

Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

## UAV 2022 – Innovation und Praxis

Beiträge zum 195. DVW-Seminar am  
28. und 29. März 2022





Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

## UAV 2022 – Innovation und Praxis

Beiträge zum 195. DVW-Seminar am  
28. und 29. März 2022 – Onlineseminar

Redaktion:  
Peter Wasmeier

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



Schriftenreihe des DVW  
Band 100  
Wißner-Verlag

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

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

Schriftenreihe des DVW  
Band 100

#### Tipps zur Navigation in der PDF-Datei:

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

#### Zitierhinweis:

[Nachname, Vorname]: [Titel des Beitrags]. In: DVW e.V. (Hrsg.):  
UAV 2022 – Innovation und Praxis. DVW-Schriftenreihe, Band 100,  
Augsburg, 2022, S. x–y.

#### Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

ISBN: 978-3-95786-312-6  
ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2022  
[www.geodaesie.info](http://www.geodaesie.info)

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg  
Bildnachweis Cover: Leibniz Universität Hannover, Johannes Bureick (links),  
HafenCity Universität Hamburg, Thomas Kersten (rechts)

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

# Inhalt

Vorwort	5
<b>Session 1: Recht und Sicherheit</b>	
Wolfgang Uslar Drohnen – vom Spielzeug zum Logistikwerkzeug	9
<b>Session 2: Messung und Auswertung</b>	
Heinz-Jürgen Przybilla Wer wird denn gleich in die Luft gehen? Apps zur Bildflugplanung für UAV	17
Thomas P. Kersten   Maren Lindstaedt UAV-basierte Bildflüge mit RTK-GNSS – brauchen wir da noch Passpunkte?	39
Alexander Reiterer   Dominik Störk   Katharina Wäschle Auswertung von UAV-Punktwolken mit KI	59
<b>Session 3: Laserscanning und UAV</b>	
Simon Stemmler   Dominik Merkle   Alexander Reiterer Hochpräzises Laserscanning aus der Luft – Neue Anwendungsfelder durch die Fusion von 2D-Bilddaten und 3D-LiDAR-Daten	69
Carsten Rudolph   Oliver Schmechtig Praxisbeispiele aus der Ingenieurvermessung mit LIDAR und Kamera	77
Gottfried Mandlbürger UAV-basiertes Laserscanning für Topographie und Bathymetrie – State-of-the-Art und Trends	89

## Session 4: UAV im vielfältigen Einsatz

Görres Grenzdörffer

UAV in der Landwirtschaft – Eine Übersicht aktueller Anwendungen  
und zukünftiger Potenziale \_\_\_\_\_ 103

Robert Delleske | Andreas Oberrauner

Untersuchung unzugänglicher untertägiger Bergwerksanlagen  
mittels Consumer-UAS \_\_\_\_\_ 127

Karsten Holste | Christian Hesse | Ralf Esser

Veredelung und Bereitstellung photogrammetrischer Daten  
am Beispiel von (UAV-)Infrastrukturprojekten \_\_\_\_\_ 131

# Vorwort

Unmanned Aerial Vehicles/Systems (UAV/UAS) sind in vielen Anwendungsbereichen als funktionelle und praktische Möglichkeit der Datenerfassung etabliert. Die Vielzahl an großen und kleinen Anbietern und Lösungen überspannt einen weiten Bogen vom Hobbybereich bis hin zu ausgereiften, kostspieligen und mit hochwertigen Sensoren bestückten Profi-Lösungen. War vor einigen Jahren noch von einem „Trend“ die Rede, so hat sich dieser mittlerweile im Tagesgeschäft von Ingenieurbüros und Dienstleistern unterschiedlicher Anwender verfestigt und auch an den Universitäten und Hochschulen gehören die Grundlagen der UAV-Photogrammetrie mittlerweile als Standard zu den Ausbildungsinhalten.

Neben der zunehmenden Automatisierung des Ablaufs von Messung und Auswertung rückt immer mehr die Bestückung von UAV mit kleinen Laserscannern in den Fokus. Waren hier in den vergangenen Jahren vor allem Forschungseinrichtungen führend in der Sensor- und Softwareentwicklung, so gibt es aktuell auch auf dem Massenmarkt entsprechende Produkte, was zunehmend auch die Fragestellung der wirtschaftlichen Kombination von statischen, bodengebundenen kinematischen und UAV-getragenen Scans aufwirft. Zur Vorbereitung eines UAV-Einsatzes für Vermessungsaufgaben gehören eine zuverlässige Bildflugplanung und auch eine Signalisierung und geodätische Bestimmung von Passpunkten.

Zusätzlich zur technischen und wirtschaftlichen Auseinandersetzung mit den Produkten und Lösungen eines sich immer noch dynamisch verändernden Marktsegments dürfen auch die rechtliche Seite und Fragestellungen des Arbeitsschutzes nicht vernachlässigt werden. Die EU-Richtlinien der neuen EU-Drohnenverordnung (2019/947 und 2020/746) definieren seit 2021 einheitliche Grundregeln für alle EU-Länder und stellen das rechtliche Grundgerüst auch für den kommerziellen Einsatz dar.

Das Seminar „UAV 2022 – Innovation und Praxis“ greift alle diese Aspekte auf und informiert – kombiniert mit einer Vielzahl von Einsatzbeispielen aus der Praxis – durch renommierte Vortragende über den aktuellen Status quo.

Nach einem Jahr Corona-bedingter Pause erweitert es die seit 2016 regelmäßig abgehaltene Seminarreihe rund um das Themengebiet „UAV“ durch die nunmehr sechste Ausgabe. Auch diesmal handelt es sich dabei um eine gemeinsame Veranstaltung verschiedener Trägerorganisationen unter einem gemeinsamen Dach: Die Durchführung liegt in den Händen des Arbeitskreises 3 „Messmethoden und Systeme“ des DVW; fachliche, inhaltliche und organisatorische Unterstützung steuern der Arbeitskreis 4 „Ingenieurgeodäsie“ des DVW,

die Fachgruppe 2 „Messverfahren“ des Bildungswerks VDV, die Arbeitsgruppen „Sensoren und Plattformen“ und „Optische 3D-Messtechnik“ der DGPF sowie der Lehrstuhl für Ingenieurgeodäsie der TU München und der DVW Bayern bei.

Der Schwerpunkt der Beiträge liegt naturgemäß auf allen Aspekten der geodätischen Praxis in Hoch- und Tiefbau sowie auf der Bestandserfassung; allerdings soll auch weiterhin der Blick über den eigenen Tellerrand hinaus gesucht werden. Denn auch benachbarte Disziplinen wie die Architektur, die Agrarwirtschaft und Dienstleister im maritimen Umfeld setzen bereits auf die vielfältigen Lösungen der Datenerfassung „von oben“.

Zwar kann in diesem Jahr das DVW-Seminar aus planungstechnischen Gründen nicht in Präsenz stattfinden, dennoch sind wir sicher, dass die hohe Qualität der Online-Vorträge dazu beiträgt, für die fehlende persönliche Interaktion und Diskussion zu entschädigen. Der vorliegende Tagungsband wird allen Teilnehmern des Seminars im Nachgang in gedruckter Form zur Verfügung gestellt und darüber hinaus auch allen anderen Interessierten als kostenfreie Online-Version eine Informationsquelle darüber sein, wie der Stand von Praxis und Entwicklung im Bereich der UAV im März 2022 war.

Peter Wasmeier, Hochschule München, DVW  
Christoph Holst, Technische Universität München, DVW  
Ingo Neumann, Leibniz Universität Hannover, DVW  
Thomas Kersten, HafenCity Universität Hamburg, DVW, DGPF  
Norbert Haala, Universität Stuttgart, DGPF  
Klaus Fritzensmeier, Leica Geosystems GmbH Vertrieb, Bildungswerk VDV  
Christian Eling, RWE Power AG, DVW  
Danilo Schneider, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, DGPF

# Session 1: Recht und Sicherheit



# Drohnen – vom Spielzeug zum Logistikwerkzeug

Wolfgang Uslar

## 1 Drohnen in der Logistik

Drohnen haben inzwischen Einzug in die unterschiedlichsten gewerblichen Bereiche gehalten. Vor allem ihre einfache Handhabung sowie die relativ niedrigen Anschaffungs- und Betriebskosten machen ihre Anwendung so attraktiv. Drohnen können dabei einerseits herkömmliche Arbeitsmittel ersetzen, sie erschließen aber auch gleichzeitig vollkommen neue Anwendungsmöglichkeiten. Damit gehören sie zu den bedeutenden technologischen Innovationen in den vergangenen Jahren.

Besonders in der kommerziellen Nutzung erfahren Drohnen dabei einen immer stärkeren Zuspruch. Allein in der Bundesrepublik Deutschland sind aktuell insgesamt weit über 400.000 Drohnen sowohl im gewerblichen als auch im privaten Bereich vorhanden. Der Anteil kommerziell genutzter Drohnen stieg seit 2019 um 138 % auf jetzt über 45.000.

## 2 Begriffsbestimmung

Der Begriff „Drohnen“ umfasst ferngesteuerte Geräte, welche sich am Boden, zu Wasser oder in der Luft bewegen. Drohnen können sich sowohl autonom fortbewegen, als auch durch den Menschen gesteuert werden.

Für luftbewegte Systeme wird dabei der Terminus Unbemannte Luftfahrtsysteme (ULS – engl. Unmanned Aircraft System – UAS) benutzt. Dabei wird mit dem Begriff UA (engl. Unmanned Aircraft) das eigentliche Luftfahrzeuge ohne Luftfahrzeugführer bezeichnet und mit UAS (Unmanned Aircraft System) das unbemannten Fluggerät einschließlich des Systems zur Kontrolle oder Fernsteuerung.

Umgangssprachlich werden für Unbemannte Luftfahrzeuge auch die Begriffe Drohnen (engl. drones), Multikopter oder Kopter verwendet. Die meisten Drehflügler-UA, die aktuell am Markt verfügbar sind, besitzen 4, 6 oder 8 Rotoren und werden daher auch je nach Anzahl der Rotoren als Quad-, Hexa- oder Oktokopter bezeichnet (Abb. 1). Im Weiteren wird hier der Begriff Drohne verwendet.



Quelle: DGUV

Abb. 1: Hexakopter

### 3 Einsatzszenarien

Grundsätzlich wird beim Einsatz von Drohnen zwischen Indoor- und Outdoor-Anwendung unterschieden. Zu beachten ist, dass für diese beiden Bereiche die rechtlichen Rahmenbedingungen sehr unterschiedlich sind. Gelten im Outdoor-Bereich die allgemeinen Luftfahrtregelungen (LuftVG, LuftVO und LuftVZO) sowie die EU Drohnenverordnung, sind bei einer reinen Indoor-Anwendung u. a. die Maschinenrichtlinie und Betriebsicherheitsverordnung anzuwenden (siehe Quellenverzeichnis). Zu Anwendungen im Outdoor-Bereich zählen:

- Landvermessung,
- Medienerstellung (z. B. Foto, Film),
- Meteorologie,
- Luftaufnahmen,
- Umwelt- und Naturschutz (u. a. Wildtierzählung, Gletscherüberwachung),
- Wissenschaft und Forschung,
- Transportlogistik,
- Inspektionsflüge (u. a. Bahnstrecken, Gebäude, Stromtrassen, Windkraftanlagen, Kühltürme),
- Straßenverkehrsüberwachung,
- aber auch Rettungsdienste und Feuerwehren nutzen inzwischen diese Technologie bei ihren Einsätzen.

Im Indoor-Bereich ist es vor allem der Logistiksektor, der sich der Vorteile des Einsatzes von Drohnen bedient. Typische Indoor-Einsatzgebiete sind so aktuell:

- Transport (z. B. dringend benötigte Ersatzteile, Sonderbauteile, Werkzeuge oder leichte Serienbauteile aber auch Produktproben),
- Durchführung von Inventuren,
- Kontroll- und Prüfaufgaben, wie das Sammeln von Informationen über den Zustand der Verpackung von Waren, den Füllzustand von Paletten oder den Instandhaltungsgrad der Lagerinfrastruktur (Regalprüfung),
- Verarbeitung Informationen zur Steuerung logistischer Abläufe,
- Bereichsüberwachung.

Durch die Nutzung des Luftraumes oberhalb der Arbeitsbereiche am Boden ergeben sich vielfältige Möglichkeiten, Abläufe auch innerhalb von Gebäuden in die Luft zu verlegen. Die Ausnutzung des dreidimensionalen Raums führt zu einer damit verbundenen höheren Flexibilität. Gleichzeitig sind weniger „Fahrzeuge“ im Bodenbereich, was mit einer Entzerrung von Verkehrsflüssen und gleichzeitig geringeren Anzahl an möglichen „Risikobegegnungen“ verbunden ist. Auch geht mit dem Wegfall von erforderlichen zusätzlichen Arbeitsmitteln zum Erreichen höhergelegener Arbeitsplätze (Leitern, Gerüste, Hubarbeitsbühnen, ...) sowie dem Verzicht auf erforderliche und häufig aufwendige Vorarbeiten u. a. auch eine Reduzierung der Gefahr des Absturzes einher. Und nicht zuletzt natürlich bedeutet dies meist auch Zeit- und Kostenersparnis.

## 4 Sicherheitstechnische Überlegungen

Die Vorbereitung und Planung des Einsatzes von Drohnen insbesondere im Indoor-Bereich erfordern jedoch eine spezielle Beurteilung der aus diesen Anwendungen resultierenden Gefährdungen. Insbesondere sind dabei die möglichen Wechselwirkungen mit den in den Flugbereichen befindlichen Personen und Einrichtungen zu betrachten.

Die entsprechenden Betrachtungen gelten sowohl für die Nutzung von eigenen oder gemieteten bzw. geleasten Drohnen als auch bei Beauftragung eines Dienstleisters im Rahmen eines Dienstleistungs- bzw. Werksvertrages.

Generell ist der gewerbliche Betreiber von Arbeitsmitteln, zu denen die Drohnen zählen, verpflichtet, alle erforderlichen Maßnahmen zu treffen, um die Sicherheit und den Schutz der Gesundheit von eigenen Beschäftigten sowie von Dritten zu gewährleisten. Vor der Verwendung sind die auftretenden Gefährdungen zu ermitteln, zu beurteilen und daraus notwendige und geeignete Arbeitsschutzmaßnahmen abzuleiten (ArbSchG, Unfallverhütungsvorschrift). Dabei sollte sich der Betreiber bei der Erstellung der Gefährdungsbeurteilung

z. B. von seiner Fachkraft für Arbeitssicherheit oder bei Bedarf darüber hinaus von weiteren Experten unterstützen lassen.

Für die Gefährdungsbeurteilung beim Einsatz von Drohnen sind u. a. zu berücksichtigen:

- allgemeine Gefährdungen bei deren Umgang,
- herstellerseitige Sicherheitshinweise (Bedienungsanleitung) und
- einsatzbezogene Gefährdungen (Wechselwirkungen mit anderen Arbeitsplätzen und Einrichtungen wie z. B. Einbauten, Maschinen/Anlagen, Leitungssysteme, elektrische und funktechnische Einrichtungen, Gefahrstoffe, etc.).

Die vorliegenden Erfahrungen zeigen dabei, dass das Hauptaugenmerk im Wesentlichen auf den mechanischen Gefährdungen, Gefährdung durch Lärm sowie Brand- und Explosionsgefährdungen im Zusammenhang mit den verwendeten Batterien liegt. Im Folgenden werden exemplarisch einige der Hauptgefährdungen beschrieben.

## 4.1 Mechanische Gefährdungen

Hier sind es vor allem der Absturz der Drohne bzw. von Teilen davon sowie Verletzungsgefahren durch die Rotoren.

Bevorzugende Maßnahmen zur Reduktion der mechanischen Gefährdungen sind in der Regel die Schaffung einer räumlichen Trennung zwischen Drohne und anwesenden Personen. Da bauliche Maßnahmen wie Netze oder Trennwände zur räumlichen Trennung zwischen Drohne und Mensch oftmals jedoch nicht realisierbar sind bzw. die Wirtschaftlichkeit und Flexibilität des Drohneinsatzes signifikant reduzieren, müssen alternative Maßnahmen eingesetzt werden, um die Gefährdung auf ein akzeptables Minimum zu reduzieren.

So führt die Auswahl einer für den Einsatz möglichst kleinen und leichten Drohne zwangsläufig zur Reduktion der kinetischen und potenziellen Energie.

Weiterhin werden mittlerweile bereits Drohnen mit redundant ausgeführten Flugsteuerungssystemen angeboten. Im Falle eines Fehlers oder Defekts bleibt dabei die Flugstabilität gewährleistet und es können geeignete Maßnahmen zur Notlandung oder Fehlerbehandlung eingeleitet werden. Abhängig von der Bauform und der eingesetzten Hardware besteht weiterhin die Möglichkeit, auch im Falle von Motorausfällen flugfähig zu bleiben oder auftretende Fehler zu indizieren, um das Absturzrisiko weiter zu minimieren.

Durch den Einsatz von Drohnen mit gekapselten Rotoren wird das Verletzungsrisiko durch diese reduziert. Jedoch ist dabei aber zwangsläufig mit Einschränkungen in der Flugdynamik zu rechnen.

## 4.2 Ergänzende Maßnahmen

Regelmäßige Kontrollen vor jedem Einsatz und die Einhaltung der vorgeschriebenen Prüfintervalle minimieren das Risiko von sich lösenden Komponenten oder mechanischem Versagen.

Bei der Betrachtung der sicherheitstechnischen Aspekte ist weiterhin zu unterscheiden, ob die Drohne manuell gesteuert oder im Automatikbetrieb eingesetzt wird. Gerade im Automatikbetrieb müssen Möglichkeiten vorhanden sein, bei Bedarf den Betrieb der Drohne, ggf. auch von Dritten ungefährlich zu beenden.

Ergänzend, soweit möglich, sind zusätzliche organisatorische und individuelle Schutzmaßnahmen zu treffen. Zu diesen Maßnahmen zählt beispielsweise sicherzustellen, dass sich während des Einsatzes keine Personen oder wenn erforderlich dann möglichst wenige Personen in der Flugzone aufhalten bis hin zu individuellen Schutzmaßnahmen in Form von persönlicher Schutzausrüstung.

Vergleichbare sicherheitstechnische Überlegungen sind selbstverständlich auch für alle anderen Gefährdungsfaktoren zu treffen.

## 4.3 Bedienpersonal

Wesentlich ist, dass die Bedienung der Drohnen ausschließlich durch geeignetes Personal erfolgt. Dementsprechend ist geeignetes und geschultes Bedienpersonal auszuwählen und zu beauftragen.

Mit Inkrafttreten des neuen Luftverkehrsrechts gibt es spezielle Anforderungen an Steuerer und Steuerinnen von Drohnen im Outdoor-Bereich (DIN 5453).

Für eine Nutzung von Drohnen ausschließlich im Indoor-Bereich ist eine Ausbildung aktuell nicht gefordert. Es empfiehlt sich aber auch hier eine geeignete theoretische Schulung verbunden mit einem betriebsspezifischen Praxisteil durchzuführen.

## 4.4 Versicherung

Unfälle, die von Drohnen verursacht werden, sind in der Regel nicht über die üblicherweise bestehenden Haftpflichtversicherungen abgedeckt. Vielmehr ist eine Halterhaftpflichtversicherung erforderlich, welche die gewerbliche Nutzung abdeckt. Gerade auch für den Indoor-Bereich ist der Abschluss einer solchen Haftpflichtversicherung deshalb sinnvoll.

## 5 Fazit

Bereits heute kann durch den Einsatz von Drohnen in den unterschiedlichsten Bereichen inzwischen eine Vielzahl von Arbeitsprozessen sicherer, schneller und meist kostengünstiger ausgeführt werden. Dabei zeigt die Entwicklung, dass der Weg von der klassischen manuellen Bedienung der Drohne heute hin zu teil- und vollautomatischen Abläufen führt. Damit wachsen auch zwangsläufig die Anforderungen an die sicherheitstechnischen Betrachtungen vor und während des Einsatzes dieser Technologie. Dieser Beitrag soll einen Überblick über die aktuelle rechtliche Situation geben und gleichzeitig eine erste Hilfestellung für alle diejenigen sein, die den Einsatz von Drohnen in ihren betrieblichen Abläufen planen.

### Literatur

- DIN 5452-Teil 2 – Entwurf – Unbemannte Luftfahrzeugsysteme (UAS) – Teil 2: Anforderungen an Piloten, Ausgabe 2019-03.
- EU-Drohnenverordnung (2019/945, 2019/947 und 2020/746).
- Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG) vom 7. August 1996, zuletzt geändert durch Artikel 427 der Verordnung vom 31. August 2015.
- Luftverkehrsgesetz (LuftVG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. Mai 2007, zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 11 des Gesetzes vom 20. Juli 2017.
- Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) vom 29. Oktober 2015, zuletzt geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 11. Juni 2017.
- Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung (LuftVZO) vom 19. Juni 1964, zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 30. März 2017.
- Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Maschinenrichtlinie).
- Unfallverhütungsvorschrift DGUV Vorschrift 1 „Grundsätze der Prävention“ vom November 2013.
- Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln (Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV) vom 3. Februar 2015, zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 30. April 2019.

### Kontakt

Dr. Wolfgang Uslar  
Berufsgenossenschaft Handel und Warenlogistik  
Hermann-Milde-Straße 1, 53129 Bonn  
[w.uslar@bghw.de](mailto:w.uslar@bghw.de)

# Session 2: Messung und Auswertung



# Wer wird denn gleich in die Luft gehen? Apps zur Bildflugplanung für UAV

Heinz-Jürgen Przybilla

## 1 Einleitung

Der Betrieb unbemannter Fahrzeuge, zu Lande, zu Wasser und in der Luft, ist ein hochkomplexes Zusammenspiel der eingesetzten Hard- und Software, ergänzt um die Fähigkeiten des Steuerers (Fern-Piloten) und eingebettet in einen administrativen Rahmen. Der Drohnen-(UAV-)Markt wächst dabei stetig, ebenso wie die Anzahl der Systemanbieter. Die nahezu erdrückende Dominanz des

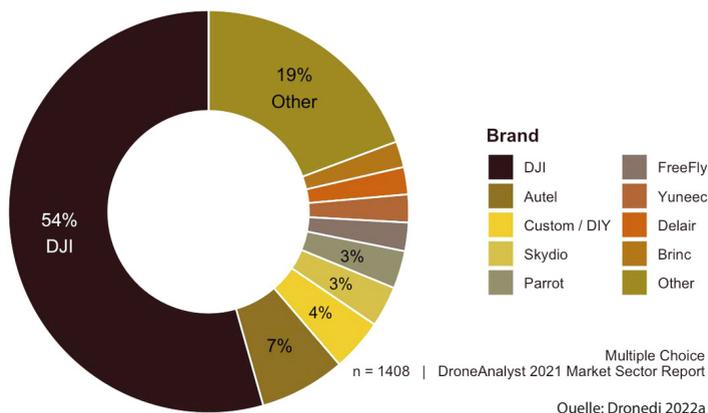


Abb. 1: Marktanteile kommerzieller Drohnenanbieter

chinesischen Marktführers DJI im Bereich der Systemhardware (zeitweise mehr als 70 % der verkauften Systeme) ist aktuell eher rückläufig, ursächlich ausgelöst durch US-Handelssanktionen. Zuletzt ist laut der Branchenberatung Skylogic Research der Anteil auf ca. 54 Prozent gefallen (Handelsblatt 2021, Singh 2021), wie in [Abb. 1](#) dargestellt.

Während die Steuerungssoftwares der UAV hardware-nahe Implementierungen voraussetzen und vielfach durch den Systemanbieter bereitgestellt werden, spielen die Hardwareproduzenten im Bereich der Auswertesoftware eher eine untergeordnete Rolle ([Abb. 2](#)).

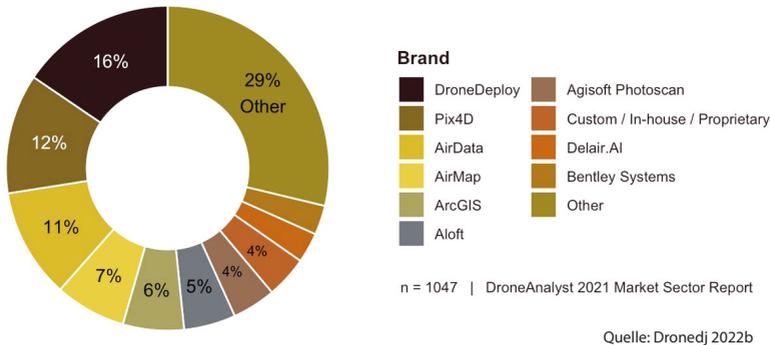


Abb. 2: Marktanteile Drohnensoftware (Auswertung sowie Datenmanagement und -analyse)

Inwieweit diese Marktanalysen den derzeitigen Status von UAV-Systemen in der Geodäsie/Photogrammetrie korrekt widerspiegeln, ist nicht bekannt. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass Anbieter, die ihre UAV mit RTK-GNSS Komponenten ausstatten, wachsende Marktanteile belegen, da die RTK-(PPK-)Technologie erhebliche Aufwandsreduzierungen im örtlichen Einsatz mit sich bringt.

## 2 UAV-Flugsteuerung

Die in diesem Kapitel durchgeführten Betrachtungen sind nicht ausschließlich auf den geodätischen Einsatz fokussiert, da Tätigkeiten im Bereich des „Mapping“ nur einen kleinen Teilbereich der Nutzung von UAV abbilden (Kap. 3). Auch wenn es Gemeinsamkeiten im „Anforderungskatalog“ gibt, so ist der Fokus in anderen Einsatzgebieten wie Inspektion, Überwachung, Transport, etc. in der Regel hiervon abweichend und erfordert auch andere Funktionalitäten der Steuerungssoftware.

Darüber hinaus stellen die nachfolgenden Aussagen über die dargestellten Softwaresysteme Momentaufnahmen dar, da diese Systeme grundsätzlich einer stetigen Weiterentwicklung unterliegen.

### 2.1 Allgemeine Anforderungen

Die Steuerungssoftware eines UAV muss einen sicheren und zuverlässigen Betrieb des Fluggerätes ermöglichen – zurzeit in vielen europäischen Ländern ausschließlich unter Sichtflugbedingungen (VLOS – visual line of sight). Techno-

logisch sind viele der im Markt verfügbaren UAV jedoch in der Lage, darüber hinaus gehende Bereiche (BVLOS – beyond visual line of sight) abzudecken.

Dem Fern-Piloten/Bediener steht für die UAV-Steuerung eine Bodenstation (Ground Control Station – GCS) mit einer Softwareanwendung zur Verfügung, die auf einem bodengestützten Computer (vielfach einem Tablet, kombiniert mit einer Funkfernsteuerung) ausgeführt wird und über (drahtlose) Telemetrie mit dem UAV kommuniziert. Die Anwendung zeigt Echtzeitdaten über die Leistung und Position des UAV an und kann als „virtuelles Cockpit“ dienen (Abb. 3). Eine GCS kann auch verwendet werden, um ein UAV im Flug zu steuern, neue Missionsbefehle hochzuladen und Parameter einzustellen. In der Regel werden die Kontrollfunktionen durch einen Live-Videostream der UAV-Kamera(s) unterstützt. Immersive Techniken, wie z. B. „First-Person-View“ (FPV) (Abb. 4), ver-

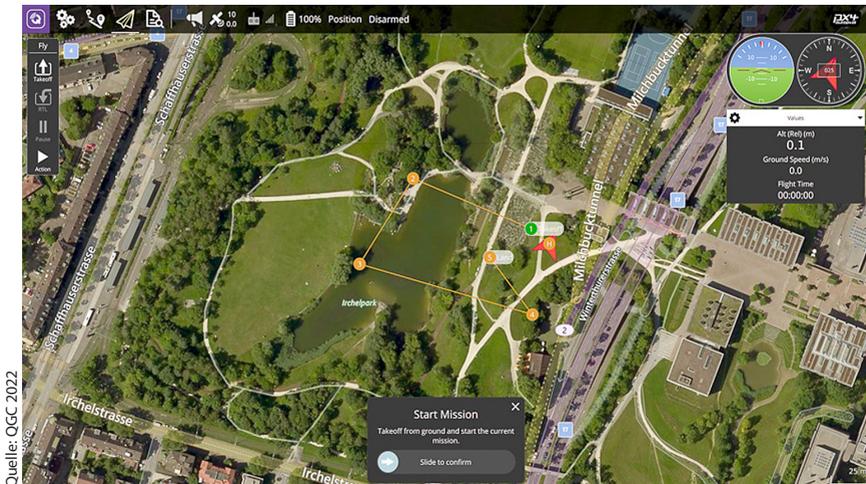


Abb. 3: QGroundControl (QGC) Bodenkontrollstation (GCS) für UAV



Abb. 4: Steuerung des UAV mittels FPV

mitteln dem Piloten zudem eine direkte Sicht aus dem „Cockpit“ des UAV, was für eine Reihe von Anwendungen durchaus gewinnbringend sein kann (Ardu-pilot 2022).

Die Produzenten der UAV statten ihre Hardware im Normalfall mit einer geeigneten Steuerungssoftware aus, deren Funktionsumfang sich an den Fähigkeiten des jeweiligen Systems orientiert. Da der Markt nach wie vor sehr dynamisch im Bereich der Produktentwicklungen ist, resultieren hieraus des Öfteren Software-Neuentwicklungen, die nur eingeschränkt abwärtskompatibel sind. Zudem neigen Anbieter wie z. B. der Marktführer DJI dazu, externe Softwareentwicklungen für ihre Systeme durch spezifische Anforderungen zu erschweren (oder zu verhindern), indem Software Development Kits (SDK) nicht, verspätet oder nicht mit allen Funktionalitäten für aktuelle Hardware ausgestattet sind.

Parallel zu diesem Trend existieren jedoch interessante Open Source-Tools, die ihre Ursprünge in den Anfängen der Entwicklung von Multikoptern haben und zwischenzeitlich auch Basis für kommerzielle Softwares von Drohnenanbietern sind.

## 2.2 Open Source-Software zur UAV-Steuerung

„Die Dronecode Foundation (DF) hostet Open Source- und Open Standard-Projekte, die für die Drohnenindustrie von entscheidender Bedeutung sind. DF ist eine herstellernerneutrale Stiftung für offene Drohnenprojekte der Linux Foundation. Wir arbeiten mit Entwicklern, Endbenutzern und adoptierenden Anbietern aus der ganzen Welt zusammen“ (Dronecode Foundation 2022a). Die Mitglieder der Dronecode Foundation sind in [Abb. 5](#) dargestellt.

Neben einigen auch in Deutschland im Markt aktiven UAV-Herstellern, wie Wingtra, Yuneec und dem Softwareanbieter DroneDeploy ist hier insbesondere die Schweizer Firma Auterion (ETHZ 2018, Auterion 2022) hervorzuheben, deren Ziel es ist, gemeinsam mit Partnern offene Standards für die Drohnenindustrie zu entwickeln („Android für Drohnen“). Für die nachfolgend gelisteten Entwicklungen zeichnet die Dronecode Foundation verantwortlich:

- MAVLink (Micro Air Vehicle Communication Protocol) ist ein Messaging-Protokoll für die Kommunikation mit Drohnen (und zwischen Bordkomponenten der Drohnen) (MAVLink 2022a, MAVLink 2022b, QGC 2022). Es wurde ursprünglich von Lorenz Meier (Meier 2022) im Rahmen des PIXHAWK-Projekts an der ETH Zürich entwickelt. Seit 2010 wird MAVLink von einer großen Community weiterentwickelt.
- PX4 ist ein Autopilot und bietet einen Standard für die Bereitstellung von Drohnen-Hardware-Support und Software-Stack (aufeinander aufbauenden Softwarekomponenten, die gemeinsam eine Plattform bilden) und erlaubt

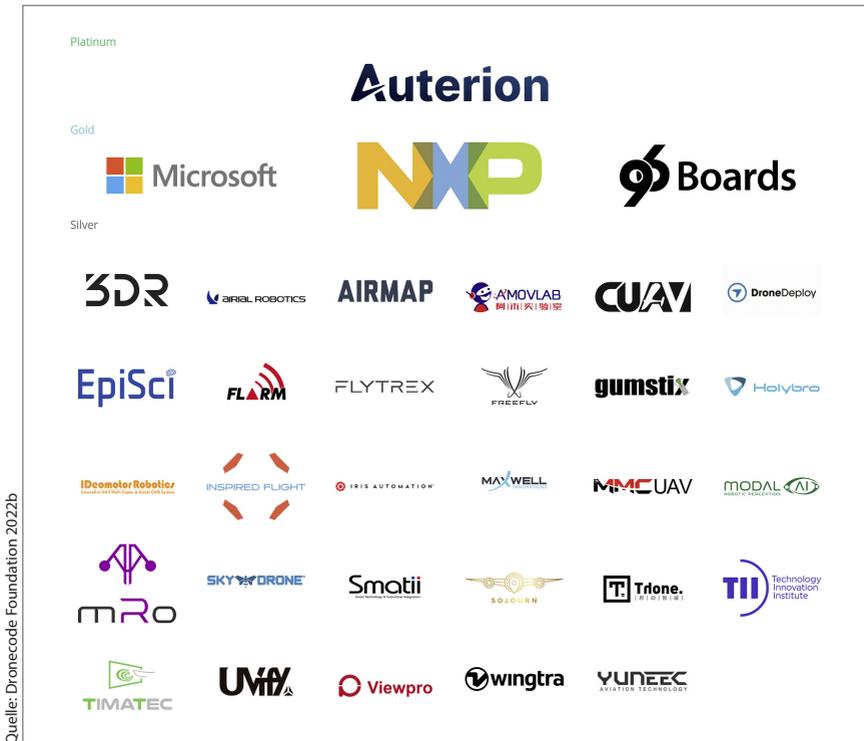


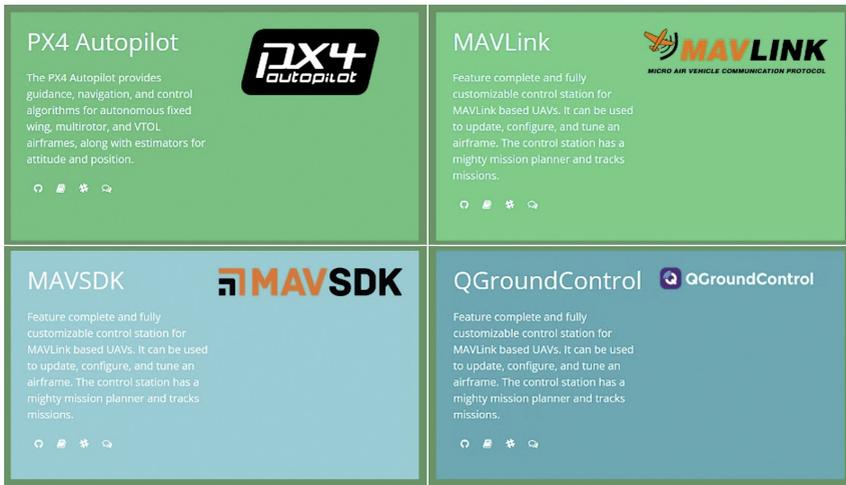
Abb. 5: Mitglieder der Dronecode Foundation

Hardware und Software auf skalierbare Weise zu erstellen und zu warten (PX4 2022).

- Die in diesem Kontext in den UAV verwendete Hardware (z. B. Flightcontroller) genügt den „PIXHAWK Open Standards“. Diese definieren alle Aspekte der mechanischen und elektrischen Spezifikationen zur Erstellung interoperabler Drohnen-Systemkomponenten (PIXHAWK 2009, PIXHAWK 2022).
- In diesem Kontext muss auch das Open Source-Projekt „ArduPilot“ genannt werden. Es bietet ebenfalls eine umfassende Sammlung von Tools, die für fast jedes Fahrzeug und jede Anwendung geeignet sind (ArduPilot 2022).

Aktuelle Ziele des DF-Konsortiums sind wie folgt definiert (Abb. 6):

- Verbesserungen in QGroundControl auf der Basis von „User Experience (UX)“, d.h. es werden Benutzererfahrungen in die Produktentwicklung eingebracht.
- MAVLink-Standardisierung und Verbesserung der Interoperabilität auf der Grundlage von Tests.



Quelle: Dronecode Foundation 2022c

Abb. 6: Open Source-Projekte der Dronecode Foundation

- Verbesserungen des PX4-Computer-Vision-Systems bzgl. der Funktionalitäten zur „Hinderniserkennung/-vermeidung“.
- Vereinfachung der Konfiguration und der Nutzung von Kommunikationsverbindungen zwischen Drohne und Bodenstation.

Die durch die Dronecode Foundation bereitgestellte Bodenkontrollstation QGC bietet vollständige Flugkontrolle und Missionsplanung für jede MAVLink-fähige Drohne und Fahrzeugeinrichtung für PX4- und ArduPilot-betriebene UAVs unter besonderer Berücksichtigung der Benutzerfreundlichkeit. Ihre Hauptmerkmale sind (QGC 2022):

- Vollständige Einrichtung/Konfiguration von ArduPilot- und PX4 Pro-Fahrzeugen.
- Flugunterstützung für Fahrzeuge mit PX4 und ArduPilot (oder einem anderen Autopiloten, der über das MAVLink-Protokoll kommuniziert).
- Missionsplanung für autonomes Fliegen.
- Flugkartenanzeige mit Fahrzeugposition, Trajektorie, Wegpunkten sowie Fahrzeuginstrumenten.
- Video-Streaming mit Instrumenten-Display-Overlays.
- Unterstützung für die Verwaltung mehrerer Fahrzeuge.
- QGC läuft auf Windows-, OS X-, Linux-Plattformen, iOS- und Android-Geräten.

QGC und auch PX4 (Abb. 7) sind dem Open Source-Konzept entsprechend von unterschiedlichen Anbietern für ihre Systeme adaptiert worden.

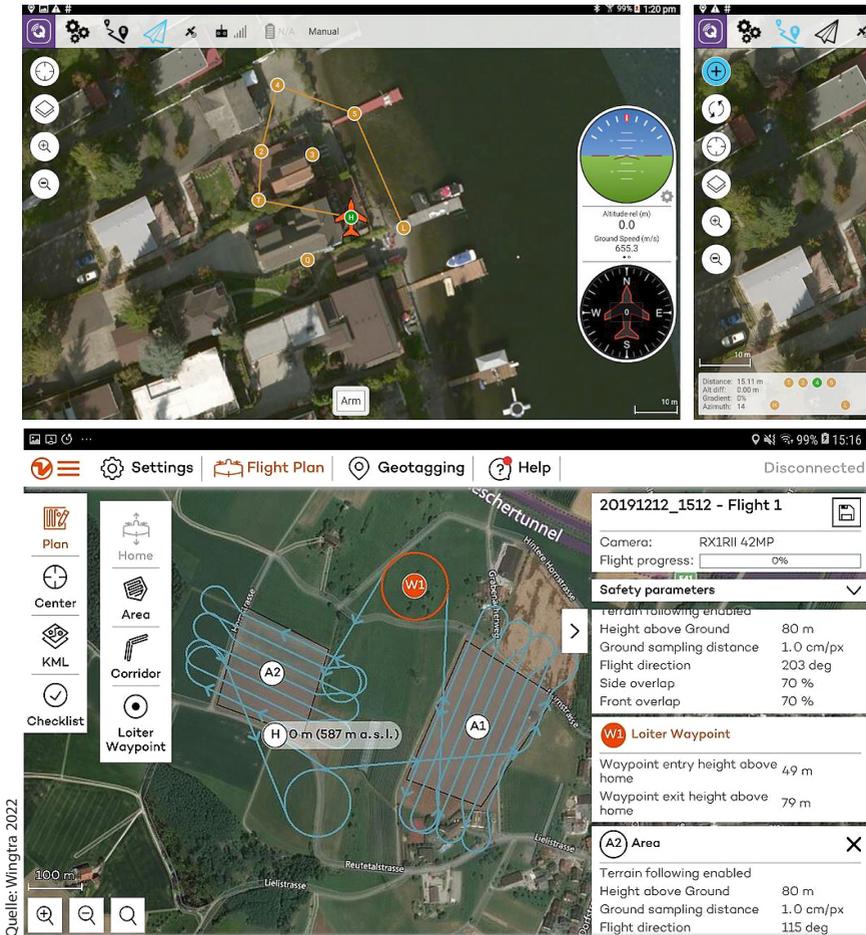


Abb. 7: Benutzeroberflächen von Flugsteuerungssoftware. Oben: QGC Android-App. Unten: PX4 Wingtra-App

### 2.3 Proprietäre Software zur UAV-Steuerung am Beispiel DJI

Proprietäre Software zur Flugsteuerung ist in der Regel auf herstellereigene UAV-Systeme und Einsatzszenarien optimiert. Beispielhaft sind nachfolgend DJI-Systeme aufgeführt, die durch die „hauseigene“ Steuerungssoftware „Ground Station Pro“ (GSP) unterstützt werden (Drohnen.de 2022), wie in Abb. 8 dargestellt.

Eine Besonderheit der DJI-Flugsteuerung ist das eigenentwickelte Übertragungssystem OcuSync (Drone-Zone 2022). Es kommt zwischen dem UAV und

**GSP**  
GROUND STATION PRO

**Kompatible Produkte**

GSP ist mit den folgenden Flugplattformen und Flugreglern kompatibel:

Mavic 2 Enterprise, Mavic 2 Pro, Mavic 2 Zoom, Mavic Pro, P3 Standard/Advanced/Professional/4K, P4, P4P, P4P V2/Advanced, P4 RTK, Matrice 200 V2, Matrice 210 V2, Matrice 210 RTK V2, Matrice 210, Matrice 210 RTK, Matrice 100, Matrice 600/Pro, Matrice 200, Inspire 1/Inspire 2, A3, N3

Kompatible Kameras:

P3 Standard/4K/Advanced/Professional,  
P4/Pro, Mavic 2 Enterprise, Mavic Pro, Mavic 2 Zoom und  
Mavic 2 Pro als auch Zenmuse X3, X5, X5R, X4S, X5S, Z3, Z30, XT, XT2 und Mavic 2 Enterprise Dual.

Quelle: DJI 2022b

Abb. 8: DJI Ground Station Pro für kompatible UAV, Flight-Controller und Kameras

**RTK-Einstellungen**

Status: Verbunden

	RTK des Fluggeräts	Benutzerdefiniertes Netzwerk-RTK
Positionierung:	FIX ←	
Breitengrad:	51.999058779	51.999335000
Längengrad:	8.613122359	8.612980000
Flughöhe:	205.748	180.158
GPS:	10	9
BeiDou:	8	2

Quelle: U-ROB 2021

Abb. 9: DJI Ground Station Pro: RTK-Nutzung, hier mit dargestellter FIX-Lösung (Positionsgenauigkeiten besser 10 cm)

der Fernsteuerung zum Einsatz und ist für die Übermittlung aller Daten zuständig, d. h. OcuSync überträgt nicht nur Steuersignale und Telemetriedaten, sondern führt auch die komplette digitale Übertragung der Live-Bilddaten der UAV-Kamera durch. Die letzte Entwicklungsstufe „Enterprise“ ist aktuell in der DJI Matrice 300 RTK integriert (für Enterprise-Systeme existiert auch die angepasste App „DJI Pilot“). Die gesamte Kommunikation zwischen dem Kopter und der Fernsteuerung ist verschlüsselt und ermöglicht Reichweiten von bis zu 15 km (FCC) bzw. 8 km (CE), die allerdings derzeit in Deutschland (EU) durch administrative Vorgaben eingeschränkt sind. Damit unterstützt die Technologie grundsätzlich jedoch zukünftige BVLOS-Anwendungen.

Die GS Pro/Pilot Apps unterstützen – auch aus geodätischer Sicht – die Möglichkeiten des klassischen photogrammetrischen Bildflugs, bei gleichzeitiger Einbindung des RTK-GNSS-Modus (Abb. 9). Somit ist die Verfügbarkeit der in Echtzeit erfassten Positionsdaten (Äußere Orientierungen) der Bilder gewährleistet, die zur weiteren Prozessierung im Rahmen der Bildtriangulation (Bündelblockausgleichung) benötigt werden. Ein eventuelles Post-Processing (PPK) ist ebenfalls möglich. Ergänzende Informationen zu den DJI-Apps finden sich z. B. in DJI (2022c).

## 2.4 Third Party-Software zur UAV-Steuerung

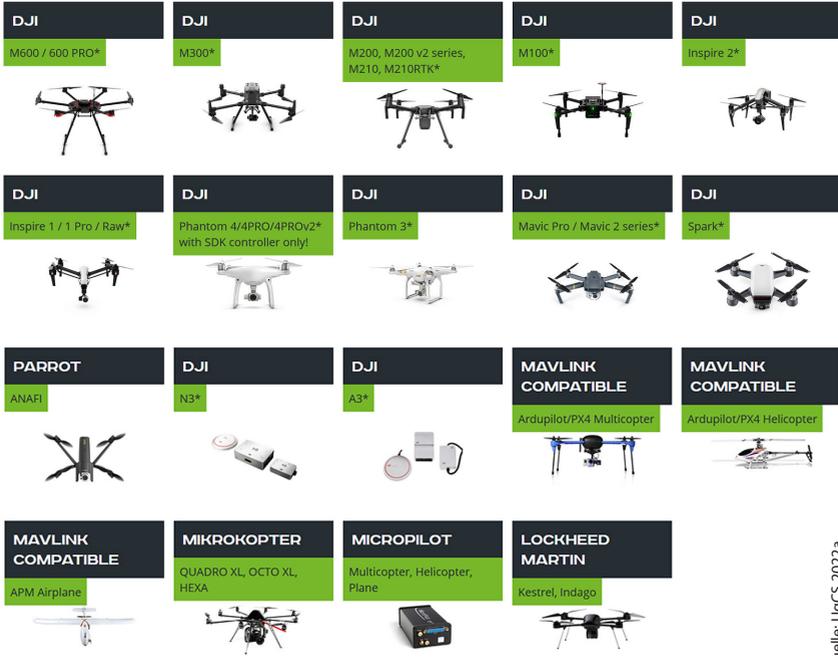
Das Angebot der Drittanbieter-Apps zur UAV-Flugsteuerung ist nahezu beliebig. Gleichzeitig ist jedoch erkennbar, dass vielfach eine Unterstützung für DJI-Systeme vorliegt, so dass auch für die eigene Software (möglichst) hohe Verkaufszahlen erreicht werden können. Ein Beispiel zeigt Abb. 10 mit dem „UgCS Photogrammetry tool for UAV Land Survey Missions“, welches neben DJI UAV auch MAVLink-kompatible Systeme unterstützt.

Neben der Planung klassischer photogrammetrischer Bildverbände bietet die App eine interessante Planungsvariante für vertikal ausgedehnte Objekte, wie z. B. Gebäudefassaden (Abb. 11).

Eine in dieser Hinsicht vergleichbare App wird durch Hammer Missions bereitgestellt (Hammer Missions 2022a). Auch mit dieser App können Bildflugplanungen für horizontal und vertikal ausgerichtete Objekte ausgeführt werden (Abb. 12).

Die App von DroneDeploy (DroneDeploy 2022a) in Abb. 13 fokussiert sich ebenfalls auf DJI-Systeme und bietet vergleichbare Funktionalitäten, allerdings aktuell ohne die Unterstützung des RTK-GNSS, d. h. RTK-Daten werden nicht in den Metadaten der erfassten Bilder aufgezeichnet. Die App ist Teil eines Gesamtpaketes, das auch photogrammetrische Auswertesoftware beinhaltet.

Przybilla: Wer wird denn gleich in die Luft gehen? Apps zur Bildflugplanung für UAV



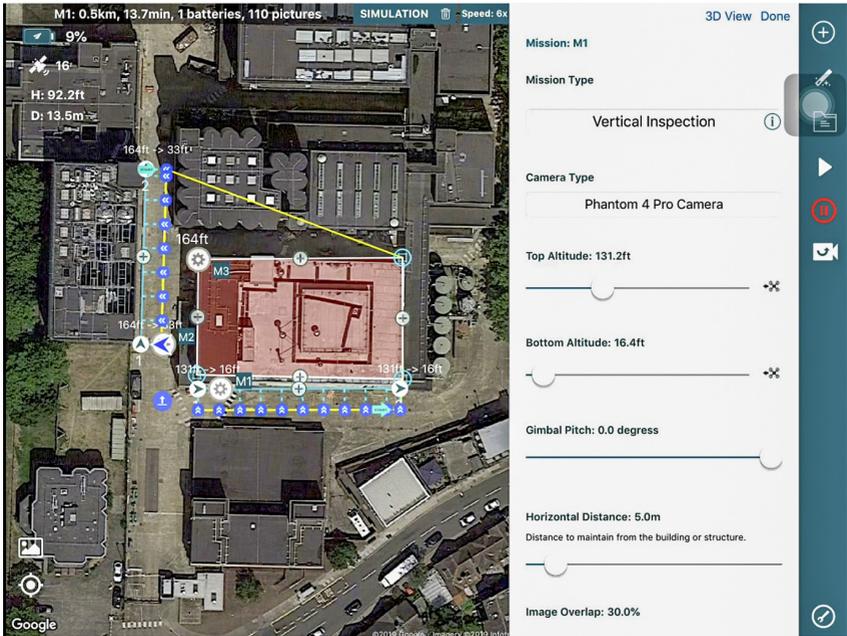
Quelle: UgCS 2022a

Abb. 10: Unterstützte Systeme der „Universal ground Control Station“ (UgCS) Photogrammetry App



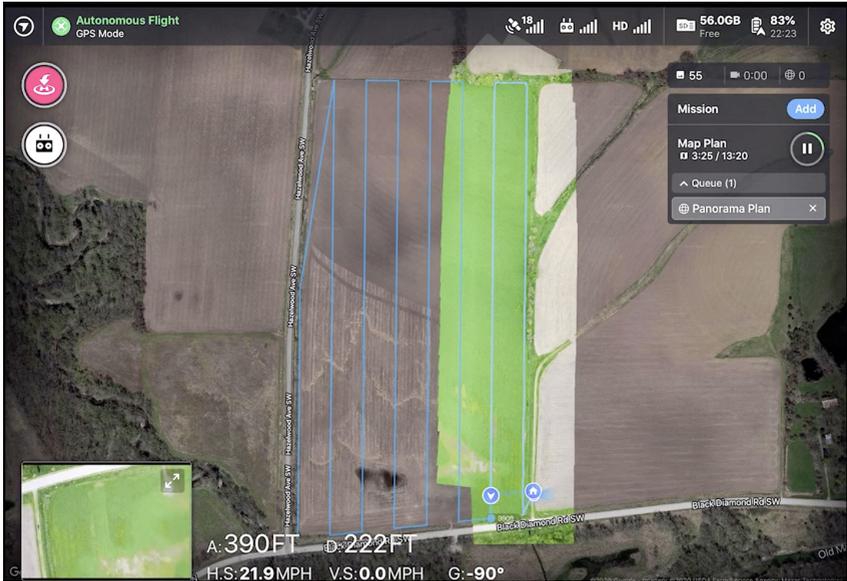
Quelle: UgCS 2022b

Abb. 11: UgCS-App zur Planung von Bildverbänden für vertikal ausgerichtete Objekte



Quelle: Hammer Missions 2022b

Abb. 12a/b: Hammer Missions-App zur Planung von Bildverbänden für vertikal ausgerichtete Objekte



Quelle: DroneDeploy 2022b

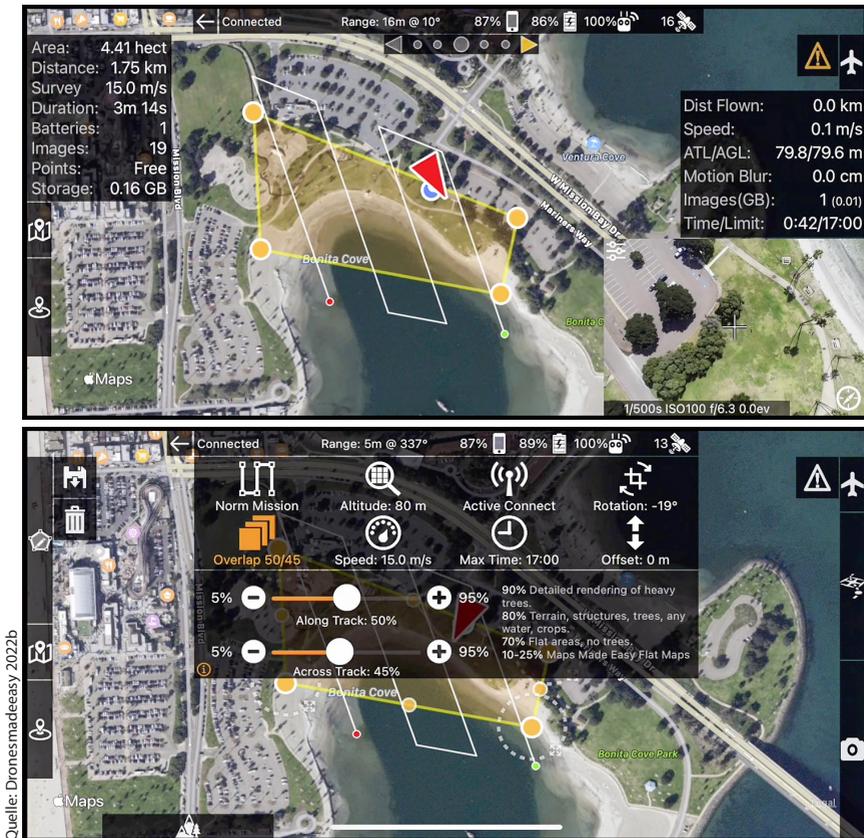
Abb. 13: DroneDeploy-App zur Planung von Bildverbänden

Die App „Map Pilot Pro“ (Dronesmadeeasy 2022a) in Abb. 14 ist ebenfalls auf DJI-Systeme ausgerichtet. Sie verfügt über eine Vielzahl von Parametereinstellungen, insbesondere auch mit Blick auf Belichtungseinstellung und Bildatenformate (Tab. 1). Es existiert zudem ein Datenfluss für die vom Hersteller bereitgestellte Verarbeitungsplattform Maps Made Easy. Die Verarbeitung (in der Cloud) durch Maps Made Easy kann durch den Kauf von Punkten auf einer „Pay-as-you-go“-Basis erworben oder monatlich abonniert werden.

Einige der in Tab. 1 spaltenweise gelisteten umfangreichen Funktionalitäten und einstellbaren Parameter sind über „In-App-Käufe“ aktivierbar, da sie nicht Bestandteil der Basisanwendung sind. Diese Strategie der Anbieter ist zwischenzeitlich durchaus üblich.

Es bleibt an dieser Stelle anzumerken, dass bei den Leistungsmerkmalen der verschiedenen Apps oftmals Hinweise auf die Unterstützung von RTK-Funktionalitäten fehlen, z. B. bzgl. der Übertragung der RTK-Geotags in die EXIF-Daten. Dies ist umso bedauerlicher, da sich die Nutzung von RTK in geodätischen UAV-Projekten zunehmend etabliert.

Einen interessanten Ansatz verfolgt Agisoft mit einem „Mission Planner for Complex Sites“, der Bestandteil der aktuellen Metashape Software ist (Abb. 15). Basierend auf einer groben Ersterfassung wird ein erstes 3D-Modell in Metashape erstellt. Dieses bildet die Basis für die nachfolgende Feinplanung der Mission. Erzeugte Aufnahmestandorte werden im Anschluss über einen KML-Import als



Quelle: Dronesmadeeasy 2022b

Abb. 14: MapPilot Pro: Oben: Planung des Bildverbandes. Unten: Flugparameter-Check

Wegepunkte in die Flugsteuerungs-App geladen und im Bildflug sukzessive abgearbeitet (Agisoft 2021).

Der Einsatzschwerpunkt des Planungstools liegt zweifelsohne im Bereich der (komplexen) Gebäudedokumentation; der Bereich des klassischen Mappings wird hierdurch nicht angesprochen.

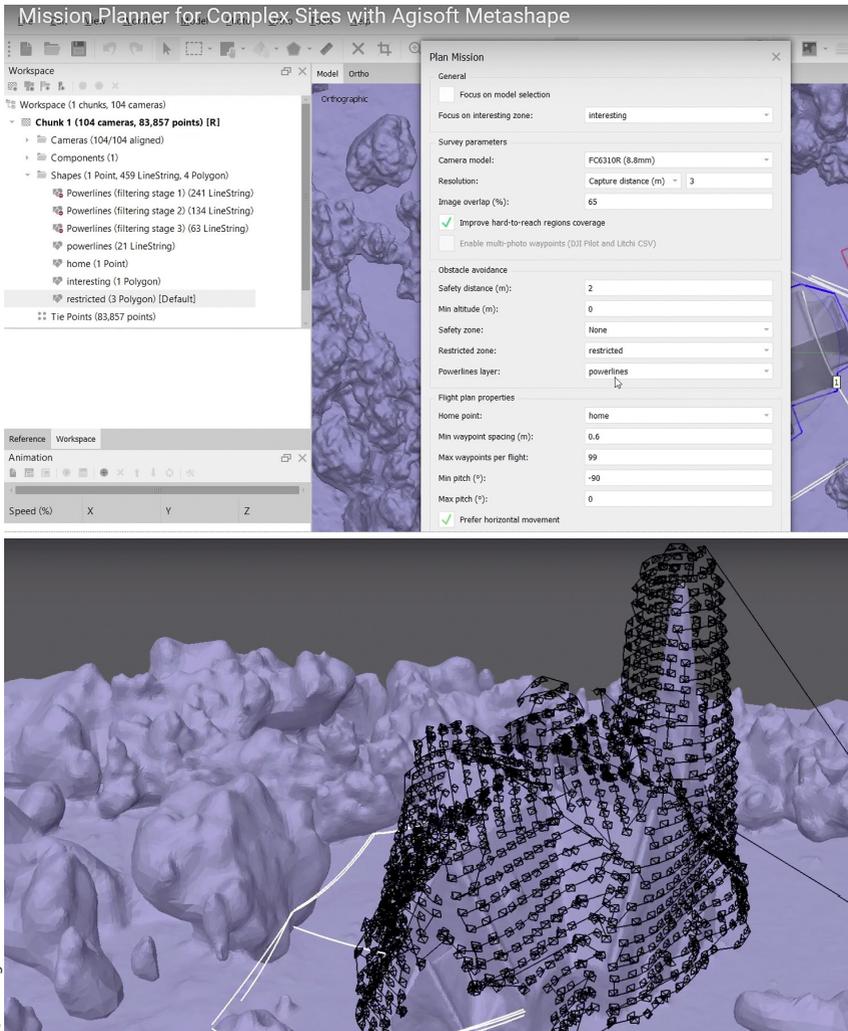
### 3 Anmerkungen zu Einflussgrößen der Bildflugplanung in der geodätischen Anwendung

Die Planung eines Bildfluges mittels UAV ist mit einer Vielzahl von Fragen zur konkreten Umsetzung verknüpft. Auf der Grundlage der durch die Open Source-Community, System- und Third Party-Anbieter bereitgestellten Appli-

**Tab. 1: Funktionalitäten und Wahl-Parameter der App MapPilot Pro**

Quick-Map-System für die Offline-Karten-vorschau	LAANC-Autorisierungen über AirMap	Flugbuch Überprüfung
Direkter Upload zur Bearbeitung	Automatische, Blenden-/Verschlussprioritäts- und manuelle Belichtungsmodi	AirData- und Drone Logbook-Upload aus dem Log File Manager
Multi-Batterie-Management mit maximaler Nutzung jeder Batterie	RAW-Bilddaten	Lineare Multi-Pass-Missionsplanung
Manuelle Neustartpunktauswahl	Geländebezogene Bild-Footprint-Anzeige	3D-Grid-Missionsplanung
FlightSync zu Karten	Vollständig Offline-fähige Geländeerken-nung	Multi-Flight-Koordina-tion
Mission und Boundary Sync mit Karten	Grundkartenzwischen-speicherung für Offline-vorgänge	Missionen speichern/ bearbeiten
Flugzonen-Management	Import von KML per E-Mail oder AirDrop	Refly – gespeicherte Missionen wiederholen
Warnung vor schlechter Signalqualität	Import von GPX-Dateien	Live-Video-Vorschau
Geschwindigkeitsmanagement	Import von benutzer-definierten Geländedaten	Live-Kartenansicht
Automatische Start und Landung	Exportieren von KML-, Protokoll- und Flug-dateien per E-Mail oder AirDrop	Sichtlinienanzeige Automatische Erfassung des Höhenreferenzbilds (Bodenbild)
Beweglicher Homepoint zur Verfolgung des Piloten	Anzeigen von 3D-Protokollen auf dem Gerät mit Google Earth	Eingebauter Simulator zum Testen

kationen (sowie der verfügbaren UAV) liegt die konkrete Entscheidung zur Festlegung von Bildflugparametern beim ANWENDER. Grundsätzlich muss dabei jede Planung ergebnisorientiert durchgeführt werden, verknüpft mit den Fragen „WIE“ das Resultat der Messung aussehen soll und über welche QUALITÄT – sowohl geometrisch als auch bezüglich der Vollständigkeit – es verfügen soll.



Quelle: Agisoft, 2021

Abb. 15: Optimierte Missionsplanung mit Agisoft Metashape. Oben: Definition von Aufnahmeparametern. Unten: Übersicht der berechneten Aufnahmestandorte

Aus wirtschaftlicher Sicht muss auch der Aspekt der KOSTEN Berücksichtigung finden.

Über den Einfluss der Aufnahmekonfiguration berichtet Przybilla (2020), wobei der Schwerpunkt der Untersuchung auf der kombinierten Verwendung von Nadir- und Senkrechtaufnahmen liegt. Es zeigen sich dabei konfigurationsabhängig zum Teil deutliche Unterschiede im Endprodukt.

Die im Planungsprozess enthaltenen Einflussgrößen werden nachfolgend näher beleuchtet, wo möglich, werden konkrete Vorschläge bzgl. einzelner Parameter getätigt. In Przybilla (2017) sind zudem Hinweise zu Kameras und zugehörigen Parametern (Sensorformat und -empfindlichkeit, Pixelgröße, Speicherformat) gelistet, die auch für aktuelle Systeme gelten.

- **Bodenauflösung** (Ground Sample Distance – GSD): Die Festlegung einer geeigneten GSD ist eine der wesentlichen Größen bzgl. der angestrebten Genauigkeit der Messung, mit unmittelbarem Einfluss auf diverse sonstige Parameter der Flugplanung. Die Bildorientierung (durch Bündelblockausgleichung) sollte als Resultat Genauigkeiten (z. B. Root Mean Square Error – RMSE-Werte an Pass- und Kontrollpunkten) im Bereich des 0,5-fachen der GSD in der Lage und des 1- bis 2 (3)-fachen der GSD in der Höhe liefern.
- **Flughöhe über Grund** (administratives Limit: 120 m): Die Wahl geringerer Flughöhen erhöht die GSD und liefert i. d. R. höhere Genauigkeiten, geht aber einher mit deutlich erhöhtem Befliegungs- und Berechnungsaufwand. Für die Lagegenauigkeit ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Genauigkeit und Flughöhe, für die Höhengenuigkeit eine näherungsweise quadratische Abhängigkeit.
- **Überlappungsverhältnis** (80:80 vs. 80:60): Die Stabilität des Bildverbandes wird im Wesentlichen durch die Wahl geeigneter Längs- und Querüberdeckungsparameter gewährleistet. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass die Festlegung dieser Parameter für die gewählte Flughöhe über Grund gilt. Bewegtes Gelände – mit entsprechenden Höhenvariationen – führt partiell zu deutlichen Veränderungen der tatsächlichen Bildüberlappung und sollte dementsprechend Berücksichtigung finden. Grundsätzlich sollte die gewählte Überlappung in Längs-(Flug-)Richtung nicht geringer als 80 % ausfallen, und die Querüberlappung nicht weniger als 60 % betragen. Eine Erhöhung der Querüberlappung auf 80 % kann in Erwägung gezogen werden, führt allerdings zu einer Verdoppelung der Anzahl erfasster Bilder. Die deutlich höhere Redundanz stabilisiert den Bildverband und erhöht seine Zuverlässigkeit und Genauigkeit, wobei nicht davon ausgegangen werden kann, dass z. B. RMSE-Werte dadurch halbiert werden.
- **Höhenmodelle zur Steuerung der Überlappungsverhältnisse:** Der Import von Höheninformation in die Planungs-App ist insbesondere für Geländeformationen mit starker Höhenausdehnung sinnvoll (Steinbrüche, Gruben, Hänge, allgemein bergiges Gelände, etc.). Bei derzeit (administrativ) möglichen maximalen Flughöhen von 120 m führen bereits Höhenunterschiede im Objekt von 20 bis 30 m zu signifikanten Veränderungen der Überlappungsverhältnisse, mit Auswirkungen auf die Stabilität/Geometrie des Bildverbandes. Die Verwendung von Höheninformation wirkt dem entgegen. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass Höheninformationen aus

z. B. SRTM-Daten (Shuttle Radar Topography Mission) die Geländeoberfläche zum Teil stark generalisieren und über Genauigkeiten im Bereich mehrerer Meter (ca. 6 m in der Höhe, bei 30 m Bodenauflösung) verfügen. Die Nutzung von Höheninformationen der Landesvermessungen (z. B. aus Geoportalen) kann dem entgegenwirken.

- **Befliegungsanordnung** (Linear, Mäander/Grid, Kreuzbefliegung): Auf der Grundlage der Objektform ist ein geeignetes Befliegungsmuster zu wählen. Lineare Objekte (z. B. Straßen- oder Trassenverläufe) und die hieraus resultierende linienförmige Befliegung sind besonders kritisch bezüglich Instabilitäten und hieraus resultierenden Verformungen des Bildverbandes. Dem entgegen wirkt eine Stabilisierung durch die Nutzung von RTK-Systemen und einer hinreichenden Anzahl von Bodenpasspunkten.
- Als Standardfall für die Erfassung flächenhafter Objekte gilt vielfach der mäanderförmig ausgeführte Bildflug (Bezeichnungen in den Apps lauten z. B. GRID, NORM, REGULAR) in einer festgelegten Höhe über Grund, der das zu befliegende Objekt vollständig abdeckt. Diese Variante kann durchaus als der Regelfall für Befliegungen mit Messkameras (so wie bei manntragenden Aufnahmesystemen der klassischen Luftbildphotogrammetrie vorliegend) betrachtet werden. Allerdings haben die eingesetzten Kameras der UAV-Systeme nicht die Eigenschaften einer Messkamera und müssen daher in der nachfolgenden Bündelblockausgleichung simultan kalibriert werden. Eine stabile Kamerakalibrierung setzt Höhenunterschiede im Gelände voraus, verbunden mit einer hinreichenden Anzahl von Bodenpasspunkten. Vorliegende RTK-Messungen (für die Äußeren Orientierungen der Bilder) in Verbindung mit den Passpunkten können nicht vorhandene Höhenunterschiede im Gelände substituieren und eine zuverlässige Kamerakalibrierung ermöglichen.
- Kreuzbefliegungsanordnungen (DOUBLE GRID) sind in nahezu allen Apps verfügbar, sie beinhalten aber i. d. R. ein grundsätzliches Problem: die Flughöhe ist im kompletten Gitter einheitlich. Das „Mehr an Bildern“ stabilisiert zwar den Bildverband und sorgt ggf. für erhöhte Vollständigkeit des 3D-Modells, allerdings beseitigt es nicht die o. a. dargestellten Probleme der Kamerakalibrierung. Eine sinnvoll ausgeführte Kreuzbefliegung (CROSS-Flight) sollte grundsätzlich auf zwei unterschiedlichen Höhenniveaus stattfinden, die sich um ca. 20 % der ursprünglich gewählten Flughöhe über Grund unterscheiden sollten (z. B. Ausgangsflughöhe: 50 m, zweite Flughöhe für die Kreuzbefliegung: 60 m). Hierdurch verbessern sich die Voraussetzungen für die simultane Kamerakalibrierung deutlich (insbesondere der Kamerakonstanten), einhergehend mit verbesserter Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Blocks, vorrangig in der Aufnahmerichtung/Höhe (Przybilla et al. 2015, Gerke und Przybilla 2016, Kersten et al. 2020).

- **Optisch-Mechanischer Aufbau der Kamera:** Die in der geodätischen UAV-Anwendung eingesetzten Kameras verfügen in der Regel nicht über die Eigenschaften metrischer Systeme, so wie sie in der mantragenden Luftbild-Photogrammetrie eingesetzt werden (Messkamera). Ein wesentliches Element ist hier der zweiteilige Kameraaufbau, bestehend aus Kamerakörper und Objektiv. Die mechanische Kopplung der Komponenten erfolgt häufig über Bajonettverschlüsse, die ein (wenn auch geringes) mechanisches Spiel aufweisen können und hieraus resultierend die Stabilität der Kamera negativ beeinflussen (instabile Innere Orientierung – IORI). In die gleiche Richtung zielen Änderungen des Parameters Kamerakonstante (Brennweite) durch entsprechende Veränderungen der Fokussierung des Objektivs.
- **Öffnungswinkel der Kamera:** Spiegelreflexkameras, Systemkameras, aber auch speziell für den UAV-Einsatz entwickelte proprietäre Systeme bieten die Möglichkeit der Nutzung unterschiedlicher Objektive mit entsprechenden Brennweiten an. Objektivbrennweite und das Sensorformat bestimmen den Öffnungswinkel. Vorteilhaft ist die Verwendung weitwinkliger Objektive (80–120°) gegenüber normalwinkligen (ca. 45°), da sie zu allgemein günstigeren Strahlenschnitten der Bildstrahlen führen.
- **Belichtungseinstellungen:** Einstellungen zur Sensorempfindlichkeit, Belichtungszeit und Blende steuern die Belichtung des Bildes. Vielfach erfolgt das Zusammenspiel dieser Größen auf der Grundlage einer automatisierten Belichtungsmessung. Die Kameras bieten dabei verschiedene Belichtungsvarianten an, die ermöglichen Präferenzen zu setzen, z. B. durch Vorwahl einer Blende oder einer Belichtungszeit. Die verbleibenden Parameter werden entsprechend angepasst.
- Da UAV kinematische Systeme sind, ist die Fluggeschwindigkeit ein wesentlicher Parameter, der – unter Berücksichtigung der Flughöhe – Bildwanderungseffekte hervorrufen kann. Kurze Belichtungszeiten ( $< 1/200$ ) können diese Effekte und damit einhergehende Unschärfen im Bild verhindern. Eine damit zusammenhängende Vergrößerung des Blendenwertes ist in den meisten Fällen eher unkritisch, da moderne Optiken auch bei nahezu voller Blendenöffnung gute Leistungsdaten bieten. Große Blendenöffnungen reduzieren jedoch im Gegenzug die erreichbare Tiefenschärfe des Bildes, was bei den üblichen UAV-Flughöhen über Grund eher vernachlässigbar ist.
- Als wesentlich kritischer für die Bildqualität ist die Nutzung extremer Einstellungen für die Sensorempfindlichkeit (ISO-Werte) zu bewerten, die einerseits bei hohen Werten ( $> \text{ISO } 800$ ) die Bildaufnahme auch bei allgemein schlechteren Beleuchtungsverhältnissen ermöglicht, andererseits aber das Bildrauschen erhöht und damit die Detailerkennbarkeit im Bild verschlechtert.
- **Autofokus vs. manueller Fokus:** Das der Bündelblockausgleichung zugrunde liegende Abbildungsgesetz (Zentralperspektive/Kollinearitätsgleichung)

geht von einer weitestgehend stabilen IORI der Kamera aus. Die Parameter „Kamerakonstante“ und „Bildhauptpunktlage“ sind bei der Verwendung von Nicht-Messkameras als variable Größen zu betrachten und daher neben der Objektivverzeichnung (ein Objektivtyp abhängiger Parameter) durch Simultankalibrierung zu bestimmen.

- Die Kamera sollte die Eigenschaft aufweisen, dass die Parameter der IORI für die Dauer einer Messung als stabil betrachtet werden können (bildinvariant), so dass jeweils nur ein Parametersatz berechnet werden muss. Es ist daher vorteilhaft, mit einem (einmal eingestellten) manuellen Fokus zu arbeiten, da er dieser Forderung am nächsten kommt. Im Gegensatz hierzu steht die Verwendung des Autofokus, da bei jeder Bildaufnahme prinzipiell eine unterschiedliche Entfernungseinstellung zur Veränderung der Brennweite führen kann. Somit würde die Kamerakonstante eine (nicht erwünschte) bildvariante Größe. Eine Bestimmung bildvarianter Parameter der IORI ist jedoch nur unter bestimmten Aufnahmeconfigurationen (die beim Bildflug nicht vorliegen) möglich. Zudem bieten die eingesetzten kommerziellen Bündelausgleichungsprogramme diese Möglichkeit in der Regel nicht. Zwar können mehrere Bildgruppen einer Kameraeinstellung zugeordnet werden, diese Einstellungen sind aber nicht individuell für jedes einzelne Bild möglich.
- Aus fotografischer Sicht ist die Verwendung eines Autofokus eine deutliche Vereinfachung bei der Bildaufnahme, verbunden mit der hohen Wahrscheinlichkeit einer scharfen Abbildung. Wie Untersuchungen im UAV-Testfeld Zeche Zollern gezeigt haben, ist die Verwendung des Autofokus auch für photogrammetrische Bildflüge möglich, ohne dass Genauigkeitsverluste zu erwarten sind. Voraussetzung ist eine hinreichende Flughöhe, so dass das Kamerasystem auch beim Autofokus eine sich wiederholende Unendlich-Einstellung vornimmt. Die Fotos sollten zudem durchgängig als Nadir-Aufnahmen ausgeführt werden. Bei Kreuzbefliegungen (mit zweiter Flughöhe) ist bei der Nutzung der Autofokus-Funktion grundsätzlich ein zweiter Parametersatz für die IORI einzuführen. Eine direkte Kombination von Nadir- und Schrägaufnahmen, so wie sie z. B. bei bestimmten Aufnahmemodi der Zenmuse P1 (DJI 2022d) möglich ist, ist bei Einsatz des Autofokus bzgl. der zuverlässigen Bestimmung der IORI eher kontraproduktiv.

## 4 Fazit

Die fachgerechte Planung eines UAV-Bildverbandes bildet die Grundlage für eine erfolgreiche Projektbearbeitung. Die Anzahl verfügbarer Planungs- und Steuerungstools ist nahezu beliebig, i. d. R. jedoch sehr stark an der vorhandenen UAV-Hardware orientiert. Neben den proprietären Softwares der Hardware-

anbieter bieten Third Party-Produkte vielfach eine Erweiterung der Funktionalitäten, wenngleich neu eingeführte UAV-Systeme häufig erst mit einem Zeitverzug in der App integriert werden können. Bedauerlicherweise betrifft dies aktuell die Integration von RTK-GNSS, welches sich schon heute als effizientes Verfahren etabliert hat. Dies zeigen z. B. die Ergebnisse geometrischer Genauigkeitsuntersuchungen in UAV-Testfeldern (Kersten und Lindstaedt 2022).

Von besonderem Interesse sind Entwicklungen der Open Source-Community, die sich auch im UAV-Markt einer steigenden Nutzung erfreuen. Diverse Anbieter von UAV-Systemen setzen zwischenzeitlich die verfügbaren Bibliotheken zum Aufbau und Weiterentwicklung eigener Apps ein.

Letztlich wird deutlich, dass die Nutzung einer App zur Bildflugplanung allein nicht ausreichend ist, um ein wunschgemäßes Endprodukt zu erstellen. Vielmehr ist hier erweitertes Wissen zum fotografischen und photogrammetrischen Gesamtprozess notwendig. In diesem Sinne sind die Anmerkungen zu den Einflussgrößen der Bildflugplanung zu verstehen – ohne Anspruch auf Vollständigkeit.

## Literatur

- Agisoft (2021): Mission Planner for Complex Sites with Agisoft Metashape. [www.youtube.com/watch?v=AvyouAJHx64](https://www.youtube.com/watch?v=AvyouAJHx64), letzter Zugriff 22.01.2022.
- Ardupilot (2022): <https://ardupilot.org/copter/docs/common-choosing-a-ground-station.html>, letzter Zugriff 18.01.2022.
- Auterion (2022): Auterion Website, <https://auterion.com/open-source-standards/>, letzter Zugriff 18.01.2022.
- DJI (2022a): DJI FPV. [www.dji.com/de/dji-fpv](https://www.dji.com/de/dji-fpv), letzter Zugriff 18.01.2022.
- DJI (2022b): DJI Ground Station Pro kompatible Produkte. [www.dji.com/de/ground-station-pro?site=brandsite&from=nav](https://www.dji.com/de/ground-station-pro?site=brandsite&from=nav), letzter Zugriff 20.01.2022.
- DJI (2022c): FAQ GS PRO App. [www.dji.com/de/ground-station-pro/info#faq](https://www.dji.com/de/ground-station-pro/info#faq), letzter Zugriff 20.01.2022.
- DJI (2022d): Zenmuse P1. [www.dji.com/de/zenmuse-p1](https://www.dji.com/de/zenmuse-p1), letzter Zugriff 20.01.2022.
- Drohnen.de (2022): DJI Ground Station Pro (GS PRO): Leistungsstarke iPad-App für komplexe Flugmissionen. [www.drohnen.de/14002/dji-ground-station-pro/](https://www.drohnen.de/14002/dji-ground-station-pro/), letzter Zugriff 20.01.2022.
- Dronecode Foundation (2022a): [www.dronecode.org/who-we-are/](https://www.dronecode.org/who-we-are/), letzter Zugriff 19.01.2022.
- Dronecode Foundation (2022b): Mitglieder der Dronecode Foundation. [www.dronecode.org/our-members/](https://www.dronecode.org/our-members/), letzter Zugriff 19.01.2022.
- Dronecode Foundation (2022c): Open Source Projekte der Dronecode Foundation. [www.dronecode.org](https://www.dronecode.org), letzter Zugriff 19.01.2022.
- DroneDeploy (2022a): <https://help.dronedeploy.com/hc/en-us/articles/1500004964842-Recommended-and-Supported-Drones>, letzter Zugriff 20.01.2022.

- DroneDeploy (2022b): App zur Planung von Bildverbänden. [www.dronedeploy.com/product/mobile/](http://www.dronedeploy.com/product/mobile/), letzter Zugriff 20.01.2022.
- Dronedj (2022a) Marktanteile kommerzieller Drohnen-Anbieter. <https://dronedj.com/2021/09/14/droneanalyst-dji-market-share-2021/>, letzter Zugriff 20.01.2022.
- Dronedj (2022b) Marktanteile Drohnen Software. <https://dronedj.com/2021/09/14/droneanalyst-dji-market-share-2021/>, letzter Zugriff 20.01.2022.
- Dronesmadeeasy (2022a): MapPilot (Pro). <https://dronesmadeeasy.com/map-pilot>, letzter Zugriff 20.01.2022.
- Dronesmadeeasy (2022b): MapPilot Pro App. [www.youtube.com/watch?v=C5l1I5cNsSY](http://www.youtube.com/watch?v=C5l1I5cNsSY), letzter Zugriff 20.01.2022.
- Drone-Zone (2022): DJI OcuSync 2.0 / 3.0 / O3+: Der ultimative OcuSync & Lightbridge Guide. [www.drone-zone.de/dji-ocusync-2-0-der-ultimative-ocusync-lightbridge-guide/](http://www.drone-zone.de/dji-ocusync-2-0-der-ultimative-ocusync-lightbridge-guide/), letzter Zugriff 20.01.2022.
- ETHZ (2018): Spin-off von ETH-Alumni erhält 10 Millionen. <https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2018/09/auterion-erhaelt-10-mio-erstfinanzierung.html>, letzter Zugriff 20.01.2022.
- FAZ (2022): Steuerung des UAV mittels FPV. <https://www.faz.net/aktuell/technik-motor/digital/fpv-drohne-von-dji-im-test-drohnenflug-mit-vr-brille-17244292/neue-flug-erfahrung-mit-der-fpv-17247572.html>, letzter Zugriff 20.01.2022.
- Gerke, M., Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. PFG – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, (1), 17–30.
- Hammer Missions (2022): [www.hammermissions.com](http://www.hammermissions.com), letzter Zugriff: 21.01.2022.
- Hammer Missions (2022b): App zur Planung von Bildverbänden für vertikal ausgerichtete Objekte. <https://youtu.be/I0bPf28XWgM>, letzter Zugriff 21.01.2022.
- Handelsblatt (2021): Das Hirn der Drohnen – wie ein Deutscher den globalen Standard setzt. [www.handelsblatt.com/technik/it-internet/insight-innovation-das-hirn-der-drohnen-wie-ein-deutscher-den-globalen-standard-setzt/27634796.html?ticket=ST-663255-TlnqreEBqBOTc5PUk9Vr-ap4](http://www.handelsblatt.com/technik/it-internet/insight-innovation-das-hirn-der-drohnen-wie-ein-deutscher-den-globalen-standard-setzt/27634796.html?ticket=ST-663255-TlnqreEBqBOTc5PUk9Vr-ap4), letzter Zugriff: 18.01.2022.
- Kersten, T., Lindstaedt, M. (2022): UAV-basierte Bildflüge mit RTK-GNSS – brauchen wir da noch Passpunkte? In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2022 – Innovation und Praxis. DVW-Schriftenreihe, Band 100, Wißner-Verlag, Augsburg, 39–58. (Dieser Tagungsband).
- Kersten, T. Schlömer, F. Przybilla, H.-J. (2020): Aerotriangulation von UAV-Bilddaten der Zeche Zollern – Die Ergebnisse verschiedener UAV-Systeme und zweier Softwarepakete im Vergleich. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Wißner-Verlag, Augsburg, 121–140.
- MAVLink (2022a): MAVLINK Messaging Protokoll. <https://mavlink.io/en/>, letzter Zugriff 19.01.2022.
- MAVLink (2022b): How do drones communicate with a controller? | MAVLink | Auterion Live. [www.youtube.com/watch?v=bBlve-x9nxE](http://www.youtube.com/watch?v=bBlve-x9nxE), letzter Zugriff 20.01.2022.
- Meier, L. (2022): <https://ch.linkedin.com/in/meierlorenz>, letzter Zugriff 20.01.2022.
- Przybilla, H.-J. (2017): Kameras für UAS – Eine Marktübersicht. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86, Wißner-Verlag, Augsburg, 51–66.

- Przybilla, H.-J. (2020): UAV-Befliegung – Alles klar? Über den Einfluss der Aufnahme-konfiguration. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schrif-tenreihe, Band 97, Wißner-Verlag, Augsburg, 61–76.
- Przybilla, H.-J., Reuber, C., Bäumker, M., Gerke, M. (2015): Untersuchungen zur Genau-igkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 24, 45–54.
- PIXHAWK (2009): Pixhawk research project. <https://web.archive.org/web/20170611002351/https://pixhawk.ethz.ch/>, letzter Zugriff 20.01.2022.
- PIXHAWK (2022): Pixhawk – Die offenen Standards für Drohnen-Hardware. <https://pixhawk.org/>, letzter Zugriff 19.01.2022.
- PX4 (2022): Open-Source Autopilot for Drone Developers. <https://px4.io>, letzter Zugriff 19.01.2022.
- QGC (2022): QGroundControl User Guide. <https://docs.qgroundcontrol.com/master/en/index.html>, letzter Zugriff 19.01.2022.
- Singh, I. (2021): DroneAnalyst report reveals dramatic drop in DJI's commercial drone market share. <https://dronedj.com/2021/09/14/droneanalyst-dji-market-share-2021/>, letzter Zugriff 18.01.2022.
- UgCS (2022a): Unterstützte Systeme der UgCS Photogrammetry App. <https://www.ugcs.com/photogrammetry-tool-for-land-surveying>, letzter Zugriff 19.01.2022.
- UgCS (2022b): UgCS-App zur Planung von Bildverbänden für vertikal ausgerichtete Ob-jekte. [www.youtube.com/watch?v=Ww37vR5dli4](http://www.youtube.com/watch?v=Ww37vR5dli4), letzter Zugriff 19.01.2022.
- U-ROB (2021): DJI Ground Station Pro: RTK Nutzung. [www.youtube.com/watch?v=7-9o0hFaN-o](http://www.youtube.com/watch?v=7-9o0hFaN-o), letzter Zugriff 19.01.2022.
- Wingtra (2022) PX4 Wingtra-App. <https://knowledge.wingtra.com/advanced-flight-planning-tools>, letzter Zugriff 19.01.2022.

## Kontakt

Heinz-Jürgen Przybilla  
(Ehemals Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie)  
Essener Straße 117, 45529 Hattingen  
[heinz-juergen@przybilla.biz](mailto:heinz-juergen@przybilla.biz)

# UAV-basierte Bildflüge mit RTK-GNSS – brauchen wir da noch Passpunkte?

Thomas P. Kersten | Maren Lindstaedt

## 1 Einführung

Unbemannte Luftfahrzeuge (UAV) werden zunehmend in verschiedenen Disziplinen für eine Vielzahl unterschiedlicher Aufgaben eingesetzt. Für UAV-Bildflüge wird heute eine breite Palette von Digitalkameras verwendet, die vom eigenen System des UAV-Anbieters bis hin zu hochwertigen Mittelformatkameras reicht, wie sie in der traditionellen Luftbildphotogrammetrie verwendet werden. Es wurden bereits Ergebnisse zur geometrischen Qualität von Aerotriangulationen für verschiedene Kamerasysteme veröffentlicht (Przybilla et al. 2019, Kersten et al. 2020). Um die Qualität der Entwicklungen der neuesten mit Post-Processed Kinematic (PPK) und Real-Time Kinematic (RTK) GNSS ausgestatteten UAV-Systemen überprüfen zu können, wurden in den Jahren 2019 und 2020 DJI UAV-Systeme (DJI Phantom 4 RTK, DJI Phantom 4 Pro V2.0 KlauPPK) in zwei Testfeldern in Deutschland (Zeche Zollern in Dortmund und Inseipark in Hamburg-Wilhelmsburg) getestet.

Gerke und Przybilla (2016) präsentierten erste Ergebnisse über den Einfluss von Onboard-RTK-GNSS (Zweifrequenzen-Empfänger) und Kreuzbefliegungen für ein UAV-System, während Przybilla und Bäumker (2020) erste Ergebnisse der RTK-basierten UAV-Photogrammetrie unter Verwendung von vier DJI Phantom 4 RTK-Systemen (Mehrfrequenzen-Empfänger) veröffentlichten, die in Kreuzbefliegungen auf dem Gebiet des UAV-Testfelds Zeche Zollern in Dortmund eingesetzt wurden. In den letzten Jahren haben sich zunehmend UAV-Systeme mit RTK-GNSS als Arbeitspferde für Anwendungen in der UAV-Photogrammetrie etabliert.

Folgende Fragen sollen in diesem Beitrag beantwortet werden: Welche Genauigkeiten werden bei den Luftbildflügen der untersuchten UAV-Systeme mit RTK/PPK-GNSS erreicht? Welche Bildflugkonfigurationen liefern die besten Ergebnisse? Ist eine direkte Georeferenzierung von RTK- und PPK-GNSS-basierten UAV-Bildflügen ohne Bodenpasspunkte möglich, wenn die Genauigkeitsanforderungen angemessen sind? Gibt es Unterschiede zwischen den Ergebnissen von RTK- und PPK-GNSS-basierten UAV-Flügen? Wie stabil bzw. unterschiedlich sind die Kamerakalibrierungen der DJI-Drohnenysteme in verschiedenen Versionen der Bündelausgleichungen, die auf den Testfeldern untersucht wurden?

In diesem Beitrag wird die geometrische Genauigkeit von Bildflügen aktueller DJI UAV-Systeme mit RTK/PPK-GNSS in zwei verschiedenen 3D-Testfeldern untersucht. Dazu werden in Verbindung mit unterschiedlichen Passpunkt-konfigurationen die Abweichungen zu signalisierten Kontrollpunkten durch Aerotriangulation und Bündelblockausgleichung bestimmt. Im Folgenden werden die UAV-Testfelder, die untersuchten UAV-Systeme und die Ergebnisse der Aerotriangulationen vorgestellt und diskutiert.

## 2 UAV-Testfelder

Für die Untersuchungen der geometrischen Qualität der DJI-Drohnen-systeme wurden zwei Testfelder (siehe [Abb. 1](#)) mit einer entsprechenden Anzahl von Passpunkten und Kontrollpunkten zur Verfügung gestellt, die in unterschiedlichen Bildflugkonfigurationen inklusive Kreuzbefliegung befliegen wurden. Das erste Testfeld befindet sich im Industriemuseum Zeche Zollern in Dortmund (Wikipedia 2022), das von der Hochschule Bochum (HSBO) im Jahr 2014 auf einer Fläche von 320 m × 220 m eingerichtet wurde und in den Folgejahren die Grundlage für verschiedene Drohnenflugkampagnen bildete (Przybilla et al. 2018 und Bäumker 2020). Das Testfeld besteht aus 46 signalisierten Passpunkten (Ground Control Points GCP). Das zweite verwendete Testfeld wurde vom Landesbetrieb für Geoinformation und Vermessung Hamburg im Jahr 2019 im Inseipark in Hamburg-Wilhelmsburg mit 45 signalisierten Passpunkten auf einer Fläche von 150 m × 300 m eingerichtet. Während in dem Testfeld Zeche Zollern zwei Passpunkte auf zwei Fördertürmen angebracht wurden und höhere Gebäude vorhanden sind, weist das Testfeld Inseipark außer Bäumen und einigen Häusern am westlichen Rand keine großen Höhenunterschiede auf. Die GCP-Koordinaten wurden in beiden Testfeldern durch präzise geodätische Messungen mit einer Genauigkeit von  $\sigma_{XYZ} = \pm 5$  mm bestimmt. Eine ausführliche Beschreibung der geodätischen Passpunktbestimmung auf der Zeche Zollern ist in Przybilla et al. (2018) und in Bäumker (2020) publiziert.

Das Aussehen und die Größe der schwarz-weißen Zielzeichen waren in den Testfeldern unterschiedlich: Auf der Zeche Zollern wurden die Passpunkte mit DIN A4 großen Zielzeichen signalisiert ([Abb. 2](#) links). Im Testfeld Inseipark wurden 40 schwarz-weiße Luftbildplatten aus wasserfestem Kunststoff mit den Abmessungen 50 cm × 50 cm ([Abb. 2](#) Mitte), vier Zielmarken (schwarz-weiß, wasserfester Kunststoff) mit einer Größe von 30 cm × 30 cm und ein Target aus Aluminiumverbundmaterial mit der Kantenlänge von 60 cm × 60 cm ([Abb. 2](#) rechts) genutzt.

Die Testfelder in Dortmund und in Hamburg wurden mit der gleichen DJI Phantom 4 Pro V2.0 KlauPPK (im Folgenden P4 KlauPPK) befliegen, während

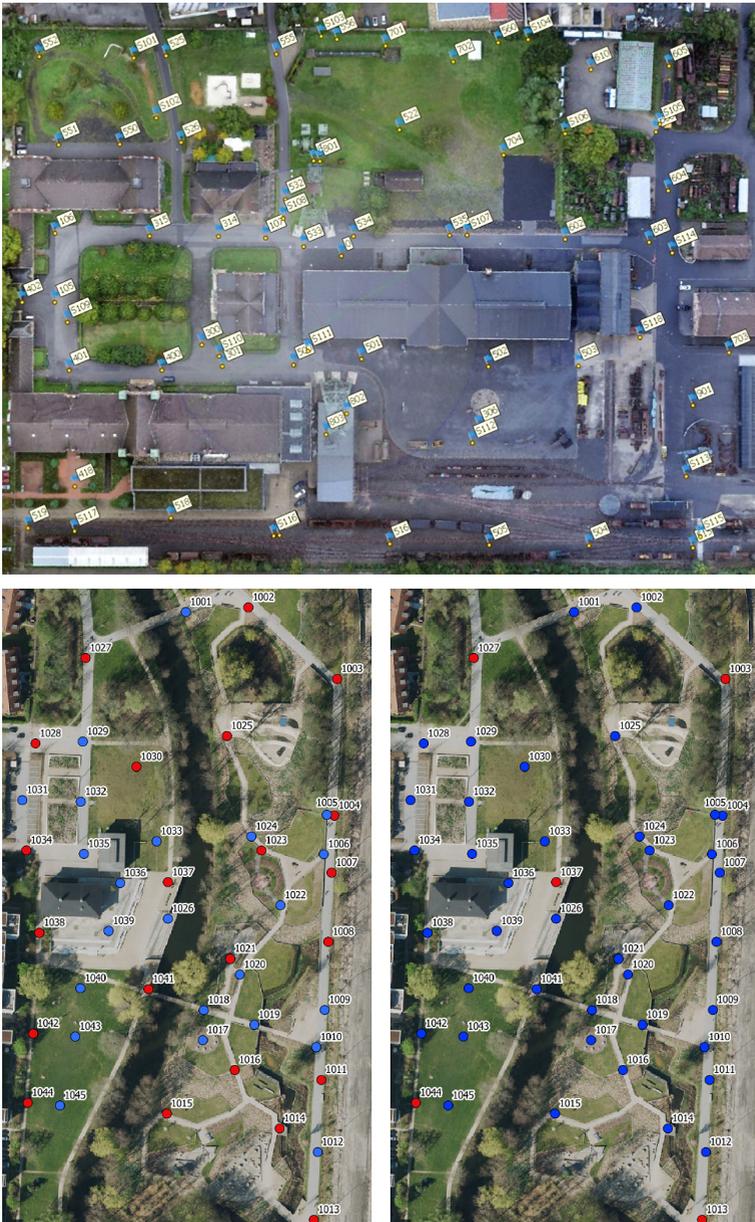


Abb. 1: UAV-Testfelder mit Passpunktverteilung: Zeche Zollern in Dortmund (oben) und Inselpark Hamburg-Wilhelmsburg (unten) mit zwei Passpunkt- und Kontrollpunkt-konfigurationen: Passpunkte in Rot, Kontrollpunkte in Blau

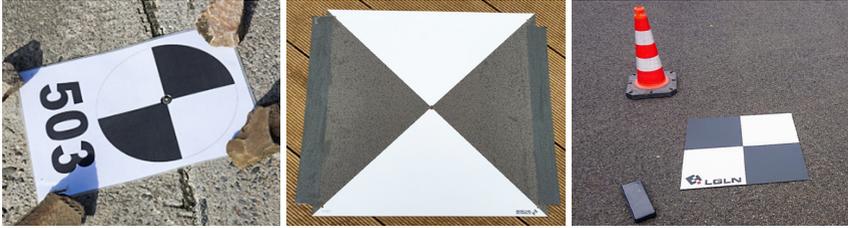


Abb. 2: Zielzeichen für die Passpunktsignalisierung in den zwei Testfeldern: Zeche Zollern Dortmund (links) und Inselepark Hamburg (Mitte und rechts)

in Hamburg zusätzlich als Vergleich ein DJI Phantom 4 RTK-System (im Folgenden P4 RTK) eingesetzt wurde.

### 3 UAV-Bildflüge und eingesetzte UAV-Systeme

Für die Untersuchungen der Bildflüge und Aerotriangulationen wurden die DJI UAVs über die Testfelder in den Kampagnen im September 2019 (Zeche Zollern) und Dezember 2020 (Inselepark Hamburg-Wilhelmsburg) wie in Tab. 1 zusammengefasst eingesetzt. Alle UAV-Bildflüge wurden in einer Kreuzanordnung mit unterschiedlicher Flughöhe quer zum 1. Flug durchgeführt, wobei die Flughöhe jeweils um ca. 20 % vom regulären Bildflug erhöht wurde. Die Durchführung der Kreuzbefliegung als separate Flüge hat ihren wesentlichen Grund in der Tatsache, dass die verfügbaren Bildflug-Planungstools (z. B. Map Pilot, Pix4DCapture) eine Kreuzbefliegung mit variierender Flughöhe nicht zulassen und dass zwischen beiden Flügen die Batterien aufgrund der Flugzeit ausgetauscht werden mussten.

Ebenso reichte die Akkukapazität der P4 RTK bei den Bildflügen im Testfeld Inselepark nicht aus, um das gesamte Areal mit einer Akkuladung zu befliegen. Aus diesem Grund war nur für dieses UAV-System eine zusätzliche Zwischenlandung für den Akkuwechsel bei beiden Bildflügen nötig, was auch durch die langsamere Fluggeschwindigkeit von 3 m/s verursacht wurde. Darüber hinaus hat die P4 RTK nach jedem Flugstreifen ein Wendemanöver durchgeführt, sodass jeder Streifen vorwärts überflogen wurde, während die P4 Pro KlauPPK die Streifen ohne 180°-Drehung nach jedem Flugstreifen (Flug vorwärts und rückwärts) beflog. Die höhere Anzahl der aufgenommenen Fotos wurde für die P4 RTK (Tab. 1) dadurch verursacht, dass einerseits während des Wendemanövers Bilder und andererseits etwas größere Flächen des Testfelds aufgenommen wurden. Um im Rahmen der Genauigkeitsuntersuchungen für beide UAV-Systeme gleiche Bedingungen im Testfeld Inselepark zu schaffen, wurden nur die Aufnahmen in der Auswertung verwendet, die das Testfeld abdecken.

**Tab. 1: Wichtige technische Daten der durchgeführten UAV-Bildflüge**

Testfeld	Zeche Zollern	Inselpark	Inselpark
UAV	DJI P4 Pro KlauPPK	DJI P4 Pro KlauPPK	DJI P4 Pro RTK
Flugdatum	30.09.2019	09.12.2020	09.12.2020
Fluggeschwindigkeit [m/s]	5	4/5	3
Flugzeit [min]	13/10	13/10	22/19
Flughöhe längs [m] / (# Fotos)	50 / (244)	50 / (319)	51 / (397)
Flughöhe quer [m] / (# Fotos)	60 / (168)	60 / (209)	60 / (308)
Längs- und Querüberdeckung in %	80/60	80/80	80/80
Datenformat	JPG	JPG	JPG
GSD [mm]	13,7/16,4	13,7/16,4	13,7/16,4

Im Folgenden werden die verwendeten UAV-Systeme vorgestellt und ihre technischen Spezifikationen kurz beschrieben. Die DJI P4 KlauPPK (Abb. 3 links) besteht aus einer GNSS-Antenne, einem KlauPPK-Modul mit NovAtel 7700-Board, das die Satellitendaten empfängt und mit 20 Hz aufzeichnet, einer USB-Powerbank inkl. Anschlusskabel, einem Gimbal mit integrierter Kamera und einer intuitiven Fernbedienung, die mit einem iPad über die DJI Software Ground Station Pro gesteuert wird. Besonders an diesem UAV-System ist die Modifizierung um die PPK-Hardware des australischen Unternehmens Klau Geomatics Pty Ltd (<https://klauppk.com/>).

Die DJI P4 RTK (Abb. 3 rechts) besitzt ein integriertes RTK-Modul, mit dessen Hilfe die Kamerapositionen direkt in den Exif-Daten jedes einzelnen Bildes zusammen mit den entsprechenden Genauigkeiten für Lage und Höhe abgespeichert werden. Ferner registriert das System auch Satellitendaten, sodass PPK-Auswertungen optional nachträglich durchführbar sind. Es besteht die



**Abb. 3: DJI Phantom 4 Pro V2.0 KlauPPK (links) und Phantom 4 RTK (rechts)**

Möglichkeit, die D-RTK 2 Mobile Station, eine Referenzstation des Herstellers DJI, zu verwenden oder auf eine Anbindung per NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) über einen 4G-Dongle oder WiFi-Hotspot zu setzen. In den Bildflügen über den Inselpark wurde ein 4G-Dongle genutzt, womit eine Kommunikation mit dem Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) möglich ist. Das 4G-Dongle ist über einen USB-Anschluss mit der Fernsteuerung verbunden (DJI 2022).

Beide DJI Phantom 4 verfügen mit der Zenmuse X4S (1"-CMOS-Sensor mit 20 Megapixel, 5472 × 3648 Pixel, und Global Shutter) über das gleiche Kameramodell mit einer Brennweite von 8,8 mm und einer Pixelgröße von 2,41 µm, das eine Sensorfläche 13,2 mm × 8,8 mm aufweist. Die Bodenauflösung (Ground Sampling Distance GSD) betrug für beide UAV-Systeme je nach Flughöhe 13,7 mm bzw. 16,4 mm (siehe Tab. 1).

## 4 Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchungen

Für die Berechnung der Aerotriangulation der jeweiligen Bildflüge wurde das Softwarepaket Agisoft Metashape eingesetzt. Die wichtigsten Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchungen für die UAV-Bildflüge über die beiden Testfelder Zeche Zollern und Inselpark sind im Folgenden zusammengefasst.

### 4.1 Arbeitsablauf

Der Arbeitsablauf für die Datenerfassung und -verarbeitung ist im Folgenden kurz beschrieben. Im ersten Schritt erfolgt die Bildflugplanung für das zu befliegende Gebiet mit der Software DJI Ground Station Pro auf einem Apple iPad, in dem die Bildüberdeckung, die Flughöhe, die Fluggeschwindigkeit und die Kameraparameter (Blende, Lichtempfindlichkeit des Bildsensors und die Belichtungszeit) festgelegt werden. Eine Initialisierung und ein Test des UAV-Systems werden im zweiten Schritt durchgeführt. Die Steuerung des automatischen Bildfluges erfolgt für das UAV-System mit der Software DJI Ground Station Pro im dritten Schritt. Nach der Landung des UAV-Systems werden die Daten (Fotos & RINEX-Daten vom Flug ggf. inkl. virtueller Referenzstation) im vierten Schritt ausgelesen und gesichert. Während die Bildpositionen bei einem RTK-GNSS-basierten Bildflug bereits vorliegen, müssen im fünften Schritt die Berechnungen der Flugbahnen und eine Zuordnung der Bildpositionen (Kamera-Events) mithilfe der Software KlauPPK durchgeführt werden (siehe Kap. 4.2). Im sechsten Schritt erfolgt mithilfe der Software KlauPPK eine Transformation in ein benutzerdefiniertes Referenzsystem (ETRS89/UTM32). Anschließend werden

die ellipsoidischen Höhen im siebten Schritt mit Hilfe eines detaillierten Geoids über Quasigeoidhöhen in das neue Höhensystem DHHN2016 gerechnet. Mit den berechneten Bildpositionen und den Passpunktkoordinaten liegen die Informationen im gewünschten Referenzsystem vor, die für eine Auswertung mit der Software Agisoft Metashape als Grundlage erforderlich sind. Mit dieser Software werden im achten Schritt die (automatischen) Bildpunktmessungen und die Bündelblockausgleichungen zur Bestimmung der Bildorientierungs- und Kamerakalibrierungsparameter durchgeführt. Im letzten Schritt findet eine Ergebnisanalyse und Qualitätskontrolle statt. Optional können dann weitere photogrammetrische Produkte wie digitales Oberflächenmodell und Orthophoto abgeleitet werden.

## 4.2 Berechnung der Flugbahnen (Trajektorie) und Bildpositionen

Das erste Ergebnis stellt die Berechnung der RTK-GNSS-Lösung für jede Bildposition mit der Software KlauPPK dar. Die Ergebnisse werden in eine FIX-Lösung (grün) mit einer Genauigkeit von  $\pm 3$  cm für die Bildpositionen (Lage/Höhe) oder in eine FLOAT-Lösung (gelb) mit einer Genauigkeit von  $\pm 25$  cm unterschieden. Die Abb. 4 (links) zeigt die Streifen der Kreuzbefliegung und eine kreisförmige Befliegung mit Schrägbildern (Blickrichtung Mitte) für drei UAV-Bildflüge der DJI Phantom 4 Pro V2.0 KlauPPK über dem Testfeld Zeche Zollern in Dortmund mit einem FIX-Lösungsanteil von 83,6 %. Die Schrägluftbilder wurden für die weitere Auswertung jedoch nicht berücksichtigt. In der Abb. 4 (rechts) sind die FIX-Lösungen (97,8 %) der Bildflüge über das Testfeld Inselpark dargestellt. Für die Aerotriangulationen sind jeweils nur die Ergebnisse der Fotos mit einer FIX-Lösung verwendet worden, wie in Abb. 4 auch gezeigt wird.

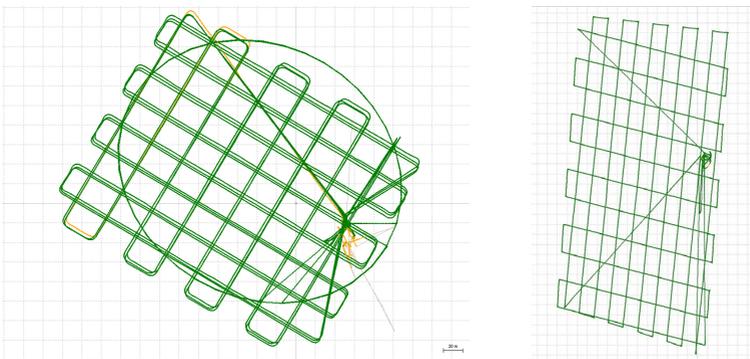
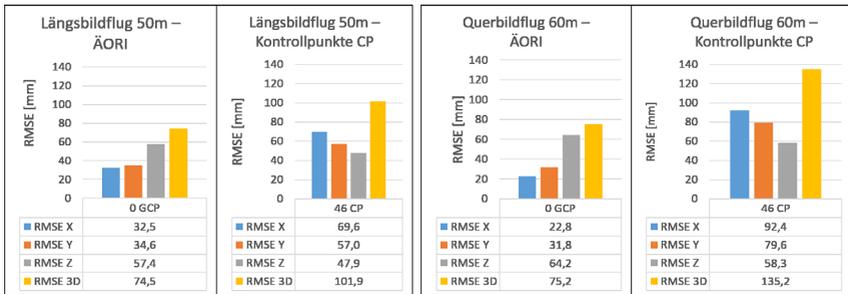


Abb. 4: RTK-GNSS-Lösung der Trajektorien bzw. Bildpositionen: Lösung FIX (grün) und FLOAT (gelb) für alle UAV-Bildflüge der DJI P4 KlauPPK über dem Testfeld Zeche Zollern in Dortmund (links) und über dem Testfeld Inselpark in Hamburg (rechts)

### 4.3 Testfeld Zeche Zollern – Ergebnisse der Bündelblockausgleichung

Die Aerotriangulationen beider Bildflugkonfigurationen (244 Fotos in Längsrichtung und in 50 m Höhe; 168 Fotos in Querrichtung und in 60 m Höhe, siehe auch [Abb. 4](#) links) über dem Dortmunder Testfeld wurden mit verschiedenen Pass- und Kontrollpunktkonfigurationen ausgewertet. In Agisoft Metashape V1.5.5 erfolgten die Bildpunktmessungen automatisch und die Passpunktmessungen halbautomatisch. In der anschließenden Bündelblockausgleichung wurden die Bildorientierungen und die Kamerakalibrierung berechnet. Die Ergebnisse der Genauigkeitsuntersuchungen für die Bilddaten der Zeche Zollern sind in den folgenden Abbildungen zusammengestellt.



**Abb. 5:** Resultate der Bündelblockausgleichungen (RMSE der äußeren Orientierung ÄORI und der Kontrollpunkte CP). Lagerung über PPK-GNSS ohne Passpunkte und mit vorkalibrierter Kamera für den Längsbildflug (244 Fotos) und den Querbildflug (168 Fotos) getrennt

In [Abb. 5](#) sind die Ergebnisse der Berechnungen der beiden Bildflüge (längs mit 50 m Flughöhe und quer mit 60 m Höhe) ohne Passpunkte dargestellt, wobei hier eine vorkalibrierte Kamera (Parameter von DJI) und Standardabweichungen von 3 cm für die äußeren Orientierungen (ÄORI) der Fotos und 0,5 Pixel für die gemessenen Pixelkoordinaten verwendet wurden. In der Ausgleichung wird bestätigt, dass die Lagekoordinaten der äußeren Orientierung ein RMSE (Root Mean Square Error = quadratischer mittlerer Fehler/Abweichung) von 3 cm aufweisen, während die Abweichungen der Höhenkoordinate bei 6 cm liegen. An den 46 Kontrollpunkten (check points CP) liegen die Abweichungen in der Lage zwischen 6 und 9 cm, wobei die Abweichungen in der Höhe mit ca. 5 bis 6 cm nur geringfügig genauer sind.

In [Abb. 6](#) sind die Resultate der Bündelblockausgleichungen mit verschiedenen Pass- und Kontrollpunktkonfigurationen in Metashape für den Längs- und Querbildflug dargestellt. In die Ausgleichungen wurden die Beobachtungen der äußeren Orientierungen (Lage/Höhe) mit Standardabweichungen von 3 cm

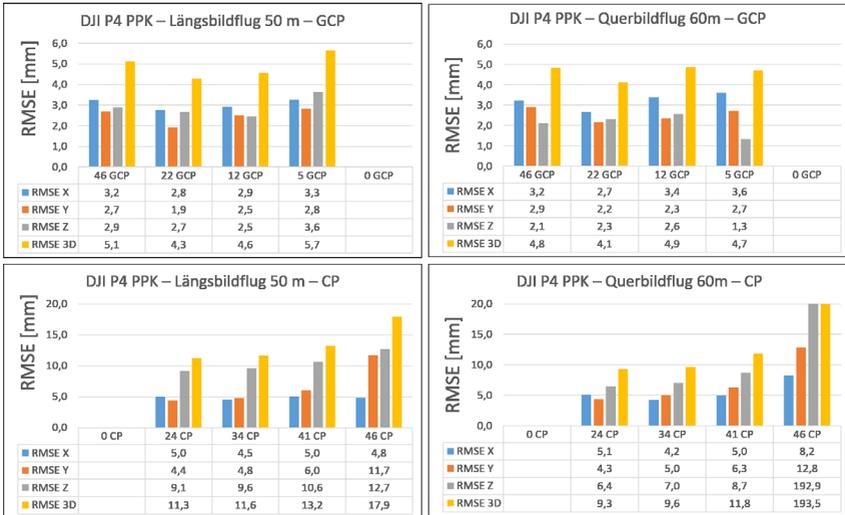


Abb. 6: Resultate für die Bündelblockausgleichung mit verschiedenen Passpunktkonfigurationen (RMSE der Pass- und Kontrollpunkte CP) für den Längsbildflug mit 244 Fotos (links) und den Querbildflug mit 168 Fotos (rechts)

gewichtet, während die Passpunktkoordinaten (GCP) mit Standardabweichungen von 5 mm und die Bildpunktmessungen mit Standardabweichungen von 0,5 Pixel in die Ausgleichungen eingeführt wurden. Für beide Bildflüge liegen die Abweichungen (RMSE) an den Passpunkten bei allen vier Passpunktkonfigurationen homogen zwischen 2 und 4 mm, was für photogrammetrische UAV-Anwendungen ein sehr gutes Ergebnis darstellt. Die Abweichungen an den Kontrollpunkten sind jedoch um den Faktor 2 bis 3 schlechter, wodurch trotzdem noch ein sehr gutes Ergebnis erreicht wurde. Erst bei der Ausgleichung ohne Passpunkte zeigen die 46 Kontrollpunktkoordinaten (CP) signifikant höhere Abweichungen besonders in der Höhe, wobei der Bildflug in 60 m Höhe deutlich höhere Abweichungen aufweist. Ursachen für die höheren Abweichungen in den Z-Koordinaten der Kontrollpunkte können Probleme bei der Bildpositionsbestimmung durch GNSS sein, welche durch atmosphärische Störungen durch schlechtes Wetter (Wolken, starker Wind, zeitweise leichter Regen) auf der Zelle Zöllern während der Bildflüge entstanden sind.

Die Verwendung von separaten Kameras für jeden Flug in der Bündelblockausgleichung führt zu geringfügig besseren Ergebnissen (RMSE) für die Passpunkte (GCPs) und Kontrollpunkte (CPs), wie in Abb. 7 dargestellt ist. Durch den Batteriewechsel vor dem 2. Bildflug der Kreuzbefliegung wird die Kamera auch abgeschaltet, so dass sich die Kamerakalibrierungsparameter ggf. verändern können.

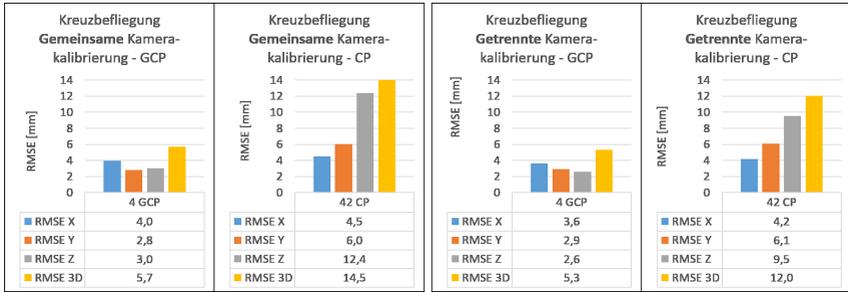


Abb. 7: Vergleich der Resultate für die Bündelblockausgleichung (RMSE der GCPs vs. CP) für die Kreuzbefliegung (412 Fotos) – gemeinsame Kamera- vs. getrennte Kamerakalibrierung

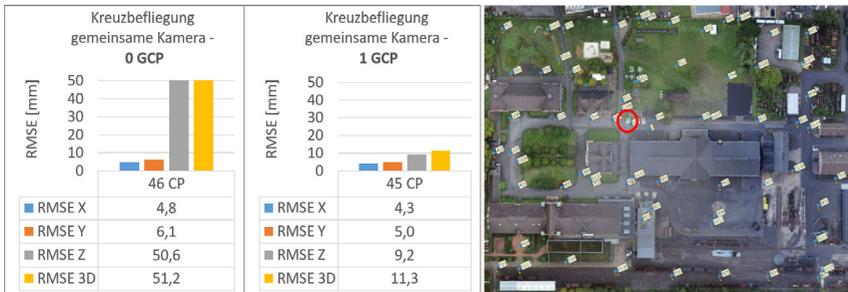


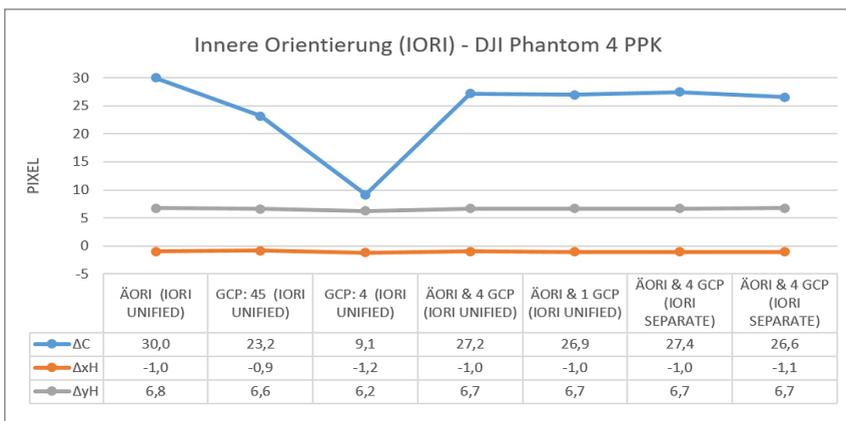
Abb. 8: RMSE der Kontrollpunkte (CP) für die Kreuzbefliegung (412 Fotos) mit der DJI P4 KlauPPK (Aerotriangulation mit Metashape) → 0 GCP (links) vs. 1 GCP (Mitte) im Testfeld Zeche Zollern Dortmund (rechts)

Abb. 8 zeigt, dass die Verwendung eines GCPs in der Mitte des Objektraums die Genauigkeit der Kontrollpunkte in der Höhenkoordinate signifikant verbessert. Ohne Passpunkte in der Ausgleichung (Abb. 8 links) können die äußeren Orientierungen als genaue Beobachtungen die Abweichungen an den Kontrollpunkten (CP) mit 4 bis 6 mm sehr gering halten, aber die Höhen weichen um den Faktor 10 im Vergleich zur Lage ab. Erst die Einführung eines Passpunktes stabilisiert die Höhe des Blockes mit nur 9,2 mm signifikant.

Welche Auswirkungen die verschiedenen Berechnungsvarianten der Bündelblockausgleichung (bezogen auf die Anzahl der verwendeten GCP sowie der Berücksichtigung der IORI) für die Kreuzbefliegung im Testfeld Zeche Zollern Dortmund mit der DJI P4 Pro KlauPPK haben, ist in der Abb. 9 dargestellt. Die Ergebnisse sind dabei unter Berücksichtigung folgender Kriterien zusammengefasst:

- Ausgleichung nur mit Lage und Höhe der äußeren Orientierung (ÄORI) als Beobachtungen und einer gemeinsamen Kamera (1. Spalte),
- Ausgleichung nur mit zwei verschiedenen Passpunktversionen und einer gemeinsamen Kamera (2. und 3. Spalte),
- Ausgleichung mit Lage und Höhe der äußeren Orientierung (ÄORI) sowie zwei Passpunktversionen als Beobachtungen und einer gemeinsamen Kamera (4. und 5. Spalte) und
- Ausgleichung mit Lage und Höhe der äußeren Orientierung (ÄORI) und vier Passpunkten (GCP) als Beobachtungen und zwei separaten Kameras (6. und 7. Spalte).

In der Grafik sowie in der Tabelle von [Abb. 9](#) zeigt sich, dass die Lage des Bildhauptpunktes bei allen Versionen der Bündelblockausgleichungen stabil bleibt, während die Abweichungen bei der Kamerakonstante von dem Nominalwert (8,8 mm = 3648 Pixel) etwas variieren. Erst bei den Ausgleichungen mit ÄORI und vier GCP (siehe die vier rechten Spalten) bleiben die Änderungen der Kamerakonstante konstant sowohl bei der Ausgleichung mit gemeinsamer Kamera als auch bei zwei separaten Kameras. Daraus kann gefolgert werden, dass mithilfe der gewichteten Beobachtungen der äußeren Orientierungen (Lage/Höhe) auch mit wenigen Passpunkten jeweils eine stabile innere Orientierung in der Ausgleichung berechnet werden kann.



**Abb. 9:** Veränderungen der inneren Orientierung der Kamera für die Kreuzbefliegung im Testfeld Zeche Zollern Dortmund mit der UAV P4 Pro KlauPPK bei verschiedenen Berechnungsvarianten der Bündelblockausgleichung

## 4.4 Testfeld Inselepark – Ergebnisse der Bündelblockausgleichung

Zur Beantwortung der in Kap. 1 gestellten Fragen werden im Folgenden weitere Ergebnisse der DJI P4 KlauPPK und der DJI P4 RTK (Abb. 10) in dem Testfeld Inselepark vorgestellt, analysiert und verglichen. In Agisoft Metashape V1.7



Abb. 10: Die untersuchten DJI P4 RTK und P4 Pro KlauPPK (weiße Systeme auf der Mauer in der Bildmitte)

wurden die signalisierten Passpunkte als Vergleich sowohl automatisch als auch manuell in den Bilddaten (Senkrechtaufnahmen) gemessen. Im Vergleich zu den manuellen Bildpunktmessungen der Passpunkte wurde durch die automatischen Messungen einerseits Zeit eingespart und andererseits gute Erfolgsraten von 98,0 % (P4 Pro KlauPPK) und 97,5 % (P4 RTK) erreicht, d. h. nur wenige Passpunkte mussten manuell nachgemessen werden. Da die automatischen Messungen der Passpunkte keine signifikanten Veränderungen der Genauigkeiten gegenüber den manuellen Bildpunktmessungen brachten, werden im Folgenden nur die Ergebnisse der manuellen Punktmessungen dargestellt.

Für detaillierte Genauigkeitsbetrachtungen wurden in den Bündelblockausgleichungen verschiedene Passpunktversionen mit unterschiedlicher Anzahl räumlich gut verteilter Passpunkte (alle GCPs, 44 bzw. 45, 22, 5 und 1 GCP) gerechnet, wobei dann entsprechend die nicht berücksichtigten Passpunkte als Kontrollpunkte (CP) verwendet wurden. Die Signalisierung eines Passpunktes wurde während der Befliegung mit der P4 Pro KlauPPK leider zerstört, so dass für diese Auswertung nur 44 Passpunkte verwendet werden konnten.

Die Abweichungen an Pass- und Kontrollpunkten sind für die Kreuzbefliegung mit der P4 Pro KlauPPK in Abb. 11 zusammengestellt, wobei die aus KlauPPK berechneten Bildpositionen (Lage und Höhe) als Beobachtungen mit der Standardabweichung von 3 cm in die Ausgleichung eingegangen sind. Die Abweichungen (RMSE) an Pass- und Kontrollpunkten liegen für die Version 1

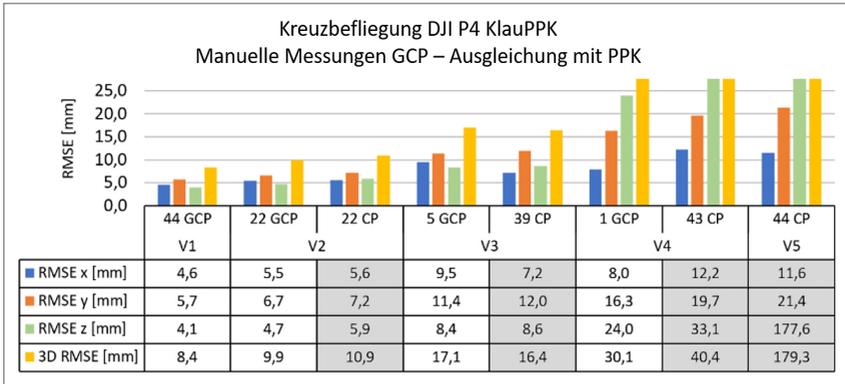


Abb. 11: Abweichungen an den Pass- (GCP) und Kontrollpunkten (CP) in verschiedenen Passpunktversionen für die Kreuzbefliegung mit der P4 Pro KlauPPK

und 2 bei 4 mm bis 6 mm in Lage und Höhe. Erst mit wenigen (V3), einem (V4) oder gar keinem Passpunkt (V5) werden die Abweichungen an den Kontrollpunkten signifikant höher. Trotz der als gewichtete Beobachtungen eingeführten äußeren Orientierung wird in der Ausgleichung ohne Passpunkt eine durchschnittliche Abweichung von 178 mm für die Höhe an den 44 Kontrollpunkten bestimmt. Durch die Verwendung eines Passpunktes in der Objektmitte (V4) werden die Abweichungen an den Kontrollpunkten auf ein Maß (ein paar Zentimeter statt Dezimeter) reduziert, das für verschiedene Anwendungen mit geringeren Genauigkeitsanforderungen ausreichen würde.

Die Auswirkungen einer Kreuzbefliegung auf die Ergebnisse der Bündelblockausgleichungen sind in der Abb. 12 beispielhaft zusammengefasst. Der Längsbildflug und die Kreuzbefliegung liefern bis auf die Version 5 sehr ähnliche Ergebnisse. Aufgrund der signifikant höheren Anzahl von Bildpunktmessungen hat die Kreuzbefliegung leicht schlechtere Genauigkeiten an den Kontrollpunkten gegenüber den Ergebnissen aus dem Längsbildflug. Erst bei der Version 5 (Ausgleichung ohne Passpunkte) zeigt sich die stabilisierende Wirkung der Kreuzbefliegung, in dem die Abweichungen an den Kontrollpunkten in der Höhe signifikant geringer sind als beim Längsbildflug. Auch hier zeigt sich, dass durch die Verwendung von einem Passpunkt in der Objektmitte Abweichungen von 13 mm bis 15 mm an den Kontrollpunkten erzielt werden, die für viele Anwendungen in der UAV-Vermessung mit RTK-GNSS reichen würden.

Welche Ergebnisse mit UAV-Bildflügen ohne den Einsatz von PPK-GNSS bzw. RTK-GNSS für die direkte Bestimmung der Bildorientierungen (Lage und Höhe) erreicht werden, ist in Abb. 13 für verschiedene Passpunktversionen zusammengefasst. Die Abweichungen an den Pass- und Kontrollpunkten haben für beide Systeme das gleiche Genauigkeitsniveau von 3 mm bis 5 mm. Sogar die

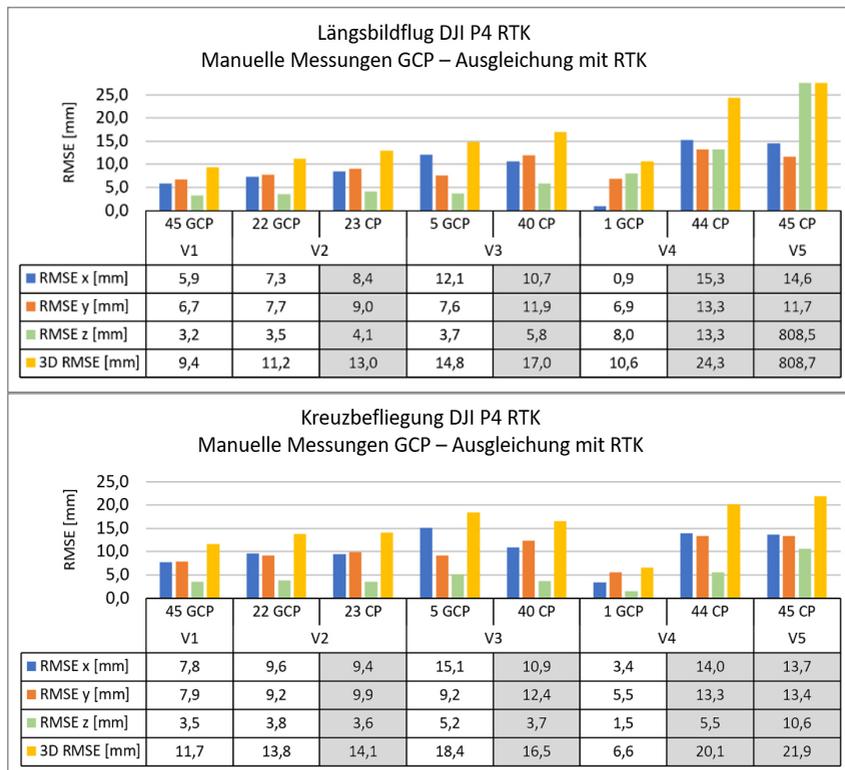


Abb. 12: Abweichungen an den Pass- (GCP) und Kontrollpunkten (CP) in verschiedenen Passpunktversionen für den Längsbildflug (oben) und für die Kreuzbefliegung (unten) mit der P4 RTK im Vergleich

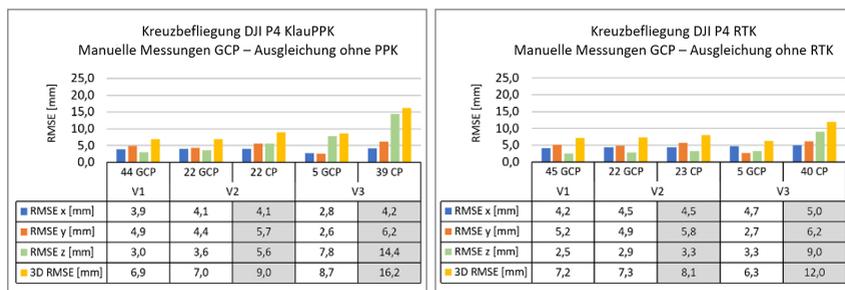


Abb. 13: Abweichungen an den Pass- (GCP) und Kontrollpunkten (CP) in verschiedenen Passpunktversionen für die Kreuzbefliegung mit der P4 Pro KlauPPK (links) und der P4 RTK (rechts) im Vergleich ohne Einsatz der ÄORI durch PPK-GNSS bzw. RTK-GNSS bestimmt

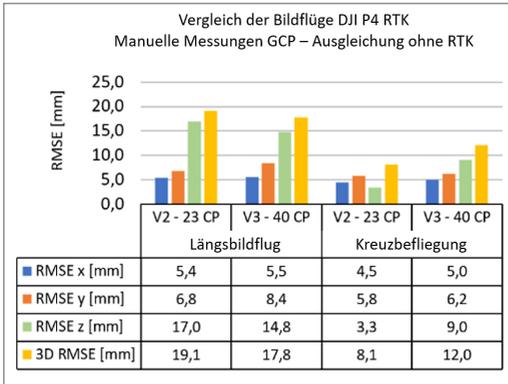
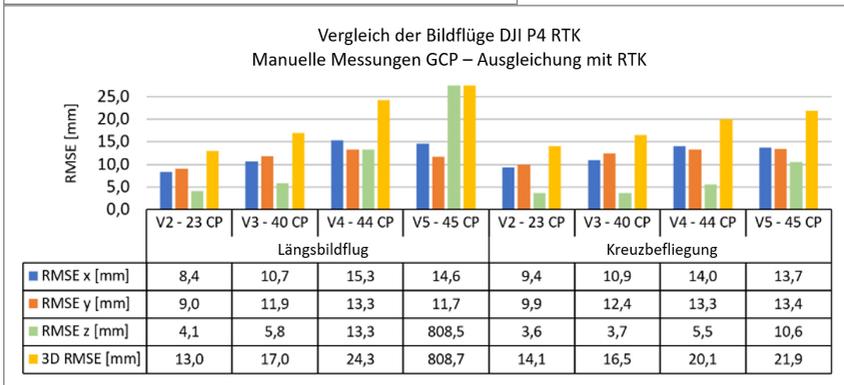


Abb. 14:  
RMSE an den Kontrollpunkten CP für den Längsbildflug und für die Kreuzbefliegung mit der P4 RTK mit (unten) und ohne RTK (oben) in der Ausgleichung im Vergleich



Konfiguration mit fünf gut verteilten Passpunkten (siehe Abb. 1 rechts unten) liefert recht gute Ergebnisse für die Abweichungen an den Kontrollpunkten. Nur die Höhenabweichungen werden hier signifikant schlechter, haben jedoch noch eine gute Genauigkeit von durchschnittlich 9 mm bis 14 mm.

Die Veröffentlichungen von Przybilla et al. (2015) und Kersten et al. (2020) bestätigen bereits bessere Ergebnisse durch eine Kreuzbefliegung mit unterschiedlichen Flughöhen von circa 20 %. Auch in diesen neuen Untersuchungen wird gezeigt, dass eine signifikante Genauigkeitssteigerung für die Kontrollpunkte durch eine Kreuzbefliegung erreicht wird (Abb. 14 oben), wenn die Bündelausgleichungen ohne die äußeren Orientierungen (Bildpositionen) aus den RTK-GNSS-Messungen als zusätzliche Beobachtungen erfolgen. Wenn die Bildpositionen aus den RTK-GNSS-Messungen in der Ausgleichung verwendet werden, zeigt sich eine signifikante Verbesserung der Höhengenaugigkeit für die Kontrollpunkte in den Versionen 4 und 5 (Abb. 14 unten).

In der Abb. 15 wird der Einfluss der verschiedenen Passpunktanordnungen, der Nutzung von Bildorientierungen aus RTK-GNSS-Messungen und der

Kreuzbefliegung auf die Kamerakalibrierungsparameter (Kamerakonstante  $c$  und Bildhauptpunkte  $x_H$  und  $y_H$ ) beispielhaft für die DJI Phantom 4 Pro RTK dargestellt. Für die Analyse wurden die Abweichungen zur nominellen Brennweite von 8,8 mm bzw. 3648 Pixel und die Bildhauptpunktlage mit  $x_H = y_H = 0$  für die proprietäre Kamera der verwendeten DJI Phantom 4 Pro aufgeführt. Die Abb. 15 zeigt, dass die Kamerakonstante ohne RTK-GNSS-Bildpositionen trotz Ausgleichung mit Passpunkten für den Längsbildflug jeweils nicht stabil bestimmt werden kann, da zwischen den Passpunktversionen Differenzen von bis zu 26 Pixel für die Kamerakonstante liegen. Diese Differenzen sind auch auf das ebene Testfeld zurückzuführen, welches für eine Kalibrierung der Kamera konstanten nicht hilfreich ist. Dagegen stabilisiert die Kreuzbefliegung die Abweichungen der berechneten Kamerakonstanten zur nominellen Brennweite recht gut, da die maximale Abweichung zwischen Version 1 und 3 nur noch 2,2 Pixel beträgt. Die Koordinaten des Bildhauptpunktes sind sowohl für den

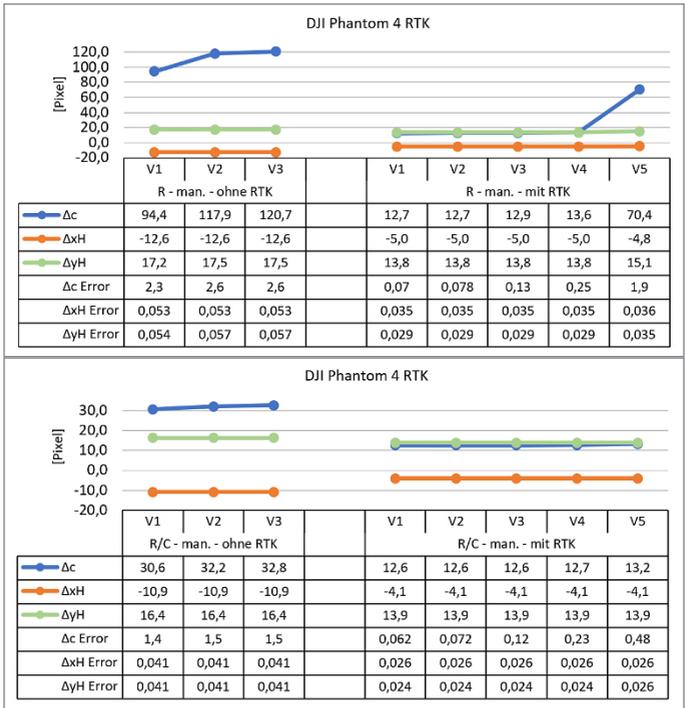


Abb. 15: Abweichungen der Kamerakalibrierungsparameter (Kamerakonstante  $c$  und Bildhauptpunkt  $x_H$  und  $y_H$ ) für die verschiedenen Versionen der Bündelblockausgleichungen im Vergleich für den Längsbildflug (oben) und für die Kreuzbefliegung (unten)

Längsbildflug, als auch für die Kreuzbefliegung sehr stabil mit geringen Standardabweichungen (hier:  $\Delta x_H y_H$  Error). Die Einführung der Bildorientierungen aus RTK-GNSS-Messungen bringt für den Längsbildflug und für die Kreuzbefliegung in der Ausgleichung mit verschiedenen Passpunktconfigurationen eine Stabilisierung der Kamerakalibrierungsparameter (Abb. 15 rechte Seite). Lediglich bei den Ausgleichungen mit Version 4 und 5 (ein bzw. ohne Passpunkte) gibt es Abweichungen bei der Kamerakonstanten, die sogar bei Version 5 signifikant sind. Erst die Kreuzbefliegung liefert Ergebnisse mit geringen Abweichungen für  $c$ . Die in Abb. 15 dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass sowohl die RTK-GNSS-Messungen für die Bildorientierungen, die als gewichtete Beobachtungen in die Ausgleichung eingehen, als auch eine Kreuzbefliegung mit unterschiedlichen Flughöhen einen Einfluss auf die Bestimmung der Kamerakalibrierungsparameter haben.

Eine ausführliche Zusammenstellung der Ergebnisse zu den Untersuchungen der UAV-Bildflüge im Inselpark Hamburg ist in Franks (2021) zusammengefasst.

## 5 Fazit und Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellten geometrischen Genauigkeitsuntersuchungen und die Ergebnisse anderer Autoren (Przybilla et al. 2019, Schlömer 2019, Losé et al. 2020, Przybilla und Bäumker 2020, Zhao et al. 2020, Zhao 2021) zeigen, dass durch UAV-Systeme mit präziser RTK/PPK-GNSS-Lösung ein genaues und effizientes Vermessungswerkzeug für viele photogrammetrische Anwendungen zur Verfügung steht. Ohne eine präzise RTK/PPK-GNSS-Lösung hängt die Genauigkeit für photogrammetrische UAV-Bildflüge sehr stark von der metrischen Qualität und der räumlichen Verteilung der Passpunkte im auszuwertenden Objektraum ab, wie bereits Lindstaedt und Kersten (2018) in Untersuchungen zur Bedeutung von Passpunkten bei UAV-basierten Bildflügen aufzeigten.

Mit den folgenden Aussagen können die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchungen von zwei UAV-Systemen DJI P4 RTK und P4 KlauPPK in zwei unterschiedlichen Testfeldern zusammengefasst werden.

- Wenn die äußeren Orientierungen bzw. die Aufnahmepositionen in Lage und Höhe in UAV-basierten Bildflügen durch präzise RTK/PPK-GNSS-Messungen mit einer Genauigkeit von 2 bis 3 cm bestimmt werden können, dann reicht sogar nur ein Passpunkt in der Mitte des auszuwertenden Objektraumes, um für viele Anwendungen in der Vermessung eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen. Man kann somit die Anzahl der erforderlichen Passpunkte bei UAV-basierten Photogrammetrie-Projekten deutlich reduzieren. Es ist jedoch zu empfehlen, aus Gründen der Kontrolle mindestens fünf gut verteilte Passpunkte im Objektraum zu platzieren.

- Die Kombination von RTK/PPK-GNSS-basierten Kamerapositionen und Passpunkten als gewichtete Beobachtungen in der Bündelblockausgleichung führt zu einer signifikanten Stabilisierung des photogrammetrischen Luftbildverbandes und der inneren Orientierung der Kamera, da so die genauen Bildorientierungsparameter als Näherungen für zuverlässige automatische Bildpunktmessungen vorliegen.
- Eine Kreuzbefliegung in unterschiedlichen Höhen erhöht die Stabilität des photogrammetrischen Luftbildblockes und die Zuverlässigkeit der Kamerakalibrierung, da durch die unterschiedlichen Flughöhen eine signifikante Bestimmung der Kamerakonstante gefördert wird. Die Bestimmung des Bildhauptpunktes scheint durch diese Untersuchungen problemlos zu sein, da die unterschiedlichen Varianten in den Bündelblockausgleichungen keine signifikanten Abweichungen aufgezeigt haben. Der wichtige Einfluss der Verzerrungsparameter wurde nicht untersucht, da sie in der Bündelblockausgleichung grundsätzlich mitbestimmt werden und je nach Punktverteilung im Bildraum leicht variieren können.
- Eine separate Kamerakalibrierung bei einer Kreuzbefliegung bringt nur eine geringe Verbesserung der Ergebnisse (Abweichungen an den Kontrollpunkten), allerdings wird die Bestimmung der Kamerakonstanten etwas verbessert. Durch den Wechsel der Batterien bei der DJI Phantom 4 wird die Stromzufuhr abgeschaltet, wodurch sich die Kalibrierung der Kamera unter photogrammetrischen Gesichtspunkten verändert.
- Die Verwendung von vorkalibrierten Parametern der inneren Orientierung (z. B. aus einer Laborkalibrierung von DJI) macht gar keinen Sinn, da sich die Werte wegen der instabilen Kamerakonstruktion durch Transport und Temperaturänderungen zwangsläufig verändern. Sie können jedoch als Näherungswerte genutzt werden.
- Die Genauigkeitsunterschiede in den Ergebnissen zwischen einer RTK-GNSS- und einer KlauPPK-GNSS-Lösung sind zu vernachlässigen. Allerdings werden durch den Einsatz von RTK-GNSS-Messungen und SAPOS bereits für die Bündelblockausgleichung verwendbare Bildorientierungsparameter in Lage und Höhe verfügbar gemacht, während bei der KlauPPK-Lösung noch eine aufwändige Berechnung dieser Parameter erfolgen muss. Dafür ist für die KlauPPK-Lösung jedoch keine Mobilfunkverbindung im Feld notwendig.

Der Einsatz von RTK/PPK-GNSS bei UAV-Bildflügen bietet somit genaue und zuverlässige Ergebnisse der Aerotriangulationen durch automatische Bildpunktmessungen und Bündelblockausgleichung. Durch die hohe Automation bei der Datenerfassung (Bildflug und Aerotriangulation) wird die Effizienz in dem gesamten photogrammetrischen Auswerteprozess gesteigert. Somit werden die preisgünstigen UAV-Systeme zu leistungsfähigen photogrammetrischen

Vermessungsinstrumenten, die mit der entsprechenden photogrammetrischen Expertise optimal in zahlreichen unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt werden können.

## Dank

Wir bedanken uns bei Prof. Dr.-Ing. Heinz-Jürgen Przybilla und Prof. Dr.-Ing. Manfred Bäumker (beide Hochschule Bochum) für die Vorbereitung, Einmessung und Bereitstellung des Testfeldes Zeche Zollern in Dortmund. Das Testfeld im Inselepark Hamburg-Wilhelmsburg wurde durch Herrn Martin Helms und seinen Mitarbeitern/innen vom Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Hamburg eingerichtet und zur Verfügung gestellt, für das wir uns ganz herzlich bedanken. Unser Dank gilt auch dem Bachelorabsolventen der HafenCity Universität Hamburg Fabian Franks für die Auswertung der UAV-Bildflüge im Inselepark Hamburg.

## Literatur

- Bäumker, M. (2020): Aufbau eines hybriden hochpräzisen 3D-Grundlagennetzes am Beispiel des UAV-Testfelds Zeche Zollern. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Wißner-Verlag, Augsburg, 103–120.
- DJI (2022): P4 RTK. Erlebbare Intelligenz. Absolute Präzision. [www.dji.com/de/phantom-4-rtk](http://www.dji.com/de/phantom-4-rtk), letzter Zugriff 06.01.2022.
- Franks, F. (2021): Genauigkeitsuntersuchungen von drei UAV-Systemen im Hamburger Testfeld. Unveröffentlichte Bachelorarbeit im Studiengang Geodäsie und Geoinformatik der HafenCity Universität Hamburg.
- Gerke, M., Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and Cross Flight Patterns. *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation*, (1), 17–30. DOI: [10.1127/pfg/2016/0284](https://doi.org/10.1127/pfg/2016/0284).
- Kersten, T., Schlömer, F., Przybilla, H.-J. (2020): Aerotriangulation von UAV-Bilddaten der Zeche Zollern – Die Ergebnisse verschiedener UAV-Systeme und zweier Softwarepakete im Vergleich. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Wißner-Verlag, Augsburg, 121–140.
- Lindstaedt, M., Kersten, T. (2018): Zur Bedeutung von Passpunkten bei der Aerotriangulation UAV-basierter Bildflüge. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Wißner-Verlag, Augsburg, 81–101.
- Losè, L. T., Chiabrando, F., Tonolo, F. G. (2020): Are measured ground control points still required in UAV based large scale mapping? Assessing the positional accuracy of an RTK multi-rotor platform. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B1-2020, 507–514.

- Przybilla, H.-J., Bäumker, M. (2020): Untersuchungen zur Qualität des Realtime Kinematic GNSS Systems der DJI Phantom 4 RTK. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 29, 47–61. DOI: [10.24407/KXP:1694344770](https://doi.org/10.24407/KXP:1694344770).
- Przybilla, H.-J., Bäumker, M., Luhmann, T., Hastedt, H., Eilers, M. (2020): Interaction between Direct Georeferencing, Control Point Configuration and Camera Self-calibration for RTK-based UAV Photogrammetry. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B1-2020, 485–492. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-485-2020](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-485-2020).
- Przybilla, H.-J., Bäumker, M., Vieten, J. (2018): Das UAV-Testfeld Zeche Zollern in Dortmund. In: DVW e. V. (Hrsg.): *UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Wißner-Verlag, Augsburg, 61–79.
- Przybilla, H.-J., Gerke, M., Dikhoff, I., Ghassoun, Y. (2019): Investigations on the Geometric Quality of Cameras for UAV Applications Using the High Precision UAV Test Field Zollern Colliery. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, 531–538. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-531-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-531-2019).
- Przybilla, H.-J., Reuber, C., Bäumker, M., Gerke, M. (2015): Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V.*, Band 24, 45–54.
- Schlömer, F. (2019): Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen UAV-basierter Bildflüge und Punktwolken. Unveröffentlichte Masterarbeit im Studiengang Geodäsie und Geoinformatik, HafenCity Universität Hamburg, 137 S.
- Wikipedia (2022): Industriemuseum Zeche Zollern, Dortmund-Bövinghausen. [https://de.wikipedia.org/wiki/Zeche\\_Zollern](https://de.wikipedia.org/wiki/Zeche_Zollern), letzter Zugriff 06.01.2022.
- Zhao, B., Li, J., Wang, L., Shi, Y. (2020): Positioning accuracy assessment of a commercial RTK UAS. *Proc. SPIE 11414, Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping V*, 1141409. DOI: [10.1117/12.2557899](https://doi.org/10.1117/12.2557899).
- Zhao, S. (2021): A Commercial PPK Solution for Phantom 4 RTK. *GIM International, Business Guide, Issue 1*, 30–32.

## Kontakt

Thomas P. Kersten | Maren Lindstaedt  
HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning  
Henning-Voscherau-Platz 1, 20457 Hamburg  
[thomas.kersten@hcu-hamburg.de](mailto:thomas.kersten@hcu-hamburg.de) | [maren.lindstaedt@hcu-hamburg.de](mailto:maren.lindstaedt@hcu-hamburg.de)

# Auswertung von UAV-Punktwolken mit KI

Alexander Reiterer | Dominik Störk | Katharina Wäschle

## 1 Einführung

Zunehmend werden 3D-Daten unserer Umgebung für verschiedenste Zwecke mit Hilfe von Drohnen (UAV, Unmanned Aerial Vehicle) erfasst. Meist werden dort Kameras, vereinzelt aber auch Laserscanner zum Einsatz gebracht. Die Wahl des Sensors und seine Spezifikation haben natürlich direkten Einfluss auf die zu erwartenden Ergebnisse.

Ein UAV-basiertes Mapping-System besteht i. d. R. aus einem Positionierungssystem, welches das Primärsystem darstellt. Die Position wird durch die Kombination eines Orientierungssystems (meist basierend auf Micro-Electro-Mechanical-Systems MEMS) und einem globalen Positionierungssystem (meist Global Navigation Satellite System GNSS) ermittelt. Dies geschieht mathematisch durch einen Kalman-Filter, der eine kontinuierliche Vorwärtslösung in Echtzeit berechnet. Alle weiteren Sensoren sind Sekundärsensoren, die entweder durch den Weg oder die Zeit mit dem Positionierungssystem synchronisiert sind. Diese Sensoren können CCD/CMOS-Einzelbildkameras, Laserscanner oder Laserdistanzsensoren sein. Ergebnis eines Messflugs mit einem solchen



**Abb. 1:** Messsystem des Fraunhofer IPM, ausgestattet mit zwei RGB-Kameras und einem Laserscanner. Das Messsystem ohne Drohne wiegt 2,5 kg.



**Abb. 2:** Punktwolke einer Straßenszene, aufgenommen durch ein Messsystem, welches auf einer Drohne montiert war.

System (vgl. [Abb. 1](#)) ist eine sog. Punktwolke (vgl. [Abb. 2](#)). Die Punktwolke kann dabei direkt aus dem Laserscanner stammen oder über Photogrammetrie mit Hilfe der Bilder berechnet worden sein und stellt die Repräsentation einer Szene als zunächst unsortierte Menge von Punkten in 3D-Koordinaten dar. Zusätzlich zur 3D-Information steht der vom Laserscanner empfangene Intensitätswert und/oder die Farbinformation aus den Bildern zur Verfügung (4D-Punktwolke).

## 2 Stand der Technik

Um einzelne Objekte in Punktwolken zu lokalisieren und zu klassifizieren, gibt es eine Vielzahl verschiedener Ansätze. Für die Analyse von komplexen Szenen werden klassischerweise geometrische Eigenschaften von Objekten sowie a-priori-Wissen über den typischen Aufbau der Umgebung kombiniert. So entsteht ein mehrstufiges Vorgehen, indem z. B. zunächst über die Suche nach einer ebenen Fläche eine grobe Kategorisierung in Fahrbahn, Objekte auf der Fahrbahn sowie Objekte über der Fahrbahn erfolgt, vgl. Pu (2011). Bordsteine lassen sich z. B. über Sprünge in den Höhenwerten bestimmen. Andere Methoden zur Objekterkennung in 3D gehen stärker merkmalsbasiert vor, wie es ähnlich aus der Bildverarbeitung bekannt ist. Darunter sind auch Ansätze, welche für komplexere Szenen mit Verdeckungen und einer größeren Anzahl an Objekten geeignet sind. Unterscheiden lassen sich hierbei globale und lokale Ansätze, je nach Art der verwendeten Merkmale. Einen Überblick über die Methoden,

welche lokale Merkmale auf Oberflächen betrachten, bietet z. B. Guo (2014). Die verschiedenen Ansätze zur Objektidentifikation in Punktwolken beschränken sich aber meist auf wenige Objekte bzw. Objektklassen, oder auf Objekte, welche in ihrer Erscheinung nur geringer Variation unterliegen. Bei stärker variierenden Objekten wie Bäumen reichen geometrische Merkmale nicht aus. Für die detaillierte Unterscheidung einer größeren Anzahl komplexerer Objektklassen ist es deshalb notwendig, weitere Informationsquellen einzubeziehen.

State-of-the-Art-Techniken zur Objekterkennung in 3D-Daten beruhen auf einem Lernprozess. Dabei werden Merkmale bestimmt, welche die relevanten Objekte möglichst vollständig beschreiben, z. B. Farbe, Form, Abmessungen etc. Komplexe Objekte lassen sich jedoch in den meisten Fällen nur schwer mit einer überschaubaren Anzahl von Parametern beschreiben, z. B. Vegetation. Um komplexe und vor allem auch sehr große Objekte voneinander abzugrenzen, müssen umfangreiche Bereiche analysiert werden, im Extremfall ganze Straßenzüge oder Städte. Dies ist eine äußerst komplexe Aufgabe, die mit klassischen Methoden der Objekterkennung anhand manuell definierter Beschreibungsmerkmale i. d. R. unmöglich ist. Daher sind in der Objekterkennung schon seit geraumer Zeit Verfahren auf Basis künstlicher neuronaler Netze (KNN) den klassischen Erkennungsverfahren überlegen. Dies gilt vor allem dann, wenn es darum geht, sehr viele verschiedene Objekte zu erkennen, deren Erscheinung zudem stark variiert. Solche KNN-basierten Methoden können auch robuster gegenüber Variationen der einzelnen Objekte sein (z. B. Verdeckungen, Farbausbleichungen, Beschädigungen oder Verschmutzungen). Bereits Ende der 1980er Jahre wurden mithilfe von KNN einfache Aufgaben wie z. B. eine Handschrifterkennung gelöst.

Der Aufbau der Netze von damals wird heute als flach bezeichnet; sie umfasste maximal acht bis zehn Schichten mit meist weniger als 20.000 Neuronen. Deep Learning unterscheidet sich von den klassischen Methoden zur Objekterkennung vor allem dadurch, dass die zu erkennenden Objekte nicht durch einen Satz manuell vordefinierter Merkmale beschrieben werden, sondern dass die beschreibenden Parameter eines Objektes vom neuronalen Netz selbst bestimmt werden. Für den industriellen Einsatz ist die Lokalisierung und Klassifizierung einer Vielzahl verschiedener Objektklassen im 3D-Raum gefordert, welche in ihrer Erscheinung stark variieren können.

### 3 Prozesskette

Fraunhofer IPM verfolgt zur Klassifizierung der Punktwolken primär einen Ansatz aus dem Feld des *Deep Learning*, bei welchem geeignete Merkmale aus einem Trainingsdatensatz automatisch gelernt und sowohl zur Lokalisierung als

auch zur Klassifizierung übernommen werden. Der Prozess ist dabei wie folgt: Ein spezielles KNN zur semantischen Anreicherung von 2D- und 3D-Daten klassifiziert die von einem Messsystem aufgenommenen Daten. Die getrennten Datenströme, die durch die Umgebungserfassung entstehen, werden dafür miteinander kombiniert. Objekte, welche in Bildern erkannt werden, überführt der Auswerteprozess vollautomatisiert in den 3D-Raum. Das notwendige Wissen dafür entstammt einem ausführlichen Kalibrationsprozess, der die Position und Ausrichtung aller Messsensoren auf der Drohne bestimmt und in ein verwertbares Format überführt. Das KNN analysiert jeden 3D-Punkt einzeln und ordnet ihn mitunter auch mehreren Objektklassen zu, da gleiche Objekte aus mehreren Perspektiven aufgenommen werden. Oft lassen sich Objekte sogar nur dann eindeutig klassifizieren, wenn auch mehrere Aufnahmeperspektiven zur Verfügung stehen; z. B. wenn ein Objekt durch einen Baum mit Ästen verdeckt wird. Mit nur einer Perspektive bestände die Gefahr, das Objekt zu übersehen und den Bereich fälschlicherweise als Baum oder als Teil eines Baumes zu klassifizieren. Erst die getrennte Verarbeitung und Gewichtung der Aufnahmeperspektiven lässt die punktgenaue Identifizierung von Objekten zu. Dieser Schritt trägt wesentlich zur Robustheit des Ansatzes bei. Objekte mit ähnlichen Merkmalen können anschließend zu Gesamtobjekten zusammengefasst werden (z. B. alle Punkte, die zur Straßenoberfläche gehören). Für diese Identifizierung von Gesamtobjekten wird ein komplexes Regelwerk angewandt.

Das Ergebnis kann am Ende als 2,5D-Karte ausgegeben werden (d. h. 2D-Objektumriss und Objekthöhe). Das KNN bildet dabei eine zentrale Komponente, es entscheidet jedoch nicht final über die Zuordnung zu einer Objektklasse. Die Entscheidung wird vielmehr aus der Kombination von Klassifizierung und dem Wissen über Objektgeometrien und Umgebungszusammenhänge getroffen. So muss eine Fahrbahnmarkierung beispielsweise immer Teil der Fahrbahn sein, ein Gehweg sich immer am Rand einer Fahrspur befinden und ein Gebäude darf niemals die Fahrbahn kreuzen.

Für den Aufbau der Prozesskette werden entsprechende Trainingsdaten benötigt. Diese Trainingsdaten werden für jedes Projekt am Fraunhofer IPM individuell erfasst und annotiert. Bei sehr umfangreichen Projekten mit entsprechend hoher geforderter Klassifizierungszuverlässigkeit sprechen wir von über 100.000 Trainingsdatensätzen. Entscheidend für den Erfolg der Objektklassifizierung sind diese qualitativ hochwertigen, manuell annotierten Trainingsdaten, die auf der einen Seite exakt auf die Zielanwendung zugeschnitten sind, aber auf der anderen Seite auch noch genügend Variation für eine Generalisierung aufweisen. Ein Beispiel eines Trainingsbildes findet sich in [Abb. 3](#).

Aufgrund der Komplexität der tiefen Netzarchitektur ist nur schwer nachvollziehbar, welche Merkmale das KNN beim Lernen extrahiert. Daher ist die Steuerung der Annotation (das sog. Labeling) mit empirischen Experimenten

eine Schlüsselaufgabe der Datenaufbereitung. Dafür hat das Fraunhofer IPM ein eigenes Annotations-Tool entwickelt, das die entsprechende Qualitätskontrolle einfacher und effizienter macht (Abb. 4).



Abb. 3: Beispiel von manuell annotierten Daten, welche als Trainingsdaten verwendet werden können.



Abb. 4: Annotations-Tool von Fraunhofer IPM, welches das Annotieren komplexer Daten erleichtert. Die Bilddaten werden durch die Annotation farblich überlagert (in diesem Beispiel steht Violett für Fahrzeug); auf der linken Seite sind entsprechende Steuereinheiten aufgelistet, um die Klassen zuzuordnen.

Der Prozess der Klassifizierung produziert während des Trainings kontinuierlich Output, der dann mit der Annotation abgeglichen werden kann. Auf Grundlage dieses Abgleichs werden die Parameter des Netzwerks dann vollautomatisiert angepasst.

Da für die Annotation von Datenmengen in der Größenordnung von 100.000 Bildern und mehr in jedem Fall eine größere Gruppe von Annotatoren bzw. Annotatorinnen mit diversem (kulturellem und fachlichem) Hintergrund eingesetzt werden muss, ist die Kommunikation und die Sicherstellung von Konsistenz beim Prozess eine herausfordernde Aufgabe. Wichtig ist, den Menschen den Hintergrund der Anwendung beizubringen und die Richtlinien für die Annotation eindeutig zu klären. Nur so kann der Fokus der Annotation von den für Menschen besonders beachteten Klassen wie Personen oder Fahrzeugen auf die für die Anwendung relevanten Annotationen gelenkt werden. Zu diesem Zweck wurde vom Team am Fraunhofer IPM ein visueller Annotations-Leitfaden erstellt.

Für wissenschaftliche Veröffentlichungen genügt es meist, wenn die Algorithmen als Proof-of-Concept evaluiert wurden – also nur auf kleinen Datensätzen mit isolierten Objekten getestet werden und nicht auf Punktwolken realer Szenen. Bei industrieller Auftragsforschung und Entwicklung ist jedoch die tatsächliche Erscheinung von Objekten oftmals unerwartet starker Variation unterworfen. Für verschiedene Projekte wurden am Fraunhofer IPM Trainingsdaten erzeugt, die einen ungeheuren Schatz für zukünftige Forschung und Anwendungen bilden. In Summe stehen dem Fraunhofer IPM weit über 100.000 Datensätze zur Verfügung, die zukünftig flexibel für verschiedene Projekte eingesetzt werden können. Es werden Variationen sowohl hinsichtlich der verschiedenen Jahreszeiten abgedeckt als auch bezüglich der regional typischen städtebaulichen und architektonischen Eigenheiten. Die Daten wurden von unterschiedlichsten Messsystemen aufgenommen, u. a. von Sensorsystemen auf Drohnen, Straßenfahrzeugen und handgeführten Systemen.

Die Prozesskette des Fraunhofer IPM wird derzeit von mehreren Unternehmen erfolgreich eingesetzt, u. a. von der Strabag AG, der Deutschen Telekom, der Bundesanstalt für Straßenwesen BAST und der Bayernwerk AG.

## 4 Zusammenfassung

Der Beitrag präsentiert den Prozess des Fraunhofer IPM zur vollautomatischen Klassifizierung von 3D-Daten. Als Datenquellen werden dabei Laserscanner- und/oder Bilddaten vorausgesetzt, welche auf Straßenfahrzeugen, aber auch auf Drohnen verbaut sein können. Anwendungen in der Praxis haben gezeigt, dass eine instanzbasierte Zuverlässigkeit von über 80 % erreichbar ist. Oberflächen

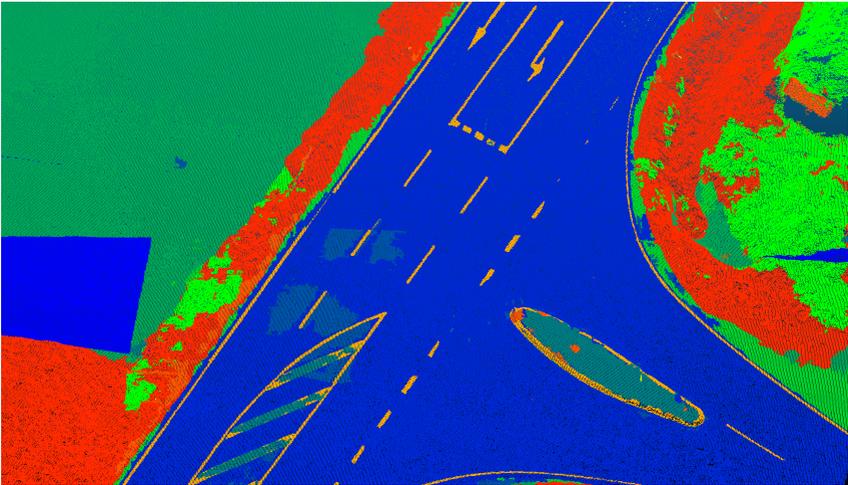


Abb. 5: Automatisiert klassifizierte Punktwolke aus Abb. 2. Die Farben stellen verschiedene Objektklassen dar, u. a. Blau für Asphalt, Dunkelgrün für Gras, Rot für Büsche, Orange für Straßenmarkierung.

wie Asphalt, Kopfsteinpflaster und Vegetation können mit über 90 % Zuverlässigkeit erkannt werden (siehe Abb. 5). Voraussetzung dafür ist, dass ausreichend Trainingsdaten in guter Qualität vorliegen.

## Literatur

- Guo, Y. (2014): 3D object recognition in cluttered scenes with local surface features: a survey. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*. In: *IEEE Transactions on*, 36(11), 2270–2287.
- Pu, S. (2011): Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(6), S28–S39.

## Kontakt

Prof. Dr. Alexander Reiterer  
Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM  
Georges-Köhler-Allee 301, 79110 Freiburg  
[alexander.reiterer@ipm.fraunhofer.de](mailto:alexander.reiterer@ipm.fraunhofer.de)



# Session 3: Laserscanning und UAV



# Hochpräzises Laserscanning aus der Luft – Neue Anwendungsfelder durch die Fusion von 2D-Bilddaten und 3D-LiDAR-Daten

Simon Stemmler | Dominik Merkle | Alexander Reiterer

## 1 Einführung

Der technologische Fortschritt macht den Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen (unmanned aerial vehicles, UAV) zunehmend auch für zivile Anwendungen interessant. Auf UAVs installierte Messsysteme können große Flächen und komplexe Strukturen schnell und effizient erfassen. Dies ist für viele Einsatzbereiche von großer Bedeutung.

Die Erfassung von Infrastrukturelementen wie Straßen, Baustellen und Gebäuden ist bis jetzt mit einem hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden. Eine engmaschige Überwachung anthropogener Strukturen, um eventuelle Veränderungen in Lage und Struktur frühzeitig zu erkennen, ist von breitem Interesse. Allein der Verkehrswegebau, der jährlich in Deutschland ca. 500 Baustellen umfasst (ADAC 2018), bietet großes Potenzial für die Überwachung mittels UAVs. Auch die Erfassung und Kontrolle von Wald und dessen Wachstum basiert vermehrt auf dem Einsatz von UAV-getragenen Messsystemen. Hierbei ist vor allem die Erfassung der Waldoberfläche und Bodenfläche in einer Messkampagne von großer Bedeutung (Wallace et al. 2017).

## 2 Stand der Technik

Die Fusion von light detection and ranging (LiDAR-)Daten und photogrammetrischen Daten stellt einen enormen Mehrwert in der Erfassung, der Vermessung und dem Monitoring verschiedenster Strukturen dar. 3D- und 2D-Daten können dabei entweder separat generiert und im Anschluss fusioniert werden. Oder alternativ können die Bilddaten zur Kolorierung der LiDAR-Punktwolken genutzt werden. Yang et al. (2021) fusionieren beispielsweise photogrammetrische Daten und LiDAR-Daten, um Bauminformationen abzuleiten. Durch Punktwolkensegmentierung und einen Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus überlagern sie die Punktwolken. Sankey et al. (2021) benutzen hingegen die Fusion von hyperspektralem LiDAR, multispektraler Photogrammetrie und

bodengestütztem Laserscanning mit Bildinformation zur Quantifizierung der Dynamik von Pflanzenbodennährstoffen in Weideland. Hartling et al. (2021) klassifizieren mit Hilfe der Sensorfusion und maschinellen Methoden urbane Baumarten. Elaksher (2008) zeigt die Vorteile der Datenfusion im Bereich von Küstengebieten. Zhang und Lin (2017) geben eine Übersicht bis 2017 von unterschiedlichen Fusionsmethoden, die für LiDAR-Daten und photogrammetrische Daten eingesetzt werden. Dabei gehen sie unter anderem auf Registrierung, die Generierung von Orthobildern, Klassifizierung, Rekonstruktion, Änderungserkennung und Waldinventur ein. Abgesehen von natürlichen Umgebungen bietet die Fusion der Datenströme auch Vorteile für die Erfassung und das Monitoring von Bauwerken, vom Haus bis hin zu Verkehrsinfrastruktur. Lee et al. (2008) verwenden für die Erkennung von Gebäuden in 3D-Daten lokale Höhenmaxima und die Entropieinformation der Histogramme von LiDAR-Daten sowie das Ergebnis der Segmentierung von 2D-RGB-Bilddaten. Des Weiteren nutzen Haala et al. (2019) UAV-basierte Photogrammetrie und Laserscanning, um Setzungsmessungen durchzuführen. Mit Hilfe eines Multisensorsystems dokumentieren Murtiyos et al. (2019) den javanesischen Sari Tempel. Chiabrando et al. (2017) erfassten hingegen einen Herkulesbrunnen.

Die Anwendung von LiDAR und photogrammetrischen Daten und 2D-Bilddaten ist wie angeführt sehr variabel. Die Anwendung und Fusion dieser Datenströme liefert für verschiedenste Anwendungen einen massiven Mehrwert.

In den angeführten Arbeiten wird deutlich, dass in vielen Fällen ein kompaktes Multisensorsystem die Arbeit erleichtern würde, jedoch oft die unterschiedlichen Perspektiven von Boden- und Luftaufnahmen erforderlich sind. Diese Arbeit zeigt weitere Anwendungsmöglichkeiten anhand eines Waldszenarios und eines Brückenszenarios auf. Hierbei wird unter anderem ein kompaktes Multisensorsystem vom Fraunhofer IPM eingesetzt.

### 3 Aufnahmesysteme und Datenfusion

Für die Erfassung von großen Gebieten hat das Fraunhofer IPM auf verschiedene drohnengestützte Messsysteme gesetzt – sowohl die einfache Aufnahme von Bilddaten mittels Kameradrohnen als auch LiDAR-Scans mit dem drohnengetragenen Lightweight Airborne Profiler LAP, der am Fraunhofer IPM entwickelt wurde. Aus den Bilddaten wird mit klassischer Photogrammetrie eine 3D-Punktwolke errechnet.

Um eine konsistente Punktwolke aus Drohnenbilddaten zu berechnen, müssen sich die Bilder überlappen. Optimal ist eine Überlappung entlang der Flugrichtung von 80 % und 50 % in Querrichtung. Um die Daten mehrerer Flüge zusammenzuführen und zu georeferenzieren, gibt es zwei Möglichkeiten:



Abb. 1: Messsystem LAP des Fraunhofer IPM im Einsatz

Ein hochpräzises GNSS oder Bodenkontrollpunkte (GCP) sind zwingend erforderlich. Mit Hilfe dieser GCP können alle erzeugten Punktwolken überlagert und in der Nachbearbeitung miteinander verschmolzen werden.

Der LAP verbindet die Vorteile eines Time-of-Flight-Laserscanners mit den Vorteilen von hochauflösenden digitalen Kameras. Durch die Verwendung beider Techniken ist es möglich, die 3D-Punktwolke des Laserscanners in Echtfarben zu kolorieren, ohne dabei einen Überlapp der einzelnen Bilder zu benötigen. Eine wichtige Voraussetzung dabei ist, dass die Kameras, der Laserscanner und die integrierte inertielle Messeinheit (inertial measurement unit, IMU) exakt kalibriert sind. Zudem ermöglicht die Kombination von Kameras und Laserscanner die schnelle Erzeugung von Tiefenbildern für spezielle Anwendungen. Durch das integrierte GNSS-System werden die Daten direkt georeferenziert und GCP sind nicht mehr nötig. Abb. 1 zeigt den LAP im Einsatz.

## 4 Anwendungsfall Wald

Im Rahmen eines Forschungsprojekts des Fraunhofer IPM wurde ein Waldstück photogrammetrisch erfasst. Die Punktwolke besitzt eine hohe Punktdichte und bildet sowohl das Blattwerk der Bäume als auch den Boden ab, wie in Abb. 2 zu sehen ist. Hier ist zu erwähnen, dass sich der erfasste Wald im Sterbeprozess befindet und deshalb der Baumbestand sehr ausgedünnt ist. Durch genug



Stemmler und Wiedemann 2021

**Abb. 2:** Photogrammetrische Punktwolke eines Wald- und Wiesenbereichs, aufgenommen mit einer DJI Phantom 4

Überlapp der Bildaufnahmen und dem Flug in zwei unterschiedlichen Höhen und variiertem Aufnahmewinkel kann ein Großteil der Verschattung vermieden werden. Allein die photogrammetrischen Daten erlauben eine Auswertung des Gesundheitszustands der Bäume sowie der relativen Quantifizierung des Blattwerks. Die RGB-Information wird durch Änderungen der Belichtungsverhältnisse innerhalb des Flugs beeinflusst. Deshalb wurde bei der Befliegung auf konstante Wetterbedingungen geachtet. Mit Hilfe von Referenzmarkern konnte im Nachgang die Punktwolke mit terrestrischen Laserscans überlagert werden.

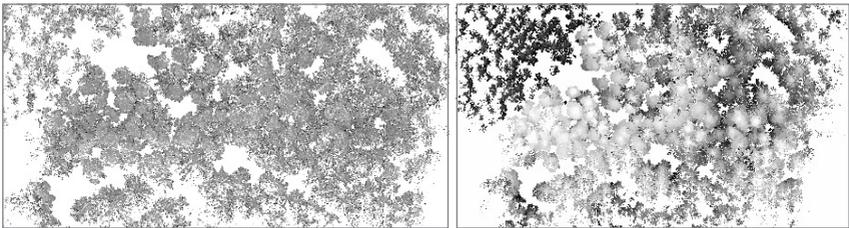
Zusätzlich zu der generierten Punktwolke bieten die 2D-Bilder die Möglichkeit, den Gesundheitszustand der Bäume aufgrund des Grünanteils zu bewerten bzw. die Baumarten zu bestimmen. Eine mögliche automatisierte Segmentierung in 2D könnte dann die RGB-Information ergänzen. Über die Erkennung



**Abb. 3:** Drohnenaufnahmen von einem Waldgebiet mit gesundem und krankem bzw. totem Baumbestand

von Bauminstanzen ist zudem eine Baumzählung möglich. Außerdem kann über die kombinierte Auswertung von 2D-Bildern und 3D-Daten die Höhe der Bäume sowie der Stammdurchmesser approximiert werden. Bei bekanntem Sonnenstand könnte perspektivisch sogar der Schatten der Bäume in die Höhen- und Blattdichtenauswertung einfließen. Die Nadir-Aufnahmen in [Abb. 3](#) zeigen deutlich, dass die RGB-Bilddaten auch eine Trennung kranker und vitaler Bäume zulassen.

Im Gegensatz zu der RGB-Information bietet die Intensitätsinformation beim Baumbestand auf den ersten Blick deutlich weniger Information, wie links in [Abb. 4](#) zu sehen ist. Die Höhenverteilung des Baumbestands, die rechts im Bild zu sehen ist, stellt jedoch sehr scharf die Baumkronen dar. Aufgrund der niedrigen Flughöhe über dem Wald ist die Abschattung des Bodens relativ hoch. In [Abb. 5](#) ist ein Querschnitt eines Ausschnitts des Waldes gezeigt. Hier ist deutlich, dass die Stämme mit genügend Punkten dargestellt werden und zusätzlich die Verteilung des Geästs in Abhängigkeit der Baumdicke sichtbar ist. Im Vergleich zur Photogrammetrie ist deutlich weniger Rauschen in der Punktwolke. Hier muss jedoch berücksichtigt werden, dass der Vergleich von vielen Faktoren wie zum Beispiel der Flughöhe, der Bildauflösung und dem Bildüberlapp und der Fluggeschwindigkeit für den Laserscanner abhängt. Durch die Fusion von Photogrammetrie und Laserscanning können die Stärken beider Systeme ausgenutzt werden.



**Abb. 4:** Laserscan-Punktwolke eines Waldstücks mit Intensitätsinformation (links) und Höheninformation in Grauwertdarstellung (rechts)



**Abb. 5:** Querschnitt der Laserscan-Punktwolke mit großem alten Baumbestand (rechts) und Nachwuchsbäumen (links)

## 5 Anwendungsfall Brücke

Im Rahmen eines weiteren Forschungsprojektes wurde eine Eisenbahnbrücke in Hannover erfasst. Hierbei wurde sowohl auf Photogrammetrie als auch auf Laserscanning gesetzt. Für die Photogrammetrie wurden Handaufnahmen mit einer Fuji X-T10 Kamera und Luftaufnahmen mit einer DJI Phantom 4 Drohne vorgenommen. Insgesamt ergaben sich dadurch mehr als 1000 Bilder, die dann photogrammetrisch zu einer Punktwolke prozessiert wurden. Als heraus-



Abb. 6: Photogrammetrische Punktwolke einer Eisenbahnbrücke basierend auf Handaufnahmen und UAV-basierten Aufnahmen



Abb. 7: Kolorierter Laserscan einer Eisenbahnbrücke mit dem LAP-System

fordernd stellte sich die geringe Textur an der Brückenunterseite, Hintergrundinformationen zwischen den Brückenstrukturen und die Vermeidung von Verschattungen im Lagerbereich heraus. Das Ergebnis der Punktwolke ist in [Abb. 6](#) dargestellt. Während die texturreichen Steinstrukturen scharf abgebildet sind, leidet die texturarme und teils reflektierende Metallträgerstruktur unter Rauschen und fehlerhaften Triangulationen. Hier wäre zusätzlich ein Laserscanning von der Unterseite hilfreich, um unabhängig vom Umgebungslicht die Unterseite zu erfassen.

Zusätzlich zu den photogrammetrischen Daten wurden LiDAR-Daten mit dem LAP aufgenommen, die in der Postprozessierung koloriert werden. Eine Perspektive davon zeigt [Abb. 7](#). Im Vergleich der Datenströme wird deutlich, dass die Punktdichten auf ähnlichem Niveau sind. Durch die genaue Kalibrierung zwischen den beiden Kameras und dem Laserscanner sitzt die RGB-Information an der richtigen Stelle. Durch die Mindestflughöhe, ab der eine Brücke laut Drohnenverordnung zügig überflogen werden darf, ist der Winkel, der unter die Brücke sieht, sehr steil. Eine Abhilfe würde hier ein Unmanned Ground Vehicle (UGV) mit mobilem Scanner, ein terrestrischer Laserscanner oder ein handgehaltener Scanner schaffen.

## 6 Zusammenfassung

Die Erfassung von Strukturen mit Hilfe von UAVs ist von hoher Relevanz für eine große Anzahl von Anwendungen. Die Nutzung von Laserscannern kombiniert mit RGB-Kameras zur Kolorierung der Punktwolken ermöglicht den Einsatz des LAP für viele verschiedene Anwendungsszenarien. Vor allem im Bereich der Erfassung von forstlich bewirtschafteten Flächen bietet der LAP einen großen Fortschritt durch die parallele Erfassung von Terrain und Vegetationsoberfläche in nur einer Messkampagne. Grundvoraussetzung ist, dass alle Komponenten exakt aufeinander kalibriert sind und deren jeweiliger Ursprung auf einen gemeinsamen Ursprungspunkt transformiert wird. Die Kolorierung der Punktwolke hilft bei einer visuellen Auswertung und Beurteilung der Ergebnisse.

In der weiteren Entwicklung ist die Integration eines weiteren Lasers in das bestehende LAP-System vorgesehen. Eine grüne Laserquelle soll ermöglichen, auch bathymetrische Scans zu erlauben und auch überflutete Bereich unterhalb des Wasserspiegels erfassen zu können.

## Literatur

- Chiabrando, F., Spanò, A., Sammartano, G., et al. (2017): UAV oblique photogrammetry and lidar data acquisition for 3D documentation of the Hercules Fountain. *Virtual archaeol rev* 8:83. DOI: [10.4995/var.2017.5961](https://doi.org/10.4995/var.2017.5961).
- Elaksher, A.F. (2008): Fusion of hyperspectral images and lidar-based Dems for coastal mapping. *Optics and Lasers in Engineering* 46:493–498. DOI: [10.1016/j.optlaseng.2008.01.012](https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2008.01.012).
- Haala, N., Mandlbürger, G., Cramer, M., Laupheimer, D., Kölle, M. (2019): Kombinierte Analyse hochpräziser Punktwolken aus UAV-Photogrammetrie und -Laserscanning im Hinblick auf Setzungsmessungen.
- Hartling, S., Sagan, V., Maimaitijiang, M. (2021): Urban tree species classification using UAV-based multi-sensor data fusion and machine learning. *GIScience & Remote Sensing* 58:1250–1275. DOI: [10.1080/15481603.2021.1974275](https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1974275).
- Lee, D.H., Lee, K.M., Lee, S.U. (2008): Fusion of Lidar and Imagery for Reliable Building Extraction. *photogramm eng remote sensing* 74:215–225. DOI: [10.14358/PERS.74.2.215](https://doi.org/10.14358/PERS.74.2.215).
- Murtiyos, A., Grussenmeyer, P., Suwardhi, D., et al. (2019): Multi-Sensor 3D Recording Pipeline for the Documentation of Javanese Temples. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci XLII-2/W15:829–834*. DOI: [10.5194/isprs-archives-xxii-2-w15-829-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xxii-2-w15-829-2019).
- Sankey, J.B., Sankey, T.T., Li, J., et al. (2021): Quantifying plant-soil-nutrient dynamics in rangelands: Fusion of UAV hyperspectral-LiDAR, UAV multispectral-photogrammetry, and ground-based LiDAR-digital photography in a shrub-encroached desert grassland. *Remote Sensing of Environment* 253:112223. DOI: [10.1016/j.rse.2020.112223](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112223).
- Stemmler, S., Wiedenmann, D. (2021): Multi-sensor data acquisition for assessing the condition of vegetation. In: *SPIE*, 111–118.
- Yang, W., Liu, Y., He H., et al. (2021): Airborne LiDAR and Photogrammetric Point Cloud Fusion for Extraction of Urban Tree Metrics According to Street Network Segmentation. *IEEE Access* 9:97834–97842. DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3094307](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3094307).
- Zhang, J., Lin, X. (2017): Advances in fusion of optical imagery and LiDAR point cloud applied to photogrammetry and remote sensing. *International Journal of Image and Data Fusion* 8:1–31. DOI: [10.1080/19479832.2016.1160960](https://doi.org/10.1080/19479832.2016.1160960).

## Kontakt

Dominik Merkle

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM

Georges-Köhler-Allee 301, 79110 Freiburg

[dominik.merkle@ipm.fraunhofer.de](mailto:dominik.merkle@ipm.fraunhofer.de)

# Praxisbeispiele aus der Ingenieurvermessung mit LIDAR und Kamera

Carsten Rudolph | Oliver Schmechtig

## 1 Einleitung

Nachdem UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) mit photogrammetrischen Sensoren mittlerweile zum Standard im Bereich der Ingenieurvermessung gehören, wurden zuletzt zunehmend Entwicklungen mit Laserscanner-Sensoren vorgestellt.

Zu Beginn des Trends befanden sich extrem große Trägerplattformen am Markt. Exoten, sowohl in ihrer Dimension als auch in der Art der Implementierung. Der Fokus lag dabei auf der Verwendung von am Markt erhältlichen terrestrischen Scannern. Diese meist sehr schweren Instrumente verlangten den Maschinen einiges ab und sorgten aufgrund ihrer Ausmaße dafür, dass die finale Drohnen-Scanner-Lösung



Abb. 1: Beispiel DJI M600 Pro, Phaseone Setup

gigantische Ausmaße annahm, die den klassischen Drohnenpiloten, der bis dato eher aus dem reinen Modellbau oder Hobbybereich kam, abschreckten.

Heute entwickeln sich die Sensoren rasant weiter. Hersteller reagieren nun auf die

Bedürfnisse der Anwender, insbesondere was Gewicht und Abmessungen angeht. Eine Vielzahl von Produkten flutet aktuell den Markt (siehe Abb. 1).

Es obliegt weiterhin dem Anwender, zu entscheiden, wann welche Lösung zum Einsatz kommen sollte, wobei die Auswahlkriterien immer komplexer werden. Dabei gilt es unter anderem zu entscheiden, welche Messmethode am effizientesten und zielführendsten ist und den benötigten Genauigkeitsanforderungen am besten entspricht, um dem Kunden ein wettbewerbsfähiges und attraktives Angebot unterbreiten zu können. Die Auswahl der Instrumente und Sensoren ist dabei inbegriffen, die Wahl der Trägerplattform, Drohne, ebenso.

## 2 Marktsegmentierung und Klassifizierung der Sensoren

Heutige UAV-Lösungen bieten eine Vielzahl an verwendbaren Sensoren. Da jeder Sensor ein eigenes Kompetenzgebiet darstellt und meist ein eigenes Marktsegment bedient, unterscheiden wir aus unserer Anwendersicht zwischen zwei für uns bedeutsamen Kategorien: Inspektion & Geodäsie (Vermessung & Bau).

Diese Unterteilung nutzen wir in unserem Tagesgeschäft. Sie ist nicht definiert und letztlich entscheidet jeder Anwender darüber, welche Kompetenz er im eigenen Hause auf- und ausbaut und für welche er sich kompetente Partner sucht.

Sehen wir unsere Kompetenz heute in der Datenerhebung und in der Datenverwaltung, vermischen sich die Anforderungen an unseren Berufsstand kontinuierlich. Dies liegt unter anderem daran, dass unsere Auftraggeber sich ebenfalls weiterentwickeln. Es entstehen dabei Synergien.

Sind wir vor Ort für den klassischen Lageplan, befliegen wir möglicherweise auch das bewachsene Nachbargrundstück mit Laserscanner und nutzen zu guter Letzt die Infrarotkamera für die vom Sturm beschädigten Solarmodule. Nicht mehr und nicht weniger wird letztlich vom Kunden erwartet.

Heute laufen wir daher außerdem mit unserer Mobile Mapping Lösung, in Rucksackform, zusätzlich das gesamte Gebiet ab, inklusive Bebauung. Warum der örtliche Mehraufwand? Weil wir wissen, dass Nachbargebäude oder Durchfahrthöhen doch von Interesse sind. Spätestens in der nächsten Planungsphase. Wir arbeiten effizient, erheben daher wohlwissend alle Daten. Ein Ablagesystem, das es uns ermöglicht, die jeweils entsprechende, digitale Schublade zu öffnen – was immer den beteiligten Gewerken im Nachhinein einfällt, wir haben es bereits hochpräzise archiviert. Die Bearbeitung erfolgt nach Bedarf. Wir sammeln daher tendenziell zu viele Daten und nehmen den lokalen Mehraufwand in Kauf, da es uns Fahrten und Folgemessungen erspart. Effizienz, die sich über die gesamte Dauer der Projekte in Wirtschaftlichkeit wandelt.

Im Bereich Inspektion finden wir Sensoren wie Multispektral-, Infrarot- und Hyperspektralkameras. Außerdem hochauflösende Sensoren, wie zum Beispiel eine metrische Vollformatkamera mit 100 MP.

Im Bereich Vermessung finden wir zahlreiche Sensoren, im Kamerabereich meist ab 24 MP aufwärts bis zum High End-Bereich mit 100 MP.

Da der Bereich LiDAR zwar nicht brandneu ist, die Hersteller allerdings zu Beginn zögerlich auf die Bedürfnisse des Marktes reagiert haben, finden sich noch viele Lösungen, die eher im Modellbereich einzugliedern wären. Hier werden LiDAR-Module verwendet, jedoch ohne Synchronisierung von GPS-Daten und RGB-Werten.

Aktuell fluten viele kompakte und integrierte LiDAR-Lösungen den Markt. Diese Sensoren sind meist voll implementiert. Heute findet sich nur noch

vereinzelt handgehaltene Sensorik, sowohl im LiDAR- als auch im Photogrammetriebereich, die in die Luft gebracht wird, da Effizienz und Workflow nicht ansatzweise den heutigen Standards entsprechen und diese Lösungen meist ausschließlich von einer Trägerplattform transportiert werden können.

Die heutigen LiDAR-Sensoren zeichnen sich neben ihren technischen Spezifikationen meist dadurch aus, dass diese individuell an die meisten gängigen, kommerziellen Flugsysteme montiert werden können. Nur einige wenige namenhaften Hersteller folgen diesem Trend nicht.

## 2.1 Kameras

Auf alle gängigen Systeme einzugehen, würde zu viel Zeit in Anspruch nehmen. Wir beschränken uns daher auf unseren „Butter- und Brotsensor“ der in unserem täglichen Geschäft zum Einsatz kommt. Der Fokus liegt dabei auf der Vermessung.

**Phaseone iXM100:** Diese Kamera ist eine metrische Kamera, die über eine Reihe von speziell entwickelten RSM-Objektiven verfügt und an verschiedenen UAV-Plattformen betrieben werden kann (siehe [Abb. 2](#)). Für unsere Zwecke nutzen wir meist das 35 mm-Weitwinkelobjektiv mit festem Fokus. Dieses Setup ermöglicht hochauflösende Fotos. Bei einer Flughöhe von 90 m erreichen wir



Abb. 2: Beispielbilder: Phaseone iXM 100 und DJI Zenmuse

eine stets konstante und reproduzierbare Pixelgröße von 10 mm. Nutzen wir ein 80 mm-Objektiv für beispielsweise Fassadenaufnahmen als Ergänzung zum terrestrischen Scanning zur Vermeidung von schleifenden Schnitten, können wir beispielsweise bei einem Abstand von 21,5 m 1 mm Pixelgröße garantieren.

Vorteile: Schnelle Erfassung von Bereichen aller Art und Größe möglich. Mit den Fotos als Rohdaten betrachtet gibt es Freiraum und Flexibilität in der späteren Nutzung. Je nach Aufgabenstellung dient eine hochauflösende Einzelaufnahme als Lösungsgrundlage oder aber die Daten, die aus einer späteren Prozessierung stammen.

Nachteilhaft dabei ist, dass das Wetter eine beeinflussende Rolle spielt. Wir benötigen ausreichend Licht und möglichst keinen Regen – Tropfen auf der Optik – sonst zwingt uns die Natur (sehr selten), am Boden zu bleiben oder aber eine Abnahme der Qualität der Daten in Kauf zu nehmen. Letzteres ist keine Option. Da wir, wenngleich zwar hochauflösend, georeferenzierte Luftbilder erzeugen, wird stets die Oberfläche festgehalten.

Zwar ist die photogrammetrische Software zur Vermaschung der Bilder heute in der Lage, Punkte, die beispielsweise unter einem Walddach liegen, vereinzelt abzubilden, aber grundsätzlich beschränken uns die bei der Nutzung der Oberflächendaten. Dies gilt ebenso für klassische Vegetation und Bewuchs.

Final bleibt zu sagen, dass das Handling der Daten/Bilder bei großen Projekten hohe Ansprüche an die Hardwareumgebung und Infrastruktur eines Büros stellt. Bilderverbände im Bereich von 5000 bis 20.000 Bilder (á 100 MP) wollen prozessiert und gesichert werden. Der Export erfolgt in gängigen Formaten, wie .las- oder .e57-Dateien und Orthofotos im .tiff-Format, die ebenfalls Speicherstruktur benötigen.

## 2.2 Laserscanner

Am Markt tobt gerade ein Marketingringen um eine etwaige Vormachtstellung eines Produktes. Namhafte Hersteller reagierten auf die Bedürfnisse des Marktes, aber auch Neulinge im Bereich LiDAR-Technologie präsentieren ihre Lösungen. Preislich sind fertige Lösungen ab ca. 20.000 Euro erhältlich und nach oben hin gibt es kaum Grenzen. Einzelne Sensoren sind zu niedrigen Preisen erhältlich.

Die Anwendung bzw. das Projekt definiert, welche Sensorik zum Einsatz kommen muss. Betrachten wir das UAV-Geschäft und unseren Fokus auf Vermessung, stellt sich die Situation aktuell wie folgt dar. Schnelle Projekte, die on-the-fly prozessiert und möglichst vor Ort übergeben werden sollen, fordern den Einsatz von LiDAR. Auch limitierte Lichtverhältnisse oder Nachtflüge – meist im Mining-Bereich – benötigen LiDAR-Technologie.

Unser Standardsensor aktuell: **Zenmuse L1 von DJI** (siehe [Abb. 3](#)). Das System umfasst ein Livox LiDAR-Modul mit hochpräziser IMU und einer Kamera mit einem 1-Zoll-CMOS auf einem Gimbal. Bei einer maximalen Reichweite von etwa 450 m, einer Punktrate von 240k Punkten/s und 3 Returns, mit einer Genauigkeit von 5 cm vertikal und 10 cm horizontal.



Abb. 3: DJI L1

Ergänzend zu Ergebnissen der Photogrammetrie nutzen wir UAS LiDAR komplementär. Vegetation und Bewuchs sind die Paradedisziplinen für diesen Sensor.

Entgegen den bekannten Genauigkeiten des terrestrischen Scannings liefert Drohnen-LiDAR nicht annähernd gleiche Ergebnisse. Ein Abwägen zwischen wirklichem Mehrwert und bereits vorhandenem Equipment (TPS, GNSS, terrestrisches LiDAR, etc.) lässt eine Schlussfolgerung zu: Mehrwert, Effizienz und Wirtschaftlichkeit erhalten wir ausschließlich über die Fusion der verschiedenen Sensoren.

Vorteile UAV LiDAR:

- Einfache Handhabung und schnelle Resultate
- Zügige Datenprozessierung nach wenigen Handgriffen
- Liveansicht der Punktwolke
- Hohe Effizienz in der Abdeckung, pro Flug etwa 2 km<sup>2</sup> möglich
- RGB-Werte werden aus der Kamera automatisch hinzugefügt.
- Bei einer sicheren Flugplanung kann das System nachts arbeiten.

Nachteile: Gibt es grundsätzlich keine, wenn wirtschaftliche Genauigkeitsanforderungen außer Acht gelassen werden.

Erfassung von Vegetation und Bewuchs sowie Punktwolkenerzeugung zur Volumenkalkulation funktionieren einwandfrei. Für uns relevante Abweichungen entstehen erst, wenn wir terrestrische Aufnahmeverfahren mit High End-Sensorik mit Daten aus dem LiDAR verschneiden wollen. Dies setzt Expertise, Wissen und Erfahrung im Umgang mit LiDAR-Daten und Punktwolken voraus.

### 3 Projektbeispiel Ingenieurvermessung

Die im Rahmen der Ingenieurvermessung mit UAV-Systemen bearbeiteten Projekte können in mindestens drei unterschiedliche Bereiche klassifiziert werden:

1. UAV-Einsatz im ländlichen Bereich mit geringeren Genauigkeitsanforderungen
2. UAV-Einsatz bei technischen Objekten, wie z. B. Gebäuden oder Industrieanlagen, mit sehr hohen Genauigkeitsanforderungen und insbesondere sehr hoher Detailschärfe!
3. UAV-Einsatz bei Gewerken im Wasserbaubereich

Anschließend wollen wir an einem Beispiel aus dem zweiten Bereich die Details näher betrachten.

### 3.1 Aufgabenstellung

Eine klassische Aufgabe dabei ist die Erstellung eines verformungsgerechten Bestandsaufmaßes eines Gebäudes oder ähnlichen Objekts mittels terrestrischem Laserscanner in Kombination mit einer UAV-Datenerfassung, zur Erfassung der exponierten Gebäudeteile (höhergelegene Fassaden, Dachansichten oder vom Boden nicht zugängliche Bereiche).

Im Regelfall ergeben sich diese Aufgabenstellungen bei der Umbau- und Ausbauplanung eines bestehenden oder denkmalgeschützten Gebäudes, Objektes oder Industriestandortes zur Erstellung von Grundrissplänen, Schnittdarstellungen, Fassadenplänen und Dachdokumentationen.

### 3.2 Lösungsansatz

Für das vorgestellte Objekt werden die Innenräume und die zugänglichen Außenbereiche mit terrestrischen Laserscansystemen erfasst. Zusätzlich erfolgt eine Datenerfassung der nicht zugänglichen Bereiche mit einem UAV-System mit einer Kamera bzw. einem UAV-System mit einem Laserscanner. Dabei wird ein entsprechender Teil des Objektes, so weit als möglich, überlappend mit allen Sensoren erfasst.

Die Verknüpfung der mit den unterschiedlichen Sensoren erhaltenen Daten erfolgt über ein im Vorfeld erstelltes lokales Festpunktfeld.

#### 3.2.1 Innenaufnahme mit terrestrischen Laserscansystemen



Abb. 4: Datenerfassung mit NavVis VLX

Für eine effiziente Erfassung der Innenräume wird standardmäßig ein NavVis VLX eingesetzt (siehe Abb. 4). Dadurch kann der überwiegende Teil der Vermessung rasch abgeschlossen werden und der Betrieb vor Ort wird geringstmöglich eingeschränkt.

Bei dunklen Räumlichkeiten, reduzierten Raumhöhen oder schlechten Zugangsmöglichkeiten wurden alternative Laserscanner wie der LEICA RTC360 oder der Leica BLK2Go für eine effektive und ergänzende Datenerfassung verwendet, um das Gebäude komplett zu erfassen (siehe Abb. 5).

Der Außenbereich wurde unabhängig davon mit dem LEICA RTC360 soweit möglich



Abb. 5: Leica RTC360 bei geringer Beleuchtung oder reduzierter Raumhöhe

mit kürzerem und längerem Abstand ebenfalls erfasst, um einen möglichst verbindlichen Überlappungsbereich zu erhalten.

### 3.2.2 Workflow UAV-Befliegung und Auswertung

Sofern keine lokale Massenermittlung oder sonstige Berechnung ohne räumlichen Bezug erfolgt, empfiehlt sich eine Befliegung ausschließlich unter Verwendung von ausreichend vielen gut platzierten Pass- und Kontrollpunkten (siehe Abb. 6).

Kontrolle ist stets ein essenzieller Bestandteil eines jeden Projekts. Ob bei Verwendung einer Basis, eines PPK- oder RTK-Systems: Benötigt werden Passpunkte, insbesondere bei späterer Fusion mehrerer verschiedener Aufnahmeverfahren und Sensordaten. Dies gilt daher sowohl für die Photogrammetrie als auch für die LiDAR-Anwendung.



Abb. 6: Dem Projekt angemessen: Beispiele zur Passpunktmessung und Markierung

### 3.2.2.1 Ablauf photogrammetrische Befliegung

Im Vorfeld des Befliegens ist dafür Sorge zu tragen, dass alle notwendigen Genehmigungen vorliegen. Der jeweilige Start- und Landepunkt ist örtlich abzusichern. Etwaige im Innendienst vorbereitete Flugplanungen müssen zwingend in der Örtlichkeit überprüft und im Bedarfsfall angepasst werden.

Vor dem Flug werden UAV, Drohne und Sensor und deren jeweilige Einstellungen und Parameter geprüft. Bildflüge mit Kamerasensoren setzen ein hohes Maß an Wissen und Erfahrung im Bereich der Bildeinstellungen voraus. Shutter-speed, Isowerte und sonstige Belichtungseinstellungen sind essenziell, was die spätere Qualität des Bildmaterials betrifft.



Abb. 7: Beispielbilder zur Flugphase „Photogrammetrie“ mit metrischer Kamera

UAV-bezogene Standardparameter wie Längs- und Querüberdeckung, Flughöhe, Pixelauflösung und Fluggeschwindigkeit nehmen ebenso Einfluss auf die Qualität der Daten. Je nach Projekt werden Teile punktuell auch manuell befliegen. Letzteres trifft überwiegend für Obliqueaufnahmen zu, die ergänzend zur klassischen Nadirbefliegung gemacht werden. Der klassische Bildflug zur Erzeugung von Senkrechtaufnahmen erfolgt im Regelfall automatisiert.

Der Pilot folgt dem UAV, sodass ein stetiger visueller Kontakt gewährleistet ist (siehe auch Abb. 7). Innerorts empfiehlt es sich daher, ein Team einzusetzen, das in direktem Funkkontakt steht und die stetige Sicherheit im Flug gewährleistet. Insbesondere in Städten empfiehlt es sich, den Piloten gesondert vor neugierigen Personen zu „schützen“, damit seine Aufmerksamkeit der Drohne und deren Flug gilt. Je nach Flugplanung werden weitere Flüge von mehreren Standorten ausgeführt.

Anschließend werden die Daten lokal gesichert und auszugsweise entwickelt und im Rahmen der Qualitätskontrolle begutachtet.

Die spezifische vollumfängliche Bildentwicklung unseres Kamerasensors, der Phaseone iXM100, erfolgt vollständig im Innendienst. Hier kann rückwirkend eine Anpassung und Bearbeitung der lokal gewählten Einstellungen vorgenom-

men werden. Sind Bilder aufgrund einer im Flug aufreißenden Wolkendecke überbelichtet, können diese dementsprechend bearbeitet werden. Hierbei werden keine Grundeinstellungen des Rohbildes verändert.

Der letzte Schritt ist das Prozessieren der Daten. Dieses erfolgt auf speziellen Hochleistungs-Workstations, die das Bildmaterial zu 3D-Modellen vermaschen. Dies nimmt je nach Projektvolumen und Anzahl der Bilder Zeit in Anspruch und erfolgt meist, einmal angestoßen, remote und über Nacht. Der Datenexport erfolgt nach Fertigstellung. Neben hochauflösenden Bildern der 100 MP-Kamera exportieren wir Punktwolken im .e57- oder .las-Format und Luftbilder als georeferenziertes Geo-TIFF.

### 3.2.2.2 Ablauf UAV LiDAR-Befliegung

Wie beim Bildverbundflug muss auch hier die notwendige Genehmigung vorliegen und Start- und Landepunkte sind entsprechend zu sichern. Grundsätzlich gleicht der Ablauf des LiDAR-Fluges dem der Photogrammetrie. Die Drohne



Abb. 8:  
Beispielbilder  
zur Flugphase  
mit LiDAR

fliegt mit Sensor auf einer vorab geplanten Flugroute. Die LiDAR-Einstellungen sind gemäß den Projektanforderungen zu setzen. Dies umfasst ebenso Einstellungen, die sich auf die Trägerplattform beziehen, Überlappungen und Geschwindigkeit.

In der von uns gewählten LiDAR-Lösung gibt es die Besonderheit, dass der Sensor nicht starr befestigt ist, sondern sich auch nach oben und unten neigen lässt. Wir können neben horizontalen Flügen auch vertikale Objekte wie Fassaden oder Überhänge befliegen (siehe auch [Abb. 8](#)). Während der Befliegung kann eine Vorschau der entstehenden Punktwolke im RC-Display visualisiert werden. Wahlweise steht eine Fusion der LiDAR-Daten mit den Werten der eingebauten RGB-Kamera zur Verfügung. Ein sehr hilfreiches Tool, das Rückschlüsse über den Fortschritt und die Vollständigkeit der Datenaufnahme zulässt.

Nach dem Flug werden die Daten gesichert. Eine Auswertung der LiDAR-Befliegung erfolgt in einer dem Sensor zugehörigen SfM (Structure from Motion)-

Auswertesoftware und steht binnen Kürze zur Verfügung. Es werden dazu keine Hochleistungsrechner benötigt, lediglich ausreichend Speicherplatz.

Ein weiterer Unterschied liegt im Zeitaufwand der Datenprozessierung. Während bei der photogrammetrischen Prozessierung Pass- und Kontrollpunkte meist manuell überprüft und händisch ausgerichtet werden müssen, beziehen sich die LiDAR-Befliegungsdaten auf eine Standpunktcoordinate oder die in Echtzeit generierten RTK-Daten und fließen unmittelbar in der Software in die Bildinformation ein. Festpunkte dienen dann primär als Kontrollpunkte oder zur gegenseitigen Registrierung von Punktwolken verschiedener Herkunft. Exportiert werden RGB-Punktwolken im .e57- oder .las-Format.

## 4 Auswertung

Die Passpunkte zur Referenzierung bzw. Verknüpfung der terrestrischen Laser-scandaten bzw. der Ergebnisse aus den Befliegungen werden vorab geodätisch bestimmt und berechnet. Anschließend werden die Rohdaten des NavVis VLX in die NavVis Ivion Software importiert. Mit Hilfe der Festpunkte erfolgt hier die Prozessierung der Daten.

Die Daten vom RTC360 und BLK2GO werden in Cyclone referenziert und als .e57-Datei exportiert. Diese Datei sowie die Punktwolken aus der Befliegung (ebenfalls .e57) werden zusätzlich in Ivion importiert. Anschließend erfolgt die Referenzierung der einzelnen Datensätze in Ivion, um eine gesamte Punktwolke zu erhalten. Diese liegt georeferenziert vor und enthält alle erhobenen Daten. Sie kann gesamt oder in Teilen als .e57-Datei exportiert werden und dient als Grundlage für die weitere Bearbeitung des Projekts in 3D/CAD-Programmen (Cyclone 3DR, 3DWORX, Cloudworx for Bricscad).

Des Weiteren kann in Ivion ein virtueller Rundgang für den Kunden erstellt werden, der online über den Ivion-Server abrufbar ist (mit Benutzername/Passwort).

## 5 Ergebnisse

Auf Grundlage der Daten lassen sich die unterschiedlichsten Endprodukte erstellen, die Möglichkeiten sind hier nahezu grenzenlos. In vorliegendem Projekt werden Grundrisse sowie Längs- und Querschnitte durch das Gebäude erstellt. Außerdem erfolgt eine detaillierte Fassadenauswertung (Denkmalschutz). Gerade bei den Schnitten und den Fassaden wäre eine exakte Auswertung ohne Kombination der unterschiedlichen Messinstrumente und Sensoren schier unmöglich (z. B. Stärke Dachhaut, Fassadendetails).

## 6 Zusammenfassung

Im dargestellten Projekt kommen die gesammelten UAV LiDAR-Daten unterstützend zum Einsatz. Bereiche, in denen beim terrestrischem Scanning vom Boden schleifende Schnitte entstünden, werden damit befüllt. Ebenso Bereiche, die nicht zu betreten waren, wie Dächer. Die Zeitersparnis beim Einsatz des UAV ist im Vergleich zum Umbau oder Standpunktwechseln beim terrestrischen Scanner (falls überhaupt möglich) enorm, erzielt aber nicht die gleichen Ergebnisse im Bereich Punktdichte, Genauigkeit und Intensität. Umgekehrt stellt es aber oft die einzige gangbare Möglichkeit dar, überhaupt Daten erfassen zu können.

Welcher Sensor, ob UAV LiDAR oder klassische Photogrammetrie, welche Messmethode und welches Verfahren die passende Lösung sind, gilt es im jeweiligen Projekt vorab zu bestimmen bzw. zu kombinieren und anzuwenden. Diese Frage beschäftigt uns im Tagesgeschäft.

Die Möglichkeiten und Resultate im Bereich Photogrammetrie sind beeindruckend. Einzig das Thema der Genehmigungsprozesse wird zunehmend komplexer.

Dem gegenüber steht der örtliche projektspezifische Zeitaufwand im direkten Vergleich zu klassischen Aufnahmemethoden wie TPS, GNSS oder terrestrischen Laserscannern. Dieser ist oft minimal. Viele Schritte der Datenprozessierung können überwiegend autonom und über Nacht stattfinden und sind daher zu vernachlässigen. Die Ergebnisse lassen sich homogen mit Daten anderer Quellen vereinen. Weiterhin problematisch sind aber: hochkomplexe Strukturen, Bewuchs und Vegetation.

Laserscanning mit dem UAV-System ist daher für uns ein komplementärer Bestandteil unseres Workflows. Für eben diese Anwendungen, komplexe Strukturen (beispielsweise engmaschige Gitterzäune), für Bewuchs und Vegetation verwenden wir LiDAR. Sonderanwendungen, wie Nachtflüge, bleiben hier unberücksichtigt. Zwar gibt es am Markt LiDAR-Sensoren, die deutlich höhere Genauigkeiten in X, Y und Z erzielen und eher den technischen Spezifikationen von terrestrischen Laserscannern ähneln, doch gilt es Effizienz und Wirtschaftlichkeit abzuwägen.

2020/21 lag ein solches LiDAR-System bei einem Anschaffungswert zwischen 100.000 und 200.000 Euro. Schnell ist abzuleiten, für wie viele Projekte der Sensor in der Luft sein müsste, bis das Investment Gewinn bringt. Zu berücksichtigen sei dabei: nicht jedes Projekt muss und kann befliegen werden. Sowohl das Drohnensegment als auch der dazugehörige Sensormarkt sind so schnelllebig, dass heutige Sensoren morgen bereits veraltet sind.

Die Technologie wird tendenziell erschwinglicher. Ähnlich wie im Bereich der GNSS- oder auch der terrestrischen Sensorik ist qualitativ hochwertiges Equipment heute deutlich attraktiver als noch vor zwei Jahren.

Letztlich entscheidet die Anzahl der tatsächlichen UAV LiDAR-Projekte und die tatsächliche Anwendung darüber, welcher (LiDAR-)Sensor es sein muss. Unter dem Aspekt, dass GNSS, TPS, terrestrischer LiDAR und mobile, handgehaltene LiDAR-Systeme bereits im Büro vorhanden sind, fragen wir uns, was wirklich notwendig ist oder mit bereits vorhandener Technologie abgearbeitet werden kann. Innovative Technik hat ihren Preis, muss sich aber refinanzieren, um wirtschaftlich zu bleiben.

Fazit: Im Alltagsgeschäft empfiehlt es sich weiterhin, verschiedene Sensorik zu kombinieren. Terrestrische Scanner bieten weiterhin die höchsten Genauigkeiten und es liegt an der eigenen vorhandenen Expertise, Messmethoden und Werkzeuge so zu kombinieren, dass wir unseren Ansprüchen und denen unserer Auftraggeber gerecht werden.

## Literatur

Schmechtig, O. (2020): Unmanned Aerial Vehicle – Aktueller Stand und technische Entwicklungen. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Wißner-Verlag, Augsburg, 9–14.

dji: [www.dji.com](http://www.dji.com). Internetseite von dji mit weitergehenden Systeminformationen.

Hexagon Leica Geosystems: [www.leica-geosystems.com](http://www.leica-geosystems.com). Internetseite der Hexagon Leica Geosystems mit weitergehenden Systeminformationen.

NavVis GmbH: [www.navvis.com](http://www.navvis.com). Internetseite der NavVis GmbH mit weitergehenden Systeminformationen.

Phase One: <https://geospatial.phaseone.com/cameras>. Internetseite von Phase One mit weitergehenden Systeminformationen.

## Kontakt

Dipl.-Ing. Carsten Rudolph  
AiSurvey GmbH  
Franzgraben 6–8, 34125 Kassel  
[info@ai-survey.com](mailto:info@ai-survey.com)

Dipl.-Ing. Oliver Schmechtig  
Ingenieurbüro Schmechtig  
Eichenstraße 9, 84061 Ergoldsbach  
[office@schmechtig.com](mailto:office@schmechtig.com)

# UAV-basiertes Laserscanning für Topographie und Bathymetrie – State-of-the-Art und Trends

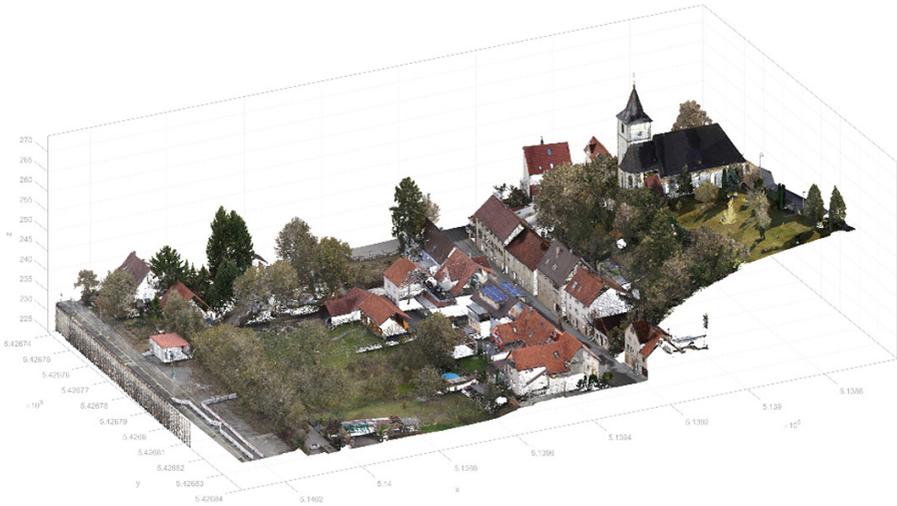
Gottfried Mandlbürger

## 1 Einleitung

Der Einsatz von unbemannten Fluggeräten (engl. Unmanned Aerial Vehicles, UAV) für die dreidimensionale Erfassung von Topographie, Vegetation, Gebäuden und Infrastruktur ist mittlerweile zu einem Standard in der luftgestützten Datenerfassung geworden. Während beim Einsatz von Kamerasystemen bereits auf eine langjährige Geschichte geblickt werden kann (Colomina und Molina 2014), ermöglichen Fortschritte in der Sensorminiaturisierung und der Plattformentwicklung mittlerweile auch die Integration von kompakten Laserscannern auf UAV-Plattformen.

UAV-Laserscanning liefert dichte 3D-Punktwolken der Erdoberfläche und der darauf befindlichen Objekte. Dabei ermöglichen die im Vergleich zu bemannten Plattformen geringeren Flughöhen und -geschwindigkeiten eine höhere Punktdichte und eine detailliertere Beschreibung der erfassten Oberflächen und Merkmale. Im Gegensatz zu Airborne Laserscanning (ALS) kann UAV-Laserscanning (ULS) als Nahbereichslaserscanning bezeichnet werden, wobei ALS und ULS hinsichtlich der fundamentalen Prinzipien ähnlich sind (Mandlbürger 2022). In beiden Fällen haben wir es mit einem Multisensor-Messsystem zu tun, bei welchem die Position und Raumstellung der Messplattform mittels globaler Satellitennavigation (Global Navigation Satellite System, GNSS) und einer inertialen Messeinheit (Inertial Measurement Unit, IMU) bestimmt wird und der Laserscanner die Erdoberfläche bzw. Messobjekte durch die Vorwärtsbewegung der Messplattform und die kontinuierliche Strahlablenkung quer zur Flugrichtung abtastet. Die Entfernungsmessung erfolgt dabei in der Regel durch das Impulslaufzeitverfahren (Time-of-Flight, ToF), bei dem die Zeitdifferenz zwischen dem ausgehenden Laserpuls und dem Eintreffen des Empfangssignals gemessen wird (Pfeifer et al. 2015, Shan und Toth 2018).

Beim Impulslaufzeitverfahren besteht grundsätzlich die Möglichkeit, zu einem ausgesendeten Laserpuls mehrere Objektpunkte entlang der Laserstrahlachse zu erhalten. Diese generelle Mehrzielfähigkeit von Laserscanning ist auch bei modernen, miniaturisierten LiDAR (Light Detection and Ranging) Sensoren

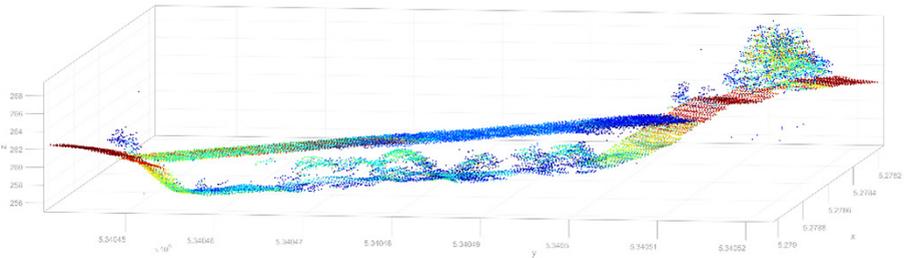


**Abb. 1:** 3D-UAV-Laserscanning Punktwolke, Hessigheim, Deutschland. Daten: ISPRS H3D Benchmark (Kölle et al. 2021). Die RGB-Farbinformation stammt aus simultan aufgenommenen Schrägluftbildern. Visualisierung mit der Software OPALS (Pfeifer et al. 2014).

vorhanden, wobei High End-Geräte auch in der Lage sind, die volle Echowel-lenform aufzuzeichnen bzw. direkt im Empfänger zu verarbeiten (Pfennigbauer et al. 2014). Im Falle von ULS führt diese sogenannte Multitarget-Fähigkeit zusammen mit hohen Messraten zu einer bislang unerreichten 3D-Punktdichte bei der Erfassung von Topographie, Gebäuden, Infrastruktur und Vegetation (vgl. [Abb. 1](#)).

Beim ULS liegen die typischen Flughöhen im Bereich von 50 bis 200 m über Grund und die Fluggeschwindigkeiten in etwa bei 6 bis 10 m/s (20–35 km/h). Zusammen mit Pulswiederholraten von  $\geq 200$  kHz entstehend dadurch Punktdichten von  $\geq 100$  Punkten/m<sup>2</sup>. Hohe Punktdichte und geringer Punkt-zu-Punkt-Abstand führen zusammen mit dem aufgrund der niedrigen Flughöhe kleinen Laserabtafstreck von ca. 3 bis 10 cm zu einer räumlichen Auflösung im Subdezimeterbereich, was neue Anwendungsfelder für luftgestütztes Laserscanning wie Präzisionslandwirtschaft, Strukturanalysen im Forstbereich, Korn- und Formrauigkeitsbestimmung in der Hydrologie und Hydraulik, Stromleitungserfassung, kleinräumige Veränderungsdetektion in der Geomorphologie etc. ermöglicht (Neuville et al. 2021, Escobar Villanueva et al. 2019, Dalla Corte et al. 2020, Mandlbürger et al. 2020).

Während die wesentliche Stärke von ALS von bemannten Plattformen aus die effiziente, großflächige Erfassung der Topographie und Vegetation ist, findet ULS meist im Kontext von Korridorerkennung (Infrastruktur wie Straßen und



**Abb. 2:** 3D-UAV-Laserbathymetrie Punktwolke eingefärbt nach Reflektivität (blau:  $-30$  dB  $\rightarrow$  gelb:  $-20$  dB  $\rightarrow$  rot:  $-10$  dB), Schotterteich, Niederösterreich (Ausschnitt); Daten: Riegl VQ-840-G topo-bathymetrischer Laserscanner, Aufnahme datum: 09.02.2022.

Leitungen, Transekte in der Forstwirtschaft, Erfassung von Flüssen und deren Umland) sowie zur hochauflösenden Erfassung von Detailgebieten (Gebäude, Anlagen, Tagebau, etc.) Anwendung (Azevedo et al. 2019, Ren et al. 2019, Dalla Corte et al. 2020).

Während zuerst topographische Laserscanner mit einer Wellenlänge im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums entwickelt wurden, ist derzeit ein klarer Trend in Richtung bathymetrischer Laserscanner für die Erfassung des Unterwasserbereichs zu erkennen (Mandlburger et al. 2020). Wesentlicher Aspekt in diesem Zusammenhang ist die Augensicherheit, da bathymetrische Laserscanner grünes Laserlicht verwenden, welches die Eigenschaft besitzt, Wasser durchdringen und damit bis an die Netzhaut gelangen zu können. Auch im topo-bathymetrischen Kontext eröffnet die höhere räumliche Auflösung neue Anwendungen wie etwa die Erfassung von Unterwasservegetation (Mandlburger et al. 2021). Ein entsprechendes Beispiel ist in [Abb. 2](#) dargestellt.

Der weitere Artikel ist wie folgt strukturiert: In Abschnitt 2 wird kurz das Grundkonzept von UAV-basiertem Laserscanning zusammengefasst. Abschnitt 3 beschreibt die unterschiedlichen ULS-spezifischen Sensorsysteme und deren Unterschiede. ULS-Laserscanner für die Erfassung von Unterwassertopographie werden im Abschnitt 4 besprochen. Der Artikel schließt mit einem zusammenfassenden Ausblick (Abschnitt 5).

## 2 Grundlagen des UAV-Laserscannings

Generell unterscheidet sich das grundlegende Messprinzip von UAV-basiertem Laserscanning nicht von dem des Flugzeuglaserscannings. In beiden Fällen beschreiben die folgenden drei Gleichungen im Wesentlichen den Messprozess (Pfeifer et al. 2015):

$$R = \frac{1}{2}(t_e - t_s)c_g \quad (1)$$

$$P_E = \frac{P_S}{(\gamma_s R)^2 \pi/4} \cdot \sigma \cdot \frac{D_E^2 \pi/4}{4\pi R^2} \cdot \eta_{ATM} \eta_{SYS} \quad (2)$$

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}_0(t) + \mathbf{R}_H(\lambda(t), \varphi(t)) \mathbf{R}(t) \left( \mathbf{t} + \mathbf{R}_M \mathbf{p}(r(t), \alpha(t), \beta(t)) \right) \quad (3)$$

Gleichung (1) fasst das Prinzip der Distanzmessung über das Impulslaufzeitverfahren zusammen. Die gemessene Entfernung  $R$  ergibt sich dabei aus der Zeitdifferenz zwischen dem Aussenden des Laserpulses ( $t_s$ ) und dem Empfangen des rückgestreuten Echopulses ( $t_e$ ) multipliziert mit der Gruppenlichtgeschwindigkeit  $c_g$  und dividiert durch zwei wegen des Hin- und Rückwegs. Die Laser-Radar-Gleichung (2) beschreibt den Zusammenhang zwischen der empfangenen, optischen Leistung  $P_E$  von der Ausgangsleistung  $P_S$ , in Abhängigkeit der Entfernung  $R$ , der Laserstrahldivergenz  $\gamma_s$ , der Größe der optischen Apertur  $D$  und system- und atmosphärenbedingten Verlustfaktoren ( $\eta_{ATM} \eta_{SYS}$ ). Der Rückstreuquerschnitt  $\sigma$  ist eine Größe, welche unabhängig von den Missions- und Geräteparametern ist, und alle Materialeigenschaften des beleuchteten Objekts zusammenfasst.

Gleichung (3) schließlich ist die Gleichung der direkten Georeferenzierung, mit welcher ausgehend von den kartesischen Koordinaten eines Punktes im Scanner-eigenen Koordinatensystem ( $\mathbf{p}$ ), die sich ihrerseits aus Entfernung und Auslenkwinkel ( $r, \alpha, \beta$ ) ergeben, die 3D-Objektpunktkoordinaten  $\mathbf{P}(t)$  in einem erdzentrierten, erdfesten Koordinatensystem (meist: WGS84) berechnet werden. Dabei werden durch fortgesetzte Rotationen und Verschiebungen Schiefstellungen zwischen dem Scannersystem und dem Plattformsystem ( $\mathbf{R}_M$ , Boresightwinkel), Offsets zwischen dem Phasenzentrum der GNSS Antenne und dem Scannerzentrum ( $t$ , Hebelarm), die Schrägstellung der Plattform ( $\mathbf{R}(t)$ ), die Stellung der Plattform in Bezug auf das Erdellipsoid ( $\mathbf{R}_H$ , lokaler Horizont) und schließlich die Position des Messsystems ( $\mathbf{P}_0(t)$ ) berücksichtigt. Für eine detaillierte Besprechung sei auf Pfeifer et al. (2015) und Shan und Toth (2018) verwiesen.

Abb. 3 zeigt die im UAV-Laserscanning verwendeten Mechanismen zur Strahlablenkung. Neben konventionellen Scanmechanismen wie rotierender (a), oszillierender (b) und nutierender Spiegel (Palmer-Scanner, c), die auch im ALS-Fall verwendet werden und ein Gesichtsfeld (Field-of-View, FoV) von  $40^\circ$  bis  $90^\circ$  aufweisen, kommen bei ULS auch Ablenkungsmechanismen zum Einsatz, welche die Erfassung eines vollen  $360^\circ$ -Panoramas erlauben. Dies kann entweder über rotierende Spiegelräder realisiert sein, die im  $45^\circ$ -Winkel abgeschrägt sind (d) oder über sogenannte Profillinien-Scanner, bei denen keine Strahl-

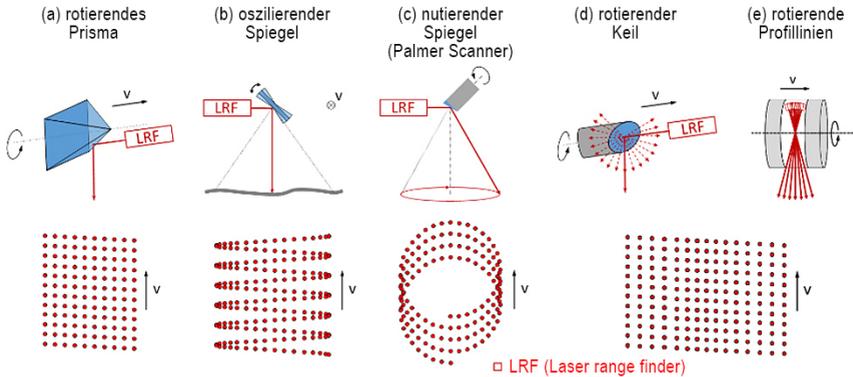


Abb. 3: Typische ULS-Scanmechanismen; (a) rotierendes, mehrseitiges Prisma, (b) oszillierender Spiegel, (c) nutrierender Spiegel (Palmer Scanner), (d) rotierender Prismenkeil, (e) rotierendes Laserbündel. Mit (d) und (e) können 360° Panoramen erfasst werden.

ablenkung erfolgt, sondern ein Laserstrahlbündel um eine gemeinsame Achse rotiert (e). Bei den Profillinien-scannern ist die Rotationsachse im ULS-Fall meist horizontal angeordnet, womit die Erfassung unterhalb der UAV-Plattform, seitlich davon und sogar über dem Horizont möglich ist. Dies ist vor allem zur Datenerfassung in Straßenschluchten, Flusskorridoren, engen Alpentälern etc. von Vorteil.

### 3 Sensorkonzepte

Je nach Ausdehnung und Gewicht kommen als Trägerplattformen für UAV-Laserscanner generell Multikopter und auch Flächenflieger in Frage. Der Vorteil der Multikopter liegt in der Wendigkeit, dem geringen Platzbedarf für Starten und Landen und der tendenziell höheren Nutzlast (payload). Der Vorteil der Flächenflieger hingegen liegt in der meist größeren Reichweite und maximalen Flugdauer (flight endurance). Während Nur-Flügler wegen der beschränkten Nutzlast meist nur für Kameraintegration geeignet sind, bieten sich Senkrechstartler (Vertical Take-Off and Landing, VTOL) immer bei komplexer Topographie und hohen Flächenleistungsanforderungen an.

Von der Sensorik her kommen für UAV-Laserscanning die folgenden Sensor-konzepte zum Einsatz:

- Konventionelle Sensoren
- Profillinien-scanner
- Flash LiDAR-Sensoren
- Hybridsysteme

**Tab. 1: Performanceparameter von kommerziell verfügbaren UAV-Laserscannersystemen**

	Sensor	Masse	Wellenlänge	Messdist.	Präz. Gen.	Messrate	Strahldivergenz	d@50m	FoV	Laser
		[kg]	[nm]	[m]	[mm]	[kHz]	[mrad]	[mm]	°	
I	VUX1-UAV	3.75	1550	300	5/10	500	0.5	25	330	1
II	miniVUX-2UAV	1.60	905	250	10/15	200	1.6 × 0.5	80 × 25	360	1
III	VUX-240	4.10	1064	650	15/20	1500	0.35	18	75	1
IV	CL-90	3.85	1550	175	5/10	500	0.3	15	90	1
V	CL-360	3.50	1550	300	5/10	500	0.3	15	360	1
VI	Puck LITE	0.59	903	100	--/30	300	3.0 × 1.2	150 × 60	360	32
VII	Alpha Puck	3.50	903	300	--/30	2400	3.0 × 1.5	150 × 75	360	128
VIII	AVIA	0.50	905	240	20/--	240	0.7 × 5	35 × 250	75	6
IX	HORIZON	1.00	905	240	20/--	130	0.7 × 5	35 × 250	80	6

Die Grundlagen und Unterschiede der genannten Konzepte werden in den folgenden Unterabschnitten kurz erläutert. Tab. 1 gibt einen Überblick über die Geräteparameter von ausgewählten am Markt verfügbaren Sensorsystemen.

### 3.1 Konventionelle Sensoren

Diese Kategorie an Sensoren übernimmt die wesentlichen Designelemente aus dem Flugzeuglaserscanning. Die entsprechenden UAV-Scanner sind lediglich kompakter und leichter, arbeiten sonst aber analog zu ALS Sensoren. In aller Regel kommt dabei ein Lasertransmitter mit hoher Taktrate (> 200 kHz) zum Einsatz und das rückgestreute Signal wird von einem einzigen Receiver empfangen und verarbeitet. Zur Strahlableitung werden rotierende, oszillierende oder nutierende Spiegel verwendet (Abb. 3a-d). Die Geräte dieser Kategorie unterscheiden sich meist lediglich durch die maximale Messentfernung von anderen ALS Sensoren, kaum aber im Bereich der Distanzmessgenauigkeit (5–20 mm) und der Strahlaufweitung (0,25–1,5 mrad). Diese Geräte sind daher tendenziell dem High End-Bereich zuzuordnen (Tab. 1, I-V) und erlauben hochauflösende Kartierung in hoher geometrischer Qualität, sofern die LiDAR-Sensoren mit qualitativ hochwertigen GNSS- und IMU-Sensoren gekoppelt sind, die auch eine präzise Verortung der Messplattform erlauben. Vor allem an die GNSS Komponente werden hohe Anforderungen gestellt, da Fehler in der Positionierung 1:1 in die 3D-Punktwolke übertragen werden. Bei den inertialen Messeinheiten sind

die Ansprüche wegen der kürzeren Distanzen ein wenig geringer als beim benannten ALS.

### 3.2 Profillinien-scanner

Profillinien-scanner (Tab. 1, VI-VII) verzichten auf eine Strahlablenkungseinheit und setzen ein Bündel von fächerförmig angeordneten LiDAR-Sensoren ein (Abb. 3e). Das rückgestreute Licht einer Laserquelle (Transmitter) wird über die Empfangsoptik auf einen individuellen Empfänger (Receiver) fokussiert, wobei der Empfänger so ausgerichtet ist, dass er möglichst nur die aus einer bestimmten Richtung kommende Laserstrahlung aufnimmt (Okunsky und Nesterova 2019). Aus dieser Sicht sind Profillinien-scanner vom System her den Fächerecholoten in der SONAR-Vermessung ähnlich, wo die Echophone auch stark richtungsabhängig ausgerichtet sind. Von der Bauweise her ermöglicht der Wegfall der Ablenkungseinrichtung ein kompaktes Design. Die räumliche Auflösung innerhalb des Profillinienfächers ist dabei abhängig von der Anzahl der verwendeten Laserkanäle, wobei Geräte mit 16, 32, 64 und 128 Kanälen typisch sind. Je mehr Laserkanäle verwendet werden, desto höher ist auch der Kalibrierungsaufwand, da jeder Transmitter mit seinem korrespondierenden Receiver abgeglichen werden muss. Die eingesetzten Laserquellen und Empfänger sind meist weniger hochwertig als die bei konventionellen Systemen verwendeten Komponenten, was sich in einer etwas geringeren Messgenauigkeit niederschlägt (vgl. Tab. 1). Sensoren dieser Art kommen hauptsächlich im Bereich von Fahrerassistenzsystemen zum Einsatz (Frost 2016).

### 3.3 Flash LiDAR-Sensoren

Im Gegensatz zu den vorgenannten Konzepten, bei denen stets ein stark kollimierter Laserstrahl verwendet wird, kommt bei Flash LiDAR-Sensoren ein sehr breiter Laserstrahlkegel zur Anwendung, der eine ganze Szene ausleuchtet (Schwarz 2010, Hansard et al. 2021, Lohani et al. 2021). Das Empfangssignal wird dabei von einem Framesensor erfasst, wobei jede Zelle ein individueller LiDAR-Empfänger ist. In Analogie zur Bilddatenerfassung, bei der jedes Pixel die Intensität der rückgestreuten Sonnenstrahlung im jeweiligen spektralen Empfindlichkeitsbereich aufzeichnet, messen die Zellen eines Flash LiDAR-Sensors Entfernungen über das Impulslaufzeitmessprinzip. Da die eingehende Laserstrahlung über die Empfangsoptik dabei auf die Fokalebene, in der sich der Framesensor befindet, fokussiert wird, spricht man oft auch von Focal Plane Array (FPA) LiDAR. Da bei diesem Sensorkonzept andererseits keine beweg-

lichen Teile benötigt werden, ist auch die Bezeichnung Solid State LiDAR gebräuchlich.

Wesentlicher Vorteil dieses Sensorkonzepts ist die Möglichkeit der ausgeprägten Miniaturisierung. Geräte dieser Klasse können wegen des geringen Gewichts daher leicht auf UAV-Plattformen montiert werden. Flash LiDAR-Sensoren spielen derzeit im UAV-Laserscanning allerdings noch eine untergeordnete Rolle, finden aber verstärkt Einsatz im Bereich 3D-Vision, Robotik und in der Fahrzeugindustrie. Vor allem im Kontext von autonomem Fahren ist die simultane Erfassung einer gesamten Szene (snap shot) wesentlich, was für Kartierungsaufgaben weniger bedeutsam ist. Durch die Miniaturisierung sind hier bei Flash LiDAR-Sensoren auch Einschränkungen hinsichtlich Reichweite und Messgenauigkeit in Kauf zu nehmen. Zukünftig ist aber auch im ULS-Bereich von einer steigenden Bedeutung dieser Sensorkategorie auszugehen.

### 3.4 Hybridsysteme

Aufgrund der Nachteile der konventionellen Scanner (hohe Kosten) und der Profillinien-scanner (aufwändige Kalibrierung, Beschränkung der Auflösung durch die Laserkanalanzahl) haben sich in jüngster Vergangenheit Systeme entwickelt, die als Hybridsysteme bezeichnet werden können (Liu et al. 2022). Ziel dieser Entwicklung war einerseits die Sensorminiaturisierung betreffend Größe und Gewicht und andererseits die Kostensenkung.

Sensoren dieser Kategorie zeichnen sich dadurch aus, dass die LiDAR-Einheit (Sender + Empfänger = Transceiver) vollständig entkoppelt ist von der Scaneinheit (Liu et al. 2022, Abb. 2). Theoretisch ist es damit möglich, dieselbe Scaneinheit für unterschiedliche Transceiver zu verwenden. Anstatt eines einzigen Senders und Empfängers kommen  $n$  Transceiver zum Einsatz (z. B.  $n = 6$ ), wobei Racks mit jeweils wenigen gepulsten Laserquellen (Transmitter) und Photodioden (Receiver) ein Standardprodukt in der industriellen Lasertechnik darstellen. Gegenüber den Profillinien-scannern besteht der Vorteil, dass die Ausrichtung und Kalibrierung von Sende- und Empfangseinheit nur für relativ wenige Kanäle durchgeführt werden muss.

Die Gebietsabdeckung wird wie bei konventionellen Scannern durch Strahl-ableitung erreicht. Dabei kommt refraktive Strahlableitung über ein sogenanntes Risleyprisma zum Einsatz. Es handelt sich dabei um zwei separate, einseitig abgeschrägte Prismen, die mit Schrittmotoren individuell angesteuert werden können. Durch Variation der Drehgeschwindigkeit und -richtung lassen sich vielfältige Scanmuster wie Profillinien, Kreise, Spiralen und Rosetten erzeugen. Die Möglichkeit zur Ablenkung in zwei Raumrichtungen (im ULS-Kontext in/quer zur Flugrichtung) ermöglicht die optimierte Erfassung von vertikalen

Flächen (Vorblick/Rückblick/Seitblick). Generell mit Bedacht auf die Anforderungen des autonomen Fahrens entwickelt, werden diese Sensoren vor allem durch die Verfügbarkeit eines entsprechenden Produkts im aktuellen Portfolio des marktstarken UAV-Herstellers DJI verstärkt für Kartierung von Topographie, Vegetation und Gebäudeinfrastruktur eingesetzt (Tab. 1, VIII-IX).

## 4 Topo-bathymetrisches UAV-Laserscanning

Die bisher besprochenen Systeme gehören zur Klasse der topographischen Scanner, welche Laserquellen mit einer Wellenlänge im nahen Infrarotbereich des elektromagnetischen Spektrums verwenden ( $\lambda = 900\text{--}1500\text{ nm}$ ). Dem gegenüber sind mittlerweile auch topo-bathymetrische Sensoren verfügbar, die eine Erfassung von Objekten oberhalb und unter der Wasseroberfläche erlauben. Bei bathymetrischen Anwendungen kommen typischerweise Laser mit einer Wellenlänge im sichtbaren grünen Bereich ( $\lambda = 532\text{ nm}$ ) zur Anwendung, wobei die grüne Strahlung in aller Regel aus einer infraroten Laserquelle (Nd:Yag Laser,  $\lambda = 1064\text{ nm}$ ) durch Frequenzverdoppelung gewonnen wird (Pfeifer et al. 2015).

Bathymetrische UAV-Lasersensoren waren zunächst als Laseraltimeter verfügbar, stehen aber mittlerweile auch schon zur räumlich hochauflösenden, flächenhaften Erfassung von Unterwassertopographie zur Verfügung (Mandlburger et al. 2020). Topo-bathymetrische UAV-Scanner sind zumeist als konventionelle Scanner mit kreisförmigem Scanmuster (Palmer Scanner) ausgeführt, welche i. d. R. die gesamte rückgestreute Echowellenform (full waveform) aufzeichnen. Alternative Konzepte setzen auf das Prinzip der Lasertriangulation, wobei eine gesamte Laserlinie von einer separaten Kamera erfasst und damit Gewässertiefen ermittelt werden (Mitchell 2019).

Entscheidend beim Einsatz von bathymetrischen Scannern ist die erzielbare Eindringtiefe, die von den Geräteherstellern in Vielfachen der Secchi-Tiefe angegeben wird. Bei bathymetrischen UAV-Laserscannern sind dabei Geräte mit einer moderaten Eindringtiefe im Bereich der einfachen Secchi-Tiefe, aber kompakter Bauweise und einem Gewicht  $< 5\text{ kg}$  genauso verfügbar wie Geräte, deren Datenblätter eine maximale Tiefenmessperformance im Bereich der 2- bis 3-fachen Secchi-Tiefe versprechen. Für einen Überblick über die wesentlichen Parameter unterschiedlicher Sensoren sei auf Mandlburger (2020, Tab. 2) verwiesen.

Besonders interessant sind Geräte, welche die Möglichkeit bieten, (i) die Pulswiederholrate, (ii) die Strahldivergenz und (iii) das Empfängergesichtsfeld (instantaneous Field of View, iFoV) zu variieren. Dies ermöglicht die Einsatzoptimierung hinsichtlich erzielbarer räumlicher Auflösung (kleine Strahldivergenz, kleines iFoV, hohe Pulswiederholrate) und Messtiefe (geringe Pulswiederholrate, große Strahldivergenz, großes iFoV). Als repräsentatives Beispiel zeigt

die Abb. 2 eine mit dem topo-bathymetrischen UAV-Laserscanner VQ-840-G erfasste 3D-Punktwolke, bei der neben Topographie und Vegetation auch detaillierte Unterwasserstrukturen (Sohlformen, Totholz, Wasserpflanzen) zu erkennen sind. Gerade der Erfassung und Modellierung von Unterwasservegetation kommt derzeit steigendes wissenschaftliches Interesse zu (Mandlbürger et al. 2021).

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die enormen Fortschritte in der Sensorminiaturisierung und der Weiterentwicklung von unbemannten Fluggeräten ist der Einsatz von leistungsfähigen Laserscannern auf UAV-Plattformen bereits als operationell zu betrachten. In diesem Artikel wurden dabei zunächst die Grundlagen von UAV-Laserscanning zusammengefasst und aktuelle Trends in der Sensorentwicklung aufgezeigt. Die Basistechnologie von ULS unterscheidet sich dabei nicht wesentlich von bemanntem Flugzeuglaserscanning. Vor allem im Bereich der Distanzmessgenauigkeit und der Plattformpositionierung über GNSS bestehen die gleichen, hohen Genauigkeitsanforderungen wie im ALS-Fall. Aufgrund der geringeren Flughöhe und der damit verbundenen geringeren Messdistanzen sind die Ansprüche an die eingesetzten Neigungssensoren tendenziell moderater.

Die geringere Entfernung zwischen Sensor und Objekt ermöglicht bei den modernen Sensoren, die über Pulswiederholraten von mehr als 500 kHz verfügen und stark gebündelte Laserstrahlkegel aufweisen, eine sehr hohe räumliche Auflösung. Typische Punktdichten liegen im Bereich von 100 bis 500 Punkten/m<sup>2</sup> mit Punkt-zu-Punkt-Abständen von <10 cm. Dadurch werden neue Anwendungsfelder für die luftgestützte Laserdatenerfassung erschlossen wie z. B. Leitungs- und Verkehrswegeerfassung, Präzisionslandwirtschaft, Einzelbaum-basierte Vegetationsparametererfassung, detaillierte Gebäudemodellierung inkl. Fassadenerfassung u. v. a.

Neben konventionellen Sensorkonzepten, die aus dem ALS übernommen und weiterentwickelt wurden, kommen beim UAV-Laserscanning auch Profillinien-scanner und Flash LiDAR-Systeme zur Anwendung. Diese Technologien wurden zunächst hauptsächlich für Anwendungen im Bereich des autonomen Fahrens entwickelt, finden aber auch verstärkt Einzug in Kartierung und Topographieverfassung. Während viele ULS-Systeme im hochpreisigen Segment angesiedelt sind, ist derzeit mit Hybridsystemen ein Trend hin zu leistungsfähigen low-cost-Sensoren auszumachen, die zwar hinsichtlich Reichweite und Genauigkeit mit den konventionellen Scansystemen nicht konkurrieren können, aber für viele Anwendungen mit geringerem Genauigkeitsbedarf eine ernstzunehmende Alternative darstellen.

Über das topographische Laserscanning hinaus stehen heute auch topo-bathymetrische Sensorsysteme zur Verfügung, die eine detaillierte Erfassung der Unterwassergeländeform sowie auch von Unterwasservegetation erlauben. Die Anwendungsfelder von ULS reichen daher bis hinein in die Themenfelder Wasserbau, Hydrologie und Hydraulik sowie Gewässerökologie und Habitatmodellierung.

Ein Ende der technologischen Entwicklung ist derzeit nicht absehbar. Vor allem ist durch eine fortschreitende Miniaturisierung und gleichzeitige Steigerung der UAV-Missionsdauer ist damit zu rechnen, dass in Zukunft auch größere Gebiete aus geringer Entfernung erfasst werden können. Dabei werden als Trägerplattformen in Zukunft neben den Multikoptern auch verstärkt Flächenflieger zum Einsatz kommen. Unter der Voraussetzung der entsprechenden Fluggenehmigungen wird auch das Thema des Betriebs über die direkte Sichtverbindung hinaus (Beyond Visual Line Of Sight, BVLOS) eine weitere Steigerung der Effizienz bringen.

## Literatur

- Azevedo, F., Dias, A., Almeida, J., Oliveira, A., Ferreira, A., Santos, T., Martins, A., Silva, E. (2019): LiDAR-Based Real-Time Detection and Modeling of Power Lines for Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors*, 19(8), 1812. DOI: [10.3390/s19081812](https://doi.org/10.3390/s19081812).
- Colomina, I., Molina, P. (2014): Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 92, 79–97.
- Dalla Corte, A., Rex, F., Almeida, D., Sanquetta, C., Silva, C., Moura, M., Wilkinson, B., Zambrano, A., Cunha Neto, E., Veras, H., Moraes, A., Klauberg, C., Mohan, M., Cardil, A., Broadbent, E. (2020): Measuring Individual Tree Diameter and Height Using GatorEye High-Density UAV-Lidar in an Integrated Crop-Livestock-Forest System. *Remote Sensing*, 12, 863. DOI: [10.3390/rs12050863](https://doi.org/10.3390/rs12050863).
- Escobar Villanueva J., Iglesias Martínez L., Pérez Montiel J. (2019): DEM Generation from Fixed-Wing UAV Imaging and LiDAR-Derived Ground Control Points for Flood Estimations. *Sensors*, 19(14):3205. DOI: [10.3390/s19143205](https://doi.org/10.3390/s19143205).
- Frost, A., Exclusive, S., For, W. (2016): LiDAR : Driving the Future of Autonomous Navigation LiDAR : Driving the Future of Autonomous Navigation Analysis of LiDAR technology for advanced safety, 1–30.
- Hansard, M., Lee, S., Choi, O., Horaud, R.P. (2012): Time-of-flight cameras: principles, methods and applications. Springer Science & Business Media.
- Kölle, M., Laupheimer, D., Schmohl, S., Haala, N., Rottensteiner, F., Wegner, J.-D., Ledoux, H. (2021): The Hessigheim 3D (H3D) benchmark on semantic segmentation of high-resolution 3D point clouds and textured meshes from UAV LiDAR and Multi-View-Stereo. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1, ISSN 2667-3932. DOI: [10.1016/j.ophoto.2021.100001](https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2021.100001).
- Liu, Z., Zhang, F., Hong, X. (2022). Low-Cost Retina-Like Robotic Lidars Based on Incommensurable Scanning. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 27, 58–68.

- Lohani, B., Chacko, S., Ghosh, S. (2021): Surveillance system based on Flash LiDAR. *Indian Cartographer*, XXXII.
- Mandlbürger, G. (2020): A review of airborne laser bathymetry for mapping of inland and coastal waters. *Hydrographische Nachrichten*, 116, 6–15.
- Mandlbürger, G. (2022): UAV laser scanning. In: Eltner, A., Hoffmeister, D., Kaiser, A., Karrasch, P., Klingbeil, L., Stöcker, C., Rovere, A. (Hrsg.): *UAVs for the Environmental Sciences – Methods and Applications*. wbg (Wissenschaftliche Buchgesellschaft), Darmstadt, 492 pages. ISBN 978-3-534-40588-6. eBook (PDF): 978-3-534-40590-9.
- Mandlbürger, G., Monetti, D., Hollaus, M., Wimmer, M., Otepka-Schremmer, J., Pfeifer, N. (2021): A case study for detection and modelling of submerged deadwood from UAV-borne topo-bathymetric LiDAR point clouds. In: *Proceedings of the SilviLaser Conference 2021*, 195–197. DOI: [10.34726/wim.1979](https://doi.org/10.34726/wim.1979).
- Mandlbürger, G., Pfennigbauer, M., Schwarz, R., Flöry, S., Nussbaumer, L. (2020): Concept and Performance Evaluation of a Novel UAV-Borne Topo-Bathymetric LiDAR Sensor. *Remote Sensing*, 12(6), 986. DOI: [10.3390/rs12060986](https://doi.org/10.3390/rs12060986).
- Mitchell, T. (2019): From PILLS To RAMMS. 20th Annual JALBTCX Airborne Coastal Mapping and Charting Technical Workshop, 2019.
- Neuville, R., Bates, J., Jonard, F. (2021): Estimating Forest Structure from UAV-Mounted LiDAR Point Cloud Using Machine Learning. *Remote Sensing*, 13, 352. DOI: [10.3390/rs13030352](https://doi.org/10.3390/rs13030352).
- Okunsky, M., Nesterova, N. (2019). Velodyne LIDAR method for sensor data decoding. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 516(1). 5. DOI: [10.1088/1757-899X/516/1/012018](https://doi.org/10.1088/1757-899X/516/1/012018).
- Pfeifer, N., Mandlbürger, G., Glira, P. (2015): Laserscanning. In C. Heipke (Ed.), *Photogrammetrie und Fernerkundung* (1. Auflage, pp. 1–51). Berlin Heidelberg: Springer. DOI: [10.1007/978-3-662-46900-2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46900-2).
- Pfeifer, N., Mandlbürger, G., Otepka, J., Karel, W. (2014): OPALS – A framework for Airborne Laser Scanning data analysis. *Computers, Environment and Urban Systems*, 45, 125–136.
- Pfennigbauer, M., Wolf, C., Weinkopf, J., Ullrich, A. (2014): Online waveform processing for demanding target situations. In *Proc. SPIE* (p. 90800J). DOI: [10.1117/12.2052994](https://doi.org/10.1117/12.2052994).
- Ren, H., Zhao, Y., Xiao, W., Hu, Z. (2019): A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives. *International Journal of Coal Science & Technology*, 6, 320–333 (2019). DOI: [10.1007/s40789-019-00264-5](https://doi.org/10.1007/s40789-019-00264-5).
- Schwarz, B. (2010): Mapping the world in 3D. *Nature Photon* 4, 429–430. DOI: [10.1038/nphoton.2010.148](https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.148).
- Shan, J., Toth, C. K. (2018): *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, Second Edition. Taylor & Francis.

## Kontakt

Dr. Gottfried Mandlbürger  
TU Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation  
Wiedner Hauptstraße 8–10, 1040 Wien, Österreich  
[gottfried.mandlbuerger@tuwien.ac.at](mailto:gottfried.mandlbuerger@tuwien.ac.at)

# Session 4: UAV im vielfältigen Einsatz



# UAV in der Landwirtschaft – Eine Übersicht aktueller Anwendungen und zukünftiger Potenziale

Görres Grenzdörffer

## 1 Einleitung

Seit einigen Jahren versprechen Drohnen für einen weiteren Durchbruch des Precision Farming zu sorgen, um Erträge zu steigern und gleichzeitig Wasser- und Nahrungsmittelkrisen zu lösen. Auch wird der landwirtschaftliche Sektor in vielen Studien als großer Zukunftsmarkt für Drohnen gehandelt. Fast jeder zehnte Landwirt in Deutschland setzt in seinem Betrieb Drohnen ein. Das ergab 2018 eine Umfrage unter 420 landwirtschaftlichen Betriebsleitern, die in Zusammenarbeit vom Deutschen Bauernverband und Digitalverband Bitkom in Auftrag gegeben wurde (Bitkom 2018). Vor allem Betriebe mit mehr als 100 Hektar Fläche nutzen demnach Drohnen.

Wenn diese Umfrage die aktuelle Lage widerspiegelt, sind Drohnen in der landwirtschaftlichen Praxis bereits angekommen und das Wissen um die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten ist weit verbreitet. Schließlich gibt es in kaum einer anderen Branche einen vergleichbar intensiven Einsatz von Drohnen, von der Vermessungsbranche einmal abgesehen. Abseits der Umfragen haben Drohnen zumindest bis vor kurzem in Deutschland leider keinen signifikanten Einfluss auf die landwirtschaftliche Praxis gehabt. Warum ist das so?

Viele Landwirte experimentieren mit ihren Drohnen und setzen diese in erster Linie zur schnellen Informationsgewinnung ein, ohne dass sich Arbeitsabläufe grundlegend ändern und die vielen Möglichkeiten der neuen Technologie voll genutzt werden. Hierfür fehlt es oft an dem speziellen Knowhow, an guter und intuitiver Software und natürlich auch an Zeit, um sich damit auch intensiv zu beschäftigen.

Nichtsdestotrotz tut sich in letzter Zeit viel. So haben sich schon einige spezielle drohnenbasierte Dienstleistungen etabliert. Im Feldversuchswesen werden mit Drohnen – ganz objektiv und nicht invasiv – Versuchspartikeln verglichen, einzelne Pflanzen erfasst, gezählt und analysiert. Deep Learning ist ein weiteres Zauberwort, das helfen soll, große Datenmengen performant und zuverlässig zu analysieren. Drohnen können beispielsweise Informationen über die Wasserhaltekapazität des Bodens und die Effektivität von Bewässerungsmaßnahmen liefern. Multispektrale Bilddaten können zur Ableitung von Applikationskarten

für eine teilflächenspezifische Stickstoffdüngung oder Anwendung von Pflanzenschutzmitteln eingesetzt werden, z. B. (Montgomery et al. 2020, (Maes und Steppe 2018, Näsi et al. 2018).

Drohnen sind also prinzipiell in der Lage, verschiedene landwirtschaftliche Praktiken und Verfahren zu ändern, sowohl für Landwirte als auch für deren Dienstleister wie Maschinenringe und landwirtschaftliche Berater. Leider konnten viele der Möglichkeiten, die Landwirten von Drohnen-Dienstleistern in Aussicht gestellt wurden, bisher so nicht realisiert werden, selbst wenn die theoretischen Grundlagen bekannt sind. Es stellt sich die Frage: Warum nicht?

Nun, vieles was in einer kontrollierten Forschungsumgebung prinzipiell funktioniert, lässt sich nicht einfach auf landwirtschaftlichen Flächen und unter praktischen Rahmenbedingungen wirtschaftlich umsetzen. Deshalb wird aktuell aus der Praxis anwendungsnahe Forschung und Expertise nachgefragt. Auch die Entwicklung geeigneter Software, die aus den sehr großen Datenmengen, die bei Drohnenbefliegungen anfallen, effizient, performant und zeitnah die richtigen Informationen extrahieren kann, schreitet kontinuierlich voran.

Die komplexe Regulierung in Deutschland muss an dieser Stelle ebenfalls genannt werden, die es Landwirten und Dienstleistern nicht einfach macht, landwirtschaftliche Flächen zu befliegen, falls diese z. B. in einem FFH-Gebiet liegen oder an einen hoch frequentierten Fuß- und Radweg, eine Bundesstraße etc. grenzen. Um wirtschaftlich größere Flächen zu befliegen, sind Flüge außerhalb der Sichtweite (BVLOS) für die Landwirtschaft sehr wichtig, was sich unter dem aktuellen Regulierungsrahmen allerdings als sehr schwierig gestaltet.

## 2 Aufnahmezeitpunkte und das richtige Timing

Der Wahl des richtigen Aufnahmezeitpunktes ist zur Beantwortung vieler Fragestellungen von ausschlaggebender Bedeutung. So sind z. B. im Boden befindliche Meliorationsanlagen nur zu ganz bestimmten Zeitpunkten, z. B. im Frühjahr, wenn der offene Boden rasch abtrocknet, aus der Luft sichtbar.

Eine Drohnenaufnahme gibt allerdings immer nur eine Momentaufnahme der Pflanzenentwicklung wieder. Je nach Aufnahmezeitpunkt werden in den Bildern „Zonen“ unterschiedlichen Wachstums bzw. Vitalität sichtbar. Diese sind aber nicht unbedingt fest und pflanzenbaulich relevant. Aufnahmen des gleichen Feldes können wenige Tage später schon ganz andere Zonengrenzen aufweisen. Einige Zonen scheinen über die Zeit bzw. Jahre hinweg zu „wandern“ und sich in Form und Größe zu verändern. Das ist allerdings oft ein Trugschluss, da unser Auge versucht, sich an visuellen Grenzen festzuhalten bzw. „Grenzen“ durch den Bearbeiter mit einer mehr oder weniger willkürlichen Anzahl von Klassen und Farben erst festgelegt werden. Andere bodenbürtige Zonen hingegen sind über

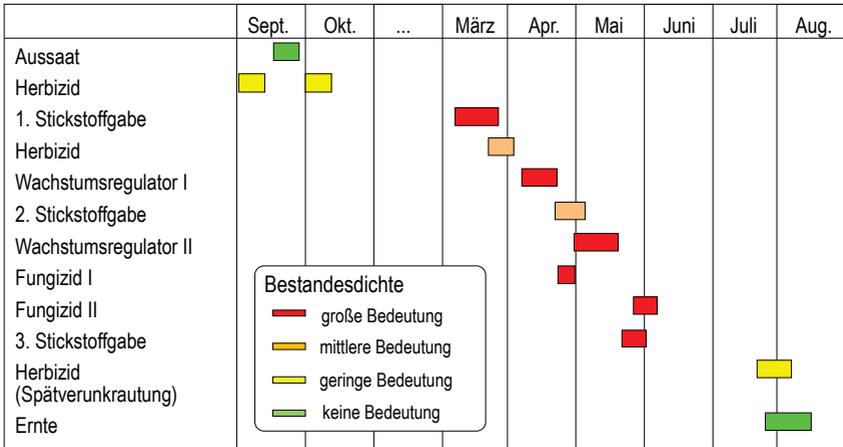


Abb. 1: Bedeutung der Bestandesdichte bzw. Biomasse für teilflächenspezifische Applikationen am Beispiel Winterweizen in Nordostdeutschland

die Zeit stabil und verändern sich parallel zum Rest des Feldes. Um diese Differenzierung zwischen permanenten und temporären Zonen treffen zu können, sind multitemporale Daten sehr wichtig.

Die Aufnahme- und Auswerteziträume für die aktuelle Bestandesführung müssen sich an der Maßnahmenabfolge der einzelnen Fruchtarten orientieren. Insgesamt konzentriert sich der Bedarf an aktuellen Bestandesinformationen, z. B. Biomasse oder Stickstoffgehalte, oft auf wenige Monate, wie Abb. 1 für Winterweizen verdeutlicht.

Vegetationsindizes korrelieren sehr gut mit verschiedenen Pflanzenparametern, z. B. dem Chlorophyllgehalt, dem Stickstoffgehalt, der Biomasse und anderen mehr. Allerdings nicht zu allen Zeitpunkten bzw. phänologischen Entwicklungsphasen, was im Wesentlichen auf drei Gründe zurückzuführen ist:

1. Bei einem Blattflächenindex von weniger als 0,5 ist der Pflanzenbedeckungsgrad noch nicht ausreichend und der Vegetationsindex wird noch stark von der Bodenreflexion beeinflusst. Außerdem können zu diesem Zeitpunkt noch Blattverfärbungen durch die winterliche Witterung das Signal beeinflussen. Schräg blickende traktorbasierte Sensoren hingegen, „sehen“ nur das Pflanzensignal und weniger den Boden und können somit früher relevante Informationen ableiten.
2. Bei einem Blattflächenindex von vier und mehr gehen Vegetationsindizes in die Sättigung, was dazu führt, dass die Unterschiede im Aufwuchs nicht mehr durch den Index abgebildet werden können
3. Bei der Blüte, insbesondere bei Raps, versagen die gängigen Vegetationsindizes, da die Blütenblätter nicht grün sind.

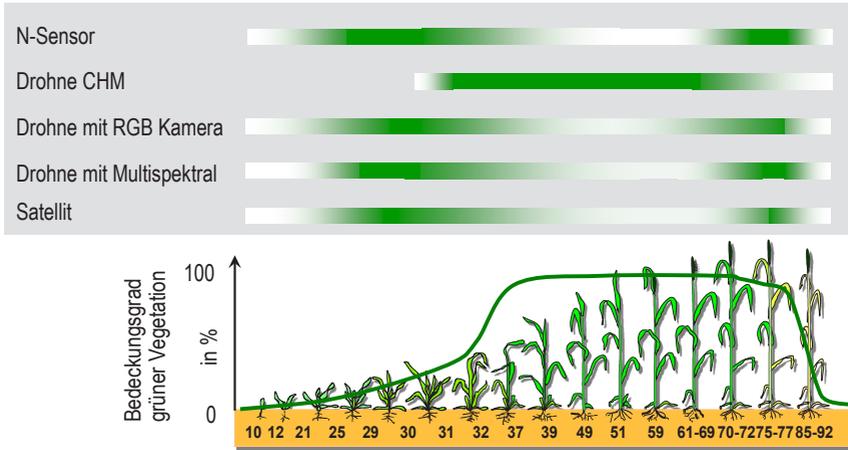


Abb. 2: Zeitfenster zur Erfassung der Bestandesheterogenität (Bestandesdichte, Biomasse, Blattflächenindex, Ertrag) von Winterweizen mit verschiedenen Sensoren

Die aus Drohnenbildern abgeleitete Wuchshöhe (Crop Height Model, CHM) hingegen liefert gerade bei dichten Pflanzenbeständen die zuverlässigsten Werte. Bei sehr kleinen Pflanzen reicht die Höhengauflösung allerdings in der Regel kaum aus, um verlässliche Daten zu erzeugen. Da das Längenwachstum mit dem Ende der Blüte im Allgemeinen abgeschlossen ist, kann das CHM Ertragsunterschiede, die sich erst in der generativen Phase bilden und üblicherweise in der Seneszenz spektral sehr deutlich werden, nicht mehr abbilden (Abb. 2).

Somit ergeben sich bei der Nutzung von spektralen Sensoren zwei Zeiträume, in denen die Bestandesdichte und alle damit korrelierenden Parameter sehr gut erfasst werden können. Zum einen in der Schoßphase (EC 30–39) und zum anderen während der Seneszenz (EC 75–87). Aufnahmen in der Seneszenz korrelieren in der Regel sehr gut mit dem Ertrag.

Da in vielen Teilen Deutschlands das pflanzenverfügbare Wasser den größten ertragslimitierenden Faktor ausmacht, bieten Aufnahmen während längerer Trockenphasen ein zuverlässiges Bild über das Wasserhaltevermögen des Bodens. Die Ausprägung der Zonen schwankt in Abhängigkeit der Jahreswitterung und der angebauten Kultur natürlich von Jahr zu Jahr.

Unterschiede in der Stickstoffversorgung und Mangelerscheinungen, die den Chlorophyllgehalt der Pflanzen beeinflussen, sind auch bei dichterem Pflanzenbestand zu differenzieren. Je nach Kultur ergeben sich mehrere geeignete Flugtermine für eine Drohne im Laufe einer Vegetationsperiode, die nicht nur auf eine direkte, teilflächenspezifische Maßnahme ausgerichtet sind, sondern auch Bonituren und andere Managemententscheidungen unterstützen (Abb. 3 für mögliche Drohnenanwendungen im Mais).

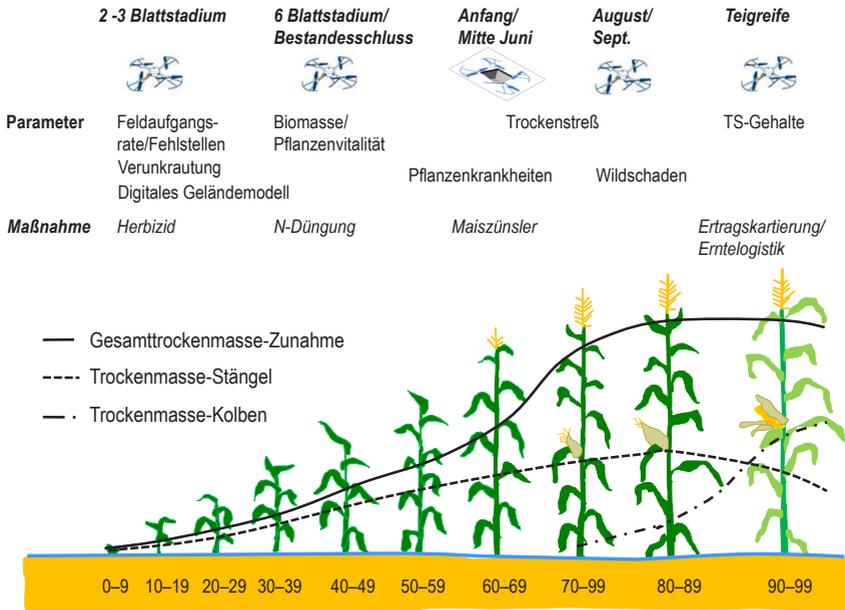


Abb. 3: Optimale Befliegungszeitfenster für Drohnenflüge und die daraus ableitbaren Informationen und teilflächenspezifische Maßnahmen im Mais

### 3 Drohnenanwendungen in der Landwirtschaft

Dieses Kapitel gibt einen Überblick zu dem Spektrum landwirtschaftlicher Drohnenanwendungen. Die Gliederung erfolgt nach der Komplexität der Anwendung und der Genauigkeit bzw. dem Aufwand bei der Georeferenzierung und damit der Möglichkeit, die Daten im Computer mit Hilfe eines Geoinformationssystems (GIS) lagegenau übereinander zu legen, d. h. die Drohnenbilder mit anderen Geodaten zu verschneiden und über die Zeit auszuwerten. Darüber hinaus gibt es noch Drohnenanwendungen, bei denen Drohnen als Akteure eingesetzt werden, z. B. als Spritzdrohne zur Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln oder zum Abwurf von Trichogrammakugeln.

#### 3.1 Differenzierung der Drohnenanwendung nach Auswertungsintensität

Die praktische Nutzung von Drohnen durch den Landwirt oder einen Dienstleister lässt sich – je nach der Fragestellung sowie zusätzlich verfügbaren

Referenzdaten (= Ground Truth) – hinsichtlich der Auswertungsintensität in vier Stufen unterteilen.

### **1. Stufe: Visuelle Auswertung (look and do)**

In vielen Fällen ist eine möglichst schnelle, qualitative Zustandsanalyse wichtig und ausreichend. Das gilt z. B. zur Bestimmung der Unkraut- und Bestandesentwicklung, von Fehl- und Schwachstellen für die Planung von Bonituren, Pflanzenschutz- oder Düngemittelapplikationen oder die Rehkitzrettung. Eine Betrachtung am Controller der Drohne oder dem Laptop im Feld genügt zur Entscheidungsfindung. Die geometrisch exakte Lage wird nicht oder nur näherungsweise benötigt. Hierfür sind Schräg- und Senkrechtaufnahmen besonders geeignet. Der technische Aufwand und die Kosten sind gering, die Aufnahmen stehen direkt zur Verfügung. Da bei Senkrechtaufnahmen auch eine geometrische Auswertung nicht beabsichtigt ist, kann sogar durch leichtes Verkippen der Kamera versucht werden, möglichst ganze Schläge aufzunehmen, um die spätere Auswertung zu erleichtern. Die Interpretation erfolgt einzelbildweise, rein visuell durch den Landwirt eventuell in Zusammenarbeit mit einem Berater. Interpretationsschwerpunkte sind vor allem Informationen über die aktuelle Bestandesentwicklung sowie bewirtschaftungsbedingte Fehl- und Schwachstellen.

### **2. Stufe: Visuelle Auswertung geokodierter Aufnahmen in einem GIS (locate and do)**

Orthophotos sind Voraussetzung für eine lagegetreue Kartierung und deren Verwendung für teilflächenspezifische Maßnahmen bzw. Vermessungen aller Art. Das wiederum setzt einen systematischen Bildflug und eine photogrammetrische Prozessierung voraus. Je nach verwendeter Kameratechnik verdeutlichen Echtfarben- oder Farbinfrarotdarstellungen bzw. Vegetationsindizes, z. B. der NDVI, qualitative Unterschiede innerhalb der Pflanzenbestände, die durch Felderhebungen bzw. Bonituren schlagweise gezielt validiert werden müssen. Auf der Grundlage dieser Daten und weiterer pflanzenbaulicher Informationen ist die Ableitung von Applikationskarten möglich. Die Überlagerung anderer GIS-Informationen am Bildschirm ermöglicht eine effiziente visuelle Analyse der Boden- und Bestandessituation durch den Landwirt oder den Berater.

### **3. Stufe: Digitale teilautomatisierte Analyse (analyse and do)**

Als Erweiterung der visuellen Interpretation, Zonierung und Validierung ist die teilautomatisierte, spektrale und quantitative Auswertung von Fernerkundungsdaten zu sehen. Dabei erlauben die Analysen neben Aussagen über die

Verbreitung von Merkmalen auch Aussagen über deren Intensität, z. B. Pflanzenvitalität, N-Versorgungszustand und Bodenfeuchte. Voraussetzung dafür sind geometrisch und radiometrisch kalibrierte Multispektralkameras. Zur Analyse sind Ground Truth-Daten zu erheben. Bei der Analyse werden verschiedene Verfahren der digitalen Bildverarbeitung z. B. Clustering und Deep Learning eingesetzt. Die für qualitative und quantitative Analysen notwendigen Ground Truth-Informationen sind bei nicht kalibrierten low-cost-Sensoren schlagspezifisch zu erheben, da eine Übertragbarkeit auf benachbarte Schläge nicht gewährleistet ist. Bei radiometrisch kalibrierten Sensoren ist eine regionale Übertragbarkeit von Ground Truth-Informationen hingegen möglich.

#### 4. Stufe: Zeitreihenanalyse und dynamische Modellierung (model and do)

Zeitreihenanalysen und dynamische Modellierung sind insbesondere für die Vorhersage des Pflanzenwachstums und der Ertragsentwicklung interessant. Allgemein gesprochen berechnen Pflanzenwachstumsmodelle, abhängig von Bodeneigenschaften, Witterungsbedingungen und Kulturpflanze, den täglichen Zuwachs an Biomasse in den einzelnen Pflanzenteilen (Stängel, Blätter, Wurzeln, Körner, Knollen, etc.) sowie den Fortschritt der Pflanzenentwicklung von Aussaat bis zur Ernte. Um einen Pflanzenbestand für eine ganze Vegetationsperiode simulieren zu können, müssen verschiedene Prozesse berechnet, gemessen oder geschätzt werden. Um genaue Vorhersagen machen zu können, benötigt ein Modell verschiedenste Informationen über den Boden, die Kulturpflanze, die Bewirtschaftungsmaßnahmen und das Wetter. Um das Modell an bestimmten Zeitpunkten mit der tatsächlichen Pflanzentwicklung abzugleichen, wird es mit Fernerkundungsdaten gekoppelt, d. h. die vorhergesagten Werte z. B. zum Blattflächenindex oder anderen biophysikalischen Parameter werden abgeglichen, und das Modell wird mit diesen Werten nachjustiert und verbessert (Bach et al. 2016). An die dafür benötigten Daten werden die höchsten Ansprüche gestellt. In Ergänzung zur dritten Stufe ist für multitemporale Analysen eine Normierung der Reflexionswerte in absolute Reflexionswerte unumgänglich. Satellitendaten sind aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften und der nahezu kostenlosen Verfügbarkeit für Zeitreihenanalysen bisher am geeignetsten.

Bis zur Verfügbarkeit geeigneter sowie einfacher, robuster Modelle und Algorithmen für Teilfragen des Precision Farming (z. B. teilflächenspezifische Düngung) wird für die betriebliche Praxis das Prinzip des „look and do“ bzw. „locate and do“ von hochaufgelösten Bildern vorherrschen, denn die Übersetzung grob aufgelöster spektraler Indexwerte in pflanzenbaulich relevante Parameter ist den Experten vorbehalten und kann nicht durch den Landwirt geleistet werden.

## 3.2 Differenzierung der Drohnenanwendung nach Technologie

Die Anwendungsmöglichkeiten und Potenziale unterscheiden sich auch deutlich, je nach Drohnentechnologie, Sensorik und Auswertesoftware (Tab. 1). Es kann zwischen einer Einsteiger- und einer Profidrohne unterschieden werden.

Mit der Einsteigerdrohne können bereits viele Aufgaben erledigt werden, je nachdem wie viel Aufwand in die Flugplanung und die weitere Prozessierung der Bilder gesteckt wird, z. B.:

- Freiflug ohne eine vorab geplante Flugroute: Die live übertragenen Bilder bzw. der Videostream können direkt ausgewertet bzw. interpretiert werden, um z. B. Wildschäden zu erkennen, Tiere aufzufinden oder auch stark verunkrautete Bereiche zu identifizieren.
- Systematische Bildflüge mit einer entsprechenden Längs- und Querüberlappung ohne die Verwendung von Passpunkten: Die Bilder werden nach dem Flug mit einer speziellen Software zu einem Orthomosaik verrechnet. Ohne die Verwendung von Passpunkten liegt die absolute Lagegenauigkeit bei wenigen Metern. Das reicht völlig aus, um z. B. die Fläche eines Wildschadens oder auch die Ausmaße winterlicher Vernässungsstellen zu berechnen. Schließlich handelt es sich dabei um natürliche Phänomene, deren Grenzen nicht klar definiert sind.
- Systematische Bildflüge mit einer entsprechenden Längs- und Querüberlappung und der Verwendung von genau eingemessenen Passpunkten: Die erzeugten Orthomosaik haben üblicherweise eine Lagegenauigkeit von wenigen Zentimetern und können für Vermessungszwecke aller Art verwendet werden. Aus den dabei berechneten Oberflächenmodellen können beispielsweise potenzielle Vernässungsstellen ermittelt oder das Pflanzenwachstum berechnet werden.

Bei der Profidrohne steht die Kartierung und Vermessung großer Flächen im Vordergrund. Je nach Kameranutzlast können hochaufgelöste Farbluftbilder oder multispektrale Aufnahmen erzeugt werden. Aus systematischen Bildflügen und unter Nutzung eines RTK/PPK-GNSS lassen sich passpunktlos Orthomosaik und digitale Oberflächenmodelle in Vermessungsqualität generieren. Bei Verwendung einer Multispektralkamera werden Reflektanzen und verschiedene Vegetationsindizes berechnet (Grenzdörffer 2020). Da die Aufnahmen räumlich perfekt übereinander passen, lassen sich aus mehreren Befliegungen Zeitreihen erzeugen. Aus den Differenzen der digitalen Oberflächenmodelle kann der Aufwuchs bzw. das Pflanzenwachstum abgeleitet werden. Für „spektrale“ Zeitreihenanalysen sind Multispektralkameras mit Sonnenlichtsensoren erforderlich, die qualitativ hochwertige radiometrische Kalibrierung ermöglichen.

**Tab. 1:** Übersicht landwirtschaftlicher Anwendungen von Einsteiger- und Profidrohnen mit verschiedenen Prozessierungs- und Kameraoptionen

Aufgabe	Einsteigerdrohne			Profidrohne	
	Schräg- oder Senkrechtaufnahmen	Orthobilder ohne GCP	+ Georeferenzierung mit GCP	mit RTK und RGB	mit RTK und Multi-spektral
Feldversuchswesen (CHM)	o	o	++	+++	++
Bestände	o	o	+	+	+++
Biomassekarten	o	+	+	+	+++
Ertragsvorhersagekarten	o	+	+	+	+++
Feldaufgangsrate/ Pflanzen zählen	+	++	+++	+++	++
Hagelschäden etc. dokumentieren	++	++	++	++	+++
Meliorationsanlagen höhenvermessen	o	o	++	+++	++
Photovoltaikanlagen kontrollieren	o	o	o		+++*
Schläge oder Anlagen vermessen	o	o	++	+++	++
Scouten oder bonitieren	++	+	o	++	+++
Tiere suchen	+++	o	o	+++	+++*
Trockenstress	+	+	+	+	+++
Videos von Maschinen und Gebäuden	+++	o	o	+++	o
Werbevideo	+++	o	o	+++	o

\* mit Thermalsensor

Bewertungsskala: o = ungeeignet, nicht empfohlen; + = geeignet; ++ = gut geeignet; +++ = sehr gut geeignet

### 3.3 Drohnen­daten als Managementinstrument für den Landwirt

Drohnen­daten, die mit einer Einsteiger­drohne gewonnen werden können, werden in erster Linie als Managementinstrument für die Bestandes­führung, den landwirtschaftlichen Betrieb und das Herdenmanagement eingesetzt, um immer einen aktuellen Überblick zu haben, der gerade in Großbetrieben oder bei unübersichtlichen Flächenverhältnissen besonders wichtig ist, um z. B.:

- den Entwicklungszustand des gesamten Schlags durch gezieltes Anlaufen und Bonituren einzelner Stellen sicher zu erfassen,
- Witterungs- und bewirtschaftungsbedingte Schwachstellen zu erfassen,
- Maßnahmenprioritäten auf den verschiedenen Schlägen zu setzen,
- die Kommunikation zwischen den Mitarbeitern und externen Beratern zu verbessern,
- Standortverhältnisse bei Betriebsleiterwechsel oder Flächenerwerb schnell zu erfassen,
- eine Dokumentationsgrundlage bei behördlichen Auflagen, bürokratischen Verfahren oder Rechtsstreitigkeiten (Wild- und Hagelschäden, Wegebau, Meliorationsanlagen, Naturschutz, ...) zu erhalten,
- die jährlich notwendigen Flächenvermessungen, z. B. bei Schlagteilungen und verschiedenen Sorten vorzunehmen,
- Orientierungsmöglichkeit auf großen Schlägen zu bieten und relevante Flächen in Umfang und Größe zu bestimmen bzw. zu schätzen,
- bei Bauvorhaben den aktuellen Baufortschritt zu dokumentieren oder die Inspektion von landwirtschaftlichen Gebäuden und Anlagen zu vereinfachen,
- Lücken in der Grasnarbe zu erkennen und zu kartieren, um bei einer Grünlandnachsaat auf Fehlstellen die Saatgutmenge nachzuregulieren,
- diverse operative Aufgaben des Herdenmanagements auf der Weide zu vereinfachen, wie z. B. die Kontrolle von Wasserstellen, Zäunen, Unterständen etc.
- einzelne ggf. ausgerissene Tiere aufzufinden und Tiere mit atypischem Verhalten in einer Herde zu entdecken, bis hin zum Treiben der Herde zum Stall.

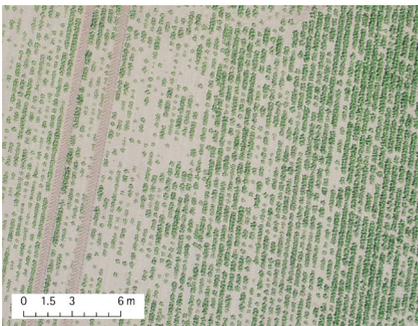
Die Aufnahme und Interpretation solcher Aufnahmen liegt vollständig in den Händen des Landwirts bzw. des Beraters, was hochauflösende Bilder notwendig macht, auf denen der Landwirt notwendige topographische Orientierungspunkte, z. B. Fahrgassen oder Bäume sicher erkennt.

### 3.4 Drohnen- und Flächen-, Volumen- und Bauvermessung

Drohnen- und Flächen-, Volumen- und Bauvermessung – systematisch befliegen und photogrammetrisch prozessiert – stellen ein exzellentes 3D-Vermessungswerkzeug für den Landwirt dar, das auf vielfältige Art und Weise genutzt werden kann, z. B. um Schadensereignisse durch Unwetter und Wildtiere auf aktuellen georeferenzierten Orthophotos zu kartieren und zu vermessen. Damit sind gerichtsfeste Auswertungen bzw. Kartierungen für Versicherungen zur Entscheidung von Ausgleichszahlungen möglich. Zudem können Acker- und Grünflächen, Schlagteile, Vorgewende, Blühstreifen etc., die z. B. im Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKoS) oder anderen nationalen bzw. regionalen Agrarförderprogrammen erforderlich sein können, gezielt vermessen werden. Distelnester oder andere perennierende Unkräuter können lagegenau kartiert werden. Gebäude und Anlagen können vermessen, Lagepläne für zukünftige Baumaßnahmen erstellt und das Volumen von temporären Zuckerrübenmieten oder permanenten Maissilos ermittelt werden. Es ist auch möglich, hydrologisch und lokalklimatisch relevante Parameter aus digitalen Geländemodellen abzuleiten, die z. B. zum Erosionsschutz oder zur Erneuerung und Planung von Meliorationsanlagen erforderlich sind. Nach der stichpunktartigen Aufzählung der vielen Möglichkeiten sollen im Folgenden verschiedene Anwendungsmöglichkeiten beispielhaft vorgestellt werden.

#### 3.4.1 Kontrolle von Bewirtschaftungsmaßnahmen

Bewirtschaftungsmaßnahmen können aus vielen Gründen Mängel aufweisen. Durch Drohnenbilder können Fehler bei der Bodenbearbeitung, der Aussaat und dem Pflanzenschutz sicher erkannt werden. Deutliche Merkmale sind Streifen in Fahrspurrichtung und scharf abgesetzte rechteckige Flächen. Bodenbearbei-



**Abb. 4:** Ungleichmäßiger Auflauf von Zuckerrüben. Aufgenommen am 5.6.2019, Drohne: Phantom 4 RTK, Flughöhe 70 m



**Abb. 5:** Effekt ungleichmäßiger Güllerdüngung, Schrägaufnahme, 6.5.2016

tungsprobleme sind nach dem Pflügen bis zum Bestandesschluss gut zuzuordnen. Drillfehler können gut zwischen Dreiblattstadium und Bestockungsphase erkannt werden (Abb. 4). In späteren Wachstumsstadien sind darüber hinaus Spritzschäden sowie Düngefehler identifizierbar (Abb. 5).

### 3.4.2 Verunkrautung

In Drohnenaufnahmen ist das Massenaufreten von Unkräutern ab einer gewissen Größe bzw. Bedeckungsgrad auszumachen, wobei jedoch nicht einzelne Arten bestimmt werden können, auch wenn das aus Sicht von Ökonomie und Umweltschutz wünschenswert wäre. Der Wachstumsvorsprung der Unkräuter nach der Saat macht sich durch die Grünfärbung im Herbst und Frühjahr bemerkbar. Früh erkennbare starke Verunkrautung ist meist persistent und kann oft während der Hauptvegetationszeit nur unzureichend bekämpft werden und bedarf meist einer besonderen Behandlung nach der Ernte. Für diese Fälle können georeferenzierte Drohnenaufnahmen im Frühjahr als Boniturhilfe und zur



Abb. 6: Durchwuchs von Disteln (weiß-/bläuliche Blüten) und Beifuß (grüne Pflanzen) in reifem Weizenschlag, Aufnahme­datum 2.8.2019, Drohne: Phantom 4 RTK, Flughöhe 100 m

räumlich differenzierten Unkrautbekämpfung eingesetzt werde. Mit Beginn der Gelbreife des Getreides im Sommer sind Ungräser und Distelnester auf den Bildern kartierbar. Sie überragen den Getreidebestand i. d. R. und unterscheiden sich bei Massenaufreten durch abweichende Färbung (Abb. 6). Nach der Ernte können solche Flächen anhand der Drohnenkartierung selektiv behandelt werden.

### 3.4.3 Wetter- und Wildschäden, Krankheits- und Schädlingsbefall

Krankheits- und Schädlingsbefall können nur zusammen mit begleitenden Bonituren in Luftbildern kartiert werden. Speziell für die Behandlung von durch Mikroorganismen hervorgerufenen Pflanzenkrankheiten wäre ein frühzeitiges Erkennen, d. h. eine Prognosemöglichkeit vor Ausbruch der Erkrankung durch Fernerkundung sehr wichtig, um Kosten und Aufwand beim Pflanzenschutz zu minimieren. Dies ist im frühen Stadium jedoch mit Sensoren, die im sichtbaren Bereich arbeiten, kaum möglich (Iost Filho et al. 2020).

Viele Pflanzenkrankheiten arbeiten sich von den unteren Blättern nach oben. Während also die Fahnenblätter, die man von der Drohne aus sieht, noch gesund sind, breitet sich die Krankheit schon im Bestand aus. Wenn sich die Fahnenblätter bzw. der Bestand verfärbt, ist es in der Regel für eine Maßnahme zu spät. Gleichwohl können Drohnenaufnahmen helfen, um bei einer Pflanzenschutzmaßnahme für eine gleichmäßige Benetzung der Pflanzen zu sorgen. Dazu wird die Biomasse über die Wuchshöhe oder einen Vegetationsindex bestimmt und darauf aufbauend die Aufwandmenge entsprechend variiert.

Für die Flächenberechnung und Quantifizierung von Wetter- und Wildschäden sind Orthophotos sehr gut geeignet. Entsprechend kann auch das Ausmaß eines Schädlingsbefalls bestimmt werden, wenn dieser den Bestand massiv beeinflusst, wie z. B. bei Fraßschäden durch Mäuse, Vögel oder anderes Wild.

## 3.5 Differenzierte Stickstoffdüngung mit Drohnen

Für die differenzierte Stickstoffdüngung im Getreide haben sich seit vielen Jahren traktorbasierte Systeme, wie der Yara N-Sensor®, ISARIA®/Crop Sensor oder GreenSeeker® etabliert. Alternativ dazu bieten mehrere Dienstleister satellitenbasierte Düngeempfehlungen an, die in der Regel auf der Grundlage eines Vegetationsindex (NDVI) einer aktuellen möglichst wolkenfreien Satellitenszene basieren. Nachteilig hierbei ist, dass es häufiger an den Schlagrändern zu Problemen kommt, wenn diese z. B. von einer Baumreihe oder einem Gewässer begrenzt werden. Auch hier muss der Landwirt die Regelfunktion, Höhe und die Spannweite der Düngegabe selbst festlegen.

Um bei der Stickstoffdüngung mit Drohnen die spezifischen Vor- und Nachteile näher zu beleuchten, soll hier exemplarisch auf die Bestimmung der Stickstoffaufnahme von Raps im Herbst eingegangen werden, da dieses Verfahren an die Befliegung, Georeferenzierung und Auswertung besondere Anforderungen stellt und die Ergebnisse im Vergleich zu anderen Alternativen, z. B. Traktor bzw. Satelliten, besser sein können.

Die Stickstoffaufnahme eines Rapsbestandes kann im Herbst in Abhängigkeit der Witterung, den Bodenverhältnissen und den aus der Vorfrucht vorhandenen Stickstoffreserven stark variieren. Der im Herbst aufgenommene Stickstoff kann im folgenden Frühjahr von der Pflanze in Teilen genutzt werden und muss somit nicht mineralisch gedüngt werden. In den letzten Jahren hat sich das so genannte Französische Biomassemodell verbreitet. Grundlage des Modells ist die Tatsache, dass die Stickstoffaufnahme sehr stark mit der Biomasse korreliert. Der dafür zugrundeliegende Algorithmus wurde in verschiedenen Praxis- und Parzellenversuchen erfolgreich überprüft, z. B. Schulz (2014). Um das Modell lokal zu eichen, sind Referenzmessungen notwendig. Dazu werden an verschiedenen Stellen des Schlags Proben von Biofrischmasse erhoben.

Für die Befliegungen ist eine Drohne mit einer Multispektralkamera dringend zu empfehlen, da die spätherbstlichen Aufnahmen bei einem niedrigen Sonnenstand aufgenommen werden, was wiederum zu langen Schatten führt. Schatten führen bei den gängigen RGB-Indizes zu unbrauchbaren Werten. Multispektralkameras mit einem Sonnenlichtsensor können die Unterschiede ausgleichen. Für eine maximale Flächenleistung ist eine Flughöhe von 120 m anzustreben.

Um den Vegetationsindex der Drohnenbefliegung in Biomasse zu überführen, werden an etwa 10 Stellen im Schlag Biomasseproben von jeweils 1 m<sup>2</sup> erhoben. Die Probepunkte sind genau einzumessen, da der Rapsbestand in der Regel eine hohe Mikrovarianz aufweist. D. h. es macht oft einen großen Unterschied, wo genau die Biomasseprobe erhoben wurde, da diese in der direkten Nachbarschaft ganz unterschiedlich ausfallen kann (Abb. 7). Das Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup>, welches den statistischen Zusammenhang zwischen der Biomasse und dem Vegetationsindex NDVI beschreibt, ist in der Regel sehr hoch (Abb. 8). Über die berechnete Funktion wird aus dem NDVI eine Biomassekarte abgeleitet (Abb. 9) und mit Hilfe des Biomassemodells der von den Rapspflanzen aufgenommene Stickstoff ermittelt (Abb. 10). In die tatsächliche Düngegabe im Frühjahr fließen neben der Stickstoffaufnahme durch die Pflanzen gemäß Düngeverordnung dann noch mehrere Faktoren ein. Unabhängig davon konnten in diesem Fall gegenüber einer schlageinheitlichen Düngung ca. 23 % der Düngemittel eingespart werden.

Unter praktischen Aspekten ist es sinnvoll, mit der Befliegung nicht bis zum ersten Frost oder zum Ende der Vegetationsperiode zu warten, sondern die Aufnahmen ab Ende Oktober zu beginnen, da sich das räumliche Muster kaum mehr ändert und der Biomassezuwachs bis zum Vegetationsende in der Regel recht gering ist. Zudem sind in zu diesem Zeitpunkt die Lichtverhältnisse noch besser, d. h. höherer Sonnenstand und kürzere Schatten und somit mehr Flugstunden je Flugtag.

Bei der Verwendung einer RTK-Drohne bzw. einer passpunktgestützten Drohnenbefliegung können die Aufnahmen bzw. das daraus abgeleitete Oberflächenmodell für weitere Zwecke genutzt werden. Schließlich entspricht das Oberflächenmodell nahezu dem Geländemodell. Das bedeutet, dass daraus z. B. Erosionspotentiale, Einstrahlungspotentiale und die Basis für zukünftige Bestandeshöhenmessungen abgeleitet werden können.

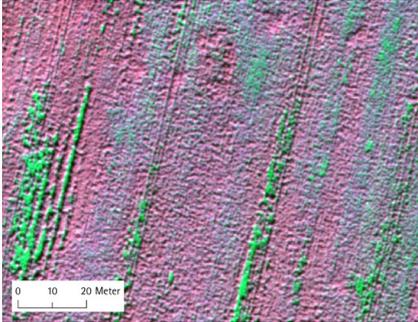


Abb. 7: Mikroheterogenität bei herbstlichem Rapsaufwuchs, Multispektralaufnahme aus 100 m Flughöhe, Colorinfrarotdarstellung

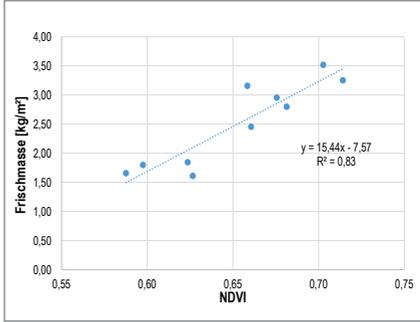


Abb. 8: linearer Zusammenhang zwischen Frischmasseproben und NDVI-Vegetationsindex, Beprobung am 16.11.2018

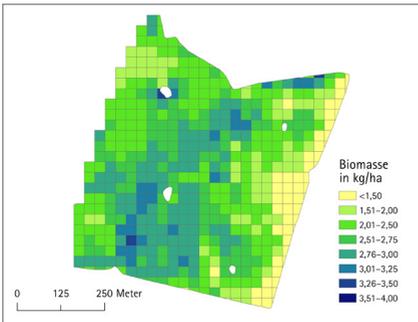


Abb. 9: Abgeleitete Biomasse für einen 35 ha-Rapsschlag, Befliegungsdatum 16.11.2018

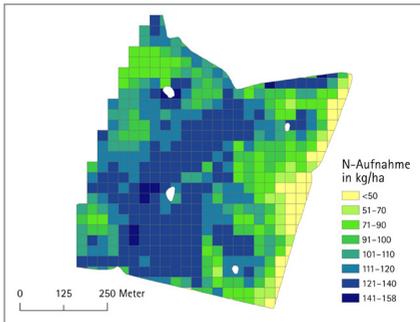


Abb. 10: Berechnete Stickstoffaufnahme für einen 35 ha-Rapsschlag, Befliegungsdatum 16.11.2018

### 3.6 Unkrauterkenennung und teilflächenspezifische Herbizidanwendung mit Drohnen

Herbizide machen etwa die Hälfte der in Deutschland eingesetzten Pflanzenschutzmittel aus. In der Regel werden die Herbizide unter Berücksichtigung gewisser Schadschwellen gleichmäßig auf die Felder ausgebracht. D.h. räumliche Unterschiede in der Artenzusammensetzung und der Menge der auftretenden Unkräuter werden nicht berücksichtigt. Das bedeutet, dass auf vielen Flächen Herbizide zum Einsatz kommen, auf denen es eigentlich gar nicht notwendig ist.

Prinzipiell kann mit Hilfe von Precision Farming, d.h. einem teilflächenspezifischen Ansatz, die Aufwandmenge an Herbiziden erheblich verringert werden, wenn nur noch gezielt die von einem gewissen Unkrautdruck betroffenen Feldteile mit Herbiziden behandelt werden. Die größten Herausforderungen bestehen dabei darin, diese Flächen zeitnah und kosteneffektiv zu identifizieren, um sie dann gezielt zu behandeln. Dieser sogenannte Offline Ansatz hat den Vorteil, dass man mit der Erstellung einer Applikationskarte die benötigte Aufwandmenge genau berechnen kann. Drohnenaufnahmen können vor allem helfen, die besonders betroffenen Flächen zu identifizieren und ggf. auch das Artenspektrum genau zu ermitteln. In der Praxis ist das allerdings gar nicht so trivial und es wurden verschiedene Strategien entwickelt, die nachfolgend kurz vorgestellt werden sollen.

Zur Erkennung und Differenzierung einzelner Unkräuter im Jugendstadium ist es notwendig, diese aus geringer Entfernung aufzunehmen. Grundsätzlich gilt dabei, je größer die Pflanzen bzw. Unkräuter sind, desto einfacher, zuverlässiger und aus einer größeren Entfernung können sie aus Drohnenaufnahmen extrahiert werden. Gleichzeitig nimmt aber der benötigte Mittelaufwand mit der Größe der Pflanzen stark zu. Aus Flughöhen von wenigen Metern lassen sich beispielsweise Gräser von zweikeimblättrigen Unkräutern unterscheiden und zudem noch die Unkräuter von Pflanzen in der Reihe trennen (Lottes et al. 2017, Pflanz und Nordmeyer 2016).

Aus verschiedenen Gründen sind flächendeckende Befliegungen ganzer Felder aus geringer Höhe mit einer Drohne nicht sinnvoll. Bei gleicher Überlappung nimmt die Flugzeit mit einer Halbierung der Flughöhe um den Faktor vier bis sechs zu. Zum einen weil bei einer entsprechend niedrigen Flughöhe viel mehr Flugstreifen erforderlich sind und zum anderen kann in niedriger Höhe nur mit einer geringen Geschwindigkeit von 1 bis 3 m/s geflogen werden, da ansonsten die Bildfolgezeit nicht ausreicht, um die Aufnahmen abzuspeichern und um Bewegungsunschärfen zu vermeiden. Aus diesen Gründen konzentrieren sich entsprechende Befliegungen auf das Feldversuchswesen oder experimentelle wissenschaftliche Anwendungen.

Ein anderer Ansatz geht dahin, die Gesamtverunkrautung unabhängig von der Artenzusammensetzung zu erfassen, um die benötigte Aufwandmenge der Spritzbrühe an den jeweiligen Unkrautdruck anzupassen. In der Literatur wurden verschiedene Verfahren entwickelt, um gezielt Unkrautnester oder die Gesamtverunkrautung zu ermitteln (Louargant et al. 2017, Pēna et al. 2013). Es hat sich gezeigt, dass die Trennung zwischen Pflanze und Boden erwartungsgemäß bei Multispektralaufnahmen deutlich besser funktioniert als bei RGB Aufnahmen. Den recht komplexen Verfahren in der Literatur ist gemein, dass für jedes Feld und jeden Flug mehrere Schwellwerte und Parameter individuell ermittelt und angepasst werden müssen. Das ist unter praktischen Gesichtspunkten problematisch, da nur ein kurzes Zeitfenster zwischen Aufnahme und Applikation besteht und sich die spektralen und morphologischen Eigenschaften der Nutzpflanzen als auch der Unkräuter und des Bodenhintergrunds innerhalb weniger Tage verändern können.

Eigene Untersuchungen haben deshalb einen minimalistischen Ansatz verfolgt, der im Gegensatz zu den oben genannten Verfahren auch zu einer konkreten Applikation der Pflanzenschutzmittel führt. Dazu wird über einen Vegetationsindex der Bodenbedeckungsgrad der Nutzpflanzen und der Unkräuter ermittelt. Eine gezielte Bonitur, die begleitend zur Befliegung durchgeführt wird, gibt Auskunft über das vorkommende Artenspektrum und die damit verbundene Mittelkombination und Schwellwerte. Anschließend wird aus der Unkrautbedeckungskarte eine Applikationskarte mit prozentualen Sollmengen abgeleitet, die dann vom Landwirt mit der konkreten Mittelauswahl in die Fläche umgesetzt wird.

Dieses Konzept wurde 2017 und 2019 für eine Nachauflaufbehandlung bei jeweils ca. 10 bis 15 ha großen Maisfeldern erprobt. In 2017 erfolgten die Drohnenbefliegungen mit einer RGB-Kamera. Zum einen aus einer Flughöhe von 30 m (= 0,7 cm GSD) und zum anderen aus einer Höhe von 200 m (= 5 cm GSD), die notwendig war, um oberhalb vorhandener Windräder zu fliegen. Eine entsprechende Sondergenehmigung lag vor. Da die gewählte Drohne nicht über ein RTK-GNSS verfügte, wurden 8 Passpunkte ausgelegt und eingemessen. Nach der Georeferenzierung wurde für das RGB-Bild der VARI-Index abgeleitet und über einen Schwellwert der Pflanzenbedeckungsgrad ermittelt (Abb. 11 und 12). Anschließend wurden die Pflanzenbedeckungsgrade für die 6 m × 6 m großen Rasterelemente gemittelt und auf der Grundlage der Bonitur eine prozentuale Spritzbrühendosierung zugewiesen (Abb. 13 und 14). Das Einsparungspotenzial aus der 30 m-Befliegung betrug 23 %. Für die größere Fläche der 200 m-Befliegung ergab sich ein rechnerisches Einsparungspotenzial von 15 %.

In 2019 wurde mit einer RTK-fähigen Multispektraldrohne in einer Flughöhe von 70 m geflogen, was eine Bodenauflösung von 7 cm zur Folge hatte. Das erleichterte die Befliegung und die Datenprozessierung ungemein. Am nächsten



Abb. 11: Ausschnitt Orthophoto aus 30 m Flughöhe

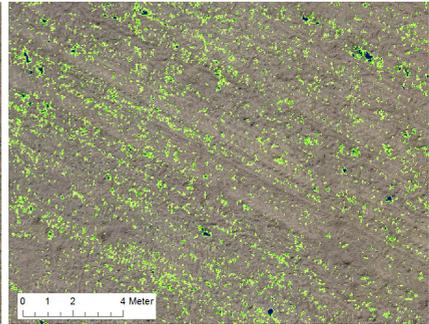


Abb. 12: Ausschnitt Vegetation (Unkraut, VARI-Index) aus 30 m Flughöhe

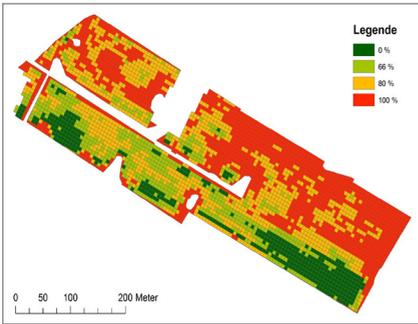


Abb. 13: Spritzempfehlung auf Grundlage 30 m Bildflug



Abb. 14: Spritzempfehlung auf Grundlage 200 m Bildflug

Tag ist anhand des NDVI eine Applikationskarte nach der bereits erläuterten Verfahrensweise erstellt worden. Aufgrund der technischen Eigenschaften der Feldspritze war eine Arbeits- bzw. Rasterbreite von 36 m bei der Applikationskartenerstellung vorgegeben. Gegenüber einer schlageinheitlichen Maßnahme betrug die Einsparung 19 %.

Die Experimente haben gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, Drohnenaufnahmen für die Erstellung von Applikationskarten für bestimmte Herbizidmaßnahmen einzusetzen. Gleichwohl muss an dieser Stelle gesagt werden, dass dieses Verfahren unter praktischen und wirtschaftlichen Aspekten noch verbessert werden muss. Perspektivisch wird der Nutzung von Deep Learning Ansätzen, also maschinellem Lernen mittels künstlicher neuronaler Netze, wie z. B. von Bah et al. (2018) beschrieben, die größte Chance eingeräumt, da diese Methoden auf unterschiedliche Unkrautarten trainiert werden können.

Daneben gibt es Unkräuter, die auch aus großer Höhe gut erkannt werden können, da sie sich zu bestimmten Zeiten spektral oder geometrisch sehr gut

von anderen Objekten auf dem Feld unterschieden lassen. Hier sind z. B. Disteln, Beifuß, Melde oder Gräser zu nennen, die in abgereiften Getreidefeldern wegen ihrer grünen Farbe hervorstechen (vgl. Abb. 6). Bei perennierenden Unkräutern reicht die Information über die Position völlig aus, da diese dann zu einem geeigneten Zeitpunkt gezielt bekämpft werden können. Allen Beispielen ist gemein, dass in der Regel nur ein kurzes Zeitfenster besteht, in dem man die Unkräuter gut erkennen und differenzieren kann.

### 3.7 Drohneneinsatz im Gemüsebau und Feldversuchswesen

Drohnen sind gerade für das Feldversuchswesen ein sehr vielseitig einsetzbares Werkzeug geworden, auf das viele Versuchsansteller und Züchter nicht mehr verzichten wollen. Schließlich bietet eine Drohne viele Vorteile, unter anderem können mit einem Flug von wenigen Minuten Dauer sehr viele Parzellen befliegen und berührungslos eine Fülle von Informationen gewonnen werden. Der logistische Aufwand für eine einzelne Befliegung ist gering und der Kostenaufwand je Flug überschaubar. Eine entsprechende technische Infrastruktur vorausgesetzt, kann die Befliegung und Auswertung der Drohnen Daten hochautomatisiert erfolgen. Aufwändiges Einmessen einzelner Versuchspartellen erfolgt am Bildschirm und Besonderheiten, z. B. Verschlämmungen nach einem Starkniederschlagsereignis, können problemlos dokumentiert werden. Die damit mögliche kontinuierliche Erfassung des Aufwuchses eröffnet viele neue Anwendungsmöglichkeiten, um z. B. den Verlauf der Pflanzenentwicklung und somit auch Prozesse, wie die Düngenaufnahme und den Verlauf von Pflanzenkrankheiten zu erfassen und zu dokumentieren (Madec et al. 2017).

Drohnen werden deshalb vorzugsweise zur Phänotypisierung eingesetzt. Die Pflanzenphänotypisierung bezieht sich auf eine quantitative Beschreibung der anatomischen, ontogenetischen, physiologischen und biochemischen Eigenschaften der Pflanze. Drohnen werden für die gesamte Bandbreite unterschiedlicher Feldversuche und Fragestellungen eingesetzt mit Schwerpunkten folgenden Bereichen:

- Erkennen und Zählen einzelner Pflanzen
- Wechselwirkungen zwischen Düngung und Pflanzenwachstum
- Detektion biotischer und abiotischer Stresseinwirkungen
- Stressresistenz
- Erkennung und Bewertung von Schadorganismen
- Detektion von Pflanzenkrankheiten, Schadinsekten und Unkräuter
- Nutzung von Wärmebildkameras um z. B. Wasserstress zu detektieren

Um die gewünschten Antworten aus den Drohnendaten ableiten zu können, ist die Wahl der „richtigen“ Flughöhe bzw. Bodenauflösung von entscheidender Bedeutung. Je nach Feldfrucht und Fragestellung können Flüge in unterschiedlicher Höhe erforderlich sein. Systematische, hochgenau georeferenzierte Drohnenflüge in sehr geringer Höhe von 5 bis 30 m erlauben die Identifikation einzelner Pflanzen bzw. Pflanzenteile. Das ermöglicht z. B. das Zählen von Einzelpflanzen in einer Parzelle. Damit kann ein neues „Level“ im Feldversuchswesen erreicht werden, in dem für verschiedene Kulturen von Parzellenmaßstab auf den Pflanzenmaßstab gewechselt werden kann. Ein zentrales Kriterium bei der Auswertung von Parzellenversuchen ist die Homogenität der einzelnen Parzellen. Dies lässt sich durch eine statistische Analyse der Bilddaten sehr einfach berechnen und in der Auswertung berücksichtigen.

Zusammengefasst lassen sich aus den Drohnen-Aufnahmen viele Informationen ableiten, bei denen die geometrischen, spektralen oder temporalen Eigenschaften der Pflanzen und deren Entwicklung im Vordergrund stehen. Geometrische Parameter, wie die Wuchshöhe oder auch der Bodenbedeckungsgrad lassen sich mit preisgünstigen Sensoren weitestgehend automatisch berechnen. Untersuchungen zur unterschiedlichen Wirksamkeit von Bioherbiziden lassen sich eher mit den spektralen und temporalen Eigenschaften der Drohnenaufnahmen klären. [Abb. 15](#) gibt einen groben Überblick über die aus Drohnenaufnahmen ableitbaren Informationen in Abhängigkeit ihrer geometrischen, spektralen und temporalen Auflösung. An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass manche der in aufgeführten Parameter nur zu bestimmten phänologischen Entwicklungsstadien zu beobachten sind.

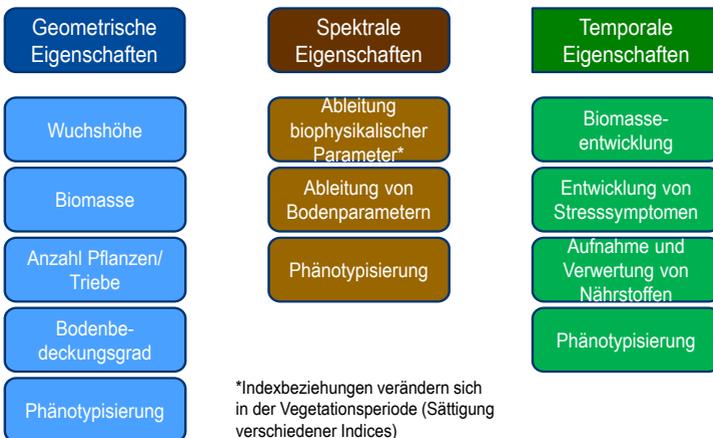


Abb. 15: Beispiele ableitbarer Informationen aus Drohnenaufnahmen für das Feldversuchswesen

### 3.8 Pflanzenschutzmaßnahmen mit Spritzdrohnen

Der Einsatz von Spritzdrohnen begann in den 1990er Jahren mit Mini-Hubschraubern auf Reis- und Gemüsefeldern in Japan und hat mit der Einführung von batteriebetriebenen Drohnen weltweit stark zugenommen. Die Technologie hat sich für kleine Parzellen und Reisfelder bewährt, wo sie erhebliche Vorteile sowohl in der Geschwindigkeit des Einsatzes erbringt als auch eine Reduktion der Gefahren der bisher meist manuellen Spritzmittelgabe ermöglicht. Neue Möglichkeiten ergeben sich auch bei speziellen Precision Farming Anwendungen, wo Drohnen gezielt zur Behandlung infizierter Standorte eingesetzt werden können, was die Menge der benötigten Pflanzenschutzmittel erheblich reduziert. Obwohl die Abdrift von Spritzdrohnen kleiner ist, als bei bisherigen Luftapplikation mit Flugzeug oder Hubschrauber, ist sie dennoch größer als bei herkömmlichen Feldspritzen mit Präzisionsdüsen (Herbst et al. 2020). Hier muss noch Entwicklungsarbeit geleistet werden, um die Abdrift zu verringern und ggf. Pufferzonen zu präzisieren, die zum Schutz der Umwelt erforderlich sind.

Aktuelle Spritzdrohnen sind zwar preiswerter als herkömmliche mechanisierte Boden- und Luftsprühgeräte, sind aber in der Nutzlast und in ihrer Flugzeit begrenzt. Dies bedeutet, dass derzeitige Spritzdrohnen bei großen homogenen Flächen nicht mit der konventionellen Spritztechnologie konkurrieren können. Eine Lösung besteht darin, mehrere UAVs in einem Schwarm zu betreiben. Es gibt eine Reihe von experimentellen UAVs, die viel größere Nutzlasten tragen und auf größeren Flächen wettbewerbsfähiger sein können. Durch die geringe Flughöhe und den starken Luftstrom der Rotoren arbeiten die Spritzdrohnen zielgenau, d. h. mit minimaler Abdrift.

Aufgrund verschiedener rechtlicher Restriktionen ist in Deutschland der Einsatz von Spritzdrohnen nur im Steillagenweinbau möglich. Um sich das aktuelle Potenzial des Drohneneinsatzes vor Augen zu halten, hierzu zwei Zahlen: Als Steillagen, d. h. Hangneigungen  $> 30\%$  sind ca. 14.100 ha Weinbauflächen eingestuft. Davon wurden im Jahr 2018 1745 ha mit Pflanzenschutzmitteln per Hubschrauber behandelt (Deutscher Bundestag 2019).

Alles in allem stellen Spritzdrohnen für den Steillagenweinbau eine Alternative zum Hubschrauber dar, der gleichzeitig wesentlich risikoärmer ist, weniger Lärm verursacht und zudem noch genauer arbeitet. Weitere Vorteile von Spritzdrohnen sind der Einsatz unabhängig vom jeweiligen Bodenzustand bzw. der Zugänglichkeit und es sind keine Fahrgassen nötig. Generell kann die Ausbringung der Sprühmittel bei geringer Abdrift durch GNSS-RTK-Navigation sehr präzise erfolgen. Eine differenzierte Behandlung einzelner Parzellen, Teilflächen und Precision Farming im Allgemeinen ist problemlos möglich. Mit Hilfe von Spritzdrohnen kann das Thema Spot Spraying, d. h. ein selektiver Pflanzenschutz

an bestimmten Stellen, einen neuen Schub bekommen und auch zu einer signifikanten Reduzierung von Herbiziden beitragen.

Ob und inwieweit sich Spritzdrohnen für andere Zwecke in Deutschland zukünftig durchsetzen werden, ist weniger eine Frage der Möglichkeiten und der Wirtschaftlichkeit als des europäischen Regulierungsrahmens und der Beweglichkeit der Behörden, neue Technologien zuzulassen. Augenblicklich verhindert die europäische Pflanzenschutzrichtlinie 2009/128/EG, Artikel 9 grundsätzlich den Pflanzenschutz von Luftfahrzeugen aus. Drohnen sind in diesem Zusammenhang ebenfalls als Luftfahrzeuge eingestuft. Ein Blick zu unseren Nachbarn zeigt, dass es durchaus Potenzial gibt. In der Schweiz ist z. B. seit Juli 2019 grundsätzlich auch der Einsatz im Ackerbau, dem Feldversuchswesen und dem Obst- und Gemüsebau erlaubt. Die dort eingesetzten Drohnen müssen ebenfalls zertifiziert werden und für jede Anwendung ist ein gewisser bürokratischer Aufwand erforderlich.

Unabhängig von der Rechtslage und angesichts der absehbaren künftigen technologischen Entwicklungen haben Spritzdrohnen ein großes Potenzial, insbesondere für den Obst- und Gemüsebau, das Feldversuchswesen und die präzise und gezielte Anwendung von Pflanzenschutzmitteln zur Verringerung der Umweltbelastung.

## Literatur

- Bach, H., Migdall, S., Brohmeyer, G., Brüggemann, L., Buddeberg, M. (2016): Satellitengestützte Ertragsserhebung. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13631>.
- Bah, M. D., Hafiane, A., Canals, R. (2018): Deep Learning with Unsupervised Data Labeling for Weed Detection in Line Crops in UAV images. DOI: [10.3390/rs10111690](https://doi.org/10.3390/rs10111690).
- Bitkom (2018): Fast jeder zehnte Bauer setzt auf Drohnen. [www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Fast-jeder-zehnte-Bauer-setzt-auf-Drohnen](http://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Fast-jeder-zehnte-Bauer-setzt-auf-Drohnen).
- Grenzdörffer, G. (2019): Multispektrale Fernerkundung mit Drohnen. In: DVW e.V. (Hrsg.): UAV 2019 – Geodäten erobern den Luftraum. DVW-Schriftenreihe, Band 94, Wißner-Verlag, Augsburg, 143–158.
- Herbst, A., Bonds, J., Wang, Zh., Zeng, A., He, Xi., Goff, P. (2020): Der Einfluss der Bauart unbemannter Luftfahrzeuge auf die Abdrift der Spritzflüssigkeit. DOI: [10.5073/JfK.2020.01.01](https://doi.org/10.5073/JfK.2020.01.01).
- Iost Filho F.H., Heldens W.B., Kong Z., de Lange E.S. (2020): Drones: Innovative Technology for Use in Precision Pest Management. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31811713/>, Zugriff am 02.08.2021.
- Joos, M., Reustle, J., Becker, M. (2020): Flugroboter Spritzdrohnen – der Deutsche Weinbau 3/2020, 18–22.
- Lottes, P., Khanna, R., Pfeifer, J., Siegwart R., Stachniss, C. (2017): UAV-based crop and weed classification for smart farming. DOI: [10.1109/ICRA.2017.7989347](https://doi.org/10.1109/ICRA.2017.7989347).

- Louargant, M., Villette, S., Jones, G., Vigneau, N., Paoli, J. N., Gée, C. (2017): Weed detection by UAV: simulation of the impact of spectral mixing in multispectral images. *Precision Agric* 18, 932–951.
- Madec, S., Baret, F., Solan, F., Solan, de Benoit, Thomas, S., Dutartre, D., Jezequel, S., Hemmerlé, M., Colombeau, G., Comar, A. (2017): High-Throughput Phenotyping of Plant Height: Comparing Unmanned Aerial Vehicles and Ground LiDAR Estimates. DOI: [10.3389/fpls.2017.02002](https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02002).
- Maes, W., Steppe, K. (2018): Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. DOI: [10.1016/j.tplants.2018.11.007](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007).
- Messina, G., Modica, G. (2020): Applications of UAV Thermal Imagery in Precision Agriculture: State of the Art and Future Research Outlook. DOI: [10.3390/rs12091491](https://doi.org/10.3390/rs12091491).
- Montgomery, K., Henry, J. B., Vann, M. C., Whipker, B. E., Huseh, A. S., Mitasova, H. (2020): Measures of Canopy Structure from Low-Cost UAS for Monitoring Crop Nutrient Status. DOI: [10.3390/drones4030036](https://doi.org/10.3390/drones4030036).
- Näsi, R., Viljanen, N., Kaivosoja, J., Alhonoja, K., Hakala, T., Markelin, L., Honkavaara, E. (2018): Estimating Biomass and Nitrogen Amount of Barley and Grass Using UAV and Aircraft Based Spectral and Photogrammetric 3D Features. DOI: [10.3390/rs10071082](https://doi.org/10.3390/rs10071082).
- Péna, J.M; Torres-Sanchez, J., de Castro, A. I., Kelly, M., López-Granados, F. (2013): Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images. DOI: [10.1371/journal.pone.0077151](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077151).
- Pflanz, M., Nordmeyer, H. (2016). Automated weed detection in the field – possibilities and limits. DOI: [10.5073/jka.2016.452.033](https://doi.org/10.5073/jka.2016.452.033).
- Schulz, R. R. (2014): Stickstoffdüngung von Raps nach N-Herbstaufnahme (Biomassemodell). [www.landwirtschaft-mv.de/static/LFA/Dateien/Hefte/MdLFA\\_Heft53.pdf](http://www.landwirtschaft-mv.de/static/LFA/Dateien/Hefte/MdLFA_Heft53.pdf), Zugriff am 10.01.2022.

## Kontakt

Dr.-Ing. Görres Grenzdörffer  
 Universität Rostock, Professur für Geodäsie und Geoinformatik  
 J.-v.-Liebig Weg 6, 18059 Rostock  
[goerres.grenzdorffer@uni-rostock.de](mailto:goerres.grenzdorffer@uni-rostock.de)



# Untersuchung unzugänglicher untertägiger Bergwerksanlagen mittels Consumer-UAS

Robert Delleske | Andreas Oberrauner

## 1 Einleitung

Weil Form und Lage vieler vorhandener Untertagestrukturen kaum bekannt ist, stellt das Betreten solcher Hohlräume zur räumlichen Vermessung oft eine Gefahr für die Durchführenden dar. Um dennoch genaue Daten über Gestalt und Zustand in digital verarbeitbarer Form aus solchen Untertagebereichen zu gewinnen, wurde in einem Gemeinschaftsprojekt von Georesearch Forschungsgesellschaft und Geoconsult ZT GmbH ein UAS-gestützter Befliegungsservice entwickelt. Seriennahe – und damit relativ kostengünstige – UAVs stellen die Flugkomponente für diesen Service dar. Diese wurden – mit einem Schutzkäfig und passendem Geleucht für Untertage ausgestattet – in unterschiedlichen Hohlräumen auf ihre Verwendbarkeit getestet und die gewonnenen Kameradaten photogrammetrisch und videotechnisch ausgewertet. Damit steht der Service sowohl zur Inspektion als auch für räumliche Aufnahmen unzugänglicher Untertagebereiche zur Verfügung.

## 2 Servicestruktur

Am Markt erhältliche Drohnensysteme für den Untertageeinsatz zeichnen sich durch hohe Spezialisierung, rasche Weiterentwicklung und damit hohe Anschaffungskosten aus. Flugbetrieb untertage unterscheidet sich jedoch wesentlich von Standardanwendungen im Gelände: Dunkelheit, begrenzte Räume, Feuchtigkeit und die Abwesenheit von Navigationssystemen erschweren die Datenaufnahme für ungeübte Piloten immens. Flugregelungseinrichtungen wie z.B. Abstandssensoren auf den UAVs

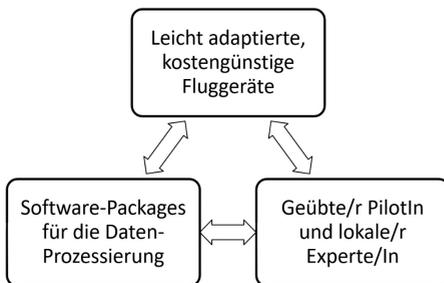


Abb. 1: Servicestruktur von UAS\_Underground

können nur begrenzt unterstützen, da sie zwar vor Abstürzen schützen können, jedoch auch die zu brauchbaren Ergebnissen führende Befliegungsrouten einer gewissen Routine bedarf.

Die Philosophie von UAS\_Underground ist es daher, günstige Flugsysteme zu verwenden und regelmäßiges Pilotentraining in die Servicestruktur zu integrieren (Abb. 1). Die nachfolgende Datenauswertung erfolgt in marktüblichen Softwarepaketen (Pix4D, CloudCompare, etc.).

### 3 Wesentliche Erkenntnisse aus durchgeführten Flugprogrammen

Zur Erkundung der Untertagegültigkeit seriennaher UAVs wurde ein Testprogramm in mehreren Untertage-Bergwerken in Österreich durchgeführt. Dabei wurde sowohl in historischen Abbaubereichen als auch in modernen Bergbaubetrieben und Infrastruktureinrichtungen geflogen und Daten sowie regelmäßig Flugpraxis gesammelt. Die Auswertungen aus diesen Befliegungen lieferten sowohl räumliche Modelle der Untertagestrukturen als auch Bildinformation über den Zustand des jeweiligen Hohlraums bzw. auch über vorhandene Einbauten.

So wurden beispielsweise die Belüftungsbauwerke der Innenstadt-Parkgarage im Salzburger Mönchsberg mittels UAS\_Underground inspiziert und mittels sphärischer („360°“) Kamera entsprechendes Videomaterial über anders kaum erreichbare Schachtbereiche der dortigen Betreibergesellschaft zur Verfügung gestellt.

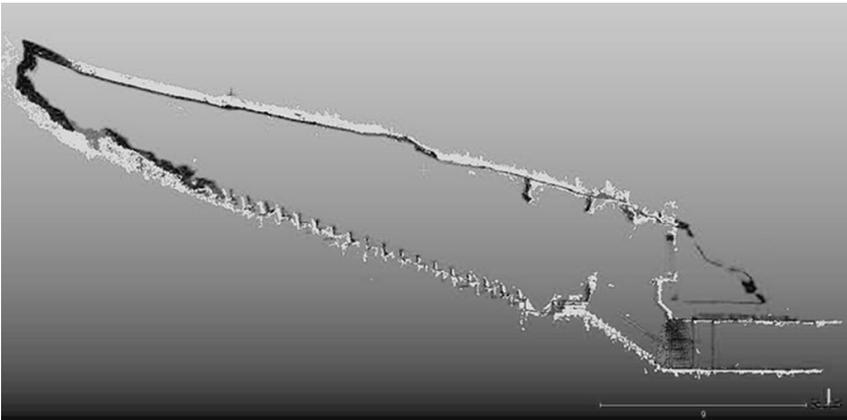


Abb. 2: Längsschnitt einer Kaverne aus Messungen mittels Photogrammetrie (weiß) und terrestrischem Laserscan (schwarz). Anmerkung: Die dargestellte Kaverne wird als Veranstaltungsort genützt und ist daher mit Sitzreihen, Scheinwerfern und Bühne bestückt.

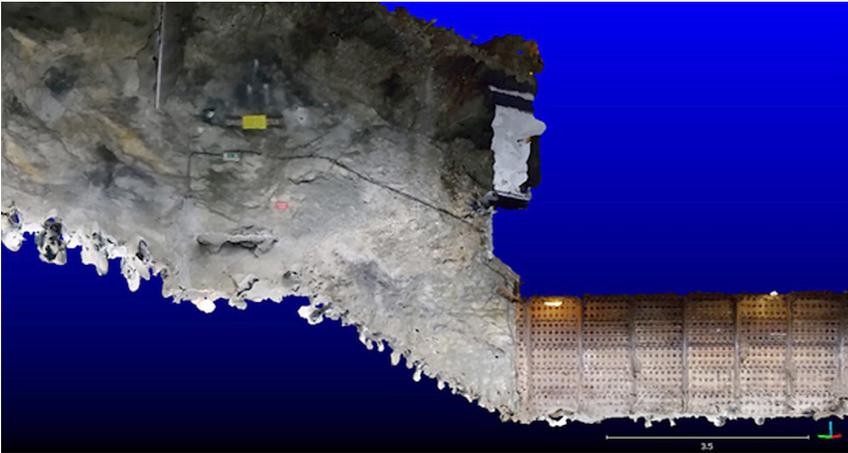


Abb. 3: Detail des Kavernenzugangs nach photogrammetrischer Auswertung im 3D-Modell

Erhaltene Daten aus Befliegungen zum Zwecke photogrammetrischer Modellierung wurden außerdem mit parallel durchgeführten Laserscans verglichen, um eine Abschätzung der erreichbaren Genauigkeiten zu erhalten, wobei die Differenzen im cm-Bereich lagen, diese jedoch bei komplizierteren Strukturen etwas zunahmten, sodass einige Bereiche bis etwa 0,5 m differierten. Der Längsschnitt durch eine Kaverne in Abb. 2 illustriert diese Messunterschiede.

Ein wesentlicher Vorteil der Photogrammetrie besteht in der fotomäßigen Darstellung der Oberfläche im Modell. Farben, Schattierungen und Textur der aufgenommenen Bereiche können sehr klar erkannt werden und geben einen guten Eindruck des Hohlraumzustandes wieder. Abb. 3 zeigt dies schön an einem gesicherten Zugangsbereich der befliegenen Kaverne.

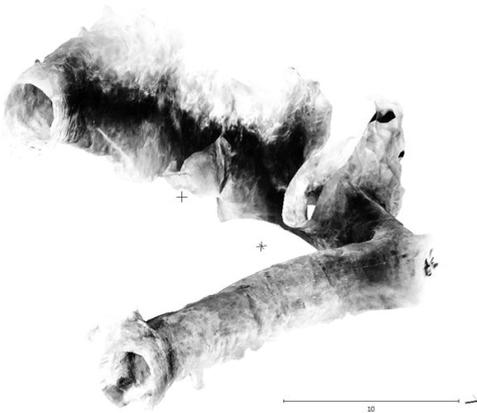


Abb. 4: Digitales Modell aus Befliegung eines unzugänglichen Abbaubereiches in einem historischen Bergwerk (Ausschnitt)

Weitere Befliegungsszenarien betrafen historische Bergwerkhohlräume, in denen sowohl vertikale Schächte als auch unregelmäßige Abbaukavernen erkundet und photogrammetrisch modelliert wurden. Abb. 4 zeigt das Ergebnis einer solchen Mo-

dellierung in einem historischen sog. Stockwerksbau, welcher durch den händischen Abbau vertikaler Lagerstättenteile entstand. Solche photogrammetrisch modellierten Bereiche stehen nach Prozessierung und Bearbeitung zur Implementierung in vorhandene Bergbau-Visualisierungs-Systeme zur Verfügung; das jeweilige Importformat kann nach Erfordernis abgestimmt werden.

## 4 Zusammenfassung

Obwohl die Einsetzbarkeit von UAVs immer praktikabler wird und auch untertage einsetzbare Systeme am Markt verfügbar sind, ist die Verwendung in solch spezieller Umgebung für ungeübte oder nur zeitweise fliegende Piloten mit einem beträchtlichen Beschädigungs- oder Verlustrisiko der üblicherweise recht teuren UAVs behaftet. UAS\_Underground wurde daher als ein Service konzipiert, welcher von regelmäßig untertage fliegenden Experten durchgeführt wird. Die Befliegungen im Rahmen der Testeinsätze übertrafen hinsichtlich der Erkenntnisse und den erarbeiteten Einsatzfällen die Erwartungen. Sowohl bei Messflügen als auch bei Inspektionseinsätzen untertage konnten nach kurzer Zeit recht genaue räumliche Modelle ermittelt bzw. kritische Informationen aus unzugänglichen Bereichen erhalten werden.

Die im Rahmen der Befliegungsmissionen erarbeiteten Servicebereiche, welche durch UAS\_Underground abgedeckt werden können, sind derzeit:

- Erfassung und Kartierung von nicht zugänglichen Bereichen,
- Inspektion und Videodokumentation solcher Bereiche sowie
- Aufklärungstätigkeiten bei unvorhergesehenen Begebenheiten mit z. B. unklarer Gefahrensituation.

### Kontakt

Robert Delleske  
GEORESEARCH Forschungsgesellschaft mbH  
Wissenspark Salzburg-Urstein  
Urstein Süd 13, 5412 Puch bei Hallein, Österreich  
[robert.delleske@georesearch.ac.at](mailto:robert.delleske@georesearch.ac.at)

Dr. Andreas Oberrauner  
GEOCONSULT ZT GmbH  
Wissenspark Salzburg-Urstein  
Urstein Süd 13, 5412 Puch bei Hallein, Österreich  
[andreas.oberrauner@geoconsult.com](mailto:andreas.oberrauner@geoconsult.com)

# Veredelung und Bereitstellung photogrammetrischer Daten am Beispiel von (UAV-)Infrastrukturprojekten

Karsten Holste | Christian Hesse | Ralf Esser

## 1 Einführung

Aufgrund der guten Verfügbarkeit von UAV-Systemen zur präzisen Erfassung von Bestandsbauwerken werden diese Daten immer stärker in der Baupraxis angefragt und verwendet. Jedoch ergeben sich dann regelmäßig bei der gewünschten Veredelung und Bereitstellung für die Infrastrukturbetreiber, die Bauunternehmen und die Planenden Überraschungen hinsichtlich der Verwendungsfähigkeit dieser Daten. In diesem Beitrag soll daher anhand von Praxisbeispielen geschildert werden, wie die niedrigschwellige Verfügbarkeit von Vermessungsdaten aus einem oder unterschiedlichen Multisensorsystemen realisiert werden kann.

## 2 Drohnenbefliegung von niedersächsischen Häfen

Niedersachsen Ports ist der größte Betreiber öffentlicher Seehäfen in Deutschland. 2020 sollten die Inselversorgungshäfen auf Norderney, Baltrum, Langeoog, Spiekeroog, Juist und Wangerooge sowie die Häfen in Cuxhaven, Stade, Emden, Norddeich, und Wilhelmshaven auf einer Gesamtfläche von rund 1200 ha durch Drohneinsatz befliegen werden. Zusätzlich waren Bestandsaufnahmen für die Niedersachsenbrücke und die UVG-Brücke in Wilhelmshaven durchzuführen. Hintergrund der Beauftragung an die HydroMapper GmbH war die Aktualisierung der Bestandsunterlagen für die Häfen und die Übernahme der Daten in das vorhandene CAD beziehungsweise GIS-System.

Für die Durchführung der Leistung konnten drei kompetente Partner gefunden werden:

- für die Drohnenaufnahmen die AI-Survey GmbH aus Kassel,
- die Glückauf-Vermessung GmbH aus Sondershausen für das Postprocessing: Photogrammetrie, Orthobilder und Teile der CAD-Bearbeitung,
- Dr. Hesse und Partner Ingenieure (dhp:i) für die Vermessung der Passpunkte und Teile der CAD-Bearbeitung.

Als wesentliche Leistungsparameter waren im Rahmen der Befliegung eine GSD von 1 cm zu erfüllen und in der Auswertung neben den Orthophotos auch Höhenmodelle und Flächenkategorisierungen sowie objektbezogene Bündelblockausgleichungen vorzunehmen.

## 2.1 Drohnenaufnahme im Niedersächsischen Wattenmeer

Der Großteil der Drohnenbefliegung wurde im Juni und Juli 2020 durchgeführt. Aufgrund der sehr guten Zusammenarbeit aller Beteiligten lagen bereits nach kurzer Zeit alle erforderlichen Genehmigungen vor. Insbesondere bei den Inselhäfen waren aufgrund der Tide besondere Randbedingungen zu beachten. Neben den Land- und Infrastrukturflächen waren nämlich auch innerhalb eines engen Zeitfensters bei Tideniedrigwasser bestimmte Wattflächen zu befliegen (siehe [Abb. 1](#)).

Durch die vollständig vom Fährverkehr unabhängig realisierten An- und Abreisen konnten die Befliegungen auf den Inselversorgungshäfen innerhalb von zwei Wochen abgeschlossen werden. Eine besondere Herausforderung waren dabei die geringen Fahrwassertiefen, durch die teilweise eine Nachtanreise erforderlich war, um dann bei Tideniedrigwasser für die Vermessung vollständig einsatzbereit zu sein.



**Abb. 1:** Passpunktvermessung auf Spiekeroog (dhp:i) und Befliegung in Benseniel (AI-Survey)

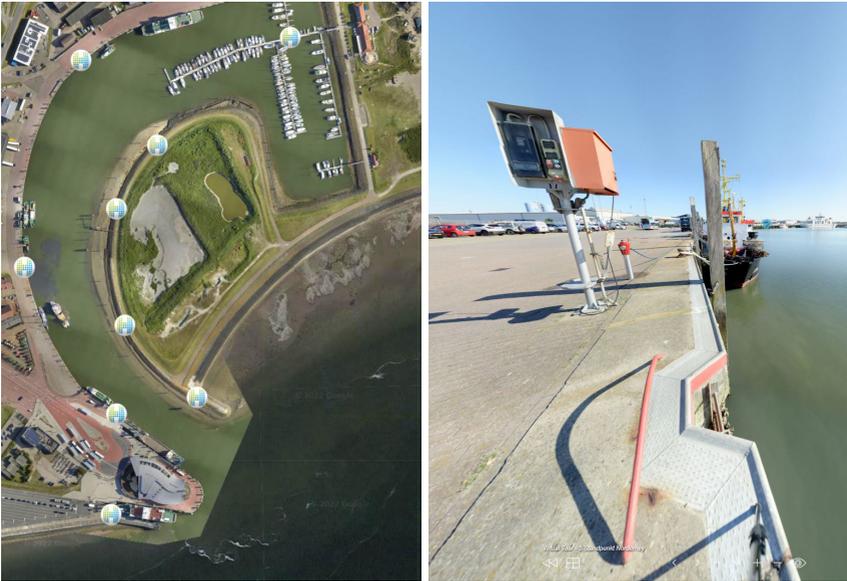


Abb. 2: Virtual Tour Norderney und Ausschnitt Einzelpanorama mit beispielhafter Kai-  
mauerausrüstung

Parallel zum Drohneneinsatz wurden für eine effizientere Bearbeitung der CAD-Daten virtuelle Touren mit HD 360°-Panoramen aufgenommen. Diese wurden den Projektteams dann später für die CAD-Modellierung zur Verfügung gestellt. So konnten insbesondere vertikal orientierte Bauteile, wie zum Beispiel Dalben, Masten oder Stromkästen zweifelsfrei erkannt und in CAD-Plänen korrekt dargestellt werden (siehe Abb. 2).

## 2.2 Auswertung und Bereitstellung der Daten

Nach der Durchführung der photogrammetrischen Auswertung und der Erstellung der True-Orthophotos wurden die Daten zusammen mit den erzeugten Punktwolken den Auswertungsteams zur CAD-Bearbeitung zur Verfügung gestellt.

Um die Digitalisierung der Punktsymbole aus der Drohnenbefliegung effizient zu gestalten, wurde von den Auswertungsteams bereits während der Digitalisierung der Punktwolken und DOP auf eine code-basierte Auswertung zurückgegriffen. Hierfür wurde eine Software für das Code- und Layermanagement, welche für die Auswertung von terrestrischen Bestandsaufnahmen entwickelt wurde, für dieses Projekt adaptiert.

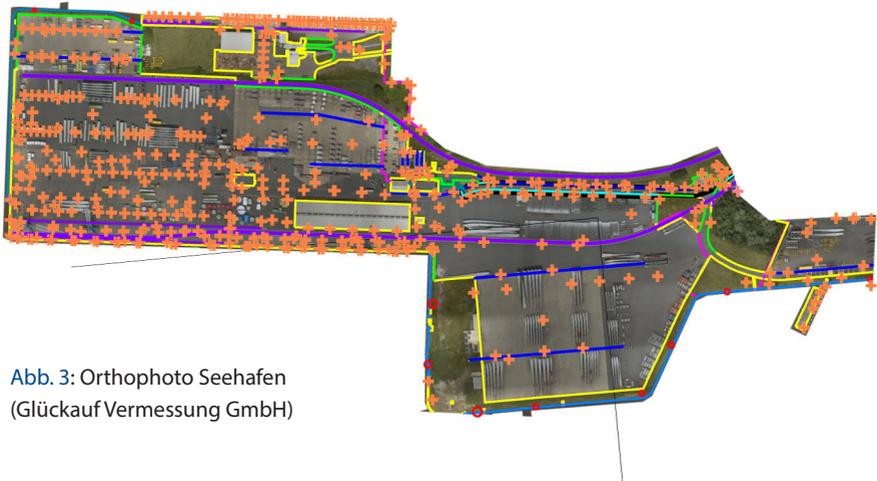


Abb. 3: Orthophoto Seehafen  
(Glückauf Vermessung GmbH)



Abb. 4: Orthophoto Seehafen in  
Überlagerung mit CAD-Objekten

Als Eingangsdaten wurde die Blockbibliothek des Auftraggebers angepasst und erweitert. Zudem wurde eine Zuordnungsmatrix aufgestellt, in der der jeweilige Code einem Block- und einem Layernamen zugeordnet ist. Bei der punktuellen Digitalisierung unter Verwendung der Kombination von Orthobild und der Punktwolke aus der Befliegung, musste dieser Code zur Erzielung der Teilautomation bei der CAD-Bearbeitung eingestellt sein (siehe [Abb. 3 und 4](#)).

In der von dhp:i entwickelten Software wurden diese Eingangsdaten dann schließlich zu dxf-Dateien inklusive der zugehörigen Linienverbindungen umgewandelt, die die jeweiligen Blöcke an der richtige Stelle einfügt, skaliert und ausrichtet.

### 3 Vertikale wasserseitige Photogrammetrie (VDOP) und Punktwolkendaten bei Hafenbauwerken

Für die Bauwerksprüfung und die Planung von längenorientierten Hafenbauwerken sind photogrammetrische Aufnahmen und Punktwolken von großer Bedeutung. So können Bauwerksprüfungen, die bei Wind und Wetter an der Küste stattfinden, in erheblichem Maße vor Ort verkürzt und sehr qualifiziert vorbereitet werden. So wurde als Alternative und Ergänzung zum wetterabhängigen Drohneneinsatz und als hochauflösende Alternative zu Laserscans von HydroMapper das sogenannte HD-Scanning-System entwickelt, das wasserseitig Bauwerke in HDR-Qualität erfasst (Abb. 5 und 6).



Abb. 5: HD-Scanning JadeWeserPort



Abb. 6: VDOP eines Kaimauerblocks am JadeWeserPort in Wilhelmshaven

Dem Bauwerksbetreiber können so messfähige vertikale Orthophotos (VDOP) zur Verfügung gestellt werden. Hierdurch ergibt sich für die Bauwerksprüfenden eine sehr niedrigschwellige Möglichkeit, Hotspots vor der handnahen Prüfung am Bildschirm zu erkennen und für eine verdichtete Aufnahme vor Ort vorzubereiten sowie eine digitale Schadensdokumentation und Auswertung durchzuführen.

In Verbindung mit einer Drohnenbefliegung konnten so im Mai 2021 die rund 1,8 km lange Hauptkaje des JadeWeserPorts innerhalb von sieben Stunden für die Vorbereitung der Bauwerksprüfung aufgenommen werden. Die Leistungsfähigkeit der bootsgestützten photogrammetrischen Objektaufnahme liegt bei circa 5 bis 6 km Kaimauer am Tag. Beim JadeWeserPort wurden drei Fahrten (Niedrigwasser, Mittelwasser und Hochwasser) durchgeführt, um so einen Überblick über die bei Niedrigwasser rund zehn Meter hohe Kaimauer zu erhalten und eine ausreichende Überlappung der Bildverbände sicherzustellen.

Aus den aufgenommenen Einzelbildern werden im Rahmen der Auswertung ein VDOP und eine Punktwolke erstellt (Abb. 6), welche georeferenziert sind. Das VDOP wird insbesondere als Grundlage für die lückenlose Dokumentation für die Vorbereitung einer Bauwerksprüfung oder als Bestandteil der Lebenszyklusbewertung genutzt. Durch die Möglichkeit der Verlegung von Teilprozessen der Bauwerksprüfung in das digitale Umfeld können Inspektionen bis zu 50 % kosteneffizienter erfolgen.

## 4 Kombination von Multisensorsystemen über und unter Wasser

Aufgrund der Bestandssituation in den deutschen Binnen- und Seehäfen müssen zur 3D-Bestandsaufnahme auch immer wieder Kombinationen der in den Kapiteln 2 und 3 genannten Verfahren zusammen mit Scanverfahren unter Wasser ausgeführt werden, um so ein vollständiges Bestandsmodell für die Bauwerksprüfung oder Planungen verwenden zu können.

Insgesamt existieren in Deutschland etwa 3000 km Uferwände in Häfen und an Wasserstraßen sowie rund 2500 Verkehrswasserbauwerke entlang der Bundeswasserstraßen. Die Datenlage dieser Bauwerke ist häufig nicht vollständig oder nur teilweise digitalisiert.

Ein großer Teil dieser Bauwerke befindet sich unter Wasser. Bislang erfolgt hier die Datenaufnahme entweder händisch mit Tauchern und Bleilot oder sie basiert auf analogen Bestandsunterlagen, die häufig die Realität im Bestand nicht widerspiegeln. Ein echter Vorteil für die Vervollständigung des digitalen Zwilings im Kaimauerbau ist daher die Kombination eines Unterwasserscannings zusammen mit der klassischen Drohnenaufnahme (Abb. 7).

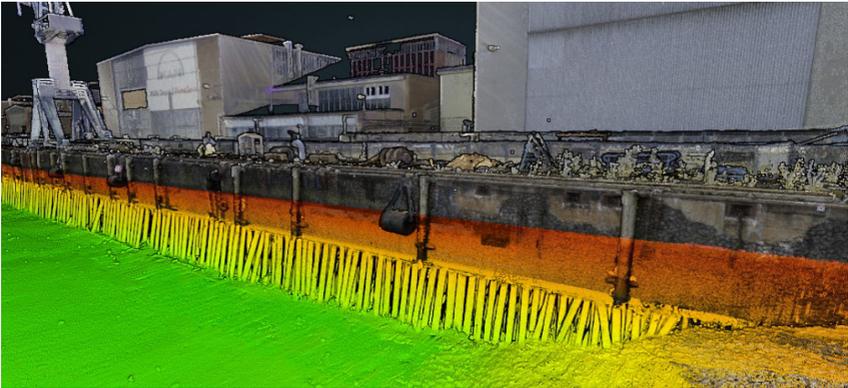


Abb. 7: Punktwolke einer Kaimauer (Schwergewichtsmauer auf Holzpfählen) in Hamburg

Das Unterwasserscanning ist ausgelegt für die wasserseitige Fahrt entlang der längenorientierten Kaimauern. Auf diese Weise können am Tag etwa 1,5 km Kaimauer mit einer hohen Objektauflösung erfasst werden.

Aus den prozessierten Vermessungsdaten wird im Rahmen einer 3D-Modellierung ein vollständiges As-Built-Pfahlmodell erstellt. Die hohe Auflösung und Genauigkeit in Lage und Position verbessern die Qualität und Aussagekraft der Planungen und minimieren das Risiko im gesamten Instandsetzungs- oder Bauwerksprüfungsprozess.

## 5 Fazit und Ausblick

Die hohe Genauigkeit und Auflösung der durch HydroMapper erfassten 3D-Daten ermöglicht es Betreibern, Ingenieurbüros und Bauunternehmen, georeferenzierte und flächige Bestandsaufnahmen für die Bauwerksprüfungen, Planungen und Bauausführungen sowie zur Verbesserung der Lebensdaueranalyse zu erheben. Unabhängig von der Aufnahmekonfiguration können viele Vermessungsdaten miteinander kombiniert werden.

Die Ergebnisse können dabei ortsunabhängig von allen Disziplinen in einem barrierefreien WebPortal genutzt werden. Durch die Verbesserung der vorliegenden 3D-Datenbasis lassen sich für die am Bau Beteiligten erhebliche Effizienzgewinne bei der Instandsetzungsplanung, der Bauwerksprüfung, der Ausführung von Baumaßnahmen oder bei der Erstellung von digitalen Bestandsunterlagen realisieren.

Darüber hinaus hilft das Wissen über den Erhaltungszustand, um Maßnahmen und Erfordernisse frühzeitig abzuschätzen und entsprechend zuverlässig durchführen zu können.

## Literatur

- Hesse, C., Holste K., Neumann, I. (2019): 3D HydroMapper, ein innovatives Über- und Unterwasserscansystem zur Bauwerksinspektion. In: DVW e.V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning 2019 (TLS 2019). DVW-Schriftenreihe, Band 96, Wißner-Verlag, Augsburg, 53–62.
- Hesse, C., Holste, K., Neumann, I., Esser, R., Geist M. (2021): 3D Hydromapper – Ein innovatives Messsystem für die Erfassung, Prüfung und das Management von Wasser-Infrastrukturbauwerken. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 4/2021, 259–265. DOI: [10.12902/zfv-0371-2021](https://doi.org/10.12902/zfv-0371-2021).
- Hesse, C., Holste, K., Neumann, I., Hake, F., Alkhatib, H., Geist, M., Knaack, L., Scharr, C. (2019): 3D HydroMapper: Automatisierte 3D-Bauwerksaufnahme und Schadenserkennung unter Wasser für die Bauwerksinspektion und das Building Information Modelling. *Hydrographische Nachrichten*, Jg: 113, 26–29, 06/2019 Weitere Informationen, ISSN: 1866-9204.
- Holste, K., Hesse, C., Neumann, I., Bassen, S. (2019): 3D HydroMapper – digitale Inspektion von Bauwerken über und unter Wasser, In: *Bautechnik*, 96/2019. DOI: [10.1002/bate.201900097](https://doi.org/10.1002/bate.201900097).

## Kontakt

Dipl.-Ing. (FH) Karsten Holste  
Hydromapper GmbH  
Veritaskai 8, 21079 Hamburg  
[karsten.holste@wk-consult.com](mailto:karsten.holste@wk-consult.com)

Unmanned Aerial Vehicles/Systems (UAV/UAS) sind in vielen Anwendungsbereichen zur Datenerfassung etabliert. Die Vielzahl an Anbietern und Lösungen spannt einen Bogen vom Hobbybereich hin zu mit hochwertigen Sensoren bestückten Profi-Lösungen.

Neben der zunehmenden Automatisierung von Messung und Auswertung rückt die Bestückung von UAV mit kleinen Laserscannern in den Fokus. Waren hier bislang Forschungseinrichtungen führend in der Sensor- und Softwareentwicklung, gibt es aktuell auch auf dem Massenmarkt entsprechende Produkte, was zunehmend die Fragestellung der wirtschaftlichen Kombination von statischen, bodengebundenen kinematischen und UAV-getragenen Scans aufwirft. Zur Vorbereitung eines UAV-Einsatzes für Vermessungsaufgaben gehören zuverlässige Bildflugplanung sowie Signalisierung und geodätische Bestimmung von Passpunkten.

Das Seminar „UAV 2022 – Innovation und Praxis“ greift diese Aspekte auf und informiert – kombiniert mit einer Vielzahl von Beispielen aus der Praxis – über den aktuellen Status quo.



ISBN: 978-3-95786-312-6



9 783957 863126

Schriftenreihe des DVW  
Band 100/2022  
Printversion: 26,60 Euro  
PDF: kostenfrei  
[www.geodaesie.info](http://www.geodaesie.info)

