

Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

## UAV 2023– Geodaten nach Maß

Beiträge zum 217. DVW-Seminar am  
23. und 24. Februar 2023 in Braunschweig





Arbeitskreis 3 „Messmethoden und Systeme“

## UAV 2023 – Geodaten nach Maß

Beiträge zum 217. DVW-Seminar am  
23. und 24. Februar 2023 in Braunschweig

Redaktion:  
Markus Gerke  
Ahmed Alamouri

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



Schriftenreihe des DVW  
Band 105  
Wißner-Verlag

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

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

Schriftenreihe des DVW  
Band 105

#### **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 2023 – Geodaten nach Maß, DVW-Schriftenreihe, Band 105,  
Augsburg, 2023, 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: 978-3-95786-338-6  
ISSN 0940-4260

© Wißner-Verlag, Augsburg 2023  
[www.geodaesie.info](http://www.geodaesie.info)

Herstellung: Wißner-Verlag, Augsburg  
Bildnachweis Cover: Natnan Srisuwan (Foto), Damien Geso (Gitter)

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: Sensorik und Plattformen</b>	
Michael Cramer Aktuelle Kameras für den UAV-Einsatz	9
Magnus Bremer Einsatz von ULS zum Monitoring natürlicher Prozesse	25
Christian Kaiser Innovative Konzepte unbemannter Systeme: freifliegend, fahrend, gefesselt – vom Drohnen-Hangar über automatisierte Regelbefliegungen bis zum Leitstand	37
<b>Session 2: Innovative Auswertung</b>	
Thomas Kraft   Henry Meißner   Matthias Geßner   Julius Gäde   Jörg Brauchle   Daniel Hein   Julia Gonschorek   Jörg Helmrich   Steven Bayer   Ralf Berger Hybride UAV-Systeme: Technologie und Anwendungen	61
Jakob Unger UAV-Einsatz in der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung	75
Norbert Haala   Michael Kölle Automatische Interpretation von UAV-Punktwolken – Spielerei oder praktischer Nutzen?	95
Peter Krzystek   Sebastian Briechle   Sebastian Dersch   Norbert Molitor Objektdetektion und -klassifikation mit Hilfe hochaufgelöster UAV-Daten und maschinellem Lernen: Anwendungen in Risikogebieten und im Forst	105

### **Session 3: Regularien und Einbettung in den Luftraum**

Andrés Arango Pérez

Unbemannt im bemannten Luftraum – Über die Integration unbemannter  
Flugzeuge ins Luftverkehrssystem \_\_\_\_\_ 127

### **Session 4: Podiumsdiskussion: Fluggenehmigung in der Praxis**

Patrick Havel | Marten Krull

Praktische Erfahrungen bei der Beantragung von Fluggenehmigungen \_\_\_\_ 141

# Vorwort

Die Nutzung UAV-basierter Datenerfassung und -auswertung ist heute für viele professionelle AnwenderInnen aus der Geodäsie und Photogrammetrie, und allgemein dem Geoinformationswesen, ein beinahe tägliches Geschäft. Mehr als bei anderen Technologien unterliegen Systeme, Software und rechtliche Rahmenbedingungen einem ständigen Wandel. In diesem Umfeld ist daher eine fortwährende Auseinandersetzung mit dem Status quo unerlässlich. Dazu gehören Fragen rund um Regularien und Fluggenehmigungsverfahren, Informationen zu modernen Plattformen und Sensoren, sowie zu innovativen Ansätzen für praktische Anwendungen.

Das 217. DVW-Seminar „UAV 2023 – Geodaten nach Maß“ greift all diese Punkte auf. In vier Sitzungen werden relevante Fragen adressiert: In „Sensorik und Plattformen“ werden sowohl Entwicklungen auf dem Drohnenmarkt als auch aktuelle Kamerasysteme beleuchtet. Das in den letzten Jahren in der Praxis etablierte drohnenbasierte Laserscanning wird ebenso angesprochen wie innovative, maßgeschneiderte Hardware-Lösungen. In der Sitzung „Innovative Auswertung“ berichten weitere Experten über Datenbearbeitung in verschiedenen Kontexten, beispielsweise im behördlichen Bereich, aber auch hinsichtlich automatischer Auswertung. Die dritte und die letzte Sitzung, in der auch eine Podiumsdiskussion vorgesehen ist, widmen sich dem komplexen Thema rund um Regulierung und Fluggenehmigungsverfahren.

Wie auch in vergangenen Jahren wird das Seminar gemeinsam von verschiedenen Organisationen veranstaltet. Unter dem Dach der GEODÄSIE-AKADEMIE erfolgt die fachliche und organisatorische Betreuung durch den bisherigen DVW AK 3 „Messmethoden und Systeme“ (neu AK 4 „Ingenieurgeodäsie“) und das BILDUNGSWERK VDV, FG 2 „Messverfahren“. Des Weiteren tragen die beiden Arbeitskreise „Sensoren und Plattformen“ sowie „Optische 3D-Mess-technik“ der DGPF (Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation) das Programm zu großen Teilen.

Die lokale Organisation liegt beim Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der TU Braunschweig. Wir hoffen, dass sich die TeilnehmerInnen auf unserem Campus wohlfühlen und dass das diesjährige UAV-Seminar an die Erfolge der letzten Jahre anknüpfen kann. Der vorliegende Tagungsband ist online kostenlos im Internet über die Homepage des Wißner-Verlages (<https://geodaesie.info>) verfügbar, wird jedoch den TeilnehmerInnen auch in gedruckter Form zugänglich gemacht.

Am Vortag des Seminars besteht erstmals die Möglichkeit, sich im Rahmen eines Workshops »Software-Produkte für typische Aufgaben bei der UAV-Bild-daten-Verarbeitung« mit dem Funktionsumfang der in der geodätischen Praxis

am häufigsten eingesetzten Produkte auseinanderzusetzen. Wir danken insbesondere den beiden Referenten Marten Krull und Jakob Unger für ihre Bereitschaft, ihr Wissen zu teilen. Ferner hat Heinz-Jürgen Przybilla dankenswerter Weise die hochwertigen Testdaten bereitgestellt. Auch hier hoffen wir, dass sich viele wichtige Erkenntnisse ergeben.

Markus Gerke, Technische Universität Braunschweig, DGPF, DVW

Ahmed Alamouri, Technische Universität Braunschweig

Norbert Haala, Universität Stuttgart, DGPF

Ingo Neumann, Leibniz Universität Hannover, DVW

Thomas Kersten, HafenCity Universität Hamburg, DGPF, DVW

Heinz-Jürgen Przybilla, Hattingen, DGPF, DVW

Danilo Schneider, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, DGPF

Peter Wasmeier, Hochschule München, DVW

# Session 1: Sensorik und Plattformen



# Aktuelle Kameras für den UAV-Einsatz

Michael Cramer

## 1 Einleitung

Nach der Erfindung der Fotografie – üblicherweise auf das Jahr 1839 datiert – wurden Kameras schon wenig später (ab Mitte 19. Jahrhunderts) für messtechnische Arbeiten verwendet. Federführend waren diesbezüglich die unabhängig voneinander und quasi zeitgleich durchgeführten Untersuchungen von Meydenbauer in Deutschland (Grimm 2021) und Laussedat in Frankreich (Egels et al. 2019). Beide beschäftigten sich mit Methoden, die mit den Kameras aufgenommenen Bilder unter Verwendung der Perspektive für die geometrische Rekonstruktion der abgebildeten Objekte zu nutzen. Seitdem verwendet die Photogrammetrie in der Regel flächenhaft aufnehmende optische Systeme als Hauptdatenquelle. Im Rahmen dieses Beitrags sollen die für UAV-Anwendungen üblicherweise genutzten RGB-Kameras exemplarisch vorgestellt werden. Der Schwerpunkt liegt auf der Diskussion von wichtigen Kameramerkmale unter Berücksichtigung der Besonderheiten der UAV-Anwendung für messtechnische Zwecke. Im zweiten Teil wird an einem Beispiel das Potenzial moderner UAV-Kameras aufgezeigt.

## 2 Systemparameter einer Kamera

Es gibt heutzutage eine unübersichtliche Vielfalt von Kameras. Das gilt vor allem für den Consumer-Bereich. Die analogen Kameras wurden dabei vollständig von der digitalen Bilddatenerfassung verdrängt. Digitale Kameratechnologie hat auch in der klassischen Luftbildphotogrammetrie seit ca. dem Jahr 2000 die klassischen großformatigen Filmkameras ersetzt. Diese Kameras verwenden zur Realisierung von großen Bildern oftmals sogenannte Mehrkopf-Konstellationen (multi-head oder multi-cone Kameradesign): Mehrere Kameras werden auf einer gemeinsamen Kameraplattform integriert und durch ein nachgeschaltetes Zusammenrechnen der kleineren Einzelbilder (Stitching) wird dann ein großformatiges Bild erzeugt. Im Unterschied dazu arbeiten UAV-Kameras hauptsächlich mit klassischen Einzelobjektiven, d. h. sie haben einen lichtempfindlichen Sensor und ein Objektiv.

Da es bei den messtechnischen Anwendungen in der Regel um hohe geometrische Genauigkeiten geht, kommen Systeme mit kürzerer Brennweite zum

Einsatz. Die Brennweiten entsprechen oftmals 28 bis 50 mm bezogen auf das Kleinbild-Äquivalent (Kamera mit klassischem Kleinbildformat  $24 \times 36 \text{ mm}^2$ , Vollformat-Kamera). In Abhängigkeit von der Brennweite des Objektivs ergibt sich der Öffnungswinkel und damit auch der für die zu erreichende 3D-Punktgenauigkeit maßgebliche Schnittwinkel der Strahlen im Objektraum.

Im Prinzip sollte die photogrammetrische 3D-Rekonstruktion mit jeder Art von überlappenden Bildern möglich sein. Um jedoch eine hohe Leistung und Effizienz zu erreichen, müssen photogrammetrische Kameras in der Regel speziellen Konstruktionsregeln folgen. Da die Realisierung vor allem bei UAVs mit geringen Nutzlasten durch Gewicht und Größe stark eingeschränkt ist, sind konstruktive Kompromisse unvermeidlich.

Herkömmliche Luftbildkameras für großflächige Anwendungen sind sehr anspruchsvoll und komplex, was nicht nur zu teuren, sondern auch zu sperrigen und schweren Systemen führt, die bei auf keinen Fall in die üblichen Standard-Drohnenplattformen integriert werden können. Der größte limitierende Faktor für jede Art von Sensorausrüstung auf UAVs ist die starke Begrenzung der maximalen Startmasse (MTOM), Kompaktheit und auch Stromversorgung. Dies ist auch der Grund, warum UAV-Kameras nicht einfach die Konzepte von großformatigen Luftbildkameras kopieren. Zumindest in Bezug auf die je Bild abgedeckte Geländefläche ist dies keine so große Einschränkung, da die meisten aktuellen UAV-Szenarien in Bezug auf die Größe des Kartierungsgebiets sehr viel eingeschränkter als Standardluftbildprojekten sind. Kompaktere Kameras mit kleineren Bildformaten führen daher bei kleineren Projektgebieten zu geringeren Einschränkungen hinsichtlich Effizienz. Wenn man sich auf ein MTOM von max. 25 kg beschränkt, markieren 150 MPix-Kameras das derzeitige obere Ende der Kameras, die in solche UAVs integriert werden können. Für Standard-UAVs (mit  $\text{MTOM} < 5 \text{ kg}$ ) liegen die Bildformate heute zwischen 20 bis 60 MPix.

Im Allgemeinen sind alle (typischen) Kameras, die für die UAV-basierten messtechnischen Anwendungen verwendet werden, als Einzelobjektivsysteme aufgebaut. Dieses schließt die Verwendung mehrerer Kanäle für die separate Farbbänderfassung aus, es sei denn, die Kamera verwendet einen Strahlteiler und zwei oder ggf. mehrere lichtempfindliche Sensoren. Derartige Kameras spalten das Licht nach den spektralen Bändern auf und lenken es um auf den entsprechend sensibilisierten Sensor. Die Leica RCD30 Kamera verwendet ein solches Strahlteilerkonzept, um gleichzeitig RGB- und NIR-Bilder auf zwei separaten Sensoren zu erfassen (Wagner 2011). RGB-Kameras, die alle drei RGB-spektralen Kanäle durch Verwendung eines Bayer-Farbfilters erfassen, müssen zuvor entmosaikiert werden, um jedem Pixel die Farbwerte aller drei Kanäle zuzuordnen zu können. Durch diesen Prozess kann sich die ursprüngliche räumliche Auflösung verringern. Die Wahl der Entmosaikierungsmethode hat ebenfalls Einfluss auf die räumliche Auflösung (Meißner 2021).

## 2.1 Optik

Zentraler Bestandteil einer jeden Kamera ist das Objektiv in Kombination mit dem Verschluss. In den ersten Jahren der UAV-basierten Photogrammetrie waren fast alle Kameras herkömmliche Consumer-Kameras. Diese Kameras wurden nicht speziell für die photogrammetrische Kartierung entwickelt und verwendeten häufig fokussierbare, manchmal zusammenklappbare Objektive oder sogar Zoomobjektive. Eine solche nicht definierte und instabile Objektivgeometrie wirkt sich negativ auf die Qualität der photogrammetrischen Verarbeitung aus. Mit dem zunehmenden Einsatz von UAVs für messtechnische Anwendungen und steigenden praktischen Erfahrungen mit Drohnenphotogrammetrie haben die Hersteller ihre Konzepte geändert und versucht, wichtige Konstruktionsmerkmale herkömmlicher Messkameras auf das Design von UAV-Kameras zu übertragen. Die Verwendung von Objektiven mit festem Fokus ohne bewegliche Teile, das heißt ohne Verwendung von optischer Bildstabilisierung und zugleich die Verwendung eines möglichst stabilen Kameragehäuse mit definierter Objektivbefestigung, sind nun Bestandteil vieler Systeme für photogrammetrische Anwendungen.

## 2.2 Verschluss

Die traditionelle Fotografie kennt mechanische Zentralverschlüsse (between-the-lens shutter) und Schlitzverschlüsse (focal plane shutter). Der Zentralverschluss ([Abb. 1 links](#)) ist zwischen den zwei Linsengruppen des Objektivs montiert. Er besteht in der Regel aus mehreren Blendenlamellen, die sich ähnlich wie eine klassische Objektivblende öffnen und schließen. Die Verschlusseffizienz für Zentralverschlüsse wird durch das Verhältnis von Belichtungszeit  $t_e$  und Gesamtzeit für den Verschlussvorgang  $t_0$  definiert ([Abb. 1](#)). Je kürzer die Zeit für die maximale Öffnung  $t_1$  bzw. das Schließen des Verschlusses  $t_3$ , umso effizienter der Verschluss. Im Idealfall kann das Öffnen und Schließen als instantan angesehen werden, d. h. die gesamte Fokalebene des Bildes wird zu einem definierten Zeitpunkt belichtet.

Mechanische Schlitzverschlüsse befinden sich zwischen Objektiv und Fokalebene und bestehen im Gegensatz zum Zentralverschluss aus zwei Vorhängen, die sich für die Belichtung unmittelbar nacheinander über die Fokalebene bewegen. Dadurch bildet sich ein Spalt, der über die Fokalebene fährt um das gesamte Bild zu erfassen. Die Breite dieses Spaltes bestimmt die Belichtungszeit. Anders als beim Zentralverschluss dauert es je nach Sensorgröße einige Zeit, bis das gesamte Bild erfasst ist. Je nach Dauer, wie lang der Schlitz braucht um einmal über die gesamte Bildebene zu fahren, können bewegte Objekte in der Bildebene



Abb. 1: Mechanische Kameraverschlüsse und zugehörige Verschluss-Zeit-Diagramme. Links: Zentralverschluss (um 1950); rechts: Schlitzverschluss (aus aktueller Vollformat-Spiegelreflexkamera)

verzerrt werden. Aufgrund der Zeitverzögerung zwischen den Belichtungen der aufeinanderfolgenden „Zeilen“ des Sensors ist es bei entsprechend großer relativer Bewegung zwischen Kamera und Objekt möglich, dass sich die Geometrie des aufzunehmenden Objekts zu verändern scheint. Diese Art von geometrischer Verzerrung lässt sich auch durch kurze Belichtungszeiten nicht vermeiden.

In der digitalen Bildaufnahme sind der Global Shutter und der Rolling Shutter den mechanischen Zentral- und Schlitzverschlüssen gleichzusetzen. Der Rolling Shutter führt wie schon beim mechanischen Schlitzverschluss erläutert zu geometrischen Verzerrungen bei sich bewegenden Objekten bzw. bewegter Kamera. Tatsächlich ist der Effekt beim Rolling Shutter deutlich ausgeprägter, da das elektronische Auslesen der Zeilen oftmals langsamer ist, als das Überfahren der Bildebene mit dem mechanischen Schlitzverschluss.

Der Effekt der geometrischen Verzerrung kann mathematisch modelliert werden, wenn die sechs äußeren Orientierungsparameter jedes Bildes nicht als konstant, sondern als über das Belichtungsintervall variabel angesehen werden (Vautherin et al. 2016). Dieses Konzept ist an die Georeferenzierung von Zeilensensoren angelehnt (Hinsken et al. 2002) und nutzt idealerweise die gemessene Orientierungsinformationen aus IMU-Daten (Colomina und Blazquez 2014). Wird die tatsächliche Sensorbewegung nicht von einem Inertialsystem

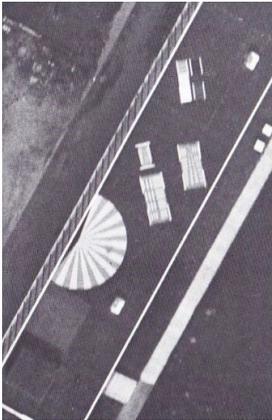
erfasst (hier sind insbesondere die Orientierungswinkeländerungen von Bedeutung), kann alternativ auch ein rein mathematisches Bewegungsmodell verwendet werden. Dieses kann aber die Sensorbewegung für das Belichtungsintervall nur annähernd beschreiben, sodass die durch den Rolling Shutter verursachten Verzerrungen nicht vollständig korrigiert werden können.

In den Anfängen der UAV-Bildflüge verwendeten die CMOS-Sensoren aufgrund des einfacheren elektronischen Designs Rolling Shutter. Heute verfügen die meisten für Messtechnikanwendungen konzipierten Kameras über elektronische Global Shutter. Analog zu der Funktionsweise von CCD-Sensoren wird hier der CMOS-Sensor derartig angesteuert, dass alle Pixel gleichzeitig belichtet werden. Dieser Global Shutter Auslesung von CMOS-Sensoren hat jedoch den Nachteil einer deutlich reduzierten Bildfolgerate. Daher besitzen einige der High-End-Kamerasysteme auch heute noch einen mechanischen Zentralverschluss oder eine Kombination aus mechanischem und elektronischem Global Shutter.

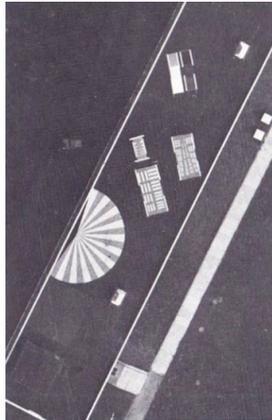
### 2.3 Bewegungsunschärfe

Bei der luftgestützten Kartierung müssen die Bilder während der Bewegung der Trägerplattform aufgenommen werden. Diese Bewegung kann in eine translatorische und eine rotatorische Komponente unterteilt werden. Beide wirken sich auf die Schärfe und damit auf die Qualität der Bilddaten aus. Das Problem ist hinlänglich bekannt. Für analoge Luftbildkameras wurde daher 1982 die sogenannte Vorwärtsbewegungskompensation (FMC) vorgestellt, bei der der Film während der Belichtung in Abhängigkeit von Bildmaßstab und Fluggeschwindigkeit bewegt wurde, um damit die durch die Vorwärtsbewegung des Flugzeugs verursachte Unschärfe auszugleichen. Diese Technologie wurde bei der Luftbildkamera LMK von Carl Zeiss Jena erstmals eingesetzt. Die [Abb. 2](#) zeigt den positiven Einfluss der FMC am Beispiel der analogen Luftbildkamera LMK 30. Die Bewegungskompensation betrug für diesen Bildausschnitt 0,19 mm. Die Verwendung von FMC erlaubt längere Belichtungszeiten und damit auch Aufnahmen unter ungünstigeren Beleuchtungsverhältnissen, den Einsatz der Kamera bei höheren Fluggeschwindigkeiten und die Erfassung der Bilder aus sehr niedrigen Flughöhen und damit die Realisierung sehr großer Bildmaßstäbe.

Diese Korrektur der linearen Vorwärtsbewegung wurde auch für Digitalkameras übernommen. Das elektronische Design von CCD-Sensoren, die in den ersten Generationen von großformatigen Luftbildkameras verwendet werden, adaptiert das analoge FMC, indem die Ladungen auf den Pixeln während der Integrationszeit (Belichtung) bewegt werden (sogenannte zeitverzögerte Integration, time-delayed integration TDI). Bei Kameras, die auf CMOS-Bildsensoren



Ohne FMC



Mit FMC

**Abb. 2:**  
Einfluss von FMC auf die  
Bildscharfe

(Entnommen aus: Firmenprospekt  
zur LMK-Luftbildkamera der Firma  
VEB Carl Zeiss Jena 1983)

basieren, wird der Sensor physisch, also analog zur filmbasierten FMC bewegt (Mueller und Neumann 2016).

In allen Fällen kann aber nur der Hauptteil der Bildunschärfe kompensiert werden, Abweichungen von der mittleren Flughöhe über Grund oder der mittleren Geschwindigkeit bleiben unkompensiert. Das gilt auch für das klassische filmbasierte FMC. Zudem werden Bewegungen, die nicht mit der Transportrichtung des Films/Sensors bzw. der Ladungen übereinstimmen, ebenfalls nicht korrigiert. Da Rotationsänderungen während der Aufnahme ebenfalls zu erheblichen Unschärfen führen, wird die FMC-Technik im Regelfall mit vollständig stabilisierten Plattformen kombiniert, die Rotationen der Trägerplattform aktiv kompensieren. Zusätzliche Vibrationsdämpfer reduzieren hochfrequente Winkelleffekte, wie sie bei Multiroboter-Drohnen auftreten können. FMC in Kombination mit einer vollständig stabilisierten Halterung wird als Full-Motion-Compensation bezeichnet.

Echte FMC mit beweglichen CMOS-Sensoren oder Ladungsbewegung gibt es bei UAV-Kameras nicht, was die Bodenauflösungen für Starrflügler-Drohnen in Abhängigkeit von der Bodengeschwindigkeit und der Verschlusszeit begrenzt. Im Unterschied zu klassischen Luftbildbefliegungen ist die Flughöhe über Grund für ein UAV deutlich geringer. Gleichzeitig wird bei UAV-Befliegungen eine kleine Bodenpixelgröße (Ground sampling Distance GSD) im (Sub-)Zentimeter-Bereich angestrebt. Daher müssen vor allem die Kameras in schneller fliegenden Starrflügler-UAVs einen schnellen Verschluss haben, um obige Bewegungsunschärfen zu vermeiden, vorausgesetzt die Beleuchtungsverhältnisse lassen die kurzen Verschlusszeiten zu. Dies ist in diesem Zusammenhang die einzige Möglichkeit, die Vorwärtsbewegung zu reduzieren. Die Minimierung der Belichtungszeiten bei gleichzeitiger Erhöhung der Sensorempfindlichkeit

(ISO-Zahl) wird auch als radiometrische Unschärfekompensation bezeichnet. Sie nutzt die hohe radiometrische Qualität digitaler Sensoren, die auch bei hohen ISO-Zahlen noch rauscharme Bilder liefern. Es handelt sich dabei nicht um eine spezifische Veränderung des Sensors, sondern um eine Kombination aus sehr kurzen Verschlusszeiten und der erweiterten radiometrischen Leistung des Sensors, die auf größeren Pixeln oder höherer Empfindlichkeit basieren. Dieser Ansatz kann im Prinzip für jede Art von Sensor angewandt werden, wird aber häufig für RGB-Bildkameras verwendet, die mit Farbmosaikfiltern arbeiten.

Im Jahr 2022 stellte die Firma Vexcel Imaging ein neues Verfahren zur Bewegungskompensation vor, die sogenannte adaptive Bewegungskompensation (Adaptive Motion Compensation AMC (Dohr et al. 2022)). Im Unterschied zu allen bisher vorgestellten Verfahren, wird die Unschärfe in den Bildern erst im Nachgang durch Verfahren der digitalen Bildverarbeitung rechnerisch korrigiert. Diese Methode kommt ursprünglich aus der Medizintechnik. Ist die Geometrie der Bildaufnahme, das heißt der genaue Belichtungsablauf, die präzise Bewegung der Kamera während der Belichtung und die Geometrie des abgebildeten Objekts, bekannt, kann die Unschärfe mathematisch durch die Punktspreadingfunktion (point spread function PSF) beschrieben werden. Das unscharfe Bild ergibt sich mathematisch durch die Faltung des idealen scharfen Bildes mit der PSF. Umgekehrt kann durch inverse Faltung aus einem unscharfen Bild das ideale Bild zurückberechnet werden, sofern die PSF bekannt ist. Diese Methode funktioniert auch für Bilder mit starken Maßstabsveränderungen, wie dieses für Schrägaufnahmen der Fall ist. Die [Abb. 3](#) verdeutlicht den Einfluss von AMC am Beispiel von Gebäudefassaden in einem



**Abb. 3:** Einfluss von AMC auf die Bildschärfe am Beispiel einer Schrägaufnahme.  
Links: kein AMC; rechts: mit AMC

Schrägluftbild der Vexcel Imaging UltraCam Osprey 4.1 Kamera. Prinzipiell lässt sich dieses nachträgliche Verfahren zur Bewegungskompensation für jede Art von Kamera anwenden; es könnte also zukünftig auch im UAV-Sektor eingesetzt werden.

## 2.4 Bildqualität

Für eine vollständige und genaue 3D-Rekonstruktion sind hochauflösende Bilder erforderlich, damit die entsprechenden Bildpunkte genau zu identifizieren und zu messen sind. Die Qualität der Bilder kann anhand des geometrischen Auflösungsvermögens gemessen werden, das vom Kamera-Objektiv-System und den Umgebungsbedingungen während der Bildaufnahme (einschließlich des Ausgleichs der Bewegungsunschärfe) abhängig ist. Das geometrische Auflösungsvermögen kann anhand von definierten Balkenmustern (siehe [Abb. 2](#)), wie dem USAF1951-Auflösungsziel, rein visuell und damit subjektiv ermittelt werden. Zielführender ist die quantitative Analyse der Modulationsübertragungs- und Punktspreizungsfunktionen, die die Auflösung wie schon in Abschnitt 2.3 erläutert mathematisch definieren (Meißner 2021). Diese Funktionen werden aus Auflösungsmustern wie dem Siemens-Stern oder klar definierten Kanten (Slanted-Edge-Methode) gewonnen. Ein weiteres Qualitätsmaß ist das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), das eher auf die radiometrische Qualität ausgerichtet ist. Die radiometrische Qualität ist nicht nur für die Fernerkundung wichtig, sondern wirkt sich auch auf die automatische Verknüpfungsmessung aus.

Um rauscharme Bilder zu erhalten, ist die Größe der einzelnen Pixel auf dem digitalen Sensor ein wichtiger Faktor. Ein klarer Trend geht dahin, die Größe der einzelnen Pixel zu verringern, um mehr Pixel auf ein bestimmtes Sensorbild zu bringen, was die individuelle Fläche zum Sammeln von Photonen pro Pixel verringert und somit das SNR reduziert. Bei CMOS-Sensoren ist ein erheblicher Teil jedes Pixels nicht lichtempfindlich, da er von der Steuerelektronik belegt wird. Dies wird durch den geringer Füllfaktor beschrieben, der das Verhältnis der lichtempfindlichen Fläche des Pixels zur Gesamtfläche des Pixels angibt. Um das SNR zu verbessern, wurde die Back-Side Illumination (BSI) eingeführt, bei der der CMOS von der Rückseite her beleuchtet wird. Dies erhöht den Füllfaktor, da die Steuerelektronik den lichtempfindlichen Bereich nicht einschränkt, und kann insbesondere bei kleineren Pixelgrößen die Leistung herkömmlicher, von vorne beleuchteter (front-side illumination FSI) Sensoren übertreffen. Nachteilig für BSI-Sensoren ist aber, dass das Licht weiter in das Silizium eindringen muss, was die Miniaturisierung der Pixelgrößen auf über 1 und 2  $\mu\text{m}$  begrenzt, wo der BSI-Sensor immer noch bessere Signale als ein FSI-Sensor liefert.

Auch wenn Bildverzerrungen keinen Einfluss auf die Bildauflösung haben, sollten sie in diesem Zusammenhang ebenfalls erwähnt werden. Die Korrektur von Verzerrungen ist ein wesentlicher Bestandteil der photogrammetrischen Auswertung. Dennoch stören auch in der Consumer-Fotografie große Verzerrungen, wie sie von Weitwinkelobjektiven bekannt sind, den Bildeindruck. Deshalb korrigieren einige (vor allem kleine und leichte) Kameras aktueller Drohnen die Objektivverzerrungen intern durch vordefinierte Modelle vor, um eine höhere Bild-„Qualität“ zu erzeugen. Die Bilder sehen verzerrungsfrei aus, obwohl die ursprünglichen Rohbilder starke Verzerrungseffekte aufweisen. Ein solcher Ansatz verbessert den visuellen Eindruck, aber diese vorkorrigierten Bilder passen möglicherweise nicht gut zu den standardmäßigen photogrammetrischen Kalibrierungsmodellen. Deshalb sollten bei der 3D-Rekonstruktion Bilder mit ihrer ursprünglichen Bildgeometrie bevorzugt werden. Alternativ sollten die intern von den Kameras angebrachten Korrekturfunktionen und -parameter zur Verfügung stehen.

### 3 Kameratypologie

Die Kameras für UAV-Luftbilddanwendungen können nach ihrem Bildsensorformat und ihrem Gesamtgewicht klassifiziert werden, was für Drohnenanwendungen aufgrund des vorgegebenen MTOM am wichtigsten ist. Schwere Kameras haben ein Gewicht von im Bereich von 1 kg. Große Kameras können sogar bis zu 2 kg wiegen. Sehr leichte Kameras wiegen weniger als 200 g. Zur Kameratypisierung können darüber hinaus weitere Aspekte berücksichtigt werden, z. B. wie gut die Kameras photogrammetrische Anforderungen wie geometrische Stabilität erfüllen oder wie flexibel die Systeme in verschiedene UAV-Plattformen integriert werden können. Die Zugänglichkeit der Rohbilddaten spielt ebenfalls eine Rolle, um die internen und oft unbekanntenen Verzerrungskorrekturen zu umgehen.

In [Tab. 1](#) sind exemplarische Kameras aufgeführt, die in der heutigen UAV-Vermessung verwendet werden, klassifiziert nach ihrem Bildsensorformat. Das Sensorformat steht häufig in Zusammenhang mit dem Gewicht der Kamera, da größere Sensoren schwerere Objektive erfordern. In der Regel handelt es sich um proprietäre Systeme, die von großen UAV-Systemanbietern entwickelt wurden, für ihre spezifischen Plattformen optimiert sind und oft nicht mit anderen UAVs ausgetauscht werden können. Als Beispiele sind in der Tabelle die Kamerasysteme von DJI aufgeführt. Die senseFly-Kameras bieten eine offene Schnittstelle, die eine Integration in andere Plattformen ermöglicht. Wichtig zu beachten ist, dass diese Sensoren über eine sogenannte direkte In-Flight-Georeferenzierung verfügen: Die vollständige äußere Orientierung eines jeden

Bildes basierenden auf den Positions- und Orientierungsdaten aus GNSS/inertial-Komponenten wird für jede Bildaufnahme aufgezeichnet und direkt in den Bildmetadaten hinterlegt. Für diese Kameras werden also keine zusätzlichen GNSS-/Inertialeinheiten benötigt. Kleinere UAV-Anbieter setzen oft noch auf handelsübliche DSLM-Kameras mit Vollformatsensoren, wie die Sony a7-Serie.

**Tab. 1: Auswahl von Kamerasystemen für Vermessungsdrohnen**

	< Vollformat			Vollformat			> Vollformat
<b>Kamera</b>	DJI Phantom 4 RTK FC6310R	senseFly S.O.D.A.	senseFly AERIA X	DJI Zenmuse P1	Delair CamLight	Sony A7R IV	Phase One industrial iXM-RS150
<b>Sensorformat</b>	1" 13.2 × 8.8 mm <sup>2</sup>	1" 13.13 × 8.76 mm <sup>2</sup>	APS-C 23.55 × 15.73 mm <sup>2</sup>	full-frame 35.9 × 24.0 mm <sup>2</sup>	full-frame 36.43 × 27.62 mm <sup>2</sup>	full-frame 35.7 × 23.8 mm <sup>2</sup>	Mittelformat 53.4 × 40.0 mm <sup>2</sup>
<b>Anz. Pixel</b>	5472 × 3648 @ 2.4 mm	5472 × 3648 @ 2.4 mm	6000 × 4000 @ 3.9 mm	8192 × 5460 @ 4.4 mm	7920 × 6004 @ 4.6 mm	9504 × 6336 @ 3.76 mm	14.204 × 10.652 @ 3.76 mm
<b>Brennweite (35 mm Äquiv.)</b>	8.8 mm (24 mm)	10.6 mm (29 mm)	18.5 mm (28 mm)	24 / 35 / 50 mm, dji DL-Mount	Verschiedene Objektive, Leica Mount	Verschiedene Objektive, Sony E-Mount	Verschiedene Objektive
<b>Verchluss</b>	global (mech.)	global (elektr.)	global (elektr.)	global (mech.)	global (elektr.)	mech. & elektr.	global (mech.)
<b>Gewicht</b>	1400 g (komplettes UAV)	142 g	290 g	800 g (inkl. Gimbal)	180 g (ohne Objektiv, bei Zeiss Biogon 2.8/21 zzgl. 280 g)	665 g (ohne Objektiv, bei Zeiss Sonnar 2.8/35 zzgl. 120 g)	1000 g (ohne Objektiv, bei Rodenstock 50 mm zzgl. 800 g)
<b>Markteinführung</b>	2018	2016	2018	2021	2019	2019	2018
<b>Kommentare</b>	Vollintegriert mit UAV, mit 3-Achs-Gimbal	für senseFly UAVs, aber mit offenem Interface, IMU für präzises Geotagging	für senseFly UAVs, aber mit offenem Interface, IMU für präzises Geotagging	Kompatibel mit DJI UAVs, mit 3-Achs-Gimbal	–	BSI-CMOS, mit Bildstabilisierung	BSI-CMOS

Diese Kameras sind vollständig eigenständig mit interner Stromversorgung und Speicher, bieten eine Vielzahl von Objektivoptionen und werden aufgrund eines großen Verbrauchermarktes ständig verbessert. Andererseits sind sie nicht in erster Linie für Drohnenanwendungen konzipiert, so dass Zugeständnisse gemacht werden müssen. Diese beziehen sich auf das Gesamtgewicht, das in der Regel im Bereich von 1 kg liegt, einschließlich Objektiv, das Verschlussdesign (Focal plane versus global) oder zusätzliche Funktionen wie Bildstabilisierung, die die kamerainternen Parameter beeinflussen können. Ebenfalls kritisch vor allem bei Integration mit GNSS und Inertial-Sensorik ist die genaue zeitliche Synchronisation solcher Kameras mit den Navigationsdaten.

Im Gegensatz zu solchen Standardkameras versuchen spezielle Drohnenmesssysteme, größere Formate und gute Qualität mit hoher Kompaktheit und geringem Gewicht zu kombinieren. Ihr Design versucht, die photogrammetrischen Anforderungen zu erfüllen, wie sie für die proprietären Systeme genannt wurden. Hervorzuheben ist hier die Camlight, die aus den Entwicklungsabteilungen des IGN Paris stammt und nun vom Anbieter von Drohnenlösungen Delair kommerzialisiert wird (Martin et al. 2017). Diese Kamera bietet vollformatige 50 MPix-Bilder bei einem Gesamtgewicht von unter 500 g für viele Kamerakörper-Objektiv-Kombinationen. Die Analyse von Daten, die mit dem IGN-Engineering-Modell geflogen wurden, zeigte eine extrem stabile Sensorgeometrie (Roth 2019), so dass die Kamera tatsächlich als photogrammetrische Kamera angesehen werden kann. Es werden keine versteckten internen Vorentzerrungskorrekturen angewendet.

Die Mittelformatkameras mit bis zu 150 MPix, wie sie Phase One heute anbietet, markieren das obere Ende der drohnenbasierten Kameras und knüpfen bereits an die bemannten luftgestützten Kartierungsplattformen an, wo einige der großformatigen Kamerasysteme auf solchen Kamerakomponenten basieren. Solche Objektiv-Kamera-Kombinationen wiegen fast 2 kg und können daher nur in größeren UAVs eingesetzt werden.

## 4 Empirische Tests

Das Institut für Photogrammetrie (ifp) der Universität Stuttgart hat sich in den vergangenen Jahren sehr intensiv mit der hochpräzisen, UAV-basierten Objektpunktbestimmung und Oberflächenrekonstruktion auseinandergesetzt und dabei auch verschiedene Kamerasysteme untersucht. Motivation für diese Tests war ein Forschungsprojekt gemeinsam mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz, in dem die Eignung der UAV-Photogrammetrie zur flächenhaften Detektion von Bodenbewegungen am Beispiel der Schleusenanlage Hessigheim am Neckar untersucht wurde. Über dieses Projekt ist

mehrfach berichtet worden (Haala et al. 2021, Cramer et al. 2018). Im Rahmen des Projekts wurde das Projektgebiet mit Phase One Kameras iXM 100 MPix bzw. 150 MPix befliegen. Parallel fanden auch Flüge mit VUX-1UAV Laserscannern statt, zunächst auf zwei getrennten UAVs. Bei der letzten Flugkampagne konnten dann high-end Kamera und Laserscanner gemeinsam auf einem UAV installiert und geflogen werden. Auf die Laserflüge wird hier aber nicht näher eingegangen.

Nachfolgend sollen die Daten aus einer Nachbefliegung im März 2022 diskutiert werden, die im Unterschied zu den „forschungsnahen“ Sensor- und Flugplattformen des eigentlichen Projekts mit rein kommerziell verfügbaren Komponenten durchgeführt wurde. Zum Einsatz kam eine DJI Matrice 300 RTK Drohne ausgestattet mit wahlweise einer P1-Kamera (mit 35 mm Objektiv) bzw. Phase One iXM 100 MPix Kamera (mit RSM 35 mm Objektiv). Das Phase One System wird in der DJI-eigenen Nomenklatur als P3-Kamera bezeichnet. Die P1 Kamera hat einen diagonalen Öffnungswinkel von ca. 63°, die P3 ist mit 76° etwas weitwinkliger. Das Projektgebiet wurde in verschiedenen Flughöhen befliegen, die resultierenden GSDs liegen zwischen 4 und 6 mm. Bei der rein passpunktbasierten Bündelausgleichung unter Verwendung von zehn im Projektgebiet verteilten Passpunkten (PP) werden für die Nadirbildflüge von P1 (2937 Bilder, GSD: 6,3 mm) und P3 (986 Aufnahmen, GSD: 4,7 mm) aus einer Flughöhe von 50 m die in Tab. 2 angegebenen Genauigkeiten (RMS) aus 27 bzw. 26 unabhängigen Kontrollpunkten (KP) erreicht. Angegeben sind die absoluten Werte und die Genauigkeiten in Bezug auf die jeweilige Bodenpixelgröße GSD.

Die Tab. 2 zeigt für die horizontale Genauigkeit praktisch identische Ergebnisse. Bezogen auf die leicht unterschiedlichen Bodenpixelgrößen erreichen beide Systeme eine Genauigkeit in Ost und Nord von ½ Pixel. In der Vertikal-komponente ist die Genauigkeit der P3 Kamera um ca. 40 % besser. Das liegt zum einen am besseren Schnittwinkel der Strahlen aufgrund des etwas größeren Öffnungswinkels der Optik, andererseits aber auch daran, dass bei dem größeren Sensorformat deutlich weniger Bilder als bei der P1 notwendig sind um das gesamte Gebiet zu erfassen. Demzufolge ist bei gleichbleibender Passpunktanzahl das Verhältnis von Bildern zur Anzahl der Passpunkte für die P1 schlechter

**Tab. 2: Absolute Genauigkeit der Bündeltriangulation aus Kontrollpunktdifferenzen für P1- und P3-Kamera (mittlere Flughöhe 50 m über Grund)**

	Anzahl PP   KP	RMS Ost [m]   [%GSD]	RMS Nord [m]   [%GSD]	RMS Vertikal [m]   [%GSD]
P1 (nadir)	10   26	0.0035   55.5	0.0031   49.2	0.0081   128.6
P3 (nadir)	10   27	0.0024   51.0	0.0021   44.7	0.0039   83.0

als für die P3. Mit anderen Worten, die Anzahl der zu überbrückenden Bilder zwischen den Passpunkten ist für die P1 größer als für die P3-Kamera. Das ist ein Vorteil von großformatigeren Sensoren. Dieses Defizit wird durch die Verwendung der RTK-Projektionszentrumskoordinaten im Rahmen einer GNSS-gestützten Bündeltriangulation ausgeglichen, was im Rahmen dieses Beitrags aber nicht diskutiert werden soll.

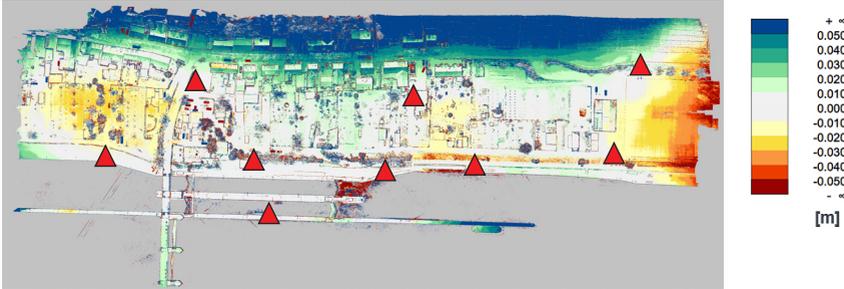


Abb. 4: Vergleich der Oberflächenmodelle aus P1- und P3-Auswertung (hier nur Westufer mit Schleusenbereich dargestellt). Die Passpunkte sind als Dreieckssymbole dargestellt.

Das durch Mehrbildstereo-Auswertung gewonnene photogrammetrische Oberflächenmodell (DOM) ist eines der wichtigsten Produkte der photogrammetrischen UAV-Bildflugauswertung. Für definierte, feste und gut texturierte Oberflächen können DOM-Genauigkeiten erreicht werden, die denen einer Laserbefliegung gleichwertig, z. T. sogar überlegen sind. Damit können je nach Anwendung Laserbefliegungen komplett durch Bildflüge ersetzt werden. Die Abb. 4 zeigt die Differenzen zwischen den beiden aus P1- bzw. P3-Bildern berechneten Oberflächenmodellen. Die für die Orientierung verwendeten Passpunkte sind ebenfalls eingezeichnet. Dargestellt ist nur das Westufer mit dem eigentlichen Schleusenbereich. Die Darstellung ist gewestet. Auch hier ergibt sich eine große Übereinstimmung. Größere Abweichungen zeigen sich in Bereichen der Vegetation und vor allem an den Rändern des Bildverbands, außerhalb des vorgegebenen Passpunktrahmens, was zu erwarten ist. Bei genauer Betrachtung lassen sich auch Unterschiede an bewegten Objekten (PKWs) erkennen, die während des zeitlichen Versatzes der beiden Befliegungen bewegt wurden. Innerhalb des Passpunktrahmens zeigen sich aber auch Abweichungen die auf Unterschiede in den beiden Oberflächenmodellen hindeuten. Diese treten vor allem in den von den Passpunkten weiter entfernten Bereichen auf. Das ist in Übereinstimmung mit dem bereits zuvor diskutierten Effekt, dass aufgrund des kleineren Bildformats der P1-Kamera ohne Verwendung von GNSS-Projektionszentren in diesen Bereichen die Bildorientierung nicht so gut ist. Fehler in der Orientierung zeigen sich demnach auch in den abgeleiteten photogrammetrischen Produkten.

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrags wurden die wesentlichen Kenngrößen von Kameras für UAV-Befliegungen vorgestellt und diskutiert. Eine Anpassung der Kameras für messtechnische UAV-Anwendungen wirkt sich positiv auf die weitere Auswertung aus. Den Systemherstellern ist dieses mittlerweile bewusst, sodass in der Regel davon auszugehen ist, dass für Vermessungsdrohnen entsprechend optimierte Kameras angeboten werden. Der empirische Vergleich zweier kommerzieller Kamerasysteme unterschiedlichen Bildformats und auch Preisklasse zeigt, wie zu erwarten war, gewisse Qualitätsunterschiede. Je nach geforderter Genauigkeit können diese aber unter Umständen vernachlässigt werden.

### Literatur

- Colomina, I., Blázquez, M. (2014): Pose versus state: Are sensor position and attitude sufficient for modern photogrammetry and remote sensing? *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-3/W1. 33–37. DOI: [10.5194/isprsarchives-XL-3-W1-33-2014](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W1-33-2014).
- Cramer M., Haala N., Laupheimer D., Mandlbürger G., Havel, P. (2018): Ultra-high precision UAV-based LiDAR and Dense Image Matching. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-1, 115–120. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLII-1-115-2018](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-1-115-2018).
- Dohr S., Muick M., Schachinger B., Gruber M. (2022): Adaptive Motion Compensation: A Modern Approach. White Paper. 7 Seiten. [www.vexcel-imaging.com/wp-content/uploads/2022/04/2022-03-31\\_WhitePaper\\_AdaptiveMotionCompensation\\_A-modern-approach.pdf](http://www.vexcel-imaging.com/wp-content/uploads/2022/04/2022-03-31_WhitePaper_AdaptiveMotionCompensation_A-modern-approach.pdf), letzter Zugriff 5.1.2023.
- Egels Y., Heipke C., Héno R., Polidori L. (2019): La photogrammétrie avant la Première Guerre Mondiale: l'action de Laussedat. In: Polidori L. (ed.): *Aimé Laussedat (1819–1907): Le précurseur de la photogrammétrie*. Edition Publi-Topex. Paris. 61–80.
- Grimm, A. (2021): Albrecht Meydenbauer: Bauingenieur – Fotograf – Photogrammeter. PFG89, 371–389. Springer Verlag. DOI: [10.1007/s41064-021-00183-8](https://doi.org/10.1007/s41064-021-00183-8).
- Haala, N., Kölle, M., Cramer, M., Laupheimer, D., Mandlbürger, G., and Glira, P.: Hybrid Georeferencing, Enhancement and Classification of ultra-high-Resolution UAV LiDAR and Image Point Clouds for Monitoring Applications, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, V-2-2020. 727–734. DOI: [10.5194/isprs-annals-V-2-2020-727-2020](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2020-727-2020).
- Hinsken, L., Miller, S., Tempelmann, U., Uebbing, R., Walker, S. (2002): Triangulation of LH Systems ADS40 Imagery Using Orima GPS/IMU. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XXXIV Part 3 A+B. 156–162, 2002.
- Martin, O., Meynard, C., Pierrot Deseilligny, M., Souchon, J.-P., Thom, C. (2017): Réalisation d'une caméra photogrammétrique ultralégère et de haute résolution. In: *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, n° 213–214 (janvier - avril 2017). 3–10.

- Meißner, H. (2021): Determination and Improvement of Spatial Resolution obtained by Optical Remote Sensing Systems. Doktorarbeit. Humboldt-Universität zu Berlin. DOI: [10.18452/22348](https://doi.org/10.18452/22348).
- Mueller, C., Neumann, K. (2016): Leica DMC III calibration and geometric sensor accuracy. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XL-3/W4. 1–9. DOI: [10.5194/isprs-archives-XL-3-W4-1-2016](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XL-3-W4-1-2016).
- Roth, M. (2019): Empirische Genauigkeitsuntersuchung einer „metrischen“ UAV-Kamera. B.S. Arbeit. Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart. Nicht veröffentlicht.
- Vautherin, J., Rutishauser, S., Schneider-Zapp, K., Choi, H.F., Chovancova, V., Glass, A., Strecha, C. (2016): Photogrammetric accuracy and modelling of rolling shutter cameras. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information III-3* (06.2016). 139–146. DOI: [10.5194/isprs-annals-III-3-139-2016](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-3-139-2016).
- Wagner, R. (2011): The Leica RCD30 Medium Format Camera: Imaging Revolution. In: Fritsch, D. (Hrsg.): *Photogrammetric Week '11*, Wichmann/VDE Verlag, Berlin und Offenbach, 89–95. <https://phowo.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo11/095Wagner.pdf>, letzter Zugriff 5.1.2023.

## Kontakt

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



# Einsatz von ULS zum Monitoring natürlicher Prozesse

Magnus Bremer

## 1 Einführung

Die fortschreitende Miniaturisierung von Sensorsystemen hat dazu geführt, dass kinematische Laserscanner seit einiger Zeit operationell auf UAV-Plattformen betrieben werden können. Beim UAV-Laserscanning (ULS) handelt es sich um ein Multisensor-Messsystem, welches die Position und Raumstellung der Messplattform mittels globaler Satellitennavigation (Global Navigation Satellite System, GNSS) und einer Inertialen Messeinheit (Inertial Measurement Unit, IMU) bestimmt, während der Laserscanner die Erdoberfläche durch die Vorwärtsbewegung der UAV und die kontinuierliche Strahlablenkung mittels rotierendem Spiegel quer zur Flugrichtung abtastet. Dabei handelt es sich in der Regel um Time-of-Flight Laserscanner (ToF), die einen Laserpuls aussenden und nach Eingang des rückgestreuten Echos die Laufzeit zwischen Aussendung und Empfang messen (Impulslaufzeitverfahren) (Pfeifer et al. 2015, Shan und Toth 2018). Unter Berücksichtigung der Lichtgeschwindigkeit und mittels der bekannten Position und Raumstellung der Plattform zum Zeitpunkt der Pulsaussendung,

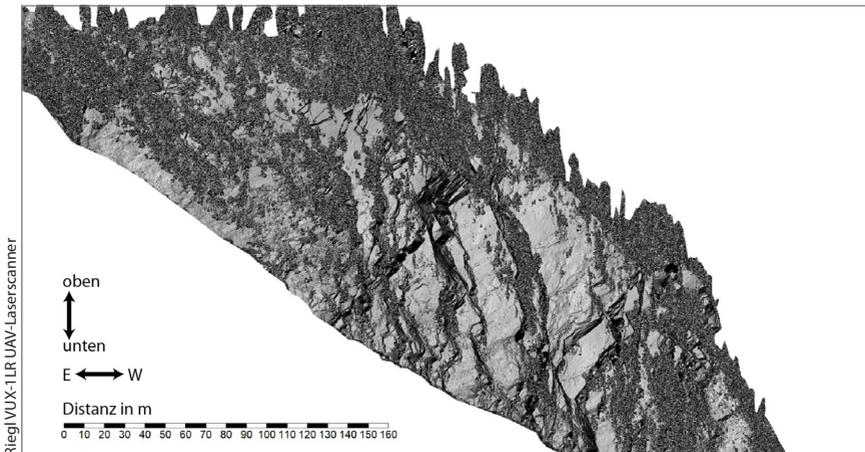


Abb. 1: Vertikale Ansicht eines DOM der nördlichen Felsflanke einer Schlucht auf Basis eines einzelnen ULS-Flugstreifens

kann so aus einem einzelnen Strahl ein georeferenzierter 3D-Punkt berechnet werden.

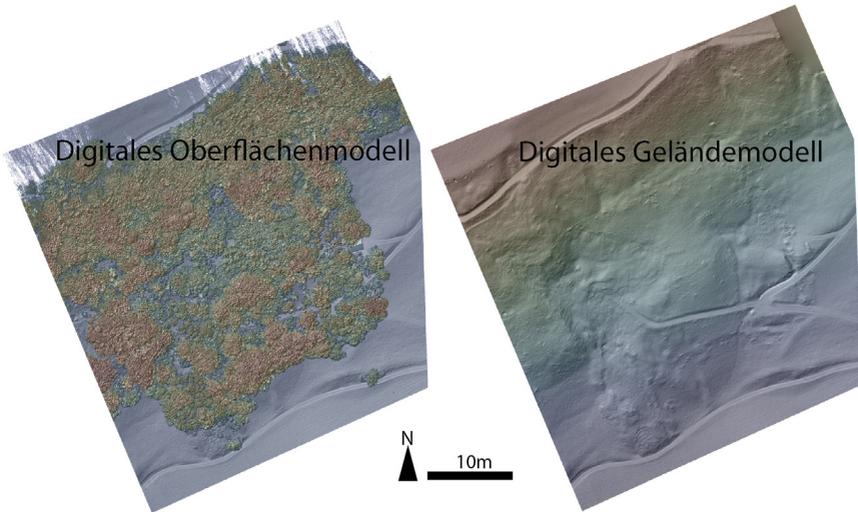
Für das Monitoring natürlicher Prozesse kann ULS aus verschiedenen Gründen von Vorteil sein (Mayr et al. 2019, 2020, Pfeiffer et al. 2019). Insbesondere für die Erfassung von Extremereignissen, die vor allem in Gebirgsräumen weitreichende Geländeänderungen und Gefahrenpotenziale für Gebäude und Infrastruktur erzeugen können, bietet sich ULS an. Beispiele können Starkniederschläge in den Sommermonaten mit Erdbeben und Überschwemmungen, aber auch winterliche Schneefallereignisse mit größeren Lawineneignissen sein. Hier ist eine schnelle effiziente, sowie flächendeckende Erfassung zur Bereitstellung aktueller Lagebilder wichtig.

Ein entscheidender Vorteil von ULS ist hier seine „Area Performance“, bei der Durchführung der Geländeerfassung in schwer zugänglicher Topographie (Abb. 1). Bei Pulswiederholraten (PRR) von durchschnittlich 200 bis 800 kHz kann, je nach Fluggeschwindigkeit, bereits für einen einzelnen Flugstreifen eine dichte 3D-Punktwolke mit  $>400$  Punkten pro  $m^2$  erzeugt werden, was das Verfahren sehr effizient macht (Bremer et al. 2019). Hinzu kommt ein sehr breiter Field-of-View ( $\leq 336^\circ$ ), der die seitliche Abtastung von beispielsweise Felswänden einer Schlucht unter Verwendung nur weniger Flugstreifen erlaubt. Nichtsdestotrotz bleiben hohe Genauigkeitsansprüche weiterhin an hohe Flugstreifenüberlappung geknüpft, die im Nachhinein eine zielführende Streifenanpassung zulassen.

Da viele, für die Punktwolkenerstellung wichtige Parameter, wie Scannerposition und Raumstellung, sowie Entfernung (Scannerobjekt), bereits von den verschiedenen Hardwarekomponenten gemessen werden, geht die beschriebene Area Performance auch mit einer schnellen Prozessierung der Daten einher. So lässt sich bei effizienter Flugplanung eine Fläche von 150 ha in ca. einer halben Stunde erfassen und nach Datendownload innerhalb weniger Minuten die erste Punktwolke extrahieren. Eine Streifenanpassungsprozedur, welche Streifendifferenzen in Überlappungsbereichen unter Berücksichtigung von Flugtrajektorieninformationen minimiert, nimmt für den beschriebenen Projektumfang maximal ein bis zwei Stunden in Anspruch. Im Zusammenspiel von Area Performance und Prozessierungsgeschwindigkeit lassen sich innerhalb weniger Stunden Volumina verlagerten Materials oder Überflutungsflächen kartieren.

Neben der Area Performance von ULS-Systemen, ist die Mehrzielfähigkeit ein entscheidender Vorteil. Da die ausgesendeten Laserstrahlen eine Aufweitung (Strahldivergenz) aufweisen, ist die Beleuchtung verschiedener (sich nur teilweise mit dem Laserstrahl schneidender) Objekte in verschiedenen Entfernungen möglich.

Dabei kann es sich z. B. um den Ast eines Baumes im Vordergrund und die Bodenoberfläche im Hintergrund handeln, die in diesem Falle als zwei separate



**Abb. 2:** Beispiel der Erstellung eines DGMs mit 10 cm Pixelauflösung auf Basis der Mehrzielfähigkeit des Riegl VUX-1LR UAV-Laserscanners

Echos registriert und verortet werden können. Dabei können bei ausreichend Laserleistung auch Ziele mit sehr kleinen Querschnitten wie zum Beispiel Äste oder Hochspannungsleitungen verlässlich erfasst werden. Die Mehrzielfähigkeit erlaubt somit nicht nur das Herausfiltern der Bodenoberfläche unter Wald (DTM-Erstellung, [Abb. 2](#)), sondern auch die Ableitung von Forstparametern, wie die Bestimmung von Holzvolumina oder statistische Auswertungen zur Bestimmung von Durchlässigkeitsverhältnissen in der Vegetation. Letztere können eine wichtige Eingangsgröße für die Modellierung natürlicher Prozesse darstellen (z. B. Einstrahlungs- und Niederschlagsmodellierung). Umso dichter ein Kronendach ist, desto besser kann es beispielsweise Starkniederschlagsereignisse puffern.

Die Nachteile von ULS sind nach wie vor bei hohen Kosten der Sensorik sowie dessen Gewicht zu suchen. In der Palette erhältlicher ULS-Systeme treffen die oben beschriebenen Vorteile vor allem auf die schweren und leistungsstärkeren Systeme mit hoher ausgesendeter Laserintensität zu. Diese verfügen über ausreichende Reichweiten zur Ausnutzung rechtlich zulässiger Flughöhen bis 120 m Above Ground Level (AGL), oder zur Erfassung von bis zu 10 Echos pro Laserpuls in der Vegetation. Da die ausgesendete Strahlungsleistungsdichte sich auf dem Weg zur Erdoberfläche kegelförmig aufweitet (Strahldivergenz) und sich die Rückstreuung je nach Oberflächeneigenschaften auf einem Raumwinkel von bis zu 120° aufspreizt, erreicht nur ein sehr kleiner Anteil der ausgesendeten Energie wieder die Apertur des Sensors (Wagner et al. 2003). Dabei nimmt die

zurückkommende Laserleistung mit der Entfernung zur Geländeoberfläche ab, so dass kleinere ULS-Systeme nur Flughöhen bis zu 50 m AGL zulassen und somit in komplexem Gelände viel aufwendigerer Flugpläne bedürfen.

Das gleiche Phänomen ist bei der Mehrzielfähigkeit zu beobachten: Die rückgestrahlte Energie hängt neben den oben beschriebenen Prinzipien auch vom Streuquerschnitt, der vom Laser beleuchteten Fläche, ab. In der Vegetation teilt sich daher die auf den Laserquerschnitt verteilte Laserleistung auf mehrere Ziele



**Abb. 3:** Herausforderungen großer ULS-Systeme im Gebirge: a) besondere Aufwände für den Transport des Equipments (Minimum 4 Personen); b) besonderes Augenmerk auf lokale Windverhältnisse und Copterverhalten; c) das Fliegen nahe der Dienstgipfelhöhe (hier 3000 m AMSL).

auf. Ist die Strahlungsleistungsdichte insgesamt zu gering, kann dies dazu führen, dass nur die ersten Ziele ausreichend Rückstreuung erzeugen, um am Sensor detektiert zu werden. Dabei kann vor allem die Durchdringung bis zur Bodenoberfläche stark beeinträchtigt sein und somit die Geländemodellerstellung negativ beeinflusst werden. Für große ULS-Systeme sind diese Nachteile kaum zu erkennen.

Der Nachteil großer ULS-Systeme geht allerdings wiederum mit hohen Abfluggewichten (Maximum Take-off Mass  $\leq 25$  kg) der verwendeten UAVs einher, was wiederum zu zusätzlichen Anforderungen an die Logistik und technische Flugsicherheit (Redundanz bei Energieversorgung, Flight-Controllern und Motoren) sowie rechtlichen Einschränkungen bei den Kategorien zu überfliegender Gebiete führt. Bei geringen Luftdichten im Gebirge operieren diese Systeme zudem oftmals nahe der Dienstgipfelhöhe und sind innerhalb kleinräumiger meteorologischer Phänomene wie Thermikblasen und geländebedingter Walzen in der Luftströmung sehr anfällig, was zur Folge hat, dass viele Prozeduren wie das Starten und Landen in unebenem Gelände nur von Hand möglich sind, was zum Teil sehr viel Erfahrung bei der Pilotierung erfordert (Abb. 3).

Nichtsdestotrotz zeigt das grundsätzliche Flugverhalten im GNSS-unterstützten, stabilisierten Flug auf Meereshöhe keinen signifikanten Unterschied zu kleineren UAV-Systemen.

Dieser Beitrag soll einen Einblick in den operationellen Umweltmonitoringbetrieb mittels ULS-System am Institut für Geographie der Universität Innsbruck geben. Die Universität Innsbruck besitzt seit 2017 einen Riegl VUX-1LR Laserscanner, der zusammen mit einer Applanix AP20 IMU betrieben wird. Als Trägerplattform dient ein vollständig redundanter Octocopter (Riegl RiCopter) mit zwei unabhängigen Flight-Controllern, der inklusive Payload ein Abfluggewicht von knapp 25 kg aufweist.

Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Erfassung von Prozessen im Gebirge, die sowohl unterhalb als auch oberhalb der Waldgrenze stattfinden. Zu nennen sind die Erfassung des Gletscherrückgangs, die Erfassung von Hangkriechen oder Extremereignissen wie Felsstürzen, Hangrutschen oder Lawinen. In Form von Auftragsforschungen wurde das System aber auch immer wieder in anderen Bereichen, wie der Befliegung von Hochspannungsleitungen bzw. Umspannwerken, oder im Braunkohletagebau zur Erfassung von Hangstabilität genutzt.

Im Folgenden soll beispielhaft das mehrjährige Monitoring eines Blockgletschers im Hochgebirge und die Erfassung von Forstparametern vorgestellt werden.

## 2 Blockgletscher-Monitoring mittels ULS

Seit 2018 wird in Obergurgl, Tirol im Äußeren Hochebenkar ein aktiver Blockgletscher mittels ULS überwacht. Bei einem aktiven Blockgletscher handelt es sich um ein Permafrostphänomen, bei dem eine Schuttmasse, dessen Porenraum mit Eis gefüllt ist, plastisch hangabwärts fließt und sich lobenförmige Strukturen herausbilden. An der Oberfläche ist im Normalfall kein Eis sichtbar. Mit Klimaerwärmung schmilzt das Eis zunehmend aus, womit es sowohl zu einem Kollaps und Abrutschen von größeren Schuttbereichen, aber auch zum Inaktivwerden der Schuttmassen kommen kann.

### 2.1 Datenaufnahme

Das Gebiet weist eine Höherenstreckung von 500 m (2300 bis 2800 m Above Mean Sea Level) und eine Hangneigung von 30 bis 35° auf. Insbesondere zur Gefahrenabschätzung für Wegeführungen unterhalb des Blockgletschers ist ein genauerer Einblick in dessen Bewegungsmuster und Stabilität notwendig.

In jährlichem Rhythmus wird deshalb jeweils eine Fläche von 150 ha mit einer durchschnittlichen Punktdichte von 400 Punkten pro m<sup>2</sup> erfasst. Hierfür wurde ein Flugplan mit einem Streifenabstand von 100 m bei einer Flughöhe von 100 m AGL erstellt. Beflogen wird mit einer Fluggeschwindigkeit von 8 m/s und einer Winkelauflösung von 0,04°. Die Flugzeit einer einzelnen Erfassung liegt bei ca. 20 Minuten.

Besondere Herausforderungen sind die schwierige Erreichbarkeit (wegloses hochalpines Gelände), geringer Luftdruck, niedrige Temperaturen, und der höhengestaffelte Flugplan bei ständig wechselnden Windverhältnissen. Dies geht in diesem Gebiet mit Akkulaufzeiten einher, die z. T. bis zu 50 % unter den Laufzeiten bei Normalbedingungen liegen. Zudem wird aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit vollständig auf eingemessene Ground Control Points (GCPs) bzw. Kontrollflächen verzichtet. Unter Berücksichtigung dieser Voraussetzungen und den herausfordernden Wetterverhältnissen wurde bei der Erfassungstechnologie bewusst auf ULS zurückgegriffen, um die kurzen günstigen Flugzeitfenster schnell und effizient zur Erfassung des gesamten Untersuchungsgebiets nutzen zu können.

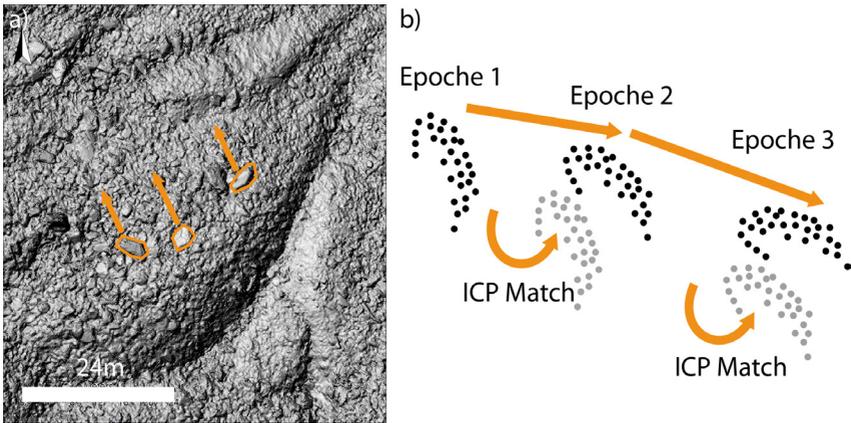
## 2.2 Datenaufbereitung

Die von der IMU aufgezeichneten Trajektorien- und Positionen werden in der Software Applanix PosPac mittels Post-Processed Kinematic (PPK) und der Zuhilfenahme von Referenzstationen des österreichischen APOS GNSS-Satelliten-Positionierungsdienstes des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (BEV) nachbearbeitet. In der Software RiProcess wird auf Basis der so errechneten Positionen und Raumstellungen der UAV, sowie den am Scanner gemessenen Pulslaufzeiten und Scanwinkeln für jedes Laserecho eine georeferenzierte Position errechnet. Des Weiteren wird in RiProcess eine Streifenanpassung durchgeführt. Dies wird für jede Scan-Epoche wiederholt.

Auf Basis stabiler Felsflächen außerhalb des Blockgletschers wurde die Lagegenauigkeit der bisher erfassten Punktwolken zu einander geprüft. Die initiale Georeferenzierungsgenauigkeit lag dabei im Bereich von 3 bis 4 cm in x, y und 10 bis 12 cm in z. Aus diesem Grund wird im Zuge des Monitorings anhand der stabilen Bereiche eine zusätzliche Anpassung der Datensätze mittels des Iterative-Closest-Point Verfahrens (ICP, Besl und MacKay 1992) durchgeführt, wobei der zeitlich älteste Datensatz als Referenz dient. Somit wurde für die bisherigen Flüge, für stabile Bereiche, eine Anpassung der einzelnen Scans mit einer Genauigkeit von 2 bis 3 cm in x, y und z erreicht.

## 2.3 Veränderungsanalyse

Eine Veränderungsanalyse wird anhand abgegrenzter Gesteinsblöcke durchgeführt, welche in einem zweistufigen Verfahren über die Zeit verfolgt werden. Im ersten Schritt werden aus den Punktwolken Oberflächenmodelle mit 0,1 m Auflösung erzeugt und in Graustufenschummerungsbilder überführt. Mit Hilfe einer Fourier-Transformation werden Oberflächenmuster in den einzelnen Zeitschritten automatisiert wiedererkannt und initiale Bewegungsvektoren zwischen zwei Zeitschritten abgeleitet (Scambos et al. 1992).



**Abb. 4:** a) Die Daten erlauben eine Abgrenzung von Gesteinsblöcken und ein entsprechendes Tracking über die Zeit. b) Die Position und Raumstellung eines Gesteinsblocks in einer früheren Epoche wird mittels ICP auf die Position und Raumstellung der Folge-epoche angepasst, um Transformationsparameter abzuleiten.

Unter Berücksichtigung dieser initialen Bewegungsvektoren werden dann mittels eines piece-wise ICP-Verfahrens (Besl und McKay 1992) die Abstände der Punktwolkengeometrien der einzelnen Gesteinsblöcke zueinander minimiert und somit Verschiebungs- und Rotationsparameter für einzelne Blöcke abgeleitet (Abb. 4).

## 2.4 Ergebnisse

Mit Hilfe der beschriebenen Vorgehensweise konnte gezeigt werden, dass sich die Stirn des Blockgletschers zurzeit in einer Destabilisierungsphase befindet und sich diese Destabilisierung auch beschleunigt (Hartl et al. in review). So beitragen die durchschnittlichen Bewegungsraten im nicht-destabilisierten Bereich

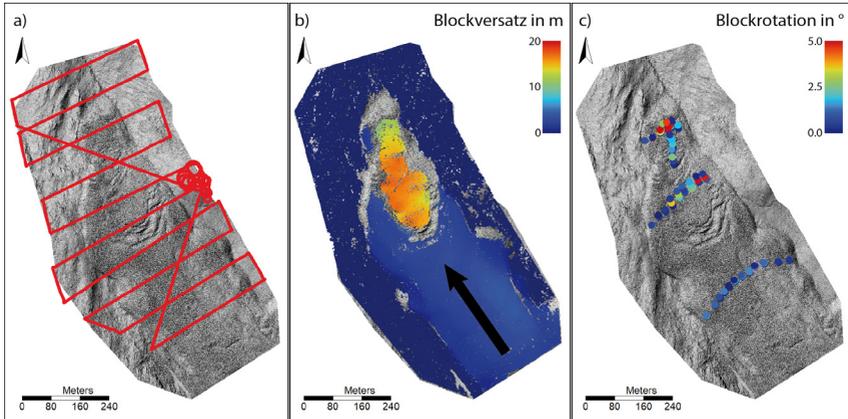


Abb. 5: a) Blockgletscher Flugtrajektorie; b) Flächig erfasster Oberflächenversatz im Zeitraum eines Jahres (2020–2021); c) Gemessene Rotationen (zum Hang) ausgewählter Gesteinsblöcke innerhalb eines Jahres (2020–2021)

des Blockgletschers zwischen 2 bis 3 m/a. Diese Bewegungen finden in erster Linie als reine Translation statt und weisen Blockrotationen  $\leq 1^\circ$  auf.

Dem gegenüber stehen die Bewegungsmuster im Stirnbereich des Blockgletschers, welche sich im Laufe des Beobachtungszeitraums (2018–2021) von durchschnittlich 10 m/a auf bis zu 18 m/a beschleunigt haben (Abb. 5b). Auffällig ist zudem, dass anhand der Blockorientierungen ein zum Hang rotieren der Gesteinsblöcke zu erkennen ist (3 bis  $4^\circ$  pro Jahr) (Abb. 5c). Dies deutet stark auf ein Rotationsrutschungssystem hin, bei dem es nach Wasserübersättigung zum gestaffelten Abrutschen von Material entlang einer Abfolge gewölbter Scherflächen kommt. Dies ist ein starkes Indiz dafür, dass hier nicht mehr Eis, sondern Schmelzwasser in Kombination mit Niederschlagswasser den Bewegungsprozess kontrolliert.

### 3 Erfassung von Holzvolumina im Wald mittels ULS

Ein anderer Anwendungsbereich von ULS liegt in der Erfassung von Forstparametern auf Bestandesebene. Neben der flächigen Erfassung von Einzelbäumen, sowie deren Baumhöhen, Kronendurchmessern und Brusthöhendurchmessern (DBH) ist die Abschätzung von Biomasseverteilungen bzw. des wirtschaftlich nutzbaren Holzvorrats von Interesse. Insbesondere der Holzvorrat ist mit herkömmlichen Verfahren nicht direkt messbar. Deshalb wird auf sogenannte allometrische Funktionen zurückgegriffen, welche gewisse Basisparameter von Einzelbäumen (z. B. Höhe, Kronenfläche und DBH) in Holzvorratswerte übersetzen.

Um eine Alternative zu allometrischen Funktionen zu entwickeln, wird versucht Holzvolumina mittels ULS direkt zu messen und dabei im Wesentlichen auf die Rekonstruktion der Verästelungsstruktur in Form von Zylindern zurückgegriffen. Für terrestrisches Laserscanning existieren dazu bereits einige Ansätze, die versuchen die Laserscanning Punktwolken in erkennbare Aststrukturen zu zerlegen und die einzelnen Äste als Zylinder zu beschreiben (Raumonen et al. 2013, Bremer et al. 2018). Das Holzvolumen eines Baumes ergibt sich dabei als die Summe aller Zylindervolumina. Im Folgenden soll kurz beschrieben werden, wie diese Ansätze für die Anwendung mit ULS getestet wurden.

### 3.1 Datenaufnahme

Um die beschriebene Methodik für ULS zu testen, wurden Waldflächen von jeweils 4 ha mit einer durchschnittlichen Punktdichte von 10.000 Punkten pro  $m^2$  erfasst. Hierfür wurden Flugpläne mit einer Doublegrid-Struktur und einem Streifenabstand von 50 m bei einer Flughöhe von 80 m AGL erstellt. Beflogen wurde mit einem Riegl VUX-1LR und Applanix AP20 IMU auf einem Riegl Ricopter und einer Fluggeschwindigkeit von 8 m/s. Unter Berücksichtigung der Strahldivergenz des VUX-1LR ( $0,5 \text{ mrad} \sim 0,0286^\circ$ ) wurde mit einer Winkelauflösung von  $0,0285^\circ$  geflogen, um eine Überlappung der einzelnen Laserstrahlquerschnitte zu garantieren und somit eine lückenfreie Abtastung quer zur Flugrichtung zu gewährleisten. Dies sollte vor allem die Erfassung feiner Strukturen im Kronendach verbessern.

Die Flugzeit einer einzelnen Erfassung lag bei ca. 15 Minuten. Zur Einhaltung des VLOS-Kriteriums wurde von Waldlichtungen aus mit bis zu 500 m Abstand zum Interessensgebiet operiert.

### 3.2 Datenaufbereitung und Volumenberechnung

Die Basisprozessierung zur Erzeugung der georeferenzierten Punktwolkendaten wurde wie in Abschnitt 2.2 beschrieben durchgeführt.

Diese Basispunktwolken enthielten noch tiefe und hohe Ausreißer, welche über ein Nachbarschaftskriterium herausgefiltert wurden. Des Weiteren wurde eine Progressive-TIN-Densification (Axelsson 2000) durchgeführt, um eine Unterscheidung zwischen Bodenpunkten und Vegetationspunkten, sowie für alle Punkte eine Zuweisung der Höhe über Boden (dz) zuzulassen.

Auf Basis der als Anfangspunkte verwendeten Bodenpunkte wurden Einzelbäume mit Hilfe eines Pfadkosten minimierenden Algorithmus zu einander abgegrenzt (Dijkstra 1959, Bremer et al. 2018). Dabei wurden für jeden

Vegetationspunkt die Pfadkosten zum nächsten Anfangspunkt (seed) minimiert. Für jeden der, in den Punktwolken abgegrenzten, Bäume wurde in 1,3 m über der Bodenoberfläche (Brusthöhe) die Punktverteilung analysiert und ein Kreis in die Daten eingepasst, um den DBH abzuleiten (Bremer et al. 2018).

Zum Schluss wurden auf Basis der Pfadkostenverteilung innerhalb der Baumsegmente die Verzweigungsarchitekturen in Form von Graphen abgeleitet. Orthogonal zu jeder Kante im abgeleiteten Graphen wurde wiederum ein Querschnitt durch die Punktwolke gelegt und wiederum durch Einpassung eines Kreises die jeweiligen Durchmesser berechnet. Alternativ wurde die Röhrenmodell-Theorie angewendet (Shinozaki et al. 1964). Diese besagt, dass die Querschnittsfläche eines Hauptastes gleich der Summe der Querschnittsflächen seiner abzweigenden Äste ist. Bei dieser Variante wurde nur der DBH als Durchmesser explizit gemessen und die Astverzückung auf Basis der Verzweigungshierarchie berechnet (Bremer et al. 2018).

### 3.3 Ergebnisse

Die abgeleiteten Astgeometrien wurden im Vergleich zu Ableitungen aus terrestrischem Laserscanning bewertet. Es konnte gezeigt werden, dass für laubfreie Laubwaldbestände eine flächendeckende Ableitung von Verzweigungsstrukturen und Holzvolumina möglich ist (Abb. 6).

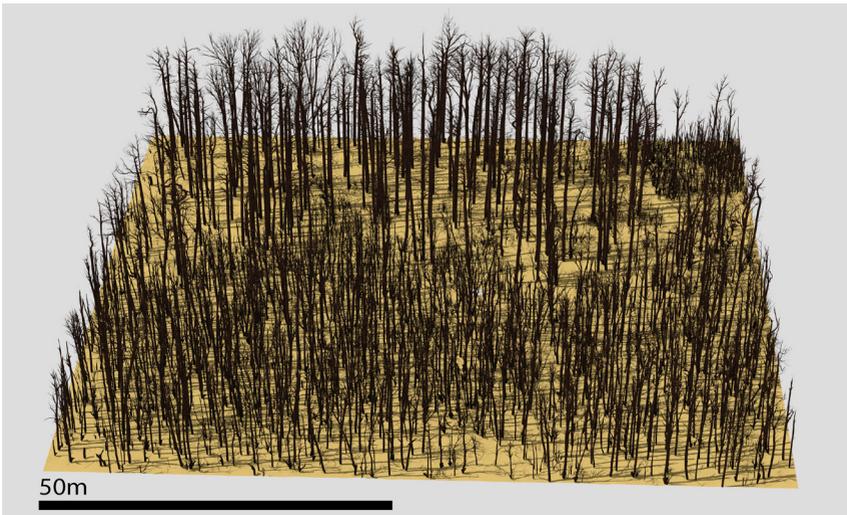


Abb. 6: Beispielableitung von Astgeometrien in einem Mischwaldbestand in Fürstenfeld, Steiermark, Österreich

Dabei ist eine verlässliche Ableitung von Zylindergeometrien mit einer Fehlermarge  $\leq 10\%$  nur bei Astdurchmessern 7 cm oder größer möglich. Schmalere Äste konnten nur mit dem Röhrenmodell-Ansatz plausibel abgeleitet werden.

Diese Erkenntnisse lassen sich beispielsweise auch auf Kiefernbestände übertragen. Weniger verlässlich ist der getestete Ansatz allerdings für dichte Fichtenbestände, wo die zumeist schmalen Äste in den Punktwolkendaten schlecht erkennbar sind und zudem die Stämme durch die geringe Durchlässigkeit des Kronendaches nur lückig erfasst wurden.

## 4 Resümee

Im Bereich des UAV-gestützten Umweltmonitorings stellt ULS aufgrund der hohen Kosten immer noch eine Nischenanwendung dar. So sind ULS-Einsatzgebiete vor allem dort zu finden, wo beispielsweise bildgestützte Verfahren an ihre Grenzen stoßen.

Hauptanwendungsfelder sind zum einen im Bereich der Vegetationsanalysen bzw. Geländemodellerstellung zu suchen, zum anderen bei der zeitlich effizienten Erfassung von Geländeänderungen. Hier können ULS-Systeme auch bei schlechter Beleuchtung und schlechter Streifenüberlappung noch Ergebnisse von ausreichender Qualität liefern. Eine zusätzliche Nische bietet die Erfassung von kontrastlosen Schneeoberflächen sowie die Erfassung von Wasseroberflächen, die in Form von Datenlücken abgegrenzt werden können. Einen deutlichen Performancevorteil gegenüber Kamerasystemen weisen hierbei vor allem größere und kostenintensivere ULS-Systeme auf.

Am Institut für Geographie der Universität Innsbruck wird ULS seit 2017 operationell betrieben und liefert schnelle, detaillierte Veränderungsanalysen im Naturgefahrenkontext. Beispielhaft wurde hier das Monitoring eines kollabierenden Blockgletschers beschrieben.

Ein weiteres Standbein liegt im Wald-Monitoring, wo insbesondere durch detaillierte Scanmuster auch Rekonstruktionen von kleineren Strukturen wie Ästen möglich sind und damit Holzvolumina direkt gemessen werden können.

Mit fortschreitender Miniaturisierung der Sensoren, in Kombination mit hohen Prozessierungsgeschwindigkeiten, ist davon auszugehen, dass ULS in Zukunft auch in anderen Anwendungsfeldern profitabel einsetzbar sein wird.

## Literatur

Axelsson, P.E. (2000): DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 32 (Part B4/1), 110–117.

- Besl, P. J., McKay, N. D. (1992): Method for registration of 3-D shapes, in: Sensor fusion IV: control paradigms and data structures, vol. 1611, 586–606, Spie.
- Bremer, M., Wichmann, V., Rutzinger, M. (2018): Multi-temporal fine-scale modelling of Larix decidua forest plots using terrestrial LiDAR and hemispherical photographs. *Remote Sensing of Environment*, 206, 189–204.
- Bremer, M., Wichmann, V., Rutzinger, M., Zieher, T., Pfeiffer, J. (2019): Simulating Unmanned-Aerial Vehicle Based Laser Scanning Data for Efficient Mission Planning in Complex Terrain. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 4213, 943–950.
- Dijkstra, E. W. (1959): A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik* 1 (1), 269–271.
- Hartl, L., Zieher, T., Bremer, M., Stocker-Waldhuber, M., Zahs, V., Höfle, B., Klug, C., Ciccoira, A. (in review): Multisensor monitoring and data integration reveal cyclical destabilization of Äußeres Hochebenkar Rock Glacier. *Earth Surface Dynamics*.
- Mayr, A., Bremer, M., Rutzinger, M. (2020): 3D Point errors and change detection accuracy of unmanned aerial vehicle laser scanning data. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, V-2-2020, 765–772.
- Mayr, A., Bremer, M., Rutzinger, M., Geitner, C. (2019): Unmanned aerial vehicle laser scanning for erosion monitoring in alpine grassland. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-2/W5, 405–412.
- Pfeifer, N., Mandlbürger, G., Glira, P. (2015): Laserscanning. In: Heipke, C. (Ed.), *Photogrammetrie und Fernerkundung* (1. Auflage, 1–51). Berlin Heidelberg: Springer. DOI: [10.1007/978-3-662-46900-2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-46900-2).
- Pfeiffer, J., Zieher, T., Rutzinger, M., Bremer, M., Wichmann, V., (2019): Comparison and timeseries analysis of landslide displacement mapped by airborne, terrestrial and unmanned aerial vehicle based platforms. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Vol. IV-2-W5, 421–427.
- Raunonen, P., Kaasalainen, M., Akerblom, M., Kaasalainen, S., Kaartinen, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Disney, M., Lewis, P. (2013): Fast Automatic Precision Tree Models from Terrestrial Laser Scanner Data. *Remote Sensing* 5 (2), 491–520.
- Scambos, T. A., Dutkiewicz, M. J., Wilson, J. C., Bindschadler, R. A. (1992): Application of image cross-correlation to the measurement of glacier velocity using satellite image data, *Remote sensing of environment*, 42, 177–186.
- Shan, J., Toth, C. K. (2018): *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, Second Edition. Taylor & Francis.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K., Kira, T. (1964): A quantitative analysis of plant form – the pipe model theory. I. Basic analyses. *Japanese Journal of Ecology* 14, 97–104.
- Wagner, W., Ullrich, A., Briese, C. (2003): Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* 91: 223–235.

## Kontakt

Dr. Magnus Bremer  
Institut für Geographie, Universität Innsbruck  
Innrain 52, 6020 Innsbruck, Österreich  
[magnus.bremer@uibk.ac.at](mailto:magnus.bremer@uibk.ac.at)

# Innovative Konzepte unbemannter Systeme: freifliegend, fahrend, gefesselt – vom Drohnen-Hangar über automatisierte Regelbefliegungen bis zum Leitstand

Christian Kaiser

## 1 Entwicklung von Innovationen mit unbemannten Systemen

Der Einsatz von unbemannten Systemen hat zu zahlreichen Innovationen in unterschiedlichen Branchen und Anwendungsfeldern geführt. Die niederschwellige Generierung von Luftaufnahmen hat u. a. auch für Geodaten zu einer Vereinfachung und Beschleunigung von Datenerhebungen und Ergebnisherstellung geführt.

Die schnelle Verbreitung der im Verhältnis kostengünstigen Flugsysteme in der Branche führt parallel auch dazu, dass zahlreiche weitere Anforderungen und Komponenten (z. B. RTK, PPK, taugliche Optiken) angeboten wurden.

Gleichfalls hat dieser Trend dazu geführt, dass z. B. LiDAR-Hersteller die Miniaturisierung vorangetrieben haben, um diese an Drohnen anbringen und fliegen zu können. Allerdings ist dies nur ein Bereich der Innovationen, welche im Bereich der unbemannten Systeme möglich sind. Deutlich mehr Potenzial besteht in der genauen Betrachtung der eingesetzten Technologien und einer veränderten Zusammenstellung und Rollenverteilung dieser.

Hierzu ist als erster Schritt zu verstehen, welche Technik überhaupt zum Einsatz kommt und wie diese zusammenspielt. Erst mit dem Verständnis dessen in Kombination mit den Wünschen, Anforderungen und Einsatzrahmenbedingungen der Nutzer, werden deutlich mehr Innovationen generiert.

## 2 Technologien und Komponenten unbemannter Systeme

UAV werden von professionellen Anwendern nahezu täglich für die unterschiedlichsten Zwecken eingesetzt. Neben der Geodäsie und Photogrammetrie werden UAV für u. a. Sicherheitsaufgaben in der Instandhaltung, im Bauwesen und durch Sachverständige unterschiedlichster Bereiche eingesetzt.

Hierbei werden i. d. R. Produkte genutzt, welche am Markt verfügbar sind und über grundlegende Eigenschaften wie niedrigschwellige Einsatzbereitschaft,

einfache Handhabung und geeignete Sensoriken verfügen. Für Einsatzgebiete wie z. B. der Vermessung müssen die Systeme auch über präzise Positionierung wie z. B. RTK/PPK-GNSS verfügen und mit bodengestützten Komponenten wie RTK-Basestation kommunizieren können.

Für eine kontrollierte, automatisierte Sammlung von Daten werden auch Systemfähigkeiten der Missionsplanung und -ausführung benötigt.



Abb. 1: UAV (Copting GmbH)

Der Begriff UAV ist, wenn es um die Bezeichnung eines Flugsystems mit anmontierter Sensorik, Handsender und gegebenenfalls weiterer Technik handelt, nicht korrekt. Es wird begrifflich zwischen UAV (unmanned aerial vehicle) und UAS (unmanned aerial system) unterschieden.

Der Begriff UAV bezieht sich ausschließlich auf das unbemannte System selbst, also der eigentlichen Drohne (Abb. 1).

Um ein UAV in seinem eigentlichen Verwendungszweck einsetzen zu können, werden weitere Komponenten wie z. B.

- Handsender,
- Sensorik,
- Missionsplanungs- und -kontrollsoftware,
- Sendereinheiten,
- Sensoriken,
- Bodenstationen,
- ggf. Sicherheitssysteme wie Fallschirm,
- computergestützte Fernsteuerungskomponenten benötigt.

Die Gesamtheit der Komponenten, was letztlich das einsetzbare System beschreibt, wird UAS genannt (Abb. 2). Diese Unterscheidung ist wichtig, da nicht nur genehmigungstechnisch alle Komponenten das eigentliche unbemannte Flugsystem definieren.

Eine Drohne, ein UAV kann keine Orthofotos erstellen. Das UAV ist lediglich das geeignete „Taxi“, um Sensorik luftgestützt zum Einsatz zu bringen. Weiter bedarf es eine Steuerungssoftware, damit Sensoren angesteuert und die Sensordaten zum richtigen, zum gewünschten Zeitpunkt aufgezeichnet werden. Um eine sichere Steuerung und Kontrolle des UAV zu gewährleisten, werden am



Abb. 2: UAS (DJI/Copting GmbH)

Boden Steuereinheiten wie Handsender und/oder Computer benötigt. Gleichfalls bedarf es auch Anwendungen, um die Sensordaten im Anschluss zu einem gewünschten Ergebnis zusammenzuführen.

Dies führt zur Erkenntnis, dass die UAS für professionelle Anwendungen aus einzelnen Hardware- und Softwarekomponenten bestehen, welche dann zu den gewünschten Abläufen und Ergebnissen führen.

Aus dieser Herleitung und der inhaltlichen Trennung der unterschiedlichen Komponenten heraus, welche in der Summe ein UAS ausmachen, werden innovative Ansätze und Konzepte für den Einsatz unbemannter Systeme erst möglich. Erst, wenn unterschiedliche Komponenten so zu einem UAS zusammengestellt werden können, damit ein Gesamtsystem zur Erfüllung einer gestellten Aufgabe entsteht, realisieren sich Innovationen.

## 2.1 Flugsystem

Ein UAV gleich welchen Aufbaus besteht, neben dem Flugkörper, im Wesentlichen aus

- Autopilot
- Antrieben
- Propeller
- Positionierungssystem (GPS, Galileo, Glonass, Beidou)
- ggf. Abstandssensorik
- Kommunikationsschnittstellen für externe Steuerung

Es gibt zwei unterschiedliche Arten von Autopiloten. Die eine Art sind Autopiloten, welche herstellerseitig vorgegeben, nicht wechselbar sind und nicht oder nur eingeschränkt extern über Schnittstellen angesprochen werden können. Die zweite Art sind Autopiloten, welche vom Typ „Open Source“ sind, über offene

Schnittstellen und Standardprotokolle verfügen und somit deutlich flexibler und individueller einsetzbar sind.

Im ersten Fall können i. d. R. nur die herstellerseitig mitgelieferten Steuerkomponenten und zu steuernden Anbauten (Kamera usw.) genutzt werden. Als mögliche Schnittstellen werden in einigen Fällen APIs angeboten, um mit Drittsoftware einen festgelegten Funktionsumfang adressieren zu können. Weiter stellt i. d. R. der Hersteller Softwareupdates bereit, die sehr häufig installiert werden müssen. Außerdem ist eine Ansteuerung der o. a. Systeme über externe Software i. d. R. auch nur über den korrespondierenden Handsender möglich. Es besteht keine Möglichkeit, die Flugsteuerung direkt (über Hardwareschnittstellen) anzusprechen.

Im zweiten Fall besteht die Möglichkeit, die zu nutzende Peripherie, Steuerungskomponenten und Sensoren nahezu frei zu wählen. Es ist lediglich darauf zu achten, dass diese über die Standardschnittstellen und -protokolle angesprochen werden können. Dies ermöglicht, die Ansteuerung über

- Standardkommunikationsschnittstellen wie z. B. MavLink, MavRos,
- technische Schnittstellen: seriell, UART, CAN, Netzwerk,
- Standardtools wie Matlab, Python u. v. m.

Da bei den Open Source-Produkten kein Update-Zwang besteht, obliegt es dem Eigner der Hardware zu entscheiden, ob ein Update installiert wird oder nicht. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn ein einseitiges Update aufgrund externer, eigenentwickelter Ansteuerung zu zwangsläufigen Änderungen in anderen Komponenten führt. Dies würde die Abarbeitung eines Testprogrammes erfordern, um die Systemstabilität zu verifizieren. Die durchzuführenden Tests hängen davon ab, welche Komponente aktualisiert wurde. Ist es „nur“ ein Update von Peripheriekomponenten (Kamera, Stabilisierung, Sender etc.) reichen einfache Funktionstests aus. Sind dies Änderungen in einer Kommunikationsschnittstelle, welche mit dem Autopiloten kommuniziert, reicht häufig schon ein Test mit einem Simulator aus. Wenn es allerdings um Firmwareänderungen des Autopiloten geht, ist nach der Installation (und ggf. Konfiguration) das Flugsystem fliegerisch zu testen. Wer letztlich die Sicherheit und Robustheit der aktualisierten Komponente sicherzustellen hat, hängt davon ab, wer diese beauftragt, bereitstellt oder einführt.

Ein weiterer entscheidender Punkt für Innovationen ist die Tatsache, dass „Open Source“-Autopiloten nicht nur auf UAV beschränkt sind. Durch die Wahl der richtigen Firmware (gleichfalls Open Source), können auch unbemannte Fahrzeuge, Flugzeuge, Boote ausgerüstet und zum überwiegenden Teil auch mit denselben Methoden gesteuert werden.

## 2.2 Steuerungskomponenten

Mit Steuerungskomponente ist eine technische Einheit gemeint, welche Steuerungskommandos über eine definierte Kommunikationsstrecke an das UAV sendet und Telemetriedaten des Flugsystems erhält. Klassisch besteht diese Steuerungskomponente aus einem Handsender für Fernpilot:innen.

Zur Darstellung des UAV-Zustandes als auch der UAV-Position werden häufig Handsender mit integrierten Bildschirmen oder anschließbaren Smartphones/Tablets genutzt. Eine App stellt die Telemetrie, Karten und Bildinformationen für Fernpilot:innen dar. Auch ist ein bestimmter Funktionsumfang zur Bedienung und für z. B. Missionsplanungen vorgegebenen. Nutzt man Flugsysteme auf Basis „Open Source“, können unterschiedliche Arten von Steuerungskomponenten eingesetzt werden. Dies steigert die Möglichkeiten deutlich, unbemannte Systeme für neue Einsatzzwecke einzusetzen.

So gibt es auch die Möglichkeit UAVs über eine Software am Boden direkt zu steuern, vorausgesetzt, dass die dafür notwendigen Kommunikationsschnittstellen verbaut sind. Ein Handsender könnte dann, wenn überhaupt genutzt, einem Sicherheitspilot:innen als Eingriffsmöglichkeit dienen. Somit werden unbemannte Systeme auch in die Lage versetzt, automatisiert zu agieren.

## 2.3 Sensorik

Der eigentliche Nutzen eingesetzter UAS besteht in der Sammlung und Auswertung von Sensordaten. Als Sensoren werden am häufigsten Kamerasysteme eingesetzt. Mehr und mehr erfolgt auch der Einsatz von LiDAR. Je nach genutztem Sensor kann die programmierte, missionsbasierte Ansteuerung notwendig sein und über die gegebenen Schnittstellen und Anwendungen eingestellt werden.

Die Datenauswertung erfolgt i. d. R. nach der Befliegung durch Übertragen der Daten in eine Anwendung, welche z. B. Orthofotos, Punktwolken und/oder 3D-Modelle erstellt.

Je nach UAS ist die Sensorik fest verbaut oder kann gewechselt werden. Auch besteht die Möglichkeit, je nach Aufbau und Fähigkeiten der Flugplattform, weitere Sensorik fallweise anzubringen. Fest verbaute Sensorik bietet i. d. R. einen begrenzten Anwendungsbereich. Nutzer sind durch die „Fähigkeiten“ des Sensors und des Funktionsumfangs des Autopiloten und der Ansteuerung beschränkt. Wechselbare Sensoriken sind bei größeren Flugsystemen i. d. R. Standard. Je nach Hersteller können jedoch nicht beliebige Sensoren ausgewählt werden, sondern sind vorgegeben.

Setzt man auf „Open Source“-Systeme, kann nahezu jede beliebige Sensorik eingesetzt werden. Sicherlich stellt sich die Frage nach der Integration in das

Flugsystem (Spannungsversorgung, Ansteuerung, Datenausleitung etc.). Diese sind aber aufgrund der existierenden, offenen Standardschnittstellen tendenziell eher eine Fleißaufgabe anstatt ein Problem. Außerdem bietet es den großen Vorteil, dass die Ansteuerung der Sensorik und gegebenenfalls dessen Datenaustausch durch eigene Software erfolgen und somit Effizienzen deutlich erhöhen kann.

## 2.4 Flugrelevante Sensorik

Die meisten der geschlossenen „off-the-shelf“-Systeme sind bereits mit flugrelevanter Sensorik ausgestattet, beispielsweise:

- Abstandssensoren (Sicht, Ultraschall),
- RTK-fähiges GNSS
- Erkennung sich annähernden bemannten Luftfahrzeuge (ADS-B)

Je nach Modell sind ein oder mehrere dieser Sensoren verbaut. Eine Nachrüstung weiterer Sensoren ist jedoch in den meisten Fällen nicht möglich. Dies kann aber für einige Missionsarten durchaus notwendig sein. In der Regel müssen dann fehlende Sensoren durch erhöhten Aufwand in der Missionsplanung und -vorbereitung kompensiert werden.

Offene Systeme hingegen sind aufgrund der zahlreichen Anschlussmöglichkeiten i. d. R. stets erweiterbar und können mit weiteren unterstützenden Sensoren ausgerüstet werden. Auch sind diese sehr häufig wechselbar, so dass ein Flugsystem zu den unterschiedlichsten Einsatzarten ausgerüstet werden kann.

## 2.5 Schnittstellen

Bei den Schnittstellen sind die elektrischen, mechanischen und Datenschnittstellen relevant. Bei geschlossenen Systemen hat der Nutzer nur die Möglichkeit, die vom Hersteller freigegebenen Schnittstellen zu nutzen. Diese beschränken sich i. d. R. auf Bildausleitungen am Handsender oder einige wenige Anschlussmöglichkeiten für herstellereitig angebotenes Zubehör.

„Open Source“-Systeme hingegen bieten sehr umfangreiche Schnittstellen. Dabei ist wichtig zu betonen, dass diese Schnittstellen entgegen der geschlossenen Systeme sich nur auf diejenigen des Autopiloten beziehen. An diesen kann man unterschiedlichste Kommunikations- oder Sensorkomponenten anschließen und ansteuern. Alle weiteren Komponenten der Vorabschnitte können fast beliebig zusammengestellt werden.

## 2.6 Missionsplanung und Systemmonitoring

Ein effizienter, automatisierter Einsatz von UAS erfordert eine Software, mit welcher man z. B. Missionen planen und während der Ausführung kontrollieren kann. Geschlossene Systeme bieten eigene Softwarebausteine, Apps oder Computeranwendungen an, um Missionen zu erstellen.

Bei offenen Systemen ist es aufgrund der Standardprotokolle egal, welche Software eingesetzt wird. Erforderlich ist nur die Nutzung des Standardprotokolls. Somit ist der Nutzer nicht auf bestimmte Produkte und Funktionsumfänge eingeschränkt und kann, auf Basis der verfügbaren offenen Schnittstellen und zahlreich freierverfügbaren Module, kostenfreie oder selbstentwickelte Software einsetzen.

Da die offenen Systeme Standardprotokolle nutzen, besteht gleichfalls auch die Möglichkeit

- mehrere unbemannte Systeme gleichzeitig zu steuern,
- unterschiedliche unbemannte Systeme über dieselbe Software parallel zu steuern und zu überwachen,
- unterschiedliche unbemannte Systeme untereinander kommunizieren zu lassen und Missionen quasi ohne externen Eingriff auszuführen,
- über Sensordatenfusion und einem Prozessor Aktionen automatisiert auszuführen.

## 3 Beispiele für realisierte Innovationen

### 3.1 Automatisierte Regelbefliegungen

#### 3.1.1 Vorprogrammierung von Missionen – einfach

Die Vorbereitung von Flugmissionen beschleunigt deren Ausführung. Insbesondere dann, wenn eine Flugmission mehrfach wiederholt wird, die Ergebnisse stets auf denselben Flugbahnen und mit denselben Sensoreinstellungen zu gewinnen sind.

Dabei ist auch nicht notwendig, dass stets dieselbe Person das Flugsystem zum Einsatz bringt. Geeignete flugerfahrene Personen vorausgesetzt, können diese das Flugsystem vor Ort vorbereiten, die Mission laden und zur Ausführung bringen. Es sind zumeist keine ergebnisorientierten, detaillierten Kenntnisse zur auszuführenden Flugplanung notwendig. So kann mehr oder weniger eine Art „Fließbandbefliegung“ erfolgen und vor Ort sind keine Spezialisten notwendig.

Diese Art der Befliegung ist nahezu mit allen gängigen Flugsystemen möglich.

### 3.1.2 Vorprogrammierung und dynamische Anpassung von Missionen

Die Erweiterung der vorprogrammierten Missionen bedeutet, dass eine spezialisierte Person die Mission(en) aus der Ferne begleitet. Hierzu wird das UAS über eine Kommunikationsverbindung (4G, Netzwerk, VPN) mit einem entfernten Computer verbunden. Diese Verbindung ermöglicht, dass die entfernte Person nicht nur in Echtzeit die Flüge verfolgen kann, sondern gegebenenfalls in die Missionen entweder fernmündlich mit der vor Ort befindlichen steuernden Person oder direkt über eine bidirektionale Schnittstelle das UAS beeinflussen kann (Abb. 3).



Abb. 3: Schema einer zentralen Steuerung dezentraler UAS (Copting GmbH)

Dies kann insbesondere dann sehr vorteilhaft sein, wenn unklare Missionen, Tests oder unklare Verhältnisse am Flugort vorliegen. Die örtliche Trennung von Flugdurchführung und Spezialisten/Sachverständigen führt zu erheblichen Kosteneinsparungen, zur Parallelisierung von Missionen und zur Optimierung des Personal- und Materialeinsatzes.

Aus regulatorischer Sicht spricht nichts gegen ein solches Szenario, da bei Flugdurchführung stets ein Fernpilot:in am Flugort ist, nach VLOS-Regeln (visual line of sight – Sichtflugregeln) fliegt und jederzeit in die Flugführung eingreifen kann.

Ob diese Art der UAS-Einsätze mit Standardsystemen möglich ist, muss im Einzelfall geprüft werden. Falls es mit einem „off-the-shelf“-System unter Nutzung von Produkten von Drittherstellern realisiert wird ist zudem die Frage zu klären, ob die Gewährleistung der Flugsystemhersteller nicht verwirkt wird.

## 3.2 Dezentralisierte Flugsysteme

Eine Weiterführung des vorherigen Beispiels ist, wenn aus einer Zentrale heraus mehrere Flugsysteme über Kommunikationsverbindungen koordiniert werden. Mit „Zentrale“ ist hierbei eine Missionsplanung- und Steuerungssoftware wie in Abschnitt 3.1.2 gemeint, welche nicht zwingend an einem festen Ort sein muss.

So können die Flugsysteme selbst entweder örtlich getrennt oder an einem Ort koordiniert zum Einsatz kommen. Erfolgt der UAS-Einsatz örtlich getrennt, dann erfolgt es wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben. Werden die UAS an einem Ort eingesetzt, kann sich die Missionsplanung- und Steuerungssoftware auch vor Ort befinden. Letztlich ist der Unterschied in der Art der Kommunikationsverbindungen.

Je nach Vorhaben können also mehrere UAS parallel z. B. ein Areal befliegen und kartieren, dabei auf Basis der Gesamtmission jeweils Teilbereiche befliegen und Daten sammeln.

Neben dem optimierten Personaleinsatz bewirkt die zentrale Steuerung dezentraler Systeme zudem eine erhebliche Beschleunigung und prozedurale Vereinfachung von Flugvorhaben. Außerdem ist dabei auch möglich, parallel sowohl eigenes Personal als auch Dienstleister einzusetzen, bei minimiertem koordinativem Personaleinsatz und deutlicher Reduktion der Aufwände. Je nach eingesetzter Missions- und Kontrollsoftware besteht auch die Möglichkeit, mehrere UAS als Schwarm einzusetzen. Da bei den Einsätzen stets steuernde Personen anwesend sind und Flug auf Sicht (VLOS) durchgeführt wird, bestehen keine erhöhten regulatorischen Anforderungen.

## 3.3 UXO – Unexploded ordnance

UXO bezeichnet den Einsatz von Messgeräten zur Detektion im Boden befindlicher metallischer Elemente. So werden z. B. Blindgänger, Munitionsreste u. v. m. detektiert, bevor Baumaßnahmen beginnen.

Diese Messgeräte und Sensoren sind Magnetometer, welche je nach Ausführung bis mehrere Meter in den Boden „sehen“ können. Der herkömmliche Weg des Magnetometereinsatzes ist über einen Handwagen, welcher mit diesen Sensoren ausgerüstet ist und von Personen geschoben werden. Je nach Bodenbeschaffenheit und Umgebung ist dies i. d. R. mühsam, teuer und zeitaufwendig.

UAS können mit Magnetometern ausgerüstet werden und schneller, effizienter, günstiger und ohne Bodenbeeinflussung UXO-Flüge durchführen. Das Magnetometer wird dabei möglichst tief am UAS befestigt, damit die magnetischen Interferenzen des Flugsystems die Messung nicht oder nur wenig beeinflussen (Abb. 4).

Elementar beim Magnetometereinsatz mit UAS ist, dass das Flugsystem stets denselben, minimalen Abstand zum Boden hält. In den von uns durchgeführten Projekten, war ein Abstand von 50 cm zum Boden gefordert. Es muss stets dem Terrain folgen und dabei verhindern, am Boden „hängen zu bleiben“. Dies erfolgt mit am UAS montierten Abstandssensoren, welche die vorgegebene Höhe zum Boden permanent messen, diese an den Autopiloten weiterleiten, der wiederum im Flug unmittelbar Höhenänderungen durchführt.

Wichtig ist auch, dass

- die Abstandssensoren stets vorne und in Flugrichtung angebracht sind, um Terrainveränderungen bereits vor dem Magnetometer festzustellen und auszugleichen,
- die Abstandssensoren mit unterschiedlichen Bodenbeschaffenheiten, Wasser und Reflektionen zurecht kommen,
- das Flugsystem über eine sehr präzise Positionierungs- und Flugrountreue verfügt,
- enge Flugbahnen geflogen werden können, da die Magnetometer nur über deren Breite messen und keine blinden Flecken zurückbleiben dürfen.



Copting GmbH

Abb. 4: UXO-Transformer

Werden Flugsysteme genutzt, welche nicht über Abstandssensoren verfügen bzw. diese nicht direkt und missionsbezogen mit dem Autopiloten kommunizieren, muss vor einer UXO-Befliegung ein Geländemodell erstellt und dies bei der Missionsplanung zugrunde gelegt werden. Dieser Prozess verlängert und verteuert die Mission deutlich.

Ein „offenes“ System mit wählbarem, frei positionierbarem Abstandssensor, welcher direkt mit den offenen Schnittstellen der Flugsteuerung kommuniziert beschleunigt die Projektdurchführung erheblich, minimiert den Aufwand der Missionsplanung und reduziert den gesamten Planungsaufwand deutlich. Außerdem können offene Systeme baulich einfach an die Einsatzanforderungen (Wetter, Wind, Regenfestigkeit, Traglast etc.) angepasst werden.

Zur Befliegung eines Areals wird, wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, eine Mission mit den Flugpfaderfordernissen geplant, auf die Drohne übertragen und

ausgeführt. In der Regel handelt es sich dabei um Flüge in Sichtweite (VLOS) und eine steuernde Person ist vor Ort.

### 3.4 Hangar-basierte Flugsysteme

Klassischer Weise, und wie in den Abschnitten 3.1 und 3.2 dargestellt, werden UAV stets mit Fernbedienung, Handsender eingesetzt. Der überwiegende Teil der am Markt erhältlichen Flugsysteme funktioniert nur in Verbindung mit einem Handsender. Ist kein Handsender vorhanden und mit dem UAV verbun-



Abb. 5: Hangar-basierte Flugsysteme

den, kann das UAS nicht eingesetzt werden. Dies liegt an der vom Hersteller voreingestellten, nicht änderbaren Funktionsweise des Gesamtsystems.

Das Prinzip hangar-basierter UAS ist, dass diese automatisch agieren (Abb. 5). Die auszuführenden Missionen können sowohl eventgesteuert als auch geplant sein. Die gesamte Funktionsweise ist so konzi-

piert, dass keine Person vor Ort sein muss. Die gesamte Steuerung und Kontrolle erfolgen von einem entfernten Arbeitsplatz. Je nach Einsatzkonzept kann dies ein einzelner Arbeitsplatz oder eine Leitstelle sein.

Dieses Konzept stellt hohe Anforderungen an alle genutzten Komponenten. Die Anforderungen bestehen in erster Linie bzgl. der Ausstattung und der Fähigkeiten, unterschiedliche Sensoren und Kommunikationsmöglichkeiten anzuschließen. Gleichzeitig ist anzumerken, dass diese Anforderungen sich weniger auf kostenintensives Material beziehen, sondern auf die Notwendigkeit flexibler, offener Schnittstellen, deren Nutzung und korrekte Konfiguration.

Die Steuerung der Drohne erfolgt vollständig softwaregesteuert. Mit Software ist nicht die Firmware auf dem Autopiloten gemeint. Gemeint ist eine Anwendung, welche das Gesamtsystem bestehend aus Hangar, Drohne, Kamera/Sensor steuert. Dies setzt also voraus, dass das System ohne die üblichen Einschränkungen hinsichtlich Handsender, begrenzter Schnittstellen und begrenzter Flugmodi funktioniert.

Gleichzeitig sind folgende Faktoren zu berücksichtigen:

- Präzise Landung: da es vor Ort keine steuernde Person gibt, muss das Flugsystem sehr präzise auf dem Hangar landen. Nur so kann der Hangar ohne Beschädigung des UAV schließen. Eine präzise Landung kann auf unterschiedliche Weise technisch umgesetzt werden, erfordert aber in jedem Fall Sensoren, welche Einfluss auf den Autopiloten nehmen und Positionskorrekturen kommandieren können. RTK ist hierbei nur eine Unterstützung aber keine alleinige Möglichkeit, die präzise Landung zuverlässig zu ermöglichen.
- Hohe Regelungsgeschwindigkeit des UAV: insbesondere bei der Landung ist wichtig, dass die Drohne schnelle Bewegungen durchführen kann, ohne in instabiles Flugverhalten zu geraten.
- Robuste und langlebige Komponenten: da sich keine Person in der Nähe der Systeme befindet, muss die Haltbarkeit der Verschleißkomponenten über dem handelsüblichen Standard liegen. Dies gilt für die Motoren als auch für alle Stabilisierungen angebaute Sensorik. Auch ist zu berücksichtigen, dass das Gesamtsystem 24/7/365 im Außenbereich stationiert ist.
- Systemstatus und frühzeitige Warnmeldungen: für die Wahrung der Sicherheit werden alle Telemetriedaten permanent protokolliert. Es ist allerdings mehr zu protokollieren, nachzuhalten und verarbeiten als die von Herstellern üblicher Weise bereitgestellten Daten. Um mögliche Fehler frühzeitig identifizieren zu können müssen z. B. die Informationen zu und pro Motorregler und Motor analysiert werden. Nur so und in Verbindung mit den durchgeführten Flügen kann aufgrund der Telemetriedaten erkannt werden, ob sich z. B. ein Motor ungewöhnlich verhält, oder etwa eine Wärmeentwicklung entsteht (Predictive Maintenance).

Wie die Kommunikation zwischen Leitstelle, Hangar und Flugsystem realisiert wird, ist abhängig von der vorhandenen Infrastruktur. Aus Sicherheitsgründen sollte die Anzahl der Schnittstellen auf ein Minimum reduziert werden. Unser Ansatz ist, dass im Hangar die zentrale Steuerungsanwendung installiert ist und von außen auf diese zugegriffen wird. Diese stellt zumindest sicher, dass Hangar und Flugsystem untereinander kommunizieren können, auch wenn die Leitstelle nicht mehr verbunden ist.

Nicht zuletzt ist zu erwähnen, dass auch eine automatische Ladung der Drohnenakkus notwendig ist und ein Flugsystem dies baulich zulassen muss.

Beispiele für den Einsatz Hangar-basierter Systeme sind:

- die Überwachung eines Areals durch geplante oder eventgesteuerte Befliegungen. Die stationierten Drohnen führen zeitgesteuert Flugmissionen durch. Diese Missionen können sich jeweils unterscheiden. Auch können Flüge von externen Meldern/Sensoren generiert werden.

- das regelmäßige Befliegen von z. B. Abraumgruben. Zu festgelegten Zeiten werden wiederkehrend (z. B. täglich) programmierte Flüge durchgeführt. Dabei können die Drohnen z. B. Aufnahmen machen oder LiDAR einsetzen, um die Veränderung der Abraumgruben zu dokumentieren. Nach Durchführung des Fluges können die Daten an eine zentrale Stelle zur Berechnung der Veränderung weitergeleitet werden.

Der Einsatz automatisierter Systeme ist ein BVLOS-Szenario (BVLOS – beyond visual line of sight, Flug außer Sicht). Dies bedeutet, dass für den Einsatz dieser Systeme stets eine Betriebsgenehmigung zu beantragen ist.

### 3.5 Gefesselte Drohnen (Tethering)

Gefesselte Drohnen sind Flugsysteme, welche an ein Kabel angebunden sind. Dieses Kabel versorgt die Drohne mit Strom vom Boden und ist somit nicht



Abb. 6: Gefesselte Drohne

mehr aufgrund der Akkus in der Flugdauer beschränkt. Wir setzen auch Kabel ein, welche eine Datenleitung beinhalten. Neben der permanenten Stromversorgung vom Boden können auch alle Steuerbefehle und Sensordaten über eine Netzwerkleitung übertragen werden.

Die eingesetzten Fesselungen haben eine Kabellänge bis 120 Meter, bieten eine Onboardleistung

bis 3 KW und erweitern den Einsatzbereich der Flugsysteme nunmehr auf Dauerflug für die unterschiedlichsten Einsatzgebiete.

Aufgrund des Kabels ist der Einsatzradius des UAS begrenzt und kann nicht wie ein freifliegendes System eingesetzt werden. Bei einer Kabellänge von ca. 100 Meter ist in einer Flughöhe von ca. 70 Metern ein Flugradius von ca. 70 Metern möglich (Abb. 6).

Gefesselte Systeme eignen sich sehr gut, wenn Drohnen für eine lange Zeit stationär und dauerhaft (also ohne Akkuwechsel) eingesetzt werden sollen. Als Einsatzgebiete sind beispielhaft zu nennen:

- dauerhafte Übersicht über Großschadenlagen,
- Langzeitbeobachtung für z. B. Sicherheit, Umweltmonitoring, Verkehrsanalysen,
- Inspektion kritischer Infrastruktur.

Bei dauerhaft fliegenden Systemen stellt sich schnell die Frage nach dem notwendigen Personaleinsatz für den Drohnenbetrieb. Systemmonitoring, Bewegen der Kamera, Höhenänderungen, Drehungen usw. erfordern steuernden Eingriff. Man möchte keine Person abstellen, welche das Flugsystem permanent im Auge hat und o. a. Steuerungen auf Anweisung einer Leitstelle durchführt. Somit bietet sich der Einsatz einer Anwendung (GroundControlStation) an, welche einer Leitstelle die übersichtliche und einfache Möglichkeit der Systemkontrolle und -steuerung ermöglicht. Hierzu müssen jedoch Flugsystem, Sensorik, Kamerastabilisierung auch eine externe Ansteuerung möglich machen. Die Nutzung von „offenen Systemen“, die Auswahl netzwerkfähiger Sensorik und Stabilisierungen, welche mit offenen Protokollen steuerbar sind, ermöglichen genau dies.

Kommen gefesselte Drohnen zum Einsatz, welche softwaregesteuert UND ohne Sicherheitspilot:in betrieben werden (BVLOS), ist stets eine Betriebsgenehmigung notwendig. Dies gilt auch, wenn eine Person das System manuell startet und sich nach Erreichen der Flughöhe von dem UAS entfernt.

Auch besteht die Möglichkeit, gefesselte Flugsysteme auf Fahrzeugen zu installieren (z. B. Pick-Up, siehe [Abb. 7](#)). Während sich das Fahrzeug bewegt, kann die gefesselte Drohne fliegen und automatisch dem Fahrzeug folgen. Somit bietet sich das Einsatzszenario an, eine mit einem LiDAR ausgerüstete gefesselte Drohne über sehr lange Strecken „zu fahren“ und Daten zu sammeln. Dies ist selbstverständlich auch mit freifliegenden Systemen möglich. Um jedoch lange Strecken befliegen zu können, sind insbesondere die gesetzlichen Rahmenbedingungen zum Drohneneinsatz BVLOS zu berücksichtigen. Diese erfordern die Erstellung und behördliche Genehmigung

Copting GmbH



**Abb. 7:** Gefesselte Drohne auf Fahrzeug

von Betriebsgenehmigungen inklusive Sicherheitskonzept, was recht aufwendig und stets nur für benannte/beantragte Gelände gilt.

Wird eine gefesselte Drohne auf einem Fahrzeug eingesetzt, hat die steuernde Person das Flugsystem stets im Blick, fliegt demnach nicht BVLOS, sondern VLOS.

Eine weitere interessante Anwendung gefesselter Drohnen ist deren Nutzung als Kommunikationsrelais. In Gebieten, in welchen keine Netzabdeckung besteht oder diese ausgefallen ist, kann eine gefesselte Drohne mit einem montierten Repeater die Funktion eines Funkmastes/Senders übernehmen. Über die im Kabel integrierte Netzwerkverbindung können vom Boden aus über den Repeater Daten mit Dritten ausgetauscht werden.

Gefesselte Systeme haben, bezogen auf etwaig notwendige Genehmigungen, den Vorteil, dass die bei Betriebsgenehmigungen anzugebenden Luft- und Bodenrisiken stark reduziert sind. Die Kabellänge bestimmt das Bodenrisiko, ein Luftrisiko kann ausgeschlossen werden. Das Luftrisiko beschreibt das generelle Risiko eines unbemannten Systems, durch technische Fehler oder falsche Handhabung in den Bereich der bemannten Luftfahrt zu geraten. Gleichwohl besteht auch bei gefesselten Systemen die Notwendigkeit, bei Annäherung bemannter Luftfahrzeuge (z. B. Rettungshubschrauber) zu landen.

Kombiniert man nun die gefesselten Systeme mit spezifischer Sensorik, gegebenenfalls ergänzt durch Analysesoftware, sind sehr innovative Anwendungen möglich. Präzise Messinstrumente, Stereokameras, Laser Range Finder in Verbindung mit einem mit RTK ausgerüsteten gefesselten Flugsystem, können insbesondere in großen oder schlecht zugänglichen Arealen teils zu erheblichen Effizienzen führen.

Um eine Drohne gefesselt fliegen zu können, sind einige Punkte baulich zu berücksichtigen. So muss das Flugsystem in der Lage sein, das notwendige Onboardmodul der Fesselung inklusive eines Notakkus unterbringen zu können. Dies ist bei Herstellern, welche eigene Akkumodelle nutzen, i. d. R. nicht möglich. Es gibt jedoch Drittanbieter, welche auch hierfür Lösungen anbieten. Allerdings stellt sich hierbei dann die Frage der Gewährleistung, sollte die Drohne verunfallen.

### 3.6 Gefesselte, dezentral stationierte UAS im Hangar

Der Einsatz gefesselter Drohnen, welche dezentral in einem Hangar stationiert sind, kombiniert alle bereits erwähnten Eigenschaften, Fähigkeiten und Einsatzmöglichkeiten (Abb. 8).

Solche Systeme stehen fern ab, sind über geeignete Kommunikationsstrecken an eine Leitstelle angebunden und können eventgesteuert oder geplant eingesetzt werden. Die Steuerungssoftware ist dabei im Hangar installiert und die Bediener greifen über Browser auf diese zu. Somit sind die stationierten Systeme im Betrieb von Kommunikationsstörungen entlastet, was die Einsatzbereitschaft und Sicherheit deutlich steigert. Standardsysteme verfügen i. d. R. nicht über die notwendigen Schnittstellen, Kommunikationsprotokolle und Dauerflugeigen-

schaften, um dezentral, gefesselt und hangarbasiert eingesetzt zu werden.

Eingesetzt werden solche Systeme, neben Sicherheitsanwendungen, Arealüberwachungen usw. zum Beispiel im Umweltmonitoring und zur Wildtierforschung. Eine mobile Hangarlösung einer dezentral stationierten, gefesselten Drohne ist angelehnt am Anhängerkonzept. Der Anhänger beherbergt sämtliche notwendigen Komponenten für einen dauerhaften gefesselten Flug und kann sowohl lokal oder zentral gesteuert werden.

Analog zu Abschnitt 3.4 und 3.5 gilt auch für diese Einsatzart (ohne steuernde Person vor Ort) die Notwendigkeit einer Betriebsgenehmigung.



Abb. 8: Gefesselte Drohne – Anhänger

### 3.7 Kooperative Systeme (1)

Kooperative Systeme sind, in diesem Fall, unbemannte Flugsysteme, welche gemeinsam bestimmte Missionen ableisten. Basierend auf einer Flugmission soll ein großes Areal befliegen und Geodaten gesammelt werden. Eine Person vor Ort, begleitet von Sicherheitspiloten, plant eine Gesamtmission und wählt hierzu unterschiedliche Flugsysteme aus. Entsprechend der Flugleistungen der Drohnen erstellt die Missionssoftware die passenden Flugrouten, überträgt diese auf die jeweilige Drohne und startet die Missionsausführung. Die Flugsysteme senden permanent Status und ausgeführte Aktionen. Die Missionssoftware überwacht den Verlauf pro Drohne und kann dynamisch Routenänderungen generieren und übertragen.

Routenänderungen oder -erweiterungen können dann relevant werden, wenn aufgrund von Umweltbedingungen oder technischen Gegebenheiten Drohne 1 langsamer vorankommt als Drohne 2. Dann kann die Missionssoftware dynamisch Teile der Drohne 1-Route der Mission von Drohne 2 hinzufügen (Abb. 9).

Ein weiteres Beispiel ist die Planung einer Flugmission, welche deutlich die Maximalflugdauer einer Drohne übersteigt. So kann Drohne 1 die Mission beginnen und, wenn der Akkustatus in den Grenzbereich kommt, Drohne 2 starten und die Mission weiterführen. Drohne 1 kehrt zurück, die Akkus werden



Abb. 9: Dynamische Missionserweiterung



Abb. 10: Dynamischer Wechsel UAS

getauscht und kann bereitstehen, wenn Drohne 2 den Akku-Grenzbereich erreicht (Abb. 10).

Die Anforderungen an die Drohnensysteme sind vergleichsweise gering und können auch durch Standardsysteme erbracht werden. Die einzige Anforderung besteht in der Existenz einer Steuerungssoftware, welche über die benannten Funktionsumfänge und über Möglichkeiten der missionsbasierten Steuerung der eingesetzten Drohnen verfügt.

### 3.8 Kooperative Systeme (2)

Eine innovative Einsatzmöglichkeit kooperativer Systeme ist der Einsatz eines unbemannten Fahrzeuges gemeinsam mit einem Flugsystem. Sowohl das (elektrisch betriebene) Fahrzeug als auch das Flugsystem müssen die Möglichkeit bieten, Missions-, Steuerkommandos und Telemetrie über dasselbe Protokoll austauschen zu können. Dies ist bei offenen Systemen i. d. R. der Fall, da Schnittstellen wie ROS oder MavLink in der gesamten Robotik genutzt werden. Das Fahrzeug, welches mit zahlreichen Sensoren, LiDAR, Kameras etc ausgerüstet ist, trägt eine Drohne, welche gleichfalls mit Sensoren ausgestattet ist. Über eine Missionsplanungs- und -kontrollsoftware werden pro Fahrzeugtyp Missionen definiert. So kann im ersten Schritt das Fahrzeug einem Waldweg folgen

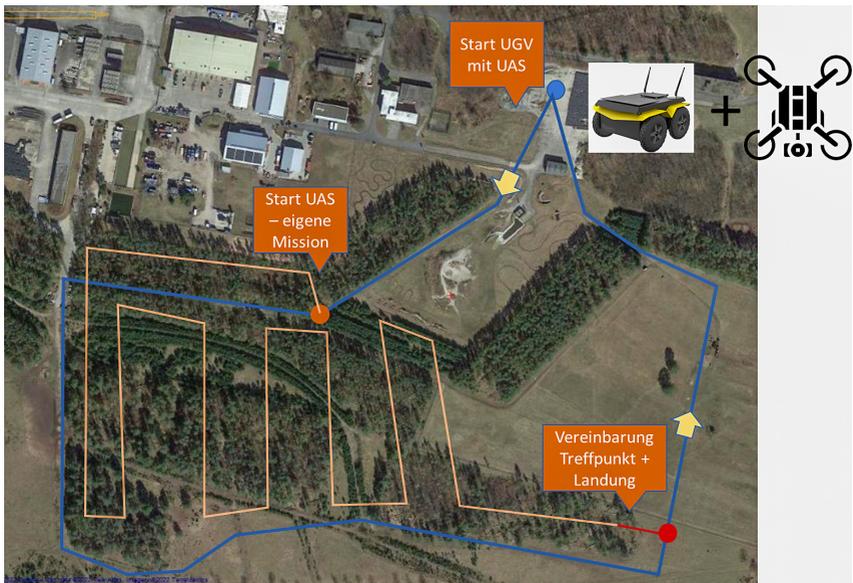


Abb. 11: Kooperative Systeme UGV und UAS

und mit den eigenen Sensoren Messungen durchführen, Aufnahmen machen, Punktwolken erstellen. Bei Erreichen einer Lichtung, wird die Mission des Flugsystems gestartet, während das Fahrzeug seine eigene Mission fortsetzt. Nach Durchführung der separaten Missionen kommunizieren das Fahrzeug und das Flugsystem untereinander zur Vereinbarung eines genauen Treffpunktes. Am Treffpunkt landet die Drohne automatisch auf dem Fahrzeug. Das Fahrzeug kann anschließend wieder zum Startpunkt zurückkehren, während die Akkus der Drohne geladen werden. Oder aber das Fahrzeug fährt weiter zum nächsten Einsatzort, an welchem wiederum pro System unterschiedliche Missionen ausgeführt werden (Abb. 11).

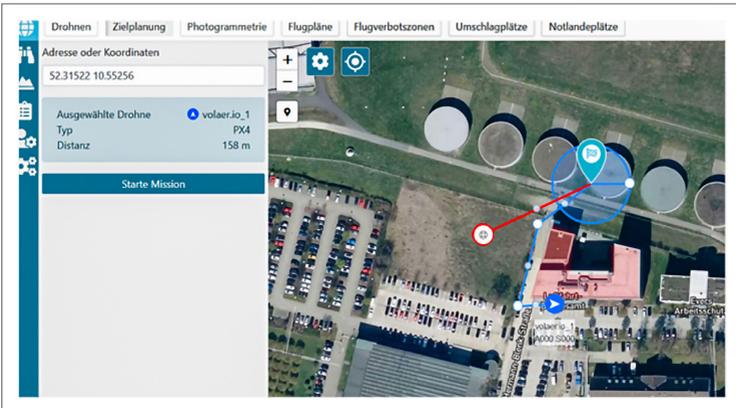
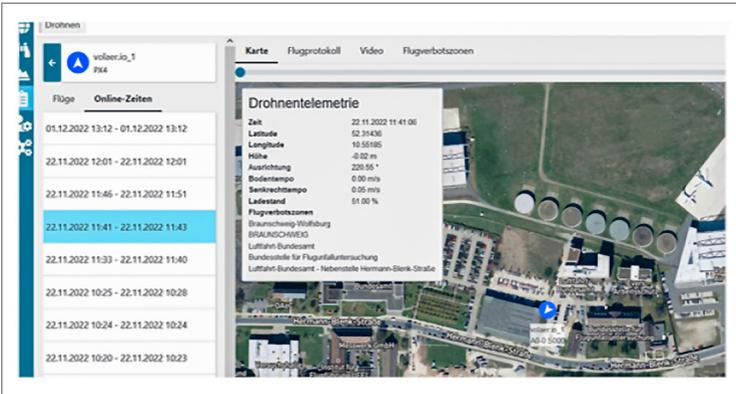
Ein elektrisch betriebenes unbemanntes Fahrzeug kann, ähnlich wie ein Rasenmäherroboter, nach Abschluss zur Garage zurückfahren und laden. Eine stabile bzw. passende Kommunikationsinfrastruktur vorausgesetzt, können so ohne weiteren Personaleinsatz viele unterschiedliche Anwendungsfälle umgesetzt werden. Einzig in einer Leitstelle sind Personen mit der Überwachung und Missionsplanung der unbemannten Systeme betraut. Die von den Systemen gewonnenen Daten werden über Kommunikationsstrecken an die Leitstelle übertragen.

### 3.9 Leitstand (1)

Ein Leitstand ist eine Anwendung, um ein oder mehrere unbemannte Systeme zu steuern, dabei kann die Anwendung am Einsatzort oder an einer entfernten Stelle sein.

Bei der mobilen Leitstelle werden die vor Ort eingesetzten unbemannten Systeme geplant, gesteuert und beobachtet. Mit der Anwendung, welche z. B. auf einem Laptop installiert ist, können alle notwendigen Missionen vor Ort geplant, übertragen, ausgeführt und kontrolliert werden (siehe auch Abb. 12). Dies sichert die zügige Umsetzung des Vorhabens, ohne unterschiedliche Drohnen und Piloten einzeln koordinieren zu müssen. Gleichzeitig besteht nicht die Notwendigkeit, Fachleute/Vermesser/Geodäten als Piloten einzusetzen. Die (Sicherheits-)Piloten werden in die auszuführende Mission instruiert, der Flugpfad beschrieben. So wissen diese, was passiert und können bei technischen Störungen eingreifen und übernehmen. Ansonsten begleiten diese im Idealfall die Befliegungen von Start bis Landung ohne weiteres Eingreifen.

Dieselbe Systematik kann auch erfolgen, wenn sich eine Leitstelle in einem Büro befindet und die Systeme inklusive Piloten an unterschiedlichen Orten eingesetzt werden. Das Prinzip der Arbeitsteilung hinsichtlich Planung und Ausführung bleibt im Grunde gleich. Allerdings haben die Piloten bei dieser Einsatzart eine größere Verantwortung während des Einsatzes, da diese sich vor



OECON Product&Services GmbH/Copting GmbH

Abb. 12: Leitstand/Drohnenmanagementsoftware

Ort befinden, die richtigen Start- und Landeplätze selbst finden müssen und die Gegebenheiten, wie Hindernisse erkennen.

### 3.10 Leitstand (2)

Die bisher umfangreichste Form der Leitstelle ist ein Leitstand, der sowohl stationierte als auch mobile Systeme koordinieren kann – dies nicht nur in Bezug auf konkrete Missionsplanungen und -ausführung, sondern vielmehr auch auf Basis der in Echtzeit übertragenen Daten. Ein Beispiel aus dem Sicherheitsbereich dazu ist, dass mehrere Drohnen gemeinsam und in unterschiedlichen Bereichen patrouillieren. Sobald die in der Leitstelle genutzte KI in einem der Livestreams etwas Auffälliges detektiert, wird diese Drohne automatisiert angesteuert, die Position zu halten und die Detektion weiter „im Auge“ zu behalten. Gleichzeitig werden die verbleibenden Systeme automatisch so umdirigiert, dass diese den Bereich der nun beobachtenden Drohne zusätzlich mit abdecken. Hierbei werden dann gleichzeitig Alarme an das Leitstellenpersonal gegeben, die sich die Bilder ansehen und über das weitere Verfahren entscheiden.

## 4 Fazit

Wenn UAS für gewerbliche Zwecke eingesetzt werden sollen, überwiegt derzeit der Ansatz, Befliegungen und Datenerhebungen entsprechend der UAS-Fähigkeiten zu planen bzw. die eigenen Arbeitsabläufe um den technischen Nutzen zu erweitern. Der regelmäßige Einsatz der UAS führt aber sehr häufig auch zur Erkenntnis, dass eigentlich auch viel mehr möglich ist/sein könnte. „Wenn man nur den Sensor X tauschen oder hinzufügen und integrieren könnte ...“.

Bei genauerer Betrachtung der bei UAS involvierten Komponenten entsteht auch recht schnell die Erkenntnis, dass herstellerbedingte Restriktionen eine Weiterentwicklung der Einsatzmöglichkeiten und der Einsatzeffizienz schnell zu Grenzen führen. Außerdem kann der Wunsch entstehen, Technik in einen effizienten Workflow zu integrieren, anstatt einen Workflow um verfügbare Technik zu gestalten.

Geht man nun über die Standardeinsatzszenarien hinaus, empfiehlt sich die Zusammenstellung eines (nicht abschließenden) Schemas:

- „Was möchte ich erreichen?“
- „Wie möchte ich es erreichen?“
- „Welche Rahmenbedingungen müssen gegeben sein?“
- „Wer und womit soll was getan werden?“

Kaiser: Innovative Konzepte unbemannter Systeme: freifliegend, fahrend, gefesselt ...

Mit den konkreteren Vorstellungen, können dann aus den Einzelkomponenten eines UAS Lösungen entstehen, welche zu wirklichen Innovationen führen.

### **Kontakt**

Dipl.-Inf. (FH), Dipl.-Europaökonom (FH) Christian Kaiser

Copting GmbH

Petzvalstraße 25, 38104 Braunschweig

[ckaiser@copting.de](mailto:ckaiser@copting.de) | [www.copting.de](http://www.copting.de)

# Session 2: Innovative Auswertung



# Hybride UAV-Systeme: Technologie und Anwendungen

Thomas Kraft | Henry Meißner | Matthias Geßner | Julius Gäde | Jörg Brauchle |  
Daniel Hein | Julia Gonschorek | Jörg Helmrich | Steven Bayer | Ralf Berger

## 1 Zusammenfassung

Das Institut für Optische Sensorsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat eine spezielle Version des *Modular Aerial Camera System* (MACS 2022) für unbemannte Fluggeräte (engl. *Unmanned Aerial Vehicle*, kurz *UAV*) entwickelt, womit überflogene Gebiete in Echtzeit kartiert werden können. In Kooperation mit dem deutschen Hersteller Quantum Systems ist eine erste Version von MACS für das hybride UAV-System *Vector* entstanden. Es handelt sich hierbei um eine sog. *Vertical Take-Off and Landing Fixed Wing* (VTOL) Drohne. Der *Vector* hat eine Flugzeit von bis zu 120 Minuten bei einer mittleren Fluggeschwindigkeit von 72 km/h. Durch den Einsatz einer speziellen Funkstrecke kann die Drohne über eine Reichweite von bis zu 15 Kilometern betrieben werden (Quantum Systems 2022). Über diese Funkstrecke kann MACS zeitgleich Nadir-Luftbilder kontinuierlich zum Boden übertragen. Mit dem vom DLR entwickelten Verfahren (Hein et al. 2018) können diese Luftbilder dann direkt als Überlagerung in einer digitalen Karte dargestellt werden. Die Visualisierung erfolgt mit einer vom DLR entwickelten Software (MACS-Box 2022). Durch die Vorwärtsbewegung der Drohne entsteht in Echtzeit ein stetig wachsendes Luftbildmosaik der überflogenen Bereiche. Dieses zeigt das aktuelle Geschehen am Boden zum Zeitpunkt des Überflugs und kann unmittelbar von einem Menschen interpretiert werden. Die Erprobung und Kommerzialisierung dieser Technologie erfolgt im Rahmen des *Helmholtz Innovation Lab OPTSAL* (HIL OPTSAL 2022). In Kooperation mit verschiedenen Endanwendern und Industriepartnern wurden MACS und *Vector* vermehrt in den Einsatz gebracht. Dieser Beitrag gibt Einblicke in die Entwicklungsarbeiten und die jüngsten Transferaktivitäten der Technologie.

## 2 Einleitung

Seit mehreren Jahrzehnten werden am DLR-Institut für Optische Sensorsysteme in Berlin hochinnovative digitale Kamerasysteme entwickelt, gebaut und

betrieben. Die *Modular Aerial Camera Systems* (MACS 2022) sind eine Evolution dieser Entwicklungslinie: eine Familie von luftgestützten Kamerasystemen mit einzigartigen technischen Fähigkeiten. Diese zeichnen sich durch einen hohen Technologie- und Anwendungsreifegrad aus. MACS ist deshalb vielfach in anspruchsvollen Missionen für Sicherheitsanwendungen im Einsatz.

Was MACS so besonders macht, ist die enorme Flexibilität – im Hinblick auf die Anwendungen und auch auf die luftgestützten Trägersysteme. Die Bandbreite der Nutzungsmöglichkeiten reicht von höchstauflösender 3D-Geodatengewinnung, über Echtzeit-Kartierung von Großschadensereignissen und Katastrophenlagen bis hin zur Vermessung klimarelevanter Umweltveränderungen. Dafür sind die Systeme unter anderem in und an wissenschaftliche Spezialflugzeuge, Helikopter, Drohnen und klassische Bildflug-, Klein-, Segel- und Ultraleichtflugzeuge integriert.

Der Schlüssel zur Anwendung ist dann die automatische Verarbeitung der aufgenommenen Daten zu nutzbaren Informationsprodukten (im Post-Processing oder in Echtzeit) sowie die nahtlose Integration in die Prozesse und Systeme der Anwender. Auf dieser technologischen Erfahrungsbasis setzt das *Helmholtz Innovation Lab OPTSAL* am DLR auf, um ausgewählte Systeme und Komponenten gemeinsam mit Unternehmenspartnern in echte Produkte und Dienste zu transferieren.

Im Bereich der behördlichen Endanwender haben sich in den letzten Jahren vermehrt unbemannte Quadrocopter mit optischen Traglasten (Payload) etabliert (BOS Drohneneinheiten Deutschland 2022). Diese Systeme sind eine ideale Ergänzung zur schnellen Aufklärung von kleinräumigen Gebieten. Zumeist wird hier das Videobild der optischen Payload von der Drohne zum Boden übertragen, um eine Einschätzung der Lage vornehmen zu können (Drohnen im Bevölkerungsschutz 2022). Der große Vorteil dieser Systeme ist das punktuelle Beobachten von Ereignissen am Boden aus der Vogelperspektive. Jedoch kommen diese Systeme an ihre Grenzen, wenn es darum geht in kurzer Zeit großräumige Bereiche ( $> 1 \text{ km}^2$ ) aufzuklären. Hier sind klassische Starrflügel- und VTOL-Drohnen aufgrund ihrer höheren Fluggeschwindigkeiten und Flugzeiten im Vorteil (Steinhoff 2021).

Zur schnellen Aufklärung und Visualisierung von größeren Schadenslagen haben sich verschiedene Softwarelösungen entwickelt, welche anhand von georeferenzierten Drohnen-Luftbildern einen Überblick erstellen können. Die Software *DroneDeploy* nutzt z. B. das übertragene Videobild von handelsüblichen Kameradrohnen und generiert im Flug ein geografisch korrektes Bildmosaik (DroneDeploy 2022) anhand von alternierenden Flugstreifen. Aufgrund der beschränkten Bandbreite der Funkstrecken (zumeist 720 p oder 1080 p) muss hier jedoch eine deutliche Verschlechterung der Bodenaufklärung in Kauf genommen werden (Kassigkeit 2021). Sehr gute Ergebnisse liefert die photogrammetrische

Verarbeitung von klassischen Nadir-Luftbildern. Dazu muss das Gebiet in alternierenden Flugstreifen mit sich überlappenden Bildaufnahmen überflogen werden. Die Verarbeitung der Aufnahmen kann erst nach der Landung der Drohne erfolgen und ist je nach Gebietsgröße, Bildanzahl und Bildgröße zeitaufwendig (PIX4D Blog 2022). Die Luftbilder müssen auf einen geeigneten Prozessier-Rechner kopiert werden und erst danach kann die Verarbeitung beginnen. Die Software *PIX4Dreact* erzeugt in kurzer Zeit sehr gute Ergebnisse (Kassigkeit 2021). Die Zeit der Prozessierung kann mit leistungsfähigen Grafikkarten optimiert werden. Trotzdem bleibt ein gewisser Zeitverzug vom Überflug der Drohne bis hin zum großräumigen Übersichtsbild.

Diese Lücke beabsichtigt das DLR zu schließen. Dazu wird seit vielen Jahren ein alternativer Ansatz des drohnenbasierten Echtzeit-Mapping (Hein et al. 2018) in Kooperation mit der Feuerwehr Duisburg (Berger et al. 2018) und der gemeinnützigen Hilfsorganisation *International Search and Rescue Germany* (ISAR 2022) entwickelt und erprobt. Es wurde zunächst die VTOL-Drohne *TRON F90+* der Quantum Systems GmbH mit einer *MACS* ausgestattet wie in Hein et al. (2019) beschrieben, um das Verfahren unter einsatzrealistischen Bedingungen erproben zu können (Feuerwehr Duisburg 2020). Der *TRON F90+* war ein idealer Erprobungsträger und die Erkenntnisse mündeten in der Entwicklung einer angepassten Version von *MACS* für den *Vector & Scorpion*.

### 3 VTOL-Drohne und MACS

Als Trägersystem von *MACS* kommt die VTOL-Drohne *Vector* der Quantum Systems GmbH zum Einsatz. Es handelt sich hierbei um ein unbemanntes Flächenflugzeug, welches vertikal starten und landen kann. Der *Vector* hat eine Spannweite von 2,8 m und kann bis zu zwei Stunden in der Luft betrieben werden. Die mittlere Fluggeschwindigkeit liegt bei 72 km/h und eine spezielle Funkstrecke ermöglicht Reichweiten von bis zu 15 km (Quantum Systems 2022). Die Payloadkapazität liegt bei 700 g. Der Flug kann manuell oder anhand von vorgegebenen Flugpfaden durchgeführt werden. Mit einer speziellen Erweiterung kann die Drohne auch in der Konfiguration *Scorpion* als sog. Tricopter betrieben werden (Quantum Systems 2022). Es handelt sich somit um ein sog. 2-in-1-System und je nach Umgebung oder Einsatzziel kann die passende Flugkonfiguration gewählt werden. In Kooperation mit dem Drohnenhersteller wurde eine spezielle Version von *MACS* entwickelt, womit eine Kartierung in Echtzeit möglich wird. Dazu wurden alle Komponenten des Kamerasystems auf die besonderen Anforderungen der beiden Trägersysteme ([Abb. 1](#)) angepasst.

Die aktuelle Version von *MACS* besteht aus einer hochauflösenden Nadir-Kamera und einem Embedded CPU Stack. Als Kameramodul kommt ein



Abb. 1: Unbemannte Fluggeräte mit integriertem MACS-Kamerasystem in der Flugkonfiguration Vector (links) und Scorpion (rechts)

CMOS-Vollformatsensor (AMS CMV50000 mit 47,5 MPx und RGB Bayer-Pattern) in Kombination mit einem 40 mm-Objektiv von *Schneider-Kreuznach* zum Einsatz. Durch die Verwendung von Industriekamera, Industrieobjektiv und Objektivadapter mit Industriegewinde (M58), können Kamera und Objektiv, sowie Fokus und Blende mechanisch fixiert werden. Dadurch wird eine stabile innere Orientierung des Kamerasystems erreicht (Kraft et al. 2016).

Blende und Fokus wurden so gewählt, dass eine scharfe Abbildung ab einer Entfernung von 35 m gegeben ist. Der diagonale Öffnungswinkel der Kamera beträgt 60°. Bei einer Flughöhe von 100 m über Grund ergibt sich eine nominelle Auflösung von 1,2 cm pro Pixel und eine Schwadbreite (quer zur Flugrichtung) von 90 m.

Die geometrische Kalibrierung des Kamerasystems erfolgte wie in Kraft et al. 2016 beschrieben. Damit sind die Parameter der inneren Orientierung wie Bildhauptpunkt ( $x_H$ ,  $y_H$ ), Kammerkonstante ( $c_k$ ), radial-symmetrische Verzeichnung ( $k_1$ ,  $k_2$ ) und tangentielle Verzeichnung ( $p_1$ ,  $p_2$ ) bestimmt. Die Bestimmung der äußeren Orientierung erfolgt mittels GNSS-Empfänger und inertialem Messsystem (engl. *Inertial Measurement Unit*, kurz IMU) der VTOL-Drohne.

Der Embedded CPU Stack von MACS basiert auf dem *COM Express Mini Type 10* Standard und verfügt über einen leistungsstarken Prozessor (*Intel i7-1185G7E*) für den Bildeinzug und die Weiterverarbeitung der Luftbilddaufnahmen.

Jedem Nadir-Luftbild wird zum Zeitpunkt der Aufnahme die GNSS-Zeit, die geografische Position (Latitude, Longitude, Height) und die Fluglage (Roll,

Quelle: DLR und Quantum Systems



Abb. 2: CAD-Modell (links) und Aufbau (rechts) des MACS-Kamerasystems für Vector und Scorpion

Pitch, Yaw) der VTOL-Drohne in Bezug zur Erdoberfläche zugeordnet (äußere Orientierung). Danach wird das Bild im RAW-Format (16 bit) mit den oben genannten Informationen auf einer wechselbaren Speicherkarte gespeichert (z. B. SanDisk Extreme Pro CFexpress Card mit 512 GB Speicher).

Gleichzeitig wird eine projektive Repräsentation des Luftbildes auf ein bekanntes Höhenmodell (z. B. SRTM30) berechnet wie in Hein et al. (2018) beschrieben. Diese Repräsentation wird komprimiert (z. B. 16-bit JPEG-2000) und als georeferenziertes Polygon zum Boden übertragen. Die aktuelle Version von MACS ist in der Lage drei Bilder pro Sekunde zu speichern und zu verarbeiten.

Die Funkstrecke der VTOL-Drohne ist so konfiguriert, dass darüber priorisiert die Steuerung der Drohne selbst erfolgt. Gleichzeitig kann MACS Bildinformationen zum Boden übertragen. Die im *Vector* verbaute Funkstrecke kommt vom Anbieter *Silvus Technologies* (Streamcaster Radios 2022). Es handelt sich hierbei um IP-basierte Funkgeräte (Broadcast Solutions 2022). Die Bildübertragung von MACS konnte im S-Band (gemäß IEEE) unter realen Bedingungen bis zu einer Reichweite von 6 km nachgewiesen werden. Laut Hersteller sind 15 km angegeben, dies konnte jedoch noch nicht unter realen Einsatzbedingungen getestet werden.

## 4 Visualisierung des Luftbildmosaiks am Boden

Trotz der stark vereinfachten Projektion der Luftbilder auf das Höhenmodell (SRTM30), welches auf der Interpolation zwischen den vier Eckpunkten der jeweiligen georeferenzierten Polygone basiert, bietet das resultierende Bildmosaik in schwach strukturiertem Gelände eine hohe Lagegenauigkeit (siehe [Abb. 3](#)).

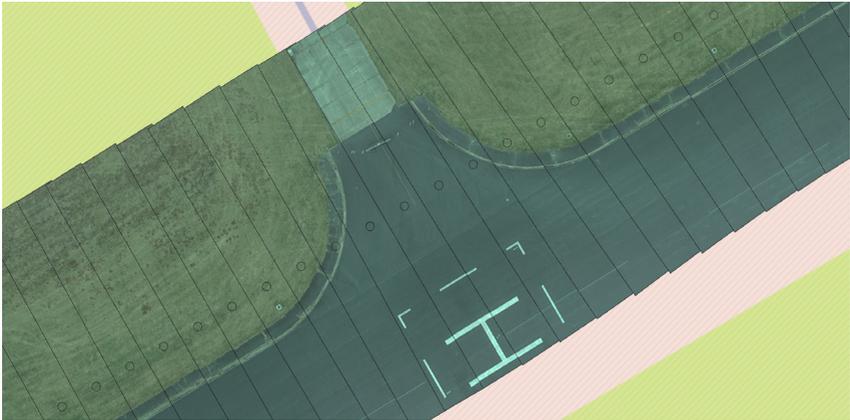


Abb. 3: Visualisierung eines Flugstreifens mit Bildaufnahme-position (Kreis) und Bildmosai-ken (Polygone) von MACS im Vector

Die verbleibenden Projektionsfehler und die Gesamtqualität des Luftbildmo-saiks werden vor allem durch die folgenden vier Punkte bestimmt:

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

Alle diese Punkte haben Einfluss auf die Lagegenauigkeit der projizierten Bilder und können Abschattungen oder visuelle Brüche zwischen den benachbarten Luftbildern im Bildmosaik verursachen (Abb. 3).

Die Visualisierung der georeferenzierten Polygone erfolgt mit der Software *MACS RT-Viewer* (MACS-Box 2022). Durch die kontinuierliche Bildaufnahme von *MACS* und die Vorwärtsbewegung der Drohne entsteht ein stetig wachsendes Bildmosaik der überflogenen Bereiche. Mit einem IP-basierten Mobil-funkgerät vom Typ *Silvus SC4200EP* können die Polygone mit jedem Notebook empfangen werden (siehe Abb. 4). Dazu muss lediglich die IP-Adresse von *MACS* im Funknetzwerk bekannt sein. Somit kann die Echtzeit-Kartierung auch an verschiedenen Orten empfangen und durch unterschiedliche Bedarfsträger angeschaut werden. Mit dem *MACS RT-Viewer* kann beliebig durch das Bild-mosaik navigiert werden. Bei Bedarf können zeitliche Teilbereiche oder auch



Quelle: DLR

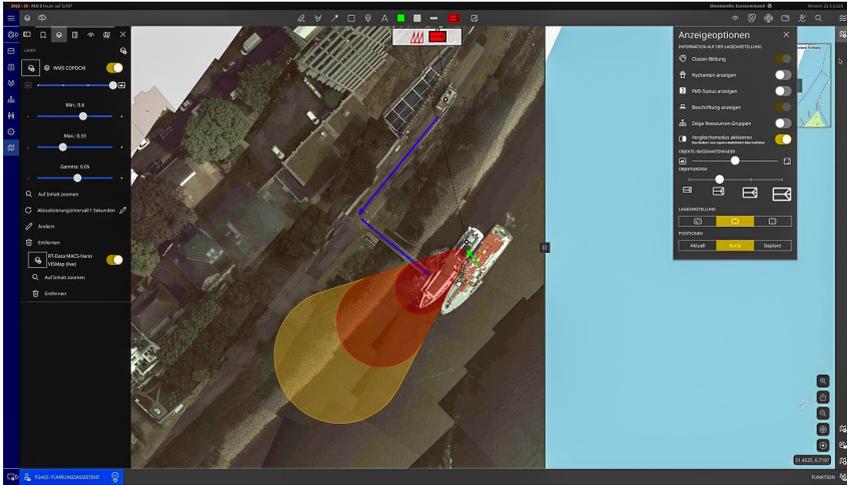
Abb. 4: VTOL-Drohne Vector mit MACS-Payload (links) und Notebook mit IP-Funkgerät (rechts) zur Visualisierung des Luftbildmosaik

das gesamte Bildmosaik exportiert werden (z. B. als GeoTiff oder als KMZ). Die Funkstrecke ermöglicht ebenfalls eine verschlüsselte Datenübertragung (z. B. DES-56 oder AES-256).

## 5 Technologieerprobung und Ergebnisse

Die Entwicklung und Erprobung von MACS in Kombination mit VTOL-Trägersystemen erfolgt seit vielen Jahren zusammen mit der Feuerwehr Duisburg und der gemeinnützigen Hilfsorganisation ISAR Germany. Beide Organisationen haben Bedarf an der schnellen Aufklärung von großräumigen Schadenslagen.

Die Vision der Feuerwehr Duisburg ist es, Lagebilder von Einsatzstellen den Rettungskräften zur Verfügung zu stellen, noch bevor diese am Einsatzort ankommen (Feuerwehr Duisburg 2022). Die Feuerwehr hat regelmäßig spezielle Einsatzlagen, in denen eine großräumige Aufklärung aus der Luft einen entscheidenden Vorteil bringen würde. Dies sind z. B. Personen im Rhein, Schiffshavarien und Industrieunfälle. Durch die trockenen Sommer der letzten Jahre rückt auch die Aufklärung von Waldbränden mehr und mehr in den Fokus. Die gemeinsame Entwicklung und Erprobung erfolgt im Rahmen des Projektes *Live-Lage* (Live-Lage 2022) und des Helmholtz Innovation Lab *OPTSAL*. Die Feuerwehr Duisburg ist die erste in Deutschland, die regelmäßig eine VTOL-Drohne betreibt. In unterschiedlichen Übungsszenarien konnten VTOL-Drohne und MACS einsatzrealistisch erprobt und stetig weiterentwickelt werden (DLR 2022a, CP 2021, Bundesregierung 2020, DLR 2018). Im Mai 2022 konnten erstmals Luftbilder vom *Vector* der Feuerwehr aus in das eigene Einsatzführungssystem übertragen werden (Stadt Duisburg 2022). Es handelt sich hierbei um die Einsatzführungssoftware *CommandX* der Eurocommand GmbH (EC 2022). Im Ergebnis konnte mit der Übung gezeigt werden, dass das Verfahren der



Quelle: DLR und Eurocommand

Abb. 5: Luftbildmosaik von MACS im Einsatzführungssystem der Feuerwehr Duisburg mit havariertem Schiff, Löschbot und Einsatzfahrzeug

Echtzeit-Kartierung technisch funktioniert. An verschiedenen Stellen konnte das Luftbildmosaik empfangen werden und anrückende Einsatzkräfte konnten die Lage vor dem Eintreffen an der Einsatzstelle beurteilen. Anhand der Aufnahmen wurden Personen im Wasser erkannt und die Rauchausbreitung eines havarierten Schiffes bestimmt (siehe Abb. 5).

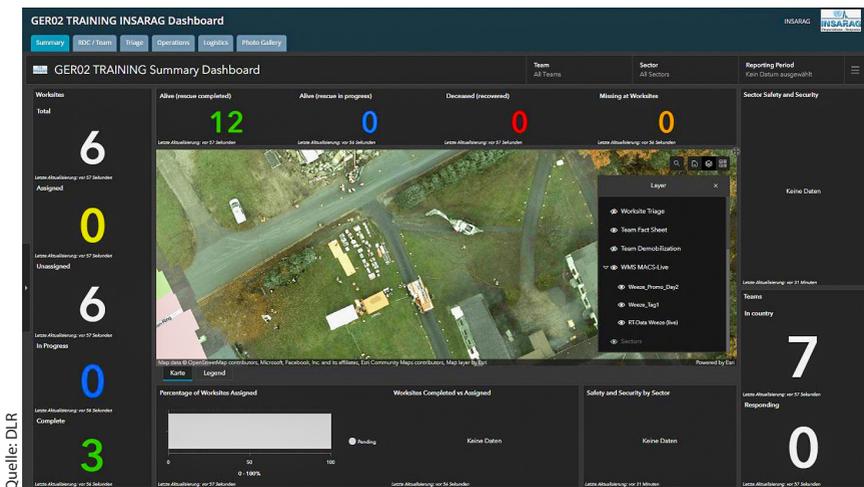


Quelle: DLR

Abb. 6: Unterstützung der Berliner Feuerwehr mit MACS und Vector im August 2022 nach den Explosionen auf dem Sprenggelände im Berliner Grunewald

Im August 2022 konnten *MACS* und *Vector* bei einem realen Einsatz der Berliner Feuerwehr unterstützen (siehe Abb. 6). Am 4. August ereigneten sich mehrere Explosionen auf dem Sprenggelände im Berliner Grunewald. Dabei wurden dort lagernde illegale Feuerwerkskörper, Bomben-Blindgänger und Granaten im anliegenden Waldgebiet großräumig verteilt (Berlin 2022). Am 9. August konnte das Sperrgebiet vollständig mit *MACS* und *Vector* dokumentiert werden. Es wurden 140 ha mit einer Bodenauflösung von 1,5 cm pro Pixel kartiert (DLR 2022b). Die Luftbilder konnten in Echtzeit übertragen werden und darüber hinaus ist das vollständige Bildmosaik direkt nach dem Flug in das Einsatzführungssystem der Berliner Feuerwehr eingespielt worden. Somit war eine Lagebeurteilung durch verschiedene Einsatzkräfte und Einsatzstellen möglich, was die allgemeine Einschätzung der Lage maßgeblich unterstützte.

Ein weiterer Anwendungsfall ist die Einsatzunterstützung von *ISAR Germany* bei internationalen Hilfsmissionen nach verheerenden Naturkatastrophen. Mitarbeitende des DLR sind Teil des Voraus- und Hauptteams von *ISAR Germany*, um den Einsatz von *MACS* und *Vector* im Katastrophengebiet zu ermöglichen (ISAR 2022). Mit der Fähigkeit des drohnenbasierten Live-Mapping können sich die Einsatzkräfte vor Ort schnell einen Überblick über das Katastrophen- und Einsatzgebiet verschaffen. Bei einer Großübung im November 2022 konnte erstmalig eine erfolgreiche Übertragung des Luftbildmosaiks über das Satellitennetzwerk *Starlink* des US-Raumfahrtunternehmens SpaceX gezeigt werden (DLR 2022c) (siehe Abb. 7). Mit dieser Fähigkeit können die Ergebnisse standortunabhängig, unmittelbar und weltweit mit Einsatzstäben und



Quelle: DLR

Abb. 7: Luftbildmosaik der ISAR-Übung im ICMS der Vereinten Nationen. Aufgenommen mit *MACS* und *Scorpion* im November 2022.

Informationsplattformen geteilt werden – auch bei vor Ort zerstörter Telekommunikationsinfrastruktur.

Ein weiteres Ziel der Kooperation ist die Einbindung der Luftbildmosaike in die zentrale Informationsplattform der Vereinten Nationen, dem *INSARAG Coordination Management System (ICMS)*. Dieser entscheidende Schritt konnte während der Übung erstmalig demonstriert werden. Somit werden ab sofort die Luftbildmosaike im Einsatzfall automatisch an alle im Land beteiligten *Urban Search and Rescue (USAR) Teams*, deren Lagestäbe in den Heimatländern und dem zentralen Krisenstab der Vereinten Nationen verteilt und können dazu beitragen, einsatzrelevante Entscheidungsprozesse zu unterstützen. Damit leistet das DLR einen wichtigen Beitrag zur effektiven Nutzung seiner Technologien bei internationalen Hilfseinsätzen.

## 6 Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass mit dem beschriebenen Kamerasystem *MACS* und der VTOL-Drohne *Vector* in Echtzeit aktuelle Luftbildmosaike von betroffenen Regionen erstellt werden können. Der Einsatz des *Vector* hat sich als ideales Trägersystem herausgestellt, da keine Start- und Landebahn erforderlich ist. Durch die spezielle Funkstrecke können *MACS* und *Vector* ohne komplizierte Infrastruktur schnell und bedarfsgerecht eingesetzt werden. Aufgrund der langen Flugzeit, schnellen Fluggeschwindigkeit und großen Reichweite des *Vector*, werden große Gebiete innerhalb kurzer Zeit aufgeklärt. *MACS* liefert zuverlässig hochauflösende und scharfe Luftbilder und diese können am Boden in Echtzeit auf einem mobilen Endgerät visualisiert werden. Die resultierenden Luftbildmosaike können exportiert und in andere Geoinformationssysteme (GIS) importiert werden. Somit stehen diese Ergebnisse anderen Beteiligten jederzeit zur Verfügung.

Die Erprobung von *MACS* und *Vector* unter realen Einsatzbedingungen hat gezeigt, welches Potenzial in der prototypischen Lösung steckt und wie das Konzept die Erkundung und Rettungskette an verschiedenen Stellen verbessern kann. Die geografisch korrekte Darstellung der Aufnahmen als Luftbildmosaik, als Überlagerung in einer digitalen Karte, verbessert die Einschätzung der Lage maßgeblich. Der aktuelle Zustand am Boden kann gezielt analysiert werden und in Verbindung mit vorhanden Informationen ein Vorher-Nachher-Vergleich erfolgen. Es können Schäden an Gebäuden, Verkehrswegen und kritischen Infrastrukturen nach Unfällen oder Naturkatastrophen entdeckt werden. Anomalien wie z. B. Rauch, Erdbeben oder Überschwemmungen können ebenfalls einfach identifiziert werden. Unter gewissen Voraussetzungen können auch Personen erkannt werden. Die Fähigkeit zum Export und Verteilen der

Luftbildmosaike kann die Koordination der Hilfsmaßnahmen deutlich verbessern. Die resultierenden Karten können ebenfalls für die Navigation verwendet werden, um z. B. die Orientierung von Ersthelfern im Katastrophen- oder Schadensgebiet zu unterstützen.

Die Stärke der hier vorgestellten Lösung ist die schnelle Visualisierung der Luftbilder im zeitlichen und geografischen Kontext. Der *Vector* ermöglicht das Überfliegen großer Gebiete und die verbaute Funkstrecke ermöglicht die nachgewiesene Bildübertragung im Flug von bis zu 6 km. Laut Hersteller sind 15 km angegeben, dies konnte jedoch noch nicht unter realen Einsatzbedingungen getestet werden. Mit den resultierenden Luftbildmosaikern lässt sich das Ausmaß der Zerstörung der überflogenen Bereiche direkt bewerten.

Da die Visualisierung maßgeblich von der Äußeren Orientierung und dem zugrunde liegenden Höhenmodell abhängig ist, können visuelle Brüche oder Abschattungen entstehen, welche die Interpretation der Lage erschweren. Dies ist z. B. bei starkem Relief, bei überhöhten Objekten oder bei schlechter Genauigkeit der Positions- und Lagebestimmung der Drohne der Fall. Dies überträgt sich dann direkt auf das Ergebnis der Visualisierung.

Das Konzept wird mit den beteiligten Projektpartnern stetig weiterentwickelt. So soll z. B. die Integration einer Thermalkamera erfolgen, um Einsätze in der Nacht zu ermöglichen. Es wird ebenfalls die Option zur Aufnahme von Schrägluftbildern geprüft, da damit z. B. der Zerstörungsgrad von Gebäuden besser beurteilt werden kann (Vetrivel et al. 2016, Duarte et al. 2017). Im Rahmen von *OPTSAL* wird der Technologietransfer begleitet, sodass in der Zukunft aus der aktuellen Lösung auch ein Service oder ein Produkt werden kann.

## Literatur

- Berger, R., Bayer, S., Helmrich, J., Kraft, T. (2018): Entwicklung und Erprobung eines neuartigen Konzeptes zur schnellen Aufklärung von Einsatzlagen – Eine Kooperation zwischen der Feuerwehr Duisburg und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Jahresfachtagung der Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V., 28.–30. Mai 2018, Duisburg. DOI: <https://elib.dlr.de/120806/>.
- Berlin (2022): Feuer nach Explosion im Grunewald. [www.berlin.de/aktuelles/7672047-958090-feuer-grunewald-explosion-verkehrseinsch.html](http://www.berlin.de/aktuelles/7672047-958090-feuer-grunewald-explosion-verkehrseinsch.html), letzter Zugriff 12/2022.
- BOS Drohneneinheiten Deutschland (2022): <https://drohneneinheit.de/einheiten/>, letzter Zugriff 12/2022.
- BroadcastSolutions(2022):<https://broadcast-solutions.de/de/behoerdenkommunikation/produkte-loesungen/silvus-technologies/>, letzter Zugriff 12/2022.
- Bundesregierung (2020): Drohne dirigiert Rettungskräfte in Echtzeit. [www.bundesregierung.de/breg-de/service/archiv/sicherheitsforschung-live-lage-1806820](http://www.bundesregierung.de/breg-de/service/archiv/sicherheitsforschung-live-lage-1806820), letzter Zugriff 12/2022.

- CP (2021): Crisis Prevention Magazin 04/2021, Mit Hightech aus Deutschland vor der Lage. [www.flipsnack.com/betapublishing/cp\\_4-2021\\_inhalt-mit-umschlag/full-view.html](http://www.flipsnack.com/betapublishing/cp_4-2021_inhalt-mit-umschlag/full-view.html), letzter Zugriff 12/2022.
- DLR (2018): DLR-Forschung hilft in Katastrophenfällen. [www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/2/20180530\\_dlr-forschung-hilft-in-katastrophenfaellen\\_27975.html](http://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2018/2/20180530_dlr-forschung-hilft-in-katastrophenfaellen_27975.html), letzter Zugriff 12/2022.
- DLR (2022a): DLR und Feuerwehr erproben Lageaufklärung in Echtzeit. [www.dlr.de/content/de/artikel/news/2022/02/20220610\\_dlr-und-feuerwehr-erproben-lageaufklaerung-in-echtzeit.html](http://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2022/02/20220610_dlr-und-feuerwehr-erproben-lageaufklaerung-in-echtzeit.html), letzter Zugriff 12/2022.
- DLR (2022b): Präzise Luftbilddaten in Echtzeit für die Lagebeurteilung. [www.dlr.de/content/de/artikel/news/2022/03/20220812\\_praezise-luftbilddaten-in-echtzeit-fuer-die-lagebeurteilung.html](http://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2022/03/20220812_praezise-luftbilddaten-in-echtzeit-fuer-die-lagebeurteilung.html), letzter Zugriff 12/2022.
- DLR (2022c): Mit Luftbildkarten weltweit helfen. [www.dlr.de/content/de/artikel/news/2022/04/20221205\\_mit-luftbildkarten-weltweit-helfen.html](http://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2022/04/20221205_mit-luftbildkarten-weltweit-helfen.html), letzter Zugriff 12/2022.
- Drohnen im Bevölkerungsschutz (2022): Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), Ergebnisbericht zur Online-Befragung 2021. [www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/Krisenmanagement/ergebnisbericht-online-befragung-2021-drohnen.pdf](http://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/Krisenmanagement/ergebnisbericht-online-befragung-2021-drohnen.pdf), letzter Zugriff 12/2022.
- DroneDeploy (2022): [www.dronedeploy.com/product/live-map/](http://www.dronedeploy.com/product/live-map/), letzter Zugriff 12/2022.
- Duarte, D., Nex, F., Kerle, N., Vosselman, G. (2017): Towards a more efficient detection of earthquake induced façade damages using oblique UAV imagery. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W6, 93–100. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-93-2017](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-93-2017).
- EC (2022): Website der Eurocommand GmbH. [www.eurocommand.com](http://www.eurocommand.com), letzter Zugriff 12/2022.
- Feuerwehr Duisburg (2022): Das Forschungsprojekt Live-Lage. [www.duisburg.de/microsites/feuerwehr/feuerwehr/seh/livelage.php](http://www.duisburg.de/microsites/feuerwehr/feuerwehr/seh/livelage.php), letzter Zugriff 12/2022.
- Hein, D., Berger, R. (2018): Terrain Aware Image Clipping for Real-Time Aerial Mapping. In: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV (1), 61–68. Copernicus Publications. ISPRS TC I Midterm Symposium – Innovative Sensing – From Sensors to Methods and Applications, 9. Okt. – 12. Okt. 2018, Karlsruhe, Deutschland. ISSN 2194-9042. DOI: [10.5194/isprs-annals-IV-1-61-2018](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-1-61-2018).
- Hein, D., Kraft, T., Brauchle, J., Berger, R. (2019): Integrated UAV-Based Real-Time Mapping for Security Applications. ISPRS International Journal of Geo-Information, 8 (5), 1–16. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). DOI: [10.3390/ijgi8050219](https://doi.org/10.3390/ijgi8050219).
- HIL OPTSAL (2022): Helmholtz Innovation Lab OPTSAL (Optical Technologies for Situational Awareness). [www.optsal.de](http://www.optsal.de), letzter Zugriff 12/2022.
- ISAR (2016): DLR und I.S.A.R. – Gemeinsam für die schnelle Rettung. [www.dlr.de/content/de/artikel/news/2016/20161118\\_dlr-und-i-s-a-r-gemeinsam-fuer-die-schnelle-rettung\\_20120.html](http://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2016/20161118_dlr-und-i-s-a-r-gemeinsam-fuer-die-schnelle-rettung_20120.html), letzter Zugriff 12/2022.
- ISAR (2022): DLR und ISAR Germany verlängern Kooperationsvereinbarung. [www.dlr.de/content/de/artikel/news/2022/02/20220518\\_technologien-fuer-das-krisen-und-katastrophenmanagement.html](http://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2022/02/20220518_technologien-fuer-das-krisen-und-katastrophenmanagement.html), letzter Zugriff 12/2022.

- Kassigkeit, J. (2021): Vergleich von Verfahren zur Aufklärung zeitkritischer Einsatzlagen der Feuerwehr mithilfe georeferenzierter Drohnen-Luftbilder. Bachelorarbeit, Beuth University of Applied Sciences. DOI: <https://elib.dlr.de/143802/>.
- Kraft, T., Geßner, M., Meißner, H., Cramer, M., Gerke, M., Przybilla, H. J. (2016): Evaluation of a metric camera system tailored for high precision UAV applications. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B1, 901–907. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLI-B1-901-2016](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B1-901-2016).
- Live-Lage (2022): DLR Projekt Live-Lage. [www.dlr.de/os/desktopdefault.aspx/tabid-12893/22517\\_read-52089/](http://www.dlr.de/os/desktopdefault.aspx/tabid-12893/22517_read-52089/), letzter Zugriff 12/2022.
- MACS (2022): Website des Modular Aerial Camera System (MACS) vom DLR. [www.dlr.de/macs](http://www.dlr.de/macs), letzter Zugriff 12/2022.
- MACS-Box (2022): Software Suite für das vom DLR entwickelte Modular Aerial Camera System (MACS). <https://macs.dlr.de/box>, letzter Zugriff 12/2022.
- PIX4D Blog (2022): Helping to protect the rainforest in Peru with drone mapping. [www.pix4d.com/blog/aerial-drone-mapping-amazon-rainforest](http://www.pix4d.com/blog/aerial-drone-mapping-amazon-rainforest), letzter Zugriff 12/2022.
- Quantum Systems (2022): Offizielle Website der Quantum Systems GmbH. [www.quantum-systems.com](http://www.quantum-systems.com), letzter Zugriff 12/2022.
- Stadt Duisburg (2022): Live-Lage Übung der Feuerwehr Duisburg am Binnenhafen. <https://youtu.be/7TfyeklolVc>, letzter Zugriff 12/2022.
- Steinhoff, C. (2021): Einsatz von Drohnen für den Medikamententransport und das Rettungswesen. Unfallchirurg 124, 965–973 (2021). DOI: [10.1007/s00113-021-01098-0](https://doi.org/10.1007/s00113-021-01098-0).
- Streamcaster Radios (2022): Offizielle Website von Silvus Technologies. <https://silvus-technologies.com/products/streamcaster-radios/>, letzter Zugriff 12/2022.
- Vetrivel, A., Duarte, D., Nex, F., Gerke, M., Kerle, N., Vosselman, G. (2016): Potential of multi-temporal oblique airborne imagery for structural damage assessment. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume III-3, 355–362. DOI: [10.5194/isprs-annals-III-3-355-2016](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-III-3-355-2016).

## Kontakt

Thomas Kraft

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Institut für Optische Sensorsysteme | Sicherheitsforschung & Anwendungen

Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin

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



# UAV-Einsatz in der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung

Jakob Unger

## 1 Einleitung

Die Photogrammetrie wird bereits seit Jahrzehnten als Messverfahren in der Landesvermessung eingesetzt und photogrammetrisch gewonnene Produkte sind neben der terrestrischen Vermessung ein Baustein für die Arbeit der Vermessungs- und Katasterverwaltungen (VKV); hinzu kommen Airborne Laserscanning (ALS) und Satellitenfernerkundung. Unbemannte Luftfahrzeuge (UAV)<sup>1</sup> schließen nun eine Lücke zwischen terrestrischer und bemannter flugzeuggestützter Datenerfassung. Als flexible luftgestützte Erfassungsmethode liefern UAV-Photogrammetrie und -Laserscanning aktuelle und hochauflösende Daten für eher kleinräumige Anwendungen. Einen Überblick über den Stand der Technik, Best-Practices sowie aktuelle, auch interdisziplinäre Trends der UAV-gestützten Vermessung geben Nex et al. (2022).

Untersuchungen zur Nutzung von UAV im Liegenschaftskataster finden sich bei Manyoky et al. (2011), die für die Anwendung im Kataster der Schweiz die UAV-Photogrammetrie klassischer Tachymetrie und GNSS anhand eines Beispielprojekts gegenüberstellen. Neben der Eignung des Verfahrens gemäß der Katastervorgaben sehen die Autoren Mehrwerte in der 3D-Modellierung der Gebäude inklusive Textur.

Stöcker et al. (2020) untersuchen anhand von sechs UAV-Befliegungen in Europa und Afrika den Einfluss der Landbedeckung, die Verteilung von Passpunkten und verschiedener Flugkonfigurationen auf die Katastervermessung aus Orthophotos<sup>2</sup> und leiten daraus Empfehlungen ab.

Rembold (2020) untersucht die UAV-gestützte Koordinierung von Gebäudepunkten und die Bestimmung von Sollkoordinaten für die Straßenschlussvermessung aus Orthophotos. Er schließt auf eine umfangreiche Einsetzbarkeit von UAV für Anwendungen des Liegenschaftskatasters, insbesondere dann,

---

1 Wenn das Gesamtsystem gemeint ist, wird auch von unbemannten Luftfahrzeugsystemen (UAS) gesprochen. Weitere Begriffe sind die ursprünglich militärisch geprägte Bezeichnung „Drohne“ sowie Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) und bei Unterscheidung der Bauweisen auch Multi-Kopter bzw. Flächen-/Starrflügler.

2 Unter dem Begriff wird in diesem Beitrag immer ein auf dichter Bildzuordnung basierendes True Orthophoto verstanden, das auch als TrueDOP (Digitales Orthophoto) bezeichnet wird.

wenn viele Punkte zu bestimmen sind, wie in Neubaugebieten oder zur Katastererneuerung. Rembold (2022) beschreibt außerdem die photogrammetrische Bestimmung von Gebäudepunkten per UAV zur Neuberechnung des Katasterzahlenwerks sowie die Dokumentation der Arbeitsschritte und Ergebnisse, die lediglich aufgrund einer Unterschriftserfordernis eines Ausdrucks bedarf. Rembold sieht verschiedene, noch zu untersuchende Möglichkeiten, photogrammetrische Punktmessungen und geometrische Homogenisierungsbedingungen zu kombinieren. Diese Erkenntnisse fließen auch in die Arbeit des LGLN ein, die im Folgenden beschrieben wird.

## 2 VKV2025-Projektgruppe „Drohne“

Wie von Kuhnt und Schlösser (2020) berichtet, untersucht das Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) seit 2018 im Rahmen des „Fachlichen Zukunftskonzepts VKV 2025“ (Rausch 2017) in einer Projektgruppe das Thema „Drohne“.

### 2.1 Überblick

Die Aktivitäten begannen in 2018 mit einer ersten Projektgruppe „Drohne“, die primär mit konzeptionellen Arbeiten beauftragt war und im Februar 2020 einen Abschlussbericht vorlegte, der eine weitere Befassung mit dem Thema vorschlug (siehe auch Kuhnt und Schlösser 2020).

Im Juli 2020 startete dann die Projektgruppe „Drohne II“ mit einem Kernteam zur Leitung und Koordination der Aktivitäten, einem Pool an Fernpilotinnen und Fernpiloten sowie einem Auswerteteam. Das Ziel war unter anderem die Durchführung und Analyse konkreter Pilotprojekte zu verschiedenen potenziellen Einsatzbereichen von UAV im LGLN, zu denen im November 2021 in einem Abschlussbericht Stellung genommen wurde. Seitdem befindet sich die Projektgruppe in einer Übergangphase zwischen Projekt- und Regelbetrieb.

### 2.2 Pilotprojekte

Über 25 Pilotprojekte wurden durch die Projektgruppe geplant, befliegen und ausgewertet. Dabei variierte die geforderte Lagegenauigkeit absolut von Dezimeter bis < 4 cm und relativ bis zu 1 cm. Höhengengenauigkeiten spielten für viele Projekte eine untergeordnete Rolle, es waren aber auch bis zu 2 cm (absolut)

nachgefragt. Die Größen beflugener Gebiete lagen meist unter 1 km<sup>2</sup>, aber auch bis 7,4 km Länge (Straßenneubau, langgestreckte Anlage) bzw. 8 km<sup>2</sup> Ausdehnung für eine Flurbereinigung (Verfahren zur Neuordnung ländlichen Grundbesitzes; als Regelbetrieb zuletzt auch Gebiete bis 31 km<sup>2</sup>, siehe Kap. 4).

### 2.2.1 Pilotierte Einsatzbereiche

Pilotprojekte umfassten den UAV-Einsatz ...

- für Gebäudeeinemessungen zum Nachweis im Liegenschaftskataster
- zur Festlegung neuer Flurstücksgrenzen
- zur Erhebung von Deichen und anderer Bestandteile des Reliefs
- für amtliche Grenzauskünfte (z. B. Dokumentation eines Straßenausbaus)
- für Lagepläne und Planunterlagen (z. B. auch Dachformen)
- für die Aktualisierung der tatsächlichen Nutzung (TN)
- für den Wege- und Gewässerplan in Flurbereinigungsverfahren
- für die Qualitätsverbesserung im Liegenschaftskataster
- für weitere Anwendungsbereiche:
  - Kooperation mit Niedersächsischer Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr (NLStBV) (Neubau einer Umgehungsstraße)
  - Forschungsprojekt des Niedersächsischen Landesamtes für Denkmalpflege (NLD) am Weltkulturerbe Rammelsberg in Goslar
- für technische Untersuchungen/Vergleiche, häufig begleitet durch Abschlussarbeiten: Systemvergleiche, Referenzpunktfelder, Unbemanntes Laserscanning (ULS) insbesondere für bewachsene Gebiete, kombinierter Einsatz eines RTK-UAVs mit einem low-cost-UAV ohne RTK mit Rolling Shutter, mit dem dafür ohne weitere Genehmigungen aufgrund des geringen Gewichts Unbeteiligte überfliegen werden dürfen.

Generell ist das Ziel, geforderte Genauigkeiten nach Möglichkeit ohne den Einsatz von Passpunkten zu erreichen. Daher wird immer der Satellitenpositionierungsdienst der Deutschen Landesvermessung (SAPOS®) zur Positionierung des UAV genutzt. Grundsätzlich werden aber über das Befliegungsgebiet photogrammetrische Kontrollpunkte signalisiert und eingemessen, um eine unabhängige Kontrolle durchzuführen und nachzuweisen.

## 2.3 Der Weg in den Regelbetrieb

Mehrere untersuchte Anwendungsszenarien für die UAV-gestützte Erhebungsmethode in der VKV wurden als direkt umsetzbar bewertet, andere bedürfen weiterer Untersuchungen bzw. Entwicklungen. Dazu gehört auch die Anpassung

von Verwaltungsvorschriften ohne die technisch und wirtschaftlich umsetzbare Szenarien nicht realisierbar sind.

### 2.3.1 Erstes regelhaftes Szenario: Flurbereinigung

Besonderes Potenzial wurde in der UAV-Befliegung in Flurbereinigungsverfahren, insbesondere als Datengrundlage für den Wege- und Gewässerplan, erkannt, weshalb dieses Szenario derzeit in das Tagesgeschäft des LGLN und der Ämter für regionale Landesentwicklung (ArL) eingeführt wird. Darüber hinaus werden weitere Anwendungen zur Festlegung der neuen Flurstücksgrenzen anhand relevanter Topografie (z. B. ausgebaute Gräben und Wege) für den Flurbereinigungsplan gesehen, insbesondere dann, wenn auf eine Abmarkung der neuen Grenzen verzichtet wird. Die klassische terrestrische Vermessung für diese Pläne bedeutet typischerweise mehrwöchige Außendienstesätze, um Wege- und Gewässergrenzen sowie weitere Objekte einzumessen. Demgegenüber stehen UAV-Befliegungen über wenige Tage und ein geringerer Aufwand, diese Messungen auf Basis der UAV-Daten durchzuführen, da dies nun zu einem großen Anteil im Innendienst anhand der Produkte der UAV-Befliegung erfolgt.

Die Fernpilottinnen/-piloten des LGLN haben daher nach entsprechender Beauftragung im Jahr 2022 insgesamt sieben Flurbereinigungsgebiete von bis zu 31 km<sup>2</sup> Fläche photogrammetrisch befliegen. Das Auswerteteam hat Oberflächenmodelle und Orthophotos berechnet und mit 3,5 cm Bodenpixelgröße zur weiteren Bearbeitung an die zuständigen Katasterämter bzw. Ämter für regionale Landesentwicklung abgegeben. Weitere Details folgen in Kap. 4.

### 2.3.2 Rechtliches

Für Details zu rechtlichen Anforderungen an den UAV-Betrieb sei an dieser Stelle auf andere Beiträge dieser Tagung verwiesen (siehe außerdem Kuhnt und Schlösser (2020)). Hier sollen nur aktuelle Entwicklungen aufgegriffen werden. Die jüngste Änderung betraf die verschärfte Auslegung<sup>3</sup> des BOS-Begriffs (Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben). Diese führte im Sommer 2022 trotz von Beginn an intensiver Befassung der Projektgruppe mit der rechtlichen Situation und bereits implementierter organisatorischer Maßnahmen für den sicheren und regelkonformen UAV-Betrieb dazu, dass nun nötige Genehmigungen nicht vorlagen und einige Vorhaben zurückgestellt oder unter erhöhtem Aufwand durchgeführt werden mussten. Der Handlungsspielraum konnte

---

3 Mitteilung des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr zur Anwendung und Auslegung des Behördenbegriffs und zur geplanten Änderung des § 21k Luftverkehrs-Ordnung, gültig ab 20.7.2022.

kurzfristig etwas erweitert werden, dank der „Genehmigung (Allgemeinerlaubnis) für geographische UAS-Gebiete nach Artikel 15 der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 i. V. m. § 21h LuftVO 1 zum Betrieb von unbemannten Luftfahrzeugsystemen im Bundesland Niedersachsen“. Außerdem wurde ein Betriebshandbuch einschließlich Betriebsrisikoanalysen für die Einsatzszenarien erstellt und der Grundstein für Genehmigungen von Flügen in der speziellen Kategorie durch die niedersächsische Landesluftfahrtbehörde gelegt.

Um den Austausch zu rechtlichen Themen zum behördlichen UAV-Einsatz voranzutreiben und Doppelarbeiten nach Möglichkeit zu verringern, hat die Projektgruppe zuletzt einen Erfahrungsaustausch UAV-einsetzender Stellen in Niedersachsen (Behörden, Hochschulen, etc.) initiiert und tauscht sich auch mit anderen Bundesländern aus.

Im Bereich der fachlichen Vorschriften wurde außerdem durch das Niedersächsische Ministerium für Inneres und Sport eine Projektgruppe zur Weiterentwicklung des Erlasses zur Erhebung von Geobasisdaten durch Liegenschaftsvermessungen (LiegVermErlass) ins Leben gerufen. Ziel der Projektgruppenarbeit ist es, das UAV-gestützte Messverfahren als weitere Erhebungsmethode in den Niedersächsischen LiegVermErlass aufzunehmen.

### 2.3.3 Hardware

Es kommen ausschließlich RTK-fähige UAVs mit Global Shutter-Kamera zum Einsatz. Das am häufigsten eingesetzte UAV ist die Phantom 4 RTK (im Folgenden kurz P4 RTK) des Herstellers DJI mit integrierter Kamera. Ende 2021 wurde außerdem das Modell DJI Matrice 300 RTK (im Folgenden kurz M300 RTK) mit den Sensoren P1 und L1 beschafft (Kameraparameter siehe [Tab. 1](#)).

**Tab. 1: Kameraparameter der am LGLN eingesetzten UAV-Modelle**

UAV	P4 RTK	M300 RTK	M300 RTK	M300 RTK
Kameramodell	FC6310R	Zenmuse L1	Zenmuse P1	
Pixelgröße	2,4 µm		4,4 µm	
Bildgröße	24 MP		54 MP	
Brennweite	8,8 mm		35 mm	24 mm
Öffnungswinkel (breit)	74°		54°	74°
Öffnungswinkel (hoch)	53°		38°	53°
Min. Bildabstand	2,0 s		0,7 s	
Bodenpixelgröße @120 m	3,3 cm		1,5 cm	2,2 cm

Die Kamera P1 wurde bislang nur zu Testzwecken eingesetzt und stattdessen mit der Kamera des L1-Sensors für die Flurbereinigung befliegen. Die Kamera des L1 entspricht der der Phantom 4 RTK. Diese Kamera stellte bei der geforderten Bodenpixelgröße von nur 3,5 cm und der auf 120 m limitierten Flughöhe die wirtschaftlichere Lösung dar, als die P1 mit dem Standardobjektiv (35 mm), die zwar höher aufgelöst, aber dafür weniger Fläche abdeckend arbeitet. Da erst im Sommer 2022 ein Update für den L1-Sensor die Möglichkeit brachte, die Bildüberlappung auch während eines Laserscanningfluges mit simultaner Bildaufnahme festzulegen, kam der Scanner für die zuvor durchgeführten großflächigen Befliegungen nicht zum Einsatz, sondern nur die integrierte Kamera. Zwischenzeitlich konnte aber auch ein weitwinkligeres (24 mm) Objektiv der P1 geliefert werden, das diese nun wirtschaftlicher macht. Es stehen jedoch weitere Untersuchungen eines beobachteten Höhenoffsets beim Einsatz der Matrice 300 RTK aus – im Schnitt wurden bei den durchgeführten Projekten mit der P4 RTK bislang die höheren Genauigkeiten bei direkter Georeferenzierung, also ohne den Einsatz von Passpunkten am Boden, erreicht.

Die Auswertung erfolgt derzeit noch auf zwei Workstations mit Serverbetriebssystem, die ausschließlich im Remotebetrieb ortsunabhängig genutzt werden. Erste Komponenten der Datenerzeugung und -bereitstellung werden derzeit Cloud-basiert als Microservices durch die sogenannten geoLabs (agil arbeitende DevSecOps-Teams) entsprechend der IT-Zielarchitektur des LGLN für eine Geoplattform entwickelt (Bischof et al. 2021). Dazu zählt auch die (interne) Bereitstellung von Auswertesoftware als Software-as-a-Service (SaaS), der über einen Internetbrowser genutzt wird.

### 2.3.4 Software

Für die Flugplanung kommen Onlinedienste<sup>4</sup> und in QGIS zusammengeführte Daten zur Beurteilung der rechtlichen Situation, An-/Abfahrtswege, Start-/Landplätze, etc. sowie die Apps des Herstellers DJI zum Einsatz. Für ausgewählte Projekte erfolgte außerdem eine 3D-Flugplanung anhand eines vorhandenen 3D-Modells mithilfe der Software Agisoft Metashape, die dann als KML an den Controller der UAVs übergeben wird. Metashape ist außerdem der Standard für die photogrammetrische Auswertung der erfassten Bilder. Derzeit werden aufgrund der russischen Herkunft der Software aber vermehrt Alternativen untersucht. Für die Weiterverarbeitung, Visualisierung und Analyse der Produkte kommen primär QGIS, CloudCompare und für Laserscanningdaten auch Software von Terrasolid sowie DJI Terra zur Anwendung.

4 <https://mapprool-dipul.dfs.de/>, <https://app.flynex.io/>, letzter Zugriff am 4.12.2022.

## 3 Beispiele durchgeführter Pilotprojekte

In diesem Kapitel werden ausgewählte Pilotprojekte der Projektgruppe (PG) Drohne II beispielhaft zusammengefasst.

### 3.1 Szenario Gebäudeeinmessung

Für Projekte zum Thema Gebäudeeinmessung wurde mit einer Bodenpixelgröße zwischen 1 und 1,5 cm (entspricht mit P4 RTK 36 bis 45 m Flughöhe) bei einer Überlappung von 80 %/80 % mit Schrägaufnahmen sowie Nadiraufnahmen in Streifen- oder Kreuzbefliegung 20 % höher befliegen. Die angestrebte Bodenpixelgröße ergibt sich aus Überlegungen zur erreichbaren Bildmessgenauigkeit, Identifizierbarkeit zu messender Punkte und Katastervorgabe  $< 4$  cm Koordinatenabweichung zu erfüllen.

Eines der ersten Projekte zum Thema war die Befliegung eines Neubaugebietes im Zusammenhang mit einer Bachelorarbeit. Aufgrund der relativ hohen Anzahl zu messender Punkte pro beflogener Fläche und günstiger Sichtbedingungen durch geringen Bewuchs wurden sowohl die technische als auch die wirtschaftliche Machbarkeit gegenüber der klassischen terrestrischen Ein-



**Abb. 1:** Aufsicht der Befliegung in Wassel zur gezielten Erfassung von UAV-Bildern (weiße Punkte) zur Gebäudeeinmessung und einem Übersichtsflug. Das daraus berechnete Orthophoto mit überlagerten Gebäudeumringen aus dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) ist hinterlegt.

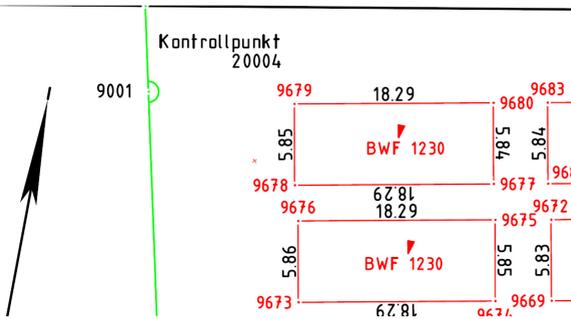
messung festgestellt. Verglichen wurden auch Varianten der 3D-Punktmessung: 1. Triangulation anhand von Bildmessungen in orientierten Luftbildern, 2. Ebenendetektion in der dichten Punktwolke und 3. Messung im 3D-Modell. Variante 2 lieferte ähnlich hohe Genauigkeiten wie Variante 1, wird aber wohl erst bei hohem Automatisierungsgrad wirtschaftlich. Variante 3 fällt aufgrund deutlich geringerer Genauigkeit zurück, wird aber als intuitiv und schnell bewertet. Variante 3 lässt sich jedoch gut mit Variante 1 verbinden, indem zunächst per 3D-Modell gemessene Punkte in den beteiligten Bildern verfeinert gemessen werden.

Um genauer zu untersuchen, wie viele Einmessungen pro beflogener Fläche für einen wirtschaftlichen UAV-Einsatz nötig sind, wurde in einem weiteren Projekt eine komplette Ortschaft befliegen und gezielt Detailbefliegungen bei vereinzelt vorliegenden Einmessungsaufträgen (vorrangig Anbauten im Bestand) vorgenommen (siehe [Abb. 1](#)). Die Übersichtsbefliegung diente primär der Untersuchung potenzieller Mehrwerte beispielsweise im Bereich des Gebäudefeldvergleichs und der TN-Aktualisierung. Das Pilotprojekt zeigte deutlich, dass die individuelle Situation vor Ort (Verdeckungen, Luftsichtbarkeit, Punktidentifizierbarkeit, Qualität des vorliegenden Katasters, Zugänglichkeit im klassischen Verfahren, usw.) eine pauschale Aussage zur Wirtschaftlichkeit und nötiger terrestrischer Ergänzungsmessungen schwierig macht.

Speziell, aber zunehmend relevant ist die Einmessung von Photovoltaikanlagen. Da es hierbei keine Dachüberstände gibt, können die Ecken direkt im Orthophoto in einem GIS gemessen werden. Um dies zu untersuchen wurde die in [Abb. 2](#) gezeigte Anlage befliegen und auf Basis des Orthophotos die zu messenden Punkte digitalisiert. Ein für dieses Szenario implementiertes QGIS-Plugin ermöglicht außerdem das Anmessen der photogrammetrischen Kontrollpunkte zum Nachweis der korrekten Georeferenzierung. [Abb. 3](#) zeigt den Entwurf eines Fortführungsrisses, der derzeit auch als Grundlage der Diskussion zu nötigen Vorschriften und der Dokumentation des Messverfahrens für den niedersächsischen LiegVermErlas dient, um das Verfahren zuzulassen.



**Abb. 2:** Orthophoto der beflogenen Photovoltaikanlage mit maßstäblich überlagerten Messungen



**Abb. 3:**  
Fortführungsgriss (unmaßstäblich) zur Dokumentation der Messung inklusive Kontrollpunktmessungen, vergebener Punktnummern und Attributen (Ausschnitt zur Abb. 2 oben links)

Diese Projekte zur Gebäudeeinmessung wären bislang nicht durch die Regularien zugelassen.

### 3.2 Szenario B-Plangrundlage

Als Grundlage für einen Bebauungsplan wurden für den Bereich des Hafens von Neuaharlingersiel terrestrisch und photogrammetrisch per P4 RTK Gebäudeecken und Dachformen vermessen (Abb. 4; 1 cm Bodenpixelgröße; 80 % / 80 % Bildüberlappung, Schrägaufnahmen 20° aus Nadir abweichend und zweite Flughöhe Nadir; Anlage der Kreuzbefliegung mit Berücksichtigung der Ausrichtung sehr schmaler Gassen zwischen den alten Gebäuden). An den zehn verteilte eingemessenen Kontrollpunkten wurde ohne Passpunkte ein mittlerer 3D-Root Mean Square Error (RMSE) von 0,9 cm erreicht (0,3 cm RMSE in X,Y).

Abb. 5 zeigt eines der Gebäude mit digitalisierten Dachformen (insgesamt 250 Trauf- und Firsthöhen). Die Gegenüberstellung der benötigten Zeit bis zur Abgabe der Dachformen und Gebäudepunkte für beide Verfahren zeigt mit 47 (UAV) gegenüber 87 Stunden (klassisch) den deutlichen Vorteil des



**Abb. 4:** 3D-Modell des Hafens Neuaharlingersiel mit gemessenen Punkten

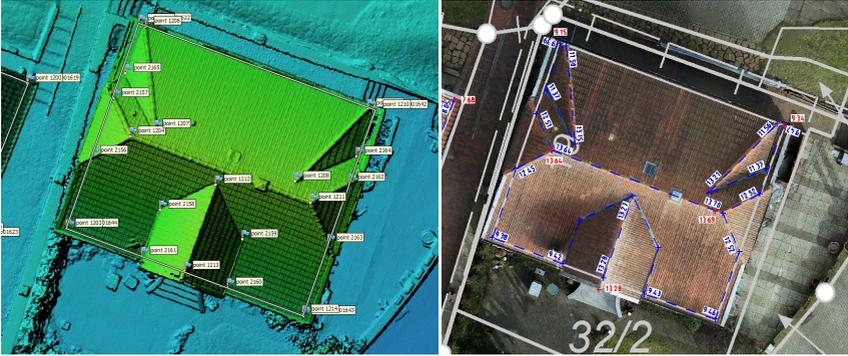


Abb. 5: Digitalisierte Dachform eines Gebäudes anhand von UAV-Oberflächenmodell (links) und Orthophoto und Gebäudegrundriss in Neuharlingersiel

UAV-Verfahrens. Eingerechnet sind hier bereits einzelne terrestrische Nachmessungen von in den Bildern verdeckten Punkten. Einzelne nicht direkt sichtbare Punkte, beispielsweise innenliegende Ecken hinter Regenabflussrohren, wurden anhand von Hilfspunkten berechnet. Terrestrisch wurden nicht alle im Orthophoto gemessenen Dachpunkte erreicht.

Neun von 127 in den orientierten Luftbildern gemessene Gebäudeecken weichen mehr als 4 cm von den Koordinaten der terrestrischen Vergleichsmessung ab (Abb. 6). Alle neun wurden begutachtet und festgestellt, dass bei diesen ein gewisser Spielraum bei der Definition der anzumessenden Ecke vorliegt, also die eindeutige Identifizierbarkeit bzw. Definition der Ecke zu der Differenz führt.

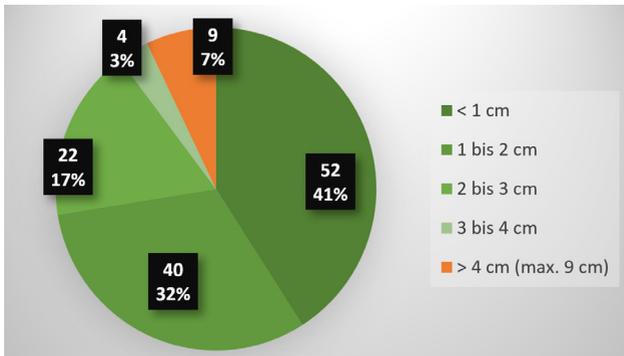


Abb. 6: Differenz der Koordinaten der Gebäudeecken zwischen UAV und klassischer Erfassung

### 3.3 Beispiel Flurbereinigung

#### 3.3.1 Flurbereinigung Berka

Das Katasteramt Northeim wurde beauftragt, ein Bestandsaufmaß als Grundlage für den Plan über die gemeinschaftlichen und öffentlichen Anlagen (Wege- und Gewässerplan nach § 41 Flurbereinigungsgesetz (FlurbG)) durchzuführen.



Abb. 7: 3D-Modell mit höhenangepasst erfassten Bildern (blau-schwarz) in Seitenansicht

Die UAV-gestützte Erhebung fand zu Vergleichszwecken mit der bereits durchgeführten klassischen Vermessung statt und sollte die Potenziale für künftige Flurbereinigungsverfahren aufzeigen. Das Projekt stellte mit insgesamt > 10.000 erfassten Bildern in 55 Einzelflügen mit zwei parallel eingesetzten P4 RTK an drei Tagen auf einer Fläche von knapp 8 km<sup>2</sup> den bis dahin (2021) umfangreichsten Auftrag dar. Vom Umgang mit Witterungsbedingungen über das Akkulademanagement, die Organisation der Standortwechsel, Zuschnitte der Einzelflüge, Nutzung des ALS-Geländemodells (DGM) des LGLN für geländeangepasste Flughöhen (120 m; vgl. Abb. 7) bis hin zu Befliegungs- und Auswerteparametern lieferte dieses Projekt wertvolle Erkenntnisse, die zu deutlich effizienteren Befliegungen in nachfolgenden Projekten führten.

Der direkte Vergleich mit der klassischen terrestrischen Vermessung, die mehrere Wochen dauerte, zeigte eindeutig, dass die UAV-Photogrammetrie in das Portfolio der Messverfahren aufgenommen werden sollte. Gleichzeitig wurde aber auch deutlich, dass das Digitalisieren und Attributieren relevanter Objekte auf Basis des berechneten Oberflächenmodells und Orthophotos (Abb. 8) ebenfalls Einzug in die Arbeitsabläufe finden muss. Schließlich liefert das Messverfahren quasi eine Kopie der Außenwelt, in der die gezielte Punktmessung noch nicht erfolgt ist. Dafür kann allerdings jeder sichtbare Punkt auch nachträglich noch gemessen werden.

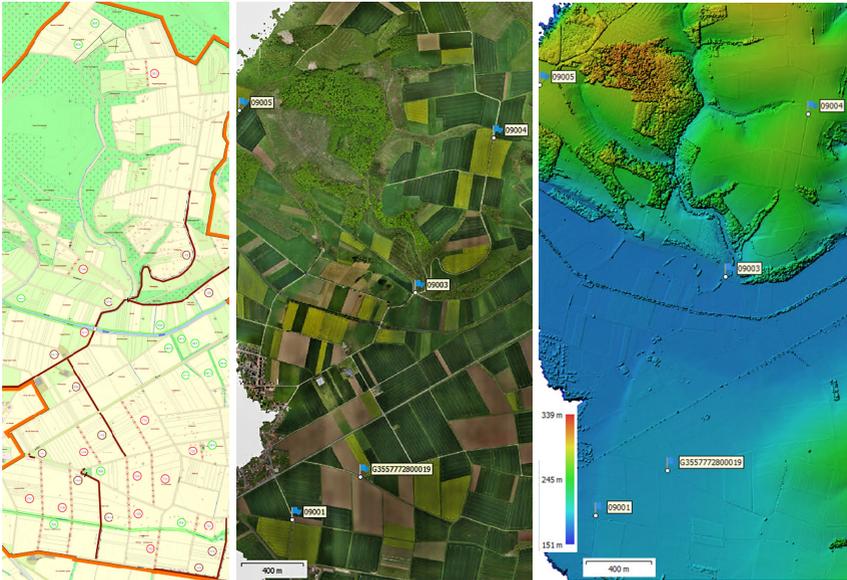


Abb. 8: Links: Plan nach § 41 FlurbG; Mitte: UAV-Orthophoto; rechts: UAV-Oberflächenmodell

### 3.3.2 Unternehmensflurbereinigung B211N

Im Rahmen eines Straßenneubaus wurde ein Unternehmensflurbereinigungsverfahren nach § 87 FlurbG eingeleitet, eine trassenbegleitende Qualitätsverbesserung des Liegenschaftskatasters durchgeführt und Flurstücksgrenzen neu gebildet. Auf eine Vermarkung der Grenzen wurde aufgrund der fast ausschließlich landwirtschaftlichen Nutzung verzichtet. Um Grenzen zu überprüfen und anhand vorgegebener Abstandsvorgaben zur Trasse bzw. zu Wegen und Gräben festzulegen, bot sich eine UAV-Befliegung an, auf deren Basis die Arbeiten weitgehend digital erfolgten. Oberflächenmodell und Orthophoto wurden auch für online Abstimmungstermine der Beteiligten (LGLN, NLStBV, ArL) genutzt und ersparten so auch in der Corona-Pandemie persönliche Außentermine vor Ort.

Über 95 % der Flurstücksgrenzen (ca. 1450 Grenzpunkte) und 100 % der tatsächlichen Nutzung wurden aus den UAV-Daten digitalisiert. Der klassisch angefallene Aufwand wurde auf knapp 250 Stunden geschätzt, während dem ca. 72 Stunden per UAV gegenüberstehen (insgesamt 30 Std. Außen- und 40 Std. Innendienst).

### 3.4 Identifizierte Mehrwerte

Ein grundsätzlicher Unterschied zur bisherigen Erfassung ist, dass per UAV-Photogrammetrie eine „Kopie“ der sichtbaren Außenwelt erfasst wird und danach für die Weiterverarbeitung im Innendienst zur Verfügung steht. Es ist daher wichtig, bereits zur Flugplanung die Anforderungen genau zu kennen, um sicherstellen zu können, dass möglichst alles Relevante erfasst wird. Dann sind später noch beliebige Punkte messbar, während bei klassischer Erfassung erneut herausgefahren werden müsste, um einen nicht angemessenen Punkt nachzuholen. Nicht zuletzt aufgrund der Corona-bedingten digitalen Gesprächskultur zeigten sich vielversprechende Möglichkeiten zur Kooperation zwischen verschiedenen Personen anhand der erfassten Daten. Auch zukünftig könnten Ortstermine entfallen, wenn hochauflösende aktuelle Daten verfügbar sind, die gemeinsam betrachtet und auf dieser Basis Absprachen und Entscheidungen getroffen werden können.

Außer bei sehr dichter Bebauung oder Vegetation (es sei denn, es kommt Laserscanning zum Einsatz) liegt ein hochgenaues Geländemodell zur Verwendung auch durch Dritte vor (z. B. für die Gestaltung von Außenanlagen, für den Endausbau von Straßen in Neubaugebieten oder für öffentliche Stellen). Mehrwerte einer UAV-Befliegung liegen grundsätzlich in der Nutzbarkeit einer Erfassung für weitere Szenarien wie die Aktualisierung der tatsächlichen Nutzung, Qualitätsverbesserung des Katasters, Spitzenaktualisierung der Geobasisdaten, für Planungszwecke, 3D-Modellierung/-Visualisierung, Simulationen, virtuelle Realität usw.

## 4 UAV-Einsatz für die Flurbereinigung

Die zwei in Kap. 3.3 durchgeführten Pilotprojekte von 2021 zeigten die Vorteile der UAV-gestützten Datenerhebung auch über das reine Bestandsaufmaß als Grundlage für den Wege- und Gewässerplan hinaus (z. B. Festlegung neuer Flurstücksgrenzen, siehe Abschnitt 3.3.2). Die Erkenntnisse decken sich mit Erfahrungen, die sich bereits in der Literatur finden. Fehres und Feindt (2022) untersuchen die Einsatzmöglichkeiten von UAV in der Flurbereinigung, stellen Kostenreduzierung und Zeiteinsparungen im Vergleich zu klassischen Verfahren und Mehrwerte im Bereich der Beweissicherung, eine bessere Transparenz und höhere Akzeptanz sowie engere und bessere Abstimmung der Verfahrensbeteiligten anhand der digital vorliegenden Daten fest. Schreier (2022) gibt einen Überblick der Einsatzmöglichkeiten von UAV in Flurbereinigungsverfahren an Beispielen der Flurbereinigungsverwaltung Rheinland-Pfalz und hat den aktuellen Stand des UAV-Einsatzes in den Bundesländern zusammengetragen.

## 4.1 Projektübersicht

Tab. 2 zeigt die im Jahr 2022 in Niedersachsen durch das LGLN per UAV beflogenen Flurbereinigungsprojekte. Es wurden in Summe über 90 km<sup>2</sup> erfasst und dabei über 68.000 Bilder á 24 Megapixel aufgenommen.

Tab. 2: Projektübersicht Flurbereinigung 2022

Verfahren	Befliegungs- tage	Gebiets- größe (beflogen)	Anzahl Aufnahmen	UAV*
Lichtenmoor	6 Tage	30,7 km <sup>2</sup>	21.665	DJI M300 RTK & DJI P4 RTK
Ridderade-Stophel	3 Tage	7,2 km <sup>2</sup>	7.247	DJI P4 RTK
Holtum-Geest	4 Tage	18,9 km <sup>2</sup>	12.894	DJI M300 RTK
Middoge-Tettens	3 Tage	20,9 km <sup>2</sup>	13.955	DJI M300 RTK
Gevensleben	4 Tage	7,8 km <sup>2</sup>	5.447	DJI P4 RTK
Kluse	1 Tag	2,7 km <sup>2</sup>	2.500	DJI M300 RTK
Heeslingen	2 Tage	5,8 km <sup>2</sup>	4.380	DJI P4 RTK

\* M300 RTK entspricht Zenmuse L1-Kamera (ohne Nutzung der Scanfunktion)

## 4.2 Befliegung

Allgemein ist einer der Vorteile der UAV-gestützten Datenerhebung die Flexibilität, auf spezifische Anforderungen einzugehen, seien es die Detaillierbarkeit, geometrische Auflösung (auch im Oberflächen- oder 3D-Modell) oder der Zeitpunkt der Befliegung.

### 4.2.1 Parameter

Die meisten Flurbereinigungsverfahren wurden in 2022 mit dem Ziel einer Bodenpixelgröße von schlechtestenfalls 3,5 cm in Nadirrichtung erfasst. Hintergrund dafür ist u. a. die Sichtbarkeit relevanter Objekte wie Zaunpfähle. Die Bildüberlappung wurde mit mind. 80 % längs und 60 % quer der Flugstreifen ohne flächendeckende Kreuzbefliegung/Schrägaufnahmen gewählt, um möglichst viel Fläche ausreichend genau wirtschaftlich zu befliegen. Für bewegtes Gelände wurde die Geländehöhe mithilfe des DGM des LGLN genutzt, um eine

Höhe von 120 m über Grund zu erhalten, was mit dem eingesetzten Kameramodell zu einer Bodenpixelgröße von 3,3 cm führt (vgl. Tab. 1).

Meist wurde die Belichtungsautomatik mit Vorgabe einer leichten Unterbelichtung genutzt (Verringerung überstrahlter Pixel), aber beachtet, dass die Belichtungszeit zu max. 1 Pixel Bewegungsunschärfe führt. Für die Belichtungszeit der P4 RTK bedeutet das beispielsweise nicht langsamer als 1/350 s bei 10 m/s Fluggeschwindigkeit bei 120 m Flughöhe. Außerdem wurden Fluggeschwindigkeit und minimaler Bildabstand bei geforderter Längsüberlappung beachtet: P4 RTK min. 2 s = theoretisch max. 16 m/s Fluggeschwindigkeit möglich (oder Potenzial für höhere Längsüberlappung ohne Mehraufwand).

Die Einteilung der Gebiete in Teilflüge erfolgte je nach Zugänglichkeit am Boden und sich ergebenden Sichten auf das UAV sowie den umliegenden Luftraum zur Beobachtung anderen Flugverkehrs. Um in möglichst vielen Teilflügen mindestens einen Kontrollpunkt zu beobachten und Wege am Boden kurz zu halten, wurde häufig am Start-/Landeplatz ein Kontrollpunkt signalisiert und eingemessen, der in mehreren sich überlappenden Teilflügen sichtbar war. Experimente zeigten, dass durch die dann lokal erhöhte Bildüberlappung der Teilflüge keine signifikante Genauigkeitssteigerung im Bildverband zu erwarten ist, weshalb die Kontrollpunkte auch für „nur“ 80 % / 60 % überlappende Flächen als repräsentativ angenommen werden. Außerdem wurden verteilt kleine Bereiche auf ca. 96 m Höhe in Kreuzbefliegung mit Schrägaufnahmen (mind. 4 × 4 Flugstreifen) und vereinzelt auch diagonale Flugstreifen mit Schrägaufnahmen ergänzend befliegen, um die Kameraselbstkalibrierung ohne Einsatz von Passpunkten zu stützen.

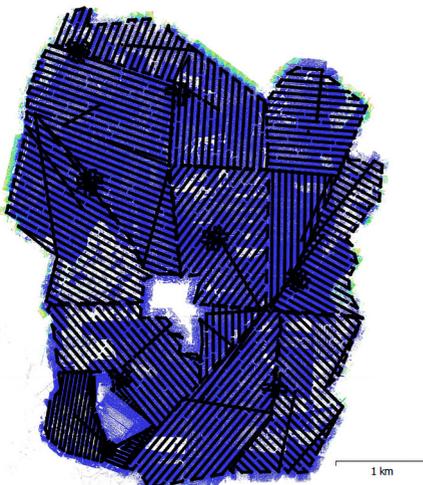


Abb. 9:

Beispiel eines Befliegungsmusters für ein Flurbereinigungsgebiet mit zentral ausgespartem Ort und nur per Schrägaufnahmen erfasstem Bereich (unten links) um Windkraftanlagen. Bildaufnahmepositionen in schwarz. Cluster von Bildern bzw. diagonale Streifen kennzeichnen lokale (Kreuz-)Befliegungen mit Schrägaufnahmen zur Stützung.

## 4.2.2 Erfahrungen

Die im Innendienst geplanten Gebietszuschnitte mussten häufig der tatsächlichen Situation vor Ort noch angepasst werden, da sich erst dort zeigt, ob Wege befahrbar und Sichten gegeben sind. Je häufiger Akkuwechsel erforderlich sind, desto relevanter ist die Länge zurückgelegter Flugstrecken für die Rückholung des UAV und deren Anteil an der Gesamtflugzeit. Außerdem haben Sichtweite und damit die Anzahl an Standortwechseln sowie die Verfügbarkeit von Wegen und deren Qualität einen erheblichen Einfluss auf Zeiten, in denen das UAV nicht in der Luft ist. Für das Nachladen von Akkus während des Flugtages wurden häufig Stellen mit Stromanschluss gefunden bzw. von den Landwirten/-innen bereitgestellt, was die Gesamtanzahl benötigter Akkus reduziert.

Verschiedene eingeschränkt vorab planbare Faktoren beeinflussen außerdem die Größe des erfassten Gebiets pro Arbeitstag: Unterbrechungen aufgrund anderen Betriebs im Luftraum, erheblich reduzierter Akkulaufzeiten bei entsprechend starkem Wind, zu starken Windes, Niederschlags und technischer Themen (Korrekturdatenverbindung, Updates, Kompasskalibrierung, etc.). Im Schnitt wurden ca. 0,5 (P4 RTK) bis 0,8 (M300 RTK) km<sup>2</sup>/Stunde befliegen.

Gemessen an den Koordinatendifferenzen an den Kontrollpunkten wurde im Mittel über alle Flurbereinigungsbefliegungen die 0,5- bis 1-fache Bodenpixelgröße in der Lage und die 1- bis 2-fache in der Höhe erreicht.

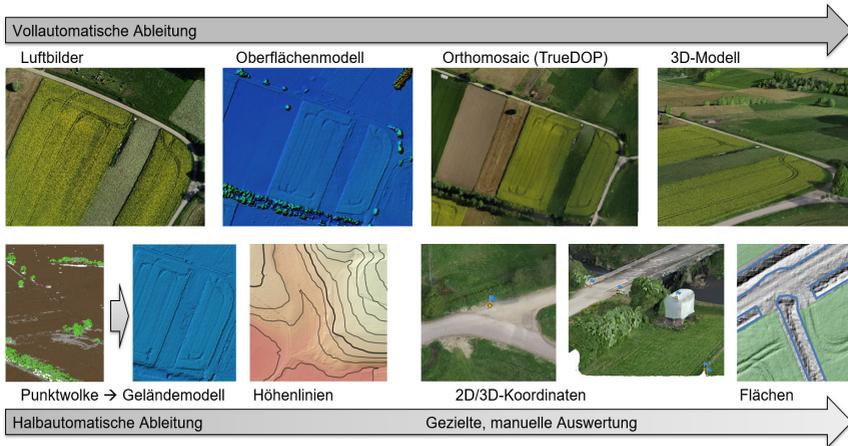
Stichprobenartig durchgeführte Vergleiche der Koordinatendifferenzen an Kontrollpunkten bei Weglassen der zusätzlichen Schrägaufnahmen/zweiten Flughöhen deuten darauf hin, dass die Lagegenauigkeit kaum abnimmt und sogar die Höhendifferenzen die 3-fache Bodenpixelgröße meist trotzdem noch unterschreiten.

## 4.3 Auswertung

Die Aufgabe des Auswerteteams beginnt nicht mit der Abgabe der erfassten UAV-Daten. Bereits in der Flugplanung findet eine enge Absprache zwischen Fernpilot/-in und Auswerter/-in statt, um sicherzustellen, dass die Datenerfassung wirtschaftlich erfolgt und die Auftragsvorgaben eingehalten werden.

### 4.3.1 Standardprodukte

Auf Basis der erfassten Luftbilder mit SAPOS-korrigierten Messungen der Parameter der äußeren Orientierung (Bildausrichtung und -aufnahme-position) wird ein vollautomatischer Prozess zur Ableitung von Oberflächenmodell und Orthophoto über Bildmatching, Bündelblockausgleichung und dichte Bildzu-



**Abb. 10:** Produkte der UAV-Befliegung ausgehend von erfassten Luftbildern über automatisch abgeleitete Standardprodukte hin zu daraus gezielt (manuell) erzeugten Geometrien

ordnung (Dense Image Matching) gestartet. Bei Bedarf werden auch die dichte 3D-Punktwolke und/oder ein texturiertes 3D-Modell berechnet. Die Koordinaten der Kontrollpunkte werden mithilfe der orientierten Luftbilder gemessen und 3D-Koordinaten trianguliert, die mit den terrestrisch eingemessenen Sollkoordinaten verglichen werden. Nur falls dabei unerwartete Abweichungen auftreten oder die Auftragsvorgaben verfehlt werden, wird die Berechnung der Produkte ggf. gestoppt und mit neuer Konfiguration neu gestartet.

Die obere Hälfte der **Abb. 10** zeigt die Standardprodukte der UAV-Befliegung, die untere zeigt Möglichkeiten der derzeit nur teilautomatisierten oder manuellen Weiterverarbeitung bzw. -nutzung dieser Produkte beispielsweise für die Ableitung eines Geländemodells nach entsprechender Klassifikation der dichten Punktwolke oder die Messung von Geometrien in 2D oder 3D. Es laufen auch erste Tests zur automatischen Ableitung von Geländebruchkanten als Unterstützung der bislang manuellen Erfassung.

### 4.3.2 Gezielte Auswertung

Mit der individuellen Ableitung gezielter Produkte wie Punktkoordinaten, Linien und Flächen beginnt ein weiterer Schritt, der sich auch als Digitalisieren und Attributieren (Klassifikation der Geometrien) aus den Standardprodukten beschreiben lässt und Fachwissen über die für die Flurbereinigung relevanten Geometrien erfordert. Dieser kann nun kollaborativ sogar per Bildschirmfreigabe zwischen den am Verfahren Beteiligten geschehen oder dediziert auf Seiten des LGLN oder des ArL. Primär genutzte Produkte sind das Oberflächenmodell

in Schummerungsdarstellung und das Orthophoto. Nicht nur in Niedersachsen liegen bereits Erfahrungen aus dem Bereich der bemannten Befliegungen für diesen Schritt vor.

Wizesarsky (2022) beschreibt die grundsätzliche Vorgehensweise und den Stand der digitalen Transformation der Flurbereinigungsbehörden in Nordrhein-Westfalen und geht dabei auch auf die Möglichkeit ein, in der Software LEFIS Orthophotos und Oberflächen-/Geländemodelle in Schummerungsdarstellung der bemannten Befliegungen (10 cm Bodenpixelgröße) zur Bildung von Soll-Koordinaten einzusetzen und damit örtliche Vermessungen auf darin nicht messbare Teilbereiche zu reduzieren.

Die gezielte Auswertung auf Basis der Standardprodukte ist jedoch (noch) nicht direkt mit der klassischen Vorgehensweise vergleichbar, da im Unterschied zu dieser noch keine vielfach erprobten Abläufe und Schnittstellen festgelegt sind und sich noch keine Routine einstellen konnte. Auf Seiten der Niedersächsischen Flurbereinigungsverwaltung befindet sich LEFIS teilweise noch in der Einführung; auf LGLN-Seite werden neben QGIS auch andere Softwaresysteme hinsichtlich ihrer Eignung erprobt. Auch in Niedersachsen gehen die Weiterentwicklungen Hand in Hand mit der digitalen Transformation und betreffen damit längst nicht nur eine technisch, fachliche Ebene.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Sowohl aus den Pilotprojekten, als auch aus den ersten regelhaft durchgeführten Flurbereinigungsverfahren wurden diverse Erfahrungen gewonnen, Fragen aufgeworfen, Erkenntnisse anderer Stellen bestätigt und ergänzt, sowie organisatorische und kommunikative Abläufe weiterentwickelt. Offensichtlich handelt es sich bei der UAV-gestützten Vermessung nicht nur um ein ergänzendes Messverfahren, sondern um eines, das auch vielfältige neue Möglichkeiten eröffnet.

Um möglichst hohe Lage- und Höhengenaugigkeiten zu erzielen, wird, wie insbesondere aus der Nahbereichsphotogrammetrie bekannt, bei allen Befliegungen angestrebt, Maßstabsunterschiede zwischen Bildern (= Variation der Flughöhe) sowie innerhalb der Bilder (= Schrägaufnahmen) zu erhalten, was die Kameraselbstkalibrierung stützt. Hierbei geht es insbesondere um die Dekorrelation von Flughöhe und Brennweite der Kamera (Remondino und Fraser 2006, Nex et al. 2022). Neben der Hinzunahme von Schrägaufnahmen und einer zweiten Flughöhe helfen hier auch signifikante Höhenunterschiede in der erfassten Szene (z. B. relativ hohe Gebäude und bewegtes Gelände). Für großflächige Befliegungen wird je nach Anforderungsszenario auf Kreuzbefliegung, Befliegung auf zwei Höhen oder Kombinationen aus Nadir- und Schrägaufnahmen in der Fläche verzichtet und diese nur an ausgewählten Stellen (vorzugsweise

im Bereich ausgeprägter Höhenunterschieden in der Szene) kleinräumig lokal durchgeführt (vgl. Beispiel aus der Flurbereinigung [Abb. 9](#)).

Zur Erreichung der geforderten Genauigkeit war in keinem Projekt die Verwendung von koordinatenmäßig bekannten und örtlich signalisierten Passpunkten nötig; auch Inertialmessungen wurden nicht genutzt.

Eine Integration eines Oberflächen-/Geländemodells in die Flugplanungssoftware macht auch Flüge in bewegtem Gelände bzw. über unterschiedlich hohen Objekten ohne Probleme möglich. Ein selbst erfasstes oder bereits vorhandenes 3D-Modell kann außerdem für eine 3D-Flugplanung eingesetzt werden, um Objekte aus allen möglichen Perspektiven aufnehmen und detailliert 3D rekonstruieren zu können.

Mit den abgeschlossenen Pilotprojekten wurde in vielen Fällen der Nachweis erbracht, dass das UAV-basierte Mess- und Auswerteverfahren bei passenden Auftragsparametern sogar wirtschaftlicher als das klassische Verfahren ist – und zwar bereits ohne die Berücksichtigung möglicher Mehrwerte. Die geforderten Genauigkeiten wurden häufig sogar übertroffen. Die rechtlichen Rahmenbedingungen waren bei keinem Projekt ein Hinderungsgrund, sind aber nicht erst aufgrund der jüngsten Entwicklungen ein kontinuierlich zu begleitendes Thema und können die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens beeinflussen.

Die Implementierung des UAV-Verfahrens gemäß der IT-Strategie und IT-Zielarchitektur des LGLN (Bischof et al. 2021) ist nicht abgeschlossen und der praktische Einsatz von UAV-Verfahren im LGLN hängt direkt von den technischen Möglichkeiten in der IT-Infrastruktur ab.

Die Projektgruppe hat das Ziel, weitere untersuchte Szenarien weiterzuentwickeln und in den Regelbetrieb zu überführen, sowie weiterhin vielversprechende neue Anwendungsbereiche zu untersuchen.

## Danksagung

Die hier beschriebenen Aktivitäten sind durch die LGLN-weite Zusammenarbeit der Projektgruppenmitglieder und weiterer Kolleginnen und Kollegen sowie vielfache Kooperationen mit anderen Behörden und Stellen möglich geworden. Auch diverse Abschlussarbeiten in Kooperation mit der Projektgruppe haben maßgeblich beigetragen. Allen Beteiligten und auch denen, die die nötigen Freiräume und Ressourcen für diese Tätigkeiten bereitgestellt haben, sei hiermit ausdrücklich für ihr Engagement gedankt!

## Literatur

Bischof, R., Clermont, D., Creuzer, P., Franke, T., Koppmann, V., Salten, J., Schmidt, V., Wichmann, A., Ziems, M. (2021): Das »Neue Amtlich« in Niedersachsen. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4/2021, 146. Jg, 266–272. DOI: [10.12902/zfv-0361-2021](https://doi.org/10.12902/zfv-0361-2021).

- Fehres, J., Feindt, F. (2022): Kosten-Nutzen-Vergleich von UAS in ländlichen Bodenordnungsverfahren zur Effizienzsteigerung. *Avn – Allgemeine Vermessungsnachrichten* (01-02), 28–33.
- Kuhnt, S., Schlösser, L. (2020): Einsatz von UAV im amtlichen Vermessungswesen – ein Werkstattbericht aus dem Zukunftskonzept VKV 2025. In: DVW e.V. (Hrsg.): *UAV 2020 – The Sky is the Limit?*. DVW-Schriftenreihe, Band 97, Wißner-Verlag, Augsburg, 39–85.
- Manyoky, M., Theiler, P., Steudler, D., Eisenbeiss, H. (2011): Unmanned Aerial Vehicle in cadastral applications. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-1/C22, 57–62. DOI: [10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-57-2011](https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-57-2011).
- Nex, F., Armenakis, C., Cramer, M., Cucci, D. A., Gerke, M., Honkavaara, E., Kukko, A., Persello, C., Skaloud, J. (2022): UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 184. 215–242. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006).
- Rausch, S. (2017): Fachliches Zukunftskonzept für die Vermessungs- und Katasterverwaltung – Zieljahr 2025. In: *Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung*, Heft 1+2/2017, 67. Jg., 7–19.
- Rembold, M. (2020): Einsatz von unbemannten Luftfahrtsystemen im Liegenschaftskataster. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 6/2020, 145. Jg., 357–363. DOI: [10.12902/zfv-0311-2020](https://doi.org/10.12902/zfv-0311-2020).
- Rembold, M. (2022): Neuberechnung des Katasterzahlenwerks mit Anschluss an UAS-bestimmte Gebäudepunkte. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 2/2022, 147. Jg., 97–103. DOI: [10.12902/zfv-0382-2021](https://doi.org/10.12902/zfv-0382-2021).
- Remondino, F., Fraser, C. (2006): Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 266–272. DOI: [10.3929/ethz-b-000158067](https://doi.org/10.3929/ethz-b-000158067).
- Schreier, M. (2022): Einsatzmöglichkeiten von Unmanned Aircraft Systems (UAS) mit Real Time Kinematic (RTK) in Flurbereinigungsverfahren. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Hochschule Mainz, Fachbereich Technik.
- Stöcker, C., Nex, F., Koeva, M., Gerke, M. (2020): High-Quality UAV-Based Orthophotos for Cadastral Mapping: Guidance for Optimal Flight Configurations. *Remote Sensing* 12, 3625. DOI: [10.3390/rs12213625](https://doi.org/10.3390/rs12213625).
- Wizesarsky, A. (2022): Die digitale Transformation in den Flurbereinigungsbehörden – ein Werkstattbericht aus Nordrhein-Westfalen. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Heft 5/2022, 147. Jg., 284–293. DOI: [10.12902/zfv-0405-2022](https://doi.org/10.12902/zfv-0405-2022).

## Kontakt

Dr.-Ing. Jakob Unger

Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) –

Landesvermessung und Geobasisinformation – Landesbetrieb –

Podbielskistraße 331, 30659 Hannover

[jakob.unger@lgl.niedersachsen.de](mailto:jakob.unger@lgl.niedersachsen.de)

# Automatische Interpretation von UAV-Punktwolken – Spielerei oder praktischer Nutzen?

Norbert Haala | Michael Kölle

## 1 Automatische Interpretation dichter UAV-Punktwolken

Die automatisierte Extraktion geografischer Objektinformation aus luftgestützten Daten ist seit Jahrzehnten ein wichtiges Forschungsthema in der Photogrammetrie und Fernerkundung. Dabei werden neben Bildern verstärkt auch 3D-Punktwolken als grundlegende Datenquelle immer wichtiger. Diese werden entweder mittels luftgestütztem LiDAR direkt erfasst oder mittels Multi-View-Stereo-Image-Matching abgeleitet. Der vorliegende Beitrag diskutiert den Stand der Forschung der semantischen Segmentierung hochauflösender 3D-Punktwolken. Grundlage ist dabei eine aktuelle Benchmark auf Basis von Daten multitemporaler UAV Befliegungen. Diese Benchmark wurde vom Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart im Rahmen einer Initiative der International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) realisiert. Ziel war dabei eine vergleichende Analyse verfügbarer Methoden und Algorithmen zur Klassifikation von 3D-Punktwolken für Geodatenanwendungen anhand der bereitgestellten Datensätze.

Aktuelle Entwicklungen der LiDAR-Technologie liefern 3D-Punktwolken mit bis vor kurzem unvorhersehbaren Auflösungen. Sehr dichte Punktwolken werden vermehrt auch durch die zunehmende Verfügbarkeit von UAV-getragenen LiDAR-Systemen erfasst. Ein weiterer Trend bei der Entwicklung von Aufnahme- und Auswertesystemen ist die integrierte Erfassung und Prozessierung von Bild- und LiDAR-Daten. Neben der Bereitstellung von RGB-Farbwerten für die LiDAR-Punktwolke werden die erfassten Bilder zusätzlich zur hybriden und damit hochgenauen Georeferenzierung der LiDAR-Daten genutzt (Haala et al. 2021) und dienen der Erzeugung von texturierten, vermaschten 3D-Punktwolken. Damit kann multimodale Informationen aus Bildern und LiDAR-Messungen für die automatische Interpretation genutzt werden (Laupheimer et al. 2020). Darüber hinaus ermöglicht die vergleichsweise kostengünstige Datenerfassung mittels UAV die Bereitstellung multitemporaler Datensätze. Die Hessigheim 3D (H3D) Benchmark stellt solche Daten interessierten Wissenschaftlern für die Entwicklung und Analyse von Verfahren zur semantischen Segmentierung von

Punktwolken zur Verfügung. Anhand der dabei erreichten Ergebnisse soll im Folgenden der derzeitige Stand der Forschung zur automatischen Interpretation der Punktwolken dokumentiert und diskutiert werden.

Kap. 2 beschreibt die im Rahmen der Hessenheim 3D Benchmark bereitgestellten Datensätze, eine exemplarische Auswertung zur semantischen Segmentierung stellt Kap. 3 vor, die Diskussion erfolgt in Kap. 4.

## 2 Hessenheim 3D (H3D) Benchmark

Abb. 1 gibt einen Überblick über die H3D Benchmark anhand eines Orthophotos, dem die Daten für Training, Validierung und Test überlagert sind. Die Gebiete für das Training und die Validierung sind in Abb. 1 durch die Farbge-

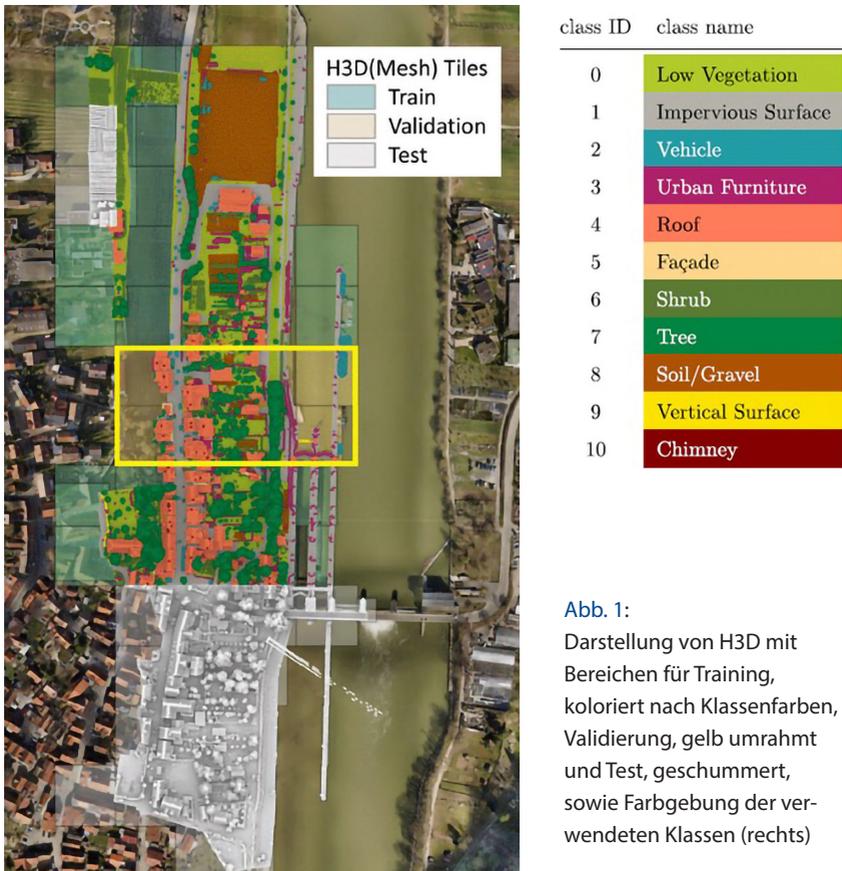


Abb. 1: Darstellung von H3D mit Bereichen für Training, koloriert nach Klassenfarben, Validierung, gelb umrahmt und Test, geschummert, sowie Farbgebung der verwendeten Klassen (rechts)

bung der jeweiligen Klassenzugehörigkeit dargestellt, der Bereich der Validierung ist zudem durch das gelbe Rechteck markiert. Daten für Training und Validierung stehen den Teilnehmern der Benchmark zur Verfügung. Im Gegensatz dazu verbleiben die Testdaten repräsentiert durch das geschummerte Grauwertbild der Höhendaten bei den Organisatoren der Benchmark und dienen damit der Bewertung der von Teilnehmern eingereichten Ergebnisse.

## 2.1 UAV-Datenerfassung Hessigheim

Die Bild- und LiDAR-Daten für die H3D Benchmark wurden ursprünglich in einem gemeinsamen Projekt der Universität Stuttgart und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) erfasst. Ziel war dabei das Monitoring von Bodensenkungen im Bereich einer Schleusenanlage nahe des Dorfes Hessigheim. Hierzu wurden UAV-Befliegungen zu unterschiedlichen Epochen (März 2018, November 2018, März 2019 und März 2021) durchgeführt und daraus hochgenaue und dichte 3D-Punktwolken abgeleitet.

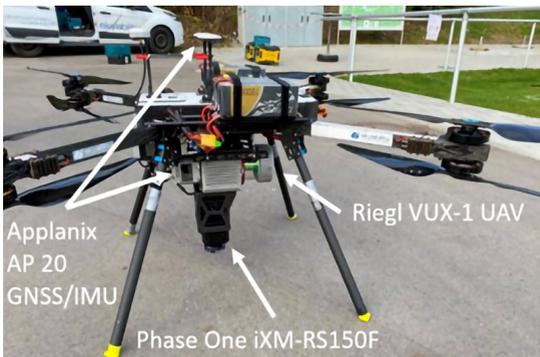


Abb. 2: Verwendete Plattform zur hybriden Erfassung von Bild- und LiDAR-Daten. UAV mit Riegl VUX-1 UAV-Scanner, Applanix AP 20 GNSS/IMU und Phase One iXM-RS150F Kamera

Abb. 2 zeigt das für die Befliegung im März 2021 genutzte Sensor-Setup. Dies besteht aus einem Riegl VUX-1 UAV-Scanner mit einer Applanix AP 20 GNSS/IMU Einheit und einer Phase One iXM-RS150F Kamera. Die entsprechenden Sensorparameter führten bei der Flughöhe über Grund zu einem LiDAR-Fußpunkt von weniger als 3 cm, die Dichte der LiDAR-Punktwolke lag bei 800 Punkten/m<sup>2</sup>. Die Auflösung (GSD) der Bilder betrug 3,7 mm. Durch gemeinsame Auswertung der Bild- und LiDAR-Daten im Rahmen einer hybriden Georeferenzierung wurde eine Genauigkeit der Punktwolke von wenigen Millimetern erreicht. Damit war sowohl die gute Ko-Registrierung der Bild- und LiDAR-Daten als auch die geometrisch exakte Überlagerung von Daten unterschiedlicher Epochen gewährleistet.

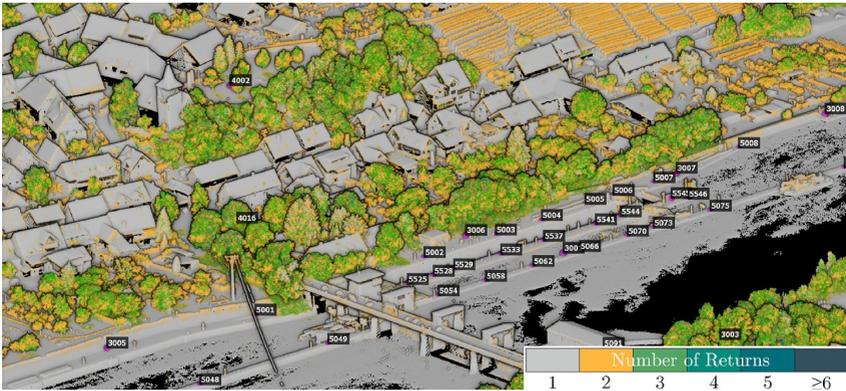


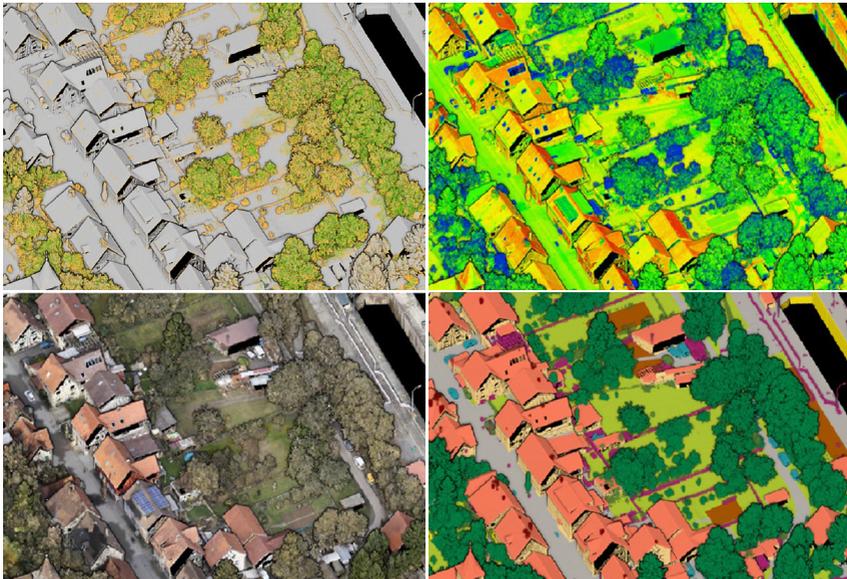
Abb. 3: Im Schiffsschleusenbereich erfasste LiDAR-Punktwolke; farbcodiert ist die Anzahl reflektierter LiDAR-Pulse (Number of Returns)

Abb. 3 zeigt die erfasste LiDAR-Punktwolke wobei sich die Farbkodierung der LiDAR-Punkte aus der Anzahl der reflektierten Pulse ergibt. Die vor allem im Schleusenbereich vorhandenen signalisierten Punkte, die zur hybriden Georeferenzierung der erfassten Bild- und LiDAR-Daten verwendet wurden, sind durch ihre jeweiligen Punktnummern markiert. Für eine Diskussion der dabei erreichten Genauigkeiten sei auf (Haala et al. 2022) verwiesen.

## 2.2 Merkmale der LiDAR-Daten und Objektklassen

Abb. 4 (oben) zeigt die LiDAR-inhärente Merkmale, die für jeden LiDAR-Punkt neben den 3D-Koordinaten zur Verfügung stehen. Während für die ausgesendeten LiDAR-Pulse bis zu sechs Echos aufgezeichnet werden, liegen an Mehrfachreflexionen vor allem zweite und dritte Echos vor. Diese sind in Abb. 3 und im oberen linken Bild der Abb. 4 durch die gelbe und grüne Farbe repräsentiert. Im oberen rechten Bild der Abb. 4 erfolgt die Farbkodierung aus den Reflektionswerten, die sich aus der entfernungskorrigierten Intensität des reflektierten Pulses ergeben. In Abb. 4 unten links sind die mit den RGB-Bildern der Kamera eingefärbten Punkte dargestellt. Abb. 4 unten rechts zeigt die aus dem manuellen Labeling bestimmten Klassenzugehörigkeiten, die schon zur Einfärbung in Abb. 1 genutzt wurden.

Wie in der dortigen Legende zu sehen wurden dabei 11 Klassen definiert: 0 = Niedrige Vegetation/Low Vegetation, 2 = Versiegelte Fläche/Impervious Surface, 3 = Fahrzeug/Car, 4 = Stadtmöblierung/Urban Furniture, 5 = Dach/Roof, 6 = Fassade/Facade 7 = Strauch, Hecke/Shrub, 8 = Baum/Tree, 9 = Offener Boden, Geröll/Gravel, 10 = Vertikale Fläche/Vertical Surface, 11 = Kamin/Chimney.



**Abb. 4:** Attribute der erfassten LiDAR-Punkte: Anzahl reflektierte Pulse (oben links), Reflektionswert (oben rechts), RGB-Farbwerte (unten links), gelabelte Objektklassen (unten rechts)

Die Klassenzugehörigkeiten für den Trainings-, und Validierungsbereich werden den Teilnehmern der Benchmark zur Verfügung gestellt, um dadurch die Parameter der eingesetzten Klassifikatoren zu trainieren. Diese Parameter werden dann für die Klassifizierung des Testbereichs genutzt. Diese Ergebnisse werden dann durch die Teilnehmer auf der Webseite der Benchmark hochgeladen und automatisch ausgewertet und bilden so die Grundlage der dort dargestellten Rangliste der eingereichten Ergebnisse (Hessigheim 3D 2022).

### 3 Semantische Segmentierung der Punktwolken

**Abb. 5** zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Klassifizierung der Testdaten mit einem Sparse Convolutional Network (SCN) auf Basis eines neuronalen Netzes (Schmohl und Sörgel 2019). Generell besitzen Deep Learning basierte End-to-End-Verfahren ein großes Potenzial für die semantische Segmentierung bzw. automatische Klassifizierung von Fernerkundungsdaten. Dies gilt vor allem für die automatische Interpretation von 2D-Bilddaten, da diese durch die mittlerweile sehr leistungsstarken faltende Neuronale Netze (Convolutional Neural Networks, CNN) bearbeitet werden können. Deep-Learning-Ansätze für die

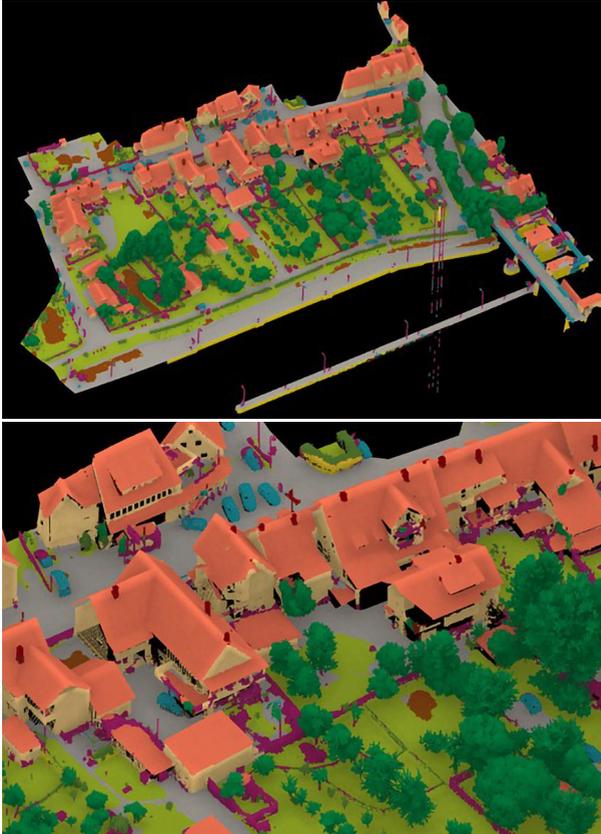


Abb. 5:  
Ergebnis der Klassifizierung für den Testbereich der LiDAR-Punktwolke, Epoche März 2018 (oben) und zugehörige Nahansicht (unten)

3D-Objekterkennung sind demgegenüber deutlich komplexer. Die verfügbaren Methoden basieren dabei beispielsweise auf 2D-Verfahren, die zunächst eine Projektion der Punktwolke durchführen oder der Transformation der Punkte in 3D-Voxelstrukturen, auf denen eine 3D-Faltung durchgeführt wird. Eine Übersicht findet sich beispielsweise in (Griffiths und Boehm 2019).

Die exemplarische Auswertung in [Abb. 5](#) durch ein SCN basiert auf einer Diskretisierung der Punktwolke in ein 3D-Voxelgitter. Diese wird anschließend durch ein faltendes Netzwerk analysiert (Schmohl und Sörgel 2019). Das Ergebnis der semantischen Segmentierung für den kompletten Testbereich ist in [Abb. 5](#) oben, das Ergebnis für einen kleineren Bereich im größeren Maßstab unten dargestellt. Neben einer solchen Darstellung, die vor allem die visuelle Repräsentation der Ergebnisse ermöglicht, wird zur Interpretation der Ergebnisse häufig eine sogenannte Konfusionsmatrix genutzt. Diese ist für das Verfahren in [Abb. 6](#) dargestellt. Dabei stellt jede Zeile der Matrix die Instanzen in einer

Predicted Label	Low Vegetation	.96	.07	.01	.07	0	.01	.08	0	.30	.03	0	.89
	Impervious Surface	.02	.90	0	.03	.01	.03	0	0	.36	.04	0	.86
	Car	0	0	.62	.05	0	0	0	0	0	0	0	.65
	Urban Furniture	0	0	.24	.65	.02	.09	.07	.01	.02	.12	.01	.51
	Roof	0	0	.06	.04	.96	.03	.01	0	0	0	.02	.98
	Facade	0	0	.01	.03	.01	.81	0	0	0	.05	0	.86
	Shrub	.01	0	.04	.08	0	.01	.73	.02	0	.01	0	.64
	Tree	0	0	.02	.02	0	.01	.09	.97	0	0	0	.97
	Gravel	.01	.02	0	0	0	0	0	0	.32	0	0	.76
	Vertical Surface	0	0	0	.02	0	.01	.01	0	0	.76	0	.81
	Chimney	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.97	.59
	<b>R</b>	.96	.90	.62	.65	.96	.81	.73	.97	.32	.76	.97	.88
	<b>F1</b>	.92	.88	.64	.57	.97	.83	.69	.97	.45	.78	.74	.77
		Low Vegetation	Impervious Surface	Car	Urban Furniture	Roof	Facade	Shrub	Tree	Gravel	Vertical Surface	Chimney	<b>P</b>

Abb. 6: Normalisierte Konfusionsmatrix des Ergebnisses der Klassifizierung des Deep Learning-basierten Ansatzes

vorhergesagten Klasse (predicted label) dar, während jede Spalte die Instanzen in einer tatsächlichen Klasse (true label) darstellt.

Die normalisierte Konfusionsmatrix zeigt beispielsweise, dass *Niedrige Vegetation/Low Vegetation* mit einem F1-Wert von 0,92 recht gut klassifiziert wird, wobei der Eintrag von 0,3 in der ersten Zeile auf eine potenziell große Verwechslungsgefahr mit der Klasse *offenere Boden, Geröll/Gravel* hindeutet. Gut erkannt wird auch die Klasse *Baum/Tree* mit einem F1-Wert von 0,97. Potenzielle Verwechslungsgefahr besteht mit der Klasse *Strauch, Hecke/Shrub*, da beide Klassen ähnliche RGB-Tupel aufweisen und eine raue Oberfläche besitzen. Trotz ebenfalls ähnlicher Merkmale gelingt die Klassifizierung von Baumpunkten recht gut, vermutlich aufgrund der ausgeprägten Multi-Echo-Fähigkeit des verwendeten LiDAR-Sensors. Demgegenüber stellt sich die Objektklasse *Offener Boden, Geröll/Gravel* als sehr schwieriges Beispiel dar. Hier besteht beispielsweise große Verwechslungsgefahr mit der Klasse *Versiegelte Fläche/Impervious Surface*. Die schon erwähnte Verwechslungsgefahr mit der Klasse *Niedrige Vegetation* entsteht vor allem dadurch, dass die Befliegung im März stattfand. Zu dieser Jahreszeit treten auch in an sich grünen Vegetationsbereichen braune Farbtöne auf. Sowohl Abb. 5 als auch Abb. 6 weisen zudem auf Probleme bei der Erkennung von Fassaden hin. Hier verursachen Balkone mit deren Handläufen oder Gartenmöbeln jeweils Abweichungen von den an sich glatten Fassadenstruktur. Solche

Punkte werden häufig als *Stadtmöblierung/Urban Furniture* klassifiziert. Wie die Einträge für diese Klasse in der Konfusionsmatrix zeigen, sind LiDAR-Punkte dieser Klasse über viele anderen Klassen verteilt. Damit dient die Klasse *Stadtmöblierung/Urban Furniture* quasi als Klasse *Sonstiges*. In diesem Zusammenhang sei auch das erheblichen Verwechslungspotenzial der Klasse *Fahrzeug/Car* mit *Stadtmöblierung* erwähnt, das sich zum einen durch die große Farbvielfalt beider Klassen erklären lässt und zudem durch Objekte wie mit Planen bedeckte Holzstapeln verstärkt wird, die im Testgebiet in einigen Gärten zu finden sind.

## 4 Diskussion

Eine tiefgehende Diskussion der im vorigen Abschnitt vorgestellten Ergebnisse sowie Resultate der semantischen Segmentierung für ein klassisches Verfahren findet sich in (Kölle et al. 2021). Dieses Verfahren nutzt vordefinierte Merkmale, die sich aus der räumlichen Verteilung der LiDAR-Punkte ergeben (Weinmann et al. 2015) zur semantischen Segmentierung mit einem Random Forest Klassifikator (Breimann 2001). Der Vergleich beider Ansätze zeigt, dass im Vergleich zur Segmentierung von Bildern bei der Segmentierung von Punktwolken Deep Learning Verfahren für die Merkmalsberechnung nur vergleichsweise geringe Vorteile bringen. Ein Grund dafür ist, dass die Matrixstruktur von Bildern unmittelbar für die Interpretation von CNN zugänglich ist, während die Analyse von 3D-Punktwolken durch solche Methoden deutlich komplexere Verfahren erfordern.

Ein weiterer Grund für die vergleichsweise hohe Schwierigkeit der vorgestellten semantischen Segmentierung von Punktwolken ist, dass den zu interpretierenden UAV-Daten keine geschlossenen Welten zugrunde liegen. Im Vergleich dazu basieren Standard-Benchmarks wie die ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge auf vordefinierten Kategorien, wobei für jede dieser Kategorien mehrerer Hundert Beispielbilder zur Verfügung stehen. Hochaufgelöste 3D-Punktwolken bebauter Gebiete repräsentieren demgegenüber eine sehr große Anzahl heterogener Objekttypen, für die häufig nur wenige Beispiele für das Training zur Verfügung stehen. Die Bereitstellung einer ausreichenden Menge von gelabelten Trainingsdaten ist ein generelles Problem von Machine Learning Verfahren und häufig mit einem hohen Zeitaufwand und damit Kosten verbunden. So betrug der Aufwand für das manuelle Labeln der 3D-Punktwolke der Hessigheim 3D Benchmark 1490 Arbeitsstunden. Aktuelle Forschungsarbeiten zielen aus diesem Grund auch auf die effektive Erfassung von Trainingsdaten beispielsweise durch Active Learning (Kölle et al. 2022).

Insgesamt zeigen jedoch auch die vorgestellten Untersuchungen, dass die automatische Interpretation von UAV-Punktwolken trotz der verbleibenden

Einschränkungen ein beachtliches Anwendungspotenzial erreicht hat, das sich aufgrund des derzeit sehr dynamischen Forschungsumfelds sicher noch weiter erhöhen wird.

## Literatur

- Breiman, L., (2001): Random forests. *Mach. Learn.* 45 (1), 5–32. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324>.
- Griffiths, D., Boehm, J. (2019): A Review on Deep Learning Techniques for 3D Sensed Data Classification. *REMOTE SENSING*, 11 (12), ARTN 1499. DOI: [10.3390/rs11121499](https://doi.org/10.3390/rs11121499).
- Haala, N., Köfle, M., Cramer, M., Laupheimer, D., Zimmermann, F. (2022): Hybrid georeferencing of images and LiDAR data for UAV-based point cloud collection at millimetre accuracy, *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 100014, ISSN 2667-3932. DOI: [10.1016/j.ophoto.2022.100014](https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2022.100014).
- Hessigheim 3D (2022): Webseite der H3D Benchmark. <https://ifpwww.ifp.uni-stuttgart.de/benchmark/hessigheim/default.aspx>, letzter Zugriff 12/2022.
- Köfle, 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*, Vol 1, 2021, ISSN 2667-3932. DOI: [10.1016/j.ophoto.2021.100001](https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2021.100001).
- Köfle, M., Walter, V., Soergel, U. (2022), Learning from the Past: Crowd-Driven Active Transfer Learning for Semantic Segmentation of Multi-Temporal 3d Point Clouds, *ISPRS Ann.*, vol. 52, 259–266, 2022. DOI: [10.5194/isprs-annals-V-2-2022-259-2022](https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-2-2022-259-2022).
- Laupheimer, D., Haala, N. (2021): Juggling with Representations: On the Information Transfer Between Imagery, Point Clouds, and Meshes for Multi-Modal Semantics, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 176 (2021), 55–68. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2021.03.007](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.03.007).
- Schmohl, S., Sörgel, U. (2019): Submanifold sparse convolutional networks for semantic segmentation of large-scale ALS point clouds. *IV-2/W5 ISPRS Annl.* 77–84.
- Weinmann, M., Jutzi, B., Hinz, S., Mallet, C. (2015): Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers. *ISPRS J.* 105, 286–304.

## Kontakt

Prof. Dr. Norbert Haala  
Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart  
Geschwister-Scholl-Straße 24, 70174 Stuttgart  
[norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de](mailto:norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de)



# Objektdetektion und -klassifikation mit Hilfe hochaufgelöster UAV-Daten und maschinellem Lernen: Anwendungen in Risikogebieten und im Forst

Peter Krzystek | Sebastian Briechle | Sebastian Dersch | Norbert Molitor

## 1 Einleitung

### 1.1 Vergleich Koptersysteme und Fixedwings

RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) oder auch UAV (Unpiloted Aerial Vehicles) werden zunehmend zur hochgenauen Geodatenerfassung eingesetzt. Unter Verwendung von miniaturisierten optischen Sensoren (RGB, Multispektral, Hyperspektral) und Laserscannern (LiDAR) können Geoobjekte detailgetreu auf kleinen Flächen erfasst werden. Im Vergleich zu herkömmlichen flugzeuggestützten Plattformen sind RPAS kostengünstiger und zeichnen sich durch eine bessere Manövrierfähigkeit aus. Weiterhin eignen sie sich hervorragend bei schnellen Einsätzen nach Katastrophen oder dem Monitoring von Gefahrenstellen. Nachteilig sind bei elektrotriebenen Systemen die begrenzte, von der Nutzlast und den Flugbedingungen stark abhängige Flugzeit (bei Koptersystemen max. nur 15 bis 20 min) und fehlende Sicherheitsprozeduren.

Zurzeit sind Koptersysteme die tragende Säule der öffentlich zugänglichen UAV-Technik (Canis 2015). Die durchaus komplexe Flugregelung ist von vielen Seiten gelöst worden und die Bedienung dieser Kopter ist auch für ungeübtes Personal äußerst bequem. Da aber bei Koptersystemen grundsätzlich das gesamte Gewicht durch Schub, plus Reserve, aufgebracht werden muss, sind hier eindeutige physikalische Nachteile gegeben. Selbst mäßig konstruierte Flächenflugzeuge erreichen ein Gewicht-zu-Schubverhältnis von 1:20 und haben daher einen enormen Vorteil. Auch sind Flächenflugzeuge wegen höherer Fluggeschwindigkeiten wesentlich besser geeignet größere Strecken zu überwinden. Der Nachteil ist aber der große Raumbedarf bei Start und Landung und es werden auch höhere Fähigkeiten dem Bedienungspersonal abverlangt. Einige Systeme verbinden beide Vorteile als sogenannte VTOL (Vertical Take Off and Landing) Systeme. Dabei werden z. B. Rotoren geschwenkt und es wird bei genügender Höhe vom Helikoptermodus in den Flächenflugmodus übergegangen. Während der Landung verhält sich dies umgekehrt. Auf jeden Fall wird aber

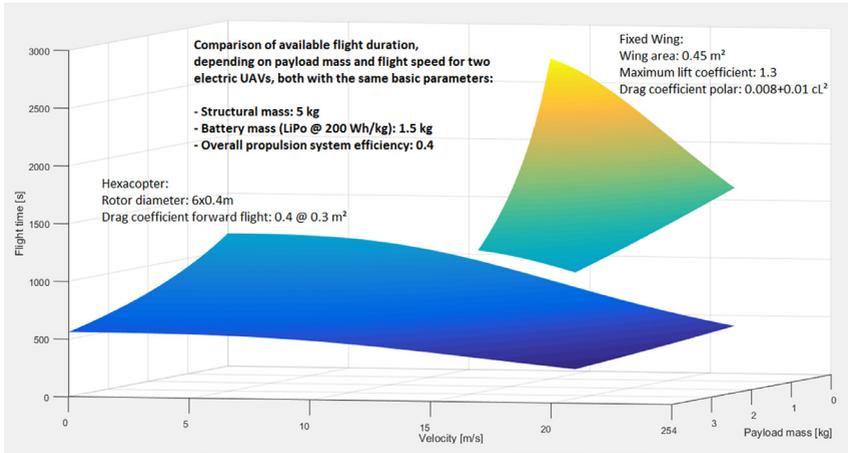


Abb. 1: Abhängigkeit der Flugzeit eines Hexakopters und Fixedwings von Payload und Geschwindigkeit

viel Energie in der Startphase aufgebracht. Bei normalen Flächenflugzeuge werden Winden und Gummiseilstartverfahren zum Starten genutzt. Diese sind aber aufwendig und bergen gewisse Gefahren in sich. Die Energieersparnis ist aber enorm und beträgt geschätzte 15 % bei einer einstündigen Mission (Abb. 1).

## 1.2 Einsatz von UAVs in Katastrophen- und Risikobereichen

Typische Beispiele für Anwendungsszenarien von UAVs in Katastrophen- und Risikobereichen sind Überschwemmungen, Windbrüche, Waldbrände, Erdbeben, Hangrutschungen oder das Austreten von gefährlichen Wirkstoffen sowie die Ablagerung von kontaminierten Objekten. Genaue und schnelle Schadenserhebungen mit Hilfe von optischen Satellitendaten scheitern häufig wegen der Wolkenbedeckung und der beschränkten Bodenauflösung. Wolkenunabhängige satellitengestützte Radardaten erlauben oftmals keine detaillierte Schadensabschätzung. Daher werden UAV-gestützte optische und aktive Sensorsysteme zunehmend für die kurzfristige und detaillierte Schadensermittlung eingesetzt (iRevolutions 2014a, iRevolutions 2014b).

Einen Sonderfall stellt die Kartierung des Außenbereichs eines Kernkraftwerks nach einem GAU-Störfall dar. Der Unfall von Tschernobyl im Jahr 1986 führte zu einer radioaktiven Verseuchung großer Gebiete mit erheblichem radioaktivem Niederschlag (Abb. 2). Rund um das Kernkraftwerk (KKW) Tschernobyl wurde nach dem Unfall die Sperrzone Tschernobyl (Chornobyl Exclusion Zone, ChEZ) mit einer Gesamtfläche von etwa 2400 km<sup>2</sup> eingerichtet (Abb. 3).

### Surface Contamination in the Chernobyl Exclusion Zone with Cs-137 (as of 1997)

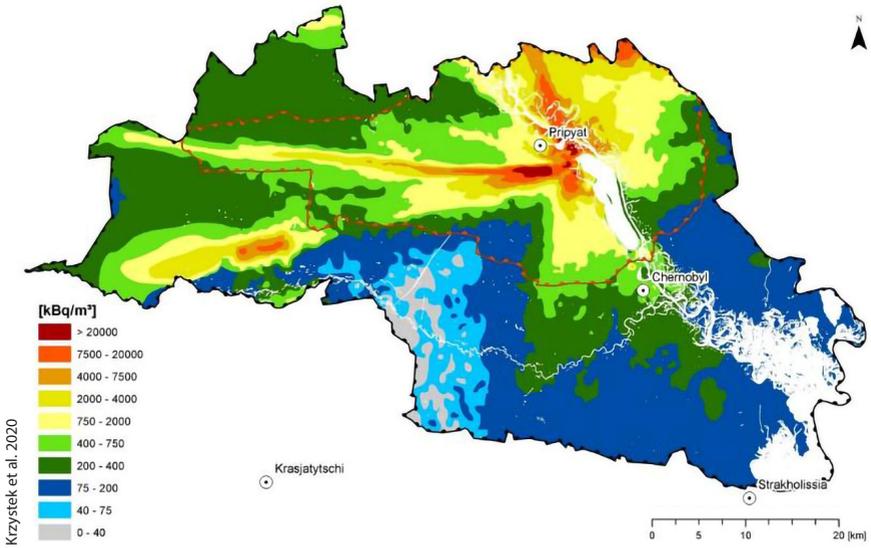


Abb. 2: Kontamination der Sperrzone durch Cäsium-137 ab 1997 (Daten aus der GIS-Datenbank des CRWME)

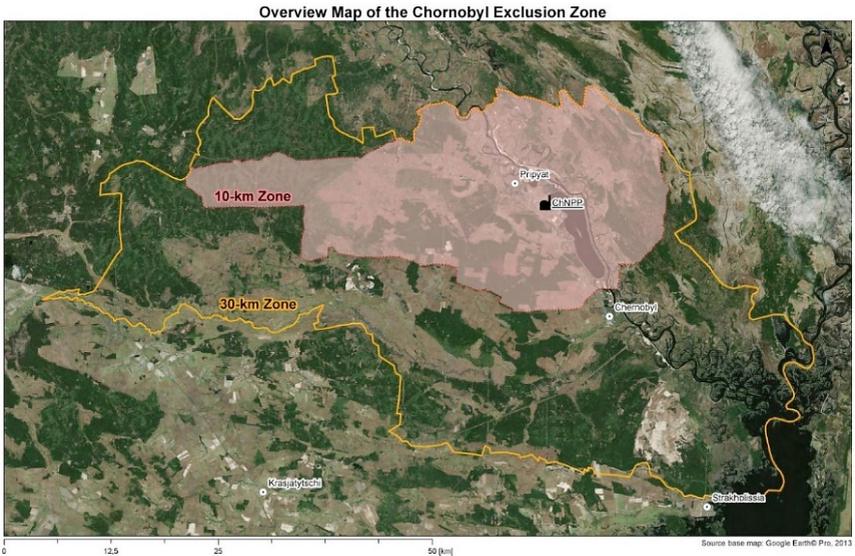
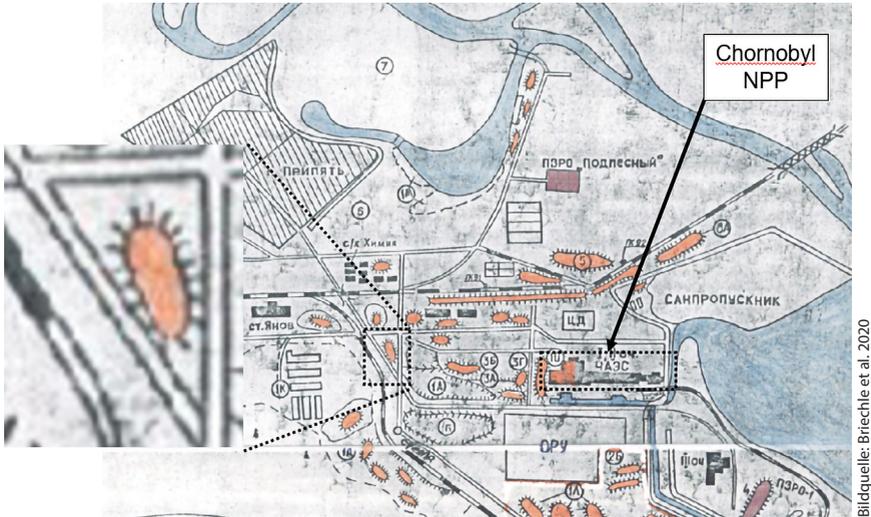


Abb. 3: Ausdehnung und Grenzen der Sperrzone von Tschernobyl im Jahr 2018



Bildquelle: Brechle et al. 2020

Abb. 4: Historische Karte der Standorte radioaktiver Abfälle

In insgesamt neun Zwischenlagern für radioaktive Abfälle (RWTSP) wird bislang eine große Menge an kontaminiertem Material gelagert, das aus den Aufräumarbeiten in den ersten Monaten nach dem Unfall stammt. Darüber hinaus wurden radioaktive Abfälle in drei Endlagerstätten für radioaktive Abfälle (RWDS) eingelagert. Die RWTSP und RWDS befinden sich innerhalb des höher kontaminierten zentralen Bereichs der CheZ in der Nähe des KKW.

In der RWTSP befinden sich rund 800 Vergrabungen, die radioaktives Material wie Erde, Pflanzen oder Bauschutt enthalten. Da die Vergrabung des radioaktiven Materials in kurzer Zeit und unter den Bedingungen der Unfallabwicklung erfolgen musste, ist eine vollständige Dokumentation der Mengen, der Radionuklidinventare und der genauen Positionen der Altlagerstätten nicht bekannt. Diese wurden lediglich mit einer 0,1 bis 0,5 m dicken, sauberen Bodenschicht bedeckt.

Die Sanierungsmaßnahmen trugen dazu bei, die externe Expositionsleistung um einen Faktor von etwa 10 zu verringern. Die RWTSP wurden teilweise neu bepflanzt, hauptsächlich mit Kiefern und Birken, um die Oberflächenabdeckung zu stabilisieren und die Auswirkungen der Resuspension kontaminierter Staubpartikel durch den Wind zu verringern. Das Vergraben des radioaktiven Materials führte jedoch zu einem höheren Risiko der Grundwasserkontamination sowie zu einer riskanten Bioaufnahme von Radioaktivität durch die in Altlagerstätten gepflanzten Baumarten.

Da diese unter extremem Zeitdruck angelegt wurden, gibt es keine detaillierte Dokumentation der RWTSP. Lediglich ungenaue Karten, die während oder

nach den Liquidationsarbeiten auf der Grundlage der Erinnerungen der Liquidatoren erstellt wurden, weisen auf mögliche Altlagerstätten hin (Abb. 4). Daher sind ein umfassender Überblick und eine genaue Kartierung der Altlagerstätten erforderlich, um die Sicherheit bei der Instandhaltung zu verbessern und eine endgültige Sanierung der Vergrabungen zu ermöglichen. Trotz der Dekontamination der Hauptverkehrswege gibt es noch vereinzelte Hotspots, an denen die Cs-137-Strahlung für einen Menschen über einen längeren Zeitraum unzumutbar hoch wäre (Abb. 5 und Abb. 6). Andererseits sind die einzelnen Bäume zu zusätzlichen Strahlungsquellen geworden. Um das Sperrgebiet langfristig wieder bewohnbar zu gestalten, wurde eine vollständige Kartierung der Lagerstätten und der Vegetation benötigt. Diese Information kann für die geplanten Sanierungskonzepte und die Simulation von Waldbränden und Tornados genutzt werden.

Bildquelle: Peter Krzystek



**Abb. 5:**  
Stark kontaminiertes Waldgebiet im roten Wald

Bildquelle: Norbert Molitor



**Abb. 6:**  
Gut sichtbares Biomassegrab im roten Wald

Neben den üblichen Techniken wie der Gammaskpektrometrie aus der Luft und der visuellen Bodeninspektion schienen UAV-gestützte Fernerkundungsmethoden eine sichere und präzise Alternative zu sein, um die mehreren hundert unbekannt radioaktiven Vergrabungsstätten aufzuspüren. Insbesondere Laserscanning kam in die engere Wahl, da dieses optische Messverfahren auch Nadelbaumbereiche mit 20 % durchdringen und daher flächendeckend Absenkungen detektieren können.

### 1.3 Detektion und Klassifizierung von Einzelbäumen in Forstbereichen

Waldmonitoring aus der Luft wird in der Regel mit Flugzeugen oder Hubschraubern durchgeführt. Der Einsatz von UAVs ist bisher auf kleinere Gebiete beschränkt, da Drohnenflüge ohne Sondergenehmigung nur im Sichtflug stattfinden können. Aufgrund der geringen Flughöhe können Drohnenflüge eine extrem hohe Auflösung der aufgenommenen Daten erreichen und bieten damit die Möglichkeit, Waldstrukturen sehr detailliert zu erfassen. Für ein Waldmonitoring werden typische Baumattribute wie Baumposition, Höhe, Baumart, Kronenbasishöhe, Brusthöhdurchmesser (BHD), Kronenvolumen, Verjüngungsgrad und die räumliche Verteilung stehender oder abgestorbener Bäume benötigt.

In den letzten Jahren hat die Verwendung von leistungsstarken Deep Learning (DL) Methoden als Segmentierungs- und Klassifizierungswerkzeuge ein großes Interesse geweckt, da sie Standardansätze des maschinellen Lernens in verschiedenen Aufgaben (Voulodimos et al. 2018) übertreffen. Der größte Vorteil dieser tiefen neuronalen Netzwerke (DNNs) liegt in dem Repräsentationslernen, das die automatische Extraktion von Merkmalen als Teil des Trainingsprozesses charakterisiert (LeCun et al. 2004). Für das Szenenverständnis aus unregelmäßigen und ungeordneten 3D-Punktwolken skizzieren Griffiths und Boehm (2019) vier allgemeine Arten von DL-Ansätzen. Zum einen untersuchten die Autoren Methoden, die entweder Multiview-Bilder rendern (Qi et al. 2016) oder Eingabedaten in RGB-Tiefenbilder transformieren (Zhou et al. 2018). Daher können bewährte und effiziente neuronale 2D-Faltungnetze (CNNs) wie z. B. AlexNet (Krizhevsky et al. 2012), VGG (Simonyan und Zisserman 2015) und ResNet (He et al. 2015) eingesetzt werden. Andererseits diskutierten die Autoren volumetrische Ansätze, die rohe 3D-Daten als regelmäßige 3D-Voxel-Gitter diskretisieren und anschließend 3D-Faltungen verwenden, um sinnvolle Informationen zu extrahieren (Zhou und Tuzel 2018). In jüngster Zeit wurden auchleistungsfähige Netzwerkarchitekturen wie PointNet++ (Qi et al. 2017) und PointCNN (Li et al. 2018) entwickelt. Diese 3D-DNNs ermöglichen die direkte Eingabe von

rohen und unstrukturierten Punktwolken und vermeiden eine vorherige Rasterung oder Voxelisierung. Daher ermöglichen sie eine End-to-End-Klassifikation von 3D-Punktwolken.

In letzter Zeit haben DL-basierte Ansätze in der Fernerkundung und insbesondere in der Forstwirtschaft wegen der Aussicht auf eine bessere Genauigkeit zunehmend Aufmerksamkeit erlangt. Mehrere Studien weisen nach, dass Methoden zur Klassifizierung von Baumarten mit Hilfe von MS-Bildern und LiDAR eine Gesamtgenauigkeit von über 90 % erreichen. Auch im Bereich der Segmentierung von Einzelbäumen mittels Deep Learning gibt es neue, vielversprechende Ansätze, die eine Instanzsegmentierung – also eine Kombination aus einer ein- oder zweistufigen Objektdetektion mit einer semantischen Klassifikation – verwenden. Die in den relativ kleinen Forstflächen mittels DL-Ansätzen gewonnene Information kann auf größere Gebiete übertragen werden. Zum Beispiel können die mittels UAV-Daten detektierten Baumsegmente als Referenzpolygone verwendet werden, um DL-basierte Methoden auf der Großfläche zu validieren.

## 1.4 Beitrag des Papers

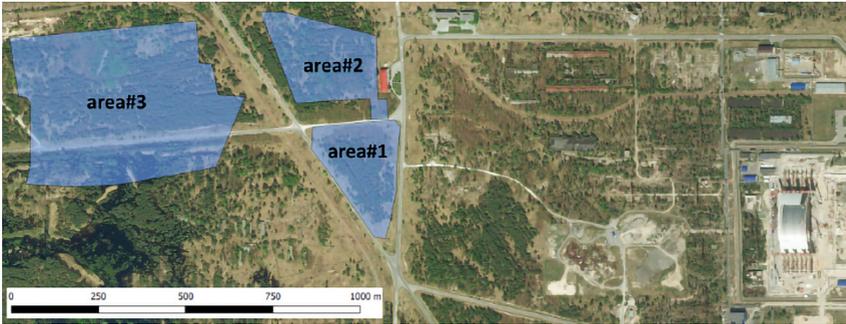
Dieser Beitrag gibt einen Überblick über die Datenerfassung, die Feldmessungen und die Methodik, die für die Erkennung von radioaktiven Vergrabungsstätten in ChEZ entwickelt wurden. Dabei zeigen wir, dass neue Werkzeuge des maschinellen Lernens und Deep Learnings vorteilhaft eingesetzt werden können, um aus den Fernerkundungsdaten die benötigte Information abzuleiten (Abschnitt 2). Im zweiten Teil des Papers (Abschnitt 3) präsentieren wir Ansätze zur Baumsegmentierung, die ebenfalls neuartige Methoden des Deep Learning nutzen.

# 2 Detektion von radioaktiven Vergrabungsstätten in Tschernobyl

## 2.1 Daten und Material

### 2.1.1 Gebiet

Die Versuche wurden in drei Untersuchungsgebieten mit einer Gesamtfläche von 37 ha durchgeführt (Briechle et al. 2020). Sie befinden sich etwa 1,5 km westlich des KKW in den Gebieten RWTSP Red Forest und RWTSP Yanov



Bildquelle: Brieche et al. 2020  
Bildquelle der Grundkarte: Bing map Microsoft Corp.

Abb. 7: Untersuchungsgebiete in ChEZ

Station (Abb. 7). Mit einer Baumdichte von etwa 400 Bäumen/ha sind alle drei Untersuchungsgebiete dicht bewachsen. Die wichtigsten Baumarten sind Silberbirke (*Betula pendula*), Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) und Schwarzerle (*Alnus glutinosa*) mit Baumhöhen von bis zu 30 m.

### 2.1.2 Drohnenbasierte Erfassung von Laserdaten und multispektralen Bildern

In den Untersuchungsgebieten wurden Laserdaten mit einem YellowScan Mapper I Laserscanner in einer Flughöhe von rund 50 m und einer Geschwindigkeit von 6 m/s erfasst. Die Batterien des Oktokopters garantierten eine Einsatzzeit von ca. 20 min. Eine Ausgleichung der LiDAR-Streifen (Software Stripalign) sorgte für eine perfekte Passung in den sich überlappenden Bereichen mit maximalen Abweichungen von ca. 5 cm. Aufgrund der 50%igen Überlappung der Streifen betrug die endgültige durchschnittliche Punktdichte der LiDAR-Punktwolke 120 Punkte/m<sup>2</sup>.



Abb. 8:  
Mica Sense RedEdge-  
Multispektralkamera  
und Octokopter

Zusätzlich wurden mit zwei MicaSense RedEdge-Kameras Multispektralbilder aufgenommen. Beide Kameras erfassten fünf Spektralbänder zwischen 475 nm und 840 nm. Die SfM-Software Metashape wurde zur Schätzung des Kameramodells und zur Georeferenzierung der Bilder verwendet. Der mittlere Fehler bei der Rückprojektion betrug im Mittel 1,3 Pixel. Die resultierende photogrammetrische Punktwolke wies eine Punktdichte von etwa 80 Punkten/m<sup>2</sup> auf. Da in den kontaminierten Gebieten keine Kontrollpunkte gemessen werden konnten, wurde die photogrammetrische Punktwolke mit der LiDAR-Punktwolke koregistriert (mittlerer quadratischer Fehler 0,237 m). [Abb. 8](#) und [Abb. 9](#) zeigen die Drohne und die montierten Sensoren.



[Abb. 9:](#)  
YellowScan Mapper I  
Laserscanner und  
zwei multispektrale  
RedEdge-Kameras

## 2.2 Methoden

### 2.2.1 Baumartenklassifikation

Zunächst wurden in den drei Gebieten eine Baumsegmentierung unter Verwendung der Laserpunktwolken berechnet. Hierzu wurde das bekannte Normalized Cut Clusterverfahren angewendet (Reitberger et al. 2009). Das Verfahren liefert pro Baum eine segmentierte Punktwolke und weitere Baumattribute wie Baumhöhe, Baumposition, Kronenansatzhöhe und Kronendurchmesser ([Abb. 10](#)). Anschließend wurden 2D-Darstellungen der Einzelbäumen generiert. Zum einen wurden maskierte Bilder der Bäume aus der Vogelperspektive erzeugt. Hierfür wurden multispektrale Orthophotos verwendet. Zusätzlich zu den MS-Bildern wurden mehrere Seitenansichten aus den segmentierten 3D-LiDAR-Punktwolken einzelner Bäume berechnet, die die Silhouetten der Bäume darstellen. Weiterhin wurden diese Bilder mit Laserintensitäten angereichert. Insgesamt wurden zwei Arten von Bildsätzen erstellt. Eine mit

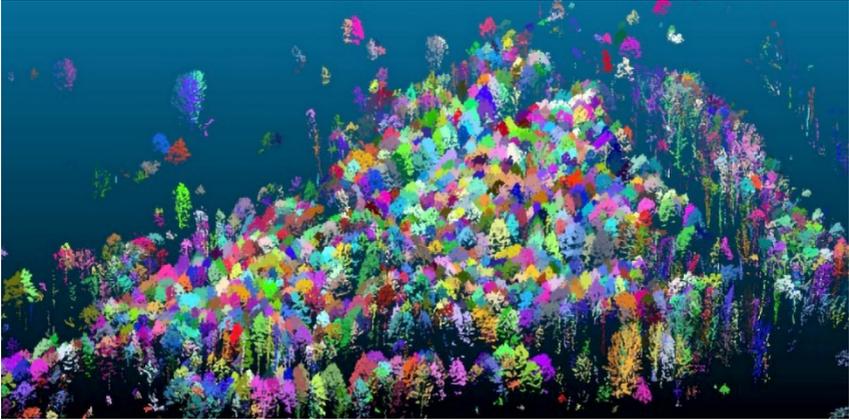
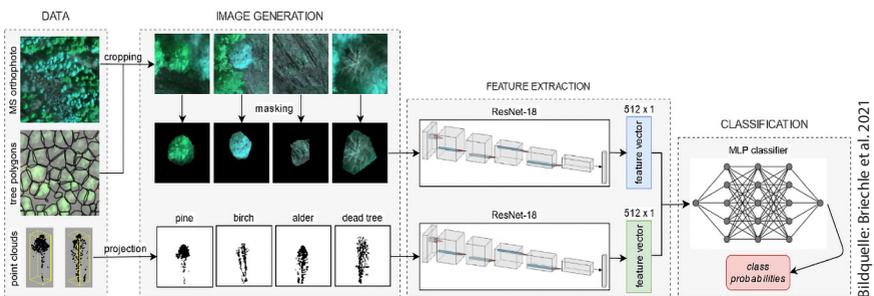


Abb. 10: Ergebnis der Baumsegmentierung im Untersuchungsgebiet Nr. 1

12 Einzelbildern pro Baum und eine mit einer Bildcollage, die alle 12 Seitenansichten pro Baum umfasst.

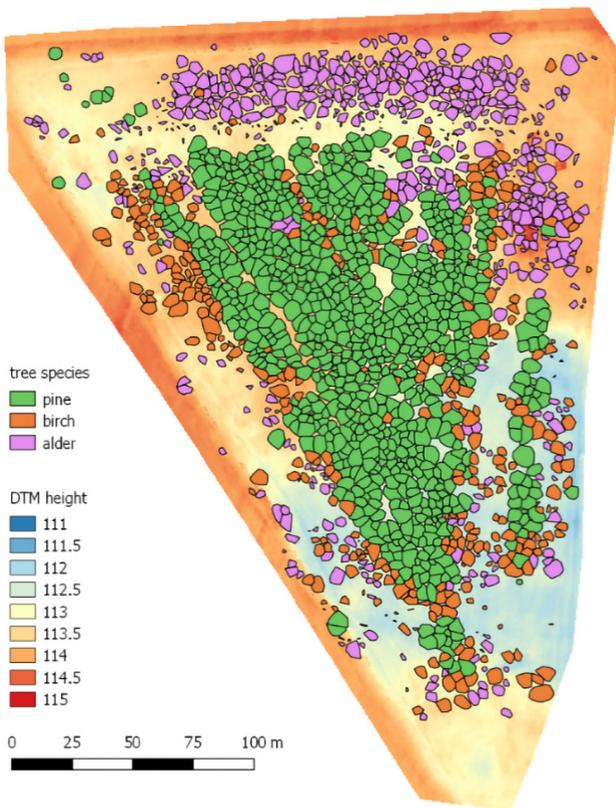
Nach der Bilderzeugung wurden Merkmale automatisch mit zwei unabhängig voneinander trainierten ResNet-18-Modellen extrahiert, die sowohl für MS- als auch für Seitenansichtsbilder optimiert wurden. Hierbei wurde die Idee des Transfer-Lernens und die Verwendung von vortrainierten Gewichten angewandt. Insgesamt wurden 512 Merkmale pro Seitenansicht und weitere 512 Merkmale aus jedem MS-Bild extrahiert. Anschließend wurden die Merkmalsvektoren fusioniert und in einem mehrschichtigen Perzeptron (MLP) verwendet. Das MLP lieferte nach dem Training die Klassenwahrscheinlichkeiten für jedes Sample (Abb. 11) (Briechle et al. 2021).

Im Rahmen der Experimente wurden für drei Baumarten Pinie, Birke, Erle und die Baumklasse Tote Pinie jeweils 94 Bäume für das Training, 23 Bäume für die Validation und 51 Bäume für das Testing verwendet. Die besten Genauigkeiten ergaben sich, wenn man sowohl die Laserintensität und die multi-



Bildquelle: Briechle et al. 2021

Abb. 11: Prinzip der Baumartenklassifikation mit Silvi-Net



Bildquelle: Krzystek et al. 2020

**Abb. 12:**  
Karte der Baumartenverteilung im Untersuchungsgebiet Nr. 1 (Area #1)

spektralen Daten zur Anreicherung der Bilddaten verwendete. Die F1-Scores erreichten Spitzenwerte von 93 % bis 99 %. Details der Untersuchungen finden sich in Briechle et al. (2020). [Abb. 12](#) zeigt eine Baumartenkarte für das Gebiet 1.

### 2.2.2 Detektion der Altlagerstätten

Die Methode für die Erkennung der Altlagerstätten ist in [Abb. 13](#) dargestellt. Merkmale wurden für jede DGM-Zelle aus (i) den segmentierten Baumpunktwolken (= LiDAR-Metriken (LM) = {höhen- und dichteabhängige Merkmale für zehn verschiedene Baumhöhenschichten}), (ii) aus einer Baumartenkarte (= Baummerkmale (TF) = {Anzahl der Baumarten in der lokalen Umgebung; Mittelwert und Standardabweichung der Parameter Baumhöhe, Brusthöhdurchmesser, Kronenvolumen, Häufigkeit der Baumarten in der lokalen Nachbarschaft; Klassenwahrscheinlichkeiten für jede Baumart, Baumgrundfläche,

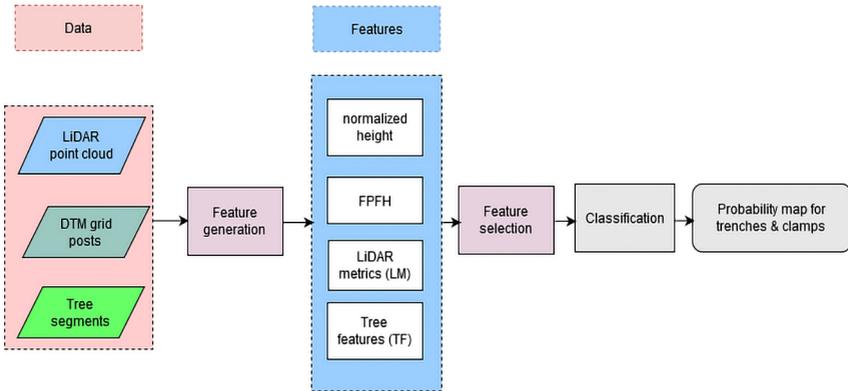


Abb. 13: Flussdiagramm der Methode zur Erkennung von Altlagerstätten

Kronendurchmesser}), und (iii) aus dem DGM (normalisierte DGM-Höhen  $h_{norm}$  und Fast-Feature-Point-Histograms (FPFH). Bei den FPFHs handelt es sich um lokale Formdeskriptoren, die zur Charakterisierung verschiedener geometrischer Formen wie Ebenen, Zylinder oder Kugeln nützlich sind (Rusu et al. 2009).

Insgesamt umfasste die Merkmalsliste 186 Elemente. Ein RandomForest (RF) Klassifikator wurde anhand von 70 % der manuell editierten Daten trainiert, die Bereiche von Altlagerstätten darstellen. Dabei wurde die lange Merkmalsliste deutlich reduziert (zehn Merkmale für jedes Untersuchungsgebiet), um eine Verschlechterung der Klassifikationsgenauigkeit zu vermeiden. Eine Analyse der zehn auffälligsten Merkmale ergab, dass die normalisierte Höhe  $h_{norm}$  und die FPFHs für jedes Untersuchungsgebiet am häufigsten vorkommen. Wir konnten auch nachweisen, dass einige der baumspezifischen TFs zur Klassifizierung beitrugen. Im Untersuchungsgebiet Nr. 1 lag die mittlere Kronenbasishöhe an vierter Stelle, während der Mittelwert und die Standardabweichung der Baumhöhe in den fünf wichtigsten Merkmalen des Untersuchungsgebiets Nr. 2 zu finden waren.

### 2.3 Ergebnisse

Die Prüfung der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen RF-Klassifikatoren ergab eine Gesamtgenauigkeit in den einzelnen Untersuchungsgebieten zwischen 97 % und 99 %. Die Anwendung des trainierten Klassifikators von Untersuchungsgebiet Nr. 1 auf den Datensatz von Untersuchungsgebiet Nr. 2 führte zu einer Gesamtgenauigkeit von 94 % und einem Kappa-Wert von 0,45. Aufgrund der begrenzten Zuverlässigkeit des RWTSP-Referenzdatensatzes erkannte der Klassifikator von

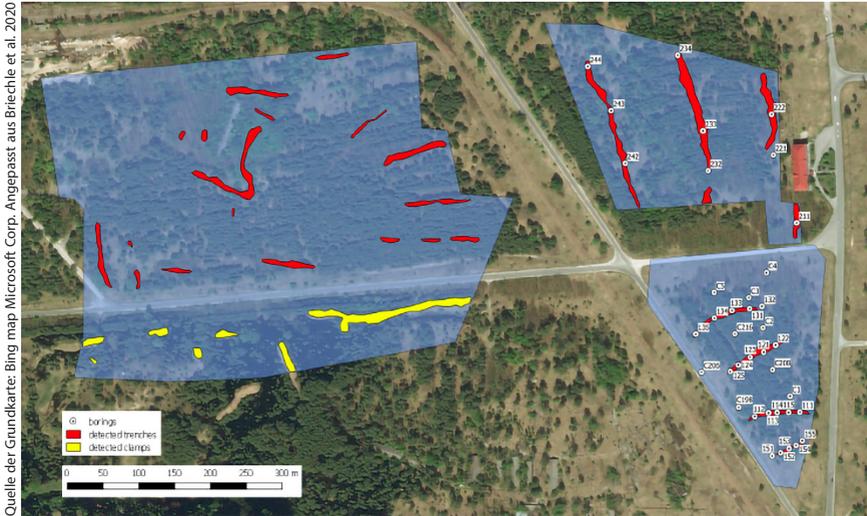


Abb. 14: Entdeckte Vergrabungsstätten und durchgeführte Testbohrungen in den Untersuchungsgebieten

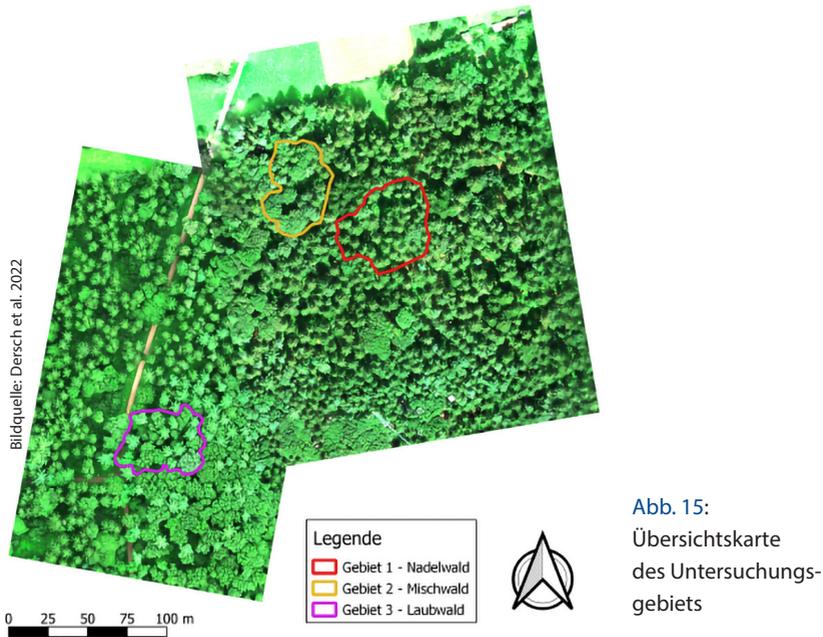
Untersuchungsgebiet Nr. 3 die Gräben in diesem Gebiet mit einer Gesamtgenauigkeit von 65 % und einem Kappa-Wert von 0,48 (siehe Briechle et al. 2020). Abb. 14 zeigt die erkannten Altlagerstätten in den drei Untersuchungsgebieten.

Insgesamt wurde bei 25 Bohrungen die Existenz und bei 9 Bohrungen das Nichtvorhandensein von vergrabenen radioaktiven Stoffen festgestellt. Dies entspricht einer Gesamtgenauigkeit von 89,5 %. In vier Fällen befanden sich die falsch-negativen Testbohrungen 9 m von den entdeckten Gräben entfernt. Das bedeutet, dass der Klassifikator 10,5 % der Flächen fälschlicherweise als nicht kontaminiert eingestuft hat (Briechle et al. 2020).

### 3 Deep Learning basierte Baumdelineierung mit Hilfe der Instanzsegmentierung Mask R-CNN

#### 3.1 Daten und Material

Das Testgebiet dieser Untersuchungen liegt im Forstbereich in der Nähe des Forschungsgebiets des Kranzberg Forest Roof Experiment (KROOF) im oberbayerischen Landkreis Freising. Dieses Waldareal ist geprägt von einer Mischwaldstruktur und steht unter Verwaltung der Bayerischen Staatsforsten (siehe Abb. 15).



Als Referenzobjekte wurden ausschließlich dominante Bäume verwendet. Das Referenzgebiet für die Baumart Nadelwald (Referenzgebiet 1), umfasst 55 Bäume mit einer Baumdichte von 226 Bäumen/ha. Referenzgebiet 2 beinhaltet ein Mischwaldwaldareal mit 36 Bäumen. Das Mischwaldgebiet beinhaltet zu 60 % Nadelbaum sowie zu 40 % Laubbaumstrukturen. Die Baumdichte entspricht 191 Bäumen/ha. Im von Laubbaumstrukturen dominierten Referenzgebiet 3 sind 34 Bäume enthalten. Die Baumdichte beträgt 185 Bäume/ha. Das Trainingsgebiet umfasst 167 Bäume. Die Baumdichte im Trainingsgebiet entspricht 243 Bäume/ha. Im Validierungsgebiet betrug die Baumdichte 262 Bäume/ha.

Multispektrale Luftbildaufnahmen wurden im August 2020 und Juli 2021 mit einer RedEdge MX Dual Kamera aufgenommen, die an einem Hexacopter (DJI M600 Pro) montiert war. Das Kamerasystem erfasste zehn Kanäle (Spektralbereich 475 bis 842 nm) mit einer Brennweite von 5,5 mm und einem horizontalen Sichtfeld von 47,2°. Die Flughöhe für die Missionen betrug ca. 85 m (Bodenauflösung 5,60 m). Die Fluggeschwindigkeit betrug bei beiden Missionen 5 m/sec über Grund. Die Software MetaShape wurde für die Erstellung von True Orthophotos verwendet. Aus den multispektralen Bilddaten und LiDAR-Daten wurden mehrere Datenlayer generiert (Dersch et al. 2022). In diesem Beitrag werden nur die Ergebnisse der Layerkombination  $RGB = \{\text{Kanal 6, Kanal 4, Kanal 2}\}$  zusammengestellt.

Zusätzlich zu den multispektralen Bilddaten wurden LiDAR-Daten mit einem RIEGL miniVUX-1UAV aufgenommen (siehe auch [Abb. 16](#)). Insgesamt wurden drei Flüge in 90 m Flughöhe mit einem LiDAR-Streifenabstand von 22 m (50 % Querüberlappung) durchgeführt, was zu einer durchschnittlichen Punktdichte von 560 Punkte/m<sup>2</sup> führte. Die LiDAR-Streifen wurde unter Berücksichtigung von Bore sightparameter ausgeglichen (Software Stripalign), um verbleibende Fehler in der Kalibrierung und INS-basierte Driteffekten zu eliminieren. Die Verarbeitungsschritte zur der endgültigen LiDAR-Punktwolke waren: (a) Bore sightkalibrierung, (b) Erzeugung von LiDAR-Daten für jede Mission im Referenzkoordinatensystem, (c) Ausgleichung der LiDAR-Streifen, (d) Zusammenführung der LiDAR-Streifen, (e) 3D-Korrektur des kompletten LiDAR-Datensatzes mit Referenzpolygonen, (f) Kalibrierung der LiDAR-Intensität. Außerdem wurde der Waldboden (DGM) aus der LiDAR-Punktwolke gefiltert mittels der Software Terrasolid. Im nächsten Schritt wurde ein Oberflächenmodell aus LiDAR-Punkten (*DSMlidar*) mit einem Gitterabstand von 5 cm erzeugt. Schließlich wurden die Datenlayer *Lidar\_intens* aus der LiDAR-Intensität sowie *Lidar\_dense* aus der Laserpunktdichte gebildet. Die Layer (*DSMlidar*, *Lidar\_intens*, *Lidar\_dense*) bildeten den Datensatz *Lidar*.



Bildquelle: Peter Krzystek

**Abb. 16:**  
Riegl MiniVUX und  
MicaSense RedEdge  
MX Dual

### 3.2 Methoden

Mask R-CNN wurde als zweistufiger Ansatz zu Instanzsegmentierung von He et al (2017) vorgestellt. Die Methode ist eine Weiterentwicklung der Objektdetektionsalgorithmen Fast/Faster R-CNN (Girshick 2015) dar. Die Architektur (Abb. 17) besteht aus zwei Hauptkomponenten: Einem Region Proposal Network beziehungsweise Backbone mit der Aufgabe, Regions of Interest im Bild zu identifizieren sowie einem Network Head. Jede vorgeschlagene Region of Interest wird durch den Network Head untersucht. Ist ein relevantes Objekt vorhanden, wird eine Bounding Box berechnet und das identifizierte Objekt klassifiziert. Für jedes Objekt wird im Anschluss eine Segmentierungsmaske berechnet.

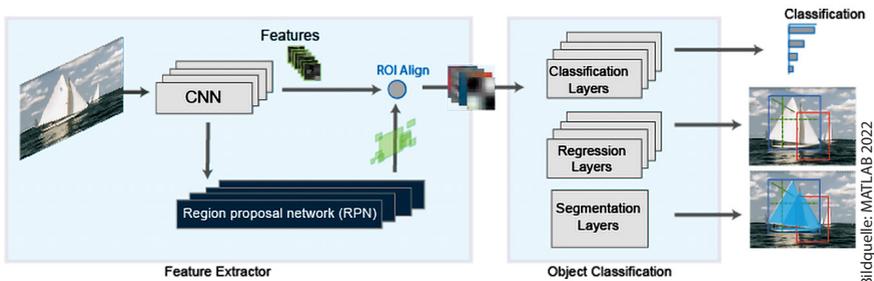


Abb. 17: Architektur von Mask R-CNN

### 3.3 Ergebnisse

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden mit vier Baseline Methoden *NCut* (Reitberger et al. 2009), *Silva* (Silva et al. 2016), *Li* (Li et al. 2012) und *WS* (Roussel und Auty 2022) (= Wasserscheidentransformation) verglichen. Die wichtigsten Schlussfolgerungen können wie folgt angegeben werden.

- Entgegen der Erwartungen sind die Ergebnisse des LiDAR-Datensatzes *Lidar* sogar geringfügig schlechter als der Datensatz *RGB*. Man beachte, dass bei dem Datensatz *RGB* keine Tiefeninformation vorliegt.
- Alle Baseline Methoden sind z. T. um 50 % schlechter als die beiden Datensätze *RGB* und *Lidar*.
- Im Nadelbaumbereich werden F1-Scores von mehr als 90 % erreicht (Abb. 18).
- Im Laubbaumbereich fällt der F1-Score auf ca. 82 % ab (Abb. 19).
- Im gemischten Baumbestand wird ein durchschnittlicher F1-Score von 84 % erreicht (Abb. 20).

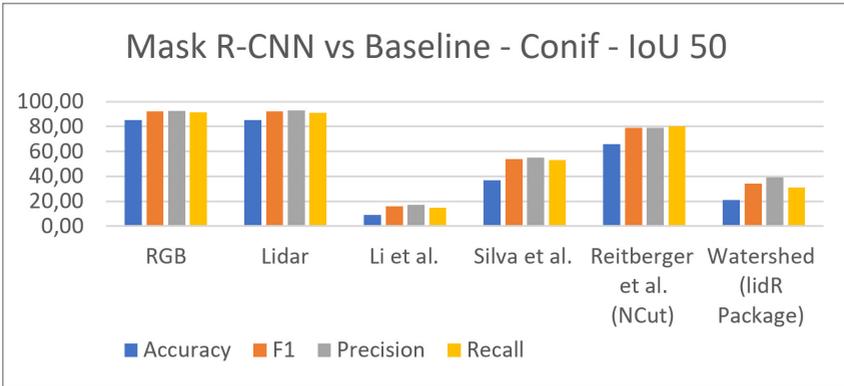


Abb. 18: Segmentierung mit Mask R-CNN in Nadelbaumbereich

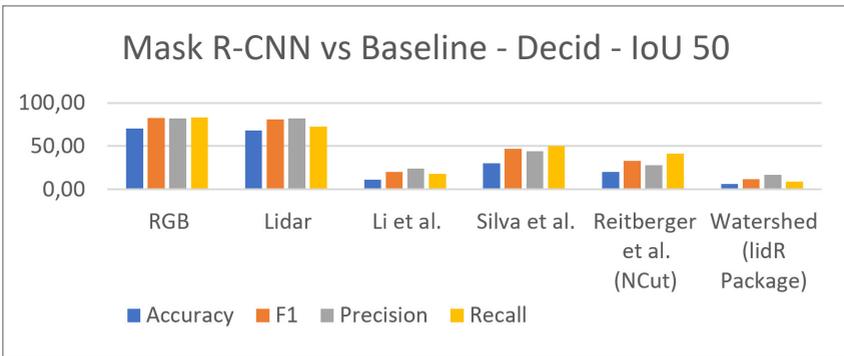


Abb. 19: Segmentierung mit Mask R-CNN in Laubbaumbereich

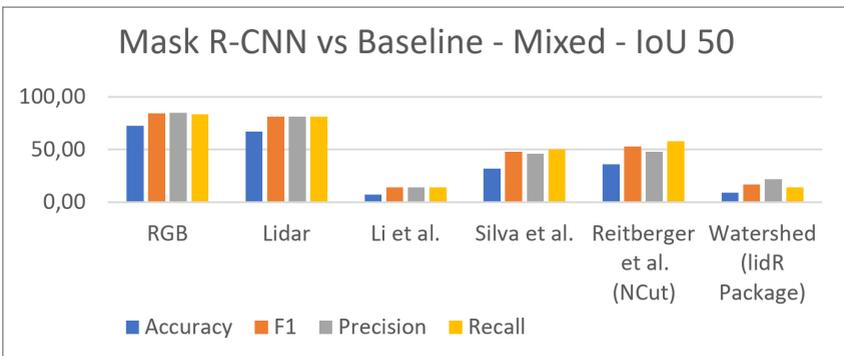


Abb. 20: Segmentierung mit Mask R-CNN im gemischten Baumbereich

## 4 Zusammenfassung

Der Beitrag zeigt an zwei Beispielen wie Drohnentechnologie im Bereich eines Risikogebietes und im Forst eingesetzt werden kann. Methoden des maschinellen Lernens und Deep Learnings sind jeweils zentrale methodische Bausteine, um exzellente Genauigkeiten bei der Objektdetektion und -klassifikation zu erzielen.

### Literatur

- Briechle, S., Krzystek, P., Vosselman, G. (2021): Silvi-Net – A dual-CNN approach for combined classification of tree species and standing dead trees from remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 98, 102292. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2020.06.015](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.015).
- Briechle, S., Molitor, N., Krzystek, P., Vosselmann, G. (2020): Detection of radioactive waste sites in the Chernobyl exclusion zone using UAV-based lidar data and multi-spectral imagery. *ISPRS Journal for Photogrammetry and Remote Sensing*. ISPRS Journal for Photogrammetry and Remote Sensing. Volume 167, September 2020, 345–362. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2020.06.015](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.06.015).
- Canis B. (2015): Unmanned Aircraft Systems (UAS). Commercial Outlook for a New Industry. Congressional Research Service. 7-7500. R44192. <http://easa.europa.eu/system/files/dfu/A-NPA%202015-10.pdf>, letzter Zugriff 10.03.2016.
- Dersch S., Schöttl A., Krzystek P., Heurich M. (2021): Instance segmentation for single tree delineation using drone-based multispectral imagery and LiDAR data. *Silvilaser* 2021.
- Dersch S., Schöttl A., Krzystek P., Heurich M. (2022): Towards complete tree crown delineation by instance segmentation: A comparative study with Mask R-CNN and DETR using UAV-based multispectral imagery and lidar data. *Open ISPRS Journal*. Eingereicht.
- Girshick, R. (2015): Fast R-CNN. In: 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), IEEE, dec 2015, 1440–148.
- He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., Girshick, R. (2017): Mask R-CNN. DOI: [10.1109/ICCV.2017.322](https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.322).
- iRevolutions, (2014a): <http://irevolutions.org/2014/07/07/humanitarian-uav-missions-during-balkan-floods/>, letzter Zugriff 20.11.2022.
- iRevolutions, (2014b): <http://irevolutions.org/2014/06/25/humanitarians-in-the-sky/>, letzter Zugriff 20.11.2022.
- Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G. (2012): ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Adv. Neural Informat. Process. Syst.*, 2, 1097–1105. <http://papers.nips.cc/paper/4824-imagenet-classification-with-deep-convolutional-neural-networks.pdf>, letzter Zugriff 2020-09-11.
- Krzystek, P., Molitor, N., Briechle, S., Bugai, D., Antropov, O., Tretyak, Y., Zabulonov (2020): UAV-based mapping of vegetation and contamination in the Chernobyl Exclusion zone – New developments and future prospects. *INUDECO* 2020.

- LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. (2015): Deep learning. *Nature* 521, 436–444. DOI: [10.1038/nature14539](https://doi.org/10.1038/nature14539).
- Li, W., Guo, Q., Jakubowski, M., Kelly, M. (2012): A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud. *Photogrammetric Eng. Remote Sens.* 78, 75–84. DOI: [10.14358/PERS.78.1.75](https://doi.org/10.14358/PERS.78.1.75).
- Li, Y., Bu, R., Sun, M. (2018): PointCnn. Convolution on X-transformed points. arXiv:180107791. <https://arxiv.org/abs/arXiv:1801.07791>.
- MATLAB (2022): <https://de.mathworks.com/help/vision/ug/getting-started-with-mask-r-cnn-for-instance-segmentation.html>, letzter Zugriff: 15.12.2022.
- Qi, C., Su, H., Mo, K., Guibas, L. (2017): PointNet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation. In: *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2017-January, 77–85. DOI: [10.1109/CVPR.2017.16](https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.16).
- Qi, C., Yi, L., Su, H., Guibas, L. (2016): PointNet++: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space. *Adv. Neural Informat. Process. Syst.*, 2017, 5100–5109. <https://arxiv.org/pdf/1706.02413.pdf>, letzter Zugriff 11.09.2020.
- Reitberger, J., Schnörr, C., Krzystek, P., Stilla, U. (2009): 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. *ISPRS J. Photogramm. Remote. Sens.* 2009, 64, 561–574. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2009.04.002](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.04.002).
- Roussel, J.-R., Auty, D., Coops, N., Tompalski, P., Goodbody, T., et al. (2020): lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 251, 112061. [10.1016/j.rse.2020.112061](https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061). hal-02972284.
- Rusu, R. B., Blodow, N., Beetz, M. (2009): Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2009. 3212{7. DOI: [10.1109/ROBOT.2009.5152473](https://doi.org/10.1109/ROBOT.2009.5152473).
- Silva, C. A., Hudak, A. T., Vierling, L. A., Loudermilk, E. L., O'Brien, J. J., Hiers, J. K., Jack, S. B., Gonzalez-Benecke, C., Lee, H., Falkowski, M. J., Khosravipour, A. (2016): Imputation of individual longleaf pine (*pinus palustris* mill.) tree attributes from field and lidar data. *Can. J. Remote Sens.* 42, 554–573. DOI: [10.1080/07038992.2016.1196582](https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1196582).
- Simonyan, K., Zisserman, A. (2015): Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. In: *3rd International Conference on Learning Representations (ICLR) – Conference Track Proceedings*. <https://arxiv.org/pdf/1409.1556.pdf>, letzter Zugriff 11.09.2020.
- Voulodimos, A., Doulamis, N., Doulamis, A., Protopapadakis, E. (2018): Deep learning for computer vision: A brief review. *Comput. Intell. Neurosci.* 2018. DOI: [10.1155/2018/7068349](https://doi.org/10.1155/2018/7068349).
- Zhou, Y., Tuzel, O. (2018): VoxelNet: End-to-end learning for point cloud based 3D object detection. In: *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 4490–4499. DOI: [10.1109/CVPR.2018.00472](https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00472).

## Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Peter Krzystek | Prof. Dr.-Ing. Sebastian Briechle | M. Eng. Sebastian Dersch  
Hochschule München, Institut für Anwendungen des maschinellen Lernens und  
intelligenter Systeme

Karlstraße 6, 80333 München

[www.hm.edu/iamlis](http://www.hm.edu/iamlis)

[peter.krzystek@hm.edu](mailto:peter.krzystek@hm.edu) | [sebastian.briechle@hm.edu](mailto:sebastian.briechle@hm.edu) | [sebastian.dersch@hm.edu](mailto:sebastian.dersch@hm.edu)

Dr. Norbert Molitor

Plejades GmbH Independent Experts

Feldstraße 5, 64347 Griesheim

[www.pleja.de](http://www.pleja.de)

[NorbertMolitor@pleja.de](mailto:NorbertMolitor@pleja.de)

# Session 3: Regularien und Einbettung in den Luftraum



# Unbemannt im bemannten Luftraum – Über die Integration unbemannter Flugzeuge ins Luftverkehrssystem

Andrés Arango Pérez

## 1 Einführung

In den letzten Jahren haben sich unbemannte Luftfahrzeuge (UAV) als vielversprechende Technologie für vielfältige Anwendungen entwickelt. Der Einsatz, z. B. von Multicopter für Inspektionsaufgaben oder im Entertainment Bereich ist heutzutage stark verbreitet. Durch die vermehrte Nutzung von UAVs wird die Integration ins Luftverkehrssystem ein immer wichtigeres Thema. Neue Betriebskonzepte sollen für die Vorbeugung zusätzlicher Risiken (Klant 2018) durch den Betrieb unbemannter Fluggeräte sorgen. Verschiedene solcher Konzepte werden aktuell entwickelt, validiert und allmählich eingeführt (Barrado et al. 2020, EUROCONTROL 2017).

Während UAVs häufig in urbanen Umgebungen oder in unkontrollierten Lufträumen auf niedrigen Flughöhen eingesetzt werden können, wird ein weiterer Flugzeugtyp für weitere Herausforderungen bei der Integration unbemannter Flugzeuge in bemannten und sehr verkehrsreichen Lufträumen sorgen. Dieser Flugzeugtyp verspricht jedoch gleichzeitig wichtige Durchbrüche in der Telekommunikationsbranche und in der Erdbeobachtung – es geht um HAPS (High-Altitude Platform Station oder High-Altitude Pseudo Satellite). HAPS sind unbemannte Flugzeuge, die in der Stratosphäre fliegen und über eine sehr lange Verweildauer verfügen. Persistenz und Erdnähe sind wesentliche Eigenschaften HAPS, die für die Telekommunikationsindustrie sehr attraktiv sind. Diese sind aber auch für Erdbeobachtungsanwendungen von großem Vorteil. HAPS sind in der Lage für die Dauer ihrer langen Reise Flüge großen Interessengebiete abzudecken oder auch mobilen Ziele zu verfolgen, während wichtige Daten kontinuierlich an den Boden übermittelt werden.

Dieser Artikel bietet eine Übersicht des Fluggeräts HAPS und seiner potenziellen Anwendungen für Erdbeobachtungszwecke. Anschließend werden die aktuellen Probleme bezüglich der Integration HAPS ins bestehende Luftverkehrssystem sowie einige mögliche Lösungswege diskutiert. Obwohl es wichtige regulationstechnischen und rechtlichen Fragestellungen für den zivilen und kommerziellen Einsatz von HAPS gibt, wird sich dieser Artikel hauptsächlich mit den operationellen Betrachtungen befassen.

## 1.1 Einführung zu HAPS

Die Abkürzung HAPS wurde bei der World Radiocommunications Conference 1997 als High-Altitude Platform Station eingeführt. Dort wurde das Konzept einer stratosphärischen Plattform als eine über ein Objekt und auf einer Höhe von zwischen 20 und 50 km lokalisierte Station, die relativ zur Erde fixierte Position hält formuliert (Aubineau et al. 2010). Zum einen herrschen in der niedrigen Stratosphäre günstige Bedingungen für den HAPS-Flug, zum anderen finden die meisten Wetterphänomene in der Troposphäre statt, wo sich auch der meiste Luftverkehr befindet. HAPS können also in der Stratosphäre ungestört von Wetter oder Verkehr fliegen.

Die obige Definition lässt genug Spielraum für verschiedenen Bauformen und Anwendungsfälle. Verschiedenen Fluggeräte verschiedener Gestaltung können als HAPS bezeichnet werden, sowohl Flächenflugzeuge als auch Luftschiffe und Ballons.

HAPS-Flächenflugzeuge wurden bisher am meisten erforscht, da diese einfachere Bodeninfrastruktur benötigen und gute Steuerbarkeit anbieten. Luftschiffe, obwohl robuster gegenüber Wetterverhältnisse als HAPS-Flächenflugzeuge und mit guter Steuerbarkeit, benötigen aufgrund ihrer Größe sehr aufwendige Bodeninfrastruktur. Ballone können schwere Lasten tragen, benötigen einfache Bodeninfrastruktur, sind aber schwer steuerbar (Euler et al. 2022). Deshalb, obwohl viele Probleme bezüglich der Integration HAPS ins Luftverkehrssystem ebenfalls für Luftschiffe und Ballone gelten, stehen hauptsächlich HAPS-Flächenflugzeuge im Fokus dieser Arbeit sowie aktueller Forschungsprojekte.

Ein aktuelles HAPS-Projekt ist das Airbus Zephyr, welches mehrere Rekordflüge erfolgreich abgeschlossen hat, zuletzt im vergangenen Jahr mit einem 64-tägigen Flug (Flaig 2022). Das Zephyr S hat eine Spannweite von 25 m eine Masse von 55 kg und eine Nutzlast von 5 kg (Bauk 2020, D'Oliveira et al. 2016).

Leider können solarbetriebenen Flugzeuge nicht überall und jederzeit aufgrund nicht ausreichender Sonnenstrahlung ununterbrochen fliegen (Gonzalo et al. 2018). Aus diesem Grund gibt es auch Programme zur Entwicklung von wasserstoffbetriebenen HAPS, die in Regionen wie Europa und Nordamerika auch in den Wintermonaten tagelang ihre Dienste leisten können. Ein Beispiel davon ist das von Leichtwerk AG wasserstoffbetriebene HAPS, der StratoStreamer (siehe [Abb. 1](#)), mit einer Spannweite von ca. 65 m und einer Nutzlast von bis zu 120 kg (Leichtwerk AG, n. d.). Eine Flotte aus wasserstoffbetriebenen HAPS könnte theoretisch Monate und sogar Jahre lang einen ununterbrochenen Service anbieten.

Die Fähigkeiten eines HAPS können meistens bei Bedarf an dem Einsatzszenario durch die Umrüstung ihrer Nutzlast angepasst werden. So kann dasselbe HAPS entweder optische Kameras, Radarsensorik oder eine Telekommunika-



Bildnachweis: Leichtwerk AG, n. d.

Abb. 1: StratoStreamer der Leichtwerk AG

tionsantenne an Bord tragen, um verschiedene Zwecke zu erfüllen. Dabei ist neben der Masse der Geräte an Bord, den Stromverbrauch zu beachten, da der Betrieb stromaufwendiger Einrichtungen die Flugzeit beeinträchtigen könnte. Dies gilt auch für solarbetriebenen HAPS.

HAPS haben ein vergleichsweise geringes Steigvermögen. Für den Aufstieg auf 20 km Flughöhe werden ca. 8 Stunden benötigt. Auf Meereshöhe sind Geschwindigkeiten von 10 m/s möglich, während in der dünnen Luft der Stratosphäre Geschwindigkeiten von ca. 45 m/s erreicht werden können. In der niedrigen Stratosphäre kann ein HAPS dank geringer Winde meistens problemlos navigieren. In der Troposphäre und vor allem in der Tropopause hingegen können Windgeschwindigkeiten auftreten, welche die Fluggeschwindigkeit eines HAPS überschreiten. In solchen Windfelder ist die Bewegung in Windgegenrichtung nicht möglich und das Flugzeug würde relativ zum Boden rückwärts fliegen. Von größerer Bedeutung sind aber Turbulenzen, die für die ultraleichte Strukturen eines HAPS sehr problematisch sein können. In der Vergangenheit haben Turbulenzen zur Zerstörung von HAPS während des Fluges geführt (D'Oliveira et al. 2016, Waldron 2020). Die Empfindlichkeit HAPS gegenüber Niederschlag und Eisbildung darf ebenso nicht außer Acht gelassen werden. Solche Bedingungen müssen beim HAPS-Flugbetrieb eher vermieden werden.

Zusammenfassend sind HAPS ultraleichte, unbemannte und große Flugzeuge, die aufgrund ihrer Persistenz und Erdnähe sowie ihren vielfältigen Einsatzmöglichkeiten als sehr attraktive Fluggeräte u. a. für Erdbeobachtungsaufgaben erscheinen. Gleichzeitig weisen HAPS diverse Einschränkungen auf, wie einem geringen Energieüberschuss und großer Empfindlichkeit gegenüber Wetterverhältnisse.

## 2 HAPS-Anwendungen für die Erdbeobachtung

Ein wichtiger Treiber für die Entwicklung von HAPS war bisher die Telekommunikationsbranche. Mit Funkantennen ausgerüsteten HAPS könnten entlegenen Regionen oder von Naturkatastrophen betroffenen Gebiete mit einer Internetkonnektivität versorgen. Es gibt jedoch weiteren Anwendungsfälle für HAPS im Bereich der Erdbeobachtung, die von den HAPS-Kerneigenschaften, Persistenz und Erdnähe, profitieren könnten. Ähnlich wie Telekommunikationsmissionen, erfordern manche Beobachtungstätigkeiten eine langfristige und kontinuierliche Abdeckung. Dies auch in Regionen, die aufgrund ihrer Topologie oder Geografie schwer zugänglich sind. Satelliten bieten langfristige und sogar globale Abdeckung. Die Anschaffung und Aufrechterhaltung einer Satellitenkonstellation ist jedoch sehr kostenintensiv.

Einige der relevanten Einsatzszenarien von HAPS bei der Erdbeobachtung werden nachfolgend zusammengefasst (Baumgartner et al. 2017, Persechino et al. 2020):

- Katastrophenhilfe und Krisenmanagement
- Beobachtung und Überwachung kritischer Infrastruktur
- Verkehrs- und Verkehrsinfrastrukturbeobachtung
- Befahrbarkeit von Seerouten
- Umweltbeobachtung (Waldbrand, Öl- und Gaslecks, usw.)
- Precision Farming

Jedes Einsatzszenario bedarf unterschiedliche Ausrüstung sowie Missionsprofile. Umweltbeobachtungsmissionen können z. B. periodische, aber nicht kontinuierliche Beobachtung von Interessengebieten erfordern. Verkehrsbeobachtungsaufgaben können entweder die kontinuierliche Nachverfolgung mobiler Ziele, z. B. Schiffe oder Bodenfahrzeuge, verlangen.

Die Ergebnisse einer Studie von Baumgartner et al. (2017) zeigen, dass die Auslegung eines Synthetic Aperture Radars (SAR) für den Einsatz an einem Airbus Zephyr möglich sei. Die Studie zeigte, dass eine Sendeleistung von 50 W, ein Tastgrad von 20 % auf einer Höhe von 20 km ausreicht, um Bilder mit einer Auflösung von unter einem Meter zu erzeugen. Mit optischen Verfahren können Flächen von ca. 70 km Durchmesser (mit Radarverfahren sogar bis 140 km) abgedeckt werden. In Baraniello et al. (2021) stellt sich der Autor den Einsatz eines Kamerasystem für sichtbares und infrarotes Licht, mit einer Masse von unter 10 kg an Bord eines HAPS, für die Erstellung von Bildern und Kartenmaterial nach Naturkatastrophen vor.

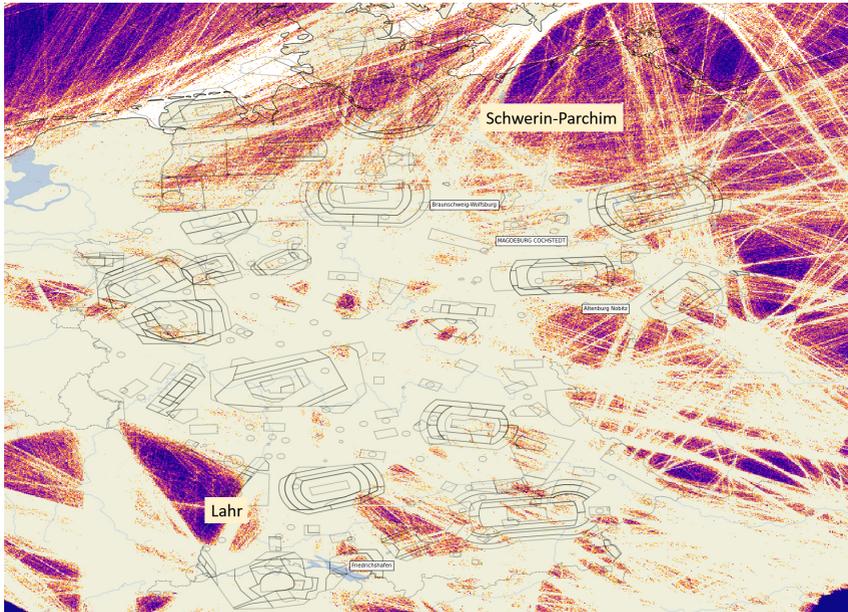
### 3 Herausforderungen bei der Integration von HAPS ins Luftverkehrssystem

Obwohl HAPS für den stratosphärischen Flug konzipiert sind und sie dort (in der Stratosphäre) den größten Teil ihrer Flugzeit verbringen werden, müssen sie sich trotzdem beim Auf- und Abstieg den kontrollierten Luftraum mit dem gewöhnlichen, bemannten Luftverkehr teilen. Während Auf- und Abstieg wären HAPS ein weiterer Verkehrsteilnehmer nach Instrumentenflugregeln, der entsprechenden standardisierten Verfahren und Anforderungen nach der International Civil Aviation Organization (ICAO) beachten muss (u. a. einen Flugplan abzugeben und auf die Anweisungen von der Luftverkehrskontrolle achten).

Im Vergleich mit gewöhnlichem Luftverkehr, z. B. Airline-Betrieb oder auch kleineren Flugzeugen der allgemeinen Luftfahrt sind HAPS sehr langsam. Heterogenität ist für die Luftverkehrskontrolle eine Herausforderung. Ein sehr heterogener Verkehr kann die Belastung der Fluglots\*innen deutlich erhöhen, u. a. weil verschiedenen Verkehrsteilnehmer unterschiedlich auf ihre Anweisungen reagieren. Werden also HAPS ohne Weiteres in den Luftverkehrsmix integriert, könnte dies häufig zu unsicheren Begegnungen in der Luft führen oder die Fluglots\*innen außergewöhnlich belasten. HAPS können selbst bei besten Wetterbedingungen nicht so schnell reagieren wie andere Verkehrsteilnehmer, geschweige denn bei starken Windverhältnissen. Zudem muss auch berücksichtigt werden, dass der Luftraum in Mitteleuropa, und insbesondere in Deutschland äußerst verkehrsreich ist. [Abb. 2](#) zeigt die Flugspuren im deutschen oberen Luftraum einer Woche im September 2018.

Hellgelb werden die Bereiche dargestellt, wo viele Flugzeuge geflogen sind. Die wenige „Löcher“ über Deutschland, wo weniger Verkehr stattfindet, sind meistens Flugbeschränkungsgebiete (Militär) und werden i. d. R. von ziviler Luftfahrt nicht beflogen. Um die oben genannten gefährlichen Begegnungen und zu vermeiden, muss die Kapazität des Luftraums angepasst werden. Das bedeutet: es werden weniger Flugzeuge in den Luftraum akzeptiert, was negative ökonomischen Auswirkungen haben könnte.

Bislang wurden HAPS aus entlegenen Flugplätzen betrieben, wie z. B. in der Wüste von Arizona und Australien im Rahmen von Forschungs- oder Militärflügen. Dort sind die Rahmenbedingungen bezüglich des Verkehrs und sogar des Wetters viel laxer als in Mitteleuropa und bestimmte Regionen von Asien und Nordamerika. Obwohl einige wichtige HAPS-Anwendungsfälle deren Einsatz in Regionen mit mäßigem Verkehrsaufkommen und variierende Wetterbedingungen vorsehen, stellen die Bedingungen in verkehrsreichen Regionen wie Mitteleuropa komplexe Herausforderungen dar, aus den wichtigen Erkenntnissen zu gewinnen sind. Diese können den Weg für den HAPS-Einsatz in weiteren Regionen der Welt zeigen.



Bildnachweis: Leichtwerk AG, Lukas Hilbers

Abb. 2: Flugspuren im deutschen oberen Luftraum in der verkehrsreichsten Woche 2018. Datenquelle: Deutsche Flugsicherung DFS, bereitgestellt als FANOMOS-ASCII-Datei

HAPS sind aus der Perspektive der Luftverkehrskontrolle auf Grund der besonderen Flugeigenschaften schwer kontrollierbar, was zu erhöhter Belastung der Fluglots\*innen und letztendlich zur Reduktion der Luftraumkapazität führen kann. Es besteht also der Bedarf, neben einen rechtlichen Rahmen, operationellen Konzepte, die die zuvor erläuterten Herausforderungen berücksichtigen und, die den sicheren Betrieb von HAPS in komplexen Luftverkehrssystemen ermöglichen.

#### 4 Lösungsansätze für die Integration HAPS ins Luftverkehrssystem

Das Projekt OBeLiSk, bestehend aus einem Konsortium der Deutschen Flugsicherung DFS (DFS), dem Deutschen Wetter Dienst (DWD), der Leichtwerk AG, Unisphere GmbH und dem Institut für Flugführung der Technischen Universität Braunschweig, beschäftigt sich seit Ende 2020 mit der Konzipierung eines Betriebskonzeptes, welches eine sichere Integration von HAPS ins bestehende und zukünftige Luftverkehrssystem sicherstellen soll (Leichtwerk Research GmbH 2021).

Wie erläutert im Abschnitt 3, würden HAPS die Heterogenität des Luftverkehrsmix erhöhen. Dies hat zur Folge, dass die Sicherheit und/oder Kapazität des Luftraums beeinträchtigt werden kann. Ein Lösungsansatz wäre, den HAPS-Verkehr vom konventionellen Luftverkehr zu separieren. Damit soll der Luftverkehrsmix homogener bleiben (sowohl der konventionelle als auch der HAPS-Verkehr). In *Abb. 2* sind einige Gebiete zu erkennen mit wenigerem Verkehrsaufkommen, z. B. in der Nähe von Schwerin oder in der Nähe von Lahr. Solche Flugplätze wären für den HAPS-Betrieb besonders attraktiv, da sie von den verkehrsreichsten Regionen etwas entlegen sind.

Weiterhin sollen HAPS innerhalb dedizierten Auf- und Abstiegsgebiete in der Nähe vom Flugplatz auf- und absteigen. Die Mindestgröße dieser Gebiete ist bisher nicht klar definiert. Diese wird von den Navigationsfähigkeiten der Fluggeräte, der Verkehrsanforderungen am Standort und der herrschenden Windverhältnisse in der Region abhängig sein.

Die Empfindlichkeit gegenüber Wetter wurde bereits mehrmals erwähnt. Es sind also neue Informationsprodukte des Wetterdiensts notwendig, mit denen HAPS-Betreiber geeigneten Flugrouten ermitteln können. Flugpläne mit groben Flugtrajektorien werden aus strategischen Gründen (u. a. für die Nachfrageabschätzung seitens der Luftverkehrskontrolle, die grundlegend für die Kapazitätsplanung ist) bereits bis ein Jahr im Voraus abgegeben. Da die Genauigkeit von Wettervorhersagen mit kleiner werdenden Vorhersagehorizonten steigt, können bereits ermittelten Flugrouten iterativ vor dem Flug neu berechnet werden, um neuen Erkenntnissen aus genaueren Vorhersagen zu berücksichtigen. Ansätze für die komplexen HAPS-Missionsplanung werden aktuell noch erforscht (Muller et al. 2018). Neue Wetterinformationsprodukte sollen speziell für den HAPS-Betrieb entwickelt und eingesetzt werden. Diese könnten HAPS-Betreiber dienen, auf Basis der Vereisungs-, Niederschlags- und Windverhältnisse geeignete Start- und Landefenster zu identifizieren, womit bereits ermittelten Flugrouten entsprechend automatisch angepasst werden.

Weiterhin sollen neuen Systeme für einen besseren Kommunikationsfluss zwischen Betreiber, Kunde, Wetterdienste und Luftverkehrskontrollstellen sorgen. Diese sollen mehr Transparenz und ein genaueres Lagebild schaffen, was das Situationsbewusstsein der Lotsen (sowie der Betreiber und anderer Verkehrsteilnehmer) verbessern sollte. Einen kontinuierlichen und automatisierten Datenfluss zwischen Wetterdiensten, Betreibern und Flugsicherung könnte hergestellt werden, um die sehr dynamischen Flugplanungsprozesse abzuwickeln. Ein solches System, was die Grundlage für diese Lösung darstellt, ist bereits in Sicht: das „System Wide Information Management“ (SWIM). Dazu gehören auch das „Flight and Flow Information for a Collaborative Environment“ (FF-ICE) und das Flight Information Exchange Model (FIXM). Unter SWIM soll der Zugang zu relevanten Informationen und deren Veröffentlichung einfacher

gestaltet werden. Die relevanten Stellen sollen unter SWIM die notwendigen Informationen zum richtigen Zeitpunkt bekommen. FF-ICE und FIXM bieten u. a. neue Formate und Verfahren, um Flugpläne und Fluginformationen mit den relevanten Flugsicherungskontrollstellen auszutauschen.

Die zuvor erläuterten Maßnahmen wurden in [Tab. 1](#) zusammengefasst.

**Tab. 1: Maßnahmen zur Integration von HAPS ins Luftverkehrssystem**

Ziel	Maßnahme
Trennung des HAPS-Verkehrs vom gewöhnlichen Luftverkehr	Betrieb aus Flugplätzen in verkehrsarmen Regionen
	Betrieb in Zeiten mit wenigem Verkehrsaufkommen
	Dedizierte Auf- und Abstiegsgebiete
Dynamische Flugplanung	Iterative Anpassung der Flugtrajektorien unter Einbeziehung neuer Wetterinformationen
	Iterative Verhandlung von Flugrouten mit Flugverkehrskontrolle unter Berücksichtigung von aktuellen verkehrsbedingten Einschränkungen
Einsatz neuer technischer Mittel	Verwendung neuer Fluginformationsformate und -Austauschverfahren (FF-ICE, FIXM)
	Automatisierte Datenflüsse zur kontinuierlichen Anpassung der Flugtrajektorien

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Artikel hat die Vorteile von HAPS bei Erdbeobachtungstätigkeiten sowie die großen Herausforderungen bei der Integration solcher Plattformen ins Luftverkehrssystem erläutert. Prinzipiell ist ihre Einsatzflexibilität, die Möglichkeit sie für verschiedenen Missionsprofile umzurüsten und insbesondere ihre Persistenz und Erdnähe von großer Bedeutung für die Erdbeobachtung.

Da HAPS die Heterogenität des Luftverkehrsmix erhöhen und ein Hindernis für andere Luftverkehrsteilnehmer aufgrund ihrer langsamen Geschwindigkeiten und beschränkten Manövriervermögen darstellen, bedarf es an sorgfältigen Betriebskonzepten für deren sicheren Integration ins Luftverkehrssystem. Das Projekt OBeLiSk hat sich in den letzten zwei Jahren mit dieser Problematik beschäftigt und hat einige potenzielle Lösungswege erkannt. Im Wesentlichen soll der HAPS-Verkehr zeitlich und geografisch vom gewöhnlichen bemannten Verkehr abgesondert werden. Die HAPS-Flugrouten sollen kontinuierlich mithilfe

neuer und für den HAPS-Betrieb konzipierten Wetterinformationsprodukten neugerechnet und angepasst werden. Weiterhin sollen neue technische Mittel wie SWIM, FF-ICE und FIXM es ermöglichen, kontinuierlichen Datenströme herzustellen, die für mehr Transparenz sorgen. Ziel dabei ist es, dass Fluglots\*innen nicht zusätzlich belastet werden und dass das Luftverkehrssystem nicht an Kapazitätseinbuße trotz eines kontinuierlichen HAPS-Betriebs leidet.

Analysen bezüglich des Einflusses von HAPS auf den Luftverkehr sind ausstehend, um die Integrationsstrategien weiter zu validieren und verfeinern. Diese werden u. a. im weiteren Verlauf des Projekts OBeLiSk anhand von Schnellzeit- sowie Human-in-the-Loop-Simulationen durchgeführt. Ein Wissenstransfer zwischen Projekten wie OBeLiSk und anderen aktuellen Vorhaben (Aerospace Valley et al. 2022, EUROCONTROL 2022) wird erforderlich sein, um die Sicherheit und Effizienz bei einem breiten Luftfahrzeug- und Anwendungsspektrum zu gewährleisten.

Weiterführende Literatur zum Thema Integration von unbemannten Luftfahrzeugen ins Luftverkehrssystem aus operationellen, technischen und rechtlichen Blickwinkeln bieten u. a. Barrado et al. (2020), EUROCONTROL (2019, 2017), FAA (2022), Konert und Kotliński (2020), Krüger et al. (2019), Lappas et al. (2022) und SESAR JU (2020).

## Literatur

- Aerospace Valley, Airbus Protect, CIRA, Collins Airspace, ISSNOVA, ONERA, PidoLabs, Sikybirdsview, Skyports, Tecnalia (2022): TindAIR (WWW Document). TindAIR. <https://tindair.eu/>, letzter Zugriff 01/2023.
- Aubineau, P., Buonomo, S., Frank, W., Hughes, K. A. (2010): ITU's Regulatory Framework, Technical Studies in ITU-R and Future Activities in Relation to High-Altitude Platform Stations (HAPS). *URSI Radio Sci. Bull.* 2010, 67–74.
- Baraniello, V.R., Persechino, G., Angelino, C.V., Tufano, F. (2021): The Application of High Altitude Pseudo-Satellites for a Rapid Disaster Response, in: 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. Presented at the IGARSS 2021-2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, Brussels, Belgium, 8400–8403. DOI: [10.1109/IGARSS47720.2021.9553819](https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553819).
- Barrado, C., Boyero, M., Brucculeri, L., Ferrara, G., Hatley, A., Hullah, P., Martin-Marro, D., Pastor, E., Rushton, A. P., Volkert, A. (2020): U-Space Concept of Operations: A Key Enabler for Opening Airspace to Emerging Low-Altitude Operations. *Aerospace* 7, 24. DOI: [10.3390/aerospace7030024](https://doi.org/10.3390/aerospace7030024).
- Bauk, S. (2020): Performances of Some Autonomous Assets in Maritime Missions. *TransNav Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp.* 14, 875–881. DOI: [10.12716/1001.14.04.12](https://doi.org/10.12716/1001.14.04.12).
- Baumgartner, S. V., Scheiber, R., Bordoni, F., Krieger, G., Peichl, M. (2017): HAPS: Potentials, Applications and Requirements for Radar Remote Sensing, in: HAPS4ESA – Towards an ESA Stratospheric High Altitude Pseudo-Satellites (HAPS) Programme for Earth Observation, Telecommunications and Navigation.

- D'Oliveira, F. A., Melo, F. C. L. de, Devezas, T. C. (2016): High-Altitude Platforms – Present Situation and Technology Trends. *J. Aerosp. Technol. Manag.* 8, 249–262. DOI: [10.5028/jatm.v8i3.699](https://doi.org/10.5028/jatm.v8i3.699).
- Euler, S., Lin, X., Tejedor, E., Obregon, E. (2022): High-Altitude Platform Stations as International Mobile Telecommunications Base Stations: A Primer on HIBS. *IEEE Veh. Technol. Mag.* 17, 92–100. DOI: [10.1109/MVT.2022.3202004](https://doi.org/10.1109/MVT.2022.3202004).
- EUROCONTROL (2017): RPAS ATM CONOPS. [https://rpas-regulations.com/wp-content/uploads/2017/02/EUROCONTROL\\_INT\\_RPAS-ATM-Concept-of-Operations-2017\\_V4.pdf](https://rpas-regulations.com/wp-content/uploads/2017/02/EUROCONTROL_INT_RPAS-ATM-Concept-of-Operations-2017_V4.pdf), letzter Zugriff 01/2023.
- EUROCONTROL (2019): SESAR Concept of Operations (CONOPS 2019). Eurocontrol. <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5c91e877d&appId=PPGMS>, letzter Zugriff 01/2023.
- EUROCONTROL (2022): European Higher Airspace Operations (WWW Document). Eur. High. Airsp. <https://higherairspace.eu/>, letzter Zugriff 01/2023.
- FAA (2022): UTM Concept of Operations Version 2.0. Federal Aviation Administration.
- Flaig, J. (2022): Zephyr drone's unfortunate end little cause for concern after record-breaking 64-day flight (WWW Document). *Inst. Mech. Eng.* <https://www.imeche.org/news/news-article/zephyr-drone's-unfortunate-end-little-cause-for-concern-after-record-breaking-64-day-flight>, letzter Zugriff 12/2022.
- Gonzalo, J., López, D., Domínguez, D., García, A., Escapa, A. (2018): On the capabilities and limitations of high altitude pseudo-satellites. *Prog. Aerosp. Sci.* 98, 37–56. DOI: [10.1016/j.paerosci.2018.03.006](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.03.006).
- Klant, P. (2018): Kollision mit Drohnen. *Pilot Flugz.* 80–97. <http://peterklant.de/wp-content/uploads/2018/05/PF-2018-05-Drohnen.pdf>, letzter Zugriff 01/2023.
- Konert, A., Kotliński, M. (2020): U-Space – Civil Liability for damages caused by Unmanned Aircraft. *Transp. Res. Procedia* 51, 304–312. DOI: [10.1016/j.trpro.2020.11.033](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.11.033).
- Krüger, T., Blom, B., Feuerle, T. (2019): Evaluation of an Automatic Separation Algorithm for Unmanned Aircraft Systems. *Transp. Res. Procedia* 43, 309–318. DOI: [10.1016/j.trpro.2019.12.046](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.12.046).
- Lappas, V., Zoumponos, G., Kostopoulos, V., Lee, H. I., Shin, H.-S., Tsourdos, A., Tantarini, M., Shomko, D., Munoz, J., Amoratis, E., Maragkakis, A., Machairas, T., Trifas, A. (2022): EuroDRONE, a European Unmanned Traffic Management Testbed for U-Space. *Drones* 6, 53. DOI: [10.3390/drones6020053](https://doi.org/10.3390/drones6020053).
- Leichtwerk AG (n. d.): Hydrogen Powered HAPS Project 'StratoStreamer' (WWW Document). <https://haps-broadband.org/technology/>, letzter Zugriff 12/2022.
- Leichtwerk Research GmbH (2021): OBeLiSk optimiert den Einsatz hochfliegender Pseudo-Satelliten (WWW Document). *Niedersachs. Aviat.* <https://niedersachsen-aviation.de/news/OBeLiSk%20optimiert%20den%20Einsatz%20hochfliegender%20Pseudo-Satelliten>, letzter Zugriff 01/2023.
- Muller, R., Kiam, J. J., Mothes, F. (2018): Multiphysical simulation of a semi-autonomous solar powered high altitude pseudo-satellite, in: 2018 IEEE Aerospace Conference. Presented at the 2018 IEEE Aerospace Conference, IEEE, Big Sky, MT, 1–16. DOI: [10.1109/AERO.2018.8396531](https://doi.org/10.1109/AERO.2018.8396531).
- Persechino, G., Baraniello, V., Parrilli, S., Tufano, F., Rianna, G. (2020): HAPS Role of in Earth Observation Multi-platform Paradigm for Environmental Monitoring.

SESAR JU (2020): European ATM Masterplan. SESAR Joint Undertaking. [www.sesarju.eu/masterplan2020](http://www.sesarju.eu/masterplan2020), letzter Zugriff 01/2023.

Waldron, G. (2020): Turbulence again blamed for loss of second Zephyr UAV in Australia (WWW Document). FlightGlobal. [www.flightglobal.com/military-uavs/turbulence-again-blamed-for-loss-of-second-zephyr-uav-in-australia/140339.article](http://www.flightglobal.com/military-uavs/turbulence-again-blamed-for-loss-of-second-zephyr-uav-in-australia/140339.article), letzter Zugriff 01/2023.

### **Kontakt**

M. Sc. Andrés Arango Pérez

Institut für Flugführung, Technische Universität Braunschweig

Hermann-Blenk-Straße 27, 38108 Braunschweig

[a.arango@tu-braunschweig.de](mailto:a.arango@tu-braunschweig.de)



# **Session 4:**

## **Podiumsdiskussion:**

### **Fluggenehmigung in der Praxis**



# Praktische Erfahrungen bei der Beantragung von Fluggenehmigungen

Patrick Havel | Marten Krull

## 1 Hintergrund

Die sogenannte „EU-Drohnenverordnung“ ist am 31. Dezember 2020 in allen EU-Staaten in Kraft getreten und soll die rechtlichen Grundlagen für den Drohnenbetrieb in der EU vereinheitlichen. Da die praktische Umsetzung der EU-Drohnenverordnung nicht nur die Luftfahrtbehörden, sondern auch die UAS-Hersteller und UAS-Betreiber vor Herausforderungen insbesondere in der zeitlichen Umsetzung gestellt hat, gibt es eine Vielzahl von Übergangsregeln, z. B. für das EU-Fernpilotenzeugnis oder für Flüge mit sogenannten Bestandsdrohnen in der offenen Kategorie. Bereits bestehende Aufstiegszeugnisse nach nationalem Recht konnten noch bis zum 31. Dezember 2021 verlängert und genutzt werden.

Seit Beginn des Jahres 2022 greift die EU-Drohnenverordnung nun verbindlich in vielen Bereichen: U. a. werden in der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 drei Betriebskategorien festgelegt (EASA 2022): Offen (Open), Speziell (Specific) und Zertifiziert (Certified). Die offene Kategorie betrifft UAS mit weniger als 25 kg Startmasse, welche innerhalb der Sichtweite bei einer maximalen Flughöhe unterhalb von 120 m über Grund fliegen und keine gefährlichen Güter transportieren oder Gegenstände abwerfen. Hier gelten je nach Startmasse bestimmte Regeln u. a. für den Überflug bzw. horizontalen Abstand zu unbeteiligten Personen. UAS mit einem maximalen Startgewicht von über 2 kg (ohne C-Zertifizierung) bzw. 4 kg (mit C-Zertifizierung) müssen 150 m horizontalen Abstand zu Wohn-, Gewerbe-, Industrie- und Erholungsgebieten, selbst wenn der Eigentümer oder Betreiber dieser Gebiete dem UAS-Betrieb zugestimmt hat. Sobald man diese Abstände nicht einhalten kann, findet der UAS-Betrieb in der speziellen Kategorie statt.

Aus unserer Sicht sind die o. g. horizontalen Abstände in der offenen Kategorie für UAS-Vermessungstätigkeiten nur sehr selten einzuhalten, sofern man nicht weit abseits von Unbeteiligten bzw. den o. g. Gebieten fliegt. Da aber genau diese Gebiete für die UAS-Vermessung von besonderem Interesse sind, findet der UAS-Betrieb sehr häufig in der speziellen Kategorie statt.

Daher möchten wir uns in diesem Beitrag auf die spezielle Kategorie und die praktischen Erfahrungen bei der Beantragung von Betriebsgenehmigungen

konzentrieren. Den Fokus setzen wir allerdings vielmehr auf die praktischen Anforderungen und Auswirkungen auf den UAS-Betrieb als auf die rechtlichen Grundlagen, welche wir nur ganz kurz anreißen möchten.

## 2 Zuständigkeiten

Für die Erteilung einer Betriebsgenehmigung nach Art. 12 Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 ist entweder das Luftfahrtbundesamt (LBA) oder die entsprechende Landesluftfahrtbehörde zuständig. Dies richtet sich nach dem Bundesland, in welchem das Unternehmen oder die Behörde seinen Sitz hat. Die Zuständigkeiten für die Betriebsgenehmigung in der speziellen Kategorie wurden aktuell von acht Landesluftfahrtbehörden an das LBA abgegeben (LBA 2022a) (siehe [Abb. 1](#)).

Dies führt aktuell (Dezember 2022) leider zu sehr langen Bearbeitungszeiten von ca. 20 Wochen für Erstanträge (LBA 2022a) im Vergleich zu den



**Abb. 1:**  
Zuständigkeit für die Erteilung einer Betriebsgenehmigung in der speziellen Kategorie.  
Blau: Landesluftfahrtbehörden; orange: Luftfahrtbundesamt.  
Stand: Dezember 2022

Bearbeitungszeiten der Landesluftfahrtbehörden von in der Regel zwei bis sechs Wochen. Änderungsanträge dauern in der Regel ein bis zwei Wochen. Gemäß Rückmeldung des LBAs werden durch Personalaufbau perspektivisch vergleichbare Bearbeitungszeiten angestrebt wie bei den Landesluftfahrtbehörden.

Für die Erteilung von Einzel- oder Allgemeinerlaubnissen für geografische Gebiete nach § 21h LuftVO sind die jeweiligen Landesluftfahrtbehörden des jeweiligen Einsatzortes zuständig oder der Betreiber, Eigentümer, etc. der entsprechenden geografischen Gebiete.

Ist eine Landesluftfahrtbehörde für die Erteilung der Betriebsgenehmigung zuständig, können auch im Antrag für die Betriebsgenehmigung Einzelerlaubnisse für geografische Gebiete erteilt werden.

### **3 Neue Anforderungen an den UAS-Einsatz**

Sofern man nicht auf ein Standardszenario oder eine vorgefertigte Risikoanalyse (Predefined Risk Assessment) zurückgreifen kann – und dies ist zurzeit bei vielen UAS-Vermessungstätigkeiten der Fall – muss ein „Specific Operations Risk Assessment“ (SORA) nach Artikel 11 DVO (EU) 2019/947 durchgeführt werden. Dies berücksichtigt u. a. das Boden- und Luftrisiko, welches man durch verschiedene Risikominderungsmaßnahmen, den sog. Mitigationen, reduzieren kann (EASA 2022).

Um die Anforderungen für die Betriebsgenehmigung gering zu halten, müssen häufig Minderungsmaßnahmen umgesetzt werden, welche bestimmte Anforderungen an den UAS-Betrieb an sich, als auch an die Systemausstattung setzen. In diesem Kapitel möchten wir auf eine Auswahl relevanter Punkte eingehen.

#### **3.1 Ausstattung des UAS**

Zur Minderung des Bodenrisikos und der Reduzierung der Aufprallenergie im Falle eines Absturzes sind im Rahmen des SORA je nach Einsatz Fallschirm- bzw. Flugterminierungssysteme notwendig. In besiedelten Gebieten wird unter bestimmten Voraussetzungen und realistischen Risikominderungen ein Fallschirmsystem unumgänglich. Dies unterscheidet sich je nach eingesetztem UAS, der angestrebten Art einer Betriebsgenehmigung („generisch“ oder „präzise“) und der zuständigen Stelle.

Des Weiteren kann es im Rahmen des SORA dazu kommen, dass je nach angrenzenden Bereichen an den UAS-Betrieb bzw. Risikominderungsmaßnahmen das sog. „Enhanced Containment“ greift. Dies kann dazu führen, dass

eine redundante Flugterminierung über eine separate Funkstrecke erforderlich wird. Dies ist zwar technisch bei vielen UAS möglich, kann aber wiederum dazu führen, dass man gegenüber dem Hersteller Garantie- und Wartungsansprüche verliert, sofern dazu das UAS von Dritten geöffnet werden muss. Die Wartung durch den Hersteller ist darüber hinaus ein wichtiger Baustein im Rahmen der Betriebsgenehmigung.

## 3.2 Praxisrelevante Parameter

Im Rahmen des SORA werden auch bestimmte Volumen wie die Flight Geography (Volumen des Fluggebiets), das Contingency Volume (Sicherheitsvolumen für Sicherheitsverfahren bei abnormalen Situationen), der Bodenrisikopuffer, sowie deren Berechnungsformeln relevant. Hier möchten wir kurz auf die für die Praxis relevantesten Parameter eingehen.

### 3.2.1 Berechnung der Visual Line of Sight (VLOS, Sichtweite)

Aufgrund fehlender Richtlinien wurden in der Vergangenheit die VLOS-Grenzen je nach Sehvermögen des Fernpiloten und Wetterbedingungen sehr optimistisch interpretiert. Das LBA gibt nun genaue Berechnungsformeln vor, welche im Rahmen der Betriebsgenehmigung anzusetzen sind (LBA 2022b). Die maximale VLOS-Entfernung ergibt sich dabei aus dem kleinsten Wert aus der Attitude Line of Sight (ALOS), sprich der maximalen Entfernung zur Lageerkennung des UAS und der Detection Line of Sight (DLOS), sprich der maximalen Entfernung, um andere Luftraumteilnehmer zu erkennen und zu reagieren, welche insbesondere die Bodensicht berücksichtigt. Im Vermessungsalltag wird wohl eher ALOS der Wert sein, welche die Einsätze begrenzen wird. Daraus ergibt sich ein ALOS-Wert für kompaktere Systeme wie der DJI Phantom 4 RTK oder der DJI Mavic 3E von knapp über 200 Meter und größere Systeme wie der DJI Matrice 300 RTK von knapp unter 500 Meter.

Bedenkt man aber nun, dass dieser ALOS-Wert als Halbkugel um den Fernpiloten zu sehen ist, muss hierbei noch die horizontale Entfernung für die jeweilige Flughöhe berechnet werden. Zudem muss auch das Contingency Volume innerhalb der Sichtweite liegen (LBA 2022b), wodurch die eigentliche Flugplanung innerhalb der Flight Geography noch kleiner wird.

### 3.2.2 Betriebsbedingte Parameter

Die Ausdehnung des Contingency Volumens und des Bodenrisikopuffers richten sich auch stark nach Parametern, welcher der UAS-Betreiber bzw. Fernpilot



**Abb. 2:** Links: UAS-Betrieb mit Fallschirmsystem, 40 m Flughöhe, 3 m/s Fluggeschwindigkeit bei maximal 5 m/s Windgeschwindigkeit. Rechts: UAS-Betrieb mit Fallschirmsystem, 110 m Flughöhe, 15 m/s Fluggeschwindigkeit bei maximal 15 m/s Windgeschwindigkeit. Grün: Flight Geography; gelb: Contingency Volume; rot: Ground Risk Buffer

beeinflussen kann. Bei der Planung eines Fluggebietes geht es also nicht mehr um maximale Effizienz, sondern in der speziellen Kategorie auch darum, wie man seinen Bodenrisikobereich reduziert, um ggf. bestimmte Gebiete nicht mit berücksichtigen zu müssen (siehe [Abb. 2](#)) oder auch um das Fluggebiet möglichst innerhalb der festgelegten VLOS-Grenzen auszuführen, ohne einen zusätzlichen Startpunkt zu benötigen.

## 4 Änderung der Sonderregeln für (Vermessungs-)Behörden

Die grundlegenden Regeln im Luftrecht für den UAS-Einsatz durch oder unter Aufsicht von Behörden werden auf europäischer Ebene durch Art. 2 Abs. 3a der EU-Grundverordnung 2018/1139 und auf nationaler Ebene durch § 21k der LuftVO geregelt.

Hinsichtlich der Betriebsgenehmigung in der speziellen Kategorie kann man diese so zusammenfassen, dass zwar keine Genehmigung erforderlich ist, aber dennoch die Sicherheitsziele der EU-Drohnenverordnung eingehalten werden müssen. Man muss also die entsprechenden Regeln kennen und anwenden und darf nur von den Sicherheitszielen abweichen, wenn dies zur Erfüllung der behördlichen Aufgaben zwingend erforderlich und im Hinblick auf die Sicherheit vertretbar ist. Somit werden auch eine Risikoanalyse und ein Betriebshandbuch erforderlich. Vor diesem Hintergrund stellt das LBA auf seiner Webseite ein

entsprechendes Formular für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben bereit, welches auch den Verweis auf ein Betriebshandbuch und eine Risikoanalyse vorsieht (LBA 2021).

Am 20.7.2022 veröffentlichte das Bundesministerium für Digitales und Verkehr eine Mitteilung „zur Anwendung und Auslegung des Behördenbegriffs und zur geplanten Änderung des § 21k Luftverkehrs-Ordnung“, welche besagt, dass von § 21k LuftVO ausschließlich Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben im engeren Sinne, sprich mit spezifischen Aufgaben zur Bewahrung oder Wiederherstellung der öffentlichen Sicherheit und Ordnung erfasst werden (BMDV 2022). Nach aktueller Lesart fallen somit alle anderen Behörden und damit auch Vermessungsbehörden nicht mehr unter den Behördenbegriff des § 21k LuftVO.

Daraus ergibt sich für die Betriebsgenehmigung in der speziellen Kategorie aus unserer Sicht nun lediglich der Unterschied, dass man zusätzlich zu dem Betriebshandbuch und der Risikoanalyse, welche ohnehin vorliegen sollte, nun eine Genehmigung der Unterlagen benötigt.

Die nun verpflichtende zusätzliche Einholung von Erlaubnissen für die geografischen Gebiete nach § 21h LuftVO durch die Landesluftfahrtbehörden bzw. Betreiber bringt hier jedoch bei vielen Gebieten einen erheblich höheren Aufwand mit sich als vor der o. g. Mitteilung.

## **5 Fazit: Wie wirkt sich die EU-Drohnenverordnung auf UAS-Vermessungstätigkeiten aus?**

An der Erarbeitung der EU-Drohnenverordnung haben eine Vielzahl kluger Köpfe und Institute mitgewirkt, um europaweit einen einheitlichen, sicheren und grenzübergreifenden UAS-Betrieb zu ermöglichen. Sicherlich dauert Vieles in der praktischen Umsetzung länger als anfänglich geplant. Es gibt zurzeit bei der recht neuen EU-Drohnenverordnung stets wichtige und sicherheitsrelevante Anpassungen wie beispielsweise der Definition von „unbeteiligten Personen“ oder auch ergänzendes Material wie das „Guidance Material“ und die „Acceptable Means of Compliance“. Dies sollte bei der Antragsstellung und den teils langen Bearbeitungszeiten berücksichtigt werden.

Hervorzuheben ist aber auch, dass die EU-Drohnenverordnung nun auch klare Möglichkeiten und Regeln für besondere UAS-Einsätze, wie Einsätze bei Nacht z. B. mit aktiven Sensoren wie Laserscannern, außerhalb der Sichtweite oder mehr als 120 m Flughöhe über Grund festlegt.

Manche Luftfahrtbehörden erwarten im Rahmen des Genehmigungsprozesses, ein Fluggebiet in kleine VLOS-Teilbereiche zu unterteilen, welches in der Praxis schnell an die Grenzen stößt, sofern sich im Gebiet stets Änderungen

durch z. B. Haufwerke, lagerndes Material, Maschinen usw. ergibt und man den Startpunkt flexibel anpassen muss. Andere Luftfahrtbehörden trauen den Fernpiloten zu, dass sie selbstständig die VLOS-Grenzen einhalten, zumal diese auch als maximale Entfernung zum Startpunkt in den UAS-Einstellungen der gängigsten UAS festgelegt werden können.

Für UAS-Vermessungstätigkeiten steht nicht mehr die maximale Effizienz bei der Wahl der Flugparameter im Vordergrund, sondern wie man diese unter den genannten Rahmenbedingungen und Grenzen hinsichtlich des Risikos umsetzen kann. Ggf. kann es ein Vorteil sein, ein größeres UAS einzusetzen, damit sich der VLOS-Bereich vergrößert oder ein kleineres UAS einzusetzen, um höhere Anforderungen an die Betriebsgenehmigung zu vermeiden.

Hat man bisher Schrägluftaufnahmen für eine bessere Höhengenaugigkeit oder bessere Abbildung von vertikalen Flächen genutzt, werden diese innerhalb der festgelegten VLOS-Grenzen schwerer umsetzbar sein. Grund ist hierfür, dass man je nach „Schrägwinkel“ der Aufnahmen auch weit über das Interessengebiet hinausfliegen muss. Gegebenenfalls bedarf es dann zusätzlicher Startpunkte.

Für bestimmte Risikominderungsmaßnahmen ist es notwendig, die Personendichte am Boden entsprechend zu reduzieren. Dies kann bedeuten, dass in bestimmten Gebieten verstärkt der Einsatz am Wochenende bzw. sonntags vormittags nötig ist, wenn möglichst wenig unbeteiligte Personen überfliegen werden.

Alles in allem ist der organisatorische Aufwand zur Einhaltung, aber insbesondere der initiale Aufwand zur Beantragung der Betriebsgenehmigung für klassische UAS-Vermessungstätigkeiten deutlich höher als vor der EU-Drohnenverordnung. Insbesondere sind die Antragsstellung und das SORA sehr einarbeitungsintensiv, weshalb hier die Begleitung bzw. Erstellung der Unterlagen durch ein beratendes Unternehmen empfehlenswert ist. Dadurch werden UAS-Betreiber, welche nur gelegentlich ein UAS in der speziellen Kategorie einsetzen, von dem Aufwand absehen. Diejenigen, welche den Aufwand nicht scheuen, werden mit erweiterten Möglichkeiten der flächenhaften Datenerfassung belohnt. Nicht zuletzt die klaren Strukturen für alle am UAS-Betrieb Beteiligten und ein, durch die Luftfahrtbehörde genehmigtes Sicherheitsniveau entsprechend des Risikos des UAS-Betriebs, schaffen Handlungs- und Rechtssicherheit.

## Literatur

BMDV (2022): [www.dipul.de/homepage/de/aktuelle-meldungen/information-zur-anwendung-und-auslegung-des-behoerdenbegriffs/202207-1.pdf?cid=12x](http://www.dipul.de/homepage/de/aktuelle-meldungen/information-zur-anwendung-und-auslegung-des-behoerdenbegriffs/202207-1.pdf?cid=12x), letzter Zugriff 12/2022.

EASA (2022): [www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems-regulations-eu](http://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems-regulations-eu), letzter Zugriff 12/2022.

LBA (2021): [www.lba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Formulare/B5/B53/Formulare\\_Deutsch/FV.GO-BOS-01\\_26072021.html?nn=2996768](http://www.lba.de/SharedDocs/Downloads/DE/Formulare/B5/B53/Formulare_Deutsch/FV.GO-BOS-01_26072021.html?nn=2996768), letzter Zugriff 12/2022.

LBA (2022a): [www.lba.de/DE/Drohnen/Betriebsgenehmigungen/Betriebsgenehmigung\\_node.html](http://www.lba.de/DE/Drohnen/Betriebsgenehmigungen/Betriebsgenehmigung_node.html), letzter Zugriff 12/2022.

LBA (2022b): [www.lba.de/SharedDocs/Downloads/DE/B/B5\\_UAS/Leitfaden\\_FG\\_CV\\_GRB\\_LUC.html?nn=2996768](http://www.lba.de/SharedDocs/Downloads/DE/B/B5_UAS/Leitfaden_FG_CV_GRB_LUC.html?nn=2996768), letzter Zugriff 12/2022.

### **Kontakt**

Patrick Havel | Marten Krull

Vermessung3D

Eppenhauser Straße 155, 58093 Hagen

[info@vermessung3d.de](mailto:info@vermessung3d.de)

Die Nutzung UAV-basierter Datenerfassung und -auswertung ist heute für viele professionelle Anwenderinnen und Anwender aus der Geodäsie und Photogrammetrie und allgemein dem Geoinformationswesen ein beinahe tägliches Geschäft. Mehr als bei anderen Technologien unterliegen Systeme, Software und rechtliche Rahmenbedingungen einem ständigen Wandel.

In diesem Umfeld ist daher eine fortwährende Auseinandersetzung mit dem Status quo unerlässlich. Dazu gehören Fragen rund um Regularien und Fluggenehmigungsverfahren, Informationen zu modernen Plattformen und Sensoren, sowie zu innovativen Ansätzen für praktische Anwendungen.



ISBN: 978-3-95786-338-6



9 783957 863386

Schriftenreihe des DVW  
Band 105 / 2023  
Printversion: 27,00 Euro  
PDF: kostenfrei  
[www.geodaesie.info](http://www.geodaesie.info)

