

RUNDER TISCH GIS E.V.



Leitfaden UAS und GIS

Grundlagen, Best Practices und Produktinformationen
Version 1.0 (Juli 2026) 1. Auflage

Leitfaden
UAS und GIS
Version 1.0 (2026)

Impressum

Leitfaden UAS und GIS

Version 1.0 (2026) (erschienen 22.07.2026), 1. Auflage

Herausgeber

Aylin Wörle, Michael Cramer, Christiane Salbach, Melanie Elias, Peter Wasmeier, Anette Eltner, Klaus Brand, Jakob Unger, Thomas H. Kolbe

Runder Tisch GIS e. V.

DGPF e.V. - Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation

DVW e. V. - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement

Redaktion

B.Sc. Aylin Wörle, GI Geoinformatik GmbH, Augsburg

Dr. Michael Cramer, Institut für Photogrammetrie und Geoinformatik, Universität Stuttgart

Dipl.-Ing. Christiane Salbach, Runder Tisch GIS e.V.

Prof. Dr. Melanie Elias, Professur für Geovisualisierung, HTW Dresden

Prof. Dr. Peter Wasmeier, Professur für praktische Geodäsie, Hochschule München

Prof. Dr. Anette Eltner, Professur für Geosensorsysteme, TU Dresden

Dr. Klaus Brand, GI Geoinformatik GmbH, Augsburg

Dr. Jakob Unger, Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN)

Prof. Dr. Thomas H. Kolbe, Lehrstuhl für Geoinformatik, TU München

Layout & Satz

Aylin Wörle, GI Geoinformatik GmbH, Augsburg

Bildnachweis Titelbild

Foto © Erik Odiin (Unsplash, zu verwenden im Rahmen der [Unsplash Lizenz](#)), bearbeitet.

Anzeigen

Christiane Salbach, Runder Tisch GIS e. V.

Arcisstraße 21, 80333 München

Tel: [+49 89 / 289-22857](tel:+498928922857)

info@rundertischgis.de

Zitierhinweis: [Nachname Autor, Vorname Autor]: [Titel des Beitrags]. In: Runder Tisch GIS e.V., DGPF e.V., DVW e.V. (Hrsg.): Leitfaden UAS und GIS (Version 1.0), 2026.

Erscheinungsweise

Digital als PDF, <https://www.rundertischgis.de/publikationen/leitfaeden>

Urheberrecht und Hinweise

Alle Rechte vorbehalten. Alle Beiträge und Abbildungen im Leitfaden Version 1.0 sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz geschützt ist, bedarf der vorherigen Genehmigung durch den RUNDEN TISCH GIS E. V., die DGPF E. V. - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR PHOTOGRAMMETRIE, FERNERKUNDUNG UND GEOINFORMATION E. V. und den DVW E. V. - GESELLSCHAFT FÜR GEODÄSIE, GEOINFORMATION UND LANDMANAGEMENT. Die Beiträge geben die Meinung der Autoren wieder. Die Vorstellung von Softwareprodukten und Dienstleistungen in diesem Leitfaden erfolgt ohne Gewähr oder Anspruch auf Vollständigkeit. Sämtliche Angaben zu den Produkten beruhen ausschließlich auf Informationen der jeweiligen Hersteller. Diejenigen Bezeichnungen von im Leitfaden genannten Erzeugnissen, die zugleich eingetragene Warenzeichen sind, wurden nicht besonders kenntlich gemacht. Es kann also aus dem Fehlen der Markierung TM oder ® nicht geschlossen werden, dass die Bezeichnung ein freier Warenname ist. Ebenso wenig ist zu entnehmen, ob Patente oder Gebrauchsmusterschutz vorliegen.



Grußwort der Verbände

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

unbemannte Flugsysteme (UAS) haben sich in den vergangenen Jahren von einer spezialisierten Technologie zu einem vielseitig eingesetzten Werkzeug der Geodatengewinnung entwickelt. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an die effiziente Verarbeitung, Analyse und Integration der erfassten Daten in Geoinformationssysteme. Die Verbindung von UAS und GIS eröffnet dabei neue Möglichkeiten für Planung, Monitoring, Dokumentation und Entscheidungsprozesse in zahlreichen Anwendungsfeldern.

Ob in Kommunen, Behörden, Ingenieur- und Planungsbüros, im Umwelt- und Infrastrukturmonitoring oder im Katastrophenschutz - die Nutzung von UAS-generierten Geodaten gewinnt kontinuierlich an Bedeutung. Mit den technologischen Entwicklungen wachsen jedoch auch die Anforderungen an Fachwissen, Methodenkompetenz und die Auswahl geeigneter Werkzeuge und Prozesse.

Vor diesem Hintergrund haben sich unsere Verbände zusammengeschlossen, um mit dem Leitfaden „UAS & GIS“ eine praxisorientierte Orientierungshilfe bereitzustellen. Ziel ist es, aktuelle Grundlagen verständlich aufzubereiten, bewährte Anwendungsbeispiele vorzustellen und einen Überblick über relevante Software-, Hardware- und Dienstleistungsangebote zu geben. Der Leitfaden soll Anwenderinnen und Anwendern dabei helfen, Potenziale zu erkennen, fundierte Entscheidungen zu treffen und erfolgreiche Projekte umzusetzen.

Besonders wertvoll ist dabei die enge Zusammenarbeit von Expertinnen und Experten aus Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung. Durch die Bündelung unterschiedlicher Perspektiven und Erfahrungen ist ein Leitfaden entstanden, der sowohl technologische Entwicklungen als auch praktische Anforderungen berücksichtigt und damit einen Beitrag zum Wissenstransfer innerhalb der Geoinformations- und UAS-Community leistet.

Unser Dank gilt allen Autorinnen und Autoren, Gutachterinnen und Gutachtern sowie den beteiligten Organisationen, die mit ihrem Engagement und ihrer Expertise zur Entstehung dieses Leitfadens beigetragen haben.

Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre, wertvolle Impulse für Ihre tägliche Arbeit und viel Erfolg bei der Umsetzung innovativer UAS- und GIS-Anwendungen.

Mit freundlichen Grüßen



Rudolf Staiger
DVW



Thomas H. Kolbe
Runder Tisch GIS



Dorota Iwaszczuk
DGPF

Inhaltsverzeichnis

Grußwort der Verbände	3
Einleitende Worte	7

1 Grundlagen 9

1.1 Grundlagen unbemannte Flugsysteme (UAS)	9
1.1.1 Einführung in UAS	9
1.1.2 Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von UAS - Deutschland.....	25
1.1.3 Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von UAS - Österreich.....	36
1.1.4 Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von UAS - Schweiz	40
1.1.5 Grundlagen der optischen Datenerhebung.....	43
1.1.6 Gängige Lage- und Höhenreferenzsysteme	46
1.1.7 Grundlagen der photogrammetrischen Prozesskette.....	48
1.1.8 Grundlagen luftgestütztes Laserscanning.....	57
1.2 UAS-Hardware und Sensorik	67
1.2.1 UAS-Plattformen.....	67
1.2.2 Sensorik	79
1.3 Missionsplanung und Datenerhebung.....	89
1.3.1 Flugplanung und Steuerung	89
1.3.2 Datenverarbeitung.....	95
1.4 Verarbeitung von UAS-Daten in GIS und Geodatenbanken	99
1.4.1 Datenformate	99
1.4.2 Datenübernahme und -management.....	110
1.4.3 Analyse und Visualisierung	122

2 Praxisanwendungen 133

2.1 Anwendungen aus der behördlichen Vermessung	133
2.1.1 Flurbereinigung	133
2.1.2 Bebauungspläne	135
2.2 Land- und Forstwirtschaft	137
2.2.1 Zum Einsatz von UAV-Daten für die Waldinventur und Betriebsgutachten	137
2.2.2 Drohnengestützte Rehkitzsuche vor der Mahd in einem landwirtschaftlichen Betrieb ...	141
2.2.3 Drohnenbasierte 3D-Rekonstruktion von Hof- und Feldstrukturen.....	143
2.3 Wasserwirtschaft und Hydrologie	147
2.3.1 Datenerhebung am Gewässer	147
2.3.2 Präzision unter der Wasseroberfläche: Bathymetrie zum Überflutungsschutz mit Drohnen	151
2.3.3 UAS-gestützte Datenerfassung für die Starkregenvorsorge - Erfahrungen aus einem Forschungs- und Anwendungsprojekt	156

2.4 Katastrophenschutz und Umweltmonitoring.....	159
2.4.1 <i>Neue Maßstäbe für die Überwachung kritischer Infrastrukturen: Drohneneinsätze zur Erstellung digitaler Zwillinge</i>	<i>159</i>
2.4.2 <i>PyroScout - Waldbranderkennung mittels Drohne</i>	<i>162</i>
2.4.3 <i>Effizientes Monitoring alpiner Naturgefahren mit Photogrammetrie</i>	<i>166</i>
2.5 Anwendungen in Kommunen und Städten	170
2.5.1 <i>Eine 3D-Karte des Oktoberfests - Wie Drohnenmapping die Sicherheit auf der Wiesen unterstützen kann</i>	<i>170</i>
2.5.2 <i>Aktuelle Orthofotos trotz stark frequentiertem Luftraum</i>	<i>173</i>
2.5.3 <i>Die Erweiterung kommunaler Geoinformationssysteme durch UAS-Daten.....</i>	<i>177</i>
2.5.4 <i>10 Jahre UAS-Betrieb in Osnabrück: Entwicklung, Herausforderungen und Innovationen in der Geodatenerfassung.....</i>	<i>181</i>
2.5.5 <i>UAS-Ergebnisse im Online-GIS nutzen - Stadt Koblenz</i>	<i>185</i>
2.5.6 <i>Regelkonforme Integration von aus-Navigation und GIS im 3D Urbanen Luftraum (KONFORMUS)</i>	<i>190</i>
2.6 Bauwesen und Denkmalschutz	193
2.6.1 <i>3D-Rekonstruktion von Kulturgütern mit AliceVision Meshroom</i>	<i>193</i>
2.7 Sonstiges	196
2.7.1 <i>Drohneneinsätze, LIDAR und Deep Learning zur Kollisionsvermeidung von Vegetation und Freileitungen.....</i>	<i>196</i>
2.7.2 <i>Genauigkeit der Vermessung mit Drohnen - DJI Modelle im Vergleich</i>	<i>200</i>
2.7.3 <i>Brückenschlag durch geo-Cluster-Zwillinge auf Basis europäischer Referenzstandards ..</i>	<i>202</i>

3 Produktvorstellungen

209

3.1 Kommerzielle Software	209
3.1.1 <i>3DF Zephyr.....</i>	<i>209</i>
3.1.2 <i>3Dsurvey - All-in-One-Software für Photogrammetrie</i>	<i>211</i>
3.1.3 <i>ArcGIS Reality Mapping - Produktsuite</i>	<i>213</i>
3.1.4 <i>CityGRID - Gebäudemodellierung aus Drohnenaufnahmen mit CityGRID.....</i>	<i>219</i>
3.1.5 <i>Correlator3D - High-Performance Photogrammetry for Drone Mapping.....</i>	<i>221</i>
3.1.6 <i>PhotoMesh - UAV-Datenauswertung mit PhotoMesh.....</i>	<i>223</i>
3.1.7 <i>Pointly Plattform - für KI basierte Punktwolkenanalyse.....</i>	<i>225</i>
3.2 Open-Source / Non-commercial Software	227
3.2.1 <i>CloudCompare - "Open-source 3D point cloud processing software"</i>	<i>227</i>
3.2.2 <i>Meshroom - Software für 3D Rekonstruktion</i>	<i>229</i>

Anhang

231

Ansprechpartner und Autoren	231
Reviewer	234

Einleitende Worte

Verfasser: Klaus Brand

Hintergründe und Zeitpunkt für die Entstehung des neuen Leitfadens

Ein Leitfaden des Runden Tisch GIS e.V. mit einer langen Tradition und gegenwärtig 8 Auflagen ist der Leitfaden „Mobiles GIS“. In der letzten Auflage vom Dezember 2023 wurde dort bereits mit dem Kapitel Mobile Mapping, also der Datenerfassung mit Sensoren auf beweglichen Trägersystemen, die Brücke zur Datenerfassung mit UAS geschlagen. Im Leitfaden „Mobiles GIS“ wurde die mobile Datenerfassung mittels UAS in einem kompakten Überblick bereits auf 20 Seiten vorgestellt. Da die Bedeutung des Themas sehr schnell gewachsen ist, wurden ab 2024 Überlegungen angestellt, diesem einen eigenen Leitfaden zu widmen. Diese Idee konnte dann zusammen mit den weiteren Branchenverbänden DGPF e.V. und DVW e.V. konkretisiert werden. Mitte 2025 stand die Finanzierung für die organisatorischen Aufwände und es konnte mit der Zusammenstellung des Redaktionsteams die Arbeit aufgenommen werden.

Wann ist der richtige Zeitpunkt für einen Leitfaden?

Die Leitfäden zielen thematisch auf Entwicklungen ab, die neu sind und für den GIS-Anwendungsbereich damit Chancen eröffnen, um effizienter, aktueller oder auch genauer bezüglich der Auswertung von Geodaten zu sein. Häufig geschieht das durch technologische Neuentwicklung der Datenerfassung und Auswertungsmethoden oder einer Kombination von Technologien mit räumlichem Bezug. Da die Leitfäden immer einen Blick auf den praktischen Nutzen und die Anwendungsbereiche haben, ist der Zeitpunkt für ein neues Leitfadenthema häufig dann, wenn die Methoden oder Technologien in der Forschung bereits etabliert sind, erste Standards entwickelt wurden und erste fertige Softwareprodukte im Markt zur Verfügung stehen.

Wie bereits bei den Leitfäden „Mobiles GIS“ kommt auch im Leitfaden „UAS und GIS“ ein weiterer Aspekt hinzu, der den Bedarf der Anwender aus dem GIS-Bereich bezüglich einer Orientierungshilfe erklärt. Dies ist das Thema des modularen Aufbaus der Gesamtlösung und die Kombination verschiedener Technologien und Softwareprodukte. Im vorliegenden Leitfaden ist für den gesamten Prozess von der Flugplanung, der Auswahl des richtigen Trägersystems, den Kameras und Sensoren bis hin zur lagerichtigen Erfassung der Rohdaten eine breite Auswahl- und Kombinationsmöglichkeit gegeben. Es handelt sich also nicht um ein abgeschlossenes Komplettsystem eines Herstellers, sondern um Kombinationen aus Einzellösungen, die von der Aufgabenstellung abhängen. Nicht zuletzt steht noch die Aufbereitung der Rohdaten mit dem Handling von großen Datenmengen und der automatisierten Übergabe von Ergebnissen in das jeweilige GIS-System an.

Die einfache und zeitnahe Übergabe der Daten in die GIS-Systeme ist entscheidend für die Verbreitung des UAS-Einsatzes in Verbindung mit Geoinformationssystemen in den verschiedenen möglichen Einsatzbereichen. Neben der hohen Auflösung der Daten ist ein weiterer Grund für das schnelle Wachstum des Drohneinsatzes die Möglichkeit zur Echtzeit-GIS-Analyse, besonders bei Anwendungen im Katastrophenschutz. Die Kombination von Datenerfassung mit UAS und Weiterverarbeitung im GIS ermöglicht vielfältige neue Anwendungsmöglichkeiten in zukunftsorientierten GeoIT-Anwendungen. Erfreulicherweise hat sich die Leitmesse der Vermessungs- und GIS-Branche, die INTERGEO, auch zur Leitmesse für UAS entwickelt, sodass hier das gesamte Spektrum an Lösungsbausteinen auf einer Fachmesse vereint ist.

Praxisbezug und Anwendungsgebiete

Die Leitfäden haben jeweils als Einführung Fachkapitel, in denen die rechtlichen und technischen Grundlagen erklärt werden. Diese Kapitel sind äußerst hilfreich, wenn man neu in das Thema einsteigt. Mit den weiterführenden Links erhält man Informationen und Verlinkungen auf die Quellen, an denen diese Informationen gepflegt werden. Sehr positiv wurden in vergangenen Leitfäden die Praxisbeispiele von den Lesern bewertet, da diese zum einen bereits existierende oder etablierte Anwendungen zeigen, aber auch auf die besonderen Herausforderungen hinweisen. Auch die Kombination der eingesetzten Produkte zeigt an den konkreten Fragestellungen, wie erfolgreiche Lösungen aussehen können und mit welchen Aufwänden der Einsatz verbunden ist. Der Einsatz von UAS zur Datenerfassung bewegt sich im Kontext von terrestrischen mobilen Systemen, Befliegungen mit Flugzeugen und zunehmend auch hochauflösenden und aktuellen Satellitendaten. Die Aufgabenstellung und das verfügbare Budget ergeben die passende Auswahl. Der Vorteil gegenüber Befliegung mit Flugzeug liegt in der höheren Flexibilität und den deutlich niedrigeren Kosten. Zudem ist die hohe Auflösung ein Vorteil gegenüber Flugzeugeinsatz und Satellitendaten.

Aus diesen Vorteilen ergeben sich die aktuell wichtigsten Anwendungsbereiche:

- Datenaufnahme für Bauwerkserfassung und 3D-Modelle (Baufortschritt oder Schadensermittlung)
- Aktualisierung der topographischen Landesvermessung
- Erfassung von Rohstoffabbau mit Volumen-Ermittlung
- Naturschutzmonitoring (besonders bei schwer zugänglichen Gebieten, Feuchtgebieten und Gewässern)
- Infrastrukturmonitoring von der Bauphase bis zur laufenden Überwachung
- Einsatz in der Land- und Forstwirtschaft zur Schädlingsfrüherkennung oder Vorratsermittlung (erste Tests erfolgen aktuell in der EU-Agrarförderung bei schwer erreichbaren Gebieten)
- Katastrophenschutz und Lebensrettung (aktuelles Lagebild und Personensuche über Infrarotsensoren)

Es gibt noch zahlreiche spezialisierte Anwendungsbereiche, bei denen die jeweilige Sensorik genau auf die Anwendung ausgerichtet ist. Die zukünftige Entwicklung der Märkte hängt stark von den Rahmenbedingungen für die Flugplanung ab, die neben Datenschutz und Personenschutz auch das Thema Flugverbotszonen und technische Hindernisse klar regeln muss.

Bedeutung des Leitfadens im Netzwerk

Die Leitfäden, die in den letzten 20 Jahren am Runden Tisch GIS entstanden sind, hatten neben dem Nutzen für die Leser auch eine hohe Bedeutung für die Sichtbarkeit des Netzwerkes und die Zusammenarbeit der Mitglieder und Interessenten. Über den jeweiligen Themenbezug bildeten sich Interessensgruppen und neue Kontakte, aus denen häufig Kooperationen entstanden sind. Im Netzwerk konnten wir über die Leitfäden neue Mitglieder gewinnen und haben über die Leitfäden auch unsere GIS-Themen an neue Anwendergruppen oder an politische Entscheidungsträger vermitteln können. In vielen Fällen wurden Leitfäden auch als Grundlage für die Ausbildung an Universitäten verwendet.

Beim vorliegenden Leitfaden entstand zudem erstmals eine enge Zusammenarbeit aus drei Branchenverbänden, die im Themenfeld der raumbezogenen Informationstechnologie eigene Schwerpunkte haben, von der Fernerkundung über die Vermessung bis zum GIS, und ihre Expertise im Leitfaden zusammengebracht und redaktionell abgestimmt haben. Die drei Organisationen Runder Tisch GIS e.V., DGPF e.V. und DVW e.V. werden den Leitfaden veröffentlichen und können die Inhalte in ihre Verbandsarbeit einbinden, beispielsweise im Rahmen von Veranstaltungen oder zum Nutzen ihrer Mitglieder.

Literatur

Leitfaden Mobiles GIS, Version 5.0 vom Dezember 2023, Herausgeber Runder Tisch GIS e.V.

1 Grundlagen

1.1 Grundlagen unbemannte Flugsysteme (UAS)

1.1.1 Einführung in UAS

1.1.1.1 Einleitung - Definitionen und Abgrenzungen

Verfasser: Aylin Wörle

Einführung

Unbemannte Flugsysteme haben sich in den vergangenen Jahren von einer Nischentechnologie zu einem zentralen Werkzeug in der Geoinformation entwickelt. Fortschritte in Sensorik, Navigation, Datenverarbeitung und Automatisierung ermöglichen heute eine hochauflösende, flexible und vergleichsweise kosteneffiziente Erfassung räumlicher Daten. Gleichzeitig wächst der Bedarf an aktuellen, detaillierten und dreidimensionalen Geodaten in zahlreichen Anwendungsfeldern - von der Vermessung über Umweltmonitoring bis hin zur Infrastrukturplanung.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die systematische Auseinandersetzung mit der Nutzung von unbemannten Flugsystemen (UAS) in Verbindung mit Geoinformationssystemen (GIS) zunehmend an Bedeutung. Der vorliegende Leitfaden verfolgt das Ziel, eine strukturierte und praxisorientierte Orientierung in diesem dynamischen Themenfeld zu bieten.

Definitionen und Terminologie

Im fachlichen Kontext haben sich verschiedene Begriffe für unbemannte Luftfahrzeuge etabliert, die teilweise synonym, teilweise jedoch mit unterschiedlicher Bedeutung verwendet werden.

Der Begriff Unmanned Aerial Vehicle (UAV) bezeichnet im engeren Sinne das eigentliche Luftfahrzeug - also ein unbemanntes, angetriebenes Fluggerät ohne Pilot an Bord, das entweder ferngesteuert oder autonom entlang vordefinierter Flugrouten betrieben wird. In der wissenschaftlichen Literatur setzte sich dieser Begriff etwa ab Mitte der 2000er Jahre zunehmend durch.

Davon zu unterscheiden ist der Begriff Unmanned Aerial System (UAS), der im professionellen und regulatorischen Kontext bevorzugt verwendet wird. Ein UAS umfasst nicht nur das Luftfahrzeug selbst, sondern das gesamte System, bestehend aus:

- dem Fluggerät (UAV),
- der Bodenstation (z.B. Fernsteuerung, Missionsplanungssoftware),
- den Kommunikationsverbindungen sowie
- gegebenenfalls Start- und Landeeinrichtungen.

Insbesondere Luftfahrtbehörden wie die europäische Agentur für Flugsicherheit (EASA), das Luftfahrt Bundesamt (LBA) oder die US-amerikanische Federal Aviation Administration (FAA) verwenden bewusst den Systembegriff, um den ganzheitlichen Charakter des Betriebs zu betonen.

Weitere gebräuchliche Begriffe sind:

- RPAS (Remotely Piloted Aircraft System): betont die Steuerung durch einen menschlichen Piloten und wird häufig im regulatorischen Kontext verwendet.
- RPA (Remotely Piloted Aircraft): bezeichnet das Luftfahrzeug innerhalb eines RPAS.
- Drohne (engl. „drone“): ein umgangssprachlicher Begriff, der sich insbesondere im öffentlichen und medialen Diskurs etabliert hat, jedoch im fachlichen Kontext aufgrund seiner unscharfen Definition und historisch militärischen Konnotationen teilweise kritisch gesehen wird.

Eine wichtige Abgrenzung betrifft zudem ältere Formen der luftgestützten Datenerfassung, wie beispielsweise Drachen-, Ballon- oder bemannte Luftbildaufnahmen. Während diese historisch als Vorläufer betrachtet werden können, beziehen sich die hier verwendeten Begriffe UAV und UAS in der Regel auf frei fliegende, angetriebene und aktiv gesteuerte oder autonom navigierende Systeme.

Unabhängig von der Terminologie ist aus Sicht der Geoinformation entscheidend, dass UAS als Trägerplattformen für Sensoren fungieren. Die eigentliche Relevanz ergibt sich somit aus ihrer Fähigkeit, georeferen-

zierte Daten mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu erfassen und für weitere Analysen bereitzustellen.

Einordnung im Kontext der Geoinformation

Die Nutzung von UAS ist eng mit der Entwicklung der Fernerkundung und der Geoinformation verknüpft. Während klassische Verfahren wie satelliten- oder flugzeuggestützte Datenerfassung großräumige Abdeckungen ermöglichen und terrestrische Messverfahren hohe Genauigkeiten im lokalen Maßstab liefern, schließen UAS die Lücke zwischen diesen beiden Ansätzen.

Sie ermöglichen:

- hochauflösende Datenerfassung auf lokaler bis regionaler Ebene,
- flexible und kurzfristige Befliegungen,
- wiederholbare Erhebungen für Monitoring-Anwendungen sowie
- die direkte Integration der erzeugten Daten in GIS-Workflows.

Die daraus entstehenden Produkte - etwa Orthophotos, digitale Gelände- und Oberflächenmodelle, Punktwolken oder 3D-Meshes - sind heute integraler Bestandteil moderner Geoinformationssysteme.

Begründung und Zielsetzung des Leitfadens

Mit der rasanten Verbreitung von UAS-Technologien geht eine zunehmende Diversifizierung der Anwendungen, Systeme und Softwarelösungen einher. Gleichzeitig bestehen weiterhin Unsicherheiten hinsichtlich:

- geeigneter Einsatzszenarien,
- technischer und methodischer Grundlagen,
- rechtlicher Rahmenbedingungen sowie
- der Integration der erhobenen Daten in bestehende GIS-Strukturen.

Zudem ist das Themenfeld durch eine hohe Dynamik geprägt: Neue Sensoren, Softwarelösungen und regulatorische Entwicklungen führen dazu, dass sich Best Practices kontinuierlich weiterentwickeln.

Vor diesem Hintergrund besteht ein klarer Bedarf an einer strukturierten, neutralen und praxisnahen Orientierungshilfe, die

- grundlegende Konzepte und Begriffe verständlich aufbereitet,
- aktuelle Technologien und Methoden einordnet,
- typische Workflows von der Datenerhebung bis zur GIS-Integration beschreibt,
- praxisnahe Anwendungsbeispiele aus verschiedenen Bereichen darstellt und
- eine vergleichende Übersicht relevanter Hard- und Softwarelösungen bietet.

Der Leitfaden richtet sich an Anwenderinnen und Anwender aus Verwaltung, Wirtschaft, Wissenschaft und Praxis, die UAS zur Datenerhebung einsetzen oder entsprechende Daten in Geoinformationssystemen weiterverarbeiten und analysieren möchten.

Ziel ist es, sowohl Einsteigern als auch fortgeschrittenen Nutzenden eine fundierte Grundlage zu bieten, um die Potenziale von UAS im Kontext der Geoinformation effizient, rechtssicher und zielgerichtet zu erschließen.

Literatur

- Aber, J. S., Marzolff, I. & Ries, J. B. (2019): Small-Format Aerial Photography and UAS Imagery: Principles, Techniques and Geoscience Applications. Elsevier, Amsterdam.
- Colomina, I. & Molina, P. (2014): Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79-97.
- Dalamagkidis, K. (2015): Classification of UAVs. In: Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Springer, Dordrecht.
- European Union Aviation Safety Agency (EASA) (2019): Regulation (EU) 2019/945 on unmanned aircraft systems.
- Granshaw, S. I. (2018): RPV, UAV, UAS, RPAS ... or just drone?, in: e Photogrammetric Record, 33, 160-170.
- International Civil Aviation Organization (ICAO) (2015): Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS). ICAO Doc 10019, Montréal.
- WBG (Hrsg.) (2023): UAVs for the Environmental Sciences - Methods and Applications. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.

1.1.1.2 Historische Entwicklung von unbemannten Fluggeräten

Verfasser: Irene Marzolff

Der Einsatz von UAS (*unmanned* oder auch *unpiloted* oder *uncrewed aerial systems*) zur bild- oder videobasierten Dokumentation, Inspektion, Vermessung und zum Monitoring von Umwelt und Infrastruktur ist in Wirtschaft, Verwaltung und Forschung mittlerweile allgegenwärtig. Die Verfügbarkeit von unbemannten Luftfahrtsystemen hat in den 2010er Jahren durch die rasante Entwicklung von UAVs (*unmanned aerial vehicles*), Flugsteuerungstechnik, neuen miniaturisierten Sensoren und 3D-Bildverarbeitungstechniken die Erfassung von hochdetaillierten Geodaten mit Zentimetergenauigkeit revolutioniert. Die Konzepte, Techniken und Anwendungen von UAS haben jedoch eine lange Vorgeschichte und bauen auf fast 150 Jahren unbemannter Fernerkundung mit verschiedenen Arten von Sensoren und Plattformen auf. Drachen, Ballone, Zepeline, Gleitschirme, Modellflugzeuge und Modellhubschrauber gehören zu den gängigsten Fluggeräten, die vor dem Aufkommen moderner Drohnen eingesetzt wurden. Dieses Kapitel fasst die Entwicklung der unbemannten Luftbildfernerkundung von ihren Anfängen bis heute zusammen.

Unbemannte Luftbilder an den Anfängen der Fernerkundung

Lange vor der Satellitenfernerkundung und noch länger vor dem Zeitalter der Drohnen wurden Landschaftsbilder aus der Vogelperspektive mit Hilfe unbemannter Plattformen aufgenommen. Bereits Mitte des 19. Jahrhunderts, nur zehn Jahre nach der Erfindung der Daguerreotypie, wurden Experimente mit an Drachen und Ballons befestigten Kameras von dem französischen Ingenieur Oberst Aimé Laussedat durchgeführt. Er gilt heute gemeinsam mit dem deutschen Bauingenieur Albrecht Meydenbauer als Wegbereiter der Photogrammetrie. Weitere Versuche mit Ballons wurden in den 1860er bis 1880er Jahren in Amerika, Deutschland und Frankreich unternommen (Aber et al., 2019:4). Am bekanntesten sind aber aus diesen Frühzeiten der Fernerkundung die Arbeiten des französischen Photographen Arthur Batut, der 1890 eine 70-seitige Abhandlung über Luftbildphotographie mit einem Drachen und einer einfachen Holzkamera mit dem Titel *La photographie aérienne par cerf-volant* veröffentlichte (Batut, 1890). Zu Batuts fortschrittlichen Ideen über mögliche Anwendungen solcher Bilder gehört die Messung von Geländehöhen anhand von zwei sich überlappenden Photographien: Diese damals neu diskutierte Methode sollte zur Stereophotogrammetrie werden und damit zu einer der wichtigsten Standardmethoden in der heutigen Luftbildvermessung und UAS-Fernerkundung. Batut sah in der Drachenphotographie auch ein vielversprechendes Mittel zum Umweltmonitoring und nannte als Beispiel die Kartierung von Reblausbefall in Weinbergen (ein damals dramatisch akutes Problem in französischen Weinbaugebieten).

Mit der Erfindung des motorisierten Flugzeugs durch Wilbur und Orville Wright zu Beginn des 20. Jahrhunderts verloren unbemannte Fluggeräte als Kameraplattformen für etwa 70 Jahre an Bedeutung, obwohl die Luftbildfernerkundung sich stark entwickelte. Die beiden Weltkriege trieben durch den Bedarf an militärischer Aufklärung und präzisen Kartierungen die technischen Fortschritte bei Flugzeugen, Kameras, Filmen und der Bildauswertung rasch voran. Aber auch zivile Akteure, die sich mit der Dokumentation, Überwachung und Interpretation von Landschaftsmustern und -prozessen befassten, profitierten in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts in hohem Maße von diesen Entwicklungen. Dies spiegelt sich wider in zahlreichen Publikationen über den Wert von Luftbildern für die Geografie, Landschaftsökologie, Geologie, Archäologie und andere Disziplinen (z.B. Troll, 1939). Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden ab den 1950er Jahren systematische Luftbildbefliegungen und photogrammetrische Kartierungen zu einer Standardaufgabe für die spätestens jetzt zivilen Vermessungsämter der Industrieländer. Die Entwicklung der Satellitenfernerkundung während des Kalten Krieges führte die Erdbeobachtung erneut in neue Dimensionen, mit unbemannten Plattformen außerhalb des Luftraums und zeilenabtastenden Scannern, die einen neuen Typ Fernerkundungsbilder lieferten.

Bis zu den 1970er Jahren war nicht nur die Bildaufnahme, sondern auch die Bildanalyse mittels Luftbildphotogrammetrie und Satellitenbildverarbeitung zu einer professionellen Aufgabe geworden, die von ausgebildeten Fachleuten mit Zugang zu teuren Auswertegeräten und spezialisierter Hardware und Software durchgeführt wurde. Dies stellte eine große Hürde für viele praktische Anwendungen und Forschungsvorhaben im Umweltbereich, der Planung und dem Kulturmanagement dar. In vielen Fällen hätten Akteure in diesen Bereichen von Luftbildern zur Dokumentation, Überwachung und Analyse von Objekten und dynamischen Prozessen auf der kleinräumigen, lokalen Skala – wie z.B. Grabungsdokumentation, Küstenerosions-Monitoring oder Erkennung von Schädlingsbefall auf Ackerflächen – erheblich profitieren können. Die geringe zeitliche bzw. räumliche Auflösung von konventionellen Luftbildern bzw. Satellitenbildern und die hohen Kosten für deren Anschaffung und Auswertung verhinderten aber häufig deren Einsatz außerhalb fachlich einschlägiger Ämter und Betriebe. Aus dieser Situation heraus erklärt sich, dass parallel zur Weiterentwicklung der Satellitenfernerkundung in den 1970er und 1980er Jahren die Luftbildphotographie aus geringer Höhe mit

low-tech-Fluggeräten und -Sensoren ein allmähliches Comeback zunächst in der Forschung erlebte und damit die Weichen stellte für die heutige UAS-Fernerkundung auch in der Anwendung.

Die Wiederbelebung der unbemannten Luftbildfernerkundung im späten 20. Jahrhundert

Ab ca. 1970 wurden handelsübliche Kleinbildkameras zunehmend für Luftaufnahmen aus geringer Flughöhe in der Archäologie und Denkmalforschung sowie in der Forstwissenschaft, Landwirtschaft, Vegetationskunde und physischen Geographie eingesetzt. In den folgenden Jahrzehnten etablierte sich der Begriff *small-format aerial photography* oder SFAP (Warner et al., 1996; Aber et al. 2019) für eine Nischen-Fernerkundungstechnik, die von einer kleinen Zahl von Enthusiasten mit nicht-metrischen Kameras auf oft unkonventionellen und unbemannten, speziell angefertigten Fluggeräten betrieben wurde: Fertig zu kaufende, integrierte Systeme aus Sensor und Plattform gab es damals ebenso wenig wie Digitalkameras und automatisierte Flugsteuerung über GNSS (Globale Navigationssatellitensysteme). Insbesondere KAP (*kite aerial photography*) als „Teildisziplin“ der SFAP wurde für wissenschaftliche, aber auch Freizeit- und künstlerische Zwecke beliebt. Bis zur Jahrtausendwende bestand die gängigste Kombination aus Sensor und Plattform aus analogen, funkgesteuerten Kameras mit Kleinbilddfilm (36 Aufnahmen pro Filmrolle), manchmal auch Mittelformatfilm (12 Aufnahmen pro Filmrolle), und gefesselten Fluggeräten wie Drachen, Ballonen oder Heißluft- und Helium-Luftschiffen (Aber et al., 2019:93-118). Die Halteleinen und Notwendigkeit des Filmwechsels alle 36 Bilder schränkten den Befliegungsbereich sowohl horizontal als auch vertikal auf wenige Zehner bis Hunderter Meter ein. Einige Studien nutzten auch manuell gesteuerte Modellflugzeuge (z.B. Przybilla & Wester-Ebbinghaus, 1979); aufgrund ihrer technischen Komplexität und des erforderlichen fliegerischen Könnens waren sie jedoch weniger beliebt. Die zunächst rein analoge Bildanalyse verlagerte sich in den 1990er Jahren hin zur digitalen Verarbeitung von gescannten Negativen oder Dias. Damit konnten die bereits in der Satellitenfernerkundung etablierten digitalen 2D-Bildverarbeitungstechniken wie Vegetationsindizes und Bildklassifikationen angewendet werden (z.B. Fouché & Booyen, 1994; Marzolf, 1999), während die stereophotogrammetrische 3D-Analyse von SFAP noch weitgehend analog blieb.

Erst Mitte der 2000er Jahre konnten Digitalkameras bezüglich Preis und Bildqualität mit analogen Fotokameras konkurrieren, wodurch die Bildaufnahme erheblich beschleunigt wurde, die Bilder unmittelbar digital verfügbar waren und das Spektrum der Anwendungen sich rasch zu erweitern begann. Gleichzeitig wurde die inzwischen im professionellen Vermessungsbereich entwickelte digitale Photogrammetrie (die allerdings entsprechende Fachkenntnisse voraussetzte) zugänglicher, da die Hardware-Anforderungen und Software-Preise sanken. Die Arbeitsabläufe insbesondere für die 3D-Datenerfassung waren jedoch wenig automatisiert, die Qualität und Dichte von mit *stereo matching* extrahierten Punktwolken waren für heutige Verhältnisse gering (vgl. Marzolf, 2022) und echte 3D-Geodatenformate kaum verfügbar. Auch aufgrund der Ausrichtung von Bildverarbeitungs- und Photogrammetrie-Software auf Satellitenbilder mit weitaus geringerer Auflösung und auf systematische Luftbildbefliegungen mit kalibrierten Großformat-Vermessungskameras blieb die digitale Analyse von SFAP eine Herausforderung, die nicht selten als etwas verschrobene Idee belächelt wurde. So teilte der technische Support eines Marktführers im GIS-Bereich der Autorin noch 2004 mit: „Ich fürchte, dass Sie mit Ihren speziellen Daten an die Grenzen der Machbarkeit stoßen.“

Entwicklungen moderner UAS seit 2010

Rückblickend markiert das genannte Zitat das Ende der „prä-UAS“ und „prä-SfM“-Ära. Ab etwa 2005 bauten die ersten Modellflugzeug-Piloten GPS/INS-Flugstabilisierungssysteme und Autopilot-Flugsteuerungen in ihre Starrflügler ein (z.B. Hardin & Jackson, 2005) und rüsteten diese auf zu (semi-)autonomen Fluggeräten, die wir heute als *fixed-wing UAS* bezeichnen. Dies war der Beginn einer rasanten Weiterentwicklung von Plattformen, Sensoren und Software ab etwa 2010 (siehe auch Colomina & Molina, 2014; Manfreda et al., 2018), in der die „Grenzen der Machbarkeit“ in weite Ferne verschoben wurden:

Plattformen: Ab etwa 2010 kamen autonom oder im halbautomatischen Modus fliegende Starrflügler-, Multikopter- und hybride VTOL-UAS (*vertical take-off and landing*) in einer Vielzahl von Preisklassen, Größen und technischen Konfigurationen auf den Verbraucher- und Profimarkt, i.d.R. mit dedizierter Flugplanungs- und Flugkontroll-Software. Ein Wendepunkt für den Einsatz von Drohnen in der Umweltforschung stellte die Markteinführung der chinesischen DJI Phantom-Quadropterserie ab 2013 da, die sich als günstige Einstiegsdrohne für die kleinen Untersuchungsgebiete von typischen Fallstudien enormer Beliebtheit erfreute. In der praktischen Anwendung in Wirtschaft und Verwaltung, die oft eine größere Flächenabdeckung erfordert, waren Starrflügler und Nurflügler zunächst wegen der längeren Flugzeiten beliebter. Inzwischen haben *high-end*-Quadropters und größere Multikopter mit höherer Nutzlastkapazität dank ihrer besseren Manövrierfähigkeit beim Starten, Landen und Fliegen und ihrer Schwebefähigkeit den wichtigsten Platz eingenom-

men. Seit etwa 10 Jahren sind viele professionelle UAS mit hochpräzisen RTK/PPK-GNSS-Systemen ausgestattet, so dass Bodenpasspunkte für die Georeferenzierung reduziert oder weggelassen werden können.

Sensoren: In den Anfangszeiten wurden die UAS durch die Anbieter oder Anwender zumeist mit kommerziellen Kleinformat-Digitalkameras ausgestattet, meist noch ohne die 3-Achsen-Stabilisierung mit elektronischen Gimbals. Seit etwa 2015 sind werkseitig integrierte Kameras Standard bei kleinen Drohnen. Dazu kamen speziell für UAS entwickelte Gimbals und Sensoren als austauschbare Nutzlast: Über den klassischen RGB-Sensor hinaus kamen in schneller Folge Multispektralsensoren für nahes Infrarot, für den *red edge*-, mittleren Infrarot- und Thermalstrahlungsbereich sowie Hyperspektralsensoren auf. Auch aktive LIDAR-Sensoren für UAS haben sich in den vergangenen 5-8 Jahren für die Erfassung von 3D-Punktwolken etabliert.

Bildanalyseverfahren: Ebenfalls ab ca. 2010 wurde die für UAS-Luftbilder und andere SFAP nur bedingt geeignete klassische Zweibild-Photogrammetrie und darauf basierende Blocktriangulation abgelöst durch den sehr viel flexibleren, stärker automatisierten Mehrbild-Ansatz des *Structure from Motion-Multi-View Stereo* (SfM-MVS) (Eltner & Sofia, 2020). Dieses ursprünglich aus der Computer Vision stammende Verfahren hat die Verarbeitung von UAS-Bilddaten in Bezug auf Geschwindigkeit, Nutzerfreundlichkeit und Kosteneffizienz revolutioniert. Etliche spezielle UAS-Bildverarbeitungssoftware für den gesamten Workflow wurde verfügbar, sowohl *open-source*- als auch kommerzielle Pakete und Zusatzmodule für führende GIS-Software. Typische Verarbeitungsschritte umfassen den automatischen Bündelblockausgleich, die Extraktion von 3D-Punktwolken, die Interpolation in 2,5D-Rastermodelle (Digitale Höhenmodelle/DHMs) oder 3D-Vektormodelle (*meshes*) sowie die Erstellung von Orthophotomosaiken und – sofern NIR-Bilder vorliegen – Vegetationsindexkarten. In jüngeren Jahren sind diese ergänzt worden durch fortgeschrittene 2D- bis 4D-Analyse-Tools, z.B. für die KI-basierte Bildanalyse, Punktwolkenklassifikation, automatisierte Zeitreihenregistrierung oder Verfolgung bewegter Objekte.

Bedingt durch diese Entwicklungen wurden in den vergangenen 15 Jahren weltweit die Luftfahrtgesetze mit expliziten Regelungen für UAS in oft mehreren Etappen angepasst. Seit 2021 gelten in der EU einheitliche (aber länderspezifisch ergänzte) Regelungen, welche UAS in verschiedene Risikoklassen und ihren Betrieb in verschiedene Szenarien einteilt und standardisierte Qualifikationsnachweise für UAS-Pilot*innen vorsieht. Für viele Anwendungen bewirken die stärkeren juristischen Regulierungen neue Einschränkungen. Gleichzeitig haben die o.g. Entwicklungen aber die lange fehlende Integration von Plattform, Sensor und Software bewirkt und damit zu einer Flexibilisierung und drastischen Senkung der Einstiegsschwelle für UAS-Anwendungen geführt: Auch Laien mit wenigen Vorkenntnissen können beispielsweise mit einem kleinen Quadkopter-UAS und Blackbox-Cloud-Verarbeitungsdiensten innerhalb einer Stunde eine Luftbildbefliegung durchführen und brauchbare Höhenmodelle und Orthophotos erstellen. Die Qualität dieser schnellen und einfachen Produkte ist zwar begrenzt, aber für viele einfachere Anwendungen sind präzisere und komplexere Daten oft nicht erforderlich.

Eineinhalb Jahrhunderte nach ihren Anfängen hat die unbemannte Luftbildfernerkundung einen beispiellosen Automatisierungsgrad von der Bildaufnahme bis zum fertigen Geodatenprodukt und einen beispiellosen Umfang an Analyse- und Anwendungsmöglichkeiten erreicht. Viele der Themenfelder, für die wir heute UAS einsetzen, sind jedoch schon seit jeher Teil dieser Geschichte – auch wenn Arthur Batut, der 1890 eine brennende Zündschnur nutzte, um eine Drachen-Kamera über den reblausbefallenen Weinbergen seiner Heimatregion auszulösen (Batut, 1890), die technologische Weiterentwicklung seiner Methoden bis zur aktuellen UAS-Nutzung in den IoT-Architekturen des *Smart Farming* (Grenzdörffer 2022; Gamboa-Cruzado et al., 2026) wohl kaum ahnen konnte.

Literatur

- Aber, J. S., Marzolff, I., Ries, J. B. & Aber, S. W. (2019): Small-format aerial photography and UAS imagery. Principles, techniques and geoscience applications. 2nd ed. Elsevier Academic Press, Amsterdam.
- Batut, A. (1890): La photographie aérienne par cerf-volant. Gauthier-Villars et fils, Paris. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1102849> (letzter Zugriff 26.01.2026).
- Colomina, I. & Molina, P. (2014): Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 92, 79-97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Eltner, A. & Sofia, G. (2020): Structure from motion photogrammetric technique. Developments in Earth Surface Processes, 23: 1-24. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64177-9.00001-1>
- Fouché, P. S. & Booyesen, N. W. (1994): Assessment of crop stress conditions using low altitude aerial color-infrared photography and computer image processing. Geocarto International 2, 25-31.
- Gamboa-Cruzado, J., Estrada-Gutierrez, J., Bustos-Romero, C., Alzamora Rivero, C., Valenzuela, J. N., Tavera Romero, C. A., Gamarra-Moreno, J., & Amayo-Gamboa, F. (2026): A Review of Drones in

- Smart Agriculture: Issues, Models, Trends, and Challenges. *Sustainability*, 18(1), 507.
<https://doi.org/10.3390/su18010507>
- Grenzdörffler, G. (2022): UAV in der Landwirtschaft - Eine Übersicht aktueller Anwendungen und zukünftiger Potenziale. In DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2022 - Innovation und Praxis. DVW-Schriftenreihe, Band 100, Augsburg: 103-125.
- Hardin, P. J. & Jackson, M. W. (2005): An unmanned aerial vehicle for rangeland photography. *Rangeland Ecology & Management* 58, 439-442.
- Manfreda, S., McCabe, M., Miller, P., Lucas, R., Pajuelo Madrigal, V., Mallin-is, G., Ben Dor, E., Helman, D., Estes, L., Ciraolo, G., Müllerová, J., Tauro, F., Lima, M. de, Lima, J. de, Maltese, A., Frances, F., Caylor, K., Kohv, M., Perks, M., Ruiz-Pérez, G., Su, Z., Vico, G. & Toth, B. (2018): On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring. *Remote Sensing* 10(4), 641.
<https://doi.org/10.3390/rs10040641>
- Marzolf, I. Großmaßstäbige Fernerkundung mit einem unbemannten Heißluftzeppelin für GIS-gestütztes Monitoring von Vegetationsentwicklung und Geomorphodynamik in Aragón (Spanien). *Freiburger Geographische Hefte* 57, Freiburg i. Br. (Dissertationsschrift).
- Marzolf, I. (2022): Chapter 1: Historical developments of UAV use in environmental sciences. - In Eltner, A., Hoffmeister, D., Kaiser, A., Karrasch, P., Klingbeil, L., Stöcker, C. & Rovere, A. (Hrsg.): *Unmanned Aerial Vehicles in Environmental Sciences - Principles, Developments, and Applications*. wbg Academic in Herder, Darmstadt: 11-24.
- Przybilla, H.-J. & Wester-Ebbinghaus, W. (1979): Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug. *Bildmessung und Luftbildwesen* 47, 137-142.
- Troll, C. (1939): Luftbildplan und ökologische Bodenforschung: Ihr zweckmäßiger Einsatz für die wissenschaftliche Erforschung und praktische Erschließung wenig bekannter Länder. *Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin* 7/8, 241-298.
- Warner, W. S., Graham, R. & Read, R. E. (1996): *Small format aerial photography*. Whittles, Latheronwheel.

1.1.1.3 Potenziale und Relevanz von UAS und GIS in der Geoinformation - Forschungsperspektive

Verfasser: Aylin Wörle

Unbemannte Flugsysteme (UAS) haben sich in den letzten zehn bis fünfzehn Jahren zu einem zentralen Werkzeug in der geowissenschaftlichen und umweltbezogenen Forschung entwickelt. Ihr Einsatz reicht heute von klassischen Disziplinen wie der Photogrammetrie und Fernerkundung bis hin zu interdisziplinären Anwendungen in Ökologie, Hydrologie, Geomorphologie, Landwirtschaft und Klimaforschung.

Insbesondere durch die Kombination aus miniaturisierten Sensorsystemen, hochpräziser GNSS/INS-Navigation und leistungsfähigen Auswertungsverfahren ermöglichen UAS eine Datenerhebung in räumlicher und zeitlicher Auflösung, die zuvor nur mit erheblichem Aufwand oder gar nicht realisierbar war. Diese Entwicklung wird in der Forschung häufig als Paradigmenwechsel beschrieben: Statt punktueller Stichproben können kontinuierliche, flächenhafte und wiederholbare Beobachtungen der Erdoberfläche durchgeführt werden.

Ein wesentlicher Vorteil liegt zudem in der Flexibilität der Systeme. UAS erlauben die Untersuchung schwer zugänglicher oder sensibler Gebiete wie alpiner Räume, Feuchtgebiete oder Küstenzonen mit vergleichsweise geringem logistischen Aufwand. Gleichzeitig schließen sie die Lücke zwischen terrestrischen Messmethoden und klassischer luftgestützter Fernerkundung, etwa durch Flugzeuge oder Satelliten, indem sie hochaufgelöste Daten auf lokaler bis regionaler Ebene bereitstellen.

Entwicklungslinien und technologische Treiber

Die Nutzung unbemannter Plattformen für wissenschaftliche Zwecke ist kein völlig neues Phänomen, sondern baut auf einer langen Tradition der luftgestützten Datenerfassung auf. Bereits im 20. Jahrhundert wurden Ballons, Drachen oder Modellflugzeuge für Luftbildaufnahmen eingesetzt. Der entscheidende Entwicklungssprung erfolgte jedoch in den letzten Jahren durch das Zusammenwirken dreier zentraler Innovationsbereiche:

Plattformtechnologie:

Moderne Multikopter, Fixed-Wing- und VTOL-Systeme ermöglichen autonome oder teilautonome Flüge mit hoher Stabilität und Wiederholgenauigkeit. Fortschritte in der GNSS-gestützten Navigation (insbesondere RTK/PPK) erlauben eine präzise Georeferenzierung, teilweise auch ohne umfangreiche Bodenpasspunkte.

Sensorik:

Neben hochauflösenden RGB-Kameras stehen heute eine Vielzahl spezialisierter Sensoren zur Verfügung, darunter multispektrale und hyperspektrale Kameras, Thermalsensoren sowie kompakte LIDAR-Systeme. Diese ermöglichen die Erfassung physikalischer Eigenschaften der Erdoberfläche weit über die rein visuelle Information hinaus.

Datenverarbeitung:

Die Entwicklung automatisierter photogrammetrischer Verfahren, insbesondere Structure-from-Motion (SfM) und Multi-View Stereo (MVS), hat die Generierung von 3D-Punktwolken, digitalen Geländemodellen und Orthophotos erheblich vereinfacht und beschleunigt. Ergänzt wird dies durch leistungsfähige Softwarelösungen sowie die zunehmende Integration in GIS- und Analyseplattformen.

Die enge Verzahnung dieser drei Bereiche führt zu hochintegrierten Workflows, bei denen Datenerfassung, Verarbeitung und Analyse zunehmend automatisiert und auch für weniger spezialisierte Anwender zugänglich werden.

Forschungsbezogene Herausforderungen und Rahmenbedingungen

Trotz der großen Potenziale sind mit dem Einsatz von UAS in der Forschung auch spezifische Herausforderungen verbunden. Diese betreffen insbesondere:

- **Datenqualität und Reproduzierbarkeit:**

Wissenschaftliche Anwendungen erfordern eine hohe Genauigkeit und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse. Faktoren wie Flugplanung, Sensorkalibrierung, Wahl und Verteilung von Ground Control Points sowie Umweltbedingungen können die Datenqualität erheblich beeinflussen.

- **Standardisierung und Vergleichbarkeit:**

Im Gegensatz zu etablierten Fernerkundungsverfahren existieren für viele UAS-basierte Methoden noch keine einheitlichen Standards. Dies erschwert die Vergleichbarkeit von Ergebnissen zwischen verschiedenen Studien und Anwendungsfällen.

- **Datenmanagement und -verarbeitung:**

Die hohe räumliche und zeitliche Auflösung führt zu großen Datenmengen, die effiziente Speicher-, Verarbeitungs- und Analysekonzepte erfordern.

- **Regulatorische Rahmenbedingungen:**

Luftfahrtrechtliche Vorgaben und Genehmigungsverfahren können insbesondere bei wiederholten oder großflächigen Befliegungen den Einsatz einschränken. Diese Rahmenbedingungen unterliegen zudem einem dynamischen Wandel und unterscheiden sich international teilweise erheblich.

- **Interdisziplinäre Anforderungen:**

Der Einsatz von UAS erfordert häufig die Kombination von Kompetenzen aus verschiedenen Fachbereichen, etwa Geoinformatik, Ingenieurwesen, Umweltwissenschaften und Informatik. Dies stellt Anforderungen an Ausbildung, Kooperation und Wissenstransfer.

Potenziale, Chancen und Perspektiven für die Geoinformation

Aus wissenschaftlicher Sicht eröffnen UAS vielfältige neue Möglichkeiten für die Geoinformation:

UAS ermöglichen die Erfassung von Geodaten in bisher unerreichter Detailtiefe und Aktualität. Dies ist insbesondere für die Analyse dynamischer Prozesse wie Erosion, Vegetationsentwicklung oder hydrologischer Veränderungen von großer Bedeutung.

Durch wiederholte Befliegungen können Veränderungen über die Zeit hinweg präzise erfasst und analysiert werden. Damit wird die Erweiterung klassischer 3D-Geodaten um die zeitliche Dimension („4D-Geodaten“) zunehmend praktikabel.

Die erzeugten Datenprodukte - etwa Orthophotos, Punktwolken, digitale Gelände- und Oberflächenmodelle oder 3D-Meshes - lassen sich direkt in Geoinformationssysteme integrieren und dort weiter analysieren, visualisieren und mit anderen Datensätzen kombinieren.

UAS dienen nicht nur als Werkzeug zur Datenerhebung, sondern auch als Testfeld für neue Methoden, beispielsweise in den Bereichen maschinelles Lernen, automatisierte Objekterkennung oder datengetriebene Modellierung.

Durch sinkende Kosten und benutzerfreundlichere Systeme wird der Zugang zu hochauflösenden Geodaten zunehmend breiteren Nutzergruppen ermöglicht, was sowohl Chancen für Wissenschaft als auch für Praxisanwendungen eröffnet.

Fazit

Unbemannte Flugsysteme haben sich in der Forschung als leistungsfähiges und vielseitiges Instrument etabliert, das die Erhebung und Analyse von Geodaten grundlegend verändert hat. Sie ermöglichen eine bislang unerreichte Kombination aus räumlicher Auflösung, zeitlicher Flexibilität und operativer Effizienz und tragen damit wesentlich zur Weiterentwicklung der Geoinformation bei.

Gleichzeitig bestehen weiterhin Herausforderungen in Bezug auf Standardisierung, Datenqualität, regulatorische Rahmenbedingungen und methodische Konsistenz. Die zukünftige Entwicklung wird maßgeblich davon abhängen, inwieweit es gelingt, diese Herausforderungen zu adressieren und UAS nachhaltig in etablierte GIS-spezifische Arbeitsprozesse zu integrieren.

Literatur

- Aber, J. S., Marzolff, I., Ries, J. B. & Aber, S. W. (2019): Small-format aerial photography and UAS imagery. Principles, techniques and geoscience applications. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Academic Press.
- Batut, A. (1890): La photographie aérienne par cerf-volant (Gauthier-Villars et ls, Paris). [online] [https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1102849# \[15.11.2020\]](https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1102849# [15.11.2020]).
- Colomina, I. & Molina, P. (2014): Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review, in: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79-97.

-
- Eltner, A., Karrasch, P., Stöcker, C., Klingbeil, L., Hoffmeister, D., Kaiser, A., Rovere, A. (Hrsg.), (2022): UAVs in Environmental Sciences - Methods and Applications. Teaching book, WBG Academic, 492 pages
- Granshaw, S. I. (2018): RPV, UAV, UAS, RPAS ... or just drone?, in: e Photogrammetric Record, 33, 160-170.
- Manfreda, S., McCabe, M., Miller, P., Lucas, R., Pajuelo Madrigal, V., Mallinis, G., Ben Dor, E., Helman, D., Estes, L., Ciraolo, G., Müllerová, J., Tauro, F., Lima, M. de, Lima, J. de, Maltese, A., Frances, F., Caylor, K., Kohv, M., Perks, M., Ruiz-Pérez, G., Su, Z., Vico, G. & Toth, B. (2018): On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring, in: Remote Sensing, 10, 641.

1.1.1.4 Potenziale und Relevanz von UAS und GIS in der Geoinformation - Wirtschaftliche Perspektive der Industrie

Verfasser: Michael Wieland

Transformation der Geoinformation

Unbemannte Luftfahrtsysteme (UAS) entwickeln sich zunehmend zu einem festen Bestandteil digitaler Infrastruktur und moderner Geoinformationssysteme. Die Kombination aus UAS, Sensorik, automatisierter Datenerfassung und GIS eröffnet immer mehr Möglichkeiten zur Erfassung, Aktualisierung und Analyse räumlicher Informationen. Insbesondere dort, wo aktuelle, hochaufgelöste oder dreidimensionale Geodaten benötigt werden, ermöglichen UAS eine flexible und wirtschaftliche Ergänzung klassischer luftgestützter und bodengebundener Verfahren.

Die technologische Entwicklung der vergangenen Jahre hat die Einsatzmöglichkeiten erheblich erweitert. Moderne UAS-Plattformen verfügen heute über hochpräzise Navigationssysteme, RTK- und PPK-Verfahren, automatisierte Flugplanung sowie unterschiedlichste Sensoren wie RGB-Kameras, LIDAR, thermische oder multispektrale Systeme. Gleichzeitig steigen Automatisierungsgrad, Datengenauigkeit und Flächenleistung kontinuierlich. Damit werden Anwendungen wirtschaftlich realisierbar, die noch vor wenigen Jahren nur mit hohem Aufwand oder gar nicht umsetzbar waren.

Aus Sicht der Industrie liegt die besondere Stärke von UAS in der schnellen und bedarfsgerechten Verfügbarkeit aktueller Geodaten. Während klassische Befliegungen oft langfristig geplant werden müssen, können UAS kurzfristig eingesetzt werden und lokale Veränderungen nahezu in Echtzeit erfassen. Dies gewinnt insbesondere im Kontext dynamischer Infrastrukturen, Baustellen, Naturereignisse oder temporärer Schadenslagen an Bedeutung. Gleichzeitig ermöglichen UAS den Zugang zu Bereichen, die für Menschen schwer erreichbar, gefährlich oder nur unter hohem Aufwand zugänglich sind. Dazu zählen beispielsweise Industrieanlagen, Schadensgebiete, kontaminierte Bereiche, große Infrastrukturen oder schwer zugängliche Geländeabschnitte. Darüber hinaus eignen sich UAS besonders für standardisierte und regelmäßig wiederkehrende Datenerfassungen. Wiederholte Vermessungen großer Flächen oder die kontinuierliche Erfassung umfangreicher Datenmengen können mit vergleichsweise geringem Aufwand automatisiert und effizient durchgeführt werden.

Die Verbindung von UAS und GIS entwickelt sich dabei zunehmend von einer reinen Datenerfassung hin zu einem integrierten digitalen Prozess. Geodaten werden nicht mehr nur erzeugt, sondern direkt in digitale Zwillinge, Planungsprozesse, BIM-Anwendungen, Leitstellen oder cloudbasierte Analyseplattformen integriert. UAS werden damit Teil digitaler Wertschöpfungsketten und unterstützen datenbasierte Entscheidungen in Verwaltung, Wirtschaft und Forschung.

Anwendungsfelder und operative Nutzung

Große Potenziale bestehen insbesondere in den Bereichen Infrastruktur, Energieversorgung, Bauwesen, Landwirtschaft, Umweltmonitoring, Wasserwirtschaft sowie Katastrophenschutz. Kritische Infrastrukturen wie Stromtrassen, Bahnnetze, Pipelines oder Industrieanlagen können mit UAS regelmäßig dokumentiert und überwacht werden. Schäden, Vegetationsveränderungen oder Risiken lassen sich frühzeitig erkennen und georeferenziert auswerten. In der Landwirtschaft ermöglichen multispektrale Sensoren eine präzisere Analyse von Vegetationszuständen und damit eine effizientere Bewirtschaftung. Im Bereich Hochwasser, Waldbrand oder Naturgefahren unterstützen UAS eine schnelle Lageerkundung und aktuelle Datengrundlage für Einsatzleitungen und GIS-Systeme.

Katastrophenschutz und Krisenmanagement

Im Katastrophenschutz und Krisenmanagement nimmt die Bedeutung von UAS und GIS kontinuierlich zu. Auf europäischer Ebene existiert mit dem Copernicus Emergency Management Service ein etabliertes System, über das Mitgliedstaaten im Katastrophenfall kurzfristig Unterstützung bei der Lageerkundung und Geodatenbereitstellung anfordern können. Satellitengestützte Daten bilden dabei häufig die erste Grundlage zur Bewertung von Schadenslagen, Hochwasserereignissen, Waldbränden oder großflächigen Zerstörungen.

In Situationen, in denen Satellitendaten aufgrund von Wetterbedingungen, Rauchentwicklung, zeitlicher Verfügbarkeit oder unzureichender Auflösung nicht ausreichen, gewinnen UAS zunehmend an Bedeutung. Moderne Einsatzkonzepte ermöglichen die koordinierte Zusammenschaltung mehrerer UAS-Systeme direkt im Schadensgebiet oder über größere Flächen. Innerhalb kürzester Zeit können dadurch aktuelle Luftbilder,

Vermessungsdaten, 3D-Modelle oder thermische Analysen bereitgestellt werden. Gleichzeitig unterstützen UAS-Einsatzkräfte bei der Vermisstensuche, Lageerkundung und Priorisierung von Rettungsmaßnahmen.

Die Kombination aus satellitengestützter Erdbeobachtung, UAS-Datenerfassung und GIS-gestützter Auswertung entwickelt sich damit zu einem wichtigen Bestandteil moderner europäischer Katastrophenschutzstrukturen. Besonders relevant ist dabei die Fähigkeit, innerhalb weniger Stunden aktuelle Geodaten verfügbar zu machen und diese unmittelbar in bestehende Lage- und Führungsinformationssysteme zu integrieren.

Verteidigung und sicherheitsrelevante Geoinformation

Der Bereich Verteidigung, militärische Lageerkundung sowie UAS-gestützte Geoinformationsverfahren gewinnt zunehmend an Bedeutung. Im Mittelpunkt stehen dabei insbesondere ISR- beziehungsweise ISTAR-Anwendungen¹ zur Aufklärung, Überwachung, Zielerfassung und Lageanalyse. Moderne UAS-Systeme ermöglichen die schnelle Erfassung hochauflösender Geodaten, die Erstellung aktueller 3D-Modelle sowie die präzise Vermessung von Gelände, Infrastruktur oder gegnerischen Stellungen. Die gewonnenen Daten dienen unter anderem der Lagebeurteilung, Navigation, Missionsplanung sowie der zielgenauen Koordination militärischer Operationen.

Dabei zeigt sich zunehmend eine enge Verbindung zwischen zivilen GIS-Technologien und militärischen Anforderungen. Verfahren zur Photogrammetrie, Echtzeitkartierung, LIDAR-Vermessung, automatisierten Datenauswertung oder digitalen Zwillingserstellung aus dem zivilen Umfeld werden heute auch für sicherheitsrelevante Anwendungen genutzt. Gleichzeitig treiben militärische Anforderungen die Weiterentwicklung robuster Sensorik, Datenübertragung und automatisierter Auswertungsverfahren voran. UAS entwickeln sich damit sowohl im zivilen als auch im sicherheitsrelevanten Bereich zu einem zentralen Werkzeug moderner Geoinformationsgewinnung.

Digitale Zwillinge und urbane Geodaten

Zunehmend relevant wird auch die kontinuierliche Aktualisierung geobasierter Datenbestände. Kommunen, Infrastrukturbetreiber und öffentliche Stellen stehen vor der Herausforderung, digitale Zwillinge, 3D-Modelle und Geodatenbestände zu erstellen und aktuell zu halten. UAS ermöglichen hierfür wirtschaftliche Verfahren mit hoher zeitlicher Flexibilität und lokal angepasster Datenerfassung. Dies betrifft insbesondere urbane Räume mit hoher Veränderungsdynamik.

Entstehung neuer Dienstleistungs- und Netzwerkstrukturen

In den vergangenen Jahren hat insbesondere die Solarwirtschaft die Nachfrage nach UAS gestützten Vermessungs- und Analysedienstleistungen deutlich erhöht. Für die Bewertung von Dachflächen, Verschattungen, Neigungswinkeln oder Installationsmöglichkeiten werden regelmäßig aktuelle Luftbilder, 3D-Modelle und Vermessungsdaten benötigt. Viele Unternehmen greifen hierfür auf spezialisierte UAS-Dienstleister zurück, die kurzfristig und flächendeckend Datenerfassungen durchführen können.

Im Umfeld dieser Entwicklung hat sich ein zusätzlicher Markt aus Vermittlungsplattformen, Netzwerken und spezialisierten Serviceanbietern etabliert. Dort registrieren sich teilweise mehrere hundert UAS-Betreiber, qualifizieren sich weiter und standardisieren ihre Arbeitsprozesse. Für Auftraggeber entstehen dadurch effiziente und skalierbare Strukturen, ohne selbst eigene UAS-Kapazitäten aufbauen zu müssen.

Diese Netzwerke übernehmen häufig die operative Koordination, Qualitätssicherung, Dokumentation und Genehmigungsprozesse. Gleichzeitig ermöglichen sie eine flexible Ersatzgestellung bei wetterbedingten Ausfällen, technischen Problemen oder regionalen Kapazitätsengpässen. Dadurch entstehen belastbare und professionell organisierte Dienstleistungsstrukturen, die eine schnelle Skalierung geobasierter Anwendungen ermöglichen und die zunehmende Industrialisierung des UAS-Marktes im Bereich GIS und Vermessung verdeutlichen.

Wirtschaftlicher Mehrwert und Wachstumspotenziale

Die wirtschaftliche Bedeutung der Nutzung von UAS als Werkzeug nimmt international deutlich zu. Studien aus Europa und Nordamerika prognostizieren für den UAS und Advanced Air Mobility Markt erhebliche Wachs-

¹ ISTAR = *Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance*; militärischer Sammelbegriff für Fähigkeiten zur Informationsgewinnung, Überwachung, Zielerfassung und Aufklärung.

tums- und Beschäftigungseffekte. Die Europäische Kommission geht im Rahmen der EU-Drohnenstrategie 2.0 davon aus, dass der europäische Drohnen-Dienstleistungsmarkt bis 2030 ein Volumen von 14,5 Mrd. EUR jährlich erreichen könnte. Gleichzeitig werden etwa 145.000 neue Arbeitsplätze erwartet.

Auch die SESAR European Drones Outlook Study prognostiziert bis 2035 einen europäischen Markt von über 10 Mrd. EUR jährlich sowie mehr als 100.000 Arbeitsplätze. Bis 2050 werden in Europa direkte und indirekte Beschäftigungseffekte von 250.000 bis 400.000 Arbeitsplätzen bei einer Wertschöpfung von 25 bis 45 Mrd. EUR erwartet.

Internationale Studien zeigen vergleichbare Entwicklungen. Deloitte und die Aerospace Industries Association prognostizieren für die USA bis 2035 einen jährlichen Marktwert von bis zu 115 Mrd. USD und mehr als 280.000 hochwertige Arbeitsplätze im Bereich Advanced Air Mobility. Die britische Studie „Skies Without Limits“ von PwC geht für das Vereinigte Königreich sogar von bis zu 650.000 Arbeitsplätzen im Zusammenhang mit einem vollständig entwickelten Drohnen-Ökosystem aus.

Diese Entwicklungen betreffen nicht nur Hersteller von Luftfahrzeugen. Es entstehen neue Wertschöpfungsketten in den Bereichen Sensorik, Softwareentwicklung, Cloud Infrastruktur, Datenanalyse, KI-Anwendungen, Wartung, Pilotenausbildung und Betriebsführung. UAS und GIS entwickeln sich damit zu einem relevanten Wirtschaftsfaktor innerhalb der digitalen Infrastruktur Europas.

Neben Herstellern von UAS und Sensorik entsteht gleichzeitig ein wachsender Markt für Softwarelösungen, Datenplattformen, automatisierte Auswertungen und spezialisierte Dienstleistungen. Besonders relevant sind dabei offene Schnittstellen und interoperable Systeme, um Daten unterschiedlicher Quellen effizient in bestehende GIS-Prozesse, digitale Zwillinge und cloudbasierte Analyseumgebungen integrieren zu können.

Auch der Fachkräftebedarf steigt deutlich. Nach Angaben der FAA existieren in den USA bereits mehr als 427.000 zertifizierte kommerzielle Drohnenpiloten. Die Zahl soll sich innerhalb der kommenden Jahre weiter erheblich erhöhen. Parallel wächst der Bedarf an Technikern, Softwareentwicklern, GIS-Spezialisten und qualifiziertem Betriebspersonal.

Deutschland nimmt innerhalb Europas bereits heute eine bedeutende Rolle ein. Anfang 2026 wurden etwa 1 Mio. registrierte Drohnenbetreiber (kommerziell und für den Privatgebrauch) gemeldet. Dies entspricht etwa 50 Prozent aller in der Europäischen Union registrierten Betreiber. Unter der Annahme einer proportionalen Marktentwicklung könnte Deutschland bis 2030 einen erheblichen Anteil des europäischen Drohnenmarktes repräsentieren. Daraus ergibt sich ein erhebliches industriepolitisches Potenzial für Wertschöpfung, Innovation und Beschäftigung.

Politische und regulatorische Weichenstellungen

Neben den technologischen Entwicklungserfolgen spielen regulatorische Rahmenbedingungen eine entscheidende Rolle für die Erreichung der prognostizierten Marktdaten. Die europäische Harmonisierung des UAS-Rechtsrahmens hat wichtige Grundlagen für den sicheren Betrieb geschaffen. Gleichzeitig zeigen praktische Erfahrungen aus Industrie und Verwaltung, dass Genehmigungsprozesse, geographische Gebiete gemäß § 21h Absatz 3 LuftVO und unterschiedliche regionale Verfahren weiterhin Herausforderungen darstellen können. Für eine breite wirtschaftliche Nutzung sind daher digitalisierte, harmonisierte und skalierbare Prozesse notwendig.

Insbesondere der Betrieb außerhalb der direkten Sichtweite des Fernpiloten, sogenannte BVLOS-Operationen, wird für viele professionelle Anwendungen entscheidend sein. Langgestreckte Infrastrukturen, großflächige Vermessungen oder automatisierte Inspektionsflüge lassen sich wirtschaftlich häufig erst durch BVLOS-Konzepte realisieren. Voraussetzung hierfür sind belastbare digitale Prozesse, elektronische Sichtbarkeit im unteren Luftraum sowie standardisierte Schnittstellen zwischen UAS, U-Space-Diensten und Geoinformationssystemen.

Die Industrie sieht deshalb einen engen Zusammenhang zwischen der Digitalisierung des unteren Luftraums und der zukünftigen Entwicklung geobasierter Anwendungen. Elektronische Identifikation, digitale Flugfreigaben und interoperable Datenplattformen werden zu zentralen Bausteinen einer skalierbaren Drohnenwirtschaft. Gleichzeitig entstehen dadurch neue Möglichkeiten für Echtzeitdaten, automatisierte Auswertungen und KI-gestützte Analysen innerhalb von GIS-Umgebungen.

Für die zukünftige Entwicklung der Branche werden in den kommenden Jahren mehrere grundlegende regulatorische und infrastrukturelle Entscheidungen von zentraler Bedeutung sein. Aus Sicht der Industrie entscheidet sich daran, ob Europa und insbesondere Deutschland die prognostizierten Wachstums- und Beschäftigungseffekte realisieren können oder ob die Entwicklung hinter den internationalen Möglichkeiten zurückbleibt.

Eine wesentliche Herausforderung stellen derzeit nationale Luftraumbeschränkungen dar. In Deutschland ergeben sich insbesondere aus § 21h LuftVO erhebliche Einschränkungen für den regelmäßigen kommerziellen Betrieb von UAS. Während bemannte Luftfahrzeuge der allgemeinen Luftfahrt, Ultraleichtflugzeuge oder Luftsportgeräte grundsätzlich gleichberechtigten Zugang zum Luftraum besitzen, bestehen für kommerziell betriebene UAS zusätzliche Betriebsverbote und Einschränkungen, insbesondere über Wohngebieten, Verkehrswegen oder sensiblen Bereichen.

Diese Regelungen wurden ursprünglich vor allem zum Schutz von Persönlichkeitsrechten und Datenschutz geschaffen. Im professionellen Betrieb greifen diese Argumente jedoch nur eingeschränkt. Gewerbliche Betreiber unterliegen bereits heute umfangreichen luftfahrtrechtlichen, datenschutzrechtlichen und zivilrechtlichen Vorgaben. Unternehmen arbeiten nach definierten Qualitäts- und Complianceprozessen, stehen unter kontinuierlicher Kontrolle verschiedener Behörden und riskieren bei Fehlverhalten unmittelbar ihre Betriebsgenehmigungen sowie ihre wirtschaftliche Existenz. Eine generelle Einschränkung des Flugbetriebs allein aufgrund der Möglichkeit einer Kamera an Bord entspricht daher aus Sicht der Industrie nicht mehr den tatsächlichen betrieblichen Risiken und hemmt die wirtschaftliche Entwicklung innovativer Anwendungen.

Hinzu kommt, dass zukünftige UAS-Operationen zunehmend außerhalb der direkten Sichtweite und über größere Distanzen stattfinden werden. Langfristig werden UAS von Leitständen überwacht, automatisiert koordiniert und in digitale Verkehrsmanagementsysteme integriert werden. Voraussetzung hierfür ist eine zuverlässige elektronische Sichtbarkeit und eindeutige Identifizierbarkeit aller Luftraumnutzer im unteren Luftraum.

Mit ADS-L steht hierfür bereits heute ein technisch geeignetes und vergleichsweise kostengünstiges System zur Verfügung. Elektronische Sichtbarkeit schafft die Grundlage für Flugsicherheit, Autorisierung, Koordination zwischen bemannter und unbemannter Luftfahrt sowie für zukünftige digitale Verkehrsmanagementsysteme. Ohne eine verpflichtende Einführung elektronischer Sichtbarkeit für alle relevanten Luftraumnutzer im unteren Luftraum wird die Integration automatisierter UAS-Operationen nur eingeschränkt möglich sein. Gleichzeitig würden wichtige Voraussetzungen für skalierbare BVLOS-Anwendungen und zukünftige U-Space-Konzepte fehlen.

Besondere Bedeutung besitzt dabei der urbane Raum. Gerade in Städten und Ballungsräumen werden erhebliche Marktpotenziale für GIS-Anwendungen, Infrastrukturmonitoring, digitale Zwillinge, Vermessung, Bauwesen und Logistik erwartet. Gleichzeitig befinden sich in diesen Bereichen häufig Verkehrsflughäfen mit Kontrollzonen. Der heutige Betrieb von UAS in Kontrollzonen ist vielfach noch von komplexen Freigaben und Haftungsfragen geprägt. Dies erschwert regelmäßige kommerzielle Operationen erheblich und verhindert skalierbare Geschäftsmodelle.

Für die weitere Entwicklung der Branche wird daher entscheidend sein, wie schnell U-Space-Verfahren, digitale Freigabesysteme und neue Integrationsmodelle für UAS in kontrollierten Lufträumen umgesetzt werden. Die Auflösung nicht mehr zeitgemäßer Betriebsbeschränkungen, die Einführung elektronischer Sichtbarkeit durch ADS-L sowie die digitale Integration von UAS in urbane Kontrollzonen zählen aus Sicht der Industrie zu den wesentlichen Voraussetzungen für den weiteren Aufbau einer leistungsfähigen europäischen Drohnenwirtschaft.

Ausblick

Die Erfahrungen der Industrie zeigen, dass UAS nicht als isolierte Technologie betrachtet werden sollten. Ihr Mehrwert entsteht insbesondere im Zusammenspiel mit anderen Dienstleistungen wie Geoinformationssystemen, ERP-Systemen, Logistikanwendungen oder Inspektionsaufgaben. UAS entwickeln sich damit zu einem Werkzeug der digitalen Transformation in vielen Bereichen von Wirtschaft und öffentlicher Verwaltung.

Auch wenn viele der beschriebenen Technologien, Verfahren und regulatorischen Entwicklungen zunächst komplex erscheinen, wird die zukünftige Relevanz von UAS im Bereich GIS und Geoinformation maßgeblich davon abhängen, wie verständlich die Möglichkeiten, Grenzen und Mehrwerte vermittelt werden. Die Erfahrungen der vergangenen Jahre zeigen, dass Aufklärung, Standardisierung und der kontinuierliche Austausch zwischen Industrie, Wissenschaft, Verwaltung und Politik entscheidend sind, um Akzeptanz, Investitionen und praktische Anwendungen zu fördern. Mit zunehmender Digitalisierung und wachsender Verfügbarkeit geobasierter Daten wird sich die Rolle von UAS in der Geoinformation weiter verstärken und von einer spezialisierten Technologie zu einem selbstverständlichen Bestandteil moderner Datenerfassung und digitaler Infrastruktur entwickeln.

Für die kommenden Jahre ist davon auszugehen, dass sich UAS-Anwendungen weiter professionalisieren und automatisieren werden. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Datenqualität, Cybersicherheit, Standardisierung und Integration in bestehende Systeme. Die zukünftige Entwicklung wird daher wesentlich davon abhängen, wie erfolgreich technologische Innovation, regulatorische Harmonisierung und digitale Infrastruktur zusammengeführt werden können.

Literatur

- Deloitte / Aerospace Industries Association (AIA), Advanced Air Mobility: Can the United States Afford to Lose the Race?, 2021.
- EASA, Drone Economy Dashboard - Statistics and key information from your Member State, IAM Hub, 2025.
- Europäische Kommission: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen. „Eine Drohnenstrategie 2.0 für ein intelligentes, nachhaltiges Ökosystem für unbemannte Luftfahrzeuge in Europa“. COM(2022) 652 final, Brüssel, 29.11.2022.
- Federal Aviation Administration (FAA), FAA Aerospace Forecast Fiscal Years 2025-2045, 2025, Abschnitt “Remote Pilot Forecast”, S. 58-59.
- Gemeinsames Unternehmen SESAR3, European drones outlook study - Unlocking the value for Europe, Publications Office, 2017, <https://data.europa.eu/doi/10.2829/085259>.
- Luftfahrt-Bundesamt (LBA), Statistiken Unbemannte Luftfahrtsysteme - Betreiberregistrierungen.
- PricewaterhouseCoopers LLP.: Skies without Limits v3.0, September 2024, <https://www.pwc.co.uk/intelligent-digital/drones/skies-without-limits-2024.pdf>.

1.1.1.5 Potenziale und Relevanz von UAS und GIS in der Geoinformation - Perspektive des amtlichen Vermessungswesens

Verfasser: Björn Degel (SL), Clemens Bolte (HB), Markus Hülsen (NI), David Schleeahn (HH), Norbert Seelus (BY), Marvin Seidel (TH), Jakob Unger (NI), Torsten Walter (BW)

UAS im amtlichen Kontext

“Unmanned Aerial Vehicles (UAV) bzw. Unmanned Aerial Systems (UAS) haben in den letzten Jahren eine enorme Verbreitung erfahren. Diese beschränkt sich mitnichten nur auf den Freizeitmarkt, sondern umfasst genauso die verschiedensten Wirtschafts- und Wissenschaftszweige; so auch das Gebiet des Vermessungswesens und der Geoinformation. Vor dem Hintergrund der Fokussierung auf Anforderungen an einheitliche, vollständige und aktuelle Geobasisdaten und der wachsenden Bedeutung der dritten Dimension innerhalb des Vermessungswesens verbirgt sich hinter dem Thema UAS ein enormes und vielfältiges Potenzial. Bezogen auf den Teilbereich des Liegenschaftskatasters lässt sich diesbezüglich diagnostizieren, dass zum einen ein umfangreiches Ausschöpfen dieses Leistungsvermögens vielfach noch in den Anfängen steckt und dass zum anderen in puncto Einheitlichkeit der Datenerhebung nur wenige normative Schriftwerke vorhanden sind.” (Landkreistag Nordrhein-Westfalen, Drohneneinsatz im Vermessungswesen - Liegenschaftskataster in 3D, 2023).

Projektgruppe PG UAV der AdV

Der Arbeitskreis Liegenschaftskataster der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) hat eine Projektgruppe PG UAV eingerichtet, der die Autoren dieses Beitrags angehören. Die PG UAV hat den Arbeitsauftrag, die rechtlichen und technischen Rahmenbedingungen für den Einsatz von unbemannten Fluggeräten im amtlichen Vermessungswesen zu erarbeiten. Dies umfasst insbesondere

- die Identifikation von Einsatzgebieten im Liegenschaftskataster und in der Geotopographie,
- die Festlegung von nachprüfbaren Parametern des Flugs, der Bildaufnahme und der Koordinatenbestimmung zur Übernahme von Vermessungen in das Liegenschaftskataster und zur Fortführung geotopographischer Daten,
- die Definition der Qualitätssicherungsmaßnahmen zur Ergebnisabnahme
- die Formulierung eines Musterparagrafen zur gesetzlichen Legitimation einer Befliegung von Liegenschaften mit UAS für Zwecke des amtlichen Vermessungswesens,
- eine Zusammenstellung der einzuhaltenden rechtlichen Erfordernisse für den Flugbetrieb eines UAS.

Grenzen, Chancen und Perspektiven für die Geoinformation

Drohnenbefliegungen von Wohngrundstücken erzeugen Luftbilder und Geodaten, die personenbezogene Daten darstellen können und unter Umständen tief in Privatsphäre und private Rückzugsbereiche (Balkone, Gärten, Wohnumfeld) eingreifen. Der Bayerische Verwaltungsgerichtshof stuft dies mit Beschluss vom 15. Februar 2024 (4 CE 23.2267) als erheblichen Eingriff in das allgemeine Persönlichkeitsrecht (Art. 2 Abs. 1 i.V.m. Art. 1 Abs. 1 GG) und in den Schutz der Wohnung nach Art. 13 GG ein. Für die Verarbeitung der dabei entstehenden personenbezogenen Daten ist eine Rechtsgrundlage nach Art. 6 Abs. 1 lit. e, Abs. 3 DSGVO erforderlich.

Mit Beschluss vom 5. Januar 2026 (AZ 222 C 2/26) führt das Amtsgericht München zum Eingriff durch eine Drohnenbefliegung in das Persönlichkeitsrecht aus: “Der Schutzbereich ist durch eine Interessenabwägung zu konturieren und für den Einzelfall zu konkretisieren. Rechtswidrig ist der Eingriff nur, wenn das Schutzinteresse des Geschädigten die schutzwürdigen Belange des Schädigers überwiegt.” Die einzelfallbezogene Abwägung kann sehr wohl zu dem Ergebnis kommen, dass die Erstellung von Aufnahmen mittels Drohnenbefliegung das mildere Mittel darstellt.

Die rechtlichen Erfordernisse für den Flugbetrieb eines UAS *unterliegen noch dynamischen Änderungen*. Das kann Anpassungen für den Betrieb notwendig machen. Es liegt in der Eigenverantwortung des UAS-Betreibers, diese Vorgaben umzusetzen.

Die Anforderungen von Nutzenden an die Geobasisdaten, vor allem an deren Aktualität, nehmen kontinuierlich zu. Der zielgerichtete Einsatz von UAS kann hierbei unterstützen.

Generell lassen sich die UAS-Geodatenprodukte (TrueDOP, bDOM, Punktwolke, Mesh, DGM, DOM, ...) aufgrund potentieller Mehrwerte vielfältig verwenden. Einsatzpotenziale werden im amtlichen

Vermessungswesen vor allem im Rahmen von sog. langgestreckten Anlagen (beispielsweise Straßenschlussvermessungen) und zur Gebäudeeinemessung gesehen. Je mehr Objekte in einem zusammenhängenden Gebiet eingemessen werden, desto größer ist der erwartete Effizienzgewinn. Im Gegensatz zu den klassischen Katasterverfahren, i.d.R. Polaraufnahme, wird die dritte Dimension quasi on-the-fly miterfasst. Die Daten können direkt zur Fortführung des 3D-Gebäudebestands weiterverwendet werden. Für die Fortführung der Tatsächlichen Nutzung (TN) des ALKIS und des ATKIS Basis-DLM können UAS hilfreich sein, insbesondere für Objekte der Spitzenaktualität, genauso wie für verschiedene Schritte im Rahmen von Flurbereinigungsverfahren. Zur punktuellen Nachverdichtung bzw. Fortführung der landesweiten Digitalen Gelände- und Oberflächenmodelle könnten UAS mit LIDAR-Sensoren zum Einsatz kommen.

Insbesondere im Liegenschaftskataster spielen die Aspekte Reproduzierbarkeit, Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Messergebnisse eine wesentliche Rolle - vor allem vor dem Hintergrund der rechtssicheren Dokumentation von Grundeigentum. Für den Einsatz photogrammetrischer Verfahren gibt es hierzu in den Ländern bislang noch kein durchgängiges Regelwerk.

Die Herausforderung für die PG UAV besteht darin, den Stellen des behördlichen Vermessungswesens einen möglichst rechtssicheren Handlungsrahmen an die Hand zu geben, der sowohl die vermessungsrechtlichen Vorgaben erfüllt, gleichzeitig aber auch die Vereinbarkeit mit dem allgemeinen Persönlichkeitsrecht und datenschutzrechtlichen Aspekten sowie den luftfahrtrechtlichen Erfordernissen herstellt.

1.1.2 Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von UAS - Deutschland

Verfasser: Oliver Heinrich

Die Regulierung unbemannter Luftfahrtsysteme (UAS) stellt den Gesetzgeber vor strukturell andere Herausforderungen als die Regulierung der bemannten Luftfahrt. Traditionelle Sicherheitsstandards der Luftfahrt sind primär auf den Schutz der an Bord befindlichen Personen ausgerichtet und lassen sich nicht ohne Weiteres auf den Drohnenbetrieb übertragen. Da bei UAS keine Personen an Bord sind, verlagern sich die maßgeblichen Risiken: Im Vordergrund stehen die Gefährdung von Personen und Sachen am Boden – etwa durch Absturz oder unkontrollierten Betrieb –, die Gefährdung anderer Luftverkehrsteilnehmer durch mögliche Kollisionen sowie die Beeinträchtigung weiterer Rechtsgüter, darunter Privatsphäre und Datenschutz, Naturschutz, Lärmschutz, Urheberrechte und Belange der nationalen Sicherheit.

Als Reaktion auf dieses spezifische Risikoprofil setzte die deutsche Regulierung über lange Zeit vorrangig auf das Prinzip der räumlichen Separation – den Ausschluss des Drohnenbetriebs von potenziellen Gefahrenquellen durch ein dichtes Netz nationaler geografischer Gebiete, das sich primär an den potenziellen Gefährdungen für Menschen, Rechtsgüter Dritter und Gegenstände am Boden orientiert. Für den deutschen Nutzer ergibt sich daraus ein zweigliedriges Regelungsgefüge: das harmonisierte europäische System einerseits, das in Abschnitt 1.2 dargestellt wird, und nationale Ergänzungen in Form von geografischen Gebieten und Zuständigkeitsregelungen andererseits, auf die Abschnitt 1.3 eingeht. Die Regulierungsansätze in Österreich und der Schweiz weichen hiervon in Teilen ab und werden in den Abschnitten 1.4 und 1.5 behandelt.

1.1.2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Der Betrieb von UAS ist in Deutschland weitgehend unionsrechtlich harmonisiert (insb. über die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 - DVO). Nationale Regelungen konkretisieren dies insbesondere für sogenannte ‚geografische Gebiete‘ nach § 21h LuftVO sowie über Zuständigkeiten und Verfahren beim Betrieb in den Drohnenkategorien „offen“, „spezifisch“ und „erlaubnispflichtig“ („open“, „specific“, „certified“).

Grundsätzlich gilt: Der Betrieb erfolgt risikobasiert unter Ansehung des jeweiligen Betriebsszenarios; je höher das Risiko des konkreten Betriebs, desto höher sind die zu erfüllenden Anforderungen (z.B. Genehmigung, Risikobewertung, Organisation, Ausbildung und Durchführung des Betriebs).

Für den anwendungsorientierten Einsatz mit GIS ist wichtig, dass neben dem Luftrecht regelmäßig weitere Rechtsmaterien „mitlaufen“, die nicht ohne weiteres aus den rein luftrechtlichen Vorschriften ersichtlich sind. Hierzu zählen insbesondere **Datenschutz/Persönlichkeitsrechte**, **Naturschutz-/Eigentumsrecht**, **Luftsicherheits- und Gefahrenabwehrregeln**, sowie **Haftung/Versicherung**. Es reicht also nicht allein der Blick in die unmittelbaren luftrechtlichen Vorschriften für ein rechtsicheres Fliegen – insbesondere sind (beispielhaft und nicht abschließend) u.a. folgende Gesetze und Regelwerke beim Drohnenbetrieb in Deutschland zu beachten: die Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) sowie das Bundesdatenschutzgesetz (BDSG), daneben je nach Einsatzkontext insbesondere das Kunsturhebergesetz (KUG) und die §§ 22 ff. KUG (Recht am eigenen Bild), zivilrechtliche Vorgaben des Bürgerlichen Gesetzbuchs (BGB) (u.a. Eigentum, Besitz, Unterlassungs- und Schadensersatzansprüche), strafrechtliche Grenzen nach dem Strafgesetzbuch (StGB) (z.B. Verletzung des höchstpersönlichen Lebensbereichs durch Bildaufnahmen), naturschutzrechtliche Vorgaben des Bundesnaturschutzgesetzes (BNatSchG) und einschlägiger Landesnaturschutzgesetze/Schutzgebietsverordnungen, ggf. das Bundeswaldgesetz (BWaldG) und Landeswaldgesetze, sowie – abhängig von der Örtlichkeit und dem Schutzobjekt – spezialgesetzliche Regelungen (z.B. zum Schutz kritischer Infrastrukturen, zu Versammlungen, Einsätzen von Polizei und Rettungskräften, oder zu militärischen Sicherheitsbereichen).

Als Unterstützung für den Drohnenbetrieb im Bereich der GIS wird nachfolgend auf Schwerpunktbereiche eingegangen, die für den rechtssicheren Drohnenbetrieb eine wichtige Rolle spielen. Dabei ist hervorzuheben, dass diese Ausführungen Betreiber und Fernpiloten nicht von ihrer eigenen Sorgfaltspflicht entbinden – die Regulatorik bei der Nutzung von Drohnen ist darüber hinaus ständiger Weiterentwicklung unterworfen, so dass hier eine eigenständige Nachforschung nicht ersetzt werden kann.

Kenntnisnachweis und Fähigkeiten des Fernpiloten

Wie bei anderen Luftfahrtsystemen müssen auch für den Betrieb einer Drohne zahlreiche Grundvoraussetzungen erfüllt sein. In diesem Abschnitt wird auf den mit dem Betrieb befassten Personen eingegangen.

Die EU-Regeln unterscheiden zwischen **UAS-Betreiber (Operator)** und **Fernpilot (Remote Pilot)**. Darüber hinaus findet sich im deutschen Recht noch die Bezeichnung des **Halters**, welcher im Zusammenhang mit Drohnen insbesondere im Rahmen der Haftung und damit auch die Versicherungspflicht eine Rolle spielt (s. Abschnitt 1.1.5).

Nach Artikel 2(2) DVO ist „**Betreiber** eines unbemannten Luftfahrzeugsystems (UAS-Betreiber)“ (unmanned aircraft system operator, UAS operator): eine juristische oder natürliche Person, die ein oder mehrere UAS betreibt oder zu betreiben gedenkt.“ Als **Luftfahrzeughalter** ist regelmäßig die (natürliche oder juristische) Person anzusehen, welche die tatsächliche Verfügungsgewalt über das Luftfahrzeug hat und für dessen Betrieb verantwortlich ist - dies muss nicht zwingend der Eigentümer sein. Mit dem Verweis auf die „juristische Person“ kann der Betreiber bzw. Halter also auch ein Unternehmen sein, was im GIS-Bereich typischerweise der Fall sein wird.

In der Praxis (GIS-Dienstleister) fallen die genannten Rollen oft auseinander:

- a) Unternehmen = Betreiber - meist auch Halter
- b) Mitarbeitende = Fernpiloten.

Der Betreiber trägt im Sinne des EU-Rechts organisatorisch die Hauptverantwortung (u.a. Verfahren des Betriebs, eingesetztes Personal, Instandhaltung - er muss sich nach EU-Recht auch als Betreiber registrieren). Erfüllt der Betreiber außerdem die Haltereigenschaften, ist er außerdem für die **Haftpflichtversicherung der Drohne** verantwortlich.

Der UAS-Betreiber muss sich registrieren. In Deutschland erfolgt die Registrierung beim Luftfahrt-Bundesamt (LBA - [Luftfahrt Bundesamt - Betreiberregistrierung](#)); dem Betreiber wird eine e-ID zugeteilt - es kann immer nur eine solche e-ID pro Betreiber geben. Bei der Registrierung ist neben Namen, Adresse und Ausweisdokumenten (bei natürlichen Personen) bzw. einschlägigen Registereinzügen (bei juristischen Personen) die **Versicherungspolice** mit anzugeben, aus der sich die Deckung des Drohnenbetriebs in der gesetzlich geforderten Mindesthöhe ergibt (s. Abschnitt 1.1.5). Außerdem ist die **USt-ID** oder, falls nicht vorhanden, die **Steuernummer** anzugeben. Die Registrierung ist gebührenpflichtig - aktuell werden nach der Kostenverordnung der Luftfahrtverwaltung (LuftkostV) 20 EUR für die Registrierung von natürlichen Personen und 50 EUR für die Registrierung von juristischen Personen als Betreiber erhoben. Der Betreiber muss dafür sorgen, dass eine witterungsbeständige und feuerfeste Plakette mit der ihm erteilten Registrierungsnummer (e-ID) an geeigneter Stelle an allen von ihm betriebenen Drohnen angebracht ist. Sofern die Drohne es zulässt, muss die **e-ID** außerdem in die Software der Drohne hochgeladen werden, damit sie von der Ferne ausgelesen werden kann.

Der Fernpilot ist für den tatsächlichen Flugbetrieb der Drohne verantwortlich. Er muss für den Drohnenflug den Anforderungen entsprechend qualifiziert sein und die Drohne jederzeit sicher betreiben. Welche Anforderungen er dabei zu erfüllen hat und Regeln von ihm einzuhalten sind, richtet sich nach der verwendeten Drohne sowie dem konkreten Einsatzszenario und dem sich daraus ergebenden Betriebsrisiko. Je höher dieses Risiko etwa durch den Flug in der Nähe oder über sensiblen Bereichen wie z.B. Menschenansammlungen ist, umso höher sind die sich daraus ergebenden Anforderungen an den Fernpiloten, was auch das Verbot bestimmter Verhaltensweisen bedingen kann.

Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über die verschiedenen Kompetenznachweise des Fernpiloten unter Berücksichtigung der jeweiligen Betriebskategorien gegeben:

a) „Offene“-Kategorie („open“ category): Kompetenznachweise (A1/A3, A2)

Für viele GIS-Anwendungen (Kartierung in Sichtweite, ohne heikle Umgebungen) ist die „**Offene**“-Kategorie der Einstieg und häufig ausreichend für die erforderliche Arbeit. Dort gilt als Grundprinzip u.a. eine Höhenbegrenzung von 120 m bezogen auf den nächstgelegenen Punkt der Erdoberfläche (Topografie beachten!), sofern nicht gerade ein Hindernis überflogen wird - dann darf die zulässige Flughöhe auf Antrag der für das Hindernis zuständigen Stelle maximal bis 15 m über dem Hindernis liegen (Anhang. Teil A - UAS.OPEN.010).

A1/A3-Kompetenz („kleiner EU-Drohnenführerschein“):

In der offenen Kategorie ist - abhängig von UAS und Einsatz - regelmäßig der EU-Kompetenznachweis A1/A3 erforderlich, da der Betrieb für GIS-Tätigkeiten - wenn überhaupt - erst mit Drohnen der Klasse C1 sinnvoll sein dürfte (Anhang. Teil A - UAS.OPEN.020 UAS-Betrieb in Unterkategorie A1 bzw. UAS.OPEN.040 UAS-Betrieb in Unterkategorie A3); er wird über Online-Lehrgang und Online-Theorieprüfung erworben; die Prüfung umfasst 40 Multiple-Choice-Fragen und verlangt mindestens 75 % richtige Antworten.

Inhaltlich gehören u.a. Luftraumbeschränkungen, Verfahren, UAS-Wissen, Privacy/Data Protection, Versicherung dazu. Weitergehende Informationen finden sich auf der Website des LBA [Onlinekurs - LBA - OpenUAV](#) - dort findet sich auch Lehrmaterial zur Vorbereitung auf die Prüfung und Zugang zur Prüfung selbst.

A2-Kompetenz („A2-Zeugnis“):

Für geplante Flüge näher an unbeteiligte Personen (aber ohne geplanten Überflug) gelten strengere Anforderungen. Unbeteiligt sind nach geltendem Recht Personen, die nicht am Betrieb des unbemannten Luftfahrzeugsystems (UAS) teilnehmen oder die die vom UAS-Betreiber erteilten Anweisungen und Sicherheitsvorschriften nicht kennen (also insbesondere Personen, die nicht in den Einsatz eingewiesen wurden und nicht als „Teilnehmende“ des Betriebs gelten). Ausdrücklich eingeschlossen sind danach auch Personen in Fahrzeugen, da eine in der Nähe operierende Drohne beispielsweise einen Fahrzeugführer ablenken und so mittelbar einen Unfall verursachen kann.

Für A2 ist zusätzlich zum A1/A3-Nachweis u.a. eine weitergehende Theorieprüfung nach den Anforderungen des Anhangs Teil A - UAS.OPEN.030 UAS-Betrieb in Unterkategorie A2 abzulegen, die von der zuständigen Behörde oder bei einer von der zuständigen Behörde eines Mitgliedstaats benannten Stelle durchgeführt wurde. Die Prüfung umfasst mindestens 30 weitere Multiple-Choice-Fragen, mit denen die Kenntnisse des Fernpiloten in der technischen und betrieblichen Minderung der Risiken am Boden geprüft werden, verteilt über die Sachgebiete Meteorologie, UAS-Flugleistung sowie technische und betriebliche Minderung von Risiken am Boden. Anschließend kann das EU-Fernpilotenzeugnis A2 beantragt und ausgestellt werden. Außerdem gelten Mindestabstände: mind. 30 m, Reduktion bis 5 m nur mit Low-Speed-Mode und nach Lagebewertung. A2-Flüge sind nur mit entsprechendem Fernpiloten-Zertifikat zulässig.

Gültigkeit:

Die Online-Kompetenz (A1/A3) und das A2-Zertifikat sind 5 Jahre gültig. Eine Revalidierung erfolgt durch erneuten Kompetenznachweis oder Refresher (je nach Fallgestaltung).

b) „Spezielle“-Kategorie („specific“ category): zusätzliche Ausbildung je nach Betriebsart (z.B. STS)

Sobald GIS-Projekte risikoreicher werden (z.B. Flug außerhalb der Sicht - sog. Beyond Visual Line of Sight - BVLOS), Betrieb in komplexen Umgebungen, geplanter Flug nahe zu Menschen/Infrastrukturen, größere UAS), ist häufig die „spezielle“-Kategorie einschlägig. Eine genaue Vorprüfung, ob die „spezielle“-Kategorie Anwendung findet, lässt sich über Art. 5 DVO anstellen: Danach ist der Betrieb der „speziellen“ Kategorie zuzuordnen, sobald eine der Voraussetzungen der „offenen“ Kategorie nach Art. 4 DVO oder Teil A des Anhangs der DVO nicht erfüllt ist; in diesen Fällen ist grundsätzlich eine Betriebsgenehmigung nach Art. 12 DVO erforderlich (ggf. auch im Wege einer Erklärung bei Standard-Szenarien (STS) nach Art. 5 Abs. 5). Ergänzende, praxisorientierte Hinweise für Deutschland finden sich auf der behördlichen Informationsseite „Spezielle Kategorie“ der Digitalen Plattform Unbemannte Luftfahrt (DIPUL) sowie in den EASA „Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems“ (konsolidierte Fassung inkl. AMC/GM zu Part UAS.SPEC).

Ist die „spezielle“-Kategorie einschlägig, richten sich die genauen Betriebsanforderungen außerdem nach den Nebenbestimmungen der hierzu zuvor einzuholenden behördlichen Genehmigung zum darunter berücksichtigten Szenario. Hierbei können auch bei GIS-Dienstleistungen die sogenannten Standardszenarien (STS) hilfreich sein. Bislang gibt es auf EU-Ebene zwei STS: (1) STS-01 (VLOS [Sichtbetrieb - Visual Line of Sight] über einem kontrollierten Bodenbereich in bewohnter Umgebung) und (2) STS-02 (BVLOS mit Luftraumbewachtern/Airspace Observers über einem kontrollierten Bodenbereich, typischerweise in dünn besiedeltem Gebiet).

Bei Standardszenarien handelt es sich um genau definierte Betriebsszenarien. Werden deren Parameter eingehalten, erspart dies eine separate Risikoprüfung (z.B. SORA) und eine individuelle Betriebsgenehmigung; stattdessen wird der Betrieb grundsätzlich über eine Betriebserklärung abgewickelt. Die genaue Einhaltung der Parameter ist daher essentiell. Geringe Abweichungen lassen den Betrieb aus dem Szenario herausfallen und die Risikoprüfung bzw. eine Betriebsgenehmigung wird wieder erforderlich.

Ob ein STS für den Einsatz von Drohnen im Zusammenhang mit GIS sinnvoll ist, richtet sich nach den Bedürfnissen im Einzelfall:

- STS-01 ist für GIS-Einsätze häufig gut nutzbar, wenn ein kontrollierter Bodenbereich organisatorisch hergestellt werden kann (Absperrung/Zutrittskontrolle), z.B. Baustellen-Mapping, Werks-/Betriebsgelände, definierte kommunale Flächen.
- STS-02 kann für GIS-Anwendungen sinnvoll sein, wenn BVLOS benötigt wird und das Einsatzgebiet dünn besiedelt ist (z.B. lineare Infrastrukturtrassen, Deich-/Gewässerabschnitte, großflächiges Moni-

toring), wobei zusätzliche Anforderungen (u.a. Luftraumbeobachter) in der Einsatzplanung zu berücksichtigen sind.

Die folgenden Mindestelemente sind jedenfalls zu beachten, wenn man sich auf ein Standardszenario zur Ersparnis einer individuellen Risikobewertung stützen möchte:

Was wenigstens erforderlich ist, wenn man ein STS nutzen möchte (Kernpunkte):

- Betriebserklärung (STS): In Deutschland wird die STS-Betriebserklärung beim LBA eingereicht. Nach Bestätigung kann der Betrieb im Rahmen der erklärten Parameter aufgenommen werden; die Verantwortung für die vollständige Einhaltung der STS-Anforderungen liegt beim Betreiber.
- Passende Drohne: Für STS werden regelmäßig UAS der Klassen C5 (STS-01) bzw. C6 (STS-02) vorausgesetzt.
- Fernpiloten-Kompetenz: Für STS ist ein Theorie-Kompetenznachweis für STS-Betrieb erforderlich; für STS-01 zudem eine praktische Kompetenzbestätigung/Practical Skill Training-Akkreditierung (nach dem von der zuständigen Stelle vorgegebenen Verfahren).

Bei STS-01 muss der Fernpilot u.a. ein Theorie-Zertifikat für Standard-Szenarien und eine praktische Kompetenzbestätigung nachweisen; zudem gelten Betriebsvorgaben (z.B. VLOS, kontrollierter Bodenbereich, definierte Bodenrisikopuffer, Geschwindigkeitslimits). Die genauen Parameter und Anforderungen des STS-01 (und STS-02) sind in der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947, Anhang „Anlage 1“, Kapitel 1 (STS-01) bzw. Kapitel 2 (STS-02) nachlesbar; zudem bietet die EASA eine Übersicht mit Verweis auf diese Stellen.

Praxis-Hinweis (GIS):

- Personalqualifikationen sollte projektbezogen geplant werden: Die Unterkategorien A1/A3 und A2 richten sich danach, wie nah die Drohne an Menschen fliegt und ob Menschenansammlungen überflogen werden - nicht nach dem Gebietstyp als solchem. In ländlichen Gebieten ist A1/A3 daher häufig ausreichend, weil dort typischerweise weniger Menschen anwesend sind. Unabhängig davon ist jedoch stets zu prüfen, ob im Einsatzgebiet geografische Gebiete bestehen, die weitergehende Anforderungen nach § 21h LuftVO auslösen. Geografische Gebiete finden sich auch im ländlichen Raum in erheblicher Zahl. BVLOS-Einsätze fallen grundsätzlich in die Specific-Kategorie und erfordern eine Betriebsgenehmigung oder die Nutzung eines Standard-Szenarios (STS).
- Der Kenntnissnachweis ist vom Fernpiloten beim Betrieb vorzeigbar mitzuführen.
- Schulen Sie nicht nur „Prüfungswissen“, sondern auch Mission Planning, Failsafe, Georeferenzierung/Genauigkeit und Datenhygiene (Privacy by Design).

1.1.2.2 EU-Drohnenverordnung (Open, Specific, Certified)

Nachfolgend ordnen wir den Drohnenbetrieb in die drei EU-Kategorien ein. Zentral ist: Die Kategorie bestimmt, ob und welche Vorabverfahren (Genehmigung/Erklärung), technischen Anforderungen und Qualifikationen gelten.

a) Open Category (geringes Risiko)

Open-Betrieb ist grundsätzlich ohne vorherige Betriebsgenehmigung oder Betriebserklärung zulässig, wenn alle Bedingungen eingehalten werden.

Typische Eckpfeiler: Betrieb im vorgegebenen Rahmen (z.B. Höhenlimit), ohne „Hochrisiko“-Umgebungen. Innerhalb „open“ gibt es die Unterkategorien A1/A2/A3 (Nähe zu Menschen/Umgebung). Beispielhafte Kernaussage für A1: Überflug einzelner Unbeteiligter kann (je nach UA) vorkommen, aber niemals über Menschenansammlungen. Die Flugzeit über Unbeteiligten muss immer so kurz wie möglich gehalten werden - sie darf nicht planmäßig stattfinden. In der Unterkategorie A3 kommen typischerweise Einsätze in Betracht, bei denen bewusst Abstand zu unbeteiligten Personen gehalten werden kann und der Betrieb in „abgelegenen“ bzw. wenig frequentierten Bereichen stattfindet (einzuhaltender Sicherheitsabstand von mindestens 150 m zu Wohn-, Gewerbe-, Industrie- oder Erholungsgebieten), etwa: Kartierungs- und Monitoringflüge über Feldern, Wiesen, Wald- und Forstflächen (aller in Sichtweite des Fernpiloten); Befliegungen von unbebautem Gelände (z.B. Kiesgruben/Tagebau, Deponieflächen, Deich- oder Gewässerabschnitte außerhalb belebter Bereiche); Inspektions- und Vermessungsaufgaben auf weitläufigen Betriebs-/Industriearealen oder Baustellen, sofern ein ausreichender Abstand zu unbeteiligten Personen zuverlässig gewährleistet ist, so dass diese nicht gefährdet werden. In die Unterkategorie A2 fallen typischerweise Einsätze in Betracht, bei denen näher an unbeteiligte Personen herangeflogen werden muss (Sicherheitsabstand mind. 30 m, in Ausnahmefällen im Langsamflugmodus (Reisegeschwindigkeit höchstens 3 m/s unter Beachtung weiterer Faktoren),

z.B.: ortsnahe Vermessungs- und Bestandsaufnahmen in gemischt genutzten Bereichen (z.B. Siedlungsrand, Gewerbegebiete, Park-/Grünanlagen) mit planbarer Personenbewegung; Inspektions- und Dokumentationsflüge an Bauwerken/Anlagen (z.B. Gebäudehüllen, Dächer, Brückenbauteile) in der Nähe von Personen, wenn durch Einsatzplanung (z.B. Absperrungen, Einweisung, definierte Start-/Landeflächen und Sicherheitsabstände) sichergestellt ist, dass keine unbeteiligten Personen überflogen werden und die vorgeschriebenen Mindestabstände eingehalten werden.

Für die Abgrenzung der Unterkategorien kann man folgende maßgebliche Kriterien heranziehen:

- (1) Nähe zu unbeteiligten Personen,
- (2) Zulässigkeit eines (ungeplanten) Überflugs unbeteiligter Personen,
- (3) Art der Umgebung (bevölkert vs. abgelegen) sowie
- (4) technische/produktbezogene Voraussetzungen der Drohne (insb. Klassenkennzeichnung und Betriebsmodus).

Praktisch lässt sich die Einordnung wie folgt verständlich machen:

1. Leitfrage: Müssen Sie in die Nähe unbeteiligter Personen hinein?

- Nein, der Einsatz lässt sich so planen, dass unbeteiligte Personen zuverlässig ferngehalten werden (z.B. ländliche/abgelegene Flächen, gesperrtes Betriebsgelände, klarer Sicherheitsbereich): Das spricht typischerweise für A3.
- Ja, der Einsatz findet typischerweise in einer Umgebung statt, in der unbeteiligte Personen realistisch in der Nähe sind (z.B. Park, Siedlungsrand, gewerblich/kommunal genutzte Bereiche mit Publikumsverkehr), und Sie müssen deshalb „näher dran“ arbeiten: Das spricht eher für A2 oder A1 (je nach Drohnenklasse und Betriebsprofil).

2. Leitfrage: Ist ein (ungeplanter) Überflug einzelner unbeteiligter Personen betrieblich denkbar?

- A1 ist die Unterkategorie, in der - abhängig von Drohnenklasse und Einsatzparametern - ein *kurzzeitiger, unbeabsichtigter* Überflug einzelner unbeteiligter Personen vorkommen kann (aber niemals über Menschenansammlungen). A1 passt daher vor allem zu Einsätzen, bei denen Sie nicht zwingend in der Nähe von Personen arbeiten *wollen*, dies aber im dynamischen Umfeld nicht mit absoluter Sicherheit ausschließen können, und die eingesetzte Drohne für A1 zugelassen/geeignet ist.
- A2 und A3 sind demgegenüber so zu planen, dass kein Überflug unbeteiligter Personen stattfindet; A2 erlaubt näheren Betrieb „an Menschen heran“, A3 verlangt grundsätzlich „weit weg von Menschen“.

3. Leitfrage: Wie „kontrollierbar“ ist Ihr Bodenbereich?

- Wenn Sie einen Sicherheitsbereich effektiv herstellen und halten können (Absperrung, Zugangskontrolle, Einweisung - z.B. Baustelle/Werksgelände), kann ein Einsatz häufig in A3 bleiben oder - wenn Nähe erforderlich ist - muss regelkonform in A2 geplant werden.
- Wenn der Bodenbereich nicht verlässlich kontrollierbar ist (öffentliche Wege, spontane Passanten, Publikumsverkehr), wird die A2/A1-Frage relevanter: Dann kommt es stark darauf an, ob Sie näher herankommen (A2) oder ob das Flugprofil und die Drohne eher auf A1 ausgelegt sind.

4. Praktische Daumenregel:

- A3: „GIS-Flüge dort, wo Menschen typischerweise keine Rolle spielen“ (abgelegen/abgesperrt; große Abstände).
- A2: „GIS-Flüge nahe an Menschen, aber ohne Überflug“ (ortsnah, kontrollierte Abstände, saubere Einsatzplanung).
- A1: „GIS-Flüge mit sehr leichten/entsprechend klassifizierten Drohnen, bei denen einzelne unbeteiligte Personen nicht sicher ferngehalten werden können - jedoch ohne Menschenansammlungen und nur innerhalb der A1-Grenzen.“

Zusammengefasst kann man sich an folgende Planungsentscheidung halten: „Kann ich die Umgebung so organisieren (Ort/Zeit/Absperrung), dass unbeteiligte Personen fernbleiben?“ - wenn ja, Richtung A3; wenn nein, ist zu prüfen, ob der Einsatz nahe an Personen stattfinden muss (A2) oder ob Drohne/Einsatzprofil in A1 passen.

Technik-/Produktrecht (CE-Klassenkennzeichnung C0-C6):

Viele Anforderungen in der „offenen“-Kategorie knüpfen an die CE-Klassenkennzeichnung (C0-C4) nach der Delegierten Verordnung (EU) 2019/945 an; für die Nutzung der EU-Standardszenarien in der „speziellen“ Kategorie sind hingegen UAS mit der jeweiligen Kennzeichnung C5 (STS-01) bzw. C6 (STS-02) vorgesehen.

Für bestimmte Klassen sind technische Funktionen besonders relevant:

„Direct Remote Identification“ (Fernidentifizierung) ist als Funktion je nach UAS-Klasse bzw. Betrieb (und - bei STS - ausdrücklich während des Betriebs) von zentraler Bedeutung; Geo-Awareness (Geo-Sensibilisierung/Geo-Fencing-Funktion im produktrechtlichen Sinn) ist insbesondere bei C1-C3 als produktseitige Risikominderungsfunktion relevant, während für C5/C6 (STS) ein eigener, STS-bezogener technischer Anforderungskatalog gilt.

Wichtig für die Praxis:

Modifikationen oder Konfigurationsänderungen außerhalb der Herstellerfreigaben (z.B. bauliche Änderungen, sicherheitsrelevante Software-/Firmware-Anpassungen, Entfernung/Deaktivierung von Sicherheitsfunktionen oder leistungs-/massenrelevante Umbauten) können dazu führen, dass die Drohne nicht mehr den Anforderungen entspricht, unter denen sie in Verkehr gebracht wurde. Wer eine Drohne so verändert, dass die Konformität betroffen sein kann, wird produktrechtlich regelmäßig wie ein Hersteller behandelt - mit entsprechenden Pflichten. Operativ kann dies bedeuten, dass man sich nicht mehr auf die ursprüngliche Klassenkennzeichnung stützen kann und der Einsatz neu zu bewerten ist (ggf. andere Betriebsbedingungen oder Wechsel in die „spezielle Kategorie“).

b) “Spezielle”-Kategorie (‘specific’-category) (mittleres Risiko)

Wie bereits erwähnt, erfordert der Betrieb in der “speziellen”-Kategorie grundsätzlich eine Betriebsgenehmigung der Behörde oder - in definierten Fällen - eine Betriebserklärung (z.B. Standard-Szenarien, Light UAV Operator Certificate - LUC) als Alternative.

Für die Erlangung entsprechender Genehmigungen relevant sind insbesondere folgende Vorarbeiten und Verfahren:

- Durchführung einer risikobasierten Bewertung des geplanten Betriebs - insbesondere wenn ein Betriebs nicht bereits unter ein vorstrukturiertes Verfahren wie PDRA (Pre-Defined Risk Assessment) oder ein STS fällt, nach dem von der EASA anerkannten Verfahren des Specific Operations Risk Assessment (SORA),
- Erstellung eines Operations Manual, Verfahren, Notfallmanagement, welche im Rahmen des SORA Berücksichtigung findet und hierzu relevante Verfahren zur Risikominderung vorsieht,
- Erstellung der Anforderungen eine LUC.

Die aufgeführten Verfahren verlangen besondere Kenntnisse organisatorischer sowie technischer Anforderungen und Bewertungen. Fehlen diese im eigenen Unternehmen, ist dringend geraten, sich die Unterstützung erfahrener Berater zu sichern. Dies verkürzt auch das Verfahren gegenüber den Genehmigungsbehörden sowie den Aufwand, da Rückfragen reduziert werden.

c) “Zulassungspflichtige”-Kategorie - ‘certified’-category (hohes Risiko)

Die Certified Category schließlich orientiert sich an Anforderungen der bemannten Luftfahrt und ist perspektivisch für komplexe Systeme wie Flugtaxi vorgesehen. Diese Kategorie kommt bei GIS-Vermessungen praktisch nicht in Betracht.

Praxis-Hinweis (GIS) für die Einordnung in die richtige Betriebskategorie

- Legen Sie früh fest, ob Sie VLOS sicher einhalten können und ob Sie ihre Einsatzgebiete systematisch klar charakterisieren können. Viele GIS-Missionen „kippen“ rechtlich erst dann von der „offenen“ in die „spezielle“ Kategorie, wenn der Betrieb BVLOS oder in komplexen urbanen Umgebungen erforderlich wird.
- Prüfen Sie Klassenzuordnung sowie die Remote-ID/Geo-Awareness-Fähigkeit bei Anschaffung der eingesetzten Drohne mit Blick auf die geplanten Einsatzszenarien. Dies erspart Ihnen Einsatzbeschränkungen bzw. die Notwendigkeit der Beschaffung weiterer Drohnen.

1.1.2.3 Datenschutz und Persönlichkeitsrechte

Drohnen werden im GIS-Kontext häufig zur Erhebung hochauflösender Bild-, Video- oder Sensordaten eingesetzt. Sobald Personen erkennbar sind oder eine Identifizierbarkeit naheliegt (auch über Kontext/Ort/Zeit), ist regelmäßig Datenschutzrecht (DSGVO/BDSG) berührt. Daneben bestehen zivilrechtliche Persönlichkeitsrechte (z.B. Recht am eigenen Bild, allgemeines Persönlichkeitsrecht) und ggf. strafrechtliche Grenzen (z.B. bei besonders geschützten Bereichen).

a) Geltungsbereich DSGVO und „Haushaltsausnahme“

Reine Privatnutzung im „familiär-persönlichen“ Bereich kann ausnahmsweise außerhalb der DSGVO liegen; bei Veröffentlichung/Plattformnutzung oder professionellem Einsatz greift die Ausnahme aber regelmäßig nicht.

Für GIS-Projekte (Behörden, Unternehmen, Vereine, Forschung, Dienstleistungen) ist die DSGVO daher typischerweise voll anwendbar.

b) Rechtsgrundlage, Transparenz, Minimierung

Um einen rechtssicheren Betrieb zu gewährleisten, sollten die folgenden Kernfragen beantwortet werden:

- Rechtsgrundlage der Verarbeitung (z.B. Vertrag/öffentliche Aufgabe/berechtigtes Interesse/Einwilligung - je nach Setting).
- Informationspflichten: Betroffene müssen grundsätzlich nachvollziehen können, wer zu welchem Zweck Daten erhebt. (Bei Drohneneinsatz ist das praktisch schwierig; daher sind gute Hinweise/Prozesse wichtig.)
- Datenminimierung: Nur so viel aufnehmen wie nötig; „Nebenbeifang“ reduzieren (Kamerawinkel, Flughöhe, Maskierung).
- Speicherbegrenzung & Zugriff: GIS-Datenhaltung (Server, Cloud, Sharing) strukturiert absichern; Rollen/Rechte, Protokollierung.

Spezifisch bei Drohnen weist z.B. die Berliner Datenschutzaufsicht auf die besondere Reichweite und die Möglichkeit hin, auch nicht öffentlich zugängliche Bereiche zu erfassen - das erhöht das Risiko von Rechtsverletzungen und die Anforderungen an den Betreiber.

c) Persönlichkeitsrechtliche Leitplanken (Praxis)

Unabhängig vom Datenschutzrecht sollten Sie folgende Punkte beachten:

- Privatgrundstücke/Intimsphäre besonders schützen (Gärten, Fensterbereiche, Innenräume).
- keine unnötige Beobachtung einzelner Personen; keine „Tracking“-Anwendungen ohne klare Rechtsgrundlage.
- bei Veröffentlichungen (WebGIS, StoryMaps, Öffentlichkeitsportale) zusätzliche Prüfungen vorsehen (Unkenntlichmachung, Aggregation).

Praxis-Hinweis (GIS)

Gerade GIS macht Daten „mächtiger“: Georeferenzierte Orthophotos/3D-Modelle erlauben Rückschlüsse auf Personen, Routinen oder Eigentumsverhältnisse. Planen Sie daher standardmäßig:

- Privacy-by-Design (ROI-Definition, Masking, Downsampling),
- klare Datenflüsse (von SD-Karte bis WebGIS),
- definierte Lösch- und Freigabeprozesse.

1.1.2.4 Haftung und Versicherung

Drohnen verursachen nicht nur Luftfahrtrisiken (Personen-/Sachschäden), sondern im GIS-Kontext auch „Datenrisiken“ (Persönlichkeitsrecht, Datenschutz, Betriebsgeheimnisse).

Rechtlich sollten Sie daher zwei Ebenen sauber trennen:

- a) luftverkehrsrechtliche Halterhaftung/Versicherung,
- b) sonstige zivil-/öffentlich-rechtliche Haftungstatbestände.

a) Halterhaftung nach LuftVG (§ 33) und Pflichtversicherung (§ 43)

Das LuftVG ordnet an, dass beim Unfallbetrieb eines Luftfahrzeugs der Halter im Rahmen der sogenannten Gefährdungshaftung grundsätzlich schadensersatzpflichtig ist.

Zudem ist der Halter verpflichtet, eine Haftpflichtversicherung zur Deckung dieser Haftung zu unterhalten.

Die Versicherung muss unbedingt vor dem Drohnenbetrieb abgeschlossen sein - der Versicherungsschein ist beim Betrieb vorzeigbar mitzuführen.

Die gesetzlich vorgeschriebene Mindestdeckung der Haftpflichtversicherungspflicht des Halters beträgt ca. 1 Mio. €.

Wichtig in Projekten: Klären Sie, wer „Halter“ des Luftfahrzeugs im Rechtssinn ist und wie die Policen bei Subunternehmern, Piloteneinsatz, Gerätepools und Mietdrohnen greifen. Der Versicherungsschutz muss für alle von Ihnen angedachten Betriebsszenarien Ihrer Drohnen lückenlos sein.

Achten Sie insbesondere darauf, dass die Police:

- gewerbliche Nutzung (GIS-Dienstleistung, Vermessung) ausdrücklich deckt,
- die konkrete Drohne/MTOM und typische Einsätze (ggf. „specific“) umfasst,
- Schäden durch Payload (Kamera/LIDAR) und typische Folgeschäden (z.B. Sachschäden an Infrastruktur) einschließt,
- idealerweise Schnittstellen zu Betriebshaftpflicht und ggf. Cyber-/Datenschutzrisiken sauber regelt (nicht luftrechtlich, aber praxisrelevant).

b) sonstige zivil-/öffentlich-rechtliche Haftungstatbestände

Bedenken Sie neben speziellen luftrechtlichen Haftungsrisiken und Versicherungspflichten außerdem darüber hinaus gehende Haftungsrisiken, die insbesondere im GIS-Betrieb mit Drohnen auftreten können. Hierzu zählen zum Beispiel:

- Datenschutz-/Persönlichkeitsrechtsverletzungen (Unterlassung, Schadensersatz, Bußgelder),
- Vertrags-/Werkleistungsrisiken (fehlerhafte Vermessung, unzureichende Genauigkeit, Fristverzug),
- Ordnungswidrigkeiten bei Verstößen gegen Betriebsregeln/Geozonen.

Sie sollten abwägen, ob Sie gegenüber diesen und ähnlichen Risiken ausreichend geschützt sind und ob ggf. weitere Versicherungen zur Absicherung in Frage kommen.

Praxis-Hinweis (GIS)

- Hinterlegen Sie in Projektakten stets: Versicherungsnachweis, Betreiber-/Pilotennachweise, Flugfreigaben, Geozonenprüfung, Datenfreigabeprozess - und zwar zusätzlich zur Mitführung von Kenntnissnachweis und Versicherungsschein im Betrieb,
- Vereinbaren Sie vertraglich klare Verantwortlichkeiten (Betreiberrolle, Datenverarbeitung, Liefergenauigkeiten, Rechte an Orthophotos/3D-Modellen).
- Klären Sie, welcher gesetzlichen Pflichten (z.B. als Drohnenhalter, Betreiber, Fernpilot etc.) aus der jeweiligen Rolle erwachsen und stellen Sie deren Einhaltung sicher.

1.1.2.5 Flugzonen und Genehmigungen

Für die rechtmäßige Flugplanung ist entscheidend, wo Sie fliegen (Luftraum/ geografische Gebiete) und welche Freigaben ggf. zusätzlich einzuholen sind (luftrechtlich und außerhalb des Luftrechts). Diesbezügliche Regeln und Festlegungen unterscheiden sich teils von Bundesland zu Bundesland und gerade Anforderungen an Lufträume können sich auch kurzfristig ändern. Es ist daher unerlässlich, sich mit örtlichen Regularien zeitnah vor jedem Flug vertraut zu machen. Für GIS-Projekte ist dieser Schritt besonders wichtig, weil Einsätze häufig in der Nähe kritischer Infrastrukturen, Siedlungen oder Schutzgebiete stattfinden.

a) Nationale „geografische Gebiete“ (Geozonen) - § 21h LuftVO und amtliche Karten

Deutschland konkretisiert EU-Vorgaben des Artikel 15 DVO über § 21h LuftVO („Regelungen ... in geografischen Gebieten“). Dort wird der Betrieb in bestimmten Gebieten an zusätzliche Voraussetzungen geknüpft bzw. eingeschränkt.

In geografischen Gebieten können - abhängig von Art des Gebiets - zusätzliche Voraussetzungen gelten (z.B. Zustimmung, weitere Auflagen, behördliche Freigaben), und zwar kategorieübergreifend. In der speziellen Kategorie treten diese Anforderungen neben das jeweilige Genehmigungs-/Erklärungsregime. Das heißt, erforderliche Zustimmungen sind regelmäßig zusätzlich zur Betriebsgenehmigung in der „speziellen“-Kategorie einzuholen. Die zuständige Luftbehörde weist auf diese Notwendigkeit ggf. in der erteilten Genehmigung als Nebenstimmung hin.

Welche Zustimmungen erforderlich sind, ist § 21h Abs. 3 LuftVO im Zuge der geographischen Einsatzplanung mit Blick auf die dort genannten Gebiete zu entnehmen. Weitere Gebiete können nach § 21h Abs. 4 LuftVO eingerichtet werden - dies kann auch zeitlich begrenzt geschehen. Zur Flugplanung gehört daher auch die

zeitaktuelle Prüfung auf das Vorliegen solcher Gebiete über die Veröffentlichungen in den Nachrichten für Luftfahrer.

Die Einholung der erforderlichen Zustimmungen kann zeitaufwendig sein - zuvor kann es bereits schwierig sein, den Zustimmungsberechtigten überhaupt zu identifizieren. Dieser Aufwand sollte immer im Projekt eingeplant sein.

Die Regeln des § 21i Abs. 1 LuftVO sehen außerdem die Möglichkeit vor, dass die zuständige Luftfahrtbehörde den Betrieb in geographischen Gebieten nach den in Nummern 1 und 2 genannten Bedingungen zulässt. Absatz 2 der Vorschrift stellt es hingegen in das pflichtgemäße Ermessen der Behörde, welche Unterlagen sie als Grundlage der Genehmigung verlangt. Dies kann zu einem ähnlich großen oder sogar noch größeren Aufwand als die Einholung der Zustimmungen nach § 21h Abs. 3 LuftVO führen, so dass dieser Weg nicht unbedingt eine Erleichterung darstellt. In der Praxis haben die Landesluftfahrtbehörden mehrerer Bundesländer diesen Aufwand durch den Erlass von Allgemeinverfügungen nach § 21i Abs. 1 LuftVO reduziert: Baden-Württemberg, Bremen, Hamburg, Hessen, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein bieten eine gemeinsame geografische Allgemeinerlaubnis an, die auf Antrag auch von den jeweils anderen beteiligten Ländern anerkannt wird. Unabhängig von der konkret gewählten Betriebsunterkategorie (A1, A2 oder A3) ist Voraussetzung für die Nutzung dieser Allgemeinerlaubnis, dass alle eingesetzten Fernpilotinnen und Fernpiloten über ein gültiges Fernpilotenzeugnis A2 verfügen. Soweit ein Vorhaben die Bedingungen der Allgemeinerlaubnis nicht erfüllt, bleibt die Einholung einer Einzelgenehmigung nach § 21i Abs. 2 LuftVO erforderlich.

Im Zusammenhang mit § 21h Abs. 3 LuftVO häufig übersehen, aber besonders praxisrelevant sind folgende Regelungen und Zustimmungsszenarien:

- nach § 21h Abs. 3 Nr. 5 LuftVO beim über und innerhalb eines seitlichen Abstands von 100 Metern von Bundesfernstraßen, Bundeswasserstraßen und Bahnanlagen: Zustimmungspflichtige Sachverhalte beschränken sich auf nicht bereits im Rahmen von § 21h Abs. 3 Nr. 5a und c LuftVO erlaubte Betriebsszenarien. Die Zustimmung der Landesstraßenbaubehörde ist nur erforderlich für einen Flugbetrieb, der (1) nicht stets kleiner ist als der seitliche Abstand zur Infrastruktur und der seitliche Abstand stets größer als 10 Meter ist (1:1 Regel - § 21h Abs. 3 Nr. 5c LuftVO), oder (2) wenn im Fall des Überflugs, dieser nicht bereits im Rahmen der für den Betrieb in der „speziellen“ Kategorie erfolgten Risikobewertung der zuständigen Luftfahrtbehörde ausreichend berücksichtigt und erlaubt wurde (§ 21h Abs. 3 Nr. 5a LuftVO).
- nach § 21h Abs. 3 Nr. 7 LuftVO beim Betrieb über Wohngrundstücken: Zustimmungserfordernis des Grundstückseigentümer/sonstigen Nutzungsberechtigten auch bei Start/Landung; teils auch Überflugkonstellationen in Geozonen - außerdem örtliche Satzung von Kommunen.
- nach § 21h Abs. 3 Nr. 6 LuftVO im Zusammenhang mit Naturschutzrecht (Schutzgebiete, Brutzeiten, Störungsverbot) - außerdem Landesnaturschutzgesetze: Zustimmungserfordernis der zuständigen Naturschutzbehörde.

Für die Praxis maßgeblich ist die amtliche Darstellung über die Digitale Plattform Unbemannte Luftfahrt (DIPUL): Das Map-Tool zeigt geografische Gebiete und stellt auch einen Web Map Service (WMS) zur Verfügung - besonders nützlich, wenn Sie Geozonen direkt in GIS/Planungssoftware einbinden möchten. DIPUL ist das zentrale amtliche Informations- und Kartentool für geografische Gebiete. Allerdings ist zu beachten, dass für die Richtigkeit der Darstellung in der DIPUL keine Gewähr besteht und keine Haftung übernommen wird. Es ist daher unbedingt ratsam, neben der DIPUL weitere Quellen zur Flugplanung wie z.B. OpenStreet-Map heranzuziehen. Zur Darlegung der erforderlichen Sorgfalt gegenüber Ordnungsbehörden sollte die sorgfältige Flugplanung außerdem dokumentiert werden. Stellt sich die Situation vor Ort dann anders dar und kommen Zweifel auf, ob ohne weitere Zustimmung Betroffener geflogen werden darf, sollte der Flug nicht vorgenommen werden, bevor die Situation geklärt ist und rechtskonformes Fliegen stattfinden kann.

Praxis-Hinweis (GIS)

- Integrieren Sie DIPUL-WMS als Layer in Ihr GIS/Flight-Planung. So lassen sich Einsatzräume und Projektgebiete frühzeitig „compliancefähig“ zuschneiden.
- Definieren Sie intern eine „No-Go“-Liste (z.B. Menschenansammlungen, sensible Einrichtungen) und eine Freigabe-Checkliste je Projekt.
- Sollten Sie die erforderlichen Zustimmungen nicht erlangt haben, bleibt die Möglichkeit, die zuständige Luftfahrtbehörde des Landes nach § 21i Abs. 1 LuftVO um eine Genehmigung des Betriebs im betreffenden Gebiet zu bitten - allerdings mit den bereits oben genannten weiteren Risiken - dass die Genehmigung erteilt ist, kann also nicht garantiert werden.

b) Spezialfall: Luftraumbezogene Freigaben (typisch: Nähe zu Flugplätzen/CTR) - § 21h Abs. 3 Nr. 9 LuftVO i. V. m. § 21 LuftVO

Neben Geozonen nach § 21h Abs. 3 und 4 LuftVO können Lufträume mit besonderen Regeln vom Betrieb betroffen sein (z.B. kontrollierter Luftraum, Luftraums über Flugplätzen mit Flugverkehrskontrollstelle). Je nach Situation kann danach vor dem Betrieb die Flugverkehrskontrollfreigabe der zuständigen Flugverkehrskontrollstelle gemäß § 21 LuftVO einzuholen sein - dieses Erfordernis wird auch bereits in § 21h Abs. 3 Nr. 9 LuftVO erwähnt. Für die Kontrollzonen der 15 deutschen Verkehrsflughäfen, an denen die DFS Flugplatzkontrolldienste erbringt, hat die DFS auf Grundlage von § 31 Abs. 3 LuftVO eine Allgemeinverfügung erlassen, die unter bestimmten Auflagen - insbesondere Einhaltung der Sichtweite, Mindestabstand von 1,5 km zur Flugplatzbegrenzung und maximale Flughöhe von 50 m über Grund - eine Flugverkehrskontrollfreigabe ohne Einzelantrag erteilt. Werden diese Bedingungen nicht eingehalten, ist eine individuelle Freigabe bei der zuständigen Flugplatzkontrollstelle zu beantragen. Ob der Flug in relevanten Lufträumen stattfindet, lässt sich wiederum den amtlichen Karten/Plattformen (DIPUL/DFS) entnehmen.

c) Betriebsgenehmigungen in „specific“

Wenn Ihr Vorhaben nicht mehr „open“ ist (z.B. BVLOS, komplexe Umgebungen), benötigen Sie i.d.R. eine Betriebsgenehmigung oder eine Betriebserklärung im Rahmen definierter Standardszenarien - dies ist derzeit, wie erwähnt, unabhängig von dem Erfordernis der Zustimmungen in Verbindung mit geographischen Gebieten nach § 21h Abs. 3 LuftVO.

Hinweis: Gerade im Bereich von GIS kommt ein behördlicher Betrieb z.B. als Landesvermessungsamt, Katasteramt, Straßenverkehrsbehörde etc. unmittelbar durch die Behörde selbst oder in deren Auftrag zur Wahrnehmung ihrer behördlichen Aufgaben in Betracht. Daher ist die Anwendung des § 21k LuftVO naheliegend. Nach dieser Vorschrift ist die Behörde und der im behördlichen Auftrag unter deren Aufsicht in ihrem Aufgabenbereich tätig werdende Auftragnehmer u.a. von dem Bedarf der Betriebsgenehmigung befreit. Auch gelten die Regelungen nach § 21h und § 21 i LuftVO nicht. Das heißt, die aufwendige Einholung der ggf. ansonsten erforderlichen Zustimmung(en) entfällt.

Es ist allerdings streitig, ob die Erleichterung lediglich auf Behörden „mit Sicherheitsaufgaben im Zusammenhang mit Not- und Unglücksfällen sowie Katastrophen“ (sogenannte „Blaulichtbehörden“) beschränkt ist.

Das BMDV hatte mit Schreiben vom 20.07.2022 auf Grundlage einer EASA-Auslegung klargestellt, dass § 21k LuftVO in der damals geltenden Fassung ausschließlich auf Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben im Zusammenhang mit Not- und Unglücksfällen sowie Katastrophen (BOS) anwendbar sei - was Vermessungs- und Geoinformationsbehörden praktisch ausgeschlossen hätte. Der nun vorliegende Referentenentwurf (Bearbeitungsstand: 08.05.2026) zur Neufassung des § 21k LuftVO löst diese Streitfrage nunmehr zugunsten eines funktionalen Behördenbegriffs auf: Privilegiert ist danach jede Behörde oder hoheitlich befugte Stelle, die im öffentlichen Interesse ihre Aufgaben wahrnimmt - unabhängig davon, ob es sich um eine Blaulichtbehörde handelt.

Zu beachten ist allerdings: Das Behördenprivileg entbindet nicht von der Einhaltung materiell-rechtlicher Sicherheitsanforderungen. Die Behörde hat vor Betriebsbeginn eine eigenverantwortliche Prüfung der sicheren Durchführbarkeit vorzunehmen. Ist man nicht selbst Behörde, sondern in deren Auftrag tätig, sollte zudem gemeinsam mit der Behörde ein Konzept entwickelt werden, das den Betrieb „unter Aufsicht“ mit ausreichenden Eingriffs- und Kontrollmöglichkeiten der Behörde belastbar abbildet. Solange der Entwurf noch nicht in Kraft getreten ist, empfiehlt sich im Zweifel weiterhin Vorsicht bei der Berufung auf das Behördenprivileg.

1.1.3 Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von UAS - Österreich

Verfasser: Dagmar Lehner, Stefan Georgiev

1.1.3.1 Einleitung und Zielsetzung

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge (UAS) in Europa sind durch die Verordnungen (EU) 2019/947 und 2019/945 weitgehend einheitlich geregelt. Die grundlegenden Bestimmungen - insbesondere zu Betriebskategorien, Registrierung, Ausbildung, Betriebsvoraussetzungen sowie Haftung - gelten daher in Österreich in gleicher Weise wie in Deutschland und werden im entsprechenden Kapitel ausführlich dargestellt.

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich daher auf die nationalen Besonderheiten und praktischen Rahmenbedingungen des Drohnenbetriebs in Österreich. Die unionsweit geltenden Anforderungen werden nicht erneut im Detail ausgeführt.

1.1.3.2 Geografische UAS-Gebiete (Geozonen)

In der praktischen Anwendung stellen geografische UAS-Gebiete einen der häufigsten und zugleich entscheidenden Faktor für die rechtliche Einordnung eines Drohneneinsatzes dar.

Während die grundlegenden betrieblichen Anforderungen unionsweit harmonisiert sind, ergeben sich wesentliche Unterschiede in der praktischen Anwendung insbesondere durch nationale geografische UAS-Gebiete (Geozonen).

Geografische UAS-Gebiete (Geozonen) sind räumlich definierte Bereiche, in denen der Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge eingeschränkt, freigabepflichtig² oder bescheidpflichtig³ ist. Rechtsgrundlage bilden insbesondere die Verordnung (EU) 2019/947 sowie die nationale Umsetzung in den Luftverkehrsregeln 2014 (LVR) in der jeweils geltenden Fassung.

Geozonen dienen dem Schutz der bemannten Luftfahrt, sensibler Infrastruktur, dem Umweltschutz sowie der öffentlichen Sicherheit und sind unabhängig von der Betriebskategorie (OPEN oder SPECIFIC) zu beachten.

Grundsätzliche Systematik der Geozonen

In der Praxis ist zwischen folgenden Formen zu unterscheiden:

- **Freigabepflichtige Zonen**
 - Zustimmung einer zuständigen Stelle⁴ erforderlich
 - keine luftfahrtbehördliche Betriebsbewilligung erforderlich
- **Bescheidpflichtige Zonen**
 - formelle Betriebsbewilligung durch die Austro Control erforderlich

Kontrollzonen (CTR) - zivile Flugplätze

Kontrollzonen (CTR), etwa die Kontrollzone des Flughafens Wien (LOWW), dienen der sicheren Abwicklung des bemannten Flugverkehrs.

- Betrieb von Drohnen ist freigabepflichtig
- Erforderlich ist die Zustimmung der zuständigen Flugverkehrskontrollstelle
- Die Freigabe erfolgt nach Abgabe eines Flugplans über dronespace.at
- Während des Betriebs sind Anweisungen der Flugsicherung verbindlich zu beachten (telefonische Erreichbarkeit sicherstellen)

² Freigabepflichtig: Flug nur mit Zustimmung der Flugverkehrskontrollstelle.

³ Bescheidpflichtig: Ein Drohnenbetrieb ist in diesem Bereich ausschließlich mit einer formellen Betriebsbewilligung der Austro Control GmbH für Flugplatzzonen zulässig. Diese wird im Rahmen der Specific-Kategorie beantragt.

⁴ Z.B.: Flugverkehrskontrollstelle, örtlich zuständige Militärflugleitung.

Militärische Kontrollzonen und Nahkontrollbezirke

Militärische Kontrollzonen (z.B. MCTR Langenlebarn - LOXT, MCTR Zeltweg - LOXZ) sowie militärische Nahkontrollbezirke (MTMA) unterliegen besonderen Sicherheitsanforderungen.

- Betrieb ist freigabepflichtig
- Zustimmung der örtlich zuständigen Militärflugleitung erforderlich
- Freigaben sind zeitlich begrenzt und an Betriebszeiten gebunden
- Ohne aktive Freigabe ist ein Drohnenbetrieb unzulässig

Diese Zonen sind besonders relevant für professionelle Betreiber:innen, da sie häufig in infrastrukturell sensiblen Regionen liegen.

Flugplatzzonen und Flugplätze ohne Flugplatzzonen

Flugplatzzonen (z.B. Flughafen Wien - LOWW)

Flugplatzzonen stellen einen erweiterten Schutzbereich rund um große Flugplätze dar.

- Erforderlich ist eine Betriebsbewilligung der Austro Control
- Eine bloße Aktivierung eines Flugplans über dronespace.at ersetzt keine Bewilligung

Flugplätze ohne Flugplatzzone

Bei kleineren oder unkontrollierten Flugplätzen gilt:

- Während der Betriebszeiten ist ein Drohnenflug nur mit Betriebsbewilligung der Austro Control zulässig
- Betreiber:innen müssen Betriebszeiten über AIP⁵, NOTAMs⁶ oder beim Flugplatzhalter abklären

Hubschrauberlandeplätze (Heliports)

Hubschrauberlandeplätze - insbesondere Heliports von Krankenhäusern - sind aus sicherheitsrechtlicher Sicht besonders kritisch.

- Während der Betriebszeiten ist der Drohnenbetrieb verboten, sofern keine Betriebsbewilligung vorliegt
- Bei Krankenhaus-Heliports ist regelmäßig von einem 24-Stunden-Betrieb (H24) auszugehen
- Eine Aktivierung des Flugplans über dronespace.at bedeutet nicht, dass der Flug zulässig und der Heliport außer Betrieb ist.

Gerade in urbanen Räumen stellt dies einen der häufigsten Ausschlussgründe für OPEN-Einsätze dar.

Flugbeschränkungsgebiete (LO R)

Flugbeschränkungsgebiete wie:

- LO R 15 - Wien
- LO R 16 - Neusiedler See

Diese sind grundsätzlich bescheidpflichtig. Dies gilt unabhängig von Drohnenklasse, Betriebskategorie oder Einsatzzweck. Ein Betrieb ist nur mit ausdrücklicher Betriebsbewilligung zulässig. Insbesondere das Flugbeschränkungsgebiet Wien (LO R 15) ist ganzjährig (H24) aktiv und umfasst große Teile des urbanen Raums - mit erheblichen Auswirkungen auf die Einsatzplanung.

Ausnahme für Drohnen unter 250 g bis 30 m Flughöhe

Gemäß der nationalen Luftverkehrsregeln 2014 (LVR) zu Flugbeschränkungsgebieten gilt folgende enge Ausnahme: Flugbeschränkungsgebiete sind auf unbemannte Luftfahrzeuge nicht anzuwenden, wenn diese eine höchstzulässige Startmasse von weniger als 250 g haben und die maximale Flughöhe von 30 m über Grund nicht überschritten wird. Diese Ausnahme hebt keine anderen Verbote (z.B. Datenschutz, Heliports, Naturschutz) auf und gilt nicht während Betriebszeiten von Flugplätzen oder Heliports.

⁵ Das AIP (Aeronautical Information Publication) ist das offizielle Luftfahrthandbuch eines Staates und enthält dauerhaft geltende luftfahrtrelevante Informationen wie Luftraumstruktur, Flugplätze und Betriebsregelungen.

⁶ NOTAM (Notice to Air Missions) sind zeitlich befristete, verbindliche Luftfahrtmeldungen zu sicherheitsrelevanten Änderungen im Luftraum (z.B. temporäre Beschränkungen, geänderte Betriebszeiten oder besondere Aktivitäten).

Neuerungen durch die LVR-Novelle 2025 - Heliport-Radien

Mit 15. Mai 2025 wurde die LVR 2014 novelliert. Für unkontrollierte Heliports gilt nun:

- Reduktion des Drohnen-Bannkreises von 2,5 km auf 1,5 km Radius
- Gilt für die meisten, aber nicht alle Heliports
- Bei Flugfeldern können weiterhin größere Sicherheitsradien gelten

Der konkret einzuhaltende Sicherheitsradius ist daher standortabhängig und muss über:

- dronespace.at
- AIP
- NOTAMs oder
- den Flugplatzhalter

verifiziert werden.

Kernaussage für die Praxis

Geografische UAS-Gebiete sind einer der entscheidenden Faktoren für die rechtliche Zulässigkeit von Drohneneinsätzen in Österreich. Die korrekte Unterscheidung zwischen Freigabe, Betriebsbewilligung und absolutem Betriebsverbot ist essenziell, insbesondere in urbanen Räumen und im Umfeld von Flugplätzen und Heliports.

Insbesondere in urbanen Gebieten, wie etwa im Stadtgebiet von Wien, können im Rahmen der sicherheitsrelevanten Risikobewertung zusätzliche Stellen der Stadtverwaltung einzubinden sein. Dazu zählen beispielsweise zuständige Magistratsabteilungen wie die MA 46 - Verkehrsorganisation der Stadt Wien, wenn temporäre Verkehrsmaßnahmen oder Straßensperren erforderlich werden.

Dies führt regelmäßig zu zusätzlichem organisatorischem Aufwand, Abstimmungsbedarf sowie weiteren Kosten, die nicht Teil des luftfahrtbehördlichen Genehmigungsverfahrens sind, jedoch wesentlichen Einfluss auf Zeitplanung und Ressourcenbedarf eines Drohneneinsatzes haben können.

Praxis-Tipps für rechtssichere Drohneneinsätze in Österreich

1. Einsatz rechtlich vorab einordnen

Klären Sie bereits in der Planungsphase, ob der Einsatz in der OPEN- oder SPECIFIC-Kategorie liegt. In vielen praktischen Anwendungen (z.B. im urbanen Raum) ist eine Genehmigung erforderlich.

2. Geozonen konsequent prüfen

Überprüfen Sie vor jedem Einsatz die geografischen UAS-Gebiete (Geozonen). Diese sind häufig der entscheidende Faktor für die Zulässigkeit eines Fluges.

3. Dronespace aktiv nutzen

Nutzen Sie die Plattform dronespace.at für Registrierung, Flugplanung, Geozonenprüfung und Freigaben. Sie ist das zentrale Werkzeug für den Drohnenbetrieb in Österreich.

4. AIP und NOTAMs berücksichtigen

Prüfen Sie zusätzlich aktuelle luftfahrtrelevante Informationen (AIP und NOTAMs), insbesondere bei Einsätzen in Flugplatznähe oder bei temporären Einschränkungen.

5. Genehmigungen und Freigaben frühzeitig einholen

Planen Sie ausreichend Zeit für behördliche Genehmigungen und notwendige Abstimmungen (z.B. mit Flugsicherung oder lokalen Behörden) ein.

6. Rechtliche Mindestanforderungen sicherstellen

Achten Sie auf gültige Registrierung, erforderliche Kompetenznachweise sowie eine geeignete Luftfahrt-haftpflichtversicherung.

7. Einsatzspezifische Checklisten verwenden

Arbeiten Sie mit standardisierten Checklisten und prüfen Sie diese vor jedem Einsatz systematisch (z.B. Luftraum, Wetter, Umgebung, Notfallverfahren).

8. Rahmenbedingungen je Einsatz neu bewerten

Bewerten Sie jeden Einsatz individuell. Standort, Umgebung und Einsatzzweck können die rechtliche Einordnung maßgeblich beeinflussen.

1.1.3.3 Fazit für die Praxis

Der rechtssichere Einsatz von UAS in Österreich erfordert eine ganzheitliche Betrachtung von EU-Recht, nationaler Umsetzung, Datenschutz, Geozonen, Haftung und Versicherung. Während die OPEN-Kategorie einen niederschweligen Einstieg ermöglicht, bildet die SPECIFIC-Kategorie, gestützt auf die SORA-Methodik, den Standard für professionelle und behördliche Anwendungen. Eine frühzeitige rechtliche Einordnung und strukturierte Einsatzplanung sind entscheidend für einen sicheren und effizienten Drohneneinsatz.

1.1.4 Rechtliche Rahmenbedingungen für den Einsatz von UAS - Schweiz

Verfasser: Felix Piringer, Aylin Wörle

1.1.4.1 Einordnung und Zielsetzung

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge (UAS) in der Schweiz orientieren sich - wie auch in Deutschland - maßgeblich an den europäischen Vorgaben der EASA. Die grundlegenden Prinzipien, insbesondere der risikobasierte Ansatz mit den Kategorien OPEN, SPECIFIC und CERTIFIED, sind daher weitgehend identisch und werden im Kapitel zu Deutschland (1.2) ausführlich erläutert.

Dieser Beitrag konzentriert sich daher auf die spezifischen nationalen Ausprägungen, Besonderheiten und praktischen Herausforderungen des Drohnenbetriebs in der Schweiz. Ziel ist es, Anwender:innen - insbesondere im Bereich GIS, Vermessung und Umweltmonitoring - eine praxisnahe Orientierung zu geben, wo sich Unterschiede zur deutschen Situation ergeben und welche zusätzlichen Aspekte bei der Einsatzplanung zu berücksichtigen sind.

1.1.4.2 Umsetzung der EU-Regulierung in der Schweiz

Die Schweiz hat die europäischen Drohnenregelungen (insbesondere VO (EU) 2019/947 und 2019/945) weitgehend übernommen. Zuständig für die Umsetzung und den Vollzug ist das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL).

Wie schon in Kapitel zu Deutschland (1.2) beschrieben, erfolgt die Einordnung von Drohneneinsätzen anhand des Risikos in die Kategorien OPEN, SPECIFIC und CERTIFIED. Für GIS- und Vermessungsanwendungen ist - analog zu Deutschland und Österreich - die SPECIFIC-Kategorie der Regelfall, insbesondere bei:

- Flügen in komplexem Gelände,
- Einsätzen in besiedelten Gebieten,
- systematischen oder wiederkehrenden Befliegungen,
- BVLOS-Anwendungen.

1.1.4.3 Zentrale Rolle des BAZL und nationale Infrastruktur

Das BAZL stellt eine Reihe von digitalen Werkzeugen bereit, die für die Planung und Durchführung von Drohneneinsätzen essenziell sind. Besonders hervorzuheben ist die interaktive Karte der geografischen UAS-Gebiete, die eine zentrale Grundlage für die rechtliche Bewertung eines Einsatzortes bildet. Diese Karte enthält sowohl permanente Einschränkungen, etwa im Umfeld von Flughäfen oder sensiblen Infrastrukturen, als auch temporäre Flugbeschränkungen.

Im Vergleich zur Situation in Deutschland ist die Bereitstellung der Informationen zwar zentral organisiert, die praktische Nutzung erfordert jedoch ein erhöhtes Maß an Aufmerksamkeit, da die dargestellten Informationen teilweise kurzfristigen Änderungen unterliegen können.

1.1.4.4 Dynamische Luftraumbeschränkungen und operative Herausforderungen

Eine Besonderheit des Drohnenbetriebs in der Schweiz ist die hohe Dynamik von Luftraumbeschränkungen. Temporäre Flugverbotszonen können beispielsweise im Rahmen von Großveranstaltungen, sicherheitsrelevanten Lagen oder besonderen Ereignissen eingerichtet werden. Ein bekanntes Beispiel ist das jährlich stattfindende Weltwirtschaftsforum in Davos, während dessen großflächige Flugbeschränkungen gelten.

Für die Praxis bedeutet dies, dass eine einmalige Prüfung des Luftraums im Vorfeld eines Einsatzes nicht ausreicht. Vielmehr müssen aktuelle Informationen unmittelbar vor dem Flug eingeholt werden. Hierbei kommt insbesondere den Luftfahrtinformationssystemen NOTAM (Notice to Airmen) und DABS (Daily Airspace Bulletin Switzerland) eine zentrale Bedeutung zu. Diese enthalten kurzfristige Änderungen und müssen idealerweise wenige Stunden vor dem geplanten Einsatz überprüft werden.

Im Vergleich zu Deutschland ergibt sich daraus ein erhöhter operativer Aufwand, da sich Rahmenbedingungen kurzfristig ändern können und eine kontinuierliche Aktualisierung der Einsatzplanung erforderlich ist.

1.1.4.5 Nationale und lokale Sonderregelungen

Trotz der grundsätzlich einheitlichen Regulierung auf nationaler Ebene zeigt sich in der Schweiz eine weitere Besonderheit: In einzelnen Kantonen und Gemeinden existieren zusätzliche Regelungen oder administrative Anforderungen, die über die nationalen Vorgaben hinausgehen können.

Diese betreffen beispielsweise Meldepflichten gegenüber lokalen Behörden oder spezifische Einschränkungen in bestimmten Gebieten. Ein Beispiel ist der Kanton Waadt, in dem eine Information der Kantonspolizei erforderlich sein kann. Auch wenn das BAZL in den letzten Jahren viele dieser Regelungen harmonisiert und in die nationale Systematik integriert hat, bestehen weiterhin Einzelfälle, in denen zusätzliche Abstimmungen notwendig sind.

Für Anwender:innen bedeutet dies, dass selbst bei Einhaltung aller nationalen Vorgaben nicht in jedem Fall von vollständiger Rechtssicherheit ausgegangen werden kann. Eine sorgfältige Prüfung lokaler Gegebenheiten bleibt daher unerlässlich.

1.1.4.6 Geografische UAS-Gebiete und Freigabeverfahren

Wie im Kapitel zu Deutschland (1.2) dargestellt, spielen geografische UAS-Gebiete eine zentrale Rolle bei der rechtlichen Einordnung von Drohneneinsätzen. Auch in der Schweiz ist der Betrieb in bestimmten Bereichen eingeschränkt oder genehmigungspflichtig. Unterschiede ergeben sich jedoch in der praktischen Umsetzung und den zugrundeliegenden Prozessen.

Für Flüge in kontrollierten Lufträumen, insbesondere in der Nähe von Flughäfen, wird eine digitale Plattform zur Koordination genutzt, die unter dem Namen Swiss U-Space (ehemals SFO-Tool) bekannt ist. Über diese Plattform können Fluganfragen eingereicht und Freigaben koordiniert werden.

Obwohl der Begriff „U-Space“ verwendet wird, handelt es sich derzeit noch nicht um ein vollständig integriertes Verkehrsmanagementsystem. Vielmehr befindet sich die Entwicklung in einem Übergangsstadium, in dem digitale Prozesse zwar etabliert sind, jedoch noch nicht vollständig automatisiert oder standardisiert ablaufen.

1.1.4.7 SPECIFIC-Kategorie und SORA in der Schweiz

Die SPECIFIC-Kategorie stellt auch in der Schweiz den zentralen Rahmen für professionelle Drohneneinsätze dar. Für die erforderliche Risikobewertung wird - analog zu Deutschland - die Methodik der Specific Operations Risk Assessment (SORA) angewendet. Seit Oktober 2025 ist dabei die Version SORA 2.5 maßgeblich.

Eine Besonderheit in der Schweiz ist die Verwendung einer vom BAZL bereitgestellten Bodenrisikokarte, die als Grundlage für die Bewertung des Risikos am Boden dient. Diese Karte wird regelmäßig aktualisiert und ist integraler Bestandteil von SORA-Anträgen. Änderungen an dieser Grundlage können jedoch kurzfristig erfolgen, was in der Praxis zu Anpassungsbedarf in bestehenden Prozessen und digitalen Anwendungen führen kann.

Im Gegensatz zu anderen Ansätzen der SPECIFIC-Kategorie, wie etwa Standard-Szenarien oder PDRA, wird SORA in der Vermessungs- und GIS-Praxis deutlich häufiger eingesetzt, da sie eine höhere Flexibilität bei komplexen Anwendungsfällen bietet.

Darüber hinaus hat sich in der Schweiz eine kooperative Lösung innerhalb der Branche etabliert. Über den Verein „Drohnenbetrieb Geomatik Schweiz“ können Unternehmen auf eine gemeinsame SORA-Bewilligung zurückgreifen. Diese ermöglicht insbesondere kleineren Unternehmen einen vergleichsweise einfachen Zugang zu genehmigten Betriebsverfahren, ist jedoch in ihrer Flexibilität begrenzt und nicht für alle Anwendungsfälle geeignet.

1.1.4.8 Besondere betriebliche Herausforderungen in der Schweiz

Ein wesentlicher Unterschied zur Situation in Deutschland ergibt sich aus der Topografie der Schweiz. Große Teile des Landes sind durch hügelige bis alpine Landschaften geprägt, was direkte Auswirkungen auf die praktische Durchführung von Drohnenflügen hat.

Insbesondere die Einhaltung der maximal zulässigen Flughöhe von 120 Metern über Grund kann bei Flächenbefliegungen problematisch sein, da sich das Gelände innerhalb eines Einsatzgebietes stark verändern kann. Dies führt dazu, dass Einsätze schneller in die SPECIFIC-Kategorie fallen, als dies in vergleichsweise flachen Regionen der Fall wäre.

Während Multirotor-Drohnen durch ihre Fähigkeit, dem Gelände flexibel zu folgen, diese Herausforderung häufig kompensieren können, sind Flächendrohnen hiervon stärker betroffen. Die topografischen Gegebenheiten stellen somit einen wichtigen Faktor bei der Wahl des Systems und der rechtlichen Einordnung eines Einsatzes dar.

1.1.4.9 Remote ID und technische Anforderungen

Im Bereich der technischen Anforderungen zeigt sich ebenfalls eine weitgehende Angleichung an die europäischen Vorgaben. Remote ID ist in der Schweiz für Einsätze in der SPECIFIC-Kategorie verpflichtend und dient der digitalen Identifizierbarkeit von Drohnen während des Betriebs.

Auch für Teile der OPEN-Kategorie bestehen entsprechende Anforderungen, wobei Ausnahmen je nach Einsatzkontext möglich sind. Die Aktivierung erfolgt in der Regel über die Systemeinstellungen der Drohne und ist integraler Bestandteil eines regelkonformen Betriebs.

1.1.4.10 U-Space-Entwicklung und zukünftige Herausforderungen

Ein aktuelles Entwicklungsthema ist die Einführung von U-Space-Konzepten, insbesondere im Raum Zürich. Ziel dieser Systeme ist es, eine integrierte und digitale Koordination zwischen bemannter und unbemannter Luftfahrt zu ermöglichen. Dies umfasst unter anderem die Echtzeitkommunikation zwischen Luftfahrzeugen und Flugsicherung sowie die automatisierte Genehmigung von Flugmissionen.

In der praktischen Umsetzung bestehen derzeit jedoch noch erhebliche Herausforderungen. Aus der Praxis wird insbesondere auf einen hohen administrativen Aufwand sowie zusätzliche Kosten hingewiesen. Zudem wird die Frage diskutiert, inwieweit die geplanten Systeme tatsächlich zu einer Vereinfachung oder vielmehr zu einer zusätzlichen Komplexität im Drohnenbetrieb führen.

Die weitere Entwicklung bleibt daher abzuwarten und wird maßgeblich davon abhängen, inwieweit die Anforderungen der Praxis berücksichtigt werden.

1.1.4.11 Fazit für die Praxis

Die Schweiz bietet grundsätzlich einen modernen und EU-kompatiblen Rechtsrahmen für den Betrieb von UAS. Im Vergleich zu Deutschland ergeben sich jedoch mehrere praxisrelevante Besonderheiten:

- höhere Dynamik im Luftraum (temporäre Zonen, NOTAM/DABS)
- teilweise uneinheitliche lokale Regelungen
- starke Bedeutung der SPECIFIC-Kategorie
- topografisch bedingte Einschränkungen
- hohe Relevanz digitaler Tools und Plattformen

Für professionelle Anwendungen - insbesondere im GIS- und Vermessungskontext - bedeutet dies:

Eine erfolgreiche Einsatzplanung erfordert nicht nur die Kenntnis der europäischen Grundlagen, sondern insbesondere ein tiefes Verständnis der nationalen und lokalen Besonderheiten sowie eine kontinuierliche Aktualisierung der Einsatzparameter.

1.1.5 Grundlagen der optischen Datenerhebung

Verfasser: Till Sieberth

Die optische Datenerhebung stellt eine zentrale Anwendung moderner UAS-Flugeinsätze dar und ist damit für die moderne Vermessung in vielen Einsatzbereichen interessant. Unbemannte Luftfahrtsysteme ermöglichen die flächenhafte und hochauflösende Erfassung von Objekten und Oberflächen mithilfe passiver und aktiver optischer Sensoren. Zu den passiven Verfahren zählen solche, die keine eigene Beleuchtungs- und Strahlenquelle nutzen, sondern reflektierter Sonnenstrahlung oder die Eigenstrahlung von Objekten beobachten. Das sind insbesondere kamerabasierte Bildaufnahmen meist im sichtbaren und seltener im nahinfraroten Spektralbereich oder anderen Bereichen der nicht sichtbaren elektromagnetischen Strahlung, während aktive Verfahren wie LIDAR (Light Detection and Ranging) auf der Aussendung und Detektion elektromagnetischer Strahlung beruhen. Dabei sind aktive Verfahren durch die eigene Strahlungsquelle unabhängig vom Sonnenstand, können bei Dunkelheit Daten erfassen und sind auch nicht durch Schatten beeinflusst. Die Qualität der gewonnenen Daten hängt dabei wesentlich von den physikalischen Eigenschaften der elektromagnetischen Strahlung, den sensorischen Aufnahmeprinzipien sowie den verschiedenen Auflösungseigenschaften des Systems ab. Das Verständnis dieser Grundlagen ist entscheidend, um UAS-Daten sachgerecht zu planen, zu erfassen, auszuwerten und hinsichtlich ihrer Aussagekraft zu beurteilen.

1.1.5.1 Physikalische Prinzipien

Die optische Datenerhebung basiert auf der Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Objekten und Materialien. Elektromagnetische Strahlung breitet sich wellenförmig mit Lichtgeschwindigkeit aus und kann durch ihre Wellenlänge beziehungsweise Frequenz charakterisiert werden. Das elektromagnetische Spektrum umfasst einen sehr breiten Bereich, der von Gammastrahlung über Röntgenstrahlung, ultraviolette Strahlung, sichtbares Licht und Infrarotstrahlung bis hin zu Mikrowellen und Radiowellen reicht. Für vermessungstechnische UAS-Anwendungen sind vor allem der sichtbare Bereich des Lichts von etwa 400 bis 700 nm, das nahe Infrarot sowie bei aktiven Sensoren bestimmte Laserwellenlängen im nahen Infrarot relevant (vgl. Kap 1.8). Seltenerere Anwendungen nutzen auch andere Wellenlängenbereiche wie zum Beispiel im Thermalen Infraroten von 3 bis 14 µm.

Die spektrale Zusammensetzung elektromagnetischer Strahlung beeinflusst maßgeblich, welche Informationen über Oberflächen gewonnen werden können. Unterschiedliche Materialien reflektieren, absorbieren oder transmittieren Strahlung in charakteristischer Weise. Dadurch entstehen materialspezifische spektrale Signaturen, die beispielsweise zur Unterscheidung von Vegetation, Boden, Wasser oder bebauten Flächen genutzt werden können. Vegetation zeigt etwa im nahinfraroten Bereich typischerweise eine hohe Reflexion, während Wasser dort meist stark absorbiert.

Für die optische Datenerhebung sind insbesondere die Prozesse Reflexion, Brechung, Streuung und Absorption von Bedeutung. Reflexion beschreibt die Rückstrahlung einfallender elektromagnetischer Strahlung von einer Oberfläche. Dabei kann grundsätzlich zwischen spiegelnder und diffuser Reflexion unterschieden werden. Spiegelnde Reflexion tritt vor allem an glatten Oberflächen auf, bei denen der Ausfallswinkel der reflektierten Strahlung dem Einfallswinkel entspricht. Diffuse Reflexion entsteht an rauen Oberflächen, bei denen die Strahlung in viele Richtungen unterschiedlich stark reflektiert wird. Für photogrammetrische Anwendungen ist diffuse Reflexion meist vorteilhaft, da sie die Objektbeobachtung aus unterschiedlichen Blickrichtungen ermöglicht.

Die Brechung bezeichnet die Richtungsänderung einer Welle beim Übergang zwischen Medien unterschiedlicher optischer Dichte, etwa von Luft zu Glas. Dieser Effekt ist für die Abbildung in optischen Systemen grundlegend, da Linsen durch gezielte Brechung eine Fokussierung der Strahlung auf den Bildsensor ermöglichen. Brechung kann jedoch auch zu systematischen Verzeichnungen führen, die in präzisen Messprozessen berücksichtigt werden müssen.

Streuung tritt auf, wenn elektromagnetische Strahlung an Partikeln oder Inhomogenitäten in einem Medium abgelenkt wird. In der Atmosphäre beeinflussen Moleküle, Aerosole und Wassertröpfchen die Ausbreitung des Lichts. Solche Effekte können die Bildqualität mindern, Kontraste reduzieren und die radiometrische Information verändern. Die atmosphärische Streuung ist insbesondere bei größeren Aufnahmeentfernungen oder ungünstigen Wetter- und Luftbedingungen relevant, kann aber auch bei kurzen Aufnahmeentfernungen oder Schrägaufnahmen Auswirkungen haben, wie zum Beispiel Nebel.

Absorption beschreibt die Aufnahme elektromagnetischer Energie durch Materie, wobei ein Teil der Strahlung in andere Energieformen, beispielsweise Wärme, umgewandelt wird. Auch dieser Prozess ist materialspezifisch und beeinflusst sowohl passive als auch aktive Sensorsysteme.

Eine besondere Rolle in der UAS-Vermessung spielt Laserlicht (vgl. Kap 1.8). Im Unterschied zu natürlichem Licht ist Laserstrahlung weitgehend monochromatisch, kohärent und stark gebündelt. Diese Eigenschaften ermöglichen eine sehr gezielte Aussendung elektromagnetischer Energie und damit präzise Distanzmessungen. Auf diesem Prinzip basiert Light Detection and Ranging (LIDAR). Bei LIDAR-Systemen werden Laufzeitverfahren sowie Phasenvergleichsverfahren angewendet, um die Entfernung zum Objekt zu bestimmen. Durch Kombination mit der Position und Orientierung des Sensors lassen sich dreidimensionale Punktwolken erzeugen.

LIDAR gehört damit zu den aktiven Sensoren, da die Energiequelle vom Sensor selbst bereitgestellt wird. Im Gegensatz zu passiven Kamerasystemen ist LIDAR nicht auf Sonnenlicht angewiesen und erlaubt die direkte Erfassung von 3D-Geometrien. Abhängig von Wellenlänge, Pulsdichte, Strahldivergenz und Objektbeschaffenheit können unterschiedliche Rückstreuersignale entstehen. Gerade in der Vermessung von Vegetation, Geländestrukturen und Bauwerken hat sich LIDAR aufgrund seiner hohen geometrischen Aussagekraft als wichtiges Verfahren etabliert.

1.1.5.2 Bildaufnahme und -verarbeitung

Die kamerabasierte optische Datenerhebung beruht auf dem Prinzip der Zentralprojektion. Dabei wird jedem Objektpunkt im Raum ein Bildpunkt auf der Bildebene zugeordnet, indem die von diesem Punkt ausgehende Strahlung durch das optische System der Kamera auf die Bildebene gelenkt wird. Der grundlegende Strahlengang in der Fotografie beginnt mit dem von einem Objekt reflektierten Licht, das durch das Objektiv in die Kamera eintritt. Die Linsen bündeln und brechen die einfallenden Strahlen so, dass auf der Sensorebene ein scharfes Bild entsteht. Die Lage des Bildpunkts hängt von der Geometrie des optischen Systems, insbesondere von der Kamerakonstante, sowie von der Position des Objektpunkts relativ zur Kamera ab.

Zusätzlich beeinflussen Blende und Verschluss die Aufnahme. Die Blende reguliert die Menge des einfallenden Lichts und beeinflusst zugleich Schärfentiefe und Abbildungsqualität. Der Verschluss bestimmt die Belichtungszeit, also die Dauer, in der der Sensor Licht empfängt. Für UAS-Anwendungen müssen diese Parameter so abgestimmt werden, dass trotz Bewegung des Fluggeräts ausreichend belichtete und scharfe Bilder entstehen.

In modernen UAS-Kameras kommen überwiegend CMOS-Sensoren (Complementary Metal Oxide Semiconductor) zum Einsatz. Ein CMOS-Sensor besteht aus einer Vielzahl lichtempfindlicher Sensorelemente, den Pixeln. Jedes Pixel enthält photodiodenbasierte Strukturen, die eintreffende Photonen in elektrische Ladung umwandeln. Die Menge der erzeugten Ladung ist näherungsweise proportional zur Lichtintensität während der Belichtungszeit. Nach Abschluss der Belichtung wird die Ladung elektronisch ausgelesen und weiterverarbeitet.

CMOS-Sensoren zeichnen sich durch einen geringen Energieverbrauch, hohe Integrationsdichte und schnelle Auslesegeschwindigkeit aus. Diese Eigenschaften sind insbesondere für UAS-Systeme relevant, da dort kompakte Bauweise, geringes Gewicht und hohe Bildraten von Vorteil sind. Gleichzeitig können sensorbedingte Effekte wie Rauschen, Rolling-Shutter-Verzerrungen oder begrenzter Dynamikumfang die Datenqualität beeinflussen und müssen je nach Anwendung berücksichtigt werden.

Da die von den Pixeln erzeugten Signale zunächst analog vorliegen, ist für die digitale Verarbeitung eine Analog-Digital-Wandlung erforderlich. Hierbei wird das kontinuierliche elektrische Signal in diskrete numerische Werte überführt. Dieser Prozess umfasst zum einen die zeitliche und räumliche Abtastung, zum anderen die Quantisierung der Signalwerte. Das Ergebnis ist ein digitaler Intensitätswert pro Pixel, der angibt, wie stark das jeweilige Sensorelement belichtet wurde. Die Anzahl möglicher Helligkeitsstufen wird durch die Bit-Tiefe bestimmt. Ein 8-Bit-System kann beispielsweise 256 (2^8) Helligkeitswerte pro Kanal darstellen, während 12-Bit- oder 14-Bit-Systeme deutlich feinere Abstufungen ermöglichen.

Da ein einzelnes Sensorelement zunächst nur die Intensität eines bestimmten spektralen Bereichs misst, ist für die Farbbildgebung eine spektrale Trennung erforderlich. Bei vielen Kameras erfolgt dies über einen Farbfilter, häufig in Form des Bayer-Patterns, bei dem einzelne Pixel jeweils nur rotes, grünes oder blaues Licht erfassen. Aus den Intensitätswerten benachbarter Pixel wird anschließend rechnerisch ein vollständiger Farbwert für jedes Bildpixel interpoliert. Dieser Prozess wird als Demosaicing bezeichnet. Alternativ können multispektrale oder spezielle Sensorsysteme separate spektrale Kanäle direkt erfassen.

Die Speicherung der Bilddaten erfolgt in Form digitaler Rasterdaten, bei denen jedem Pixel ein oder mehrere Intensitätswerte zugeordnet sind. Diese Werte können als Rohdaten oder bereits verarbeitet in Bildformaten abgelegt werden. Für photogrammetrische Auswertungen sind neben den reinen Bildinformationen oft auch Metadaten wie Kameraparameter, Zeitstempel, Position und Orientierung des Sensors nützlich, um die folgende Ausgleichung zu unterstützen.

1.1.5.3 Auflösungstypen (räumlich, spektral, radiometrisch, zeitlich)

Die Aussagekraft optischer UAS-Daten wird wesentlich durch verschiedene Auflösungseigenschaften bestimmt. In der Photogrammetrie wird zwischen der geometrischen, spektralen, radiometrischen und zeitlichen Auflösung unterschieden. Diese Auflösungstypen beschreiben unterschiedliche Aspekte der Erfassungssysteme und müssen stets gemeinsam betrachtet werden.

Die geometrische Auflösung beschreibt die Fähigkeit eines Systems, räumlich getrennte Strukturen auch getrennt abzubilden. Im UAS-Kontext wird sie häufig durch die Bodenauflösung beziehungsweise die Ground Sampling Distance (GSD) charakterisiert. Die GSD gibt an, welcher Bereich auf der Erdoberfläche einem Pixel im Bild entspricht. Eine kleine GSD bedeutet grundsätzlich eine feinere räumliche Abtastung. Allerdings ist die Pixelgröße allein nicht ausreichend, um die tatsächliche geometrische Leistungsfähigkeit eines Systems zu beschreiben.

Neben der GSD ist aber auch das Auflösungsvermögen optischer Systeme zu berücksichtigen. Zur Beschreibung wird häufig auf Linienpaare zurückgegriffen. Ein Linienpaar besteht aus einer dunklen und einer hellen Linie gleicher Breite. Die Anzahl unterscheidbarer Linienpaare pro Millimeter ist ein klassisches Maß für das räumliche Auflösungsvermögen eines optischen Systems. Zum Testen des Auflösungsvermögens wird daher ein Siemensstern genutzt, bei dem der Durchmesser des nicht mehr aufgelösten Kreises die Berechnung des Auflösungsvermögens erlaubt.

Eng mit diesem Konzept verknüpft ist die Modulation Transfer Function (MTF). Die MTF beschreibt, wie gut ein System Kontraste unterschiedlicher räumlicher Frequenzen übertragen kann. Während grobe Strukturen meist mit hohem Kontrast wiedergegeben werden, nimmt die Kontrastübertragung bei feineren Strukturen ab. Die MTF erlaubt somit eine differenzierte Beurteilung der Bildschärfe und Abbildungsleistung eines Gesamtsystems aus Optik, Sensor und Signalverarbeitung. Für die Vermessung ist dies besonders wichtig, da nicht allein die Sichtbarkeit eines Objekts zählt, sondern die präzise Bestimmbarkeit seiner Lage.

Die spektrale Auflösung beschreibt, in welchen, wie viele und wie schmale Wellenlängenbereiche ein Sensor die einfallende Elektromagnetische Strahlung unterteilen kann. Ein herkömmlicher RGB-Sensor erfasst nur drei relativ breite Spektralkanäle im roten, grünen und blauen Wellenlängenbereich. Multispektrale und hyperspektrale Sensoren unterteilen das Spektrum in zusätzliche beziehungsweise sehr viele schmale Bänder. Eine höhere spektrale Auflösung erlaubt eine differenziertere Analyse von Materialeigenschaften und Oberflächenzuständen. In der Vermessung kann dies beispielsweise bei der Unterscheidung von Vegetation, Feuchteverhältnissen oder Materialarten relevant sein.

Die radiometrische Auflösung gibt an, wie fein ein Sensor Unterschiede in der Intensität der erfassten Strahlung unterscheiden kann. Sie wird im Wesentlichen durch die Bit-Tiefe der Analog-Digital-Wandlung bestimmt. Ein Sensor mit höherer radiometrischer Auflösung kann feinere Helligkeitsunterschiede erfassen und besitzt typischerweise einen größeren Dynamikumfang. Dies ist besonders bei Szenen mit stark unterschiedlichen Helligkeiten von Bedeutung.

Die zeitliche Auflösung beschreibt, in welchen zeitlichen Abständen Daten erfasst werden können. Bei UAS-Systemen sind hohe zeitliche Auflösungen möglich, die es ermöglichen, die Beobachtung zeitlicher Veränderungen, etwa bei Baustellen, Erosionsprozessen, Vegetationsentwicklung oder Deformationsmessungen durchzuführen. In dynamischen Szenarien ist sie ein entscheidender Faktor für die Aussagekraft der Datenerhebung.

Für die praktische UAS-Vermessung ist zu beachten, dass diese Auflösungstypen nicht unabhängig voneinander optimiert werden können. Die Auswahl eines geeigneten Sensorsystems muss daher stets anwendungsbezogen erfolgen und die jeweiligen Anforderungen an Genauigkeit, Klassifizierbarkeit, Datenvolumen und Wiederholfrequenz berücksichtigen.

1.1.6 Gängige Lage- und Höhenreferenzsysteme

Verfasser: Markus Gerke

Das Verständnis der verwendeten Koordinatenreferenzrahmen, Kartenprojektionen und Höhensysteme ist eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Projektbearbeitung. Einen guten Überblick über die Systeme und die mathematischen Zusammenhänge geben Donaubauer und Kolbe (2016) sowie Heunecke (2017).

In der Praxis unterhalten Vermessungsbehörden und globale Institutionen erdgebundene Koordinatenreferenzrahmen, die sicherstellen, dass beispielsweise die von GNSS abgeleiteten geografischen Koordinaten im Laufe der Zeit stets auf denselben Punkt der Erdoberfläche bezogen sind. Um Plattentektonik und andere Veränderungen der festen Erde im Laufe der Zeit zu berücksichtigen, gibt es das Internationale Terrestrische Referenzsystem (ITRS), das hochgenaue Referenzrahmen bereitstellt, die auch für die geophysikalische Forschung wichtig sind. Die Realisierung eines ITRS erfolgt durch die Anlage von weltweit verteilten Bezugspunkten auf der Erdoberfläche. Diese Punkte, die beispielsweise mittels Raumverfahren abgeleitet werden, bilden den sog. Referenzrahmen (ITRF: International Terrestrial Reference Frame) und verändern sich über die Zeit. Da Bewegungsraten abgeleitet werden, können Koordinaten aus einzelnen Epochen in andere Epochen transformiert werden. Die europäischen Bezugspunkte bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von ca. 25 mm/Jahr Richtung Nordosten. Bei absoluten GNSS-Messungen (die sich auf ITRF beziehen) muss das berücksichtigt werden. Die Transformation zwischen den Systemen ist möglich, indem Transformationsparameter verwendet werden, die beispielsweise von den nationalen Vermessungsbehörden bereitgestellt werden. Amtlich bereitgestellte GNSS-Korrekturdienste wenden die jeweils aktuellen Parameter aber direkt an.

In Europa wurde das ETRS89 (Europäisches Terrestrisches Referenzsystem, Version 1989) definiert, indem es aus dem ITRS zum Zeitpunkt 1989.0 abgeleitet wurde. Über festgelegte Transformationsparameter lässt sich das ETRS89 in das durch GNSS genutzte WGS84 (World Geodetic System 1984) überführen.

Das Geodätische Datum wird generell über die Parameter des Rotationsellipsoids und dessen Lagerung in der festen Erde bestimmt. Die Ellipsoidparameter werden im GRS80 (Geodetic Reference System 1980) definiert. Historisch ist also die Definition des Bessel-Ellipsoids/DHDN (Deutsches Hauptdreiecksnetz) durch GRS80/ETRS89 abgelöst worden. Zusammen mit der Umstellung von der Gauß-Krüger-Abbildung auf UTM, s.u., wurde im Jahr 2017 auch amtlich die Modernisierung der Referenzsysteme endgültig in ganz Deutschland vollzogen (Donaubauer und Kolbe, 2016).

Kartenprojektionen stellen sicher, dass die Abbildung der ellipsoidischen Erdoberfläche in einen zweidimensionalen ebenen Kartenrahmen unter Verwendung eines genau definierten mathematischen Modells erfolgen kann. Hier wird die universelle transversale Mercator-Projektion (UTM) als Standard verwendet. Der zentrale Meridian und die UTM-Zone müssen angegeben werden, um sicherzustellen, dass sich Koordinaten aus verschiedenen Quellen auf denselben Punkt des zugrunde liegenden Ellipsoids beziehen. Bei der praktischen Arbeit ist u.a. eine Maßstabskorrektur zu berücksichtigen. Für weitere praktische Aspekte wird auf Donaubauer und Kolbe (2016) und Heunecke (2017) verwiesen.

In Bezug auf das Höhensystem ist ein etwas anderer Ansatz erforderlich, da Höhen an das (lokale) Gravitationsfeld gebunden sind, aber auch im ellipsoidischen System gegeben sein können. In der Praxis hat jedes Land ein eigenes System für hochgenaue, geophysikalische und technische Anwendungen. In Deutschland ist beispielsweise das Höhensystem DHHN 2016 die neueste eines physikalisch definierten Höhennetzes. In der Praxis ist insbesondere bei der Nutzung von GNSS zu beachten, dass sich daraus abgeleitete Höhen stets auf das Rotationsellipsoid und die jeweils geltende ITRF-Festlegung beziehen. Mittels eines passenden Geoidmodells können diese in DHHN 2016 transformiert werden. Es ist jedoch auch zu beachten, dass präzise physikalische Höhendifferenzen nur mittels terrestrischer Verfahren wie Nivellement oder Tachymetrie zu erfassen sind.

Aus den genannten Gründen ist es wichtig, Informationen über den verwendeten Referenzrahmen, das Datum, die verwendete Kartenprojektion und das tatsächliche Höhensystem zu haben, um sicherzustellen, dass sich Koordinaten, die aus verschiedenen Verarbeitungsschritten und Quelldaten abgeleitet wurden, auf denselben Punkt beziehen.

Um die Arbeit mit den Lage- und Höhensystemen zu erleichtern, hat die „European Petroleum Survey Group Geodesy“ (EPSG) ein Kodierungsschema definiert, in dem eindeutige Codes für verschiedene Realisierungen von Koordinatensystemdefinitionen weltweit bereitgestellt werden. Da alle gängigen Geodaten-Softwareprogramme diese Codes verarbeiten können, ist eine Transformation zwischen verschiedenen Quellen in der Regel unkompliziert möglich. Beispielsweise steht der EPSG-Code 32632 für das System WGS84 in der Kartenprojektion UTM in Zone 32. Da die führende Zonennummer im „Easting“-Wert häufig nicht angegeben

wird, ist es essenziell, dass das Abbildungssystem bekannt ist. Der EPSG-Code für DHHN2016 lautet 7837. Über <https://epsg.io> können Code-Definitionen abgerufen und Lagekoordinaten zwischen Systemen transformiert werden.

In einer praktischen Drohnenanwendung wird in der Regel die äußere Orientierung, meist nur die Lageparameter der Kamera, in WGS84 (geografischen Koordinaten) gespeichert; die Höhe wird mit Bezug zum Ellipsoid angegeben. Das Ziel-Koordinatensystem und jenes der Pass- und Kontrollpunkte werden hingegen häufig in WGS84/UTM und DHHN2016 gegeben sein. In den Einstellungen der Software sollte dies definiert sein, damit auch die als Näherungswerte dienenden GNSS-Positionen korrekt genutzt werden können. Erfahrungsgemäß ist aber bei manchen Drohnensystemen ein (unbekannter) systematischer Höhengsprung zu beobachten, dieser kann in der Regel durch Angabe eines Korrekturwertes berücksichtigt werden.

Literatur

- Donaubauer, A. und Kolbe, T.H. (Herausg.) (2016): Bezugssystemwechsel auf ETRS89/UTM - Grundlagen, Erfahrungen und Empfehlungen. Runder Tisch GIS
- Heunecke, O. (2017): Der Bezugssystemwechsel im amtlichen Vermessungswesen und seine Folgen bei der Nutzung von Lage- und Höhenkoordinaten für Bauvorhaben. Bauingenieur 92(6):370-376. DOI: <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2017-09-54>

1.1.7 Grundlagen der photogrammetrischen Prozesskette

Verfasser: Till Sieberth

Die photogrammetrische Prozesskette beschreibt die aufeinander aufbauenden Schritte, mit denen aus zwei-dimensionalen Bildaufnahmen 3D-Objektpunkte abgeleitet werden. Der wesentliche Vorteil der Photogrammetrie liegt darin, dass aus einer Vielzahl überlappender Aufnahmen sowohl dreidimensionale Punktwolken als auch Farbinformation gewonnen werden können. Voraussetzung hierfür sind eine geeignete Bildaufnahme, ausreichende Überlappung sowie entsprechende Software für die Auswertung. Die photogrammetrische Prozesskette führt damit von einzelnen Bildern über Punktwolken und Oberflächenmodelle bis hin zu kartierbaren Endprodukten wie Orthophotos oder texturierten 3D-Modellen.

1.1.7.1 Sensorgeoreferenzierung

Verfasser: Michael Cramer

Die Georeferenzierung der durch UAS erfassten Messdaten bildet den entscheidenden Schritt der photogrammetrischen Prozesskette. Um den Bezug vom sensorspezifischen Koordinatensystem zum übergeordneten Objektkoordinatensystem herzustellen, sind zusätzliche Referenzdaten erforderlich. Bei bildgebenden Sensoren dienen hierzu im Regelfall Bodenpasspunkte in ausreichender Anzahl; bei LIDAR-Anwendungen kommen häufig 3D-Referenzflächen zum Einsatz. Diese Informationen gewährleisten nicht nur den korrekten Übergang in das Objektraumkoordinatensystem (z.B. nach UTM), sondern sichern auch die Genauigkeit der Auswertung.

Dabei werden heute drei methodische Ansätze unterschieden (Abb. 1.1.7.1 - 1). Bei der indirekten Georeferenzierung (Abb. 1.1.7.1 - 1, links) ergibt sich die Sensororientierung erst nachträglich durch eine mathematische Optimierung (Bündelblockausgleichung) basierend auf den Passinformationen im Objektraum.

Bei der direkten Georeferenzierung (Abb. 1.1.7.1 - 1, Mitte) wird die vollständige Sensortrajektorie bereits während des Fluges mittels GNSS- und Inertialsensorik (IMU) erfasst. Dies erlaubt einen unmittelbaren Bezug zwischen Sensor- und Objektkoordinaten. Voraussetzung sind eine hochgenaue Trajektorie sowie eine exakte Gesamtsystemkalibrierung. Letztere umfasst sowohl die räumlich-zeitliche Zuordnung der Sensoren zueinander (Boresight-Alignment und Lever-Arm) als auch die individuelle Kalibrierung der Einzelkomponenten (z.B. der Kamera). Diese Gesamtsystemkalibrierung ist entscheidend für die spätere Genauigkeit und Zuverlässigkeit.

Da moderne UAS-Plattformen meist über integrierte GNSS-Empfänger (z. T. auch mit Inertialmesseinheit) verfügen, hat sich der hybride Ansatz der integrierten Sensororientierung (Abb. 1.1.7.1 - 1, rechts) in der Praxis etabliert. Hierbei werden entweder nur die direkt gemessenen Koordinaten der Projektionszentren aus GNSS oder aber die vollständige äußere Orientierung, sofern ein GNSS/Inertial-System mit der Kamera kombiniert ist, gemeinsam mit einer reduzierten Anzahl an Bodenpasspunkten als gewichtete Beobachtungen in einer gemeinsamen Bündelausgleichung verarbeitet (Triggs et al. 2000).

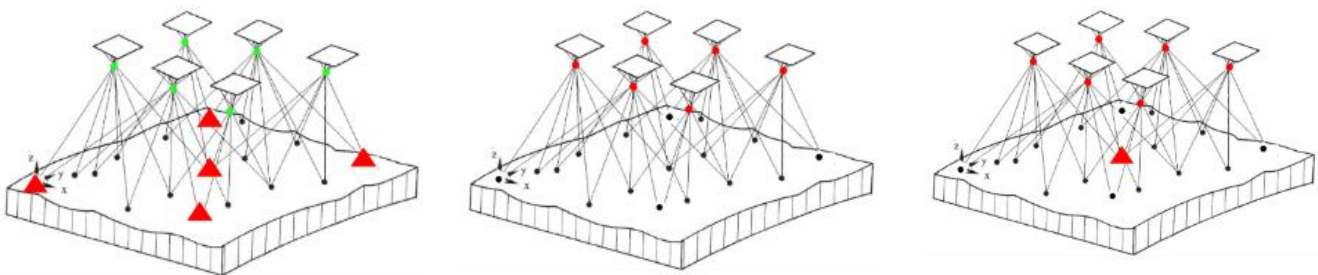


Abbildung 1.1.7.1 - 1: Verschiedene Methoden der Sensororientierung (links: indirekt, Mitte: direkt, rechts: integriert). Rot gekennzeichnet sind die (gemessenen) Passinformationen (Passpunkte (Δ) bzw. Elemente der äußeren Orientierung für jedes Bild ($\circ$) aus GNSS bzw. GNSS/Inertial-Systemen). Grün gekennzeichnet sind die unbekannten Elemente der äußeren Orientierung im Fall der indirekten Georefe-

renzierung. Die schwarzen Punkte stehen für die zu bestimmenden Neupunkte im Objektraum (sog. Verknüpfungspunkte).

Mathematische Modellierung

Die Abbildung 1.1.7.1 - 2 und die Formeln (1) - (3) zeigen das fundamentale Gerüst für die Georeferenzierung, hier angegeben für den Fall einer Kamera. Prinzipiell sind die Formeln auch auf andere Sensoren wie z.B. LIDAR-Systeme übertragbar. Dazu muss die angegebene Gleichung 4 durch eine entsprechende sensor-spezifische Abbildungsgleichung ersetzt werden (siehe dazu auch Abschnitt 1.1.8). Die Basis bildet die zentralperspektivische Abbildung (Gleichung 1), aus der die Kollinearitätsgleichung (Gleichung 4) abgeleitet wird. Sofern keine weiteren Sensordaten in den Auswerteprozess einfließen, ist dieser Ansatz für die Georeferenzierung ausreichend.

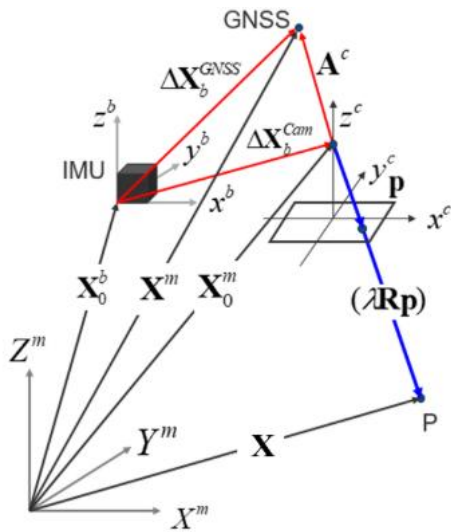


Abbildung 1.1.7.1 - 2: Räumlicher Bezug zwischen den unterschiedlichen Sensoren auf dem UAS (hier am Beispiel einer Kamera). Dargestellt ist der Fall, dass die Kamera um GNSS/Inertial-Komponenten für die direkte Messung der Sensortrajektorie erweitert wird.

$$X = X_0^m + \lambda \cdot R_c^m(\omega, \phi, \kappa) \cdot x^c \quad (1)$$

$$X^m = X_0^m + R_c^m(\omega, \phi, \kappa) \cdot A^c + S^m \quad (2)$$

$$R_b^m(\phi, \theta, \psi) = R_c^m(\omega, \phi, \kappa) \cdot R_b^c(\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa) \quad (3)$$

$$x^c = x_0 - c \cdot \frac{r_{11}(X - X_0^m) + r_{12}(Y - Y_0^m) + r_{13}(Z - Z_0^m)}{r_{31}(X - X_0^m) + r_{32}(Y - Y_0^m) + r_{33}(Z - Z_0^m)} + \Delta x \quad (4a)$$

$$y^c = y_0 - c \cdot \frac{r_{21}(X - X_0^m) + r_{22}(Y - Y_0^m) + r_{23}(Z - Z_0^m)}{r_{31}(X - X_0^m) + r_{32}(Y - Y_0^m) + r_{33}(Z - Z_0^m)} + \Delta y \quad (4b)$$

Die äußere Orientierung definiert dabei die Position des Projektionszentrums X_0^m so wie die Rotation $R_c^m(\omega, \phi, \kappa)$ zwischen Bild- und Objektkoordinatensystem. Der Vektor x^c beschreibt die Bildkoordinaten der Punktmessungen, die unter Berücksichtigung der inneren Orientierung aus den Pixelkoordinaten abgeleitet werden.

Sobald direkt gemessene Positionen und Winkel aus GNSS- bzw. GNSS/Inertial-Daten berücksichtigt werden, muss das Modell um die Gleichungen (2) und (3) erweitert werden. Gleichung (2) berücksichtigt dabei direkt gemessene Projektionszentrumskoordinaten. Gleichung (3) ist notwendig, um direkt gemessene Orientie-

rungswinkel in die integrierte Sensororientierung einzubeziehen. Da sich diese Messungen nicht direkt auf das Bildkoordinatensystem der Kamera beziehen, müssen räumliche Exzentrizitäten und Orientierungsunterschiede korrigiert werden:

- Translation (lever arm): Der räumliche Offset $\mathbf{A}^c$ zwischen dem Kameraprojektionszentrum und dem Phasenzentrum der GNSS-Antenne.
- Rotation (boresight misalignment): Die Einbauwinkel $\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa$ zwischen der Inertialmesseinheit (IMU) und der Kamera. Während die Translationen oft baulich bekannt sind, müssen die Winkel durch Kalibrierung bestimmt werden.

Gleichung (2) berücksichtigt zudem einen Korrekturterm $\mathbf{S}^m$, der systematische Offsets zwischen der GNSS-Trajektorie und den Kameraprojektionszentren kompensiert. Solche, meist für den gesamten Bildverband konstanten Offsets lassen sich nicht immer endgültig klären. Sie können in der GNSS-Trajektorie liegen, aber auch in Fehlern bei Koordinatentransformationen oder ungenaue Datumsübergänge. Durch Korrelationen sind solche Offsets oft auch mit Ungenauigkeiten in der Sensorkalibrierung (hier Kamera) verknüpft.

GNSS/Inertial-Systeme liefern neben Positionsinformationen auch die Ausrichtung der Plattform. Die Winkel beziehen sich dabei zunächst auf die Ausrichtung der internen Sensoren in der Inertialmesseinheit. Im Wesentlichen ist dies die Ausrichtung der Kreisel, die das sog. inertielle Körperkoordinatensystem (sog. body-frame) definieren. Die gemessenen Orientierungswinkel sind Bestandteil der Rotationsmatrix zwischen Body- und Objektkoordinatensystem $\mathbf{R}_b^m(\phi, \theta, \psi)$. Voraussetzung ist hierbei, dass die inertialen Navigationswinkel bereits in ein zum Zielkoordinatensystem konformes Format überführt wurden.

Um diese Orientierungswinkel auf die Kamera zu übertragen, ist die genaue Kenntnis der Einbauwinkel $\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa$ zwischen IMU und Kamerakoordinatensystem zwingend erforderlich. Diese ergeben sich aus der Kalibrierung. Solange die Sensoreinheit starr verbunden ist, bleiben diese Winkel als Kalibrierkonstanten stabil.

Kamerakalibrierung

Gemäß DIN 18716 ist die Kalibrierung die „quantitative Bestimmung von systematischen und reproduzierbaren Eigenschaften eines Sensors anhand referenzierter Normale“. Im photogrammetrischen Kontext fokussiert dies primär auf die innere Orientierung einer Kamera bzw. eines Gesamtsystems. Nach Brown (1971) umfasst die (geometrische) Kalibrierung der Kamera die Bestimmung der kalibrierten Brennweite (Kamerakonstante), die Lage des Hauptpunktes, den Symmetriepunkt, die räumliche Auflösung der Linse, den Ebenheitsgrad der Brennebene und die Linsenverzeichnung, die auf die jeweilige Kamerakonstante bezogen ist.

Das Ziel ist es, den realen Abbildungsvorgang so präzise wie möglich zu beschreiben und Abweichungen vom idealen zentralperspektivischen Modell zu minimieren. Da reale Lichtstrahlen das Objektiv nicht perfekt geradlinig passieren, wird das mathematische Modell um Korrekturfaktoren $\Delta x, \Delta y$ erweitert (siehe Gleichung 4). Neben dieser geometrischen Komponente existiert die radiometrische Kalibrierung, die vor allem in der Fernerkundung mittels Referenzlichtquellen im Labor erfolgt, um die spektrale Genauigkeit sicherzustellen.

Bei großformatigen Luftbildkameras ist die herstellereitige Kalibrierung üblich. Sie setzt jedoch ein mechanisch hochstabiles Kamerasystem voraus. Für die meisten UAS-Kameras ist dies aufgrund ihrer Bauweise und Materialeigenschaften nicht übertragbar. Hier ist die Selbstkalibrierung (In-situ-Kalibrierung) der einzige verlässliche Weg: Die Kalibrierparameter werden dabei simultan mit der Objektrekonstruktion direkt aus den Projektfotos berechnet.

Mathematisch werden bei der Selbstkalibrierung die Kalibrierterme als zusätzliche unbekannte Parameter $\Delta x, \Delta y$ in das Modell der zentralperspektivischen Abbildung integriert. Die Abweichungen werden verursacht durch Fehler des Objektivs (Verzeichnungen vor allem in radialer, geringer auch in tangentialer Richtung), Sensor-Unebenheiten und Fehler in der inneren Orientierung. Atmosphärische Refraktion und Erdkrümmungseffekte sind für UAS-Anwendungen im Regelfall vernachlässigbar und beziehen sich eigentlich nicht auf die Kamerageometrie. Alle diese Abweichungen sind additiv und äußern sich damit in Verschiebungen des idealen Bildpunktes zum gemessenen Bildpunkt.

Für die Kalibrierung von UAS-Kameras werden im Regelfall derartige physikalisch motivierte Zusatzparameter angenommen. Die Korrekturen werden also auf die zuvor genannten physikalischen Ursachen, also Fehler der realen Abbildung zurückgeführt. (siehe Brown 1971, Fraser 1997)

In Ergänzung zu den bisher beschriebenen physikalisch motivierten Korrekturmodellen gibt es rein mathematisch motivierte Korrekturen. Diese sind in der Lage, beliebige Bildsystematiken und damit sämtliche Restfehler zu erfassen. Die Frage nach der physikalischen Ursache der Fehler spielt dabei keine Rolle. In diesem Zusammenhang sind vor allem orthogonale Polynome (Ebner (1976), Grün (1978), Tang (2013)) zu nennen. Eine Kombination von physikalischen und mathematischen Korrekturen ist in einigen Softwarepaketen zur Auswertung von UAS-Bildern implementiert.

In-situ Kalibrierverfahren (Selbstkalibrierungen) haben sich heute als Standard etabliert, vor allem bei UAS-Anwendungen. Damit eine Kalibrierung physikalisch gültig und somit szenenunabhängig übertragbar ist, muss die Aufnahmegeometrie spezifische Kriterien erfüllen. Dabei spielen die Geometrie der Szene und die Orientierung der Aufnahmen eine entscheidende Rolle. Zwei Dinge sind dafür entscheidend, wobei der erste Punkt die größere Bedeutung hat:

1. Maßstabsvariationen innerhalb der einzelnen Bilder und
2. Maßstabsvariationen zwischen den Bildern.

Für eine verlässliche Selbstkalibrierung sollten daher folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Konvergente Aufnahmen aus unterschiedlichen Blickrichtungen,
- Kamerarotationen (Mischung aus Hoch- und Querformat),
- Tiefe im Objektraum (ausgeprägtes Relief),
- Hohe Redundanz sowie Präzision bei der Bildpunktmessung,
- Gleichmäßige Verteilung der Bildpunkte über die gesamte Sensorfläche.

Bei klassischen Nadir-Aufnahmen (Senkrechtaufnahmen) über flachem Gelände lassen sich die Parameter der inneren Orientierung untereinander bzw. zwischen innerer und äußerer Orientierung oft nicht sauber trennen. Diese projektive Kopplung erschwert die Bestimmung übertragbarer Kalibrierparameter. In solchen Fällen können zusätzliche Bodenpasspunkte und direkt gemessene GNSS-Projektionszentrumskoordinaten die Bestimmbarkeit der Kalibrierparameter erhöhen und damit auch eine genaue Bestimmung der Kamera-konstante zulassen. Voraussetzung ist jedoch, dass sowohl Bodenpasspunkte als auch direkt gemessene GNSS-Kameraprojektionszentren mit sehr hoher Genauigkeit vorliegen, was - insbesondere bei den GNSS-Messungen - nicht immer vorausgesetzt werden kann.

Wenn für verschiedene Projekte gültige Kalibrierungsparameter bestimmt werden müssen, ist dieses aus den normalen Bildflugszenarien selten möglich. Daher unterscheidet die Selbstkalibrierung zwischen der rein numerischen Kompensation systematischer Fehler - also der Optimierung auf den aktuellen Bildverband - und der physikalischen Kamerakalibrierung, die szenen-unabhängig für verschiedene Projekte übernommen werden kann. Letztere ist in der UAS-Anwendung aber oft nachrangig: Hier kann durch die Freigabe der Kamerakonstante trotz nicht hinreichend genauer GNSS-Projektionszentren eine geometrisch korrekte 3D-Rekonstruktion erzielt werden, sofern die Bodenpasspunkte in guter Verteilung und mit ausreichender Genauigkeit vorliegen. Zwar besitzen die hierbei bestimmten Kalibrierwerte keine allgemeingültige physikalische Korrektheit, sie ermöglichen jedoch eine erfolgreiche Kompensation von Fehlereinflüssen innerhalb des Projekts.

Literatur

- Brown, D.C., 1971: Close range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, XXXVII(8).
- Ebner, H., 1976: Self calibrating block adjustment. In: XIIIth Congress of the International Society for Photogrammetry, Commission III, Helsinki.
- Fraser, C., 1997: Digital camera self-calibration, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 52(1997):149-159.
- Fraser, C., 2001: Photogrammetric Camera Component Calibration: A Review of Analytical Techniques. In: Gruen, A., Huang, T.S. (eds) *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision*. Springer Series in Information Sciences, vol 34. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04567-1_4.
- Grün, A., 1978: Accuracy, reliability and statistics in close-range photogrammetry, Inter-congress symposium, International Society for Photogrammetry, Com. V, Stockholm, Sweden.
- Tang, R., 2013: *Mathematical Methods for Camera Self-Calibration in Photogrammetry and Computer Vision*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 703, München 2012, ISBN 978-3-7696-5115-7, 111 S.
- Triggs, B., McLauchlan, P.F., Hartley, R.I., Fitzgibbon, A.W. (2000). Bundle Adjustment – A Modern Synthesis. In: Triggs, B., Zisserman, A., Szeliski, R. (eds) *Vision Algorithms: Theory and Practice*. IWVA 1999. Lecture Notes in Computer Science, vol 1883. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-44480-7_21

1.1.7.2 Erzeugung der 3D-Punktwolke

Die Erzeugung von 3D-Punktwolken mittels Photogrammetrie basiert auf dem Prinzip, dass ein Objekt aus verschiedenen Blickrichtungen aufgenommen wird und sich daraus räumliche Informationen ableiten lassen. Grundlage ist die Zentralprojektion, bei der jeder Bildpunkt einem Bildstrahl im Raum entspricht. Wird ein Objektpunkt in mehreren, sich überlappenden Bildern identifiziert, kann seine dreidimensionale Lage durch Triangulation bestimmt werden. Hierzu wird die Lage der aufnehmenden Kameras relativ zueinander benötigt.

Am Anfang des photogrammetrischen Auswerteprozesses steht daher die Bestimmung von Bildmerkmalen und deren Zuordnung über mehrere Aufnahmen hinweg. In den Bildern werden charakteristische Punkte, Kanten oder Texturmuster identifiziert, die sich in anderen Bildern wiederfinden lassen. Diese sogenannten homologen Punkte bilden die Grundlage für die Rekonstruktion der Aufnahmegeometrie. Im nächsten Schritt werden aus diesen Bildbeziehungen die relative Orientierung der Kameraaufnahmen geschätzt, welche die Lage der Kameras zueinander beschreibt. Bei diesem Prozess werden sowohl die Positionen der Kamerastandpunkte als auch eine erste dreidimensionale Punktstruktur der Szene berechnet.

Das Ergebnis dieses Verfahrens ist zunächst eine dünne Punktwolke. Sie besteht aus markanten, eindeutig identifizierbaren Objektpunkten und beschreibt die Geometrie der Szene in grober Form. Für viele Anwendungen ist jedoch eine deutlich dichtere und flächenhaftere Repräsentation erforderlich. Daher folgt in der Regel weitere Verarbeitungsschritte, bei denen für möglichst viele Pixel oder Pixelbereiche korrespondierende Bildinformationen in benachbarten Aufnahmen gesucht werden. Aus diesen Korrespondenzen wird anschließend eine dichte Punktwolke erzeugt, welche die Oberfläche des erfassten Objekts wesentlich detaillierter beschreibt.

Die Genauigkeit und Vollständigkeit der erzeugten 3D-Punktwolke hängen von verschiedenen Einflussgrößen ab. Dazu zählen insbesondere die Bildqualität, die Überlappung der Aufnahmen, die geometrische Verteilung der Kamerastandpunkte, die Textur der aufgenommenen Oberflächen sowie die präzise Kalibrierung der Kamera wichtige Rollen. Strukturreiche Oberflächen mit gut erkennbaren Merkmalen lassen sich in der Regel zuverlässig rekonstruieren, während homogene, glänzende oder transparente Flächen problematisch sein können. Auch Schatten, Bewegungen im Objektbereich oder unzureichende Bildschärfe können die Qualität der Punktwolke mindern.

Für eine vermessungstechnisch verwertbare Punktwolke ist darüber hinaus die Georeferenzierung von Bedeutung. Diese kann über GNSS- und IMU-Daten des UAS als direkte Georeferenzierung oder über Passpunkte am Boden als indirekte Georeferenzierung oder durch eine Kombination beider Verfahren erfolgen. Erst durch die Einbindung in ein übergeordnetes Koordinatensystem wird aus der rein relativen 3D-Rekonstruktion ein geodätisch nutzbares Datenset. Die photogrammetrisch erzeugte Punktwolke bildet damit die Grundlage für eine Vielzahl weiterführender Auswertungen und Produkte.

1.1.7.3 Datenprodukte

Aus der photogrammetrischen Prozesskette lassen sich unterschiedliche Produkte ableiten, die je nach Aufgabenstellung in der Vermessung, Planung, Dokumentation oder Analyse eingesetzt werden. Die 3D-Punktwolke stellt dabei häufig das primäre Zwischenergebnis dar, aus dem weitere strukturierte und interpretierbare Datensätze erzeugt werden.

Ein zentrales Produkt ist das digitale Oberflächenmodell, das die Höheninformationen aller sichtbaren Oberflächen einschließlich Vegetation, Gebäuden und sonstiger Objekte beschreibt. Mithilfe verschiedener Algorithmen ist auch die Ableitung eines digitalen Geländemodells möglich. Beide Modellarten sind für zahlreiche vermessungstechnische Fragestellungen relevant, etwa zur Volumenberechnung, Profilanalyse, Geländebewertung oder Entwässerungsplanung.

Ein besonders häufig erzeugtes Endprodukt ist das Orthophoto. Hierbei handelt es sich um ein geometrisch entzerrtes und georeferenziertes Luftbild, bei dem perspektive und projektive Bildverzerrungen korrigiert werden. Im Unterschied zu einem gewöhnlichen Luftbild besitzt ein Orthophoto einen einheitlichen Maßstab und kann daher wie eine Karte für metrische Auswertungen verwendet werden. Orthophotos eignen sich unter anderem zur Bestandsdokumentation, zur Kartierung, zur Flächenerfassung und als Planungsgrundlage.

Werden mehrere entzerrte Einzelbilder zu einem gemeinsamen Gesamtbild zusammengefügt, entsteht ein Orthophotomosaik. Dieses erlaubt die flächenhafte und nahtlose Darstellung größerer Untersuchungsgebiete. Die Qualität eines solchen Produkts hängt unter anderem von der geometrischen Korrektheit der Einzelbilder, der radiometrischen Anpassung zwischen benachbarten Aufnahmen und der Qualität des zugrunde liegenden Höhenmodells ab.

Darüber hinaus können aus photogrammetrischen Daten dreidimensionale Oberflächenmodelle und texturierte 3D-Meshes erzeugt werden. Bei einem Mesh werden benachbarte Punkte der Punktwolke meist mit Dreiecken verbunden, sodass eine geschlossene Oberflächenrepräsentation entsteht. Wird diese Geometrie zusätzlich mit Bildinformationen belegt, entsteht ein texturiertes 3D-Modell, das sowohl geometrische als auch visuelle Eigenschaften eines Objekts realitätsnah abbildet. Solche Modelle finden Anwendung in der Bauwerksdokumentation, Denkmalpflege, Visualisierung und Bestandsaufnahme.

Weitere Möglichkeiten sind die Erstellung von Höhenlinien, Quer- und Längsprofilen, Volumenmodellen sowie abgeleiteten Karten und thematische Informationslayer. Damit zeigt sich, dass die Photogrammetrie nicht nur der Bildgewinnung dient, sondern eine vielseitige Methode zur Erzeugung metrisch nutzbarer, flächenhafter und dreidimensionaler Geodaten darstellt. Im UAS-Kontext ist sie damit ein zentrales Verfahren, um aus digitalen Luftbildern belastbare und praxisrelevante Vermessungsprodukte zu generieren.

1.1.7.4 Aktuelle Entwicklungen im Bereich Grundlagen der photogrammetrischen Prozesskette - “Neuronale Photogrammetrie”

Verfasser: Boris Jutzi

Die dreidimensionale Rekonstruktion einer zu erfassenden Szene erfolgt traditionell in der Photogrammetrie, wird jedoch zunehmend durch bildbasierte Verfahren ergänzt, deren Ursprung in der Computer Vision liegt. Mit bildbasierten Verfahren können dreidimensionale Daten in der Regel in Form von Punktwolken nur dann extrahiert werden, wenn sowohl die innere Orientierung als auch die äußere Orientierung (Pose) der Kamera (näherungsweise) bekannt ist und homologe Punkte in mindestens zwei Bildern vorliegen. Insbesondere bei unstrukturierten Bildaufnahmen, wie sie bei UAS mit freier Trajektorie erzeugt werden, muss zunächst die Aufnahmestruktur mittels geeigneter Verfahren rekonstruiert werden. Besonders hervorzuheben sind hierfür die bildbasierten Verfahren zur automatischen Kamera-Selbstkalibrierung, Structure-from-Motion (SfM) für die gemeinsame Schätzung von Kameraposen und spärlichen Punktwolken, Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) für die gleichzeitige Positionsbestimmung und Szenenrekonstruktion in Echtzeit sowie Dense Image Matching (DIM) bzw. Multi-View Stereo (MVS) zur Erzeugung dichter dreidimensionaler Punktwolken. Prinzipiell wird eine hohe Rekonstruktionsgenauigkeit und -vollständigkeit erzielt, wenn die Oberflächen ausreichend texturiert und hinreichend diffus reflektierend sind.

Neural Radiance Fields (NeRF) erweitern die zuvor genannten bildbasierten Verfahren, indem die Szene als kontinuierliche, volumetrische Darstellung bestehend aus Dichte (*Density*) und richtungsabhängigen RGB-Farbwerten (*Radiance*), modelliert wird (Mildenhall et al., 2020). NeRF synthetisiert neue Bildansichten aus vorhandenen Bildern und deren Kameraposen, welche üblicherweise durch eine SfM-Rekonstruktion geschätzt werden. Zudem ermöglicht diese implizite NeRF-Repräsentation eine 3D-Rekonstruktion, die weitgehend unabhängig von Textur und Reflexionscharakteristik der Oberfläche ist und sich daher deutlich vom bisherigen Goldstandard unterscheidet. Ausgehend von der Kamerapose lässt sich für jede 3D-Position die Dichte und der dazugehörige Farbwert eines 3D-Punktes bestimmen. Die Dichte kann als eine Art wahrscheinlichkeitsähnlicher Hinweis auf das Vorhandensein von Oberflächen oder Objekten interpretiert werden, woraus sich unmittelbar 3D-Punktwolken ableiten lassen (Jäger et al., 2025). Insbesondere in Szenen mit transparenten oder teiltransparenten Objekten (z.B. Glas, Wasser, Wasseroberflächen) sowie bei teilweisen Verdeckungen (z.B. Vegetation) lässt sich die 3D-Rekonstruktion verbessern (Günthner et al. 2025, Petrovska und Jutzi, 2024).

3D-Gaussian Splatting (3DGS) ist eine effiziente explizite Repräsentation, bei der anisotrope dreidimensionale Gauß-Primitive (Ellipsoide) zur Szenenmodellierung verwendet werden (Kerbl et al., 2023). Diese Ellipsoide verfügen über Attribute wie i) 3D-Position, ii) eine rotationsabhängige Kovarianzmatrix zur Beschreibung ihrer anisotropen Ausdehnung, iii) Opazität (Alpha-Wert), sowie iv) Farbwerte und v) *Shading*-Koeffizienten, wobei die Attribute während der Optimierung dynamisch an die Szene angepasst werden. Für die 3D-Rekonstruktion ist die 3D-Position des Ellipsoids nicht direkt geeignet zur Oberflächenrepräsentation, da häufig das Zentrum des Ellipsoids nicht auf der Oberfläche liegt. Daher wurde *2D-Gaussian Splatting* (2DGS) entwickelt, indem die dreidimensionalen Ellipsoide zu oberflächenorientierten zweidimensionalen Ellipsen reduziert werden, womit eine geometrisch konsistentere und stabilere 3D-Rekonstruktion ermöglicht wird (Huang et al., 2024). *Gaussian Splatting* wird über Oberflächenpunkte initialisiert. Dabei können die zugrunde liegenden 3D-Punkte von passiven optischen Sensoren respektive Verfahren (z.B. SfM, DIM/MVS, MDE), von aktiven optischen Sensoren (z.B. Entfernungskamera, Laserscanner) oder aus synthetisch erzeugten Oberflächenpunkten modellbasierter Szenen (z.B. BIM) stammen (Zhang et al., 2025).

Visual Geometry Grounded Transformer (VGGT) ist ein neuartiges Verfahren, welches basierend auf *End-to-End Learning* (E2E) ohne jegliche physikalische oder geometrische Modellierung direkt durch einen lernbasierten Transformer-Ansatz eine dreidimensionale Rekonstruktion ermöglicht (Wang et al., 2025). Dies ist ein verlockender Ansatz, da dadurch komplexe Verarbeitungsschritte wie bei SfM oder DIM/MVS vollständig entfallen, andererseits wirft dieser Ansatz - wie alle E2E-Verfahren - Fragen hinsichtlich der Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse auf.

Aufgrund der speziellen Herangehensweise und damit etwas losgelöst von den zuvor beschriebenen Verfahren ist abschließend *Monocular Depth Estimation* (MDE) zu nennen. MDE ist die Schätzung einer Tiefenkarte aus nur einem einzigen Bild (Eigen et al., 2014). Anstatt mehrere Ansichten auszuwerten, wie es in der Photogrammetrie üblich ist, nutzen moderne MDE-Verfahren bildinhärente Eigenschaften (z.B. Perspektive, Texturgradienten, Objektskalen, semantische Muster) aus einem Einzelbild, um Tiefeninformationen zu schätzen (Yang et al., 2024). Bedingt durch die damit verbundenen Unsicherheiten dient MDE meist als ergänzende oder initialisierende Komponente bei 3D-Rekonstruktionsverfahren (Zhang et al., 2024).

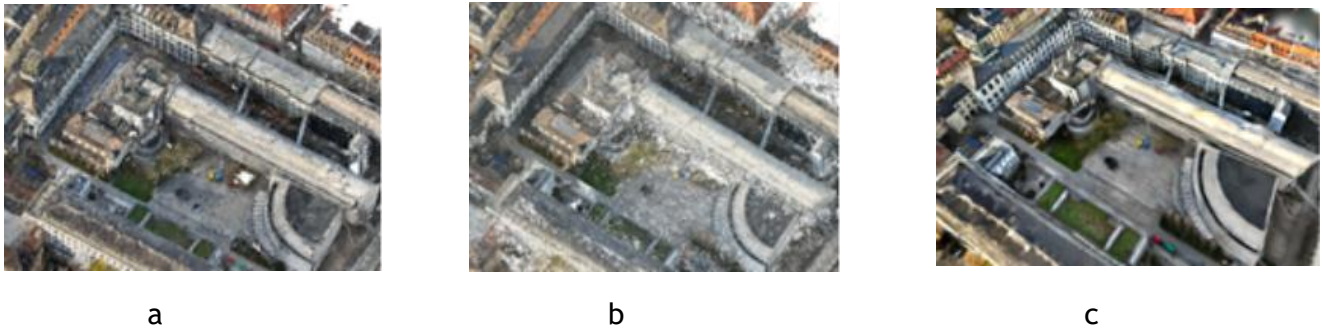


Abbildung 1.1.7.4 - 1: Vergleich von 3D-Rekonstruktionsergebnisse (Wysocki et al., 2026): (a) MVS, (b) NeRF, (c) 3DGS

Literatur

- Eigen, D., Puhrsch, C., Fergus, R., 2014. Depth Map Prediction from a Single Image using a Multi-Scale Deep Network. In: Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS), Vol. 27.
- Günthner, A., Brezovsky, M., Schulte, F., Winiwarter, L., Mandlbürger, G., Jutzi, B., 2025. Exploring the Potential of Refractive NeRFs for Photogrammetric Bathymetry - First Application to UAV-based Data from the Pielach River. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-2/W10, pp. 39-45. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W10-2025-39-2025>.
- Huang, B., Yu, Z., Chen, A., Geiger, A., Gao, S., 2024. 2D Gaussian Splatting for Geometrically Accurate Radiance Fields. In: Proceedings of SIGGRAPH 2024 Conference Papers, Association for Computing Machinery (ACM), Article 32. <https://doi.org/10.1145/3641519.3657428>.
- Jäger, M., Landgraf, S., Jutzi, B., 2025. Density uncertainty quantification with NeRF-Ensembles: Impact of data and scene constraints. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 137, 104406. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104406>.
- Kerbl, B., Kopanas, G., Leimkühler, T., Drettakis, G., 2023. 3D Gaussian Splatting for real-time radiance field rendering. *ACM Transactions on Graphics*, 42(4), Article 1.
- Mildenhall, B., Srinivasan, P.P., Tancik, M., Barron, J.T., Ramamoorthi, R., Ng, R., 2020. NeRF: Representing scenes as Neural Radiance Fields for view synthesis. *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 405-421.
- Petrovska, I., Jutzi, B., 2024. Vision through obstacles—3D geometric reconstruction and evaluation of Neural Radiance Fields (NeRFs). *Remote Sensing*, 16(7), 1188. <https://doi.org/10.3390/rs16071188>.
- Wang, J., Chen, M., Karaev, N., Vedaldi, A., Rupprecht, C., Novotny, D., 2025. VGGT: Visual Geometry Grounded Transformer. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 5294-5306. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.11651>.
- Wysocki, O., Schwab, B., Biswanath, M.K., Greza, M., Zhang, Q., Zhu, J., Froeh, T., Heeramaglore, M., Hijazi, I., Kanna, K., Pechinger, M., Chen, Z., Sun, Y., Rueda Segura, A., Xu, Z., AbdelGafar, O., Mehranfar, M., Yeshwanth, C., Liu, Y.-C., Yazdi, H., Wang, J., Auer, S., Anders, K., Bogenberger, K., Borrmann, A., Dai, A., Hoegner, L., Holst, C., Kolbe, T.H., Ludwig, F., Nießner, M., Petzold, F., Zhu, X.X., Jutzi, B., 2026. TUM2TWIN: Introducing the large-scale multimodal urban digital twin benchmark dataset. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 232, 810-830. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.12.013>.
- Yang, L., Kang, B., Huang, Z., Xu, X., Feng, J., Zhao, H., 2024. Depth Anything: Unleashing the Power of Large-Scale Unlabeled Data. In: Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.10891>.
- Zhang, Q., Wysocki, O., Jutzi, B., 2025. GS4Buildings: Prior-Guided Gaussian Splatting for 3D Building Reconstruction. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4/W6-2025, 249-256. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W6-2025-249-2025>.
- Zhang, Q., Wysocki, O., Urban, S., & Jutzi, B. 2024. CDGS: Confidence-Aware Depth Regularization for 3D Gaussian Splatting. *ISPRS Archives XLVIII-2/W7*.

1.1.8 Grundlagen luftgestütztes Laserscanning

Verfasser: Gottfried Mandlbauer

Einleitung

Flugzeuglaserscanning (engl. Airborne Laserscanning, ALS) hat die Erfassung topografischer Daten revolutioniert (Shan and Toth, 2018; Vosselmann und Maas, 2010). Vermessungsbehörden setzen diese aktive Fernerkundungstechnologie für die Erstellung nationaler und transnationaler digitaler Geländemodelle (DGM) und anderer Geodatenprodukte ein. In den letzten beiden Jahrzehnten wurden enorme Fortschritte in der Sensortechnologie erzielt. Das Gewicht und die Größe der Sensoren haben sich deutlich verringert, sodass seit etwa 2015 die Integration von Laserscannern auf UASs für Kartierungsaufgaben in geodätischer Qualität möglich ist (Nex et al, 2022). UAS-Laserscanning (ULS) liefert sehr dichte 3D-Punktwolken der Erdoberfläche und der darauf befindlichen Objekte wie Gebäude, Infrastruktur und Vegetation. Durch die hohen Scanraten und den geringeren Abstand zwischen Sensor und Objekt können mit ULS-Punktdichten von mehr als 500 Punkten/m² erzielt werden, was die Ableitung von Produkten mit einer räumlichen Auflösung im Sub-Dezimeterbereich ermöglicht. Während die präzise Geometrie und die Fähigkeit zur Durchdringung der Vegetation allgemeine Highlights von ALS sind, ermöglicht ULS durch die hohe Punktdichte Anwendungen, die über die reine Geländekartierung hinausgehen. Beispielhaft seinen hier Korridorerfassung (Straßen, Gleise, Pipelines, Hochspannungsleitungen, etc.), Land- und Forstwirtschaft (Stichwort: precision farming/forestry) und Monitoring von Gefahrenzonen (Hangrutschungen, Felsstürze) genannt. Im Folgenden werden die Grundlagen von ULS erläutert und an Beispielen demonstriert.

Allgemeines Konzept

Bei ULS handelt es sich um ein kinematisches 3D-Datenerfassungsverfahren, das 3D-Punktwolken der Erdoberfläche und der darauf befindlichen Objekte wie Gebäude, Infrastruktur und Vegetation liefert. Die drei Hauptkomponenten sind: (i) der Laserscanner bestehend aus der Entfernungsmesseinheit (engl., LIDAR, Light Detection And Ranging) und der Strahlablenkungseinheit (engl., Scanning), (ii) ein Globales Navigationssatellitensystem (engl., Global Navigation Satellite System, GNSS) zur Messung der Position der Plattform in einem kartesischen, georeferenzierten Koordinatensystem und (iii) eine Inertiale Messeinheit (engl., Inertial Measurement Unit, IMU), welche die Orientierung der Plattform liefert.

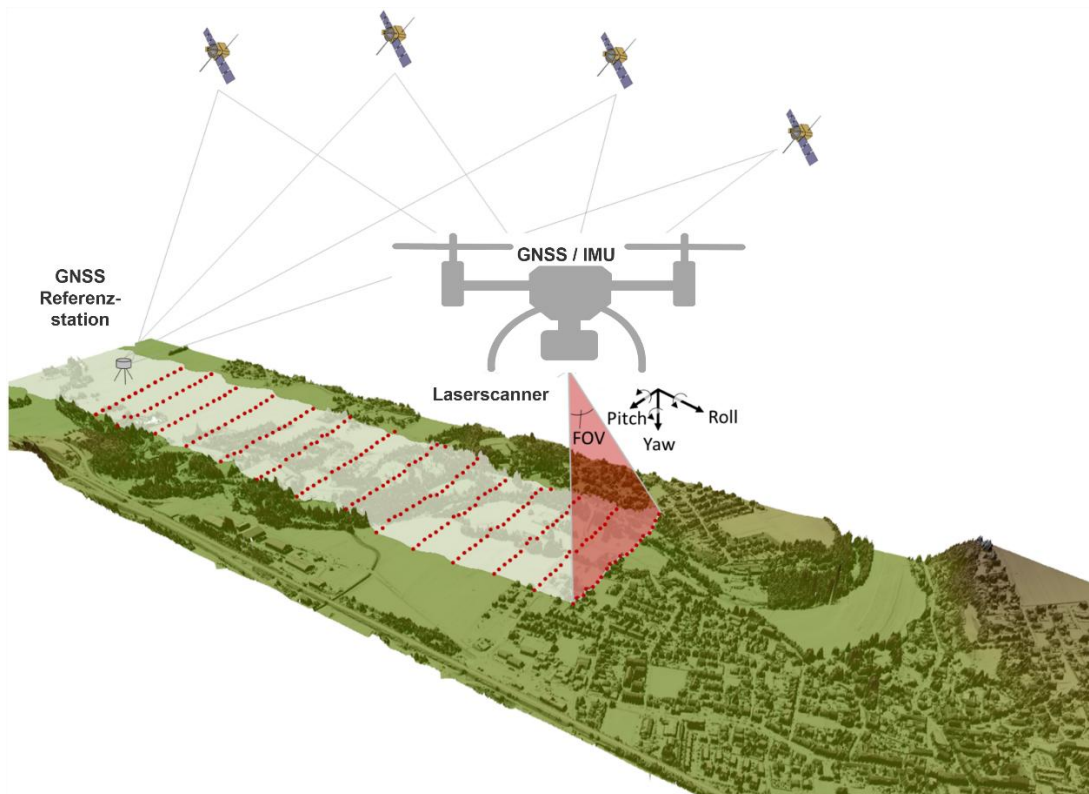


Abbildung 1.1.8 - 1: Schematische Darstellung von UAS-Laserscanning

Bei dem in Abbildung 1.1.8 - 1 dargestellten Sensorsystem werden die Laserstrahlen kontinuierlich quer zur Flugrichtung abgelenkt, wodurch zusammen mit der Vorwärtsbewegung der Plattform der Streifen des Geländes unterhalb des UAS im Sichtfeld (FoV) des Scanners erfasst wird. Die Entfernungen zwischen dem Sensor und den Zielen am Boden werden durch Messung der Laufzeit von kurzen Laserimpulsen bestimmt. Aus der Zeitdifferenz zwischen dem Aussenden des Pulses und dem Empfangen des reflektierten Echopulses kann bei bekannter Lichtgeschwindigkeit die Distanz zwischen Sensor und Objekt errechnet werden. Dies wird allgemein als Time-of-Flight-Messprinzip (ToF) bezeichnet. Um die 3D-Koordinaten eines Objekts in einem georeferenzierten Koordinatensystem (z.B. WGS84) zu erhalten, müssen zusätzlich zu den Entfernungen auch die Position und Lage der Plattform sowie der Scanwinkel kontinuierlich gemessen werden. Somit handelt es sich bei ULS um ein zeitlich synchronisiertes Multisensorsystem. Die 3D-Punkte werden über direkte Georeferenzierung berechnet. Um eine Positionsgenauigkeit der Flugbahn (Trajektorie) im cm-Bereich zu erreichen, ist die Verwendung einer GNSS-Basisstation im Vermessungsgebiet unerlässlich. Dabei kann es sich entweder um eine permanente oder virtuelle Station eines GNSS-Dienstleisters oder um einen GNSS-Empfänger handeln, der auf einem Stativ an einem Referenzpunkt mit bekannten Koordinaten installiert ist. Während für die präzise Einhaltung des geplanten Flugpfades RTK-Empfänger (Real Time Kinematic) auf den UAS-Plattformen eingesetzt werden, erfolgt die Auswertung der präzisen Trajektorie typischerweise durch PPK (Post Processed Kinematic) basierend auf den aufgezeichneten GNSS-Beobachtungen der GNSS-Empfänger sowohl des Scannersystems als auch der Basisstation.

Der ideale Laserstrahl ist unendlich klein, aber tatsächliche Laserstrahlen können eher als Lichtkegel mit einem engen Öffnungswinkel betrachtet werden. Bei ULS liegt der typische Durchmesser des beleuchteten Punktes auf dem Boden (Footprint) je nach Flughöhe und Strahldivergenz des Sensors im cm- bis dm-Bereich. Aufgrund des endlichen Footprints werden potenziell mehrere Objekte entlang der Laser-Sichtlinie von einem einzigen Laserpuls beleuchtet. Zum Beispiel in der Vegetation liefern ToF-LIDAR Sensoren daher mehrere 3D-Punkte für einen einzigen Laserpuls. Darüber hinaus erfassen gängige ULS-Sensoren neben der Entfernung auch zusätzliche Attribute für jeden erfassten Laserpunkt, wie z.B. Signalstärke (Intensität) oder Reflektanz (kalibriertes Rückstreumaß). Ein Beispiel ist in Abbildung 1.1.8 - 2 dargestellt. Es zeigt sowohl die Durchdringungsfähigkeit von ULS als auch die Fähigkeit zur Erfassung radiometrischer Information. In der Abbildung ist ein kreisförmiger Ausschnitt eines Waldgebietes dargestellt, wobei die Punkte entweder nach ihrer Echonummer (a) oder der Reflektanz (b) eingefärbt sind. Es ist zu erkennen, dass im Fall von Mehrfachreflexion die ersten Echos (blau) in der Baumkrone zum Liegen kommen, manche Laserschüsse aber auch ohne weitere Reflexion an den Zweigen und Ästen direkt vom Waldboden reflektieren (single echos). Abbildung 1.1.8 - 2b zeigt deutlich, dass der Waldboden und die Baumstämme (rot) stärker reflektieren als dünne Zweige und Blätter (grün, blau).

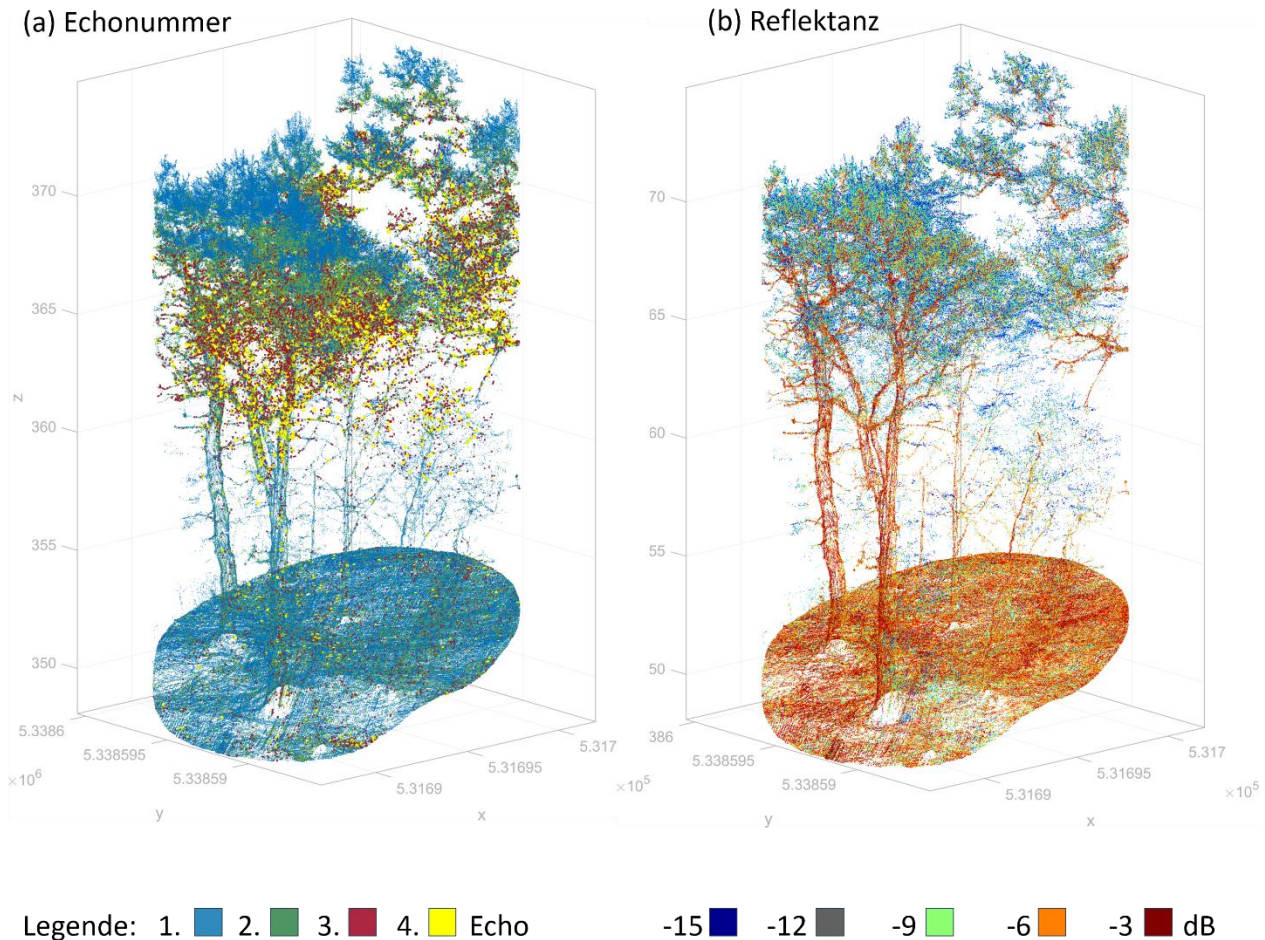


Abbildung 1.1.8 - 2: 3D-ULS-Punktwolke eingefärbt nach (a) Echonummer und (b) Reflektanz

Laser-Entfernungsmessung

Die Kernkomponente jedes Laserscansystems ist die Entfernungsmessungseinheit. Die Entfernung vom Sensor zu einem Objekt wird im Allgemeinen durch Messung der Laufzeit eines kurzen Laserimpulses ermittelt. Wenn die Lichtgeschwindigkeit c , die Impulsemissionszeit t_0 und die Ankunftszeit des Echopulses t_1 bekannt sind, kann die Entfernung R zwischen Sensor und Ziel wie folgt berechnet werden:

$$R = \frac{(t_1 - t_0)}{2} c \quad (1)$$

Neben der Entfernungsmessung auf Basis von ToF kommt gelegentlich auch das Phasenvergleichsverfahren zur Distanzmessung zum Einsatz. In diesem Fall wird ein kontinuierliches Lasersignal auf eine Trägerwelle aufgeprägt und die Verschiebung zwischen der Phase des ausgesendeten und des reflektierten (modulierten) Signals gemessen. Der Hauptvorteil des ToF-Prinzips ist seine inhärente Mehrzielfähigkeit, d.h. die Möglichkeit, aus einem einzigen Laserimpuls mehrere Punkte entlang der Laser-Sichtlinie zu extrahieren (vgl. Abbildung 1.1.8 - 2a). Dies ist besonders nützlich für Vermessungen in der Vegetation. Das Phasenvergleichsverfahren liefert dagegen nur einen Punkt pro Impuls.

Scannen

Bei ULS erfolgt die Abtastung der Erdoberfläche auf der Grundlage von Flugstreifen (vgl. Abbildung 1.1.8 - 1). Die flächige Erfassung mit 3D-Punkten erfordert (i) die Vorwärtsbewegung des Flugzeugs und (ii) eine Scaneinheit, welche die Laserstrahlen systematisch unterhalb oder um den Sensor herum ablenkt. Abbildung 1.1.8 - 3 zeigt typische Scanmechanismen und die daraus resultierenden Punktmuster am Boden.

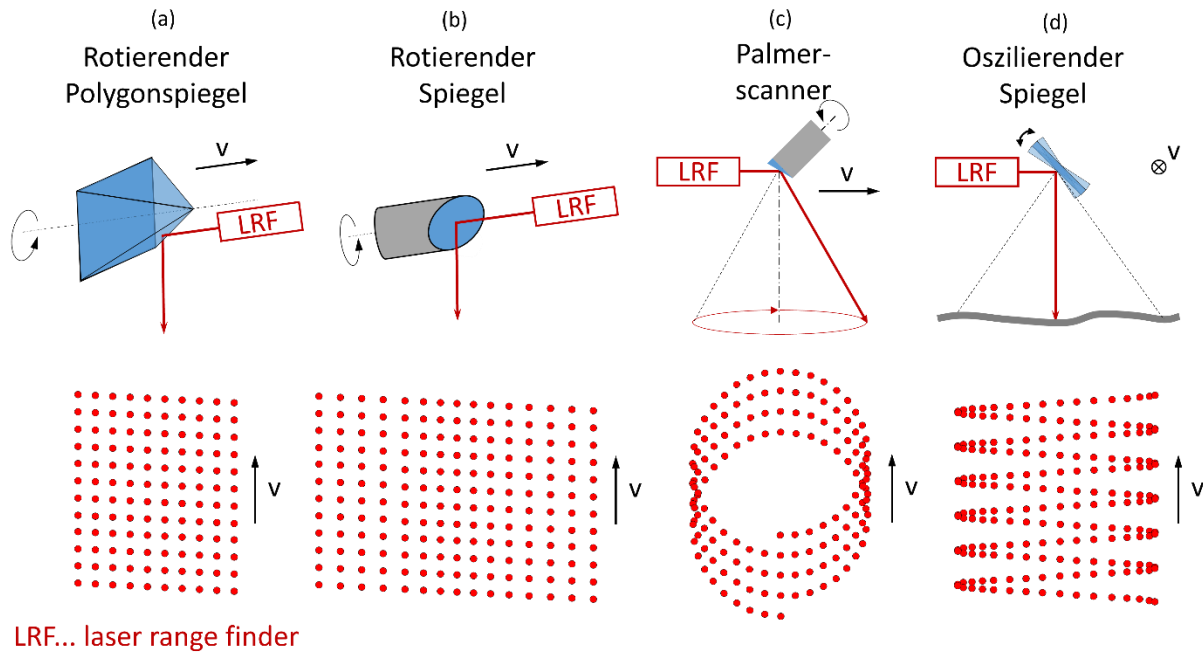


Abbildung 1.1.8 - 3: Laserstrahlablenkung mit rotierenden und oszillierenden Spiegeln

Rotierende Polygonräder erzeugen parallele Scanlinien auf dem Boden, die ungefähr senkrecht zur Flugbahn verlaufen. Durch leichte Veränderung der Neigung der einzelnen Spiegelflächen können in einer einzigen Umdrehung des Spiegelrades Scanlinien erzeugt werden, die nacheinander vorwärts, rückwärts und nach Nadir ausgerichtet sind. Dadurch können bspw. auch vertikale Fassadenflächen mit ULS erfasst werden. Durch Anpassung der Rotationsgeschwindigkeit, der Fluggeschwindigkeit und der Pulswiederholungsrate kann jedenfalls eine homogene Punktverteilung auf dem Boden innerhalb des Scanner-Sichtfeldes von ca. $\pm 30 - 45^\circ$ um die Nadir-Richtung erreicht werden. Ein Scan-Keil mit einem einzigen um 45° geneigten Spiegel ermöglicht das Abtasten der gesamten Vertikalebene (360° -Panorama). Palmer-Scanner verwenden eine geneigte Drehachse des Spiegels und erzeugen ein spiralförmiges Scanmuster auf dem Boden. Ein solches kegelförmiges Scannen resultiert in einem konstanten Einfallswinkel des Laserstrahls in Bezug auf die horizontale Bodenebene, was insbesondere für die Laserbathymetrie nützlich ist, um den Winkel zwischen Laserstrahl und Wasseroberfläche konstant zu halten. Palmer-Scanner werden auch beim topografischen Laserscanning eingesetzt, um Visuren unter Brücken zu ermöglichen und Gelände und Gebäude aus verschiedenen Winkeln zu erfassen. Die Punktdichte ist jedoch weniger homogen, da an der Streifengrenze deutlich höhere Dichten erreicht werden als in der Mitte des Streifens. Ein weiterer Nachteil ist das Fehlen von Laserstrahlen in Nadir-Richtung. Oszillierende Spiegel schließlich schwingen wiederholt zwischen zwei Positionen. Dieser Scanmechanismus führt aufgrund der notwendigen Verzögerung und Wiederbeschleunigung des Spiegels in die entgegengesetzte Richtung ebenfalls zu einer höheren Punktdichte am Rand des Streifens.

Im Gegensatz zur Reflexion an einer Spiegeloberfläche nutzen Risley-Prismen die Lichtbrechung an den Grenzflächen zwischen Glas und Luft zur Strahlbrechung (Refraktion). Die beiden abgeschrägten Glaskeile des Risley-Prismas weisen kollineare Drehachsen auf, können aber unabhängig voneinander betrieben werden und dadurch beliebige Scanmuster erzeugen. Annähernd linienförmige Scanmuster lassen sich dabei genauso erzeugen, wie Kreise, Spiralen und blütenblatt-förmige Muster. Im UAS-Kontext wird überwiegend ein Scanpattern in Form einer flachen Achterschleife verwendet. Dadurch weist der Laserstrahl im Außenbereich des Streifens leicht nach vorne und hinten. In der Mitte und am äußersten Rand des Streifens hingegen weist der Strahl annähernd zum Nadir. Der Nachteil der auf Brechung basierenden Strahlsteuerung besteht darin, dass die Streuung im Glas die Strahlqualität leicht verschlechtert. Abbildung 1.1.8 - 4 zeigt das Sensor- und Scan-Konzept des Livox Avia. Das Instrument weist sechs LIDAR-Einheiten auf, deren Strahlen über ein Risley-Prisma abgelenkt werden.

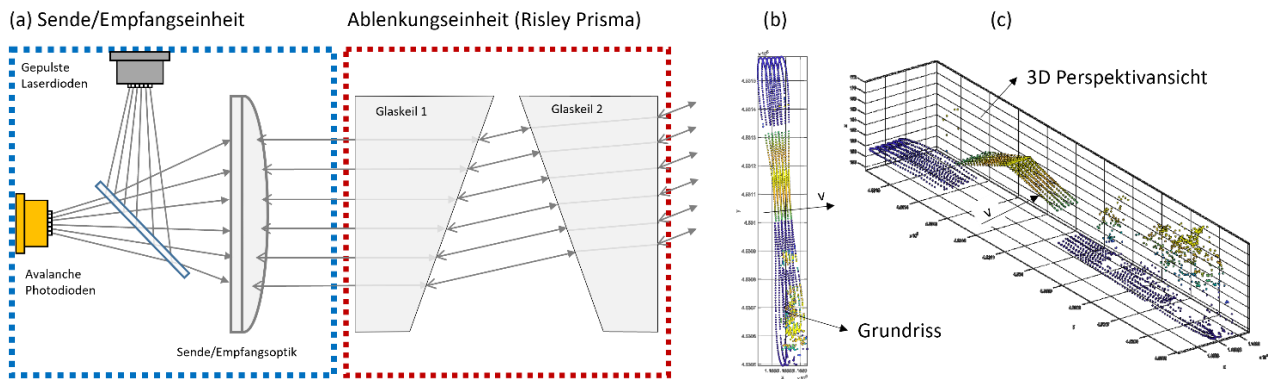


Abbildung 1.1.8 - 4: (a) LIDAR und Scaneinheit des Livox Avia, (b+c) Grundriss und perspektivische Ansicht der 3D-Laserpunkte während einer vollständigen Drehung der Scaneinheit (sechs parallele Achter-Schleifen)

Signalerfassung

Bei der herkömmlichen ToF-Laserentfernungsmessung wird das Rücksignal eines hochkollimierten Laserimpulses von einem einzigen Detektor empfangen. Für die Umwandlung der optischen Leistung in digitale radiometrische Informationen wird ein zweistufiges Verfahren angewendet. Zunächst wandelt eine Avalanche-Photodiode (APD) die empfangene Laserstrahlung in ein analoges Signal um, anschließend erzeugt ein Analog-Digital-Wandler (ADC) das endgültige Messergebnis in digitaler Form. APDs, die für das UAS-basierte Laserscanning verwendet werden, arbeiten im linearen Bereich, d.h. in dem Dynamikbereich der APD, bei dem ein linearer Zusammenhang zwischen optischer Leistung und der Stärke des analogen Signals am Ausgang des Empfängers besteht. Solche APDs liefern direkt Messungen der empfangenen Signalstärke und geben Auskunft über die Reflexion und/oder die Materialeigenschaften der beleuchteten Objekte.

Die eigentliche Entfernungsmessung wird entweder durch Hardwarekomponenten des Laserscanners (diskrete Echosysteme) oder durch hochfrequente Diskretisierung der gesamten zurückgestreuten Echowellensform (Full Waveform, FWF) realisiert. Im letzteren Fall werden die erfassten Wellenformen entweder online durch die Firmware des Sensors verarbeitet oder zur detaillierten Analyse in der Nachbearbeitung gespeichert. Werden die vollen Wellenformen gespeichert, ermöglicht dies die Signalauswertung im Postprocessing. Ein gängiges Verfahren der FWF-Auswertung ist z.B. die Gaußsche Zerlegung. Gegenüber einfachen Schwellwertverfahren, bietet die Gaußsche Zerlegung Vorteile hinsichtlich Entfernungsmessgenauigkeit, der Trennbarkeit einzelner Echos und ermöglicht die Charakterisierung der erfassten Objekte, da dabei nicht nur die Entfernung, sondern auch weitere Punktattribute (Amplitude, Echobreite, Schätzgenauigkeit) anfallen. In allen Fällen sind für die zuverlässige Erkennung eines einzelnen Objekts mehrere hundert Photonen erforderlich.

Geometrisches Sensormodell

Wie oben erwähnt, handelt es sich bei ULS um ein kinematisches Messverfahren, das auf einem streng synchronisierten Multisensorsystem - bestehend aus GNSS, IMU und Laserscanner - basiert. Für UAS mit Kameras ist die Georeferenzierung im Abschnitt 1.1.7.1 erläutert. Im Gegensatz zu Kamerasensoren erfolgt die Berechnung der Koordinaten der 3D-Laserpunkte immer über direkte Georeferenzierung. Während bei einem Bildverband ein Trägheitsnavigationssensor die Bestimmung der Orientierungen unterstützen kann, ist eine IMU mit hoher Taktrate (250-1000 Hz) zur kontinuierlichen Messung der Drehwinkel beim ULS ein unverzichtbarer Bestandteil. Schematisch ist das geometrische ULS-Sensormodell in Abbildung 1.1.8 - 5 dargestellt.

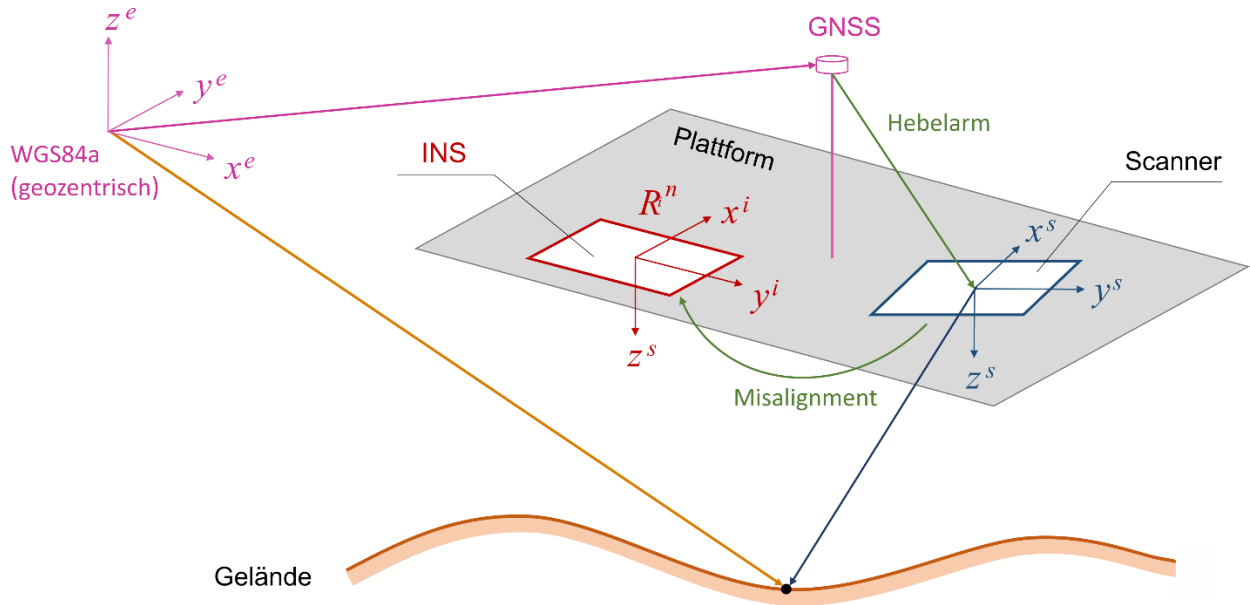


Abbildung 1.1.8 - 5: Schematische Darstellung des geometrischen ULS-Sensormodells

Die standardmäßige ULS-Datenverarbeitungskette beginnt mit der Berechnung der Flugbahn der Plattform unter Verwendung von Kalman-Filterung der GNSS- und IMU-Beobachtungen. Das Ergebnis ist eine bestmögliche, geglättete Schätzung der Flugbahn (Smoothed Best Estimate of Trajectory, SBET), welche die absoluten 3D-Positionen (X, Y, Z) der Messplattform in einem geozentrischen, kartesischen Koordinatensystem (Earth-Centered-Earth-Fixed, ECEF) sowie die Orientierung der Messplattform in Bezug auf den lokalen Horizont (Navigationswinkel: roll/pitch/yaw). Im nächsten Schritt werden die Trajektoriendaten mit den zeitgestempelten Laserscanner-Messungen kombiniert. Hier kompensieren die Hersteller in der Regel kleine systematische Instrumenteneffekte der Entfernungsmess- und Scaneinheit auf der Grundlage von Laborkalibrierungen und liefern direkt korrigierte 3D-Koordinaten der erfassten Objektpunkte im Sensorkoordinatensystem. Diese bilden die Grundlage für die Berechnung der 3D-Objektkoordinaten in einem ECEF-Koordinatensystem gemäß Gleichung 2

$$\mathbf{x}^e(t) = \mathbf{g}^e(t) + \mathbf{R}_n^e(t) \mathbf{R}_i^n(t) (\mathbf{a}^i + \mathbf{R}_s^i \mathbf{x}^s(t)) \quad (2)$$

Die Transformationskette in Gleichung 2 transformiert zwischen den folgenden Koordinatensystemen (KS), die jeweils durch einen Index gekennzeichnet und in Abbildung 5 farblich hervorgehoben sind.

- s/blau: Scanner-KS
- i/rot: IMU-KS, auch als Body-KS oder Plattform-KS bezeichnet
- n/keine Farbe: Navigations-KS (KS des lokalen Horizonts: Nord/Ost/Unten)
- e/magenta: ECEF (erdzentriertes, erdgebundenes) KS

Liest man Gleichung 2 von rechts nach links, so wird der 3D-Punkt im lokalen Scanner-KS (x^s, y^s, z^s) um die Boresight-Misalignment Winkel in das IMU-System (R_s^i) gedreht und um den Hebelarm ($\mathbf{a}^i$) verschoben. Der Hebelarm ist der Vektor zwischen dem Phasenzentrum der GNSS-Antenne und dem Ursprung des Scanner-Systems, und die Misalignment-Winkel bezeichnen die kleinen Winkelunterschiede (Δroll , Δpitch , Δyaw) zwischen den Referenzebenen des Scanners und der IMU (vgl. grüne Elemente in Abbildung 1.1.8 - 5). R_i^n transformiert den resultierenden Vektor vom IMU-KS zum Navigations-KS (lokaler Horizont-KS) auf der Grundlage der von der IMU gemessenen Roll-, Nick- und Gierwinkel. R_n^e rotiert schließlich ins kartesische ECEF-System. Diese Rotation hängt von der geografischen Position (Breite/Länge) ab. Die 3D-Koordinaten des Laserpunktes $\mathbf{x}^e(t)$ erhält man schließlich durch Addition der ECEF-Koordinaten der GNSS-Antenne ($\mathbf{g}^e$).

Die gesamte Unsicherheit in Lage und Höhe der 3D-Laserpunkte (engl., Total Positional/Vertical Uncertainty, TPU/TVU) hängt von der Genauigkeit des Laserscanners und der Trajektorie sowie von der Synchronisation aller Sensorkomponenten (GNSS, IMU, Scanner) ab. Moderne Laserscanner bieten eine Entfernungsmessgenauigkeit von 1-3 cm bei gängigen maximalen Messentfernungen von 250-750 m. Die absolute Lagegenauigkeit ist von der GNSS-Genauigkeit begrenzt. Nach sorgfältigem Prozessieren der GNSS-Daten der Basisstation und des Laserscanners z.B. mit Precise Point Positioning (PPP) liegt die absolute Genauigkeit der Punktlage bei 3-5 cm. Typische Genauigkeiten für IMUs, die für ULS eingesetzt werden, liegen bei 0,0025 für Roll-

und Nickwinkel (roll/pitch) und 0,005 für den Kurswinkel (yaw). Insgesamt liefern ULS-Sensoren eine 3D-Koordinatengenauigkeit im sub-dm-Bereich.

Radiometrisches Sensormodell

Informationen über die radiometrischen Eigenschaften beleuchteter Objekte sind von großer Bedeutung für viele Folgeanwendungen. Die Laser-Radar-Gleichung beschreibt dabei den grundlegenden Zusammenhang zwischen der gesendeten und der empfangenen optischen Leistung:

$$P_R = \frac{P_T D^2}{4\pi(\gamma R)^2} \sigma \eta_{ATM} \eta_{SYS} + P_{BK} \quad (3)$$

Die empfangene Leistung P_R hängt demnach von der gesendeten Leistung P_T , der Messdistanz R , der Laserstrahldivergenz γ , der Größe der Empfängerapertur D , dem Rückstreuquerschnitt σ sowie von Faktoren für Systemverluste η_{SYS} und atmosphärischer Dämpfung η_{ATM} ab. P_{BK} schließlich bezeichnet die solare Hintergrundstrahlung, die das Signal-Rausch-Verhältnis verschlechtert.

Der Rückstreuquerschnitt σ umfasst alle Eigenschaften des erfassten Objekts betrifft und kann in die Fläche (A), den Reflexionsgrad des Objekts (ρ) und den Rückstreu-Raumwinkel (Ω) unterteilt werden.

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega} A \rho \quad (4)$$

Kleine Werte von Ω sind bei spiegelnder Reflexion gegeben, z.B. bei Wasser- oder Glasoberflächen. Die meisten natürlichen Ziele (Boden, Gras, Bäume usw.) sowie versiegelte Oberflächen (Asphalt, Beton) streuen das Laserlicht hingegen diffus. Für ideal diffus reflektierende Ziele ($\Omega = 180^\circ$) gilt das Lambertsche (Kosinus)Gesetz. Der Querschnitt hängt außerdem von der beleuchteten Fläche A ab, die eine Funktion der Entfernung R , der Strahldivergenz γ und des Inzidenzwinkels zwischen dem Laserstrahl und der Normalenrichtung der beleuchteten Fläche ist. Während die Laser-Radar-Gleichung im allgemeinen Fall eine Reduktion der empfangenen Leistung mit R^4 zeigt, ist der Signalverlust für Ziele, die vollständig von einem einzigen Laser-Footprint abgedeckt sind, auf R^2 begrenzt, wie Gleichung 3 zu entnehmen ist. Typische Beispiele für solche ausgedehnten Ziele sind Punkte auf offenem Gelände, Straßen oder Gebäudedächern.

Sensorkomponenten

Plattformpositionierung - GNSS

Beim ULS werden 3D-Punkte durch direkte Georeferenzierung ermittelt, bei der die Position und Lage der Plattform mit den Messungen des Laserscanners kombiniert werden. Die Positionierung des UAS basiert hauptsächlich auf globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS), wobei heute Daten aus verschiedenen Systemen wie GPS, Galileo, GLONASS und Beidou gemeinsam genutzt werden.

Für UAS-Anwendungen wird GNSS in zweierlei Hinsicht genutzt: (i) Eine Basisstation mit bekannten Koordinaten in einem genau definierten Referenzsystem (z.B. WGS84 oder ETRS89) dient als Grundlage für Vermessungen mit cm-Genauigkeit, und (ii) das UAS selbst nutzt GNSS zunächst, um zu Wegpunkten zu navigieren und vordefinierte Routen unter Verwendung von Echtzeit-Kinematik-Korrekturen (RTK) zu fliegen, die entweder von der Basisstation oder von einem GNSS-Netzwerkbetreiber gesendet werden, und zweitens, um die rohen GNSS-Signale zur Berechnung einer Single Best Estimate Trajectory (SBET) in der Nachbearbeitung aufzuzeichnen.

In jedem Fall besteht das GNSS-Gerät aus einer Antenne und einem Empfänger. Für Basisstationen werden hochwertige Choke-Ring- oder Radom-Antennen verwendet, die eine gute Unterdrückung von Mehrwegeeffekten bieten, was für bodengestützte Installationen wichtig ist. Auf dem UAS werden leichtere und kostengünstigere Antennentypen verwendet. Patch-Antennen sind klein und kostengünstig und werden daher immer dann eingesetzt, wenn die Genauigkeitsanforderungen moderat sind. In den meisten Fällen werden für UASs Helix-Antennen verwendet. Sie haben eine typische zylindrische Form, und die eigentliche Antenne ist ein spiralförmig gewickelter Draht. Helix-Antennen bieten einen omnidirektionalen Signalempfang, wodurch sie anfällig für Mehrwegeeffekte sind. Dies spielt jedoch keine große Rolle, da sich die Plattform in der Luft befindet. Auf der Empfängerseite stehen entweder (i) Einfach-, (ii) Doppel- oder (iii) Mehrfrequenzgeräte zur Verfügung. Dies bezieht sich auf die Fähigkeit des Empfängers, die einzelnen GNSS-Frequenzen (L1, L2, L5) gleichzeitig zu empfangen. Mehrfrequenzempfänger sind leistungsfähiger als Einfach-

und Doppelfrequenzgeräte, die dafür wiederum kostengünstiger sind. Ein wichtiger Parameter ist die Messfrequenz. Heute sind Frequenzen von 1-10 Hz üblich. Zu den Herstellern von GNSS-Geräten für UASs gehören beispielsweise uBlox und Septentrio. Je nach Qualität der Komponenten liegen die absoluten Koordinatenunsicherheiten der nachbearbeiteten Flugbahnpositionen zwischen etwa 3 und 10 cm, sofern keine Abschätzung des GNSS-Signals vorliegt, was bei 3D-Erfassung von Gebäuden vorkommen kann.

Plattformausrichtung - IMU

Neben der Position muss auch die Lage der Plattform jederzeit genau bekannt sein. Inertial Measurement Units (IMU) messen kontinuierlich die Bewegung der Plattform mit Hilfe von (i) einem Gyroskop, (ii) einem Beschleunigungsmesser und (iii) optional einem Magnetometer. Gyroskope messen die Winkelgeschwindigkeit (d.h. die Rotationsgeschwindigkeit) um drei Achsen. Die Integration der Winkelgeschwindigkeit über die Zeit ergibt die tatsächlichen Orientierungswinkel, z.B. Roll-, Nick- und Kurswinkel. Beschleunigungsmesser messen wiederum die lineare Beschleunigung (d.h. die Geschwindigkeitsänderung), ebenfalls entlang der drei Achsen. Die doppelte Integration der Beschleunigungsmessungen ergibt Positionen in Bezug auf den Navigationsrahmen (z.B. Nord/Ost/Unten), sodass der IMU-Beschleunigungsmesser die GNSS-basierte Positionierung unterstützt. Das optionale Magnetometer wird zur Korrektur des Kurswinkels mit dem Erdmagnetfeld verwendet. Im Allgemeinen haben IMUs eine Messfrequenz von 100-1.000 Hz. Je höher die IMU-Frequenz, desto besser können hochfrequente Schwingungen der Plattform erfasst werden. Hohe IMU-Taktraten sind dabei vor allem im Hinblick auf die nochmals um mehrere Größenordnungen höheren Pulswiederholraten von Bedeutung. Eine Unterabtastung der Drehwinkel führt direkt zu Koordinatenfehlern in der finalen 3D-Punktwolke.

Im Allgemeinen werden zwei verschiedene IMU-Konzepte verwendet: (i) faseroptische Systeme und (ii) MEMS-basierte IMUs. Faseroptische IMUs sind präziser, aber auch teurer und schwerer. Daher werden für UAS-LIDAR überwiegend MEMS-basierte IMUs verwendet, da sie kompakt, leicht und kostengünstig sind. Darüber hinaus kann die Genauigkeit durch strenge Kalibrierung und den parallelen Einsatz mehrerer MEMS-IMUs erhöht werden. Die Beschleunigungsmesser verwenden winzige, an Federn aufgehängte Testmassen, deren Auslenkung durch kapazitive Sensoren gemessen wird. Die Gyroskope verwenden vibrierende Strukturen (Stimmgabeln), die einer Coriolis-Kraft ausgesetzt sind, sobald sich der Sensor/die Plattform dreht. Dies führt zu einer messbaren Verschiebung, die proportional zur Winkelgeschwindigkeit ist. Glasfasergyroskope wiederum nutzen Lichtinterferenzen im Faserbündel zur Messung der Drehgeschwindigkeit.

Unabhängig davon, welche Technologie verwendet wird, besteht die endgültige 6-Freiheitsgrade-Trajektorie (6-DoF) aus Positionen (x, y, z) und Orientierungen (Roll, Pitch, Heading), die über die Zeit (t) parametrisiert sind, und wird durch die Fusion von GNSS- und IMU-Messungen in der Nachbearbeitung, typischerweise unter Verwendung von Kalman-Filtern, erreicht. Die Integration von GNSS-Beobachtungen ist notwendig, da IMUs nur relative Messungen liefern und sich die Fehler bei der Integration über die Zeit hinweg summieren (Drift). Die erreichbaren Genauigkeiten liegen im Bereich von $0,015^\circ$ für die Roll- und Nickwinkel, $0,035^\circ$ für den Kurswinkel und etwa 2-5 cm für die Position. Glasfaseroptische IMUs übertreffen MEMS-basierte IMUs in Bezug auf die Genauigkeit im Allgemeinen. Andererseits bieten MEMS-basierte IMUs oft höhere Messraten und eignen sich daher besser zur Erfassung hochfrequenter Plattformbewegungen.

Entfernungsmessung

Die Laser-Entfernungsmessung erfolgt entweder direkt in der Empfängerelektronik auf der Grundlage von Triggerschwellenwerten (diskrete Echosysteme) oder durch Digitalisierung des gesamten zurückgestreuten Echopulses und durch Erkennung einzelner Echos innerhalb der abgetasteten vollständigen Echowellenform (full waveform). Letzteres kann entweder online im Gerät oder in der Nachbearbeitung erfolgen, wenn die Wellenform zusätzlich auf Festplatte gespeichert wird. Beide Technologien sind auch für UAS-LIDAR verfügbar. Geräte für den Vermessungseinsatz mit einem einzigen Transceiver arbeiten häufig auf der Grundlage von vollständiger Wellenformdigitalisierung, während Multibeam-Sensoren in der Regel diskrete Echoerkennung verwenden.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Sensoren für Vermessungszwecke und Sensoren für Anwendungen mit geringerem Genauigkeitsanspruch ist die verwendete Lasertechnologie. Im Allgemeinen kann die Entfernungsmessung mit relativ kostengünstigen Diodenlasern und teureren Festkörper- oder Faserlasern durchgeführt werden. Diodenlaser, die häufig in der Automobilindustrie eingesetzt werden, emittieren Laserstrahlung mit einer Wellenlänge von 905nm (nahes Infrarot). Der Vorteil dieser Wellenlänge besteht darin, dass Standard-Siliziumdetektoren verwendet werden können, was die LIDAR-Sensoren kostengünstig macht. Im Hinblick auf die Augensicherheit ist die Verwendung einer längeren Wellenlänge, z.B. der von einem Erbium-dotierten Faserlaser erzeugten Wellenlänge von 1550 nm, von Vorteil, da mehr Laserleistung ohne Beein-

trächtigung der Augensicherheit genutzt werden kann. Dies ist besonders relevant für UAS-LIDAR, da die Sensoren in Bodennähe mit typischen Flughöhen von etwa 100 m über Grund betrieben werden. Die Verwendung eines 1550-nm-Lasers erfordert jedoch den Einsatz teurer InGaAs-Fotodioden. Aus diesem Grund werden Faserlaser nur in UAS-LIDAR-Sensoren für Vermessungszwecke eingesetzt, die eine höhere Spitzenleistung, eine bessere Strahlqualität, eine geringere Strahldivergenz, eine höhere Pulswiederholrate und eine geringere Pulsdauer bieten, dafür aber auch höhere Kosten verursachen. Diodenlaser sind hingegen nicht nur kostengünstiger, sondern auch kompakter, was für UAS-LIDAR von Bedeutung ist, da die Nutzlast ein wichtiger Faktor ist.

Integrierte Systeme

Die meisten modernen ULS-Sensorsysteme weisen neben der Navigationseinheit und dem Laserscanner auch noch RGB-Kameras auf. Die Kamera wird dabei primär für die Einfärbung der Punktwolke verwendet, kann aber im Falle von hinreichender Qualität auch als separate Datenquelle für photogrammetrische Auswertung verwendet werden. Abbildung 1.1.8 - 6 zeigt ein abschließendes Beispiel einer 3D-ULS Punktwolke einer Waldszene, die einmal in RGB-Echtfarben (a) und farbkodiert eingefärbt nach Reflektanz (b) dargestellt ist.

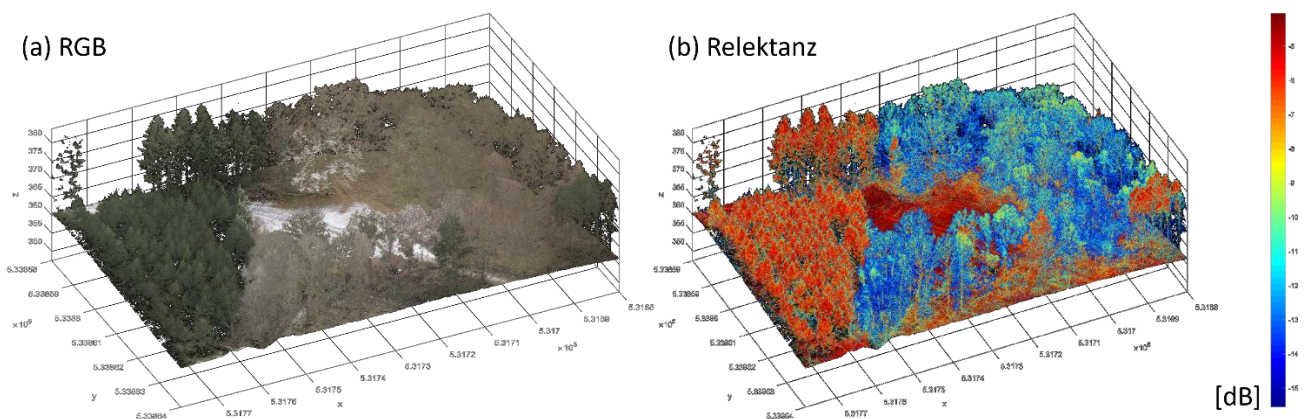


Abbildung 1.1.8 - 6: 3D-ULS-Punktwolke von einer Winterbefliegung eines Waldgebiets;
(a) RGB-Echtfarben; (b) farbkodiert nach Reflektanz in dB

Literatur

- Mandlbürger, G. (2022). UAV laser scanning. In A. Eltner, D. Hoffmeister, A. Kaiser, P. Karrasch, L. Klingbeil, C. Stöcker, & A. Rovere (Eds.), *UAVs for the Environmental Sciences - Methods and Applications* (pp. 199-217). <http://hdl.handle.net/20.500.12708/30759>.
- 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*, 184 (2022), 215-242. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006>.
- Shan, J., & Toth, C. K. (Hrsg.). (2018). *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*, Second Edition. Taylor & Francis.
- Vosselman, G., & Maas, H.-G. (Hrsg.). (2010). *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Großbritannien: Whittles Publishing.

1.2 UAS-Hardware und Sensorik

1.2.1 UAS-Plattformen

Verfasser: Görres Grenzdörffer

Drohnen sehen sehr unterschiedlich aus, lassen sich aber grob in drei Kategorien einteilen: Flächenflügler, die auch als Starrflügler, Fixed-Wing UAS o.ä. bezeichnet werden; Multicopter und seit kurzem auch sogenannte eVTOL-Drohnen (electric Vertical Takeoff and Landing). Letztere sind Flächenflügler, die in der Start- und Landephase ihre Rotoren umklappen und so senkrecht starten und landen können. Vollautomatische Drohnen auch als „out of the Box“ Drohnen bezeichnet, stellen zwar keinen eigenen Drohnentyp dar, verfügen aber dennoch über sehr spezifische Eigenschaften, auf die noch spezieller eingegangen wird.

Daneben gibt es noch Modellhelikopter, Drachenflügler, Ballons und Prallluftschiffe, die in der Praxis aber keine Rolle spielen und deshalb hier auch nicht weiter erläutert werden. Gemäß ihren Eigenschaften sind die verschiedenen Fluggeräte für unterschiedliche Zwecke bzw. Anwendungsfelder prädestiniert. Tabelle 1.2.1 - 1 vergleicht die unterschiedlichen Drohnentypen nach verschiedenen Kriterien.

Fast alle der verkauften Drohnen in Deutschland sind Multicopter, der Rest verteilt sich auf Flächenflügler und die anderen genannten Fluggeräte. Warum ist das so?

Das ist im Wesentlichen auf drei Faktoren zurückzuführen:

1. Multicopter sind preiswert
2. Multicopter sind leicht zu fliegen, verfügen oft über eine Hinderniserkennung und können überall starten und landen.
3. Multicopter sind flexibel, können auf der Stelle schweben und gezielt sowohl Videos als auch Fotos erzeugen.

Diese Eigenschaften sind für private als auch kommerzielle Nutzung fast immer ausschlaggebend.

Multicopter. Moderne Multicopter sind technisch ausgefeilte Fluggeräte, die sich leicht steuern lassen, Hindernissen ausweichen und verwackelungsfreie hochauflösende Bilder bzw. Videos erstellen können. Damit ein Multicopter automatisiert seine Position halten und in alle Richtungen fliegen kann, braucht es mehrere Sensoren und eine ausgefeilte Technik. Angetrieben wird der Multicopter von 4 bis 8 Rotoren. Die Rotoren sind, im Gegensatz zum Helikopter, starr und unbeweglich. Die Steuerung der Drohne wird nur durch die Regelung der einzelnen Rotoren umgesetzt, die einzeln angesteuert werden und sich für die Fortbewegung mit unterschiedlicher Geschwindigkeit drehen. Dabei drehen sich die gegenüberliegenden Rotoren immer in der gleichen Richtung.

Damit Multicopter auch bei Wind stabil in der Luft liegen und ihre Position halten können, sind inertielle Messsysteme verbaut, die kontinuierlich die Beschleunigungen und Winkelveränderungen in allen Achsen messen. Auf Grundlage dieser Daten werden dann bei Wind die Drehgeschwindigkeiten der einzelnen Rotoren laufend automatisch angepasst und die Drohne in der Schwebelage gehalten. Die Flugzeit eines Multicopters wird durch die Kapazität der Batterie und das Gewicht der Drohne inklusive ihrer Nutzlast limitiert.

Multicopter können üblicherweise in verschiedenen Modi geflogen werden. Zum einen im so genannten „ATTI-Modus“ bei dem die Drohne sich automatisch stabilisiert und die Höhe hält, allerdings ohne eine Kompensation des Windes vorzunehmen. In einer normalen Umgebung ist der ATTI-Modus allerdings nur in Notfällen sinnvoll z.B., wenn das GNSS versagt oder maximaler Schub von Nöten ist.

Bei Flügen im so genannten First Person View (FPV), bei der der Pilot eine spezielle Brille trägt, die ihm die Perspektive der Drohne einblendet, wird der Acro-Modus (von akrobatisch) verwendet, d.h. der vollständig manuelle Flugmodus. D.h. es gibt keine automatische Stabilisierung und keine künstlichen Neigungslimits und die Drohne behält jede Fluglage bei, bis der Pilot aktiv gegensteuert.

Normalerweise wird ein Multicopter im GNSS-Modus geflogen, bei dem die Drohne mit Hilfe des GNSS ihre Position in der Luft hält. Sie ist dadurch sehr leicht zu steuern, da man auch in schwierigen Situationen einfach die Steuerhebel loslassen kann und die Drohne bleibt erst einmal in der Luft stehen, bevor man zum nächsten Flugmanöver ansetzt. Der GNSS-Modus ist auch eine zwingende Voraussetzung für automatisierte und systematische Flüge, da die Drohne entlang definierter Wegpunkte bzw. Koordinaten ihren Weg findet. Moderne Drohnen verfügen darüber hinaus auch noch um weitere Modi, z.B. das Umkreisen oder Verfolgen eines getrackten Objekts.

Tabelle 1.2.1- 1: Vergleich verschiedener Drohnentypen

	Flächenflügler	Multicopter	eVTOL-Drohnen
Technik			
Handling/Kalibrierung	einfach	einfach	einfach
Steuerbarkeit	++	++	++
Hinderniserkennung	teilweise	oft vorhanden	nein
Wind Resistenz im Flug	+	+	+
Wind Resistenz (Start und Landung)	o	+	o
Robustheit	++	+	++
Flugdauer	++	o	++
Kosten			
Kosten (Anschaffung)	++	- bis +	++
Laufende Kosten	+	o	+
Reparaturkosten bei Absturz	o	++	+
Anwendung			
Geschwindigkeit und Flächenleistung	++	o	++
Mindestflughöhe	+	-	+
Videotauglichkeit	-	++	-
Gimbalausstattung ¹⁾	selten	Standard	selten
Nutzlast im Verhältnis zum Gewicht	++	+	+
Start- und Landung	Landebahn	überall	überall im ländlichen Raum

Bewertungsskala: -- = sehr gering; - = gering; o = mittel; + = hoch; ++ = sehr hoch

¹⁾ Bei einem Gimbal handelt es sich um eine motorisierte kardanische Aufhängung für die Drohnenkamera zur Bildstabilisierung.

Flächenflügler sind fast ausschließlich im gewerblichen Einsatz zu finden. Sie sind zwar wesentlich unflexibler als ein Multicopter, können aber auf anderen Gebieten punkten, die insbesondere für die Land- und Forstwirtschaft von Bedeutung sind. So ist die Flächenleistung größer, da sie schneller fliegen können und die Batterien aufgrund des eigenen Auftriebs eine wesentlich längere Flugzeit ermöglichen.

Flächenflügler sind im Handling in der Regel sehr einfach zu bedienen, da der gesamte Flug in der Regel vorab programmiert wird und dann vollautomatisch erfolgt, d.h. der Pilot greift nur in Ausnahmefällen während des Fluges ein. Damit Flächenflügler nicht abstürzen, benötigen sie immer eine bestimmte Geschwindigkeit relativ zu ihrer umgebenden Luft. Die Luftgeschwindigkeit wird mit einem Pitotrohr gemessen. Um bei (Rücken)Wind nicht zu schnell zu fliegen und die minimalen Auslöseintervalle zu unterschreiten sind die Flugstreifen immer quer zur Windrichtung zu orientieren. Um den dann auftretenden Seitenwind zu kompensieren, dreht sich der Flächenflügler mit seiner Nase in den Wind. Die Bilder sind dann leicht verdreht, was aber bei der anschließenden Datenprozessierung kein Problem darstellt. Um Gewicht zu sparen, haben Flächenflügler keine Videokameras an Bord, so dass sie im Allgemeinen ohne einen Gimbal ausgestattet sind.

Unter praktischen Gesichtspunkten ist der große Platzbedarf der Drohne bei der Landung das größte Problem. Die Landung der meisten Flächenflügler ist ein mehr oder weniger kontrollierter Absturz, bei der die Drohne in einem vorher definierten Gebiet von ca. 20 x 30 m eine Bauchlandung macht. Damit die Drohne mit minimaler Geschwindigkeit aufsetzt, muss die Landung entgegen der vorherrschenden Windrichtung

erfolgen. Das bedeutet, dass in dieser Richtung auch keine hohen Bäume oder Gebäude stehen dürfen, mit der die Drohne im Landeanflug kollidieren könnte. Um die Drohne und die Kameras vor Schaden zu bewahren, sollte ein weicher Untergrund wie z.B. eine Wiese oder ein Getreidefeld gewählt werden. Die überwiegend professionell genutzten Fluggeräte werden mittlerweile fast immer mit hochwertigen GNSS verkauft, die eine RTK-/PPK-Funktionalität (vgl. Kap. 1.2.1.6) ermöglichen, da diese Fluggeräte nur so effizient hochgenaue Geodaten liefern können.

eVTOL-Drohnen gibt es in unterschiedlichen Bauarten. Eine Tailsitter-Drohne z.B. startet und landet senkrecht „auf dem Heck“ stehend. Nach dem Start kippt sie in die horizontale Fluglage und fliegt dann wie ein Flächenflugzeug. Die gleichen Propeller und Motoren werden meist sowohl für den Senkrechtfly als auch für den Vorwärtsflug genutzt. Dadurch ist die Konstruktion oft leichter und mechanisch einfacher, aber die Übergangsphase zwischen Vertikal- und Horizontalflug ist anspruchsvoll. Demgegenüber sind Fixed-Wing-VTOLs herkömmliche Starrflügler, die senkrecht starten und landen können. Viele Fixed-Wing-VTOLs haben dafür zusätzliche Hubmotoren für Start und Landung und einen separaten Antrieb für den Vorwärtsflug. Das bedeutet, beim Start und der Landung einer eVTOL-Drohne werden die Rotoren nach oben geklappt und die Drohne startet und landet wie eine Multicopter.

Unabhängig von der Bauart verringert sich die Problematik des großen Platzbedarfs bei Start und Landung. Die kontrollierte Landung schützt auch die Nutzlast. Gleichwohl ist eine eVTOL-Drohne bei Start und Landung bei weitem nicht so flexibel wie ein Multicopter, der unterschiedliche Windrichtungen und Windstärken in Sekundenbruchteilen kompensieren kann. Deshalb wird bei diesen Fluggeräten der maximal zulässige Wind auch mit zwei Werten angegeben. Einem höheren Wert beim Flächenflug - vergleichbar mit einem Flächenflügler - und einem geringeren Wert, der beim vertikalen Start und Landung sowie dem Übergang vom Schwebeflug in den Streckenflug zu beachten ist.

Um die Vorteile der großen Flächenleistungen von Flächenflüglern bzw. eVTOL-Drohnen richtig zu nutzen, die bei einer Flughöhe von 120 m durchaus 400 bis 600 ha je Batterieladung betragen kann, sind diese Fluggeräte für Missionen außerhalb der Sichtweite (BVLOS) prädestiniert, was nur in der Specific Category möglich und in Deutschland regulatorisch herausfordernd ist.

Docks für autonome Flüge. Der Begriff „Out of the Box“-Drohnen (oft auch Drone-in-a-Box oder Autonomous Drone Box Systems) bezeichnet vollautomatisierte Drohnensysteme, bei denen Drohne, Landeplattform, Ladestation, Wetterschutz und Steuerungssoftware in einer geschlossenen Box integriert sind. Diese Systeme sind für dauerhaften Betrieb ohne Personal vor Ort ausgelegt und werden häufig zur Überwachung kritischer Infrastruktur, aber auch zur Verkehrs- und Baustellenüberwachung eingesetzt.

Ein typisches System besteht aus einer Drohne (meist Multikopter mit RTK-GNSS) und einer Box bzw. Dockingstation, die diese vor Witterungseinflüssen schützt (Regen, Schnee, Staub). Die Box verfügt über eine automatische Ladeeinheit (Kontakt- oder Induktivladung) und ein Kommunikationsmodul, um die Drohne ansprechen und steuern zu können. Die Steuerung der Drohne erfolgt in der Regel extern und cloudbasiert. Die Systeme verfügen über umfangreiche Fail-Safe-Systeme, die ein Return-to-Box z.B. bei Verbindungsverlust, niedrigem Akkustand oder einer Wetterverschlechterung auslösen. Die Drohnen sind grundsätzlich BVLOS-fähig, entsprechende Genehmigungen und UTM-Systeme vorausgesetzt. Die Vorteile gegenüber „normalen“ Drohnen liegen zum einen in der Möglichkeit, einen kostengünstigen 24/7 autonomen Betrieb zu organisieren, der keine Anwesenheit von Personal nötig macht und zu anderen in den schnellen Reaktionszeiten, die z.B. für einen Feuerwehreinsatz notwendig sind. Für kontinuierliche Überwachungs- und Vermessungsaufgaben zeichnen sich die Aufnahmen durch eine standardisierte Datenqualität aus, die durch reproduzierbare Flughöhen, Blickwinkel und anderen konstanten Sensorparametern zu besseren Zeitreihen- und KI-Analysen führen können.

Trotz vieler Vorteile gibt es auch Einschränkungen. Da sind zum einen die hohen Investitionskosten und die begrenzte Flexibilität bei Ad-hoc-Missionen zu nennen. Nicht zuletzt ist der Einsatz auch von einer durchgehenden Mobilfunkabdeckung abhängig. Größtes Problem sind aber regulatorische Hürden, um die erforderlichen BVLOS-Betriebsgenehmigungen zu erhalten. Da der zeitliche Vorlauf für eine Genehmigung in Deutschland aktuell gerne ein Jahr oder auch etwas mehr in Anspruch nehmen kann, werden viele Systeme nur zusammen mit einer entsprechenden Genehmigung verkauft.

Kurzgefasst: „Out of the Box“-Drohnen sind keine „besseren“ Drohnen, sondern ein anderes Systemkonzept: weg vom manuellen Einzelbetrieb und hin zu autonomen, skalierbaren Luftdatendiensten.

1.2.1.1 Marktüberblick

Die chinesische Firma DJI ist mit einem globalen Marktanteil von ca. 70 bis 80 % auch in Deutschland Marktführer und bietet verschiedene Drohnen, die als Einsteigermodelle in Frage kommen. Zu nennen ist hier z.B. die Mavic Mini 5 bzw. Mavic 4 Pro. Für den professionellen Vermessungseinsatz kommen Drohnen der Matrice 4 Enterprise Serie und die Matrice 400, die mit verschiedenen Nutzlasten ausgestattet werden kann, in Frage. Daneben bietet die Firma Parrot aus Frankreich auch speziell für die Vermessung zugeschnittene Produkte an, z.B. Parrot Anafi AI™. Weitere Alternativen bieten z.B. Drohnen der chinesischen Firma Autel. Im Bereich der VTOL-Systeme bieten Produkte der Firmen Quantum Systems GmbH und Wingtra AG interessante Alternativen. Daneben gibt es noch eine Fülle anderer Drohnen weniger namhafter Hersteller, die von der EASA⁷ in Europa in den verschiedenen Kategorien zugelassen sind.

1.2.1.2 Eigenschaften und Einsatzszenarien

Bei der Kaufentscheidung für eine Drohne spielen mehrere Aspekte eine Rolle. Zuerst natürlich, wofür soll die Drohne eingesetzt werden und wie viel Erfahrung wird eingebracht. Tabelle 1.2.1.2 - 1 vergleicht die wichtigsten Anforderungen an eine Drohne für zwei verschiedene Nutzungsszenarien.

Eine Einsteigerdrohne für den täglichen Gebrauch durch den Vermesser:

- Die Drohne sollte klein und leicht sein, damit sie überall hin mitgenommen und auch im urbanen Raum geflogen werden kann.
- Die Bedienung sollte möglichst einfach und intuitiv sein.
- Schwerpunkt der Nutzung ist beispielsweise die Inspektion von Flächen und Gebäuden, die Dokumentation von Schäden, Baufortschritt oder der Topographie usw.
- Ein automatischer Flug entlang einer vorab programmierten Flugroute sollte möglich sein, um Bilder auch photogrammetrisch prozessieren zu können.

Eine Profidrohne für ambitionierte Vermesser bzw. Dienstleister:

- Wichtig sind hier große Flächenleistung, möglichst vollautomatischer Flugbetrieb, hohe Wind- und Wetterresistenz für maximale Flugstunden und ein performanter photogrammetrischer Workflow zur Auswertung von Farbluftbildern, multispektralen Daten oder Laserscans.
- Die aus den Bildern abgeleiteten hochgenauen digitalen Orthophotos und digitalen Geländemodelle sollen beispielsweise in der Ingenieur- und Landesvermessung eingesetzt werden können.

Gerade bei Einsteigermodellen und wenn viel Freiflug geplant ist, ist die automatische Hinderniserkennung von großer Bedeutung, um mögliche Kollisionen mit Bäumen etc. zu vermeiden und die Lebensdauer der Drohne entscheidend zu verlängern. Die Hinderniserkennung moderner Geräte geht sogar so weit, dass etwaige Hindernisse, z.B. beim automatischen Heimflug mehr oder weniger automatisch umflogen werden.

Für den Freiflug ist eine zuverlässige Übertragung der Drohnenperspektive auf das Display der Drohnensteuerung ebenfalls ein Muss. Schließlich will man auch sehen, was die Drohne sieht, bzw. wohin sie fliegt. Für die Navigation ist zudem die Ausrichtung einer Drohne schon bei Entfernungen von 100 m mit dem Auge oft schwer auszumachen. Über das Display hingegen ist die Drohne immer noch sicher innerhalb der Sichtweite zu steuern.

Die Return-to-Home Funktion (RTH) ist ebenfalls nicht nur praktisch, sondern als schnelle Reaktion bei etwaigen Problemen ein echter Zugewinn an Sicherheit. Eine Flugzeit von 20 bis 30 Minuten ist völlig ausreichend, um sich die Umgebung innerhalb der Sichtweite anzuschauen und auch die eine oder andere Flächenvermessung durchzuführen. Beim Kauf einer entsprechenden Drohne ist darauf zu achten, dass diese für systematische Bildflüge auch durch eine externe Software gesteuert werden kann.

Der gravierendste Unterschied gegenüber einem Profisystem ist die Kamera, die bei der Einsteigerdrohne für die Aufnahme von Videos optimiert ist, d.h. es ist eine Digitalkamera mit Active-Pixel-Sensoren (Sensortyp CMOS - Complementary Metal-Oxide Semiconductor) mit einem digitalen Verschluss (Rolling Shutter Effekt) und einer Optik mit Superweitwinkel. Gleichwohl können die systematischen Anteile der inneren Orientierung im Zuge der Datenprozessierung weitestgehend modelliert und kompensiert werden. Der andere Unterschied ist die RTK-GNSS Funktionalität, die bei einem Profisystem eine nahezu vollautomatische passpunktlose Georeferenzierung ermöglicht, was für alle Arten für Vermessungen und multitemporale Anwendungen unabdingbar ist.

Tabelle 1.2.1.2 - 1: Vergleich typischer Eigenschaften und Funktionalitäten einer Einsteigerdrohne vs. einer Profidrohne für Vermessungsanwendungen

	Einsteigerdrohne	Profisystem
Preis (o. MwSt.)	600 - 2.000 €	5.000 - 30.000 €
Drohntyp	Multicopter	Multicopter/Dock/Flächenflügler/eVTOL-Drohne
Gewicht	<250 g - 900 g ¹⁾	900 g - 10 kg ²⁾
Flugzeiten	20 - 30 min	30 - 90 min
Reichweite Controller	1 - 2 km	2 - 10 km
Nutzlast - Kamera	klein und leicht, problematisch bei wenig Licht, elektronischer Shutter, Kamera optimiert für Video, 4/8 K-Video	digitale Spiegelreflexkamera, hohe Bildqualität, global Shutter, Kamera optimiert für Einzelbilder, optional Multispektral-/Thermalkamera, ggf. Dualkamera oder Laserscanner
Flexible Nutzlast	nein - fest verbaute Kamera	ja - unterschiedliche Kameras/Sensoren möglich
Übertragung Livebild auf Controller	ja	nur bei Multicopter
Übliche Sicherheitsfeatures	Coming Home, Notlandung, Hinderniserkennung, automatischer Start, automatische Landung	Coming Home, Notlandung, (Hinderniserkennung), automatischer Start, automatische Landung, Redundanz, Fallschirm, ADS-B (in/out)
RTK-GNSS	nein	ja
Flugplanungssoftware für automatischen Flug	Teilweise, externe Software, z.B. Pix4D capture app, DroneDeploy,	integrierte Software, i.d.R. 3D
Anbindung an Auswertesoftware	möglich	Anbindung an eine oder mehrere Softwareprogramme
Laufende Kosten z.B. Batterie Wartung, Reparatur	gering bis mittel	mittel bis hoch
Transport/Logistik	klein, handlich, immer dabei	Kofferraum
Führerschein	A1/A3 (A2)	A2 (inkl. STS)

¹⁾ C0 - C1 klassifizierte Drohnen

²⁾ C1 - C6 klassifizierte Drohnen

1.2.1.3 Flächenleistung einer Drohne

Ein wichtiges Kriterium ist die Flächenleistung einer Drohne, wobei die Herstellerangaben nicht so einfach miteinander vergleichbar sind. Die Flächenleistung einer Drohne hängt von verschiedensten Faktoren ab. Da sind z.B. die Batterielaufzeit, die Fluggeschwindigkeit, die Flughöhe, die Längs- und Querüberlappung, das minimale Auslöseintervall und die Brennweite der Kamera und einige andere Faktoren, wie die Form des Fluggebiets, die Entfernung des Gebiets vom Start- und Landepunkt zu nennen. Man muss also die genauen Rahmenbedingungen kennen, um die Flächenleistungen verschiedener Drohnen und Kameras miteinander vergleichen zu können. In den letzten Jahren hat sich die Kameratechnik rasant weiterentwickelt und damit auch die Flächenleistung der Drohnensysteme.

Die effektive Flugzeit je Batterie, d.h. die Zeit, die tatsächlich für einen Bildflug zur Verfügung steht, liegt üblicherweise bei ca. 2/3 der Batterielaufzeit, da bei der Flugplanung immer ein gewisser Puffer für die Start- und Landephase und andere Eventualitäten einzukalkulieren ist. Z.B. ist der Stromverbrauch je nach Windstärke und Außentemperatur sehr unterschiedlich. Bei Flächenflüglern wird zudem ein Teil der Flugzeit für die Wendemanöver zwischen den Flugstreifen benötigt, dieser wiederum schwankt in Abhängigkeit der vorherrschenden Windrichtung und Windstärke. Nicht zuletzt leiten moderne Drohnen bei einer Restleistung von 15 bis 30 % aus Sicherheitsgründen automatisch eine Rückkehr zum Startpunkt ein.

Aufgrund der Fülle der eingangs genannten Faktoren steigt die Flächenleistung nicht linear mit der Flughöhe. Bei niedrigen Flughöhen wird die Flächenleistung durch das minimale Auslöseintervall der Kamera begrenzt. D.h. die Kamera kann bei der vorgegebenen Längsüberlappung die aufgenommenen Bilder nicht rechtzeitig auf die Speicherkarte schreiben, bevor der nächste Auslöseimpuls kommt. Das bedeutet, die Drohne muss langsamer fliegen als sie vielleicht könnte. Dies ist auch einer der Gründe, warum Flächenflügler eine Mindesthöhe von 40 bis 60 m einhalten müssen. Schließlich müssen diese eine gewisse Geschwindigkeit im Medium halten, um in der Luft zu bleiben. Da die Kameras von Flächenflüglern in der Regel nicht mit einem Gimbal stabilisiert werden und gerade leichte Flächenflügler durch Seitenwinde und Böen nicht immer die geplante Flugrichtung halten können und in der Rollachse von der Senkrechten abweichen, ist es notwendig, die Querüberlappung auf 80 % zu erhöhen und dafür die Längsüberlappung auf bis zu 60 % zu reduzieren. Nur so kann die Bildfolgezeit auch bei Rückenwind eingehalten werden.

Bei größeren Flughöhen wird, zumindest bei Multikoptern, die maximale Fluggeschwindigkeit erreicht, so dass die Flächenleistung mit zunehmender Flughöhe langsamer steigt als sie vielleicht könnte. Abb. 1.2.1.3 - 1 verdeutlicht die Zusammenhänge exemplarisch für Multicopter und Flächenflügler bzw. eVTOL-Drohnen.

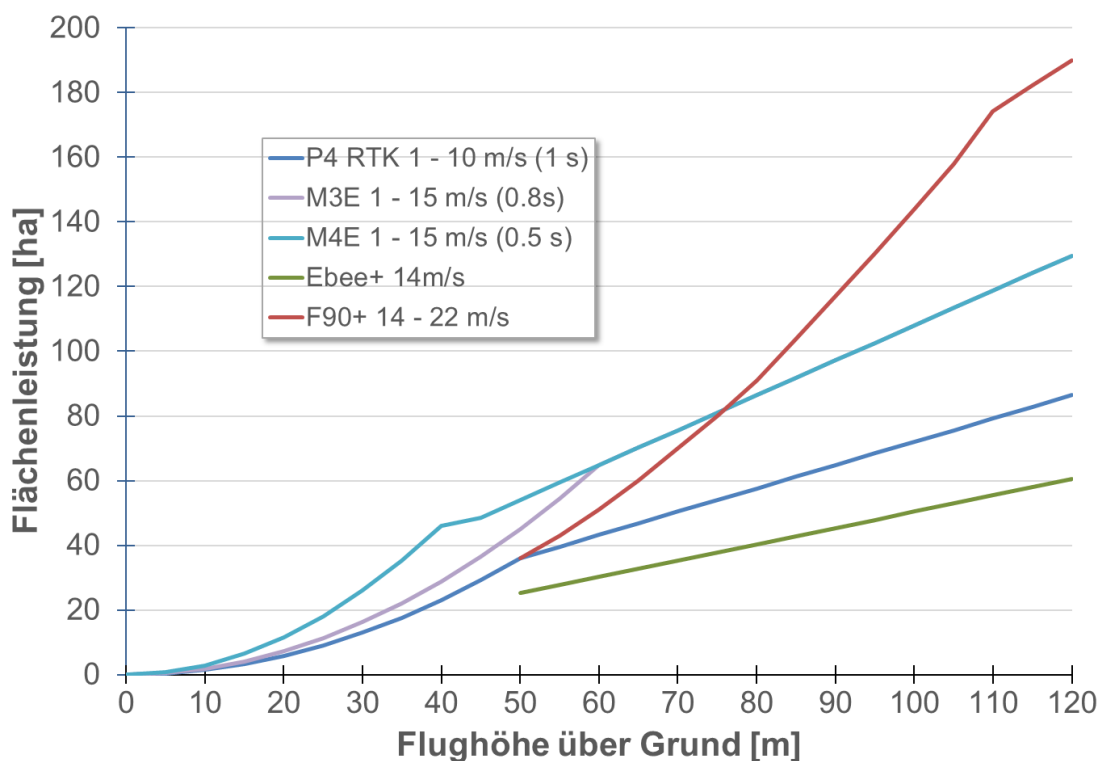


Abbildung 1.2.1.3 - 1: Vergleich der Flächenleistung von Multicoptern und Flächenflüglern in Abhängigkeit der Flughöhe, Fluggeschwindigkeit und minimaler Bildfolgezeit - bei einer effektiven Flugzeit von 20 Minuten, was einer Bruttoflugzeit von ca. 30 Minuten entspricht und der Verwendung einer 20 Mpix Kamera

Für die Multicopter werden in Abbildung 1.2.1.3 - 1 folgende Rahmenbedingungen angenommen: Eingesetzt werden eine DJI Phantom 4 RTK, eine Mavic 3 E bzw. eine Matrice 4 E, die jeweils einen 20 Mpixel-Sensor und eine Brennweite von 8,8 mm haben. Das minimale Auslöseintervall der Kamera der Phantom 4 RTK beträgt 1 Sekunde, das der Mavic 3 E 0.8 Sekunden und das der Matrice 4 E beträgt 0.6 Sekunden. Die vorgegebene Längsüberlappung liegt bei 80 %, die Querüberlappung bei 60 %. Die maximale Fluggeschwindigkeit der Drohne im Automatikmodus beträgt 10 m/s (= 36 km/h) bei der Phantom 4 RTK und 15 m/s (= 54 km/h) bei der Mavic 3 E und der Matrice 4 E. Die effektive Flugzeit wird mit 20 Minuten angenommen.

Bei dem Flächenflügler soll die gleiche Kamera verbaut sein. D.h. auch hier beträgt das minimale Auslöseintervall 1 Sekunde. Um die Flächenleistung beider Fluggeräte besser vergleichen zu können, liegt die effektive Flugzeit auch hier bei 20 Minuten. Die minimale Fluggeschwindigkeit beträgt 14 m/s. Wenn dies dazu führt, dass die Bildfolgezeit nicht ausreicht, muss die Längsüberlappung entsprechend auf 60 % angepasst und die Querüberlappung auf 80 % erhöht werden, um die vorgegebene Gesamtüberlappung einzuhalten. Das Fluggerät kann die Fluggeschwindigkeit dynamisch bis zur maximalen Fluggeschwindigkeit von 22 m/s (= 79,2 km/h) anpassen.

In einem weiteren Fall eines Flächenflüglers wird angenommen, dass dieser mit einer durchschnittlichen Fluggeschwindigkeit von 14 m/s unterwegs ist und eine erhöhte Querüberlappung von 80 % erforderlich ist, um Variationen in der Fluggeschwindigkeit und unpräzise Flugbahnen bei starkem Wind, die zudem noch zu starken Querneigungen führen können, auszugleichen.

Die Graphik verdeutlicht mehrere Dinge ganz anschaulich:

- Die Flächenleistung eines Flächenflüglers, ist erst ab einer Flughöhe von 80 m größer als die eines vergleichbaren Multicopter.
- Der Unterschied zwischen Multicopter und Flächenflügler in der Flächenleistung nimmt mit der Flughöhe zu.
- Langsame Flächenflüglers, die aufgrund fehlender Stabilisierung und unpräziser Flugbahnen bei starkem Wind eine Querüberlappung von 80 % erfordern, weisen eine geringere Flächenleistung auf als ein vergleichbarer Multicopter. Da die Batterielaufzeit eines Flächenflüglers in der Regel deutlich höher ist, fällt dies in der Praxis nicht so ins Gewicht.
- Multicopter sind am flexibelsten, sie können auch in geringer Höhe operieren. Bei niedrigen Flughöhen bis 50 m nimmt die Flächenleistung mit der Flughöhe exponentiell zu, bis die maximale Fluggeschwindigkeit (hier 15 m/s) erreicht wird. Danach nimmt die Flächenleistung linear mit der Flughöhe zu.
- Für eine maximale Flächenleistung eines Multicopters ist die maximale Fluggeschwindigkeit der entscheidende Parameter.
- Aufgrund der Sichtflugregeln kann das Potential der Flächenflügler, gerade dann, wenn die volle Batterielaufzeit von 1 Stunde und mehr genutzt werden soll, nicht voll ausgeschöpft werden, bzw. sie müssen dann unter BVLOS-Regeln fliegen.

Die Flächenleistung von ca. 80 ha pro Batterieladung eines marktgängigen Multicopters bei einer max. Flughöhe von 120 m entspricht einem Flugradius von ca. 500 m. Diese Entfernung kann bei entsprechenden äußeren Bedingungen noch in Sichtflugbedingungen mit einem zusätzlichen Observer überblickt werden. Kurzum, marktübliche Multicopter haben ihr Flächenpotential unter den aktuellen Sichtflugbedingungen eigentlich schon erreicht.

1.2.1.4 Energieversorgung und Autonomie

In den letzten Jahren hat sich für die Stromversorgung von Drohnen weitgehend der Lithium-Polymer (LiPo) Akku durchgesetzt, da er leichter, flexibler und leistungsfähiger ist als ältere Varianten bzw. klassische Lithium-Ionen Akkus. Das führte zu längeren Flugzeiten und besserer Sicherheit bei sinkenden Kosten. Die Energiedichte aktueller Drohnenbatterien ist deutlich gestiegen - von ~150-200 Wh/kg herkömmlicher Lithium-Ionen zu teils 300+ Wh/kg bei modernen Systemen. Dadurch verlängern sich Flugzeiten von ~20-30 Minuten (ältere Modelle) auf teilweise 60 Minuten oder mehr in modernen Drohnen. Vermutlich sind in den kommenden Jahren Energiedichten von 500 - 600 Wh/kg durch Lithium-Schwefel-Batterien (LI-S) zu erwarten.

Die Autonomie moderner Drohnen hat in den letzten Jahren stark zugenommen, d.h. Drohnen sind unter anderem mittlerweile in der Lage, mehr oder weniger autonom ihren Weg zu einem vordefinierten Ziel zu finden, in Umgebungen ohne GNSS zu navigieren oder Objekte zu identifizieren und zu verfolgen. Eine wichtige Grundlage dafür sind eine Fülle von Sensoren, die zum einen zur Navigation und Lageerfassung dienen und diejenigen, die die Umgebung der Drohne abtasten und erfassen. Allgemein gesprochen beschreibt die Autonomie, wie selbstständig eine Drohne ohne menschliches Eingreifen operieren kann. Die Autonomie einer Drohne lässt sich vereinfacht in vier Stufen unterteilen:

Stufe	Beschreibung
0	Manuell gesteuert
1	Stabilisierung und Assistenz (Höhenhaltung, GPS-Position, Atti-Modus)
2	Teilautonom (Waypoint-Flug, automatisches Starten/Landen)
3	Hochautonom (Hindernisvermeidung, adaptive Flugrouten)
4	Vollautonom (Missionsplanung und -durchführung ohne Eingriff)

BVLOS ist der Hauptanwendungsfall autonomer Drohnen, da dieser Flugmodus zusätzliche Herausforderungen bereithält. Z.B. zur Luftraumbeobachtung, um andere Luftverkehrsteilnehmer rechtzeitig zu identifizieren und ggf. sofort darauf reagieren zu können. Auch für Notfallkonzepte ohne Pilotensicht ist ein hoher Grad an Autonomie erforderlich.

1.2.1.5 Gimbals und Stabilisierung

Ein Gimbal ist eine mechanisch-elektronische Stabilisierungseinheit, die eine Nutzlast (z.B. Kamera, Thermal- oder Multispektralsensor, LIDAR) unabhängig von den Bewegungen der Drohne ausrichtet. Ein Gimbal entkoppelt somit Fluglage und Sensorausrichtung. Typisch sind 2-Achs-Gimbals, die die Roll + Pitch-Bewegungen der Drohne kompensieren können, und 3-Achs-Gimbals, die sowohl Roll + Pitch, als auch den Yaw-Winkel kompensieren oder steuern zu können (Standard bei professionellen Drohnen). Damit kann eine Drohne manövrieren, während der Sensor stabil bleibt. Dies ermöglicht unter anderem eine Objektverfolgung unabhängig von der Flugrichtung.

Prinzipiell lassen sich unscharfe Bilder bei Drohnenbefliegungen vermeiden, indem die Belichtungszeit auf ein absolutes Minimum reduziert wird - $1/2.000$ s oder noch kürzer. Das ist aber nicht immer machbar und für Videoaufnahmen gar unmöglich. Deshalb ist ein Gimbal, bzw. die Qualität der Stabilisierung für Bild- und Datenqualität von großer Bedeutung. Ohne Gimbal würde jede Bewegung der Drohne direkt zu Verwacklungen und Bewegungsunschärfen führen. Bei Rolling-Shutter Objektiven verhindert der Gimbal zusätzliche und schwer zu kompensierende geometrische Verzerrungen. Das ist vor allem bei Videoaufnahmen und Aufnahmen unter schwierigen Belichtungsbedingungen, wie z.B. Nachtaufnahmen von essentieller Bedeutung.

1.2.1.6 RTK-/ PPK-Module

Real-Time Kinematic (RTK) ist ein wichtiger Schlüssel für ein Profisystem. Sie ist Voraussetzung für eine direkte, d.h. nahezu passpunktlose Georeferenzierung der Bilder (s. Kap. 1.1.7.1) Das spart gegenüber einer indirekten Georeferenzierung auf der Grundlage von Passpunkten Zeit und Geld, denn Passpunkte müssen vor der Befliegung ausgelegt und mit einem hochwertigen GNSS-Empfänger eingemessen werden und nach der Befliegung wieder eingesammelt werden. Auch das manuelle Markieren der Passpunkte im Rahmen der photogrammetrischen Auswertung entfällt, so dass die Prozessierung der Bilder einer RTK-Drohne vollautomatisch erfolgen kann.

Real-Time Kinematic (RTK) und Postprocessed Kinematic (PPK) sind keine neuen Technologien. Insbesondere RTK-Verfahren werden seit vielen Jahren erfolgreich in der Vermessung eingesetzt. Beide Methoden korrigieren die Position der Äußeren Orientierung der Aufnahmen einer Drohnenbefliegung und machen Passpunkte nahezu überflüssig, so dass absolute Genauigkeiten bis in den cm-Bereich erreicht werden können.

Wenn man jedoch die bei der Drohnenvermessung üblichen Herausforderungen und Umweltbedingungen berücksichtigt, ist es wichtig, den Unterschied zwischen einer PPK-Drohne und einer RTK-Drohne zu verstehen. Tatsächlich kann man durch die Wahl der besten Korrekturmethode Zeit und Projektkosten bei der Auswertung einer Drohnenbefliegung sparen. Zuvor ist ein Blick auf die Funktionsweise der beiden Methoden notwendig, einschließlich ihrer inhärenten Stärken und Nachteile.

Eine RTK-Drohne trägt einen bordeigenen GNSS-RTK-Empfänger, der Daten von verschiedenen Satellitensystemen (dem amerikanischen GPS, dem russischen GLONASS sowie ggf. dem europäischen Galileo und dem chinesischen Beidou) erfasst und diese online mit Daten einer stationären GNSS-Referenzstation verrechnet, um die exakte Position zum Zeitpunkt der Bildauslösung während des Fluges in Echtzeit möglichst genau zu bestimmen. Die GNSS-Satellitendaten der ca. 20 bis 45 Satelliten, die man von einer Stelle aus beobachten kann, sind aufgrund troposphärischer Einflüsse und vieler anderer Fehlerquellen immer mit einem gewissen Fehler behaftet und liefern ohne Korrekturdaten eine maximale Genauigkeit von etwa 1 bis 2 Metern. Die Daten von einer GNSS-Referenzstation, die entweder genau eingemessen am Boden steht oder als Online-Dienst, z.B. SAPOS® auf einem Netz von Referenzstationen aufbaut, müssen in Echtzeit über die Basisstation der Drohne auf die Drohne telemetriert werden. Auf der Drohne wird dann die Korrektur der verschiedenen Satellitensignalfehler durchgeführt und Phasenmehrdeutigkeiten gelöst, wodurch die Genauigkeit der GNSS-Messung auf den cm-Bereich verbessert wird.

Damit alles reibungslos funktioniert, ist im Falle der RTK-Technologie eine ununterbrochene Kommunikation von der GNSS-Referenzstation über die Drohnen-Basisstation bis zur Drohne erforderlich. Die Nutzung eines Online-Referenzdiensts wie SAPOS® setzt dabei einen ausreichenden Handyempfang voraus. Wenn alle Signale korrekt übertragen und verarbeitet worden sind, stehen unmittelbar nach der Landung der Drohne, die Daten, d.h. die exakte Position jeder Aufnahme, mit hoher absoluter Genauigkeit für die Weiterverarbeitung in einer photogrammetrischen Software zur Verfügung. Das ist sehr bequem und spart Zeit. In der Regel werden zur Sicherheit die GNSS-Beobachtungen der Drohne aufgezeichnet, um im Falle eines Signalabbrisses noch eine Postprocessing Option (PPK) zu haben.

Eine PPK-Drohne fliegt ebenfalls mit einem bordeigenen hochgenauen GNSS-Empfänger, der Daten der verschiedenen GNSS-Satelliten kontinuierlich aufzeichnet, um sie gemeinsam mit den GNSS-Referenzdaten zu

verarbeiten. Die Referenzdaten in Form einer Datei im Receiver Independent Exchange Format (RINEX) können genauso wie bei der RTK-Methode von einer lokalen Referenzstation oder von einem Referenznetzwerk stammen. Im Falle der PPK-Technologie ist weder die Kommunikation von GNSS-Referenzstation zu Drohnen-Basisstation noch die Übertragung der Korrekturdaten von der Drohnen-Basisstation zur Drohne erforderlich. Nach der Landung der Drohne, werden die GNSS-Daten der Drohne mit den GNSS-Daten der Referenzstation kombiniert und ausgewertet. Anschließend werden die optimierten GNSS-Positionen zu den genauen Auslösezeitpunkten der einzelnen Bilder interpoliert und die berechneten äußeren Orientierungen den Bildern zugeordnet und ggf. in die Exchangeable Image File Format-Dateien (EXIF) der Bilder geschrieben. Die dafür notwendige Software kommt in der Regel mit der Drohne. Je nach Hersteller und Projektgröße dauert das Postprocessing für einen Flug 15 bis 30 Minuten. Die Ergebnisse sind prinzipiell genauso genau wie bei der RTK-Prozessierung.

Kurz zusammengefasst: Damit die Drohne im RTK-Betrieb funktioniert, sind vier kontinuierliche Datenströme erforderlich, wie Abb. 1.2.1.6 - 1 verdeutlicht. Im Gegensatz dazu sind bei einer PPK-Auswertung nur zwei Online-Datenströme erforderlich (Abb. 1.2.1.6 - 2). Das erhöht die Zuverlässigkeit.

- ① GNSS-Beobachtungen der Drohne
- ② Bei RTK-GNSS-Beobachtungen der GNSS-Referenzstation bzw. GNSS-Online-Dienst. Bei PPK RINEX-Datei der GNSS-Basisstation bzw. GNSS-Online-Dienst
- ③ Datenlink zwischen GNSS-Referenzstation bzw. GNSS-Online-Dienst und Basisstation der Drohne
- ④ Radiolink für Upload GNSS-Korrekturdaten von der Bodenstation zur Drohne

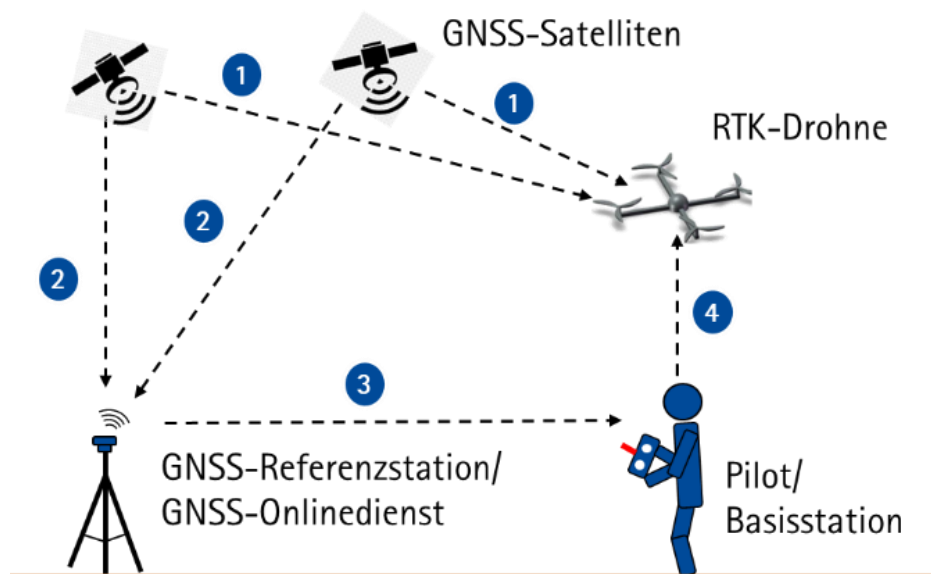


Abbildung 1.2.1.6 - 1: erforderliche kontinuierliche Datenströme für RTK-Betrieb von Drohnen (Real-Time Kinematic)

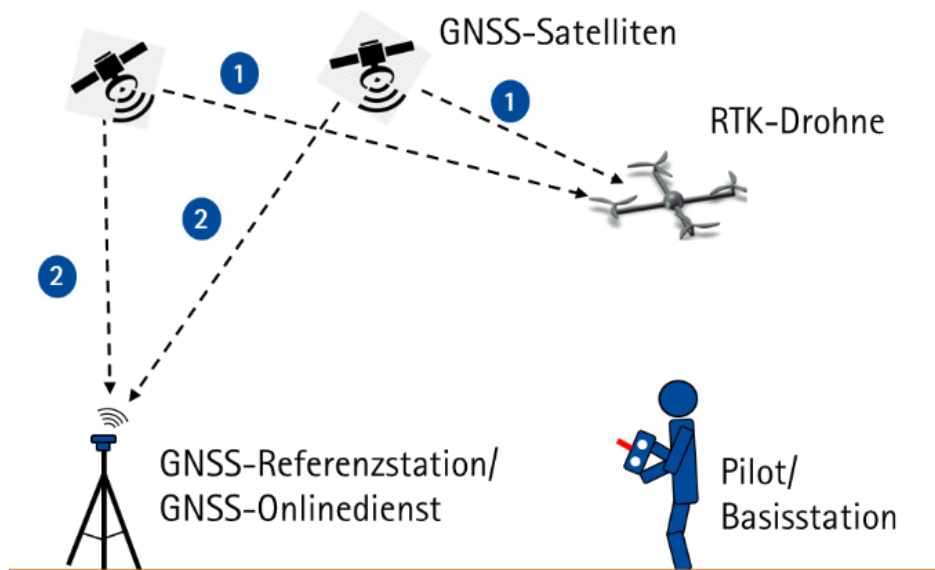


Abbildung 1.2.1.6 - 2: Erforderliche kontinuierliche Datenströme für PPK-Betrieb von Drohnen (Post-Processed Kinematic)

Was ist nun besser: RTK oder PPK? Wenn alles glattgeht, ist das RTK-Verfahren zu bevorzugen. Die Praxis mit verschiedenen RTK-fähigen Drohnen hat aber gezeigt, dass das RTK-Verfahren im ländlichen Raum nicht immer funktioniert und der Nutzer auf alle Fälle in der Lage sein sollte, die PPK-Software zu beherrschen, da z.B. die Telemetrie zwischen der Drohnen-Basisstation und der Drohne oder auch der Handyempfang für die Übermittlung der GNSS-Korrekturdaten nicht immer so kontinuierlich funktioniert, wie man es gerne hätte. PPK ist vor allem bei eVLOS und BVLOS-Flügen das Mittel der Wahl, da die Bandbreite und Zuverlässigkeit der Telemetrie zwischen Basisstation und Drohne mit der Entfernung stark abnehmen.

1.2.1.7 Bodenreferenzpunkte

Bodenreferenzpunkte auch Passpunkte genannt, dienen zur präzisen geometrischen Verortung im jeweiligen Landeskoordinatensystem. Passpunkte werden üblicherweise vor der Befliegung in Form von Platten oder Markierungen auf dem Boden signalisiert und mit einem hochgenauen GNSS-Empfänger eingemessen. Die Größe bzw. Durchmesser der Passpunkte ist abhängig von der Bodenauflösung. Sie sollte im Allgemeinen etwa den zehnfachen Wert der Bodenauflösung betragen, und in der Landschaft gut wieder erkennbar sein (Abb. 1.2.1.7 - 1).



Abbildung 1.2.1.7 - 1: Passpunkte für jede Gelegenheit

Darüber hinaus darf ein Passpunkt nicht durch Bäume etc. in dem einen oder anderen Bild abgeschattet werden. Um Verwechslungen auszuschließen ist es hilfreich, die Passpunktposition im Gelände durch ein Foto zu dokumentieren. Zur Qualitätssteigerung, gerade bei der Verwendung natürlicher Passpunkte, werden diese üblicherweise als Doppelpasspunkte gemessen, um eine fehlerhafte Messung oder Digitalisierung eines Punktes durch seinen in der direkten Nachbarschaft befindlichen Punkt sofort entdecken zu können. Bei den Passpunkten sind mehrere Faktoren zu beachten:

- Die Anzahl der Passpunkte, die sich an der Größe und Form des Bildverbands orientieren muss. Es sind mindestens 6 Passpunkte notwendig. Als Faustzahl sollten pro 100 Bilder zwei zusätzliche Punkte gemessen werden.
- Die Verteilung der Passpunkte. Bei einer 80 %-Längs- und 60 %-Querüberlappung sind Passpunkte vor allem in den jeweiligen Ecken und Rändern des Bildverbands notwendig (Abb. 1.2.1.7 - 2). Bei Nicht-RTK/PPK-Bildverbänden oder auch Aufnahmen einer Kamera mit Rolling Shutter sind zusätzliche Passpunkte in der Mitte des Bildverbands erforderlich, anderenfalls kann dies in der Mitte zu Aufwölbeffekten führen

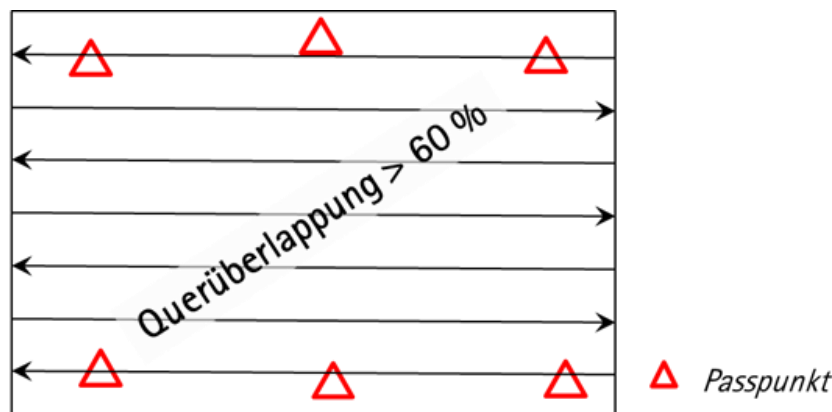


Abbildung 1.2.1.7 - 2: Anzustrebende Passpunktverteilung bei Querüberlappung > 60%

Leider ist das nicht immer möglich, da z.B. unzugängliche Stellen oder Wasserflächen das Setzen von Passpunktmarken an den optimalen Stellen verhindern können. Das bedeutet, dass zusätzliche Passpunkte erforderlich werden oder die Genauigkeit ggf. um die entsprechende Stelle geringer ist.

Genauigkeit, mit der die Passpunkte eingemessen werden: Üblicherweise geschieht dies mit RTK-GNSS-Empfängern, was Genauigkeiten von etwa 1 bis 2 cm in der Lage und 2 bis 3 cm in der Höhe bedeutet. Diese Genauigkeit definiert gleichzeitig auch die „äußere“ oder „absolute“ Genauigkeit“ des Bildverbands. D.h. das einzelne Pixel kann absolut nicht genauer verortet werden als die zugrundeliegende GNSS-Messung. Die „innere“ Genauigkeit des Bildverbands richtet sich nach der Bodenauflösung und kann durchaus genauer sein. Das bedeutet, Strecken können mit einer höheren Genauigkeit gemessen werden. Falls eine höhere äußere Genauigkeit erforderlich ist, d.h. weniger als 1 bis 2 Zentimeter, steigt der Messaufwand bei der Passpunktmessung deutlich an, da dies nur mit einem Tachymeter und entsprechenden geodätischen Verfahren möglich ist.

Die in den Qualitätsreports gemessenen Residuen an den Passpunkten - also die Abweichung zwischen dem durch die Regressionsgleichung vorhergesagten Wert und dem tatsächlich beobachteten Wert in einer Regressionsanalyse - stellen optimistische Werte dar. Um möglichst realistische Werte für erzielte Genauigkeit zu bekommen, sind unabhängige Kontrollpunkte zu signalisieren, die nicht mit in die Ausgleichung eingehen. Es sollten mindestens drei Kontrollpunkte ausgelegt werden. Bei größeren oder unförmigen Befliegungsgebieten ist die Anzahl der Kontrollpunkte zu erhöhen.

Äußere Bedingungen bei der Befliegung: Wie eingangs erwähnt spielen das Licht und die Witterungsverhältnisse bei der Befliegung eine große Rolle. Gerade bei viel Wind und ungünstigen Belichtungsverhältnissen kann es zu Unschärfen oder auch zu verrauschten Bildern kommen, da unter Umständen die Blende weit geöffnet und auf ISO-Werte von 800 und größer gegangen werden muss, um Bewegungsunschärfen und gravierende Unterbelichtungen zu vermeiden.

Das Messobjekt: Der Vermesser ist in erster Linie an der Messgenauigkeit seiner Objekte wie Gebäude, Bordsteine, Feldgrenzen, Hecken interessiert. Diese hängt maßgeblich von der Form und dem Kontrast der jeweiligen Objekte ab. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der Definitionsunsicherheit. Diese kann von Zentimetern (z.B. Gullydeckel) bis zu mehreren Dezimetern reichen (z.B. Hecke).

Die Orthoprojektion: Die erzielbaren Genauigkeitsangaben an Pass- und Kontrollpunkten beziehen sich immer auf einzelne Punkte, die in mehreren Bildern redundant gemessen werden. Koordinaten, Strecken und Flächen werden jedoch von den Endanwendern in der Regel in den abgeleiteten Orthobildern gemessen. Die Qualität bzw. Genauigkeit dieser Gebrauchskoordinaten ist in starkem Maße von der Genauigkeit des zugrundeliegenden Gelände- bzw. Oberflächenmodells abhängig. Der Lageversatz bzw. die Ungenauigkeit in der Position hängt dabei von der Radialdistanz des Objekts von der Bildmitte und der Differenz zwischen der Höhe des digitalen Oberflächenmodells und der tatsächlichen Höhe ab. Gerade bei Bäumen bzw. bei der Bestimmung der Position der Baumkrone können Lageabweichungen im Dezimeterbereich auftreten.

1.2.2 Sensorik

Im Nachfolgenden werden verschiedene optische Nutzlasten mit ihren spezifischen Eigenschaften vorgestellt, die zur Vermessung von Objekten verwendet werden.

1.2.2.1 RGB-Kameras

Verfasser: Michael Cramer

Was macht eine gute Drohnenkamera aus, die für eine weitere photogrammetrische Auswertung gut geeignet sein soll? Idealerweise liegen folgende Auswahlkriterien für eine Drohnen-Kamera zugrunde:

- eine hohe Auflösung des Bildsensors bei möglichst großem Bildformat
- geringes Gesamtgewicht und geringes Gesamtvolumen bei dennoch stabilem Gehäuse
- keine beweglichen Teile wie Bildstabilisierung oder Sensorreinigungssystem in der Optik
- gute Festbrennweiten-Optik mit Zentralverschluss
- manuelle direkte mechanische Fokussierung und eine kabelgebundene Auslösung des Verschlusses
- Weitwinkelobjektiv mit i.d.R. 60° - 80° diagonalem Bildwinkel

Die digitale Kameratechnologie hat in der klassischen Luftbildphotogrammetrie seit ca. dem Jahr 2000 die klassischen großformatigen Filmkameras ersetzt. Im Unterschied zu diesen großformatigen Kameras, die meist mit mehreren Kameras auf einer gemeinsamen Kameraplattform arbeiten, arbeiten UAS-Kameras hauptsächlich mit klassischen Einzelobjektiven, d.h. sie haben einen lichtempfindlichen Sensor und ein Objektiv. Dies schließt die Verwendung mehrerer getrennter Kanäle für die separate Erfassung der Farbbänder aus, es sei denn, die Kamera verwendet einen Strahlteiler und zwei oder ggf. mehrere lichtempfindliche Sensoren, die durch die Verwendung von Farbfiltern für unterschiedliche spektrale Bänder sensibilisiert werden (Bsp. die Leica RCD30 Kamera; Wagner, 2011). In der Regel werden die Farbinformationen durch Verwendung von Bayer-Filtern erfasst (Meißner, 2021).

Da es bei messtechnischen Anwendungen in der Regel um hohe geometrische Genauigkeiten geht, werden Kameras mit kurzer Brennweite (28-50 mm Kleinbildäquivalent bzw. Vollformatsensor) eingesetzt. Die Brennweite bestimmt dabei den Öffnungswinkel und den Schnittwinkel der Strahlen, was die 3D-Punktgenauigkeit beeinflusst. Eine Optik mit 50 mm Brennweite bei Vollformat entspricht dem klassischen Normalwinkel mit knapp 50° diagonalem Öffnungswinkel und definiert damit die untere Grenze. Fischaugenobjektive mit einem diagonalen Bildwinkel von 120° und mehr sind ungünstig, da diese Objektive an den Rändern eine große Verzerrung aufweisen. Diese kann rechnerisch größtenteils kompensiert werden, aber eben nicht komplett.

Die begrenzte Startmasse (MTOM), Kompaktheit und Stromversorgung von UAS schränken die Größe und Leistung der Sensoren ein, weshalb Konzepte großformatiger Luftbildkameras für die bemannte Bildfliegerei nicht direkt übertragbar sind. Bei UAS mit MTOM bis 25 kg sind derzeit Kameras bis etwa 150 Megapixel möglich, während Standard-UAS (< 5 kg) üblicherweise 20-60 Megapixel erreichen.

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 UAS-Plattformen integriert werden können. Die Zugänglichkeit der Rohbilddaten spielt ebenfalls eine Rolle, um die internen und oft unbekannten Verzeichnungskorrekturen zu umgehen.

Optik

Zentraler Bestandteil einer jeden Kamera ist das Objektiv in Kombination mit dem Verschluss. Mit dem zunehmenden Einsatz von UAS für messtechnische Anwendungen haben die Hersteller wichtige Konstruktionsmerkmale herkömmlicher Messkameras auf das Design von UAS-Kameras 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 messtechnische Anwendungen.

Verschluss

Die traditionelle Fotografie kennt mechanische Zentralverschlüsse (between-the-lens shutter) und mechanische Schlitzverschlüsse (focal plane shutter). Beim Zentralverschluss befindet sich der Verschluss im Objektiv und belichtet das Bild gleichzeitig (instantan) über die gesamte Fläche. Der Schlitzverschluss liegt vor dem Sensor und belichtet das Bild zeilenweise durch einen wandernden Schlitz. Dadurch sind i.d.R. kürzere

Belichtungszeiten möglich. Bei längeren Belichtungszeiten und relativer Bewegung zwischen Kamera und aufgenommenem Objekt entstehen Verzerrungen (sog. rolling-shutter-Effekt). In der digitalen Bildaufnahme entsprechen der Global Shutter dem Zentralverschluss und der Rolling Shutter dem Schlitzverschluss. Der elektronische Rolling Shutter verursacht stärkere geometrische Verzerrungen, da das elektronische Auslesen der Zeilen oftmals langsamer erfolgt als beim mechanischen Schlitzverschluss. Der Effekt der geometrischen Verzerrung kann mathematisch modelliert und dadurch zu einem gewissen Grad korrigiert werden (Colomina & Blazquez, 2014; Hinsken et al., 2002; Vautherin et al., 2016).

Frühe UAS-Kameras verwendeten häufig Rolling-Shutter-Sensoren, was bei Bewegung zu Verzerrungen führte. Heute nutzen die meisten messtechnischen Kameras einen Global Shutter. Bei dieser Technik werden alle Pixel gleichzeitig belichtet. High-End-Kamerasysteme verwenden weiterhin einen mechanischen Zentralverschluss oder eine Kombination aus mechanischem und elektronischem Global Shutter. Die Kombination dieser Technologien soll die sogenannte parasitäre Lichtempfindlichkeit reduzieren: Sie verhindert, dass ein geringer Teil des Lichts während des Auslesevorgangs in den Speicherbereich des Sensors gelangt und dort das eigentliche Bildsignal verfälscht.

Bewegungsunschärfe

Bei der UAS-gestützten Bildaufnahme 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 in Abhängigkeit von der Belichtungszeit auf die Schärfe und damit auf die Qualität der Bilddaten aus. Für analoge Luftbildkameras wurde 1982 die Vorwärtsbewegungskompensation (FMC) entwickelt. Dabei wurde der Film während der Belichtung bewegt, um die durch die Flugbewegung verursachte Unschärfe zu reduzieren – ein Prinzip, das heute auch bei Digitalkameras in der bemannten Bildfliegerei angewandt wird (Bewegung des Sensors oder der Ladungen während der Belichtung) (Müller & Neumann, 2016).

Bei UAS-Kameras gibt es keine echte FMC mit beweglichen Sensoren, weshalb die Bodenauflösung bei Starrflügler-Drohnen durch Fluggeschwindigkeit und Verschlusszeit begrenzt ist. Da UAS in geringer Höhe fliegen und eine hohe Auflösung (Sub-Zentimeter-GSD) anstreben, sind kurze Belichtungszeiten entscheidend. FMC wird meist mit stabilisierten Plattformen und Vibrationsdämpfern kombiniert (Full-Motion-Compensation).

Neue Verfahren der digitalen Bildverarbeitung erlauben die nachträgliche Korrektur der Bewegungsunschärfen in zunächst unscharfen Bildern. Dieses setzt aber die präzise Kenntnis der Bewegung der Kamera während der Belichtung und die Geometrie des abgebildeten Objekts voraus (Adaptive Motion Compensation AMC (Dohr et al., 2022)).

Bildqualität

Ein mögliches Qualitätsmaß für die Bildqualität ist das geometrische Auflösungsvermögen, die vom Kamera-Objektiv-System und den Umgebungsbedingungen während der Bildaufnahme (einschließlich des Ausgleichs der Bewegungsunschärfe) abhängig ist. Das geometrische Auflösungsvermögen kann anhand von definierten Auflösungsmustern (Balkenmuster oder Siemensstern) bestimmt werden (Meißner, 2021).

Ein weiteres Gütemaß ist das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), das eher auf die radiometrische Qualität des Bildes ausgerichtet ist. 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 reduzieren kann.

Bildverzerrungen haben zwar keinen Einfluss auf die Bildqualität, sollen aber in diesem Zusammenhang ebenfalls erwähnt werden. Die Korrektur von Verzeichnungen ist ein wesentlicher Bestandteil der photogrammetrischen Auswertung. Deshalb korrigieren einige (vor allem kleine und leichte) Kameras aktueller Drohnen die Objektivverzeichnungen intern durch vordefinierte Modelle vor, um eine höhere Bild-"Qualität" zu erzeugen. Die Bilder sehen verzerrungsfrei aus, obwohl die ursprünglichen Rohbilder starke Verzeichnungseffekte aufweisen. Ein solcher Ansatz verbessert den visuellen Eindruck, aber diese vorkorrigierten Bilder passen möglicherweise nicht mehr zu den 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.

1.2.2.2 Multispektral- und Hyperspektralkameras

Multispektrale Fernerkundung war bis vor wenigen Jahren nur Erdbeobachtungssatelliten und Flugzeugen mit speziellen Multi- oder Hyperspektralkameras vorbehalten. Das hat sich mit der Entwicklung von Drohnen als neue Trägerplattform und der Entwicklung miniaturisierter multispektraler Kameras nachhaltig geändert. Multi- und hyperspektrale Bilder bieten in vielen Bereichen neue Möglichkeiten und Märkte.

Die Unterscheidung zwischen multi- und hyperspektralen Sensoren wird in der Regel über die Anzahl der spektralen Kanäle bzw. Bänder vorgenommen. Bis 16 Kanäle spricht man von Multispektralsensoren. Geräte, die das Spektrum noch feiner abtasten bzw. auflösen, nennt man Hyperspektralsensoren. Während hyperspektrale Sensoren in der Lage sind, die genaue spektrale Signatur eines Objekts zu erfassen, tasten multispektrale Sensoren die Erdoberfläche in mehreren spezifischen, signifikanten Spektralbereichen ab. Somit sind grundsätzlich hyperspektrale Daten aufgrund ihrer fast kontinuierlichen Spektren besser geeignet, um spezielle Material- oder Pflanzeigenschaften, z.B. bestimmte Blattpigmente, Chlorophyllgehalte, zu erkennen. Allerdings geht mit einer Verbesserung der spektralen Auflösung durch eine hyperspektrale Datenerfassung auch eine ungemein komplexere Datenverarbeitung einher, die oftmals nicht zu signifikant besseren Ergebnissen führt, da in den Spektren sehr viel redundante Informationen stecken.

Es gibt mittlerweile eine Reihe von Hyperspektralscannern für Drohnen, vgl. z.B. Adão et al. (2017). Diese sind aber verhältnismäßig teuer und ihr Einsatz ist sehr komplex und immer noch rein wissenschaftlichen Fragestellungen vorbehalten. Aus diesem Grund wird in dieser Veröffentlichung schwerpunktmäßig auf die multispektralen Sensoren eingegangen, für die es kommerzielle und einfach handhabbare Produkte gibt.

Bei den Hyperspektralscannern lassen sich zwei grundsätzlich verschiedene Aufnahmeverfahren unterscheiden. Pushbroom-Scanner (u.a. SPECIM-, Headwall-, Hypex-Kameras) nehmen die spektrale Information lediglich für eine einzelne Bildzeile auf. Die Gesamtaufnahme entsteht erst durch die Relativbewegung zwischen UAS und Messobjekt. Erforderlich sind die Verwendung einer IMU zur Korrektur der Lage und eines Oberflächenmodells. Die mit Pushbroom-Scanner erfassten Daten müssen hinsichtlich der Effekte Spectral Smile und Keystone korrigiert werden. Alternativ wurden auch sogenannte Snapshot-Scanner entwickelt (z.B. Cubert Ultris). Bei diesen Kamerasystemen werden alle Kanäle des räumlich zweidimensionalen Hyperspektralbildes mit geringen Integrationszeiten, wie sie von RGB- und Multispektralkameras bekannt sind, erfasst. Dies eröffnet gegenüber Pushbroom-Scannern erweiterte Möglichkeiten zur Erfassung dynamischer Prozesse und zur photogrammetrischen Rekonstruktion von Punktwolken und Oberflächenmodellen.

Unabhängig von dem verwendeten Sensor gibt es in der Verarbeitung und Analyse multi- und hyperspektraler Daten deutliche Unterschiede zur herkömmlichen Prozessierung von Farbluftbildern, schließlich müssen die Aufnahmen nicht nur geometrisch, sondern auch radiometrisch kalibriert und korrigiert werden.

Bei Drohnen kommen Multispektralsysteme mit mehreren Optiken zum Einsatz. Dies sind einzelne kleine Kameras, die über einen entsprechenden Bandfilter einen definierten Bereich des Spektrums aufzeichnen. Um gegenüber Vibrationen und Bewegungen gefeit zu sein, können nur Kameras mit einem Global Shutter, d.h. einem elektronischen oder mechanischen Verschluss zu Einsatz kommen. Neben der zugrundeliegenden Technologie dürfen Multispektralkameras nur 200 bis 500 g wiegen, um die Traglast von kleineren Drohnen, d.h. solche in der C2-Kategorie, mit einem Abfluggewicht unter den europäischen EASA-Bestimmungen von 4 kg, nicht zu überschreiten. Idealerweise sollen sie auch über einen Sonnenlicht-Sensor verfügen, auf dessen Funktionsweise und Bedeutung im nachfolgenden Abschnitt noch näher eingegangen wird.

Sonnenlichtsensor - Funktionsweise und Bedeutung

Vegetationsoberflächen reflektieren das von der Sonne einkommende Licht nicht gleichmäßig in alle Richtungen wieder zurück. Vielmehr variiert die Reflektion in Abhängigkeit der Richtung des einfallenden Lichtes und der Kamera. Dies wird auch als bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion (BRDF) bezeichnet. Für die Bestimmung der BRDF wird das Reflektanzverhalten der Oberfläche aus verschiedenen Blickwinkeln zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. Sonnenstand bestimmt. Abb. 1.2.2.2 - 1 verdeutlicht den Strahlengang der Sonne und der Oberflächenreflektion zur Kamera. Die Ebene, die durch den Stand der Sonne und durch den Punkt des Interesses (POI) sowie der Horizontalen im POI an der Erdoberfläche definiert ist, wird Principal Plane genannt. Befindet man sich zwischen Sonne und POI, erkennt man eine sehr starke Überstrahlung an der Oberfläche (Abb. 1.2.2.2 - 2).

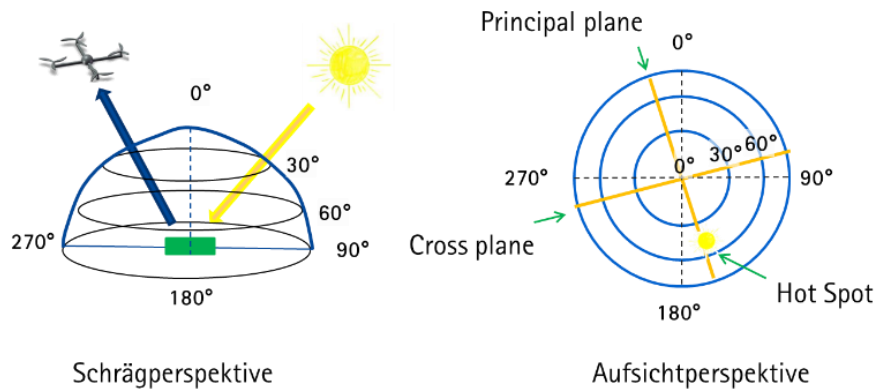


Abbildung 1.2.2.2 - 1: Prinzip der Bestimmung des Reflektanzverhaltens einer Oberfläche und Darstellung Principal Plane und Cross Plane

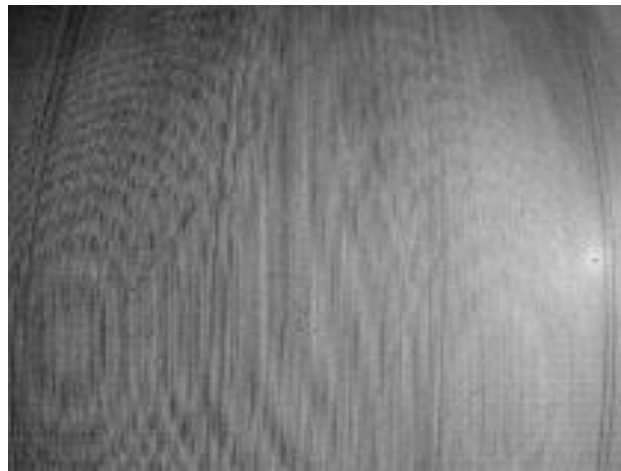


Abbildung 1.2.2.2 - 2: NIR-Aufnahme eines Maisschlags am 20.05.2020 um 10:49 mit Hot-Spot Effekt am rechten Rand

Für die Vergleichbarkeit spektraler Messungen wird üblicherweise der Anteil der reflektierten Strahlung als Größe gemessen. Um diesen Anteil zu ermitteln, wird bei Satellitenaufnahmen eine mehr oder weniger aufwendige Atmosphärenkorrektur durchgeführt, die eine Modellierung der jeweiligen atmosphärischen Bedingungen beinhaltet. Alternativ ist eine „Empirical Line“ Methode üblich, die zeitgleiche spektrale Referenzmessungen mit einem Feldspektrometer am Boden (Ground Truth) benötigen.

Bei modernen Multispektralsensoren für Drohnen ist das glücklicherweise nicht mehr notwendig, da neben den zum Erdboden schauenden multispektralen Bildsensoren parallel ein weiterer, nach oben schauender Sensor die einkommende Sonnenstrahlung (Irradiance) misst, und die atmosphärischen Bedingungen zwischen der Drohne und der Erdoberfläche einheitlich sind. Zusätzlich zu dem Sonnenscheinsensor sind in den Kamerasystemen noch ein einfaches Inertialmesssystem und ein GNSS mit integriert. Damit wird zusätzlich die Lage des Sensors bzw. der Kamera zum Zeitpunkt der Bildaufnahme festgehalten. Das ist insbesondere bei Flächenflügen von Bedeutung, da diese in der Regel keinen Gimbal zur Kompensation der Auswirkungen des Windes haben, was in der Roll- und Nickachse zu Abweichungen von 10 bis 20° von der Lotrechten führen kann. Somit ergeben sich dann auch Unterschiede in der Menge der gemessenen Einstrahlung, da der Sonnenlichtsensor unter einem anderen Winkel zur Sonne steht, was in der weiteren Auswertung mitberücksichtigt werden muss.

Nichtsdestotrotz kann auch mit diesem Multispektralsensor nicht bei jedem Wetter geflogen werden. Wolkenfreier oder gleichmäßig bedeckter Himmel sind Voraussetzung. Bei schnell wechselnder Bewölkung hingegen können im Bild Schatten auftreten, die vom Sonnenlichtsensor nicht erfasst werden können. Um die Bedeutung der gleichzeitigen Irradiance Messung zu verdeutlichen, wurde ein Bildverband, der bei stark wechselnder Beleuchtung aufgenommen, mit und ohne die Korrekturdaten aus dem Sonnenlichtsensor prozessiert (Abb. 1.2.2.2-3 und Abb. 1.2.2.2-4).

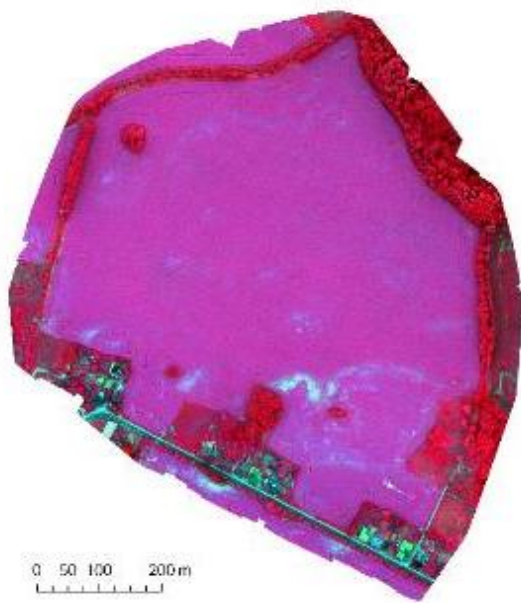


Abbildung 1.2.2.2 - 3: NIR-Farbkomposit - Prozessierung mit Sonnenlichtsensorkorrektur



Abbildung 1.2.2.2 - 4: NIR-Farbkomposit - Prozessierung ohne Sonnenlichtsensorkorrektur

Bei der Prozessierung ohne die spektralen Korrekturdaten des Sonnenlichtsensors wird deutlich, dass ein Teil des Bildverbands überbelichtet ist und ein anderer eher unterbelichtet. Das zeigt zugleich, dass die Sonnenlichtkorrektur funktioniert und gerade bei wechselnden Beleuchtungsverhältnissen zu deutlich besseren Ergebnissen führt.

Es stellt sich die Frage, wie genau die berechneten Reflektionswerte der Multispektralkameras sind bzw. wie die Genauigkeit beeinflusst wird. Assmann et al. (2017) haben gezeigt, dass die Art und die Durchführung der radiometrischen Kalibration sowie der Sonnenstand, wenn er über einem gewissen Schwellwert ist, die Reflektionswerte bzw. den daraus abgeleiteten NDVI-Wert in geringem Maß (ca. 0,02-0,03) beeinflussen und somit Aufnahmen zu verschiedenen Tages- bzw. Jahreszeiten vergleichbare Ergebnisse liefern. Problematischer sind Wolken, Nebel und ungleiche Beleuchtung während des Bildfluges. Ein auch nicht zu unterschätzender Effekt sind Veränderungen der Spektraleigenschaften des Referenzpanels, insbesondere bei häufigem Gebrauch, was zu Abweichungen von 0,02 beim NDVI führen kann.

Eigene Untersuchungen können diese Beobachtungen grundsätzlich bestätigen, allerdings haben diese auch gezeigt, dass gerade bei Sonnenständen von $< 10^\circ$, wie sie in den Wintermonaten häufig auftreten, und der Verwendung eines Flächenflüglers, der Sonnenscheinsensor keine vernünftigen Korrekturen liefert und unrealistische Reflektanzen > 1 erzeugt werden. Ursache ist, dass der Sonnenscheinsensor bei einem ungünstigen Verkippen des Fluggeräts nicht mehr der Sonne zugewandt ist.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die berechneten Reflektanzen der Multispektralkameras in der Regel sehr zuverlässig und durchaus mit den Genauigkeiten eines Feldspektrometers vergleichbar sind.

Für die Verarbeitung von Hyperspektraldaten kommen teilweise ebenfalls Sonnenlichtsensoren zum Einsatz. Diese sind als Spektrometer ausgeführt und differenzieren die eintreffende Strahlung nach ihrer Wellenlänge. Für die radiometrische Korrektur der Daten erfolgt in der Regel eine Überwachung der Sensortemperatur und die periodische Dunkelstrommessung zur Korrektur thermischen Rauschens. Vor allem für Hyperspektralscanner im SWIR-Bereich ist eine aktive Kühlung in der Regel vorhanden. Für die Korrekturen bezüglich des Sonnenlichtspektrums und die Berücksichtigung atmosphärischer Einflüsse kommen spezialisierte Verfahren zum Einsatz, die in der Regel auf MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission) basieren. Zu nennen sind hier beispielsweise FLAASH und ATCOR.

1.2.2.3 Thermalkameras

Thermalkameras messen die Infrarot-Wärmestrahlung, die jeder Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt ($-273,15\text{ °C}$) aussendet bzw. emittiert. Diese Strahlung wird hauptsächlich im langwelligen Infrarotbereich (LWIR, ca. $8\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$) gemessen, da dieser von der Sonnenstrahlung unberührt ist. Eine Thermalkamera „sieht“ also keine Wärme, sondern Infrarotstrahlung, aus der auf Temperatur geschlossen wird.

Fast alle Drohnen-Thermalkameras nutzen ungekühlte Mikrobolometerkameras, da diese relativ preiswert hergestellt und sehr leicht sein können, zudem keine aufwändige Kühlung erfordern und damit auch nur eine geringe Menge an Energie verbrauchen. Dabei trifft die Infrarotstrahlung auf ein Pixel-Array aus wärmeempfindlichen Materialien (z.B. Vanadiumoxid) und jedes Pixel erwärmt sich minimal, was die elektrische Leitfähigkeit des Materials ändert. Diese Änderung wird elektronisch gemessen und digitalisiert. Da normales Glas für langwelliges IR undurchlässig ist, nutzen Thermalkameras spezielle Linsen aus Germanium bzw. Chalcogenid-Gläsern, die etwas günstiger sind und zudem spezifische Linsenformen ermöglichen.

Um aus dem Sensorsignal Temperaturen abzuleiten, wird intern in einem ersten Schritt eine Nicht-Uniformitäts-Korrektur (NUC) bzw. Schwarzkalibration durchgeführt, die individuelle Pixelabweichungen ausgleicht. Anschließend findet eine Kalibrierung gegen interne Referenzen statt, die eine Umrechnung in relative Temperaturwerte oder absolute Temperaturen (bei radiometrischen Kameras) ermöglicht. Absolut radiometrisch kalibrierte Kameras ermöglichen exakte Messungen und nachträgliche Analyse, sowie Isothermen und die Ableitung von Temperaturprofilen. Die Herstellerangaben bzgl. der Infrarot-Temperaturmessgenauigkeit liegt - je nach Temperaturbereich - meistens bei $\pm 2\text{ °C}$ - 5 °C .

Bedeutet das nun, dass die angezeigten absoluten Temperaturen stimmen? Leider nein bzw. nicht ganz, da sich diese nur auf den radiometrisch kalibrierten Sensor beziehen und eine bestimmte einheitliche Emissivität aller Objekte (in der Regel 0.95) voraussetzen. Konkrete Umweltbedingungen bei der Drohnenaufnahme und spezifische Objekteigenschaften (Emissivität), die einen maßgeblichen Einfluss auf die gemessene Oberflächentemperatur haben können, werden nicht mitberücksichtigt. Z.B. beeinflussen Luftfeuchtigkeit, Nebel oder Regen, die Sonneneinstrahlung (Reflexionen!) und der Wind, der Oberflächen abkühlen kann, die Messungen. Verschiedene Materialien strahlen unterschiedlich stark, z.B. ist der Emissionsgrad vieler natürlicher Materialien von Beton bis Vegetation mit 0.92 - 0.97 hoch, wo hingegen die Emissivität von Metallen mit 0.1 - 0.4 sehr gering ist.

Die Qualität einer Thermalkamera wird oftmals über dessen Auflösungsvermögen definiert. Dieses wird zum einen über die geometrische Auflösung beschrieben. Diese ist wesentlich niedriger als bei RGB-Kameras. Das liegt unter anderem daran, dass aufgrund der größeren Wellenlänge Pixelgrößen (Pixel Pitch) von $12\text{ }\mu\text{m}$ bis $17\text{ }\mu\text{m}$ erforderlich sind und die Herstellungskosten für größere Optiken sehr hoch sind. Typische Auflösungen von Drohnen-Thermalkameras sind 320×256 bzw. 640×512 Pixel. Höhere Auflösungen von 1280×1024 sind die absolute Spitzenklasse für professionelle Systeme. Zum anderen beschreibt die Temperaturauflösung (NETD) die kleinste messbare Temperaturdifferenz. Diese wird bei vielen Drohnen-Thermalkameras mit 50 mK (Millikelvin) angegeben. D.h. die Thermalkamera ist prinzipiell in der Lage, Temperaturunterschiede von 0.05 °C zu messen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass ein Pixel immer den Mittelwert aller Temperaturen innerhalb seiner Bodenfläche (GSD^2) misst. D.h. mit zunehmender Flughöhe verliert nicht die Kamera an Temperaturauflösung - sondern das Objekt verliert seinen thermischen Kontrast im Pixel.

Moderne (Thermal)-Drohnenkameras sind mittlerweile Multisensorsysteme mit einer Kombination mehrerer Optiken, die z.B. eine RGB-Restlicht-Kamera, eine Thermalkamera und eine Telekamera umfassen. Das ermöglicht eine Kombination von Thermal + RGB. Diese können in verschiedenen Modi miteinander kombiniert werden, um die Thermalauswertung für den Benutzer zu verbessern, z.B. Picture-in-Picture, Alpha-Overlay oder Side-by-Side.

Eine aktuelle technische Entwicklung stellen miniaturisierte Hyperspektralscanner für den langwelligen Infrarotbereich zum Einsatz an Drohnen (z.B. Telops Hypercam nano) dar. Aufgrund sehr hoher Kosten sind diese jedoch nur gering verbreitet. Eine Anwendung ist der Einsatz für die Detektion von Gasen, die sich hinsichtlich Zusammensetzung und Konzentrationen anhand ihrer Emissionsspektren unterscheiden lassen. Daraus resultieren Anwendungen für die Inspektion von technischen Anlagen und Infrastrukturen in der Energiewirtschaft sowie der chemischen Industrie.

Thermaldaten kommen in speziellen Dateiformaten, z.B. dem R-JPEG (Radiometric JPEG). Diese JPEG-Datei enthält ein zusätzliches Band, das Temperaturdaten enthält und die Nachbearbeitung von thermischen In-

formationen unter Beibehaltung des visuellen Kontexts ermöglicht. Thermale Orthomosaik besitzen in der Regel das GeoTIFF-Format. Dies ist nicht zu verwechseln mit dem radiometrischen TIFF (16 Bit), das Temperaturwerte mit Gleitkomma speichert und häufig für detaillierte Analysen und die Konvertierung in ein-kanalige TIFFs verwendet wird. Natürlich sind auch proprietäre Formate unterwegs, d.h. herstellerspezifische Dateien wie FLIRs .img, .fff, DJIs .jpg, Autels .irg und ältere Formate wie .rtv, .ats, die häufig eine Konvertierung erfordern.

1.2.2.4 UAS-basierte LIDAR-Systeme

Verfasser: Gottfried Mandlbauer

Einleitung

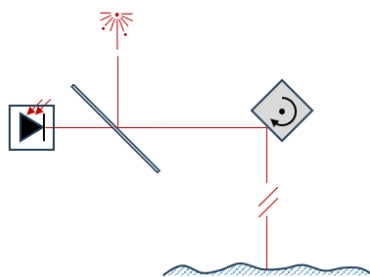
Im Teil „UAS-Laserscanning“ dieses Leitfadens wurden die Grundlagen von ULS erläutert (Laserentfernungsmessung, Scannen, geometrisches und radiometrisches Sensormodells). In diesem Abschnitt liegt der Fokus auf konkreten UAS-LIDAR-Systemen. Die ersten kommerziell erhältlichen UAS-Laserscanner kamen um 2015 auf den Markt. Insbesondere seit Fahrerassistenzsysteme LIDAR-Sensoren nutzen, hat dies die Entwicklung kostengünstiger Sensoren für den Massenmarkt gefördert. Viele dieser Sensoren sind mittlerweile auf UAS integriert und werden für 3D-Kartierung eingesetzt. Infolgedessen ist eine breite Palette von UAS-LIDAR-Sensoren verfügbar, die von kostengünstigen Geräten für den Breitenmarkt bis hin zu hochwertigen Vermessungsgeräten reicht. Im Folgenden werden verschiedene Sensorkonzepte vorgestellt und ausgewählte LIDAR-Systeme beschrieben.

Sensor-Konzepte

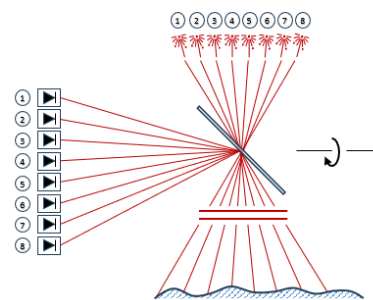
UAS-Laserscanner lassen sich in folgende Kategorien einteilen (Abbildung 1.2.2.4 - 1):

- I. Single-beam scanning LIDAR
- II. Rotating multi-beam profile array LIDAR
- III. Multi-beam scanning LIDAR
- IV. Solid-state LIDAR

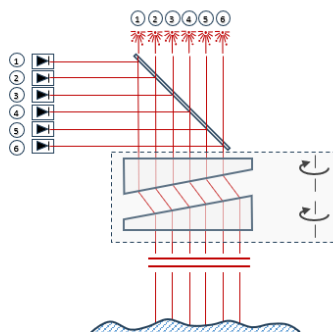
(I) Single-beam scanning lidar



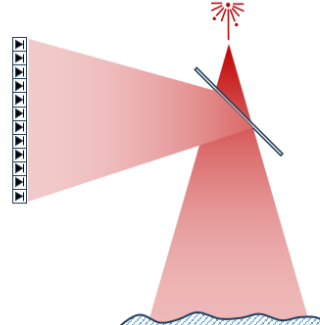
(II) Multi-beam profile array lidar



(III) Multi-beam scanning lidar



(IV) Solid-state flash lidar



-  Laserquelle
-  Photodiode
-  Photodioden-Array
-  Spiegelrad
-  Risley Prisma
-  Gelände

Abbildung 1.2.2.4 - 1: Schematische Darstellung der verschiedenen UAS-LIDAR Sensorkonzepte

Grundlage von Sensoren der Kategorie I ist das klassische linear-mode LIDAR-Konzept, wie es seit Jahren für Airborne Laserscanning (ALS) eingesetzt wird, jedoch mit deutlich reduzierter Größe und Gewicht der Sen-

soren. Typischerweise wird ein einzelner hochwertiger Laser mit einer Pulsrepetitionsrate (PRR) im MHz-Bereich mit einer rotierenden oder oszillierenden Strahlablenkungseinheit und einem hochwertigen Detektor gekoppelt. Als Detektoren kommen Avalanche-Photodioden mit nachgeschalteten AD-Wandler zum Einsatz. Diese Systeme zeichnen sich durch große Messentfernungen (~500 m) und hohe Messgenauigkeit (5-10 mm) sowie kleine, kreisförmige Laser-Footprints mit Durchmessern im Sub-Dezimeterbereich aus. Um die Augensicherheit zu gewährleisten, verwenden Geräte dieser Klasse überwiegend Wellenlängen im nahen Infrarot (1064 nm oder 1550 nm). Hinsichtlich der Strahlablenkung kommen Scankonzepte zum Einsatz, bei dem die Laserstrahlen in einer vertikalen Ebene abgelenkt werden. Hochwertige Sensoren verwenden verschieden geneigte Spiegelflächen auf einem Polygonrad, die eine Ablenkung in Vorwärts-, Rückwärts- und Nadirrichtung erlauben.

Rotating multi-beam profile array LIDAR-Sensoren kommen ohne Strahlablenkungseinheit aus. Sie verwenden stattdessen eine Reihe von Diodenlasern. Alle Laser feuern gleichzeitig mit einer PRR von 10-50 kHz. Die Laserstrahlen bilden einen Fächer mit einem typischen Sichtfeld (FoV) von 30°. Das reflektierte Signal jedes Lasers wird zu einem individuellen (Silizium-)APD-Empfänger geleitet. Das gesamte Bündel an individuellen Sende- und Empfangseinheiten (Transceiver) dreht sich um eine gemeinsame Achse und bietet so eine 360°-Punktabdeckung. Da viele Transceiver zum Einsatz kommen, ist die Qualität eines einzelnen Transceivers im Vergleich zu herkömmlichen LIDAR-Sensoren geringer. Dies gilt sowohl für die maximale Messreichweite als auch für die Laserstrahldivergenz. Ein wesentlicher Vorteil ist der geringere Preis. Die Kalibrierung und Ausrichtung der einzelnen Transceiver ist jedoch nicht trivial, insbesondere bei Systemen mit mehr als 100 Kanälen.

Aus diesem Grund hat sich ein hybrides Konzept entwickelt, das wenige Transceiver und eine kompakte Strahlablenkeinrichtung verwendet. Beim *Multi-beam scanning LIDAR* werden in der Regel sechs gepulste Laserdioden und entsprechende APD-Detektoren als Transceiver verwendet. Die Strahlablenkung wird mit einem Risley-Prisma realisiert. Dieses besteht aus zwei Glaskeilen, die coaxial angeordnet sind. Die Glaskeile drehen sich unabhängig voneinander um eine gemeinsame Achse. Abhängig von der gegenseitigen Ausrichtung der Keilprismen werden die Laserstrahlen aufgrund der Brechung an den Grenzflächen zwischen Glas und Luft unterschiedlich abgelenkt. Je nach Drehgeschwindigkeit und -richtung lassen sich mit Risley-Prismen beliebige Scanmuster erzeugen, die von geraden Linien über Kreise bis hin zu Spiralen und Blumenmustern reichen. Gerade Scanlinien bzw. Scanpatterns in Form einer flachen Acht eignen sich für den Einsatz auf UAS, da durch die Vorwärtsbewegung des UAS 1D Strahlablenkung generell ausreichend ist. Im Einsatz sind aber auch sternförmige Scanmuster, die Vorwärts- Diagonal- und Seitblicke erlauben.

Die letzte Kategorie wird als Solid-State-LIDAR bezeichnet, d.h. ein Konzept ohne rotierende Teile. Der Begriff „Solid-State-LIDAR“ wird auch für Systeme verwendet, die mikroelektromechanische Systeme (MEMS) zur Strahlablenkung verwenden, aber auch für sogenannte Focal-Plane-Array-Systeme, auch als Flash-LIDAR bezeichnet, die mit Digitalkameras vergleichbar sind, bei denen jedes Pixel eine einzelne APD und somit eine unabhängige Laser-Entfernungsmessungseinheit ist. Wegen der limitierten Reichweite ist die Integration solcher Sensoren auf UAS bisher nicht sehr verbreitet.

Beispiele für Sensoren und Integrationen

Tabelle 1.2.2.4 - 1 listet die Spezifikationen ausgewählter handelsüblicher UAS-LIDAR-Sensoren, die den von den einzelnen Herstellern veröffentlichten Datenblättern entnommen sind.

Tabelle 1.2.2.4 - 1: Spezifikationen ausgewählter UAS-LIDAR-Sensoren

Sensor	Hersteller	Kategorie	Masse [kg]	Dimension (L x B x H) [mm]	Wellen- länge [nm]	Reich- weite [m]	Präzision / Genauig- keit [mm]	Pulsrate [kHz]	Strahldi- vergenz [mrad]	Footprint @50m [mm]	FOV [°]	Kanäle
VUX1- UAV ²²	RIEGL	I	3,75	227 x 209 x 129	1550	750-160 ¹⁾	5/10	50-1200 ¹⁾	0,35	17,5	360	1
miniVUX- 3UAV	RIEGL	I	1,75	243 x 111 x 85	905	170	10/15	100-300	1,6 x 0,5	80 x 25	360	1
VUX-120 ²³	RIEGL	I	2,30	242 x 117 x 126	1550	760-200 ¹⁾	5/10	150-2400 ¹⁾	0,4	20	100	1
Puck LITE	Velo- dyne/Ouster	II	0,59	103 x 103 x 72	903	100	--/30	300	3,0 x 1,2	150 x 60	360 x 30	16
Alpha Prime	Velo- dyne/Ouster	II	3,50	166 x 166 x 141	905	300	--/30	2300	2,1 x 1,1	105 x 55	360 x 40	128
CL- 360HD2	Teledyne Optech	I	3,50	310 x 160 x 116	1550	730-45 ¹⁾	4/5	200-2000 ¹⁾	0,3	15	360	1
CL-90	Teledyne Optech	I	4,10	300 x 213 x 209	1550	633-176 ¹⁾	5/10	50-500 ¹⁾	0,3	15	90	1
EchoONE	Teledyne Optech	I	1,65	170 x 144 x 120	1535	270-220 ¹⁾	5/10	400-600 ¹⁾	0,5	25	90	1
Avia	Livox	III	0,50	91 x 61 x 65	905	250	20/50	240	0,5 x 5,0	25 x 250	70	6
Zenmuse L2	DJI	III	0,90	155 x 128 x 176	905	250	20/50	240	0,4 x 1,2	30 x 90	70	6
Zenmuse L3	DJI	I	1,60	192 x 162 x 202	1535	2000-700 ¹⁾	5/10	100-2000 ¹⁾	0,25	24	80 x 80	1
H600	GreenValley	I	1,30	179 x 114 x 127	1535	~300	5/50	100-550	--	--	80	1
TrueView 540	GeoCue	I	1,55	210 x 112 x 131	1535	400	5/15	500	--	--	75	1
Navigator	YellowScan	I	4,20	350 x 160 x 190	532	120 ²⁾	30/30	20	4	200	40	1
VQ-840-GL	RIEGL	I	10,5	360 x 280 x 200	532	300 ²⁾	15/20	50-200	1-6	50-300	40	1

¹⁾ Entfernungsmessperformance hängt von PRR ab

²⁾ Für bathymetrische Scanner wird die maximale Reichweite eher durch die Gewässertrübung als durch die Messdis-
tanz begrenzt

Die Tabelle listet eine Reihe von *Single-beam scanning LIDAR*-Sensoren (Kategorie I) verschiedener Hersteller mit einer Messgenauigkeit von unter 1 cm auf (VUX1-UAV, VUX-120, CL-360HD2, CL-90, Zenmuse L3, H600, TrueView540). Alle diese Sensoren verwenden einen hochwertigen 1550-nm- oder 1535-nm-Laser und einen entsprechenden hochwertigen Empfänger. Die maximale Reichweite variiert je nach Gerät und Pulswiederholungsrate zwischen 160-2000 m. Die Pulswiederholungsrate beträgt 100 kHz bis 2,4 MHz. Die speziell für den Vermessungsmarkt konzipierten Geräte bieten die geringsten Strahldivergenzen (0,3-0,5 mrad), was zu einer kleinen Laseraufstandsfläche von 15-25 mm auf dem Boden führt.

Die *Rotating multi-beam profile array LIDAR*-Sensoren (PuckLITE, Alpha Prime; Kategorie II) und die *Multi-beam scanning LIDAR*-Sensoren (Avia, Zenmuse L2; Kategorie III) sind wiederum in der Regel leichter als ihre Pendanten der Kategorie I. Alle genannten Systeme verwenden einen 905-nm-Diodenlaser. Diese Sensoren weisen in der Regel eine geringe Strahldivergenz in einer Richtung und eine höhere Divergenz in der orthogonalen Richtung auf, was zu ungünstigen, elliptischen Abtastflächen am Boden führt. Multi-beam-Sensoren verwenden typischerweise eine moderate Pulsrepetitionsrate (2-40 kHz). Die resultierende Nettopulsrate kann jedoch aufgrund der Kopplung mehrerer Kanäle hoch sein. Beim AlphaPrime ergibt sich beispielsweise eine Scanfrequenz von 2.4 MHz aus 128 Kanälen mit einer PRR von jeweils 20 kHz.

Tabelle I listet auch zwei topo-bathymetrische UAS-Laserscanner (Navigator, VQ-840-GL) auf, die einen grünen Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm verwenden. Beide sind Geräte der Kategorie I (*Single-beam scanning LIDAR*) und verfügen über Full Waveform-Digitalisierung. Aus Gründen der Augensicherheit haben diese Systeme eine relativ große Strahldivergenz von 4 mrad (Navigator) bzw. 1-6 mrad (VQ-840-GL).

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: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W1-33-2014>.
- Dohr S., Muick M., Schachinger B. & Gruber M. (2022): Adaptive Motion Compensation: A Modern Approach. White Paper. 7 Seiten. https://www.vexcel-imaging.com/wp-content/uploads/2022/04/2022-03-31_WhitePaper_AdaptiveMotionCompensation_A-modern-approach.pdf (letzter Zugriff 2.3.2026).
- 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, <https://scispace.com/pdf/triangulation-of-lh-systems-ads40-imagery-using-orima-gps-15oim968no.pdf> (letzter Zugriff 2.3.2026).
- Mandlbürger, G. (2025). Airborne LiDAR - A tutorial for 2025; Part IV: UAV Lidar. Lidar Magazine. <https://lidarmag.com/2025/12/28/airborne-lidar-a-tutorial-for-2025-4/>.
- Meißner, H. (2021): Determination and Improvement of Spatial Resolution obtained by Optical Remote Sensing Systems. Doktorarbeit. Humboldt-Universität zu Berlin. DOI <http://dx.doi.org/10.18452/22348>.
- Müller, 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 <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XL-3-W4-1-2016>.
- Vautherin, J., Rutishauser, S., Schneider-Zapp, K., Choi, H.F., Chovancova, V., Glass, A. & Strecha, C. (2016): Photogrammetric accuracy and modelling of roll-ing shutter cameras. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information III-3 (06.2016). 139-146, DOI: <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. (ed.): Photogrammetric Week '11, Wichmann/VDE Verlag, Berlin & Offenbach, 89-95. <https://phowo.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo11/095Wagner.pdf> (letzter Zugriff 2.3.2026).

1.3 Missionsplanung und Datenerhebung

1.3.1 Flugplanung und Steuerung

Verfasser: Melanie Elias, Danilo Schneider

Flugplanung /-steuerung bildet das operative Rückgrat UAS-gestützter Vermessungsaufgaben. Sie verbindet die fachlichen Anforderungen an Geometrie, Auflösung und Abdeckung mit technischen Randbedingungen, regulatorischen Vorgaben und sicherheitsrelevanten Aspekten. Moderne UAS-Workflows nutzen dabei zunehmend softwaregestützte Missionsplanung, automatisierte Flugabläufe und integrierte Sicherheitsmechanismen, um eine reproduzierbare Datenqualität, effiziente Durchführung und einen kontrollierten Betrieb auch in komplexen Umgebungen zu gewährleisten.

1.3.1.1 Missionsplanung

Die Missionsplanung ist das zentrale Bindeglied zwischen der Vermessungsaufgabe und dem tatsächlichen UAS-Flug. Sie übersetzt die Anforderungen an Genauigkeit und Abdeckung in einen konkret ausführbaren Flugplan. Während früher meist starre, manuell definierte Wegpunktmissionen eingesetzt wurden, hat sich der Stand der Technik in den letzten Jahren deutlich weiterentwickelt. Moderne Missionsplanung arbeitet heute mit dynamischen und adaptiven Flugpfaden, die sich an die jeweilige Situation anpassen.

Dabei wird nicht nur die Topographie des Zielgebiets berücksichtigt, sondern auch praxisrelevante Randbedingungen, z.B. Leistungsgrenzen des Sensors, Energieverfügbarkeit, Wetterbedingungen sowie aktuelle Vorgaben und Risiken im Luftraum. Das Ergebnis sind effizientere, sicherere und zuverlässigere Missionen, die sich stärker an realen Einsatzbedingungen orientieren und AnwenderInnen bei der Planung und Durchführung von UAS-gestützten Vermessungen entlasten.

Hinweis: Die folgenden Ausführungen beziehen sich primär auf die Missionsplanung in UAS-Planungstools. Weitere Aspekte, etwa der Einsatz von Passpunkten bei RTK-GNSS- und nicht RTK-GNSS-fähigen UAS-Systemen sowie spezifische Flugmuster zur Sensororientierung, werden hier nicht behandelt.

Missionsparameter für bildbasierte Messflüge

Die Qualität photogrammetrischer Auswertungen wird maßgeblich durch die Bodenauflösung, die Bildgeometrie sowie die Bewegungsparameter des UAS bestimmt.

Zentrale Kenngröße der Flugplanung ist dabei die **Bodenauflösung** (Ground Sampling Distance, GSD), da sie die erreichbare räumliche Detailtiefe der Bilddaten definiert. Die GSD steht in direktem Zusammenhang mit der Flughöhe h , der Brennweite f des Objektivs und der physikalischen Pixelgröße p des Sensors und lässt sich näherungsweise wie folgt beschreiben:

$$GSD = \frac{h \cdot p}{f} \quad (1)$$

Zur praktischen Bestimmung der GSD stehen zahlreiche kostenfreie Berechnungshilfen online zur Verfügung, z.B. PropellerAero.

Die Wahl der GSD hat erhebliche Auswirkungen auf die operationale Effizienz einer Mission. Eine Verringerung der GSD von 5 cm auf 1 cm führt bei einer zu erfassenden Fläche von einem Hektar zu einer Erhöhung der Bildanzahl von etwa 90 auf über 2200 Aufnahmen, während die Datenmenge von rund 4,5 GB auf mehr als 50 GB anwächst (Maes, 2025). Diese exponentielle Zunahme erfordert eine sorgfältige Abwägung zwischen geforderter Genauigkeit, Flugzeit, Speicherbedarf und Auswerteaufwand. Für viele vermessungstechnische Anwendungen hat sich daher eine GSD von etwa 1,5-2,5 cm/px als praxisgerechter Kompromiss etabliert.

Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor ist die Bewegungsunschärfe. Bewegt sich das UAS während der Belichtungszeit, kann dies zu einer deutlichen Verschlechterung der Bildschärfe und damit der photogrammetrischen Auswertbarkeit führen. Besonders bei hochauflösenden RGB-Kameras können bereits moderate Fluggeschwindigkeiten in Kombination mit zu langen Belichtungszeiten sichtbare Unschärfen verursachen.

Moderne Bildstabilisierungssysteme und kurze Belichtungszeiten reduzieren diesen Effekt, ersetzen jedoch keine angepasste Fluggeschwindigkeit. Zur quantitativen Bewertung wird die Bewegungsunschärfe häufig als prozentualer Anteil der GSD angegeben.

Maes (2025) veranschaulicht diesen Zusammenhang anhand eines Rechenbeispiels: Bei einer angestrebten GSD von 1 cm führt eine Fluggeschwindigkeit von 5 m/s in Kombination mit einer Belichtungszeit von 1/500 s dazu, dass sich das UAS während der Aufnahme um 10 mm bewegt. Diese Strecke entspricht der GSD und resultiert in einer Bewegungsunschärfe von 100 %, bei der ein Bildpunkt vollständig verwischt wird. Wird die Fluggeschwindigkeit bei gleicher Belichtungszeit auf 2 m/s reduziert, verringert sich die Unschärfe auf 4 mm, entsprechend 40 % der GSD. Je kleiner dieser Anteil ist, desto schärfer und zuverlässiger photogrammetrisch auswertbar sind die Bilder. Fluggeschwindigkeit und Belichtungszeit sind daher stets aufeinander abzustimmen.

Bei Thermalkameras ist dieser Effekt noch ausgeprägter. Aufgrund der physikalischen Funktionsweise der Sensoren kann selbst bei niedrigen Fluggeschwindigkeiten eine erhebliche Bewegungsunschärfe auftreten, die am Boden mehrere Zentimeter erreichen kann. Da bislang keine allgemein akzeptierten, praxisnahen Grenzwerte existieren, sind für thermale photogrammetrische Anwendungen konservative, langsame Fluggeschwindigkeiten dringend zu empfehlen (Maes, 2025).

Neben der GSD und der Fluggeschwindigkeit ist eine ausreichende Bildüberlappung Voraussetzung für eine stabile Bündelausgleichung. Üblich sind 70-80 % Längs- und Querüberlappung; in bewaldetem oder stark reliefiertem Gelände können höhere Überlappungswerte und spezielle Befliegungsmuster erforderlich sein.

Die Höhenführung kann entweder in konstanter Flughöhe oder als TerrainFollowing-Flug erfolgen. Letzteres ist insbesondere dann notwendig, wenn über variierendes Gelände hinweg eine konstante GSD sichergestellt werden soll. Dies setzt ein geeignetes digitales Geländemodell in Kombination mit einer präzisen GNSS-Positionierung (RTK/PPK) bzw. eine sensorbasierte Messung und adaptive Anpassung der lokalen Flughöhe voraus. In ebenem Gelände ist Terrain Following hingegen nicht zwingend erforderlich.

Ergänzend kann der Kamerawinkel an die Aufgabenstellung angepasst werden. Nadir-Aufnahmen stellen den Standard für Orthophotoerstellung und Befliegungen über ebenem Gelände dar, während Schrägbilder mit Neigungswinkeln von etwa 20-45° die Erfassung vertikaler Strukturen verbessern und die geometrische Stabilität der 3D-Rekonstruktion erhöhen.

Als übergeordnete Faustregel gilt auch für photogrammetrische Messflüge: *so schnell wie nötig, aber so langsam wie möglich*. Die optimale Fluggeschwindigkeit ist stets ein Kompromiss zwischen Flächenabdeckung und verlässlicher Bildqualität.

In der Praxis wird oft insbesondere die Querüberlappung und Flughöhe abhängig von der Flugzeit und verfügbaren Batteriekapazität eingestellt. Häufige Batteriewechsel bei größeren Flugmissionen kosten Zeit, weshalb hier oft ebenfalls mit Kompromissen gearbeitet wird.

Missionsparameter für LIDAR-Messflüge

Im Gegensatz zu Bildflügen für photogrammetrische Auswertungen erfordert die Planung von LIDAR-Missionen (Light Detection and Ranging) spezifische Einstellungen und Flugmanöver, da die geometrische Qualität der Punktwolke unmittelbar von der Genauigkeit der Trajektorie (Position und Rotation entlang der Bewegungslinie) abhängt. Ziel ist eine konsistente Punktwolke mit möglichst homogener Punktdichte, die neben dem eigentlichen LIDAR-System auf einer stabilen inertialen Messeinheit (IMU), einer ausreichenden Streifenüberlappung sowie einer präzisen Höhenführung über Grund basiert.

Zur Initialisierung und Kalibrierung der IMU integrieren moderne Missionsplanungstools gezielte Flugmanöver in den Missionsablauf. Dazu zählen insbesondere sogenannte Achterflüge sowie definierte Beschleunigungs- und Abbremsphasen zu Beginn und am Ende der Mission. Diese Manöver dienen der Reduktion von IMU-Drift und der Stabilisierung der Schätzung der Systemparameter und sind für eine präzise Georeferenzierung der LIDAR-Daten essenziell. In der Praxis werden diese Kalibriermanöver zunehmend automatisiert in den Flugplan eingebunden.

Im Vergleich zur Photogrammetrie ist die erforderliche Querüberlappung der Flugstreifen geringer; häufig genügen 20-30 % (Aerotras, n.d.), da keine Aerotriangulation im klassischen Sinne durchgeführt wird. Die Fluggeschwindigkeit wird primär durch die Laser-Pulsrepetitionrate sowie die angestrebte Punktdichte bestimmt und entsprechend an die Missionsanforderungen angepasst.

Ein weiterer zentraler Aspekt der LIDAR-Missionsplanung ist das Terrain Following zur Höhenführung über Grund. Während photogrammetrische Befliegungen in topografisch wenig reliefiertem Gelände häufig mit konstanter Flughöhe über Normalnull (NN) durchgeführt werden können - sofern die resultierende Variation der GSD tolerierbar ist -, erfordert die LIDAR-Datenerfassung in der Regel eine konstante Flughöhe über Grund (Above Ground Level, AGL). Nur so lassen sich eine gleichmäßige Punktdichte, gleichmäßige Streifenbreite ohne Lücken zwischen den Streifen und eine stabile Messgeometrie sicherstellen (Sofonia et al., 2019). Moderne Missionsplanungs- und Flugsteuerungssysteme nutzen hierfür digitale Geländemodelle (DGM), die entweder vorab eingebunden oder während des Fluges dynamisch aktualisiert werden. Auf dieser Grundlage wird das UAS entlang der Geländekontur geführt, wodurch Höhenabweichungen minimiert und die Qualität der resultierenden Punktwolke insbesondere in stark reliefiertem Gelände deutlich verbessert wird.

Ergänzend tragen geglättete Trajektorien und sanfte Übergänge zwischen benachbarten Flugstreifen zur Reduktion von Sensorrauschen und zur weiteren Verbesserung der Punktwolkenqualität bei.

1.3.1.2 Softwarelösungen

Missionsplanungssoftware ist das zentrale Werkzeug jeder UAS-Vermessung. Sie übersetzt die fachliche Aufgabenstellung - etwa gewünschte Bodenauflösung, Punktdichte oder Abdeckung - in einen ausführbaren Flugplan. Moderne Systeme automatisieren diesen Prozess weitgehend und berücksichtigen dabei nicht nur die Eigenschaften der eingesetzten Sensorik, sondern auch die Leistungsgrenzen der UAS-Plattform, den Energiebedarf, die Geländetopographie sowie regulatorische Rahmenbedingungen.

Im Gegensatz zu früheren, meist statischen „Wegpunkt-Planern“ handelt es sich heute um hochintegrierte Softwaresysteme. Flugparameter, Sensoreigenschaften und Missionslogik sind eng miteinander verknüpft und werden dynamisch aufeinander abgestimmt. Insbesondere bei kombinierten Photogrammetrie- und LIDAR-Einsätzen ist die Wahl der Missionsplanungssoftware von entscheidender Bedeutung, da beide Verfahren unterschiedliche Anforderungen an Flugmuster, Fluggeschwindigkeit, Überlappung und Höhenführung stellen.

Aktuelle Softwarelösungen (Stand 2026)

Die nachfolgende Auswahl an Software stellt eine exemplarische Übersicht gängiger Missionsplanungslösungen für UAS-gestützte Vermessungsaufgaben dar:

UgCS (Universal Ground Control Software) ist eine professionelle Desktop-Mission-Planning-Software für anspruchsvolle photogrammetrische und LIDAR-Missionen. Sie unterstützt standardisierte Gitterflüge, Korridorflüge und Fassadenflüge sowie Terrain Following-Missionen mit konstanter Flughöhe über Grund (AGL). Für LIDAR-Anwendungen stehen spezialisierte Werkzeuge wie Korridor-Workflows und IMU-Kalibrierungsmuster (z.B. Achter-Flüge) zur Verfügung. UgCS unterstützt eine Vielzahl von UAS-Plattformen, erlaubt die Offline-Planung und den Import externer Karten- und Geländemodelle.

DJI Terra / DJI Pilot ist ein Mapping- und Datenverarbeitungstool innerhalb des DJI-Ökosystems, das die Planung von Gitter-, Korridor- und Schrägbildflügen mit integrierter 3D-Rekonstruktion aus Bild- und LIDAR-Daten kombiniert. Die Software unterstützt photogrammetrische Missionsplanung für DJI-Plattformen und ermöglicht Terrain Following-Flüge auf Basis interner Höhenmodelle. Für DJI-LIDAR-Sensoren (z.B. DJI Zenmuse L1 und DJI Zenmuse L2) erlaubt DJI Terra zudem die Flugplanung sowie die initiale Verarbeitung und Visualisierung der erfassten Punktwolken. Die operative Durchführung und Überwachung der geplanten Missionen erfolgen dabei als Flugsteuerungs- und Missionsplanungsanwendung auf der UAS-Plattform (s. Abb. 1.3.1.2 - 1).

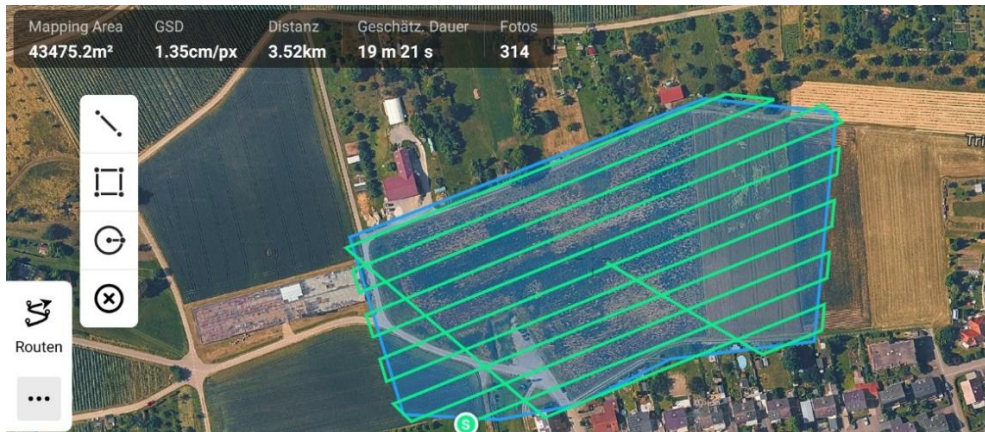


Abbildung 1.3.1.2 - 1: mit *DJI Pilot* erstellte Flugplanung
(Leucht, geoplana Ingenieurgesellschaft mbH)

Dronelink ist eine plattformunabhängige Flugsteuerungs- und Missionsplanungssoftware für automatisierte photogrammetrische Missionen. Sie unterstützt Gitterflüge, Kreuzgitterflüge (Crosshatch) sowie lineare Korridorflüge und bietet Terrain Following-Funktionen mit konstanter Flughöhe über Grund. Die Missionsplanung erfolgt über Web-, Mobil- oder Remote-Controller-Applikationen und ermöglicht eine detaillierte Parametrierung von Kamera-, Gimbal- und Fluglogik sowie eine 3D-Vorschau der geplanten Mission. Unterstützt werden ausgewählte Plattformen von DJI und Autel.

Drone Harmony ist eine mobile und webbasierte Flugplanungslösung mit einem starken Fokus auf automatisierte Missionsgenerierung in komplexem Gelände. Die Software unterstützt Gitter-, Korridor-, Orbit- und Fassadenflüge sowie Terrain Following-Missionen auf Basis importierter Geländedaten und 3D-Objekte. Durch die 3D-Szenendarstellung und automatische Routengenerierung lassen sich kombinierte Nadir- und Schrägbildflüge in anspruchsvollen Gelände- oder Objektsituationen effizient planen.

Weitere Missionsplaner wie DroneDeploy unterstützen ebenfalls standardisierte Gitter- und Korridorflüge, Terrain Following-Funktionen sowie automatisierte Planungs- und Datenerfassungs-Workflows mit cloudbasierten Auswerteketten, insbesondere für photogrammetrische Anwendungen.

Allen genannten Lösungen ist in Bezug auf photogrammetrische Bildflüge gemeinsam, dass sie gängige Flugmuster (z.B. Gitter- und Korridorflüge), Terrain Following-Missionen mit konstanter Flughöhe über Grund sowie automatisierte Planungsworkflows unterstützen. Sie unterscheiden sich jedoch deutlich im Funktionsumfang, etwa bei der „echten“ 3D-Flugplanung auf Basis von CAD-Modellen für Fassaden- und Brückenbefliegungen oder der 2,5D-Flugplanung auf Basis digitaler Geländemodelle für Terrain Following zur Erfassung von Oberflächenmodellen, sowie hinsichtlich der Plattformintegration. Herstellerunabhängige Missionsplanungssoftware für LIDAR-Flüge ist derzeit nur eingeschränkt verfügbar.

Hinweis zur Terminologie

Die Bezeichnungen für Flugmuster und Höhenführungsstrategien variieren zwischen den einzelnen Softwarepaketen teilweise deutlich. So wird eine konstante Flughöhe über Grund je nach Hersteller beispielsweise als *Terrain Following*, *Terrain Awareness* oder *AGL Flight* bezeichnet. Für eine eindeutige Interpretation der Funktionen ist daher stets die jeweilige Herstellerdokumentation heranzuziehen.

Weiterführende Informationen der Hersteller

Detaillierte Spezifikationen und Tutorials zu den einzelnen Softwarelösungen sind auf den offiziellen Seiten der Hersteller zu finden (Stand: 18.01.2026):

- UgCS: <https://www.sphengineering.com/flight-planning/ugcs>
- DJI Terra: <https://enterprise.dji.com/dji-terra>
- Dronelink: <https://www.dronelink.com/>
- Drone Harmony: <https://www.droneharmony.com/>
- DroneDeploy: <https://www.dronedeploy.com/>

1.3.1.3 Automatisierung und Sicherheit in der Flugplanung

Automatisierung und Sicherheit sind in der UAS-gestützten Vermessung keine theoretischen Konzepte, sondern feste Bestandteile der täglichen Praxis. Ziel ist es, Missionen wiederholbar, kontrollierbar und regelkonform zu planen und durchzuführen - unabhängig von individuellen Entscheidungen der Piloten während des Flugs. Praktisch bedeutet Automatisierung vor allem: *weniger manuelle Eingriffe, klar definierte Abläufe und ein erhöhtes (planbares) Sicherheitsniveau.*

Prävention von Fehlern durch Automatisierung: Zwischenfälle entstehen oft nicht durch technische Defekte, sondern durch Fehleinstellungen oder inkonsistente Planung. Moderne Planungssoftware wirkt präventiv, indem sie:

- Plausibilitätsprüfungen durchführt, um unrealistische Parameter zu verhindern (z.B. zu hohe Geschwindigkeit bei kurzer Belichtungszeit)
- Vordefinierte Missionsprofile bereitstellt, die bewährte Einstellungen wiederverwenden
- Große Projekte (bezogen auf die zu erfassenden Flächen) automatisch segmentiert, um Missionsabbrüche durch leere Akkus zu vermeiden

Für Einsteiger ist dies besonders vorteilhaft, da strukturierte Abläufe die Abhängigkeit von individueller Erfahrung reduzieren.

Sicherheit durch begrenzten Handlungsspielraum: Moderne Systeme priorisieren den autonomen Ablauf, erlauben aber jederzeit manuelle Übernahmen. Typische Sicherheitsmaßnahmen umfassen:

- Automatische Begrenzung des UAS-Betriebs auf definierte Bereiche (Geofencing) und Höhenlimits, die bereits in der Planung definiert werden
- Failsafe-Strategien wie Return-to-Home (RTH), Landung oder Schweben in Abstimmung mit der Umgebung und dem Missionsziel
- Nutzung von Sensorik zur Hinderniserkennung
- Autonome Start- und Landesequenzen, insbesondere bei wiederkehrenden Einsätzen

Damit bleibt das System auch bei Kommunikationsabbrüchen oder GNSS-Problemen kontrolliert und stabil.

Navigation in schwierigen Umgebungen: In urbanen oder topografisch anspruchsvollen Gebieten ist GNSS-Abdeckung nicht immer zuverlässig - etwa unter Brücken und Häuserschluchten. Ziel ist nicht maximale Autonomie, sondern kontrolliertes, vorhersehbares Verhalten des Systems. Hier setzt bewährte Planungssoftware auf:

- Konservative Höhenreserven
- klare Abbruchkriterien bei Positionsunsicherheit
- Reduzierte Geschwindigkeit in kritischen Bereichen durch Sensorintegration
- Vermeidung unnötig komplexer Fluggeometrien

Dokumentation und Nachvollziehbarkeit: Eine vollständige Dokumentation der Mission ist entscheidend für Genehmigungen, Qualitätssicherung und Wiederholungsmessungen. Empfohlen werden:

- Speicherung der geplanten Mission inkl. aller Parameter
- Logfiles zur Nachvollziehbarkeit des Flugverlaufs
- Trennung zwischen Planungs-, Durchführungs- und Auswertungsdaten

In Ergänzung zu den benannten Sicherheitsfaktoren findet sich eine umfangreiche Checkliste zur Risikobewertung in Wildbach- und Lawinenverbauung, Forsttechnischer Dienst, & Langedger, F. (2024), S. 33ff.

Fazit

In der Praxis dient Automatisierung in der Missionsplanung vor allem der Standardisierung und Risikominimierung. Sie übernimmt zuverlässig Aufgaben, die früher manuell und fehleranfällig waren. KI-gestützte Verfahren könnten künftig adaptive Risikobewertung oder dynamische Flugbahnoptimierung ermöglichen, sind aber aktuell noch nicht Bestandteil etablierter Praxis. Für AnwenderInnen gilt: *saubere Planung, klare Prozesse und gezielter Einsatz bewährter Automatisierungsfunktionen.*

Literatur

- Aerotas. (n.d.). Overlap and Flight Pattern. <https://www.aerotas.com/overlap-and-flight-pattern-lidar>.
- Maes, W. H. (2025). Practical Guidelines for Performing UAV Mapping Flights with Snapshot Sensors. *Remote Sensing*, 17(4), 606. <https://doi.org/10.3390/rs17040606>.
- Sofonia, J. J., Phinn, S., Roelfsema, C., Kendoul, F., & Rist, Y. (2019). Modelling the effects of fundamental UAV flight parameters on LiDAR point clouds to facilitate objectives-based planning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149, 105-118. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.020>.
- Wildbach- und Lawinenverbauung, Forsttechnischer Dienst, & Langegger, F. (2024). Drohnen als Instrument zur Vermessung. In *Praxisleitfaden Zur Erstellung Von Geländemodellen Mit Hilfe Von Drohnen (UAS). Anleitungen Und Erläuterungen Zur Modellerstellung Und Flugdurchführung Sowie Wichtige Aspekte Und Begriffsbestimmungen Bei Der Auftragsvergabe*. Wildbach- und Lawinenverbauung, Forsttechnischer Dienst. https://www.bmluk.gv.at/dam/jcr:6651adab-6aa3-43f5-8cab-d980563ee92e/Drohnenerlass_Endfassung_Korr.pdf.

1.3.2 Datenverarbeitung

Verfasser: Ahmed Alamouri

Nach erfolgter Befliegung werden die Bilddaten und die dazugehörigen Aufnahmepositionen ggf. die mit (RTK/PPK) - GNSS gemessenen Koordinaten der Bildhauptpunkte an eine photogrammetrische Auswertesoftware (z.B. Pix4dMapper, Pix4Dmatic, Metashape, usw.) übergeben (Martínez-Carricondo, Agüera-Vega, & Carvajal-Ramírez, 2023). Die Skalierung und Georeferenzierung des Objekts in den Bildern werden mit Hilfe der gemessenen Passpunkte und/oder der GNSS-Positionen durchgeführt. In diesem Rahmen und durch die Bündelblockausgleichung (BBA) werden aus den erfolgreich zugeordneten Bildpunkten die äußere Bildorientierung sowie die Parameter für die Kamerakalibrierung (innere Orientierung) automatisch berechnet.

Der Workflow ggf. die Berechnungsschritte der o.g. photogrammetrischen Auswertung können wie folgend zusammengefasst werden (Kersten und Lindstaedt, 2017):

1.3.2.1 Kameraorientierung

Als erster Schritt werden nach dem Erstellen eines neuen Projekts in der verwendeten Auswertesoftware die Bilder eingeladen. Die verwendete Kamera mit der entsprechenden internen Orientierung wird aus einer Datenbank, entsprechend den Vorgaben der EXIF-Datei eines jeden Bildes, automatisch eingeladen. Bei der „Kameraorientierung“ können alle Bilder des Datensatzes zugeordnet und im Raum orientiert werden. Es werden die Schritte der Bündelblockausgleichung (BBA), inkl. automatischer Messung von Verknüpfungspunkten, durchlaufen (Luhmann, 2023). Wichtige Einstellungsparameter sind die Angaben zur Genauigkeit der Position der Kameras (über RTK-GNSS oder unkorrigiertes GNSS) sowie zur Genauigkeit der gemessenen Bodenpunkte (Pass- und Kontrollpunkte). Die internen Kameraparameter (Kammerkonstante, Bildhauptpunkt, Linsenverzeichnung) werden im Rahmen der BBA bestimmt. Wichtig ist, dass die Kameraeinstellungen (Zoom/Fokus) innerhalb eines Projekts nicht verändert werden.

1.3.2.2 Punktwolke und Vermaschung

Unter Verwendung der ausgeglichenen Orientierungsparameter und von Verfahren zur Bildzuordnung wird automatisch eine 3D-Punktwolke erstellt. Zusätzlich zur generierten Punktwolke besteht die Möglichkeit, eine Dreiecksvermaschung der Punkte zu berechnen. Die Punktwolken enthalten jedoch häufig irrelevante Punkte, wie beispielsweise Messrauschen und Störpunkte. Um dieses Problem zu beheben, wird empfohlen, einen Filterprozess anzuwenden. Dieser Prozess kann automatisch durchgeführt werden, um die Datenmenge zu reduzieren, aber es ist wichtig sicherzustellen, dass während des Filterprozesses keine wertvollen Details verloren gehen. Sobald die Filterung abgeschlossen ist, kann eine Dreiecksvermaschung der Punkte erfolgen, um Digitale Oberflächenmodelle (DOM) zu berechnen.

1.3.2.3 DOM und Orthomosaik

Durch die erzeugte Dreiecksvermaschung lässt sich ein geschlossenes Modell bilden. Weiterhin können aus dem Vermaschungsmodell ein Orthophoto und/oder Mosaik abgeleitet werden.

Die oben genannten Schritte lassen sich anhand eines Beispielprojekts besser verstehen, das kürzlich von Studierenden an das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie IGP an Technischen Universität Braunschweig TUBS abgeschlossen wurde. Dies wird im Folgenden erläutert.

1.3.2.4 Beispielprojekt: Baracke

Der UAS-Datensatz für dieses Projekt wurde im Sommer 2024 erhoben. Der Teststandort „Baracke“ befindet sich auf dem nördlichen Campus der TUBS und umfasst eine Fläche von 130x180 m², auf der sich überwiegend alte Gebäude befinden (Abb. 1.3.2.4 - 1). Die Flugmission wurde mit der DJI Mavic3 Enterprise durchgeführt mit dem Ziel, Bilder mit einer Überlappung von 80 % in Flugrichtung und 70 % lateral in einer Flughöhe von 30 Metern aufzunehmen. Die Global-Shutter-Kamera mit einem Sichtfeld (FOV) von 84° nahm insgesamt 175 Bilder auf. Um die absolute Orientierung des Bildblocks mit hoher Genauigkeit zu ermitteln, war ein gut verteilter Satz von Bodenkontrollpunkten (GCPs) erforderlich. In diesem Zusammenhang erfassen die Studierenden 9 GCPs mit einer Positionsgenauigkeit von ±2 cm und verwendeten diese zur Unterstützung der indirekten Sensorausrichtung des Bildblocks.

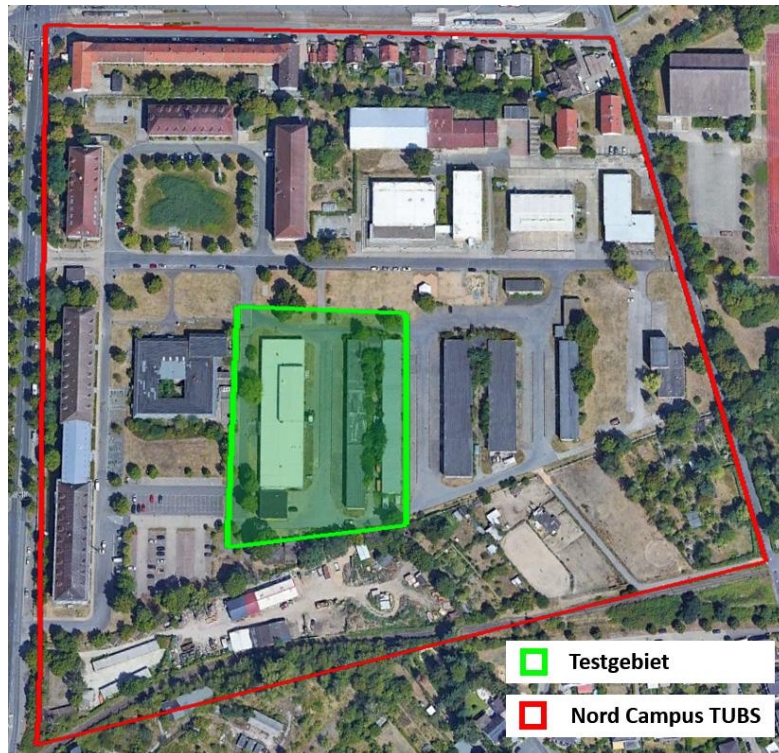


Abb. 1.3.2.4 - 1: Testgebiet an der Nord Campus der TUBS

Als nächstes wurden die Bildorientierung und die Bündelblockausgleichung mit der kommerziellen Software Pix4DMapper durchgeführt. Es ist wichtig zu beachten, dass dieser Prozess auch mit Open-Source-Tools für Photogrammetrie wie z.B. OpenDroneMap durchgeführt werden kann. Abb. 1.3.2.4 - 2 zeigt den orientierten Bildblock- die Flugstreifen sind gut zu erkennen.

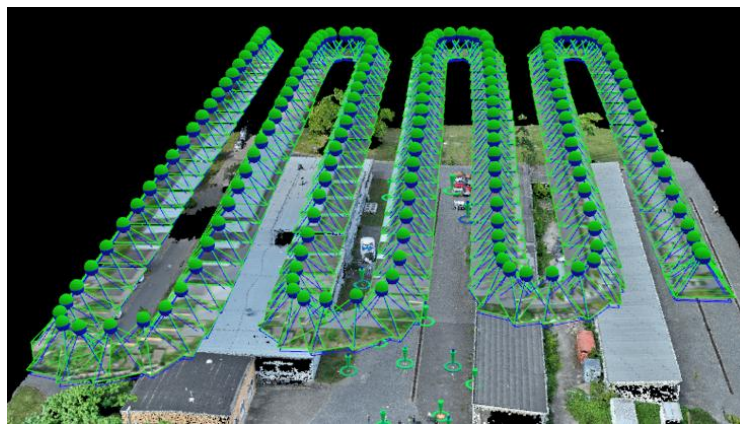


Abbildung 1.3.2.4 - 2: Der orientierte Bildblock entlang der Flugstreifen

Nach Abschluss des Orientierungsprozesses wurden die Studierenden mit der Analyse und Bewertung der Ergebnisse beauftragt. Dazu verwendeten sie den von der Software erstellten Qualitätsbericht, der verschiedene Kriterien enthält wie z.B. der Mittelwertfehler RMSE der GCPs, usw.

Die erfolgreiche geometrische Überprüfung des Bildblocks ermöglichte, mit dem nächsten Schritt fortzufahren, nämlich die Erstellung zusätzlicher photogrammetrischer Produkte wie beispielsweise eines Orthobildes des Testgebiets und eines digitalen Oberflächenmodells, siehe Abb. 1.3.2.4 - 3.



Abbildung 1.3.2.4 - 3: Orthomosaik des Testgebiets und das entsprechende DOM

Literatur

- Kersten, T. P. & Lindstaedt, M. (2017): Photogrammetry at the Touch of a Button - Evaluation and Results of UAV-Supported Photo Flight Data. ZfV - Zeitschrift Fur Geodasie, Geoinformation Und Landmanagement 142 (1): 3-13. DOI: <https://doi.org/10.12902/zfv-0145-2016>.
- Luhmann, T. (2023): Nahbereichsphotogrammetrie Grundlagen - Methoden - Beispiele, Lehrbuch, 5. Auflage ISBN 978-3-87907-732-8, Verlag: Wichmann.
- Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F. & Carvajal-Ramírez, F. (2023): Accuracy assessment of RTK/PPK UAV-photogrammetry projects using differential corrections from multiple GNSS fixed base stations. Geocarto International, 38(1). DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2197507>

1.4 Verarbeitung von UAS-Daten in GIS und Geodatenbanken

1.4.1 Datenformate

1.4.1.1 Austauschformate für 3D-Punktwolken

Verfasser: Benedikt Schwab

3D-Punktwolken sind im Wesentlichen ungeordnete Mengen von 3D-Koordinaten (x, y, z), die zusätzlich Attribute wie Intensität, Messzeitpunkt oder Farbwerte tragen können. In ihrer einfachsten Form lassen sie sich als Tabelle darstellen, in der jede Spalte ein Attribut beschreibt. Trotz dieser vergleichsweise einfachen Struktur haben sich eine Vielzahl unterschiedlicher Formate mit eigenen Einsatzschwerpunkten etabliert.

LAS

Das LAS-Format gilt als etablierter und breit unterstützter Industriestandard für den Austausch von LIDAR-Punktwolken. Es wird als offenes Format von der American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) aktiv weiterentwickelt und die aktuelle Version 1.5 R00 wurde 2025 veröffentlicht (ASPRS, 2025). In der Praxis liegen LAS-Datensätze überwiegend in der Version 1.4 vor, die im Jahr 2018 vom OGC als Community Standard verabschiedet wurde (ASPRS, 2018).

Das LAS-Format ist binär und speichert die Fließkomma-Koordinaten der Punkte intern als Ganzzahlen, die über einen Offset und einen Skalierungsfaktor aus dem Header rekonstruiert werden. Dies ermöglicht eine effiziente Repräsentation, wobei der Skalierungsfaktor die Nachkommagenauigkeit beeinflusst und in der Regel vor der Speicherung von der verwendeten Software festgelegt werden kann.

Die Version 1.4 spezifiziert insgesamt elf Point Data Record Formats (PDRFs), die die Attributstruktur und Datentypen festlegen. Das häufig genutzte PDRF 0 umfasst zwölf Attribute, darunter Intensität, Return Number und Klassifikation. Farbkanäle werden in den PDRFs 2, 3, 5, 7, 8 und 10 unterstützt. Die Klassifikation eines Punktes wird durch 256 mögliche Werte kodiert, wobei beispielsweise Gebäude der Klasse 6 und der Boden der Klasse 2 entsprechen. Ausgewählte PDRFs können außerdem GPS-Zeit, Punktquelle, Nahinfrarotwerte, Scanwinkel, Waveform-Daten sowie nutzerspezifische Informationen in einem Bytefeld speichern. Der Datei-Header enthält neben Offset und Skalierungsfaktor auch die Bounding Box, optional das Erstellungsdatum sowie Sensor- und Hardwareinformationen. Zusätzliche Metadaten, nutzerspezifische Informationen und Angaben zum Koordinatenreferenzsystem können in sogenannten Variable Length Records (VLRs) gespeichert werden. Das Koordinatenreferenzsystem kann in LAS 1.4 entweder als GeoTIFF-CRS oder vorzugsweise als Well-Known Text (WKT) repräsentiert werden. Letzteres ermöglicht die Definition des Lage- und Höhensystems als Compound-CRS (Roger, 2015). Punktdatensätze können zudem über sogenannte Extra Bytes VLRs um beliebige zusätzliche Attribute erweitert werden, wobei ganzzahlige und Gleitkommatypen mit bis zu 64-Bit unterstützt werden.

Die LAS-Version 1.5 bringt Verbesserungen bei der Repräsentation der GPS-Zeit und stellt zugleich die Unterstützung für die PDRFs 0-5 sowie für die Georeferenzierung mittels GeoTIFF-CRS ein.

LAZ

Das Format LAZ basiert vollständig auf der LAS-Spezifikation und ergänzt diese um eine verlustlose Kompression. Die offene Spezifikation wird von der rapidlasso GmbH aktiv weiterentwickelt und geht maßgeblich auf Martin Isenburg zurück. Die Version 1.4 der LAZ-Spezifikation wurde 2025 veröffentlicht (rapidlasso, 2025).

Mit LAZ lassen sich LAS-Punktwolken-Datensätze verlustfrei auf etwa 7-20 % ihrer ursprünglichen Größe reduzieren. Insbesondere für große Punktwolkenbestände und die speichereffiziente Archivierung ist das Format daher weit verbreitet. Die Kompression bzw. Dekompression geht jedoch mit einem erhöhten Zeitaufwand beim Lesen und Schreiben von Punktwolken innerhalb von Applikationen oder Verarbeitungspipelines einher. Bibliotheken zum Lesen und Schreiben von LAS-Datensätzen unterstützen in der Regel auch LAZ über dieselben Schnittstellen, sofern eine entsprechende Bibliothek für die Kompressionsfunktionalität installiert ist.

zLAS

zLAS ist ein proprietäres Format von ESRI, das auch auf dem LAS-Format basiert und dieses um eine eigene Kompression erweitert. Das Format kommt insbesondere innerhalb der ESRI-Produktpalette zum Einsatz. Da die Spezifikation nicht offen ist, wird es von Werkzeugen außerhalb des ESRI-Ökosystems kaum unterstützt und muss zunächst nach LAS oder LAZ konvertiert werden.

COPC

Cloud Optimized Point Cloud (COPC) ist eine von der LIDAR-Softwarefirma Hobu entwickelte Erweiterung des LAZ-Formats in Version 1.4 (Hobu Inc., 2021). Für die Visualisierung und Verarbeitung von Punktwolken werden üblicherweise räumliche Indizes, insbesondere Quadrees und Octrees, aufgebaut, um effiziente Abfragen von Teilmengen zu ermöglichen. Das COPC-Format definiert eine Octree-basierte Anordnung der Punkte innerhalb einer LAZ-Datei. Dadurch können Applikationen selektiv nur relevante Teilbereiche der Punktwolke lesen, ohne zuvor selbst den Octree bauen zu müssen. Diese Strukturierung ermöglicht cloud-natives Streaming von Punktwolken und findet zunehmend Unterstützung in verschiedenen Softwarelösungen. Da eine COPC eine vollständig valide LAZ-Datei darstellt und die Dateiendung „.copc.laz“ verwendet, können alle LAZ-fähigen Werkzeuge direkt COPC-Dateien verarbeiten.

EPT

Entwine Point Tiles (EPT) ist das Format der gleichnamigen Bibliothek Entwine und wurde von der Firma Hobu entwickelt (Hobu, 2025). Es definiert eine octreebasierte räumliche Indexstruktur und gilt als Vorläufer des moderneren COPC-Formats. Im Gegensatz zu COPC erfolgt die Octree-Organisation nicht innerhalb einer einzelnen LAZ-Punktwolkendatei. Stattdessen wird die Ausgangspunktwolke entsprechend der Octree-Struktur in viele kleinere Punktwolkendateien aufgeteilt, wobei jede Datei einem Knoten des Octrees entspricht. Die Namen dieser Punktwolkendateien folgen dem Schema Tiefe-X-Y-Z und ermöglichen so eine direkte räumliche Adressierung einzelner Knoten. Die Auflösung ist additiv, sodass sich die vollständige Punktwolke eines Bereichs durch das Zusammenführen aller Knoten vom Wurzelknoten bis zur tiefsten Ebene ergibt. Eine separate Hierarchiedatei gibt dem Client vorab Auskunft darüber, welche Knoten existieren und wie viele Punkte sie enthalten. Die eigentlichen Punktdaten können dabei in verschiedenen Formaten vorliegen, etwa als LAZ-Dateien, als unkomprimierte Binärdaten oder als Zstandard-komprimierte Binärdaten.

E57

Das E57-Format ist ein offener Standard für den Austausch von 3D-Scandaten und wird durch die ASTM-Norm E2807 spezifiziert, die erstmals 2011 veröffentlicht und 2019 reaffirmiert wurde (E57 Committee, 2019). Das Format hat sich als herstellerübergreifender Austauschstandard für terrestrische Laserscanning-Systeme (TLS) etabliert und wird von namhaften Herstellern unterstützt. Da diese Hersteller in der Regel proprietäre Formate als primäres Speicherformat nutzen, dient E57 in der Praxis vor allem als Exportformat für die softwareübergreifende Weiterverarbeitung und Archivierung von Scandaten. E57 basiert auf XML mit eingebetteten binären Datenbereichen und ist daher teilweise menschenlesbar. Eine E57-Datei kann mehrere Scan-Positionen mit Transformationen, Punktdaten (XYZ, Intensität, RGB), Kamerabildern sowie Metadaten enthalten. Die Georeferenzierung kann optional über das coordinateMetadata-Textfeld mit einem WKT-CRS erfolgen.

PCD

Das PCD-Format (Point Cloud Data) ist das native Dateiformat der Bibliothek Point Cloud Library (PCL), einer etablierten Open-Source-Bibliothek zur Verarbeitung von Punktwolken. Version 0.7 des Formats wurde 2020 eingeführt und wird insbesondere in der Punktwolkenverarbeitung und Robotik eingesetzt (PCL-Dokumentation, 2026). Es unterstützt die Speicherung in ASCII-, binärer und komprimierter binärer Form. Dabei können beliebige Felder mit frei wählbaren Namen, Datentypen und Dimensionen im Header deklariert werden, was das Format besonders flexibel für unterschiedliche Sensormodalitäten macht. Da PCD keine explizite Definition eines Lage- und Höhenkoordinatensystems unterstützt, ist es für die Archivierung und den Austausch georeferenzierter Punktwolken nur eingeschränkt geeignet. Stattdessen wird es vorwiegend für die echtzeitnahe, sensorbezogene Verarbeitung in lokalen Koordinatensystemen eingesetzt.

XYZ

Das XYZ-Format folgt keiner formalen Spezifikation, sondern ist eine weit verbreitete Konvention zur einfachen, textbasierten Speicherung von Punktwolken. Eine XYZ-Datei besteht aus einer durch Leerzeichen oder Kommata getrennten Wertetabelle, in der jede Zeile einen Punkt repräsentiert. Da die Namen und Reihenfolge der Spalten nicht standardisiert sind, können beliebige Attribute pro Punkt gespeichert werden. Damit Punktwolken-Software die Spalten korrekt interpretieren kann, wird häufig beim Import ein Dialog angezeigt, in dem die Bedeutung der einzelnen Spalten festgelegt werden muss, beispielsweise für Intensitäts- oder Farbkanäle.

Die Stärke des Formats liegt in seiner Kompatibilität, da nahezu jede Software zur Punktwolkenverarbeitung XYZ-Dateien lesen sowie schreiben kann und sich die Dateien ohne spezielle Werkzeuge in einem Texteditor einsehen lassen. Im Vergleich zu binären Formaten führt die textbasierte Speicherung zu deutlich größeren Dateien und langsameren Ladezeiten. Außerdem werden Metadaten und Koordinatenreferenzsysteme nicht unterstützt. XYZ eignet sich daher vor allem für kleine Datensätze und den Einsatz als kleinster gemeinsamer Nenner beim Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Softwareumgebungen. Alternativ zum XYZ-Format werden Punktwolken auch als CSV- oder TXT-Dateien in textbasierter Form gespeichert.

Übersicht

Die Tabelle 1.4.1.1 - 1 vergleicht die beschriebenen Punktwolkenformate. Da EPT als Vorläufer von COPC primär eine Indexstruktur für verschiedene Punktwolken-Trägerformate definiert, wird es hier nicht gesondert aufgeführt.

Tabelle 1.4.1.1 - 1: Vergleich der Punktwolkenformate

Eigenschaft	LAS	LAZ	ZLAS	COPC	E57	PCD	XYZ
Entwickler	ASPRS	rapid-lasso	Esri	Hobu	ASTM	PCL	—
Basierend auf	—	LAS	LAS	LAZ	—	—	—
Offen / Proprietär	Offen	Offen	Proprietär	Offen	Offen	Offen	Offen
Typ	Binär				XML mit Binärbereichen	ASCII, binär	ASCII
Menschenlesbar	Nein				Teilweise	Nein	Ja
Koordinaten- Repräsentation	Ganzzahlig mit Skalierungs- und Offsetparametern				Fließkomma mit 64-Bit	Fließkomma mit 32- oder 64-Bit	Fließkomma
Unterstützung für Definition von Koordinatensystem	Lage- und Höhensystem im WKT-CRS-Format innerhalb des LAS-Headers				WKT-CRS möglich	—	—
Cloud-nativ	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein

Weitere Formate

Neben den genannten Formaten existieren zahlreiche weitere herstellersistenspezifische Formate, die als native Ausgabeformate einzelner Scannerhersteller verbreitet sind, darunter PTX, FLS, ZFC und RCS. Für die softwareübergreifende Verarbeitung ist in der Regel eine Konvertierung in offene Formate wie E57 oder LAS erforderlich.

Außerdem hat sich im Bereich der cloud-nativen Analyse großer Datenmengen das quelloffene und spaltenorientierte Format Apache Parquet etabliert. Es definiert zwar keine punktwolken-spezifischen Konzepte, kann jedoch aufgrund seiner hohen Flexibilität und der integrierten Kompression bei der Entwicklung eigener Punktwolken-Pipelines hilfreich sein. Erwähnenswert ist zudem GeoParquet, das Parquet um Punkt-, Linien- und Polygoneometrien erweitert und sich derzeit im OGC-Standardisierungsprozess befindet.

Für den Austausch von Punktwolken und zunehmend auch Gaussian Splats wird außerdem das Format PLY eingesetzt, das jedoch primär dem Bereich der Oberflächen- und Mesh-Formate zuzuordnen ist.

1.4.1.2 Formate für Oberflächen / Meshes

Verfasser: Thomas Fröch

In der 3D-Computergrafik versteht man unter Meshes im Allgemeinen Datenstrukturen zur Beschreibung der Oberfläche von 3D-Objekten durch Verbände unregelmäßiger Flächen (faces). Diese Flächen (meistens Dreiecke oder Vierecke) werden aus miteinander verbundenen Knoten (vertices) und Kanten (edges) aufgebaut. Im Bereich der Geoinformatik finden Meshes vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Im Folgenden werden die gängigsten Mesh-Datenformate kurz beschrieben.

Wavefront Object (OBJ)

Entwickelt um 1990 von Wavefront Technologies, dient das Wavefront-OBJ-Format zur Beschreibung der 3D-Geometrie der Oberfläche eines oder mehrerer Objekte (OBJ 2025, Bourke 2026a). Seit Mitte der 1990er-Jahre gilt das für Menschen lesbare, ASCII-basierte Format als herstellerneutral und wird als „Wavefront OBJ“, „Alias/Wavefront OBJ“ oder einfach als „OBJ“ bezeichnet. Neben Geometrien in Form von Punkten, Linien, Flächen, Freiformkurven und Freiformflächen können auch Farben sowie Texturen repräsentiert werden. Die ursprüngliche Spezifikation des OBJ-Formates verwendet hierzu eine zusätzliche Wavefront Material Template Library (MTL)-Datei.

Zentrales Konzept von OBJ sind Elemente wie beispielsweise Flächen oder Linien. Diese sind zusammengesetzt aus Vertices. OBJ folgt dabei einer einfachen, zeilenorientierten Struktur. Jede Zeile beginnt mit einem bestimmten Schlüsselbuchstaben, welcher die Art des in der jeweiligen Zeile beschriebenen Objektes festlegt. Die Zusammensetzung der Elemente erfolgt hierbei durch Indizierung der zugehörigen Vertices. Dementsprechend können auch mehrere Objekte gleichzeitig in einer einzelnen Datei repräsentiert werden. Das OBJ-Format selbst schreibt die Orientierung des verwendeten Koordinatensystems nicht vor.

OBJ bietet keinen einheitlichen Mechanismus zur Einbettung strukturierter Metadaten. Auch einen Header müssen OBJ-Dateien nicht zwingend enthalten. Eine Angabe von Objektidentifikatoren, semantischen Attributen, verwendeten Maßeinheiten und Koordinatenreferenzsystemen muss daher gesondert oder mithilfe von Kommentaren in den Dateien erfolgen.

Während das OBJ-Format grundsätzlich auch parametrische Geometrien wie Freiformflächen und Kurven erlaubt, werden diese jedoch von gängigen Softwareprodukten nur selten vollständig unterstützt. In der Praxis beschränken sich viele Anwendungen (wie beispielsweise diverse Game-Engines und 3D-Modellierungstools) auf das Laden und Verarbeiten von Vertices („v“) und Faces („f“). Das OBJ-Format selbst macht keinerlei Vorschriften über die zu verwendende Bit-Tiefe.

Standard Tessellation Language (STL)

Vom Standard Tessellation Language (STL)-Format existieren zwei Varianten. Eine für Menschen lesbare, ASCII-basierte, und eine verglichen mit der ASCII-basierten Variante kompaktere, und daher häufiger verwendete binäre Variante (STL 2025). STL wurde Ende der 1980er-Jahre von der 3D Systems Corporation entwickelt. Seitdem hat das Format weite Verbreitung erfahren und findet heute hauptsächlich im 3D-Druck Anwendung.

Bei STL handelt es sich um ein vergleichsweise einfaches Datenformat. Es bietet neben der Repräsentation von Geometrie keine standardisierte Möglichkeit zur Repräsentation von Farben, Texturen, oder semantischen Attributen. Des Weiteren existiert auch kein standardisierter Mechanismus zur Georeferenzierung modellierter Objekte, wobei die Orientierung des Koordinatensystems und auch Maßeinheiten nicht vom Datenformat vorgegeben oder gespeichert werden.

Sowohl die ASCII-basierte als auch die binäre Variante des Formats folgen derselben Herangehensweise zur Repräsentation von Objekten. Zentraler Baustein sind dabei Dreiecksflächen, für welche jeweils die Koordinaten der Eckpunkte und die Komponenten des nach außen zeigenden Normalenvektors gespeichert werden. Die Reihenfolge der Eckpunkte muss bei Betrachtung von außen entgegen dem Uhrzeigersinn erfolgen („Rechte-Hand-Regel“) und der Normalenvektor sollte normiert werden. Zudem muss jedes Dreieck mindestens zwei seiner Eckpunkte mit einem anderen Dreieck teilen.

Ein STL-Dokument kann keine ganzen Szenen, bestehend aus mehreren Objekten, enthalten, sondern stets nur ein einzelnes Objekt repräsentieren. Während die binäre Variante des STL-Formates zur Speicherung der Koordinaten 32-Bit Zahlen verwendet, existiert für die ASCII-Variante theoretisch keine Einschränkung.

Das STL-Format ist häufig teils scharfer Kritik ausgesetzt. Kritiker monieren beispielsweise häufig hohe Redundanz in der Speicherung einzelner Punkte sowie die teils sehr aufwendige Repräsentation von Geometrien mit glatten Kurven durch oft sehr große Zahlen einzelner Dreiecke.

Filmbox (FBX)

Das Filmbox (FBX)-Format ist ein von Kaydara entwickeltes und seit 2006 im Besitz von Autodesk befindliches, proprietäres, geschlossenes Datenformat (FBX 2025). Um FBX-Dateien verarbeiten zu können, müssen Softwareanwendungen üblicherweise das ebenfalls proprietäre FBX-SDK verwenden.

Mit FBX können vollständige 3D-Szenen, bestehend aus mehreren Objekten, inklusive Kamera- und Beleuchtungsparametern sowie weiterer Elemente repräsentiert werden. Typischerweise werden FBX-Dateien binär enkodiert, es ist jedoch auch eine Speicherung im ASCII-Format möglich. Inhaltlich können FBX-Dateien eine große Bandbreite an Informationen enthalten, darunter 3D-Geometrie (z.B. Vertices, Polygone), Materialinformationen, Texturen und Hierarchien. Zusätzlich erlaubt FBX als einziges der in diesem Kapitel gelisteten Formate explizit auch die Speicherung von Animationen, Kamera- und Beleuchtungsparametern. Die geometrischen Informationen werden dabei als Eigenschaften in unterschiedliche Datentypen (skalare Werte, Arrays, Strings) abgelegt. FBX verwendet dabei standardmäßig ein rechtshändiges Koordinatensystem, bei welchem die Y-Achse nach oben zeigt. Zudem erlauben zusätzliche Parameter die Speicherung von Informationen über die verwendete Maßeinheit. Eine vollständige Georeferenzierung modellierter Objekte muss jedoch gesondert, außerhalb des eigentlichen Datenformates, erfolgen.

Das FBX-Format ist nicht offiziell öffentlich dokumentiert. Es existieren jedoch offen zugängliche Nachbauten des Datenformates (beispielsweise durch die Blender Foundation (2013)). Demnach bestehen FBX-Dateien im Kern aus einer hierarchischen Struktur verschachtelter Knoten (Nodes). Jeder Knoten besitzt einen Knotentyp, eine Liste von Eigenschaften (z.B. Zahlen, Strings, oder Arrays) sowie optional weitere untergeordnete Knoten, wodurch sich eine rekursive Struktur ergibt.

Polygon File Format / Stanford Triangle Format (PLY)

Auch das Polygon File Format (PLY) erlaubt die Speicherung von Mesh-Geometrien. Es wurde maßgeblich in den 1990er Jahren an der Stanford University entwickelt, weshalb es auch häufig als Stanford Triangle Format bezeichnet wird. PLY ist ein offenes Datenformat, dessen Weiterentwicklung gegenwärtig nicht in einem formell definierten Rahmen erfolgt. Es existiert in binärer sowie in menschenlesbarer ASCII-basierter Variante (PLY 2025, Bourke 2026b).

Eine der Motivationen für die Entwicklung von PLY war die Überwindung der Beschränkungen des OBJ-Formates. Wie OBJ dient PLY der Beschreibung polygonaler Geometrien, unterscheidet sich jedoch durch die Verwendung eines Dateiheaders und Mechanismen für zusätzliche Flexibilität. Im Header von PLY-Dateien werden die verschiedenen in der Datei enthaltenen Objekte, zum Beispiel Vertices oder Faces, explizit definiert. Zusätzlich erlaubt PLY die explizite Spezifizierung von Datentypen und die Speicherung zusätzlicher, nutzerdefinierter Attribute wie Metadaten oder auch Informationen über verwendete Koordinatenreferenzsysteme. Zu beachten ist, dass bei PLY für die Georeferenzierung keine standardisierten Mechanismen existieren; entsprechende Informationen müssen über benutzerdefinierte Attribute kodiert werden.

Neben der Speicherung von Oberflächenmeshes erlaubt das PLY, wie in Kapitel 1.4.1.1 erwähnt, auch die Speicherung von Punktwolken und Gaussian Splats.

Georeferenzierung von Meshes

Eine zentrale Herausforderung für die Nutzung der verschiedenen Mesh-Datenformate für Anwendungen mit Raumbezug ist die Georeferenzierung. Keines der in diesem Kapitel vorgestellten Formate unterstützt nativ vollumfängliche Georeferenzierung in einem der gängigen amtlichen Koordinatensysteme. Eine eindeutige Georeferenzierung muss hier stets entweder durch die Bereitstellung zusätzlicher Metadaten, nutzerdefinierter Parameter oder Modifikationen der Datenformate selbst erfolgen.

In der Praxis erweisen sich große Zahlenwerte, wie sie beispielsweise in UTM-Systemen durch das Anbringen des „False Easting“ von 500.000m vorkommen, als eine Herausforderung. Einige Formate, wie beispielsweise die binäre Variante von STL, verwenden zur Repräsentation der Objektkoordinaten Zahlen mit begrenzter Genauigkeit (z.B. 32-Bit Zahlen). Die Speicherung absoluter Koordinatenwerte kann daher zu signifikanten Rundungsfehlern führen, welche sich zum Beispiel in Form von Jittering-Effekten in Visualisierungen zeigen. Auch wenn textbasierte Formate wie beispielsweise OBJ theoretisch höhere Präzision zulassen, limitieren oft die bearbeitenden Zielanwendungen (wie beispielsweise verschiedene Game-Engines oder Anwendungen zur 3D-Modellierung) die interne Genauigkeit.

Tabelle 1.4.1.2 - 1: Vergleich Oberflächen-Datenformate

Eigenschaft	OBJ	STL	FBX	PLY
Entwickler	Wavefront Technologies	3D Systems Corporation	Kaydara / Autodesk	Stanford University
Offen / Proprietär	Offen	De-Facto offen	Proprietär	Offen
Typ	ASCII-Basiert	Binär (häufig)	Binär (häufig)	Binär
		ASCII-basiert	ASCII-basiert	ASCII-basiert
Menschenlesbar	Ja	Binär nein	Binär nein	Binär nein
		ASCII-basiert ja	ASCII-basiert ja	ASCII-basiert ja
Unterstützte Geometrie-Typen	Vielfältige Geometrietypen, In der Praxis meist nur Unterstützung von Vertices und Faces	Ausschließlich Dreiecke und deren Normalenvektoren	Vielfältige Geometrietypen, Volle Unterstützung durch FBX SDK	Vielfältige Geometrietypen
Bit-Tiefe	Theoretisch keine Einschränkung, in der Praxis häufig 32-Bit float	Binär: 32-Bit Float ASCII-basiert: theoretisch keine Einschränkung, in der Praxis häufig 32-bit float	Variable, im SDK definiert	Konfigurierbar, bis zu 64-bit
Unterstützung von Farben, Material, Textur	Ja (über zusätzliche .mtl Datei)	Nein	Ja	Ja
Unterstützung für Definition der Orientierung von Koordinatenachsen	Nein	Nein	Ja	Ja (über nutzerdefinierte Eigenschaften)
Unterstützung für Definition von Maßeinheiten	Nein	Nein	Ja	ja
Unterstützung für Speicherung von Animationen und Kameraparametern	Nein	Nein	Ja	Nein

1.4.1.3 3D-Visualisierungsformate

Verfasser: Benedikt Schwab, Thomas Fröch

Gängige Formate zur Visualisierung von 3D-Inhalten lassen sich grundsätzlich danach unterscheiden, ob sie für die direkte Darstellung einzelner 3D-Assets ausgelegt sind oder das webbasierte Streaming großer georeferenzierter Datensätze unterstützen.

glTF

Das Format GL Transmission Format (glTF) der Khronos Group ermöglicht das effiziente Übertragen und Laden von 3D-Szenen und -Modellen. Es ist ein offener Standard, wobei die aktuelle Version 2.0.1 seit 2021 als Spezifikation verfügbar ist (Khronos Group, 2021) und als ISO-Standard ISO/IEC 12113:2022 veröffentlicht wurde (ISO, 2022). glTF basiert auf einem hierarchischen Szenengraphen mit Konzepten für Kameras, Geometrien, Materialien, Texturen, Bilder, Hautoberflächen und Animationen. Es bietet ein JSON-basierte Encoding mit separaten Binär- und Textur-Assets sowie ein komplett eigenständiges Binär-Encoding mit der Dateiendung „.glb“. glTF wird von den meisten Modellierungswerkzeugen wie Blender, Autodesk Maya und SketchUp als Exportformat unterstützt und hat sich für den Einsatz in Game-Engines (Unity, Unreal Engine, Godot), Web-Engines (Three.js, Babylon.js) sowie VR/AR-Anwendungen etabliert.

Das Geometriemodell von glTF unterstützt die Repräsentation von Dreiecksmeshes, Linien und Punkten, deren Koordinaten für ein effizientes Rendering als 32-Bit-Gleitkommazahlen gespeichert werden. Die Geometrien sind in einem lokalen Koordinatensystem definiert, wobei in glTF kein globales Lage- oder Höhen-system spezifiziert werden kann. Damit eignet sich glTF zur Visualisierung von Punktwolken, texturierten Meshes sowie triangulierten Objektoberflächen ohne Georeferenzierung.

Die Geometrieelemente werden mithilfe eines Szenengraphen hierarchisch gruppiert, sodass individuelle Knoten mitsamt ihren Kindknoten in der Szene für beispielsweise Animationen bewegt werden können. Jede Meshoberfläche kann mit einer Materialbeschreibung versehen werden, die physikalisch basiertes Rendering (PBR) ermöglicht und über die sich unter anderem Grundfarbe, Metallizität, Rauheit sowie Emissivität definieren lassen. Materialien können zusätzlich mit Texturen verknüpft werden, die u.a. Farbinformationen (Base Color), Oberflächendetails (Normal Map) sowie Licht- und Schattierungseffekte (Occlusion, Emissive) kodieren.

Darüber hinaus verfügt glTF über einen Erweiterungsmechanismus, der es ermöglicht, den Standard um zusätzliche Funktionalität zu ergänzen. Über offizielle Khronos-Erweiterungen (KHR_) sowie herstellerspezifische Erweiterungen (EXT_) lassen sich beispielsweise spezielle Materialeigenschaften, Draco-Komprimierung oder Metadaten definieren. Die Erweiterung KHR_gaussian_splatting ermöglicht die Einbettung von Gaussian Splats in glTF, die auf Basis von Fotoaufnahmen rekonstruiert werden können und eine neuartige Möglichkeit zur photorealistischen Darstellung bieten.

3D Tiles

Die Version 1.1 des Standards 3D Tiles wurde vom OGC im Jahr 2023 veröffentlicht (Cozzi & Lilley, 2023). Er definiert eine hierarchische Kachelstruktur zur Bereitstellung renderbarer Inhalte. Damit unterstützt 3D Tiles das Streaming großer georeferenzierter Datenmengen und ermöglicht die Darstellung von Punktwolken, texturierten Meshes sowie 3D-Modellen. Der Standard findet breite Anwendung im Bereich digitaler Zwillinge, in Smart-City-Plattformen sowie bei der Visualisierung von Punktwolken und Modellen in virtuellen Globen.

Für das Streaming heterogener Geodaten werden die Inhalte in Kacheln (Tiles) unterteilt, wie in Abbildung 1.4.1.3 - 1 dargestellt. In der Version 1.1 von 3D Tiles werden insbesondere Quadrees und Octrees durch den impliziten Tiling-Mechanismus unterstützt. Die Ausmaße der einzelnen Kacheln müssen dabei nicht mehr explizit angegeben und übertragen werden, da sie sich aus der Indexstruktur direkt ableiten lassen. Bei einem Octree wird die Punktwolke rekursiv in Oktanten unterteilt, wobei jeder Knoten eine repräsentative Teilmenge der Punkte enthält und mit zunehmender Tiefe eine höhere Detailgenauigkeit erreicht wird. Wie in Abbildung 1.4.1.3 - 1 dargestellt, können abhängig vom Sichtbereich des Clients entweder beispielsweise 100.000 Punkte stellvertretend für die gesamte Wand auf Level 0 oder ausschließlich die oberen rechten Fenster mit 100.000 Punkten auf Level 2 übertragen werden.

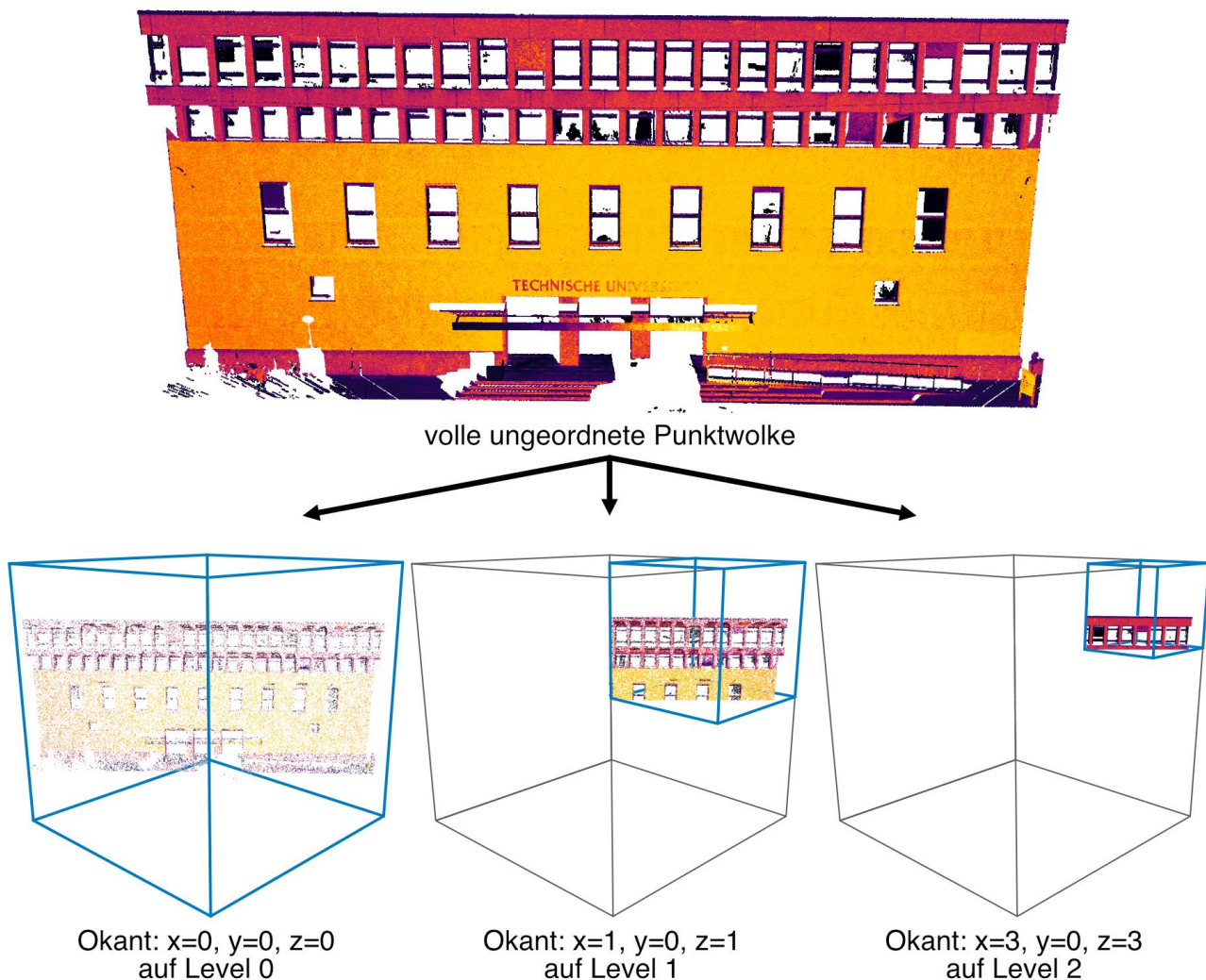


Abbildung 1.4.1.3 - 1: Hierarchische Unterteilung einer vollständigen, ungeordneten Punktwolke in einen Octree-Index, so dass clientabhängig nur die im Sichtbereich relevanten Punkte übertragen werden.

Seit Version 1.1 wird für die Übertragung von Kachelinhalten ausschließlich glTF als Kachelformat verwendet. Damit lassen sich Punktwolken, texturierte Meshes sowie triangulierte Objektoberflächen einheitlich mithilfe von glTF in einem lokalen Koordinatensystem repräsentieren und über die Kachelstruktur von 3D Tiles georeferenzieren. 3D Tiles verwendet standardmäßig das erdzentrierte, erdfeste WGS 84 (EPSG 4978) als globales Koordinatenreferenzsystem. Das PNTS-Trägerformat für Punktwolken sowie das B3DM-Trägerformat für Modelle gelten seit Version 1.1 als veraltet, weshalb ein Umstieg auf glTF als Trägerformat empfohlen ist.

Um Geometrien und deren Teilkomponenten innerhalb eines glTF-Assets eindeutig zu unterscheiden, ermöglicht die Erweiterung EXT_mesh_features die Zuweisung von Identifikatoren zu einzelnen Geometrieelementen. Die zugehörige Erweiterung EXT_structural_metadata ergänzt dies durch die Speicherung strukturierter Metadaten, indem ein Schema zur Beschreibung der Metadatenstruktur definiert und die Metadaten effizient in Vertex-Attributen oder Texturkanälen abgelegt werden. Darüber hinaus bietet 3D Tiles eine deklarative Styling-Sprache, mit der die visuelle Darstellung von Features regelbasiert gesteuert werden kann. Mithilfe einer JavaScript-ähnlichen Ausdruckssprache lassen sich Eigenschaften wie Farbe, Transparenz und Sichtbarkeit in Abhängigkeit von Metadatenattributen dynamisch definieren.

QGIS bietet partielle Unterstützung von 3D Tiles in den Versionen 1.0 und 1.1. Bezüglich der Version 1.0 unterstützt QGIS das Batched 3D Model (b3dm) Tile Format. Punktwolken (pnts) und Instanced 3D Models (i3m) werden aktuell nicht unterstützt. Bezüglich der 3D Tiles Version 1.1 unterstützt QGIS die 3DTILES_content_glTF Erweiterung, jedoch nicht die EXT_mesh_gpu instancing Erweiterung. Zudem werden gegenwärtig nur explizites Tiling und die Referenzierung im EPSG:4978 von QGIS unterstützt.

In der ESRI Produktpalette ist die Unterstützung für 3D Tiles mittlerweile tief verankert, auch wenn das Maßgeblich von ESRI entwickelte I3S-Format oft im Vordergrund steht. Dementsprechend wird derzeit auch keine vollständige Unterstützung von 3D Tiles geboten, wenngleich häufig auf den laufenden weiteren Ausbau entsprechender Funktionalitäten hingewiesen wird. ArcGIS Pro dient als zentrales Werkzeug zum Einlesen, Konvertieren und Veröffentlichen von 3D Tiles-Datensätzen, während ArcGIS Online und ArcGIS Enterprise das native Hosting sowie die Visualisierung über den webbasierten *Scene Viewer* übernehmen. Gegebenenfalls sind in der Interoperabilität jedoch Einschränkungen vorhanden. So unterstützt beispielsweise der 3D Scene Viewer ausschließlich 3D Tiles Layer des Types *Integrated Mesh*.

Die Version 2.0 von 3D Tiles befindet sich derzeit in der Finalisierungsphase und erweitert den Standard unter anderem um Unterstützung für zeitdynamische Kacheln, die Repräsentation von Voxeln sowie das Rendering von Gaussian Splats.

I3S

Ursprünglich von ESRI entwickelt, ist das Indexed 3D Scene Layers (I3S)-Format seit 2023 gemeinsam mit dem Scene Layer Package (.slpk)-Format als internationaler OGC-Community-Standard anerkannt.

I3S-Datensätze, bezeichnet als Scene Layers, sind in einer hierarchischen, rekursiven, auf Knoten basierenden, räumlichen Indexstruktur organisiert. Ein Scene Layer kann verschiedene Datentypen repräsentieren: einzelne Punkte, eine Punktwolke, 3D-Objekte, integriertes Meshes oder umfangreiche Gebäudemodelle. Der 3D-Raum wird hierarchisch in durch einzelne Knoten repräsentierte Regionen aufgeteilt. I3S ist dabei grundsätzlich agnostisch gegenüber der konkret für die räumliche Indizierung verwendeten Methode. Zum Einsatz kommen können zum Beispiel Octrees oder R-Trees.

Ein grundlegendes Merkmal von I3S ist die Verwendung von Level-of-Detail (LoD)-Konzepten. In Abhängigkeit von Szenenparametern und (clientabhängiger) Selektionsmetriken - wie beispielsweise der Perspektive des Blicks auf die Szene und der Größe und Auflösung des Bildschirms - werden nun geeignete LoD-level ausgewählt. Durch Kombination mit der räumlichen Indexstruktur wird so effizientes Streaming massiver 3D-Geodaten ermöglicht. I3S ist für die Bereitstellung über Webservices - typischerweise über REST APIs - konzipiert. Dadurch können Web-Clients gezielt nur die benötigten Daten streamen, ohne die Notwendigkeit des vorherigen Herunterladens vollständiger Datensätze.

I3S erlaubt die Festlegung des verwendeten Koordinatenreferenzsystems im Well-Known-Text-Format entsprechend gängiger Standards wie beispielsweise *OGC WKT CRS/ISO 19162:2015 Geographic information – Well-known text representation of coordinate reference systems [12-063r5]*. I3S definiert zwei Modi der Georeferenzierung: global und lokal. Der globale Modus erlaubt ausschließlich die Nutzung von EPSG 4326 (sowohl für Index-, als auch für Vertexkoordinaten).

Tabelle 1.4.1.3 - 1: Vergleich Visualisierungsformate

Eigenschaft	glTF	3D Tiles	I3S
Entwickler	Khronos Group	OGC / Cesium	OGC / Esri
Offen / Proprietär	Offen	Offen	Offen
Hauptzweck	Austausch und Darstellung von 3D-Assets	Streaming großer georeferenzierter 3D-Datensätze	Streaming georeferenzierter 3D-Szenenebenen
Räumlicher Index	Keiner (einzelnes Asset)	Quadtree / Octree (implizites Tiling)	Octree / R-Tree (grundsätzlich agnostisch)
Globales Koordinatensystem	Nur lokale Koordinatensystem	EPSG:4978 (WGS 84)	EPSG:4326 (WGS 84)
Kachelformat	—	glTF ab 3D Tiles 1.1	JSON und eigenes BinärfORMAT

3D-Visualisierung cloud-nativer Punktwolkenformate

Auch cloud-native Punktwolkenformate ermöglichen die direkte web-basierte Visualisierung von sehr großen Punktwolken, wobei insbesondere die Open-Source-Software Potree sehr bekannt ist. Mithilfe der in COPC und EPT enthaltenen Octree-Strukturen können Visualisierungsclients gezielt die relevanten Teilmengen der Punktwolke abrufen, die sich im Sichtbereich befinden. Somit können Punktwolken in cloud-nativen Formaten direkt und ohne vorherige Konvertierung in ein Streaming-Visualisierungsformat von Webanwendungen wie Potree effizient genutzt werden. Andererseits besteht der Vorteil von Streaming-Visualisierungsformaten wie 3D Tiles und I3S darin, dass sie neben Punktwolken auch texturierte Meshes und 3D-Modelle unterstützen.

Literatur

- ASPRS (2025): LAS Specification 1.5 - R00. <https://community.asprs.org/leadership-restricted/leadership-content/public-documents/standards> Zugriff: 25.05.2026
- ASPRS (2018): LAS Specification 1.4 - OGC Community Standard. <https://www.ogc.org/standards/las/> Zugriff: 25.05.2026
- Blender Foundation (2013): FBX binary file format specification. <https://code.blender.org/2013/08/fbx-binary-file-format-specification/> . Zugriff: 24.04.2026
- Bourke, Paul (2026a): Object Files (.obj). <https://paulbourke.net/dataformats/obj/> . Zugriff: 24.04.2026
- Bourke, Paul (2026b): PLY - Polygon File Format, Also known as Stanford Triangle Format. <https://paulbourke.net/dataformats/ply/> . Zugriff: 24.04.2026
- Cozzi, P., Lilley, S. (2023). 3D Tiles Specification. OGC Community Standard. <http://www.opengis.net/doc/cs/3D-Tiles/1.1> Zugriff 26.04.2026
- E57 Committee (2019): Specification for 3D Imaging Data Exchange, Version 1.0. ASTM E2807-11(2019)e1. <http://www.astm.org/Standards/E2807.htm>
- ESRI Inc. (2026): ArcGIS Pro Documentation - Work with 3D tiles layers . <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/work-with-3d-tiles-layers.htm> Zugriff: 26.04.2026
- FBX (2025): Autodesk Filmbox Interchange File. In: Sustainability of Digital Formats: Planning for Library of Congress Collections. <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000558.shtml> . Zugriff: 24.04.2026
- Hobu Inc (2021): Cloud Optimized Point Cloud Specification - 1.0 <https://copc.io/> Zugriff: 26.04.2026
- Hobu Inc (2025): Entwine Point Tile. <https://entwine.io/en/latest/entwine-point-tile.html> Zugriff: 26.04.2026
- ISO. ISO/IEC 12113:2022 (2022): Information Technology — Runtime 3D Asset Delivery Format — Khronos glTF™ 2.0. <https://www.iso.org/standard/83990.html> Zugriff: 28.04.2026
- Khronos Group (2021). glTF™ 2.0 Specification. <https://registry.khronos.org/glTF/specs/2.0/glTF-2.0.pdf> Zugriff: 28.04.2026
- Lott, Roger (2015): Geographic information - Well-known text representation of coordinate reference systems. Version: 1.0. Open Geospatial Consortium. <http://www.opengis.net/doc/IS/wkt-crs/1.0> Zugriff: 25.04.2026
- Lott, Roger (2023): Geographic information — Well-known text representation of coordinate reference systems. Version: 2.1.11. Open Geospatial Consortium. <http://www.opengis.net/doc/is/crs-wkt/2.1.11> Zugriff: 25.04.2026
- OBJ (2025): Wavefront OBJ File Format. In: Sustainability of Digital Formats: Planning for Library of Congress Collections. <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000507.shtml> . Zugriff: 24.04.2026
- PCL Dokumentation (2026): https://pcl.readthedocs.io/projects/tutorials/en/latest/pcd_file_format.html Zugriff: 26.04.2026
- PLY (2025): Polygon File Format (PLY) Family. In: Sustainability of Digital Formats: Planning for Library of Congress Collections. <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000501.shtml> . Zugriff: 24.04.2026
- QGIS User Guide (2026): 17. Working with 3D Tiles. https://docs.qgis.org/3.44/en/docs/user_manual/working_with_3d_tiles/3d_tiles.html?utm_source=chatgpt.com Zugriff: 26.04.2026

-
- rapidlasso GmbH (2025): LAZ Specification 1.4 Revision R1. <https://rapidlasso.de/laszip/> Zugriff: 25.04.2026
- STL (2025): STL (STereoLithography) File Format Family. In: Sustainability of Digital Formats: Planning for Library of Congress Collections. <https://www.loc.gov/preservation/digital/formats/fdd/fdd000504.shtml> . Zugriff: 24.04.2026
- Turk, Greg (1994): The PLY Polygon File Format. <https://gamma.cs.unc.edu/POWERPLANT/papers/ply.pdf> . Zugriff: 26.04.2026

1.4.2 Datenübernahme und -management

1.4.2.1 Unterstützung von 3D-Punktwolken und Meshes in ArcGIS Pro

Verfasser: Peter Kaiser

3D-Punktwolken in ArcGIS Pro

ArcGIS Pro unterstützt 3D-Punktwolken in den Formaten LAS, LAZ (beide bis Version 1.4), und zLAS. Das LAZ-Format wird allerdings noch nicht vollständig unterstützt, daher ist das empfohlene Format das proprietäre zLAS-Format (siehe Kapitel 1.4.1.1). Mit Hilfe des Geoverarbeitungswerkzeug „LAS konvertieren“ können die Daten-Formate zwischen verschiedenen LAS-Komprimierungsmethoden, -Dateiversionen und -Punkt-datensatzformaten konvertiert werden. Die meisten Geoverarbeitungswerkzeuge erfordern die ArcGIS Pro Erweiterung 3D Analyst, Spatial Analyst oder mindestens eine Standard-Lizenz.

Für das optimale Handling der oft umfangreichen LAS- oder zLAS-Dateien stellt ArcGIS Pro mit dem LAS-Dataset (.lasd) einen Container zur Verfügung mit dem eine große Anzahl von LAS- oder zLAS-Dateien verwaltet werden können.

Ein LAS-Dataset kann als Layer einer Karte oder 3D-Szene hinzugefügt werden und weist dann dieselben Darstellungs-Eigenschaften wie eine einzelne LAS- oder zLAS-Datei auf. Der große Vorteil von LAS-Dataset besteht in der Möglichkeit, mit LAS-Dataset-Pyramiden zu arbeiten. Eine LAS-Dataset-Pyramide wird zur Verbesserung sowohl der 2D- als auch der 3D-Darstellungs-Performance und -Qualität für LAS-Datasets verwendet. Dies geschieht, indem die Punkte so organisiert und indiziert werden, dass 3D-Anzeigeabfragen optimiert werden. Dafür steht das Geoverarbeitungswerkzeug „LAS-Dataset-Pyramide erstellen“ zur. Für einzelne LAS -oder zLAS-Dateien können keine Pyramiden erstellt werden. Wird eine Pyramide für ein LAS-Dataset erstellt, wird in demselben Ordner, in dem das LAS-Dataset gespeichert wird, ein neuer Dateiordner erstellt. Die Namenskonvention für den Pyramidenordner ist der LAS-Dataset-Name mit dem Suffix .slas. Der Nachteil bei der Verwendung von LAS-Dataset-Pyramiden ist ein sehr deutlicher zusätzlicher Speicherplatzbedarf. Die erzeugten Pyramiden-Ordner sind im Durchschnitt ca. 40 % größer, wie die Summe der vom LAS-Dataset verwalteten LAS- oder zLAS-Dateien.

Neben der empfohlenen Verwendung von LAS-Datasets gibt es weitere Performance-Optimierung bei der Symbolisierung und Bearbeitung von 3D-Punktwolken in ArcGIS Pro. Diese werden durch die folgenden Schritte erreicht:

- Kacheln von großen einzelnen LAS- oder zLAS-Dateien:
Die Prozessierung von 3D-Punktwolken in ArcGIS Pro ist performanter, wenn diese mit Hilfe des Geoverarbeitungswerkzeug „LAS kacheln“ (3D Analyst) in kleinere Kacheln aufgeteilt werden
- Neuordnen von LAS-Punkten:
Durch das Neuordnen von LAS- oder zLAS-Punkten mit dem Geoverarbeitungswerkzeug „LAS extrahieren“ (3D Analyst) und dem Parameter „Punkte neu anordnen“ wird die Reihenfolge der Punktdatensätze in einer LAS-Datei angepasst und ein räumlicher Index für diese Punkte erstellt.
- Berechnen von Statistiken für LAS-Datasets:
Bei der Berechnung von Statistiken mit dem Geoverarbeitungswerkzeug „LAS-Dataset-Statistiken“ wird für ein LAS-Dataset, das LAS- oder zLAS-Dateien referenziert, ein räumlicher Index erstellt, der die Gesamtperformance verbessert.
- Symbolisieren der 3D-Punktwolken anhand von Quadraten:
Die quadratische Symbol-Darstellung der Punkte erhöht die Darstellungs-Performance in 3D-Szenen. Die Einstellung ist unter den Optionen -> Anzeige zu finden.

Weitere Informationen zur Analyse und Visualisierungsmöglichkeiten von 3D-Punktwolken in ArcGIS Pro finden Sie im Kapitel 1.4.3.1

3D-Meshes in ArcGIS Pro

3D-Meshes werden in ArcGIS Pro in Form von texturierte Oberflächen eingesetzt. Szenen-Layer mit integrierten Meshes werden im Allgemeinen für die Erstellung von 3D-Karten für Städte genutzt. Sie werden häufig von Drohnen erfasst und ihr Aussehen kann in ArcGIS Pro nicht neu gestaltet werden.

3D-Meshes können nur mit einer installierten und lizenzierten ArcGIS Reality Lizenz erstellt werden.

Bestehende 3D-Meshes im Format slpk (Punktwolken-Szenen-Layer-Pakete), wie sie z. B. bei OpenData Bayern landesweit paketierte heruntergeladen werden können, werden als „Layer mit integriertem Mesh“ einer lokalen oder globalen 3D-Szene hinzugefügt und visualisiert.

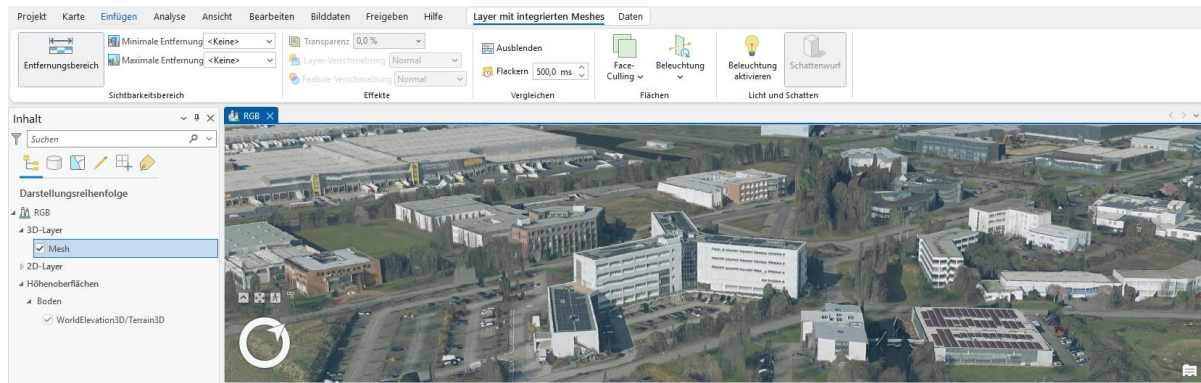


Abbildung 1.4.2.1 - 1: Punktwolken-Szenen-Layer als 3D-Mesh von OpenData Bayern

Diese können über die Layer-Eigenschaften im Bereich Inhalt in einen Änderungsmodus versetzt werden, der drei verschiedene Modifikationen des 3D-Meshes erlaubt. Durch das Erfassen von Änderungspolygonen und der entsprechenden Attribuierung können diese Polygon zum Ausschneiden (siehe Abbildung unten), Maskieren (es bleibt nur die Maske erhalten) oder Ersetzen verwendet werden.

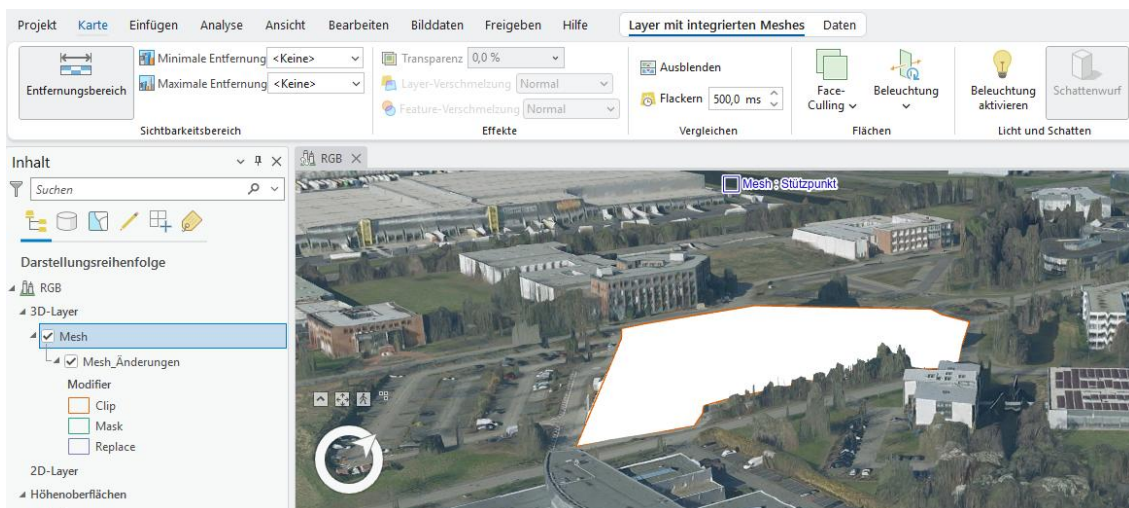


Abbildung 1.4.2.1 - 2: Bearbeitetes 3D-Mesh (Ausschneiden (Clip), Maskieren (Mask) oder Ersetzen (Replace))

Aus dem 3D-Mesh können 3D-Punktwolken mit dem Geoverarbeitungswerkzeug „Mesh in LAS“ erzeugt und mit dem Geoverarbeitungswerkzeug „Mesh-Feature aus Punktwolke extrahieren“ (3D Analyst) in Multipatch-Features (vektorielle Körper) konvertiert werden.

Seit ArcGIS Pro Version 3.6 kann auch die Fotorealistische 3D-Grundkarte von Google als 3D-Mesh in lokalen und globalen 3D-Szenen in Form von Grundkarten hinzugefügt und visualisiert werden. Voraussetzung dafür ist ein aktives Portal auf ArcGIS Online und der Nutzer muss am Esri Portal als Named User angemeldet sein. Das Google-Mesh wird aber abweichend vom Punktwolken-Szenen-Layer-Paket nicht als 3D-Layer hinzugefügt, sondern in Form einer Höhenoberfläche und erlaubt dann keine Kombination mit anderen Höhenoberflächen oder die Visualisierung drapierter 2D-Layer auf dieser Höhenoberfläche. Weitere 3D-Layer können aber gemeinsam dargestellt werden. Laut aktueller ArcGIS Pro Roadmap vom Mai 2026 soll die 3D-Mesh Integration als Höhenoberfläche mittel- bis langfristig aber noch umgesetzt werden.

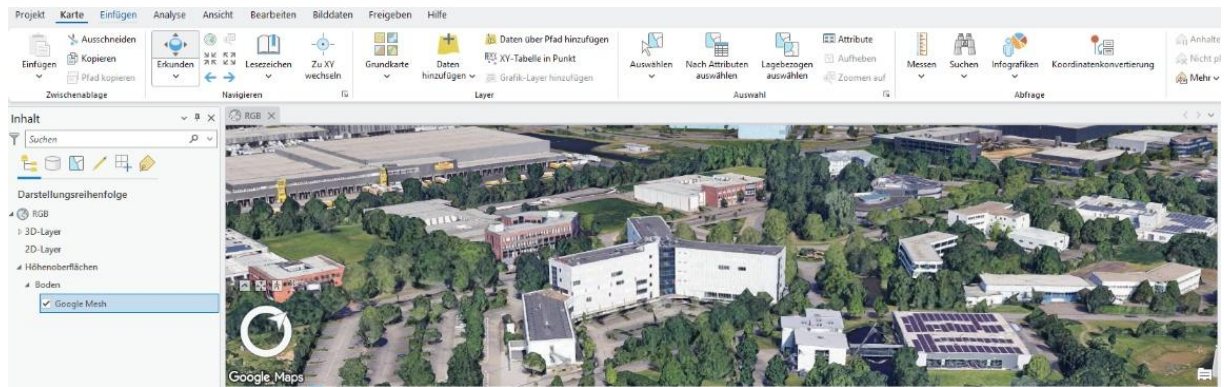


Abbildung 1.4.2.1 - 3: Fotorealistic 3D-Grundkarte von Google

1.4.2.2 Unterstützung von 3D-Punktwolken und Meshes in QGIS

Verfasser: Andreas Neumann

3D-Punktwolken

Darstellung von Punktwolken

QGIS unterstützt die 2D- und 3D-Darstellung von Punktwolken. Die 2D und 3D Ansicht kann synchron oder separat dargestellt werden. Die folgenden Darstellungs-Optionen werden unterstützt:

- Nur Ausdehnung (Begrenzungsrahmen) mit optionalen tile-labels (Dateinamen).
- Attribut nach Farbverlauf (Farbverläufe basierend auf numerischen Attributen)
- RGB (Echtfarben aus Rot-, Grün- und Blau-Attributen) mit Option der Kontrast-Verbesserung (Streckung von min/max-Werten)
- Klassifizierung (Farbe nach Klasse, z. B. Boden, Vegetation, Gebäude)
- Filterung von Klassen, nach Höhenbereichen oder nach beliebigen Attributen
- Festlegung von Zeichnungsreihenfolge (Default wie im Datensatz, sortiert nach Z-Werten unten nach oben oder oben nach unten). Die Sortierung verlangsamt die Darstellung gegenüber dem Default.
- Eye-Dome lighting und ambient-occlusion Effekte (Umgebungsverschattung) für verbesserte Tiefenwahrnehmung
- Optionale on-the-fly Triangulierung zur Darstellung der Punktwolke als Oberfläche
- Einstellen der Punktgröße, Punktform (Kugel, Box) und Ausdünnung der Punktwolken (Maßstabsabhängige Sichtbarkeit).

Beim Import nach QGIS werden LAS/LAZ oder EPT (Entwine Point Tile)-Dateien automatisch ins COPC-Format (Cloud Optimized Point Cloud) konvertiert. Im COPC gibt es ähnlich wie beim GeoTIFF reduzierte (gefilterte) Übersichts-Ansichten, für schnelle Übersichten ohne alle Details.

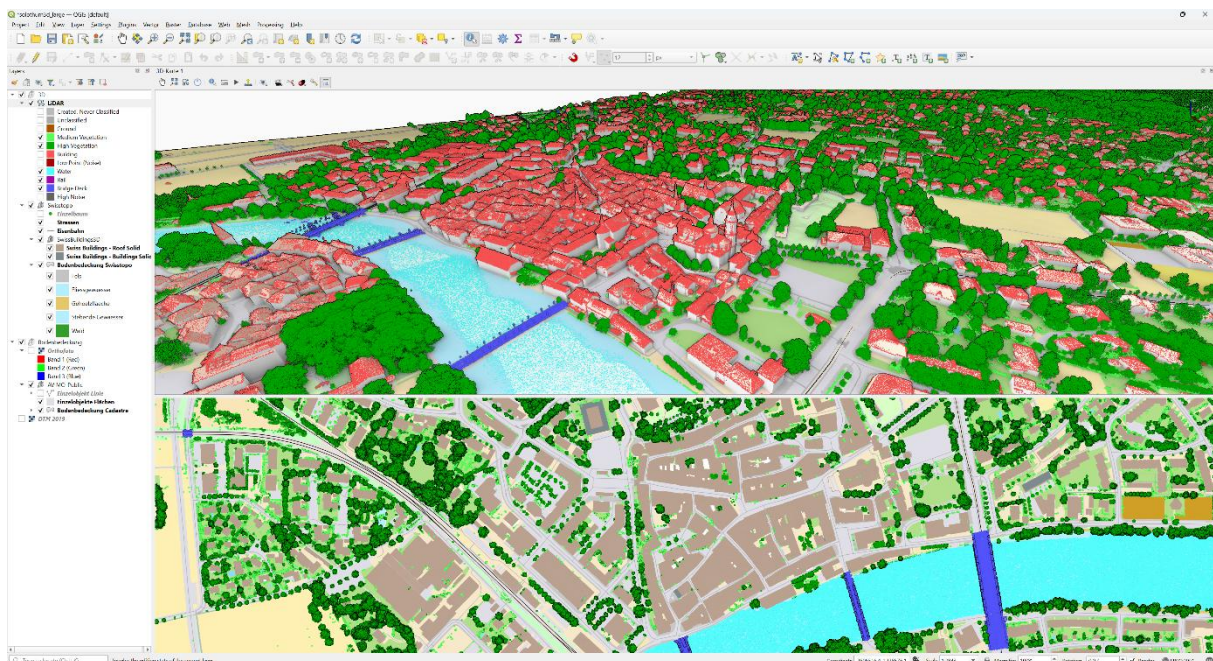


Abbildung 1.4.2.2 - 1: kombinierte 2D und 3D-Ansicht in QGIS mit Geländemodell, 3D-Gebäuden und 3D-Punktwolken

Import und Export

- Import: LAS, LAZ, EPT, COPC und Virtual Point Cloud (VPC). Unterstützung von remote Datenquellen (https, S3, etc.).
- Export: COPC, VPC, LAS, LAZ, GeoPackage, Shapefile, DXF, und memory layer. Unterstützt die Umprojektion sowie den Export mit Attribut- oder räumlichen Filtern (z. B. innerhalb eines Polygons).

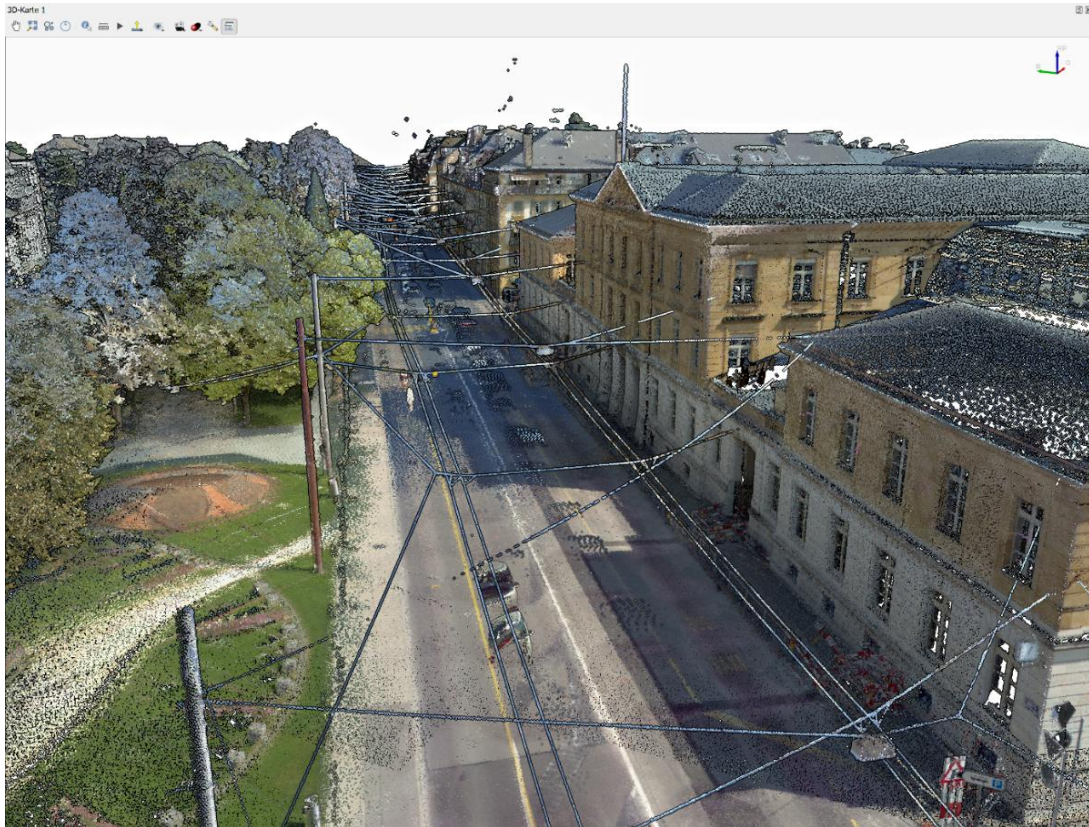


Abbildung 1.4.2.2 - 2: Punktwolkendarstellung mit RGB-Werten in QGIS. Kombination von terrestrischen und flugzeuggestützten LiDAR-Daten.

Editieren von Punktwolken

Einzelne Punkte oder Teile von Punktwolken können für die Bearbeitung selektiert werden. Punkte können interaktiv selektiert werden (über Polygonauswahl oder Pinselwerkzeug, Punkte oberhalb oder unterhalb eines Trapezoids), oder über einen Expression-Filter (Formel). Für gewählte Punkte können deren Attributwerte verändert werden (z.B. bei vorherigen Fehlklassifikationen, Ausreissern, etc.).

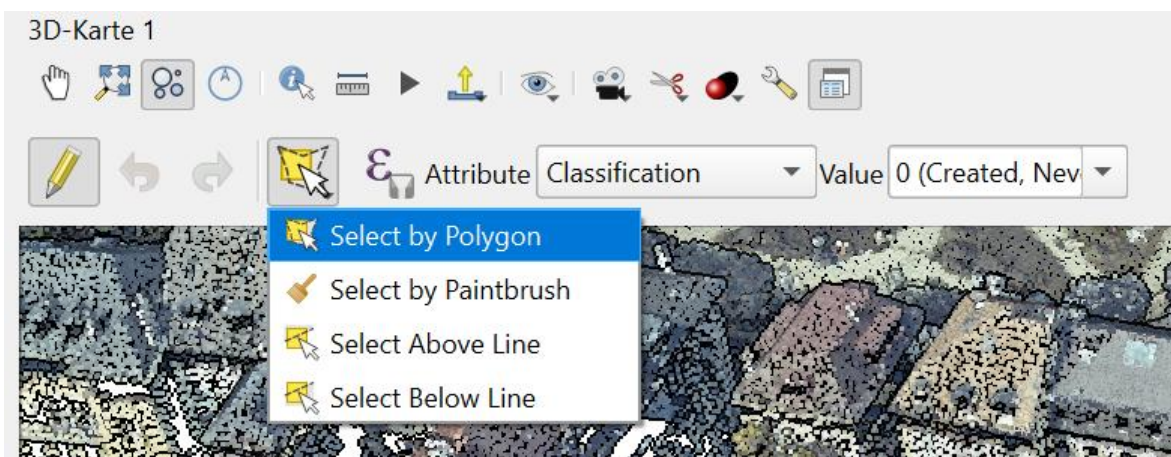


Abbildung 1.4.2.2 - 3: Werkzeuggeste zum Editieren der Punktwolken. Auswahlwerkzeuge.

Detaillierte Infos unter:

https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/working_with_point_clouds/point_clouds.html

Meshes

QGIS unterstützt verschiedene Meshtypen: Dreiecksmaschen (TIN), Quad Mesh (regelmäßiges Gitter), Gemischte irreguläre Meshes (Dreiecke und Quad Meshes gemischt, regelmäßig und unregelmäßig gemischt).

Weil Meshes häufig in der Klimatologie und Hydrologie zum Einsatz kommen ist die Darstellung in QGIS vor allem für diese Einsatzzwecke optimiert.

Darstellung von Meshes

- Kontinuierliche Farbverläufe nach Höhe resp. Attributwert (in den Flächen (faces) wird interpoliert aufgrund der Daten in den Stützpunkten)
- Pfeile (Vektoren)
- Windpfeile ((wind barbs), spezielle Form der Pfeile, zeigen Windgeschwindigkeit und Richtung, die Schwanzfedern der Pfeile zeigen die Windstärke)
- Strömungslinien (statische Strömungslinien)
- Spuren (Traces = animierte Strömungslinien)
- Optionale Beschriftung (an Stützpunkten und Flächen). Nur sinnvoll, wenn stark eingezoomt (großer Maßstab)

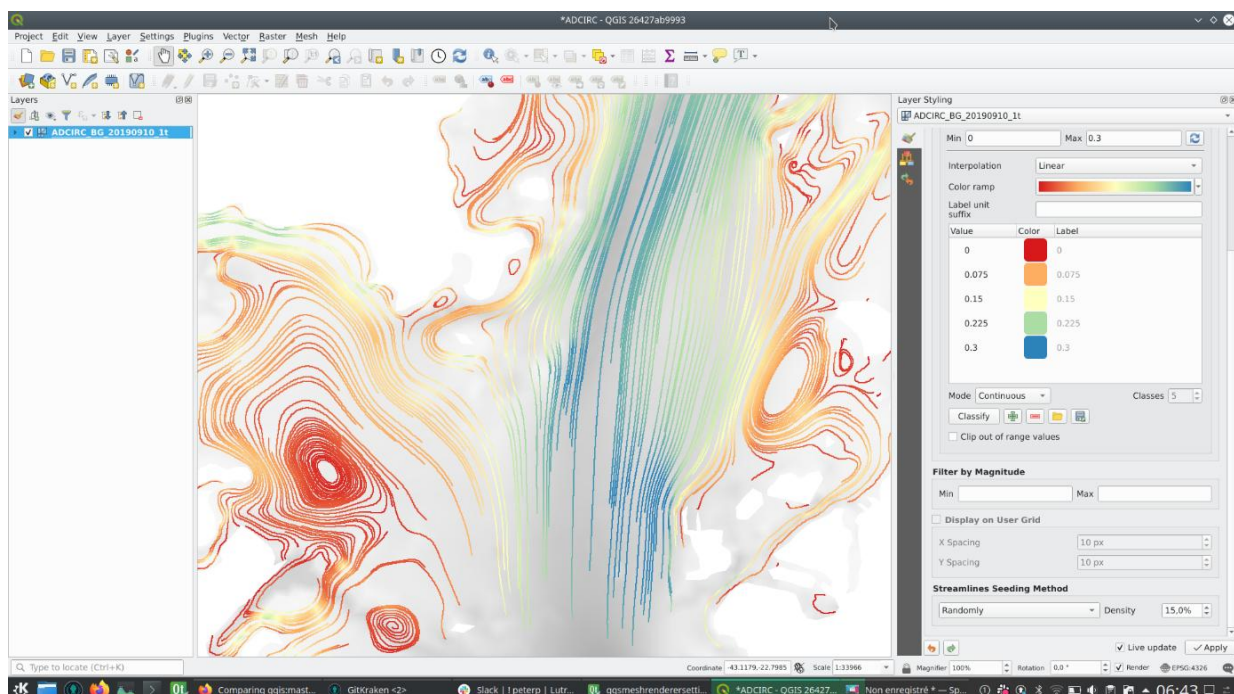


Abbildung 1.4.2.2 - 4: Darstellung von Strömungslinien aus Mesh-Daten

Alle Darstellungsformen erlauben für die relevanten Darstellungs-Parameter (wie Farben, Strichstärken, Vektoren, etc.) auch die Hinterlegung von Datenfeldern und Formeln.

Mesh-Daten rund um Wetter oder Überflutungen enthalten oft mehrere Zeitstände. Diese können in QGIS gefiltert und als Sequenzen animiert werden.

Import und Export

Der Zugriff auf Mesh-Daten erfolgt über die MDAL library. Unter dieser URL (<https://www.mdal.xyz/>) sind alle unterstützten Formate und deren Eigenschaften aufgelistet. Bekannte Vertreter sind NetCDF (Network Common Data Form), GRIB (GRIdded Binary) oder PLY (Polygon File Format).

Editieren von Meshes

QGIS stellt umfangreiche Editierfunktionen für Mesh-Daten zu Verfügung. Es gibt verschiedene Selektionsmechanismen, interaktiv oder über Expressions (Formeln), für Stützpunkte und Flächen. Neue Stützpunkte können eingefügt und das Mesh danach neu vermascht, gerechnet und optimiert werden. Außerdem können Z-Werte oder Attributwerte geändert werden oder selektierte Stützpunkte gelöscht oder transformiert werden. Z-Werte oder Attributwerte können beim Editieren auch von anderen Datensätzen übernommen wer-

den. Es gibt verschiedene Regeln und Logiken beim Editieren von Meshes die im Editierwerkzeug definiert werden können.

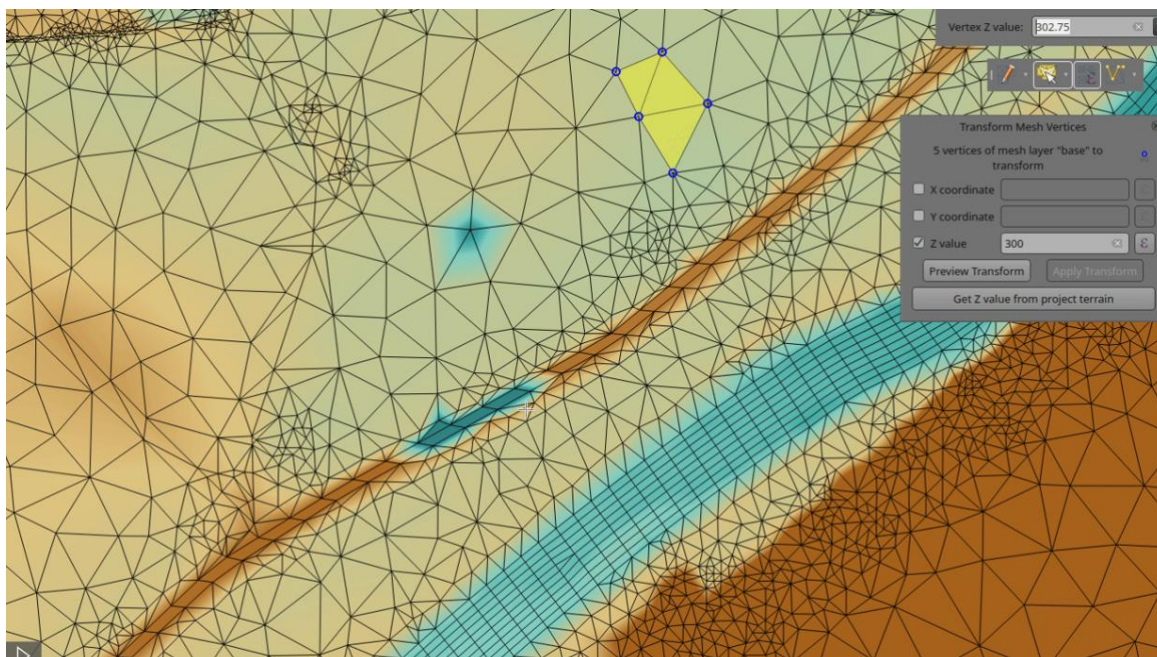


Abbildung 1.4.2.2 - 5: Editierwerkzeuge für Meshe-Daten in QGIS. Screencast von Saber Razmjooei (Lutra-Consulting)

Detaillierte Infos unter https://docs.qgis.org/latest/en/docs/user_manual/working_with_mesh/mesh.html

1.4.2.3 Unterstützung von 3D-Punktwolken und Meshes in Geodatenbanken

Verfasser: Benedikt Schwab

Beim Management von 3D-Punktwolken und Meshes mithilfe von Geodatenbanken stellt sich zunächst die grundsätzliche Frage, welche Informationen in einer Geodatenbank repräsentiert werden sollen und welche Informationen gegebenenfalls extern, beispielsweise in einem Object Storage, abgelegt werden können.

Relationale und nicht-relationale Geodatenbanken

Relationale Datenbanken sind primär für strukturierte sowie transaktionsorientierte Anwendungsfälle optimiert und stoßen bei der Verwaltung sehr großer unstrukturierter Datenmengen an ihre Grenzen. Ein Grund hierfür ist ihre zeilenbasierte Speicherarchitektur sowie die strikte Durchsetzung der ACID-Konsistenzgarantien (Atomarität, Konsistenz, Isolation und Dauerhaftigkeit). Im Gegensatz dazu ermöglichen nicht-relationale Datenbanken durch den Verzicht auf strikte Konsistenzgarantien und flexible Datenmodelle eine horizontale Skalierung über mehrere Server, wodurch deutlich größere Datenmengen effizienter verwaltet werden können. Die fehlende Schemavalidierung verlagert dabei die Verantwortung für die Datenstruktur und den Umgang mit Inkonsistenzen auf die Anwendungsebene.

Im Open-Source-Bereich ist insbesondere die PostGIS-Erweiterung für die relationale Datenbank PostgreSQL weit verbreitet und vielseitig im Einsatz. Nicht-relationale Datenbanklösungen bieten hingegen meist nur eingeschränkte Unterstützung für Koordinatenreferenzsysteme, Geometrietypen und räumliche Analysefunktionen. So unterstützt die dokumentenorientierte Datenbank MongoDB beispielsweise ausschließlich das Koordinatenreferenzsystem WGS84 und bietet keine native Unterstützung für 3D-Geometrien. Auch das Open-Source-Projekt GeoMesa, das durch raum-zeitliche Indizierung auf verteilten spaltenorientierten Datenbanksystemen die Verwaltung sehr großer Geodatensätze ermöglicht, ist hinsichtlich der unterstützten Geometrien auf 2D beschränkt.

Um 3D-Geometrien in unterschiedlichen Koordinatenreferenzsystemen zu repräsentieren und komplexe 3D-Operationen darauf durchzuführen, stellt die PostgreSQL-Erweiterung PostGIS im Open-Source-Bereich eine etablierte Lösung dar. Für erweiterte 3D-Analysen kann PostGIS optional durch SFCGAL ergänzt werden, das als C++-Wrapper-Bibliothek auf der umfassenden Geometriebibliothek CGAL (Computational Geometry Algorithms Library) aufbaut. Dadurch stehen in PostGIS zusätzliche Funktionen wie 3D-Verschneidungen, Extrusionen, Triangulierungen und Konvexe-Hülle-Berechnungen zur Verfügung.

3D-Punktwolken in PostgreSQL-Datenbanken

Für das Management von Punktwolken mit Geodatenbanken können unterschiedliche Strategien abhängig von den Anforderungen verfolgt werden. Erstens können in der Datenbank lediglich zugehörige Metadaten wie Ersteller, Geräteinformationen und räumliche Ausdehnung, beispielsweise in Form von Alpha-Shapes, vorgehalten werden. Die Punktwolkendateien selbst werden dabei auf einem externen Netzwerklaufwerk oder Object Storage abgelegt und können, sofern sie in einem Cloud nativen Format wie COPC vorliegen, direkt gestreamt werden. Zweitens können in der Datenbank zusätzlich Informationen einer räumlichen Unterteilung der Punktwolke, beispielsweise eines Octrees, vorgehalten werden, was räumliche Abfragen und Analysen auf dieser Unterteilungsstufe der Punktwolke ermöglicht. Drittens können die einzelnen Punkte der Punktwolke in der Geodatenbank gespeichert werden. Dies ermöglicht detaillierte 3D-Analysen mit den umfangreichen PostGIS-Funktionen, bringt jedoch auch erhebliche Speicher- und Performanceanforderungen an die Datenbank mit sich.

Die Speicherung von Punktwolken in Datenbanken kann entweder flach oder blockbasiert erfolgen. Bei der flachen Repräsentation wird ein Punkt pro Zeile in der Tabelle gespeichert. Vorteilhaft sind hierbei das einfache Tabellenschema sowie die direkte Abfragbarkeit und Manipulierbarkeit einzelner Punkte. Nachteilig hingegen sind der enorme Speicherbedarf und die geringe Performance bei großen Datensätzen, da jede Abfrage potenziell Millionen oder Milliarden von Tabellenzeilen durchsuchen muss.

Beim blockbasierten Ansatz werden mehrere räumlich benachbarte Punkte in einem Block gruppiert und gemeinsam in einer Tabellenzeile gespeichert. Vorteilhaft sind hierbei die kompaktere Speicherung durch block-interne Komprimierung sowie die höhere Performance bei räumlichen Abfragen, da ein räumlicher Index direkt auf Blockebene operiert und somit nur relevante Blöcke geladen werden müssen. Nachteilig hingegen sind das komplexere Tabellenschema sowie der erhöhte Implementierungsaufwand, da einzelne Punkte nicht direkt abgefragt oder manipuliert werden können, sondern stets der gesamte Block geladen und dekomprimiert werden muss.

Für einen detaillierten Vergleich der unterschiedlichen Repräsentationsansätze sowie deren Auswirkungen auf Abfrageperformance und Speicherbedarf empfehlen sich die Untersuchungen von van Oosterom et al. (2015, 2017).

Der blockbasierte Ansatz kann mithilfe des PostGIS-nativen Geometrietyps MultiPoint realisiert werden, wobei zugehörige Punktwolkenattribute wie beispielsweise die Intensität als parallele Arrays von Gleitkommazahlen in derselben Reihenfolge wie die Punkte gespeichert werden müssen. Zu beachten ist dabei, dass die Größe eines einzelnen Tabellenfeldes in PostgreSQL standardmäßig auf 1 Gigabyte begrenzt ist, was die maximale Blockgröße entsprechend einschränkt. Der Ansatz kommt ohne zusätzliche Abhängigkeiten aus und bietet eine hohe Flexibilität. Da MultiPoint ein nativer PostGIS-Geometrietyp ist, können alle PostGIS-Funktionen wie beispielsweise ST_Envelope, ST_ConvexHull oder räumliche Joins direkt auf den Blöcken angewendet werden. Zudem können die Blöcke direkt mit einem GiST-Index indiziert werden und profitieren automatisch von PostgreSQL-Transaktionen, Backups und Replikation, ohne dass zusätzliche Konfigurationen erforderlich sind. Der Ansatz bietet durch die Nutzung nativer PostGIS- und PostgreSQL-Typen in selbst erstellten Tabellen eine hohe Flexibilität, wodurch Punktwolken beispielsweise um neue Attribute erweitert oder hierarchische Unterteilungen realisiert werden können. Allerdings geht dies mit einem höheren Speicherbedarf durch fehlende block-interne Komprimierung sowie der Notwendigkeit einer eigenen Verwaltungslogik einher, welche z.B. die Konsistenz paralleler Attributarrays sicherstellen muss.⁸

Eine alternative Realisierung des blockbasierten Ansatzes ermöglicht die PostgreSQL-Erweiterung pgPointCloud, die speziell für die effiziente Speicherung und Verarbeitung von Punktwolken entwickelt wurde. Sie führt den nativen Datentyp PcPatch ein, der mehrere räumlich benachbarte Punkte als komprimierten Block zusammenfasst, sowie den Typ PcPoint für den Zugriff auf einzelne Punkte. pgPointCloud unterstützt block-interne Komprimierungsverfahren und bietet spezialisierte Funktionen wie PC_Filter, PC_PatchAvg und PC_Summary für direkte Punktwolken-spezifische Analysen auf Blockebene. Das Punktschema wird dabei explizit als XML-Dokument definiert, wodurch eine schema-basierte Verknüpfung zwischen Geometrie und Attributen gewährleistet ist. Um erweiterte Analysen mit den umfassenden PostGIS- und SFCGAL-Funktionen durchführen zu können, müssen die in PcPatch-Blöcken gespeicherten Punkte jedoch zuerst in PostGIS-Geometrien umgewandelt werden. Das Open-Source-Punktwolkenwerkzeug PDAL ermöglicht zudem den Import von Punktwolkendateien verschiedener Formate in eine pgPointCloud-Datenbank, was durch Meyer & Brunn (2019) umfassend beschrieben wird.

3D-Meshes in PostgreSQL-Datenbanken

Die Repräsentation von 3D-Mesh-Geometrien in einer PostgreSQL-Datenbank kann grundsätzlich mit dem PostGIS-Geometrietyp PolyhedralSurfaceZ realisiert werden. Eine PolyhedralSurfaceZ ist eine zusammenhängende Menge von ebenen Polygonflächen, die gemeinsame Kanten teilen und zusammen eine 3D-Oberfläche bilden. Ein verwandter Geometrietyp ist TIN Z (Triangulated Irregular Network), der im Gegensatz zur PolyhedralSurface ausschließlich aus nicht-überlappenden Dreiecken besteht und typischerweise zur Repräsentation von Geländeoberflächen eingesetzt wird.

Da ein beispielsweise photogrammetrisch erstelltes 3D-Mesh üblicherweise aus einer Vielzahl von Polygonen besteht und damit das Speicherlimit eines einzelnen Datenbankfeldes überschreitet, ist eine räumliche Zerlegung des Meshes in kleinere Teilgeometrien notwendig. Dies ist grundsätzlich vergleichbar mit der Gruppierung von Punkten zu Blöcken bei Punktwolken.

Während es für Punktwolken mit pgPointCloud eine spezialisierte Erweiterung gibt, existiert keine direkt vergleichbare Lösung für 3D-Meshes. Da der Typ PolyhedralSurfaceZ ausschließlich die Geometrie repräsentiert, ohne Texturen oder Materialien zu berücksichtigen, stellt sich die Frage, wie texturierte Meshes in einer Geodatenbank abgebildet werden können. Ein Ansatz hierfür findet sich in der 3DCityDB, die eine Verknüpfung von Oberflächengeometrien mit Erscheinungsinformationen wie Texturen und Farben innerhalb eines relationalen PostgreSQL/PostGIS-Datenbankschemas realisiert. Alternativ kann ein hybrider Ansatz verfolgt werden, bei dem lediglich Metadaten, räumliche Ausdehnung und Verweise auf extern gespeicherte Mesh-Dateien in der Datenbank vorgehalten werden.

⁸ Am Lehrstuhl für Geoinformatik der Technischen Universität München wird aktuell eine Datenbanklösung namens 3DSensorDB entwickelt, die sowohl die Verwaltung von Punktwolken mit unterschiedlichen Strategien unterstützt als auch komplementär zur 3DCityDB die Verknüpfung einzelner Punkte mit den Oberflächengeometrien semantischer 3D-Stadtmodelle ermöglicht.

Literatur

- van Oosterom, P., Martinez-Rubi, O., Ivanova, M., Horhammer, M., Geringer, D., Ravada, S., Tijssen, T., Kodde, M., & Gonçalves, R. (2015). Massive point cloud data management: Design, implementation and execution of a point cloud benchmark. *Computers & Graphics*, 49, 92-125. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2015.01.007>
- van Oosterom, P., Martinez-Rubi, O., Tijssen, T., & Gonçalves, R. (2017). Realistic Benchmarks for Point Cloud Data Management Systems. In A. Abdul-Rahman (Ed.), *Advances in 3D Geoinformation* (pp. 1-30). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-31925691-7_1
- Meyer, T., & Brunn, A. (2019). 3D-Punktwolken in PostgreSQL/PostGIS für Anwendungen in Geoinformationssystemen. (28). <https://opus4.kobv.de/opus4-fhws/frontdoor/index/index/docId/4002>
- Bormann, P. (2024). Improving the efficiency of point cloud data management. Dissertation, Technische Universität Darmstadt. <https://doi.org/10.26083/tuprints-00027526>

1.4.2.4 Datenkonvertierung / Extract-Transform-Load (ETL) für Geodaten aus UAS/UAV

Verfasser: Christian Dahmen

Die Erfassung hochauflösender Geodaten mittels Unmanned Aircraft Systems (UAS) bzw. Unmanned Aerial Vehicles (UAV) hat die Verfügbarkeit von Orthofotos, Punktwolken und digitalen Oberflächenmodellen signifikant erhöht. So werden in verschiedenen Anwendungsbereichen hochauflösende Bild- und Punktwolkendaten etwa zur Erfassung von Infrastruktur (z.B. Oberleitungen), Gebäuden (Bauen im Bestand) oder Denkmälern verwendet. Die dabei generierten Datensätze zeichnen sich zumeist durch sehr große Datenmengen, vielfältige Formate und variierende Qualitätsparameter aus. Für deren Integration in Geoinformationssysteme (GIS) wie ArcGIS oder QGIS ist eine systematische, skalierbare und reproduzierbare Aufbereitung erforderlich. Auch für die Analyse mittels Künstlicher Intelligenz (KI) ist die gezielte Extraktion und Aufbereitung benötigter Daten ein wesentlicher Vorverarbeitungsschritt. Das ETL-Paradigma (Extract, Transform, Load) stellt hierfür einen etablierten methodischen Rahmen dar.

Die Extraktion (Extract) umfasst die gezielte Übernahme von Daten aus der originären Quelle. Hierbei sind Aspekte wie Datenorganisation, Zugriffseffizienz und Metadatenverfügbarkeit entscheidend.

Die Transformation oder Umwandlung (Transform) ist der zentrale Verarbeitungsschritt. Er umfasst die Harmonisierung und Strukturierung der Daten sowie eine Vielzahl räumlicher, attributiver, topologischer und semantischer Operationen. Je nach Erfassungs- und Datenart zählen dazu insbesondere Koordinatentransformationen, radiometrische Korrekturen und Orthorektifizierung, die Filterung und Klassifizierung sowie Resampling-, Tiling- und Pyramidisierungsverfahren.

Der anschließende Ladeschritt (Load) beinhaltet die persistente Ablage in Zielsystemen, etwa in räumlichen Datenbanken (z. B. PostGIS), dateibasierten Formaten oder serviceorientierten Architekturen (z. B. Tile-Services).

Die Verarbeitung von UAV-/UAS-Daten ist mit spezifischen Herausforderungen verbunden. Die hohen Datenvolumina führen zu erheblichen Anforderungen an I/O-Leistung, Speicherressourcen und damit häufig zu einer längeren Prozessdauer. Gleichzeitig erschwert die Heterogenität der Formate die Interoperabilität zwischen Systemen. Unterschiedliche räumliche Referenzsysteme erhöhen die Komplexität der Transformation und können bei Nicht-Berücksichtigung zu Genauigkeitsverlusten führen. Darüber hinaus stellen Zielsysteme spezifische Anforderungen an Datenstrukturen und Zugriffsmuster, beispielsweise im Hinblick auf Visualisierungsperformance und analytische Effizienz.

Die gezielte Datenreduktion, etwa durch Zuschneiden auf den gewünschten räumlichen Ausschnitt, Ausdünnen von Punktwolken, Reduktion der Rasterauflösung oder die Extraktion relevanter Merkmale, ermöglicht eine signifikante Verringerung der Datenmenge bei gleichzeitiger Wahrung der Anwendungsrelevanz. Die Verarbeitung in segmentierten Einheiten verbessert die Skalierbarkeit und reduziert den Speicherbedarf. Ergänzend erlaubt die Parallelisierung von ETL-Prozessen, beispielsweise durch Multi-Core-Architekturen oder cloudbasierte Infrastrukturen, eine deutliche Verkürzung der Verarbeitungszeiten.

Eine zentrale Rolle spielt darüber hinaus der Einsatz optimierter Datenformate. Während klassische Formate wie GeoTIFF oder GeoPackage häufig einen sequenziellen Zugriff auf vollständige Datensätze erfordern, ermöglichen moderne, cloud-optimierte Formate wie z.B. Cloud Optimized GeoTIFF (COG) einen direkten, selektiven Zugriff auf Teilbereiche über entsprechende HTTP-Anfragen. Spaltenorientierte Speicherformate wie Apache Parquet bieten zusätzliche Vorteile hinsichtlich Kompression und analytischer Performance bei großen Datenbeständen. Für Punktwolken stellt LAZ eine effiziente, verlustfreie Kompressionsvariante dar. Diese Formate sind insbesondere für verteilte und cloud-native ETL-Prozesse geeignet, da sie den Datenzugriff beschleunigen und die I/O-Belastung reduzieren.

Die praktische Umsetzung erfolgt typischerweise unter Verwendung spezialisierter Spatial-ETL-Werkzeuge. FME von Safe Software, die marktführende Datenintegrationsplattform, zeichnet sich durch eine breite Unterstützung von Datenformaten sowie durch die Möglichkeit der visuellen Modellierung komplexer, automatisierter Workflows aus. Ergänzend kommen GDAL/OGR für Raster- und Vektoroperationen sowie PDAL für die Verarbeitung von Punktwolken zum Einsatz. In produktiven Umgebungen werden diese Werkzeuge häufig kombiniert, um robuste, automatisierte, skalierbare und reproduzierbare Verarbeitungs-Pipelines zu realisieren.

Ein typischer ETL-Workflow umfasst die Datenerfassung durch UAV/UAS, die Extraktion aus unterschiedlichen Quellen, eine mehrstufige Transformation sowie das Laden in geeignete Zielsysteme. Entscheidend ist dabei die konsequent anwendungsorientierte Datenaufbereitung. Für WebGIS-Anwendungen werden beispielsweise gekachelte und pyramidierte Orthofotos bereitgestellt, während analytische Anwendungen häufig auf reduzierte Datensätze oder abgeleitete Produkte wie digitale Höhenmodelle zurückgreifen. In 3D-GIS-Kontexten kommen optimierte Punktwolken oder 3D-Tile-Strukturen zum Einsatz.

Zusammenfassend stellt ETL eine Schlüsselmethodik zur Integration und Nutzbarmachung von UAV-/UAS-basierten Geodaten dar. Die Kombination aus datenreduzierenden Verfahren, skalierbaren Verarbeitungsstrategien, optimierten Datenformaten und leistungsfähigen Werkzeugen ermöglicht eine effiziente und zielgerichtete Bereitstellung komplexer Geodaten für unterschiedliche GIS-Anwendungsfelder.

1.4.3 Analyse und Visualisierung

1.4.3.1 GIS-Operationen auf 3D-Punktwolken in ArcGIS Pro

Verfasser: Peter Kaiser

Vorbemerkung: Stereoskopische Darstellung in ArcGIS Pro

ArcGIS Pro unterstützt eine stereoskopische Darstellung aller Inhalte für lokale 3D-Szenen. Dabei wird auf dem Bildschirm der Eindruck von Tiefe vermittelt, indem zwei getrennte Bilder (je Auge ein Bild) erstellt werden. Der Stereoskopische Modus wird in den Optionen unter Anzeige aktiviert. Es stehen die Modi „3D-Shutter-Brille“ oder „3D-Brille Rot/Cyan“ (Anaglyphen-Stereo) zur Auswahl. Der Modus 3D-Shutter-Brille erfordert einen speziellen Monitor mit hoher Aktualisierungsrate und eine Shutter-Brille zur Erzeugung des 3D-Effekts. Dieser Modus bietet im Vergleich zum Modus „3D-Brille Rot/Cyan“ einen sehr guten 3D-Effekt bei entsprechender Farbqualität. Der Modus „3D-Brille Rot/Cyan“ funktioniert dafür mit jedem Monitor und erfordert nur eine sehr kostengünstige Rot/Cyan Brille.

3D-Punktwolken in ArcGIS Pro

Wird ein LAS-Dataset oder eine einzelne Datei im LAS- oder zLAS-Format einer 3D-Szene in ArcGIS Pro hinzugefügt, werden die Punkte standardmäßig mit einem Höhen-Renderer und einem Eye Dome Lighting-Effekt symbolisiert. Durch diese Schummerungstechnik wird die Wahrnehmung von Tiefe und Kontur beim Anzeigen von LAS-Datasets verbessert.

3D-Punktwolken können nach unterschiedlichen Gesichtspunkten gefiltert (z. B. nach Klassencodes oder Höhe) und symbolisiert werden (z. B. nach Höhe, Ausrichtung, Klassencode oder RGB-Werten - falls vorhanden). Auch die dargestellte Punktzahl, -größe oder -dichte sind einstellbar.

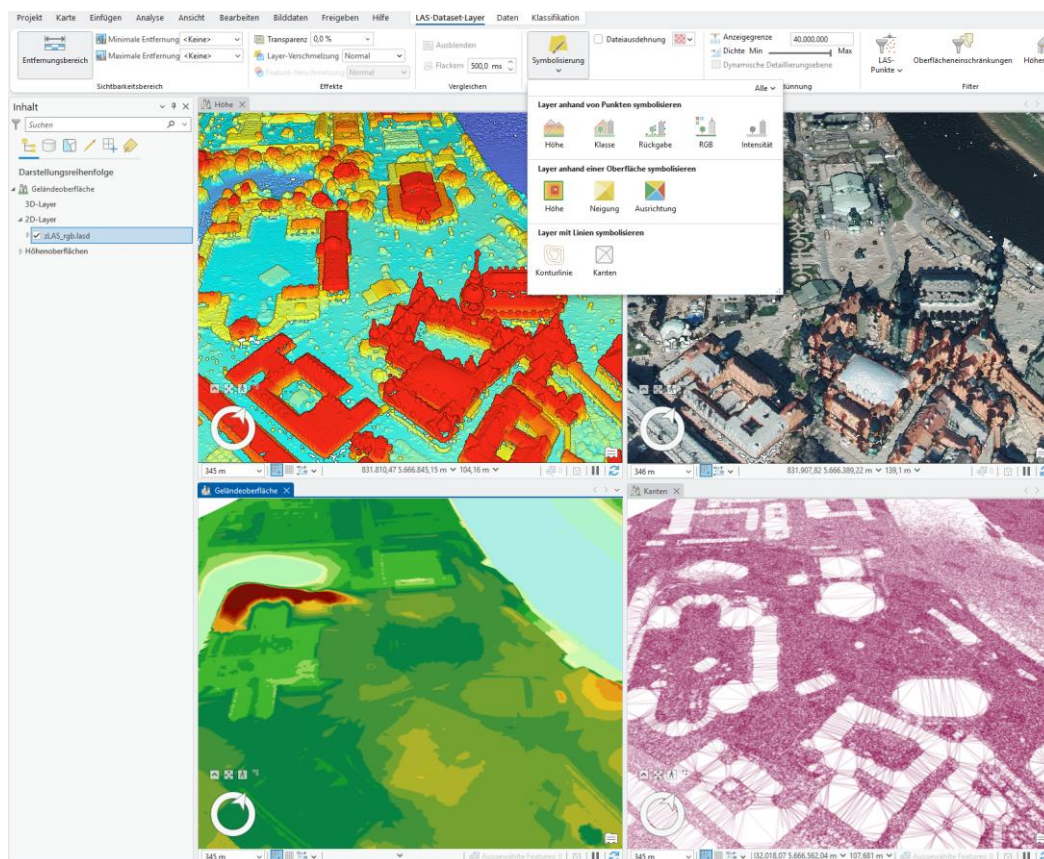


Abbildung 1.4.3.1 - 1: Darstellung von Punktwolken nach Höhe und RGB (oben), sowie anhand einer Höhenoberfläche und mit Kanten (unten)

Eine weitere Darstellungsmöglichkeit stellen die Profilanalysen innerhalb von 3D-Szenen dar. Die Anzeige wird dadurch in beliebig breite vertikale Abschnitte geschnitten. Außerdem wechselt die Szenenansicht vom

Standardzeichen-Modus in den parallelen Zeichen-Modus (ohne Verzerrung der Perspektive). Unter anderem stehen hier vertikale Messwerkzeuge zur Verfügung.



Abbildung 1.4.3.1 - 2: Profilansichten innerhalb von 3D-Szenen

Weisen die 3D-Punktwolken keine Klassencodes auf, oder sollen neue Klassencodes erstellt oder zugewiesen werden, stehen entsprechende Werkzeuge zur Bearbeitung ausgewählter Punkte zur Verfügung. Verschiedene Geoverarbeitungswerkzeuge ermöglichen eine automatische Klassifizierung bestimmter Klassencodes wie Boden, Gebäude oder Stromleitungen.

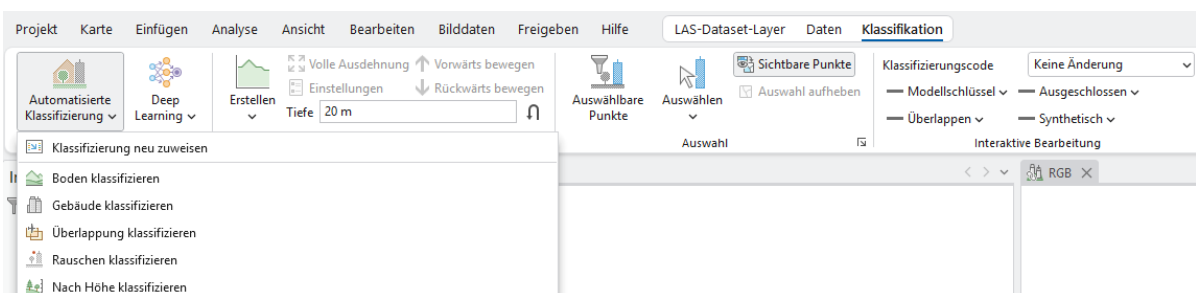


Abbildung 1.4.3.1 - 3: Automatische und interaktive Klassifizierung von Klassencodes

Deep-Learning-Modelle für die Punktwolkenklassifizierung

ArcGIS Pro mit der 3D Analyst Erweiterung stellt nach der Installation zusätzlicher Deep-Learning-Framework-Bibliotheken Deep-Learning-Geoverarbeitungswerkzeuge zur Analyse von 3D-Punktwolken zur Verfügung. Entsprechende Hardware, wie eine NVIDIA-GPU mit CUDA-Compute Capability und mindestens 8 GB dedizierter GPU-RAM, ist Voraussetzung. Zur Erstellung eines Deep-Learning-Modells, das für die Punktwolkenklassifizierung verwendet werden kann, gehören zwei Hauptschritte: Die Vorbereitung der Trainingsdaten und das eigentliche Training. Sie können dafür eigene Deep-Learning-Modelle verwenden oder vorgefertigte Modelle nutzen, die z. B. vom Esri Analytics Team über den ArcGIS Living Atlas zur Verfügung gestellt werden.

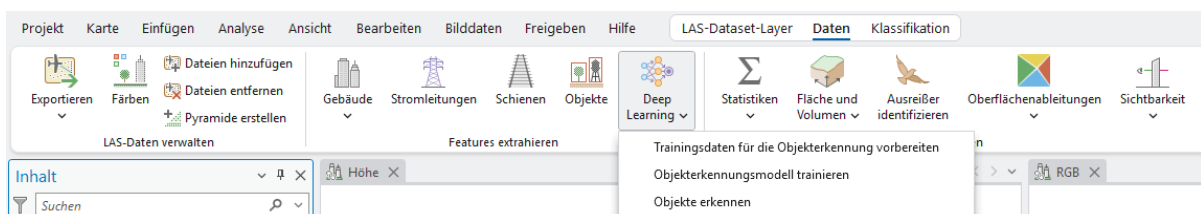


Abbildung 1.4.3.1 - 4: Deep-Learning-Modelle für die Punktwolkenklassifizierung

Für 3D-Punktwolken stehen in ArcGIS Pro verschiedene Export- und Konvertierungsmöglichkeiten zur Verfügung. Kartenausschnitte oder selektierte Punkte können in neue LAS- oder zLAS-Formate exportiert werden, ebenso können z. B. die Bodenpunkte mit dem Geoverarbeitungswerkzeug „LAS-Dataset in Raster“ in ein Raster interpoliert oder mit dem Geoverarbeitungswerkzeug „LAS-Dataset in TIN“ in ein Esri TIN (triangulated irregular network) konvertiert werden. Für eine sehr performante Darstellung können die 3D-Punktwolken in Punktwolken-Szenen-Layer-Pakete (.slpk) konvertiert werden, die als „Punktwolken-Layer“ auch in ArcGIS Online genutzt werden können. Weitere Bearbeitungen sind damit aber nicht möglich.

Weitere Informationen zur Datenverwaltung von 3D-Punktwolken und 3D-Meshes in ArcGIS Pro finden Sie im Kapitel 1.4.2.1.

Literatur

GI Geoinformatik GmbH (Kaiser, P.), 2024: ArcGIS Pro - Das deutschsprachige Handbuch inklusive Einstieg in ArcGIS Online, Berlin.

1.4.3.2 GIS-Operationen auf 3D-Punktwolken in QGIS

Verfasser: Andreas Neumann

QGIS verwendet vor allem die PDAL-Library für die Analyse und Manipulation von Punktwolken. Unter anderem stehen die folgenden Funktionen zur Verfügung:

- Klassifikation von Bodenpunkten mit dem SMRF-Algorithmus⁹ (Simple Morphological Filter) zum Separieren von Bodenpunkten von Gebäude- und Vegetationspunkten
- Vergleich von 2 Punktwolken mit dem M3C2-Algorithmus¹⁰ (Multiscale Model to Model Cloud Comparison)
- Höhe über Boden Algorithmus (vertikaler Abstand z.B. von Baum- und Gebäudepunkten über Bodenpunkten)
- Identifizieren und entfernen von Ausreißern (Noise)
- Erstellen von COPC (Cloud Optimized) und VPC (Virtual-Point Cloud) Datensätzen als Kombination von einzelnen Dateien
- Ausdünnen von Punktwolken
- Filtern von Punkten über Attributwerte und Formeln
- Export von Punktwolken nach Vektor, Raster (optional auch über Triangulierung)
- Erstellen von Rasterdaten mit Werten zur Punktwolkendichte (Anzahl 3D Punkte in Rasterzelle)
- Transformieren von Punktwolken (zum Korrigieren von systematischen Abweichungen über den ganzen Datensatz)
- Clippen (ausschneiden) von Punkten mit Hilfe eines Polygon-Layers
- Umprojizieren von Punktwolken in ein anderes Projektionssystem
- Diverse Python Plugins für Point Clouds

1.4.3.3 GIS-Operationen auf 3D-Meshes in QGIS

Verfasser: Dr. Andreas Neumann

- Mesh-Calculator (über Formeln, ähnlich wie Rasterrechner)
- Generieren von Konturlinien (Isohyps) aus den Mesh-Datensätzen
- Generieren von Querschnitten (cross sections) in regelmäßigen Abständen
- Berechnen von Volumen: via Umwandlung in Raster und danach verschiedene Möglichkeiten (z.B. Raster surface volume Algorithmus oder Raster-Calculator und Zonenstatistik-Werkzeug). Am einfachsten jedoch über das qgisVolume Plugin.
- Erstellen von TIN aus Punkt-Vektordaten
- Export des Mesh zu Rasteroberflächen (bei mehreren übereinander liegenden Oberflächen im selben Mesh-Datensatz wird gemittelt)
- Export der Mesh Stützpunkte, Kanten und Flächen zu 3D Vektordaten (bei mehreren Oberflächen im selben Mesh-Datensatz an der gleichen geographischen Lokalität wird gemittelt)
- Extrahieren von Attribut-Werten an Vektor-Punkten basierend auf Zeitinformationen aus Meshdatensätzen mit mehreren Zeitständen
- Diverse Python-Plugins (z.B. TUFLOW, Crayfish)

Profilwerkzeug

Das QGIS-Profilwerkzeug funktioniert mit allen Datenstrukturen die Höheninformationen beinhalten können: Rasterdaten, Mesh-Daten, Point-Clouds, 3D Vektor-Daten. Im Profil werden alle Daten aller gewählten Layer

⁹ Pingel, Thomas J., Keith C. Clarke, and William A. McBride. "An Improved Simple Morphological Filter for the Terrain Classification of Airborne LIDAR Data." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 77 (March 2013): 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.12.002>.

¹⁰ <https://arxiv.org/pdf/1302.1183>

kombiniert dargestellt. Bei Punktwolken macht es Sinn bei der Profillinie einen Puffer anzugeben, damit mehr Punkte links- und rechts der Profillinie einbezogen werden. Im Profil kann auch gemessen werden und die Attributwerte können im Profil abgefragt werden.

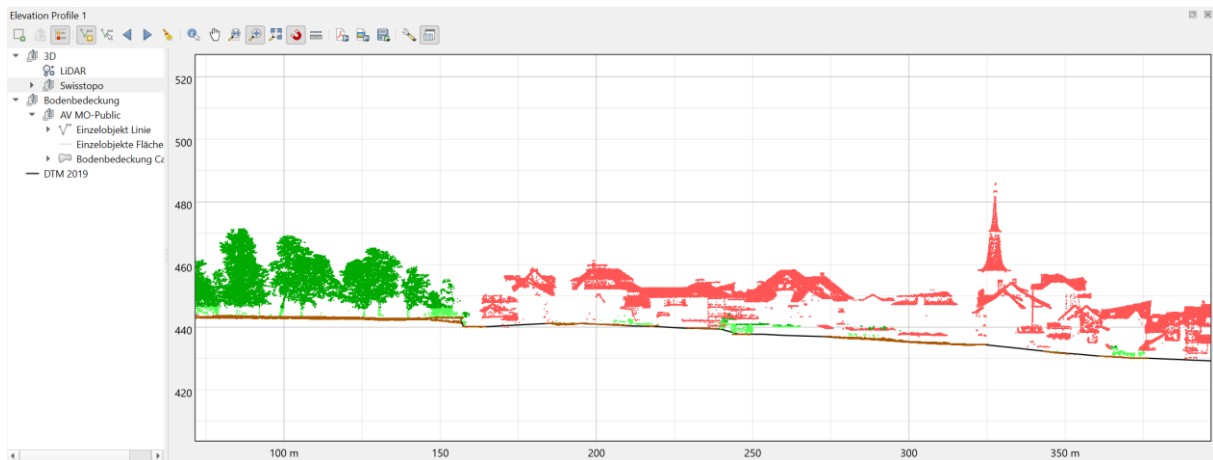


Abbildung 1.4.3.3 - 1: Höhenprofilwerkzeug mit Schnitt in 3D-Punktwolke und Raster-Geländemodell

Höhenfilter

Neben der Zeitsteuerung (temporal control) gibt es im Menü «Ansicht» → «Datenfiltrierung» auch die «Höhensteuerung». Damit kann aus den minimalen und maximalen Höhen eines Projekts eine «Scheibe» zwischen Min/Max-Werten der jeweiligen «Scheibe» entlang der Gesamthöhe des Projekts «herausgeschnitten» werden. Punkte der Punktwolke, Rasterzellen eines Geländemodells oder Flächen eines Meshes die ausserhalb des Höhenfilters liegen werden ausgeblendet, also alle weissen Bereiche im Kartenausschnitt sind ausserhalb des gewählten Höhenschnittes.

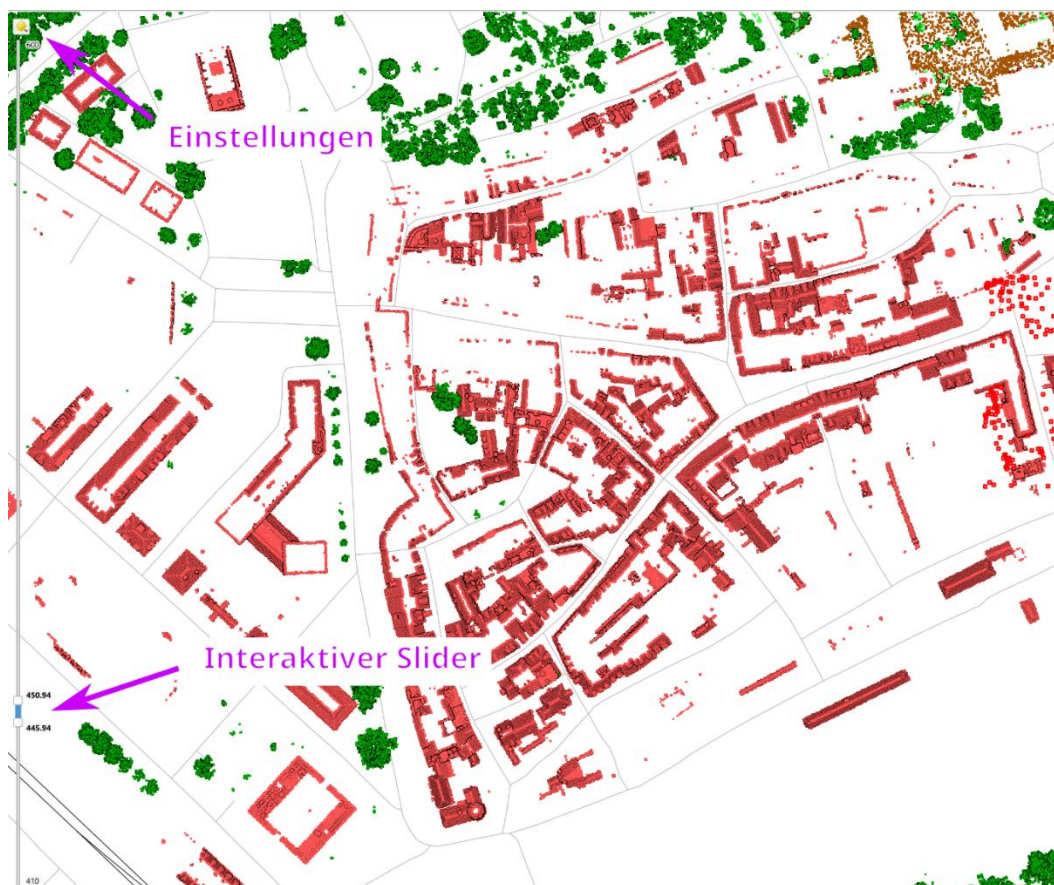


Abbildung 1.4.3.3 - 2: Interaktiver Slider zur Höhensteuerung (elevation slicing)

1.4.3.4 3D-Visualisierung (lokal auf dem Desktop, im Web, VR/AR)

Verfasser: Thomas H. Kolbe, Andreas Donaubauer

Ein grundlegender Anwendungsfall bei der Nutzung von Daten, die mittels UAS erfasst werden, ist die 3D-Visualisierung. In diesem Kapitel werden daher Methoden und Viewing-Plattformen für die Visualisierung von 3D-Punktwolken und 3D-Meshes vorgestellt. Die zugrunde liegenden Speicher- und Austauschformate werden hier nicht erneut beschrieben: Eine ausführliche Darstellung der Punktwolkenformate (z. B. E57, LAS, LAZ) findet sich in Kapitel 1.4.1.1, der Mesh-Formate (z. B. OBJ) in Kapitel 1.4.1.2 sowie der für die Visualisierung optimierten Streaming-Formate (glTF, 3D Tiles, I3S) in Kapitel 1.4.1.3.

Eine mögliche Einteilung der Viewing-Plattformen erfolgt nach dem Endgerät, auf dem sie genutzt werden sollen. Zu unterscheiden sind dabei insbesondere native Apps für Desktop-PCs und Laptops, native Apps für Tablets und Smartphones, native Apps für AR-/VR-Brillen sowie Game Engines. Unter nativen Apps werden hier spezifische Anwendungsprogramme verstanden, die auf der jeweiligen Plattform installiert werden müssen und die explizit für die Visualisierung von 3D-Punktwolken und/oder 3D-Meshes entwickelt wurden. Native Desktop-Anwendungen werden dabei auf dem Betriebssystem (Windows, macOS oder Linux) eines PC oder Laptop installiert, native mobile Apps auf den Betriebssystemen von Tablets und Smartphones (z. B. iOS und Android). Demgegenüber stehen Web-Apps, die als Anwendung in einem Webbrowser laufen - unabhängig davon, ob auf einem Desktop-PC oder einem Smartphone - und die keine Installation zusätzlicher Software erfordern.

Native Anwendungen und Web-Anwendungen im Vergleich

Die Wahl zwischen einer Web-Anwendung und einer nativen Anwendung hat unmittelbare Auswirkungen auf Bereitstellung, Performanz und benötigte Datenaufbereitung.

Der wesentliche Vorteil von Web-Apps besteht darin, dass sie betriebssystemunabhängig laufen und die Nutzerinnen und Nutzer keine Rechte zur Installation von Software benötigen. Dies ist insbesondere für Mitarbeitende von Verwaltungen oder Unternehmen relevant, die häufig nicht über solche Rechte verfügen. Demgegenüber stehen mehrere Nachteile: Auch für lokal gespeicherte 3D-Daten wird in der Regel ein Webserver benötigt, von dem die Daten gestreamt werden. Zudem ist die Visualisierungsperformanz üblicherweise geringer als bei nativen Anwendungen, und häufig müssen die Daten vor der Darstellung zunächst aus dem Punktwolken- oder Mesh-Format in ein Visualisierungsformat wie 3D Tiles oder I3S konvertiert werden (siehe Kapitel 1.4.1.3).

Native Anwendungen haben demgegenüber den Vorteil, dass die Daten oftmals direkt im vorliegenden Datenformat ohne vorherige Konvertierung geladen werden können. Nachteilig ist, dass die Größe der darstellbaren Szene durch den verfügbaren Arbeitsspeicher begrenzt wird. Darüber hinaus kann das interaktive Navigieren bei großen Datensätzen sehr langsam werden, sofern keine vorab berechneten räumlichen Indizes vorliegen.

Kriterien zur Auswahl eines Viewers

Unabhängig von der konkreten Plattform sollten bei der Auswahl eines Viewers die folgenden Kriterien betrachtet werden:

- Für welche Plattformen ist der Viewer verfügbar? Gemeint ist hier in erster Linie die Geräteklasse (Desktop, Mobilgerät, VR-/AR-Brille); das konkrete Betriebssystem kann ebenfalls ein Kriterium sein.
- Welche Arten von Geodaten können visualisiert werden? In Betracht kommen 3D-Punktwolken und/oder 3D-Meshes sowie gegebenenfalls weitere Datentypen. Können verschiedene Arten von Geodaten gemeinsam visualisiert werden, etwa eine 3D-Punktwolke zusammen mit einem 3D-Mesh oder mit weiteren GIS-Daten? Diesem Aspekt widmet sich Kapitel 4.3.8 ausführlicher.
- Können die originalen Datenformate wie E57, LAS oder LAZ (Punktwolken, siehe Kapitel 1.4.1.1) bzw. OBJ (Meshes, siehe Kapitel 1.4.1.2) direkt dargestellt werden, oder müssen sie zunächst in ein für die effiziente Visualisierung optimiertes Format wie 3D Tiles, I3S oder Potree konvertiert werden (siehe Kapitel 1.4.1.3)?
- Kann immer nur ein Datensatz geladen werden, oder können weitere Daten derselben Art hinzugeladen und gemeinsam visualisiert werden?
- Kann sich die Nutzerin oder der Nutzer ad hoc dazu entscheiden, weitere Daten hinzuzuladen? Bei Game Engines ist dies häufig nicht möglich; dort müssen in der Regel bereits bei der Definition der Szene alle Daten ausgewählt worden sein und bereitstehen.

- Müssen die Daten für die Visualisierung georeferenziert sein, oder können auch nicht-georeferenzierte Daten dargestellt werden?
- Sind für den Anwendungsfall neben der reinen Visualisierung weitere Funktionen wie das Messen von Distanzen, das Ausdünnen/Subsampling oder die Filterung nach Klassifikation (z. B. LAS-Klassen) der Punktwolke erforderlich und werden diese vom jeweiligen Viewer unterstützt?
- Ist für den Anwendungsfall die Möglichkeit zum Einfärben der Punktwolke nach RGB-, Intensitäts-, Klassifikations- und Höhenwerten erforderlich und unterstützt der Viewer diese Darstellungsoptionen?

Native Desktop Apps, Desktop-GIS- und CAD-Software

Für die Visualisierung lokal gespeicherter 3D-Daten auf Desktop-PCs oder Laptops stehen zahlreiche eigenständige Werkzeuge zur Verfügung. Exemplarisch seien zwei verbreitete, quelloffene bzw. frei verfügbare Lösungen genannt:

- CloudCompare¹¹ ist eine quelloffene Software, die nicht nur als Viewer für 3D-Punktwolken und 3D-Meshes dient, sondern auch aus Punktwolken Meshes erzeugen kann. Darüber hinaus lassen sich Unterschiede zwischen zwei Punktwolken oder zwischen einer Punktwolke und einem Mesh ermitteln; 3D-Daten können außerdem gefiltert und zugeschnitten werden. Die ermittelten Unterschiede lassen sich dabei als farbcodierte Distanzkarte (Cloud-to-Cloud bzw. Cloud-to-Mesh) darstellen, was zur in Kapitel 1.4.3.5 beschriebenen visuellen Qualitäts- und Abweichungskontrolle beiträgt.
- Potree Desktop¹² ist eine native Anwendung zum Anzeigen lokal gespeicherter 3D-Punktwolken. Damit Punktwolken in Potree Desktop - wie auch im webbasierten Potree (siehe unten) - visualisiert werden können, müssen sie zuvor mit der Software PotreeConverter¹³ in das Potree-Datenformat konvertiert werden (siehe Kapitel 1.4.1.3).

3D-Punktwolken und 3D-Meshes lassen sich auch innerhalb etablierter Desktop-GIS-Systeme und ETL-Werkzeuge (Extract, Transform, Load) darstellen.

Im Bereich der GIS-Software bieten sowohl ArcGIS als auch QGIS entsprechende Funktionen. ArcGIS Pro kann massive Punktwolken - als Scene Layer Packages (.slpk) - sowie 3D-Meshes einschließlich nativer 3D Tiles (.3tz) darstellen (siehe Kapitel 1.4.2.1). QGIS unterstützt in den aktuellen Versionen das native Laden von Punktwolken im Format Cloud Optimized Point Cloud (.copc) sowie das direkte Streaming von 3D Tiles über die integrierte 3D-Ansicht (siehe Kapitel 1.4.2.2). Aus dem CAD-Bereich sei beispielhaft die Software Autodesk ReCap Pro genannt. Sie konvertiert massive Scandaten in das herstellereigene Format (.rcp/.rcs) und ermöglicht so ein verzögerungsfreies Navigieren. Mit dem FME Data Inspector steht zudem ein Werkzeug aus dem ETL-Umfeld zur Verfügung, mit dem sich räumliche Daten einschließlich 3D-Daten visualisieren und explorieren lassen.

Native Apps für Smartphones und Tablets

Auch für mobile Endgeräte existieren native Apps zur Visualisierung von 3D-Daten. Beispielhaft sei hier die App Emb3D 3D Model Viewer¹⁴ genannt. Die App ist ein kommerzieller Viewer für umfangreiche 3D-Meshes, der unter iOS und Android läuft. Emb3D unterstützt die gängigsten 3D-Dateiformate - auch innerhalb von ZIP-Archiven - und kann 3D-Modelle direkt aus E-Mail-Anhängen, Dropbox, WhatsApp-Nachrichten und anderen Quellen öffnen.

Darüber hinaus gibt es zahlreiche Apps, die sowohl selbst Scans erzeugen als auch Punktwolken und Meshes visualisieren können. Eine kleine Auswahl: Polycam (iOS und Android)¹⁵, PIX4Dcatch (iOS und Android)¹⁶, SiteScape bzw. Faro Sphere Mobile (iOS)¹⁷, mit Fokus auf großflächige 3D-Punktwolken sowie FME Realize (iOS)¹⁸, speziell für die Nutzung von Geodaten in Augmented-Reality-Anwendungen.

¹¹ <https://www.cloudcompare.org/>

¹² <https://github.com/potree/PotreeDesktop>

¹³ <https://github.com/potree/PotreeConverter>

¹⁴ <https://www.emb3d.com>

¹⁵ <https://poly.cam/>

¹⁶ <https://www.pix4d.com/de/produkt/pix4dcatch/>

¹⁷ <https://www.faro.com/de-DE/Products/FARO-Sphere-XG>

¹⁸ <https://fme.safe.com/platform/fme-realize/>

Webbasierte Visualisierung

Bei der webbasierten Visualisierung spielen die OGC-Standards 3D Tiles und I3S eine zentrale Rolle (siehe Kapitel 1.4.1.3). Beide Formate unterstützen explizit sowohl 3D-Punktwolken als auch 3D-Meshes; die künftige Version 2.0 von 3D Tiles wird darüber hinaus Gaussian Splats unterstützen. Als Viewer kommen unter anderem CesiumJS sowie der ESRI I3S Viewer in Betracht, daneben weitere Viewer, die 3D Tiles darstellen können.

Zahlreiche 3D-Webviewer verwenden im Kern die CesiumJS¹⁹. Sie können dadurch 3D-Tiles- und I3S-Daten laden und neben 3D-Punktwolken und 3D-Meshes weitere Geodaten visualisieren; Beispiele hierfür sind der 3DCityDB Webmap Client²⁰, VC Map²¹ und das Masterportal²². Die folgende Abbildung zeigt eine kolorierte Indoor-Punktwolke, visualisiert mittels Masterportal. Die angezeigten Bemaßungen wurden vom Nutzer mit einer entsprechenden Mess-Funktion direkt in der webbasierten Benutzeroberfläche des Masterportals erzeugt.



Abbildung 1.4.3.4 - 1: Visualisierung einer Punktwolke im Masterportal, Geobasisdaten © Landeshauptstadt München - Kommunalreferat - GeodatenService 2024

Speziell für sehr große 3D-Punktwolken hat sich der quelloffene, auf WebGL basierende Webviewer Potree etabliert. Auch hier müssen die Punktwolken vor dem Betrachten in das Potree-Datenformat konvertiert werden.

¹⁹ <https://cesium.com/platform/cesiumjs/>

²⁰ <https://github.com/3dcitydb/3dcitydb-web-map>

²¹ <https://github.com/virtualcitySYSTEMS/map-ui>

²² <https://www.masterportal.org/>

Game Engines, VR-/AR-Brillen

Auch einige Game Engines²³ ermöglichen die Visualisierung von Punktwolken und 3D-Meshes. So existieren beispielsweise Cesium-Plugins für die folgenden Game Engines, die auf diesem Weg das direkte Streaming von Punktwolken und 3D-Meshes im 3D-Tiles-Format erlauben:

- Unreal Engine - Cesium for Unreal plugin²⁴,
- Unity - Cesium for Unity²⁵,
- NVIDIA Omniverse - Cesium for Omniverse²⁶.

Für die genannten Game Engines gibt es VR-/AR-Versionen zur Nutzung mit entsprechenden Brillen. Wird zusätzlich die jeweilige 3D-Tiles-Erweiterung verwendet, so lassen sich 3D-Tiles-Daten direkt in einer VR-/AR-Brille streamen.

²³ <https://gamecompanies.com/game-engines>

²⁴ <https://github.com/CesiumGS/cesium-unreal>

²⁵ <https://github.com/CesiumGS/cesium-unity/releases>

²⁶ <https://github.com/CesiumGS/cesium-omniverse/releases>

1.4.3.5 Gemeinsame Visualisierung mit anderen Geodaten

Verfasser: Thomas H. Kolbe, Andreas Donaubauer

Für bestimmte Anwendungsfälle ist es sinnvoll, notwendig oder zumindest hilfreich, verschiedenartige raumbezogene 3D-Daten gemeinsam zu visualisieren. Gründe hierfür können unter anderem sein:

- die visuelle Qualitätskontrolle der mit einem UAS erzeugten 3D-Punktwolke oder des 3D-Meshes durch Überlagerung mit Referenzdaten wie einem 3D-Stadtmodell, einem BIM-Modell oder einer zu einem früheren Zeitpunkt erfassten Punktwolke;
- die visuelle Inspektion der mit einem UAS erzeugten Daten und die Suche nach Abweichungen gegenüber einem 3D-Stadtmodell, einem BIM-Modell oder einer früher erfassten Punktwolke bzw. einem früher erfassten Mesh, beispielsweise zur Baufortschrittskontrolle oder zur Detektion von Veränderungen zwischen dem 3D-Modell eines geplanten Bauwerks und der mit UAS erfassten Punktwolke des realen Bauwerks;
- die visuelle Suche nach Datenlücken.

Für eine gelungene gemeinsame Visualisierung sind insbesondere die folgenden Punkte entscheidend:

- der Viewer muss in der Lage sein, alle interessierenden 3D-Modelle in ihren jeweiligen Datenformaten zu lesen und darzustellen;
- der Viewer muss verschiedene Datensätze aus verschiedenen Quellen gleichzeitig darstellen können;
- die Daten müssen hinsichtlich des verwendeten Koordinatensystems, der Skalierung und der Lage übereinstimmen. Dies ist am ehesten gewährleistet, wenn alle Datensätze vollständig und genau georeferenziert sind.

Sollen darüber hinaus komplexe 3D-Daten wie 3D-Stadtmodelle (CityGML) oder BIM-Modelle (IFC) - aber auch digitale Geländemodelle, über die zusätzlich Orthophotos oder Karten gelegt werden - gemeinsam mit 3D-Punktwolken oder 3D-Meshes dargestellt werden, bietet sich die Verwendung der OGC-Streaming-Formate 3D Tiles oder I3S an. Alle 3D-Daten werden hierzu vorab mittels entsprechender ETL-Prozesse (siehe Kapitel 1.4.2.4) nach 3D Tiles bzw. I3S konvertiert und können anschließend gemeinsam in Webviewern, aber auch in GIS-Systemen, Game Engines und VR-/AR-Brillen betrachtet werden.

Bilden die erzeugten 3D-Meshes das Gelände ab und sollen automatisch Luftbilder oder Karten darübergelegt werden (Draping), so sollten solche Meshes dem Viewer explizit als digitales Geländemodell (DGM) annonciert werden. Bei CesiumJS-basierten Viewern empfiehlt es sich, derartige DGM-Meshes nicht im Format 3D Tiles, sondern als spezielles quantized-mesh terrain tileset aufzubereiten. Auf solche Quantized-Terrain-Meshes kann CesiumJS automatisch georeferenzierte Bilddaten wie Luftbilder oder Karten projizieren. Seit der Version 1.130 (Mitte 2025) unterstützt CesiumJS zudem das dynamische Draping georeferenzierter Bilddaten (Imagery Layers) direkt auf 3D Tiles. Die folgende Abbildung zeigt eine Visualisierung einer Punktwolke in Kombination mit einem semantischen 3D-Stadtmodell. Die Punktwolke und das Stadtmodell wurden aus ihren originären Formaten LAZ und CityGML in das 3D-Tiles-Format konvertiert. Das DGM liegt als quantized-mesh terrain tileset vor.



Abbildung 1.4.3.5 - 1: Gemeinsame Visualisierung einer Punktwolke (nach Intensitätswerten eingefärbt), eines semantischen 3D-Stadtmodells und eines DGM-Mesh im 3DCityDB Webmap Client (Bildquelle: <https://sensordb.org/>)

VERNETZEN.
UNTERSTÜTZEN.
ERMÖGLICHEN.



WAS DIE BAYKD ALS ZENTRALE ANLAUFSTELLE BIETET:

- ◆ Unterstützung für kommerzielle Betreiber inkl. Dual Use Anwendungen
- ◆ Vernetzung mit Behörden zu Anwendungen und Genehmigung
- ◆ Organisation von Netzwerktreffen, Anwenderforen und Fachveranstaltungen
- ◆ Entwicklung und Förderung effizienter Prozesse für Drohneneinsätze in Bayern

Drohnenbefliegung, Geodaten und digitale Zwillinge für moderne Kommunen.

Von der Befliegung mit RGB-
Multispektral-, Thermal- und
Lasersensoren über die Auswertung
bis zur Bereitstellung als
digitaler Zwilling –
alles aus einer Hand.



10+

Jahre Erfahrung



2.000+

Befliegungen



200+

kommunale Kunden



Präzise Befliegung

Drohnenbefliegungen
mit RGB, Multispektral,
Thermal und Laser –
flexibel, effizient und
passend zu Ihrer
Aufgabenstellung.



Praxisnahe Auswertung

Orthophotos, 3D-Modelle
und Fachauswertungen
für Bauamt, Infrastruktur,
Umwelt, Bestandsdokumentation
und kommunale Planung.



Direkt nutzbare Ergebnisse

Bereitstellung als GIS-fähige
Daten, Pläne und digitaler
Zwilling – für schnellere
Entscheidungen und moderne
Verwaltungsprozesse.



2 Praxisanwendungen

2.1 Anwendungen aus der behördlichen Vermessung

Verfasser: Jakob Unger

Bei bemannten Befliegungen in der Landesvermessung wird die Photogrammetrie bereits seit Jahrzehnten als Messverfahren eingesetzt und auch Airborne Laserscanning (ALS) hat sich zu einem Standardverfahren entwickelt. So gewonnene Produkte sind neben der terrestrischen Vermessung ein Baustein für die Arbeit der Vermessungs- und Katasterverwaltungen (VKV). UAS schließen eine Lücke zwischen terrestrischer und bemannter, flugzeuggestützter Datenerfassung für eher kleinräumige Anwendungen. Am Beispiel Niedersachsens (Kuhnt & Schlösser, 2020; Unger, 2023) zeigt sich, dass die Technologie in Liegenschaftskataster und Geotopographie Einzug gehalten hat. UAS werden dort im Regelbetrieb landesweit gemeinsam durch Landesvermessung und Katasterämter unter dem Dach des Landesamts für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN) eingesetzt.

2.1.1 Flurbereinigung

Verfasser: Jakob Unger

Ein bereits in mehreren Bundesländern praktiziertes UAS-Einsatzbeispiel ist die Vermessung in Flurbereinigungsverfahren. Diese Verfahren dienen dazu, abgegrenzte Gebiete für bestimmte Zwecke wie die Verbesserung der Agrarbewirtschaftung, Umweltschutzmaßnahmen, Infrastrukturprojekte und Regionalentwicklung neu zu ordnen und zu entwickeln, indem beispielsweise Flächen neu verteilt und Wege, Straßen und Gewässer angepasst werden. Dabei werden meist über mehrere Jahre unterschiedliche Verfahrensschritte durchlaufen, die Vermessungsarbeiten erfordern. In Niedersachsen setzt das LGLN im Auftrag der Ämter für regionale Landesentwicklung (ArL) seit einigen Jahren UAS ein, um bislang umfangreich ausgeführte terrestrische Arbeiten zu minimieren. Dabei geht es primär um die Erstellung des „Wege- und Gewässerplans mit landschaftspflegerischem Begleitplan“ (§41 FlurbG), aber auch um die Festlegung der neuen Flurstücksgrenzen anhand relevanter Topografie (z.B. ausgebaute Gräben und Wege) für den Flurbereinigungsplan, insbesondere dann, wenn auf eine Abmarkung der neuen Grenzen verzichtet wird.

Den Standardfall machen hierbei photogrammetrisch erfasste und berechnete Oberflächenmodelle (bDOM) und True Orthophotos (TrueDOP) als Produkte aus. Diese Produkte bilden die gesamten Verfahrensgebiete ab und dienen im Anschluss im Innendienst als Datengrundlage für das Digitalisieren und Attributieren relevanter Objekte im GIS. Schließlich liefert das UAS-Messverfahren ein digitales Abbild der Außenwelt von oben, in der die bislang gezielt im Feld durchgeführte Punktmessung noch nicht erfolgt ist. Dafür kann allerdings jeder sichtbare Punkt auch nachträglich gemessen werden. Die Daten bieten so häufig einen Mehrwert für weitere, über die Ausgangsfragestellung hinausgehende Anwendungen, bspw. in der Wertermittlung. Für die performante GIS-Nutzung der entstehenden großen Datenmengen wird in der Bereitstellung auf cloudoptimierte Formate wie Cloud Optimized GeoTIFF (COG) und Cloud Optimized Point Cloud (COPC) gesetzt.

Durch das LGLN wurden und werden Verfahren mit Flächen von wenigen Quadratkilometern bis zu über 30 km² mit Multikoptern befliegen, womit es teilweise um Gebietsgrößen geht, die auch Flugzeug-gestützt erfasst werden könnten. Mit technologischen, organisatorischen und insbesondere auch rechtlichen Weiterentwicklungen verschiebt sich die Grenze der wirtschaftlich per UAS erfassbaren Fläche jedoch stetig: Benötigte das LGLN für das erste Pilotprojekt mit zwei parallel eingesetzten Drohnen 2021 noch etwa eine Woche für 8 km² entspricht dies vier Jahre später der Flächenleistung, die an zwei Tagen mit einem UAS erreicht wird. Die jährlich per UAS beflogene Fläche entwickelte sich am LGLN von 90 km² in 2022 zu 255 km² in 2025.

Als Standard haben sich dabei folgende Parameter etabliert: Eine GSD von mindestens 3,5 cm, 80 % Längs- und 60 % Querüberlappung flächendeckend im Nadir befliegen sowie zusätzliche lokale Flüge mit Schrägaufnahmen in 20 % abweichender Höhenlage zur Stabilisierung des Bildverbands. Dies dient dem Ziel, auf Passpunkte möglichst zu verzichten und die Georeferenzierung auf RTK-GNSS (SAPOS-Korrekturdaten) am UAS zur Messung der Position des Projektionszentrums der Bilder zu stützen. Kontrollpunkte werden hingegen grundsätzlich immer über das Gebiet verteilt, signalisiert und eingemessen. So wurden im Mittel der großflächigen Flurbereinigungsprojekte der letzten Jahre am LGLN Lageabweichungen um die 2 cm an den Kontrollpunkten in diesem Setup erzielt, was die für die Flurbereinigung nötige Genauigkeit bereits übersteigt.



Abbildung 2.1.1 - 1: Beispiel eines per UAS erfassten TrueDOP eines Flurbereinigungsverfahrens (34 km²). Hintergrund: transparentes DOP20, UAS-Flugplanungssegmente in Rot (bspw. wegen rechtlicher Vorgaben oder höherer Flughöhen über Windkraftanlagen)

Ein großer Vorteil des UAS-Einsatzes ist, dass sowohl GSD, als auch Befliegungssetup und -zeitpunkt je nach Bedarf individuell und auch lokal anpassbar sind. So werden bei Bedarf Schrägaufnahmen für bestimmte Objekte eingeplant. Vegetationsreiche Gebiete können mit einer höheren Bildüberlappung oder ergänzend - beziehungsweise simultan - zur Bilderfassung auch gezielt per UAS-Laserscanning befliegen werden. Laserscanning bietet sich flächendeckend beispielsweise für Waldflurbereinigungsverfahren (dann teilweise auch in belaubtem Zustand erforderlich) oder als Korridor für Gewässerläufe an, die von Vegetation verdeckt sind. Unterschiedliche Anforderungen ergeben sich außerdem, wenn mehrere Stellen in einem Verfahren involviert sind. Beispielhaft seien hier Flurbereinigungsprojekte unter Beteiligung weiterer Landesbehörden genannt:

1. mit dem Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) im Bereich Moorwiedervernässung und Waldflurbereinigung, wobei nicht nur die Lage-, sondern auch die Höhengenaugkeit relevant und ein detailliertes Geländemodell gefordert ist;
2. mit der Niedersächsischen Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr (NLStBV) bei Trassenneubau-projekten mit höheren Anforderungen an GSD, Lage- und Höhengenaugkeit.

2.1.2 Bebauungspläne

Verfasser: Jakob Unger

Ein weiteres Beispiel, das den Mehrwert der UAS-gestützten behördlichen Vermessung zeigt, ist die Erstellung von Planunterlagen für Bebauungspläne im Rahmen der Bauleitplanung. Hier sind typischerweise diverse geometrische Elemente und Attribute gefordert, die sich zu einem erheblichen Teil aus per UAS erfassten Daten mittels GIS (häufig auch in 3D) erheben lassen: Gebäude mit Dachstruktur und First- und Traufhöhe, Bäume mit Höhe, Stamm- und Kronendurchmesser, versiegelte Flächen mit Oberflächenart, Straßen, Rad- und Fußwege, Parkplätze, Geländehöhen, Böschungen, Schilder, Strommasten, Hecken, Zäune, Mauern, usw.

Im Vergleich zur Flurbereinigung sind die Anforderungen an Detailerkennbarkeit, Lage- und Höhengenaugkeit hier höher, weshalb am LGLN auf eine GSD von mindestens 1,5 cm, Schrägaufnahmen in vier Richtungen („oblique“) sowie höhere Bildüberlappungen gesetzt wird. Selbst Baumstämme sind bei laubfreier Erfassung bereits häufig aus den so resultierenden dichten photogrammetrischen Punktwolken (vgl. Abb.) messbar. Außerdem lassen sich 3D-Meshes und generalisierte Gebäudemodelle erzeugen, die als Grundlage für Visualisierungen und 3D-Druck gern gesehene Zusatzprodukte ergeben. Hinzu kommt die Möglichkeit, die Perspektive orientierter Luftbilder zu nutzen, um Einzelpunkte per Mehrbildtriangulation präzise photogrammetrisch zu messen. Je nach spezifischen Anforderungen und Vegetationsaufkommen kommt ergänzend UAS-Laserscanning mit Punktdichten von mehreren 100 Punkten pro Quadratmeter zum Einsatz.



Abbildung 2.1.2 - 1: Beispiel einer rein photogrammetrischen Punktwolke aus per UAS erfassten Bildern

Der Hauptaufwand solcher Projekte liegt derzeit in den GIS-Arbeiten im Innendienst. Deshalb spielen Entwicklungen im Bereich der (halb-)automatischen Objekterkennung aus Bild- und Höhenrastern sowie Klassifikation auch in 3D-Daten (insbesondere Punktwolken) eine wichtige Rolle bei der zunehmenden Automatisierung des Digitalisierens und Attributierens relevanter Objekte. Neben der Nutzung des Oberflächenmodells in unterschiedlicher Visualisierung und zur Entnahme von Höheninformationen, ist die Arbeit mit Querprofilen durch Punktwolken typisch. Profile werden je nach Anwendungsfall vertikal, etwa für die Digitalisierung von Gräben, oder horizontal zur Bestimmung von Baumstammmittelpunkten und -durchmessern eingesetzt. Dabei lassen sich insbesondere Dachgeometrien im Vergleich zur terrestrischen Vermessung meist aus UAS-Daten vollständiger und einfacher ableiten.

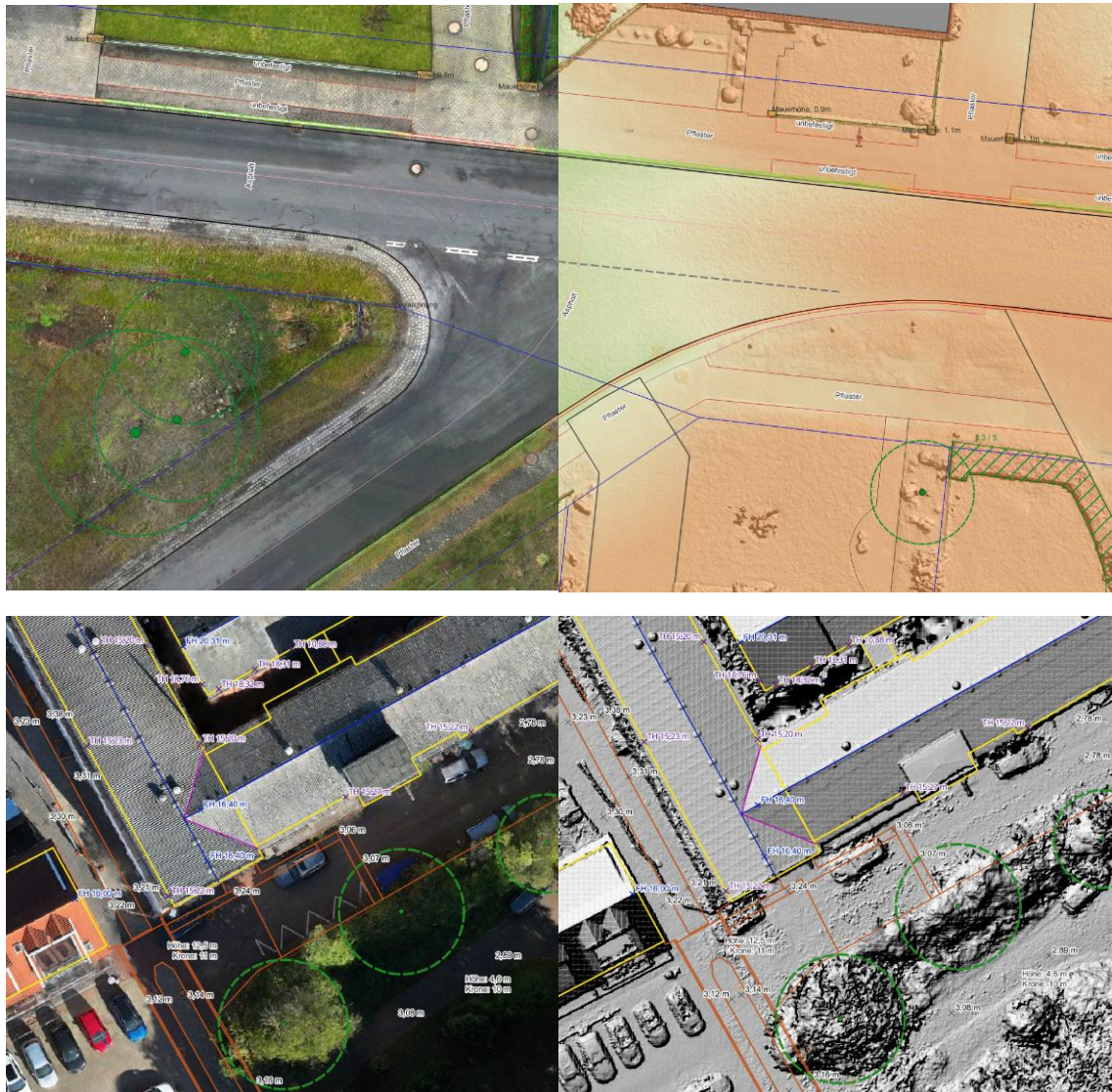


Abbildung 2.1.2 - 2: TrueDOP (links) und bDOM-Schummerung (rechts) mit digitalisierten GIS-Elementen

Literatur

- 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. S. 39-85.
- Unger, J. (2023): UAV-Einsatz in der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung. In: DVW e.V. (Hrsg.): UAV 2023-Geodaten nach Maß, DVW-Schriftenreihe, Band 105, S. 75-94

Kontakt

Jakob Unger | uav@lgl.niedersachsen.de

Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN), Podbielskistraße 331, 30659 Hannover

2.2 Land- und Forstwirtschaft

2.2.1 Zum Einsatz von UAV-Daten für die Waldinventur und Betriebsgutachten

Verfasser: Johannes Schlesinger und Steffen Vogt, Patricia Holter und Axel Weinreich

Die Auswertung von UAS-basierten Fernerkundungsdaten gewinnt in der Forstwirtschaft zunehmend an Bedeutung. Drohnen ermöglichen eine flächendeckende, objektive und reproduzierbare Erfassung von Waldbeständen. Sie unterstützen das Waldmonitoring, die forstliche Nachhaltigkeitskontrolle sowie die Planung und Bewertung von Wäldern bis hin zur Erfassung von Einzelbäumen.

Im Rahmen eines Pilotprojekts zur Forsteinrichtung im Raum Oppenau im mittleren Schwarzwald wurde untersucht, wie UAS-Daten für die Erstellung und Digitalisierung von Betriebsgutachten eingesetzt werden können. Betriebsgutachten stellen eine zentrale Bewirtschaftungsgrundlage dar und werden in der Regel für einen Zeitraum von zehn Jahren erstellt. Ziel des Projekts war es, die Datenerfassung und Auswertung stärker zu digitalisieren, die Genauigkeit zu erhöhen und die Ergebnisse leichter zugänglich zu machen.

Datenerfassung mit UAS-Systemen

Für die Datenerfassung wurden rund 400 Hektar Wald befliegen, darunter Nadel-, Laub- und Mischwälder. Zum Einsatz kamen unterschiedliche Drohnen sowie Sensorsysteme, die komplementäre Informationen liefern:

- LIDAR-Sensoren zur Erfassung der dreidimensionalen Waldstruktur
- RGB-Kameras zur Erstellung hochauflösender Echtfarb-Orthophotos
- Multispektralsensoren zur Analyse der Vegetationsgesundheit und Baumarten

Die Kombination dieser Daten ermöglicht eine umfassende Beschreibung des Waldbestands, sowohl in seiner Struktur als auch in seiner Vitalität.

Praktische Herausforderungen der Datenerhebung

Die Datenerfassung im Schwarzwald ist durch steiles Gelände, dichte Bestände und wechselnde Wetterbedingungen geprägt. Eine sorgfältige Flugplanung und die Auswahl geeigneter Drohnensysteme sind daher entscheidend für die Datenqualität. Unterschiedliche Sensoren und Plattformen werden je nach Fragestellung und Gelände eingesetzt. Erfahrung in der UAS-gestützten Datenerhebung trägt wesentlich dazu bei, sichere Flüge und konsistente Datensätze zu gewährleisten.

LIDAR-Daten und Einzelbaumsegmentierung

Ein zentraler Bestandteil der Auswertung ist die Analyse der LIDAR-Punktwolken. Diese liefern eine detaillierte dreidimensionale Darstellung des Waldes. Mithilfe frei verfügbarer Open-Source-Werkzeuge wie den R-Paketen *lidR* (Roussel et al, 2026) oder *lidaRtRee* (Monnet, 2025) können die Punktwolken in einzelne Bäume segmentiert werden. Für jeden Baum lassen sich Lage, Höhe und Kronenmaße ableiten.

Besonders in Nadelholzbeständen zeigen die Segmentierungsverfahren sehr gute Ergebnisse. Im Vergleich zu klassischen Stichprobeninventuren stehen damit deutlich mehr und präzisere Informationen zur Verfügung.

Aus den ermittelten Baumhöhen und Kronengrößen können über baumartenspezifische Funktionen weitere Kenngrößen abgeleitet werden, etwa der Stammdurchmesser in Brusthöhe (BHD). Auf dieser Grundlage lassen sich das stehende Holzvolumen, die Biomasse sowie der Kohlenstoffvorrat sowohl auf Einzelbaum- als auch auf Bestandsebene berechnen.

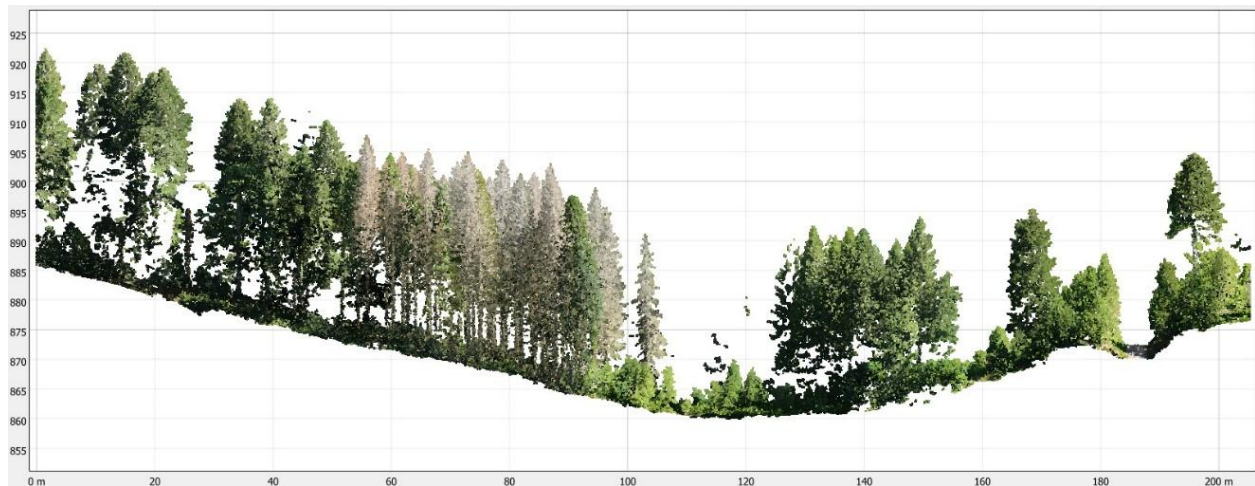


Abbildung 2.2.1 - 1: Schnitt durch eine Punktwolke aus einem drohnengestützten Laserscan. Die für die weiteren Auswertungen notwendigen Punktdichten werden sowohl im Bereich der Baumkronen als auch bei Stämmen und am Boden erreicht.

Nutzung von RGB- und Multispektraldaten

RGB-Orthophotos dienen der visuellen Interpretation und Kartierung des Waldes. Sie unterstützen die Abgrenzung homogener Waldbestände, die als Planungseinheiten für die Bewirtschaftung dienen. In Kombination mit Kronenhöhenmodellen können Bestandsgrenzen im GIS visuell nachvollziehbar abgegrenzt werden.

Multispektraldaten liefern zusätzliche Informationen zur Baumart und zum Gesundheitszustand der Vegetation. Durch die Kombination von LIDAR-Kenngrößen und spektralen Merkmalen können Baumarten mittels frei verfügbarer Algorithmen in R für jedes segmentierte Individuum klassifiziert werden (Hologa et al., 2021). Trainingsdaten werden dabei durch visuelle Interpretation der RGB- und Multispektralbilder im GIS erzeugt. Die Ergebnisse ermöglichen baumartenangepasste Auswertungen und Planungen.

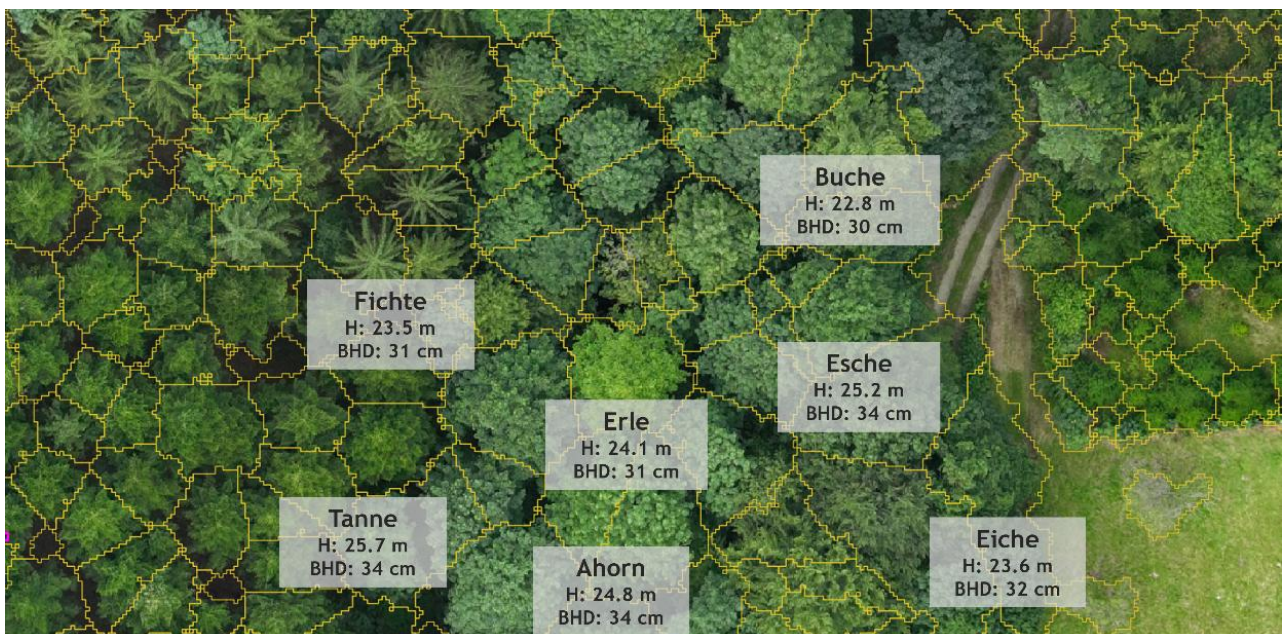


Abbildung 2.2.1 - 2: RGB-Bild und segmentierte Einzelbäume (gelbe Polygone). Für jeden Baum liegen Informationen zu Baumart und Höhe (H) vor, sowie der daraus abgeleitete Brusthöhendurchmesser (BHD).

Digitale Auswertung und Bereitstellung der Ergebnisse

Die aus UAS-Daten abgeleiteten Informationen bilden eine umfassende digitale Grundlage für Betriebsgutachten. Neben Auswertungen auf Einzelbaum- und Bestandsebene können die Ergebnisse über Web-Applikationen mit integriertem WebGIS bereitgestellt werden.

Waldbesitzende erhalten so ergänzend zur klassischen Druckfassung einen digitalen Zugang zu wichtigen Informationen zum Waldzustand und zur Maßnahmenplanung. Die Daten lassen sich mit weiteren Geodaten, etwa zu Standortbedingungen, Schutzgebieten oder Geländeparametern, kombinieren und unterstützen die betriebliche Jahresplanung.

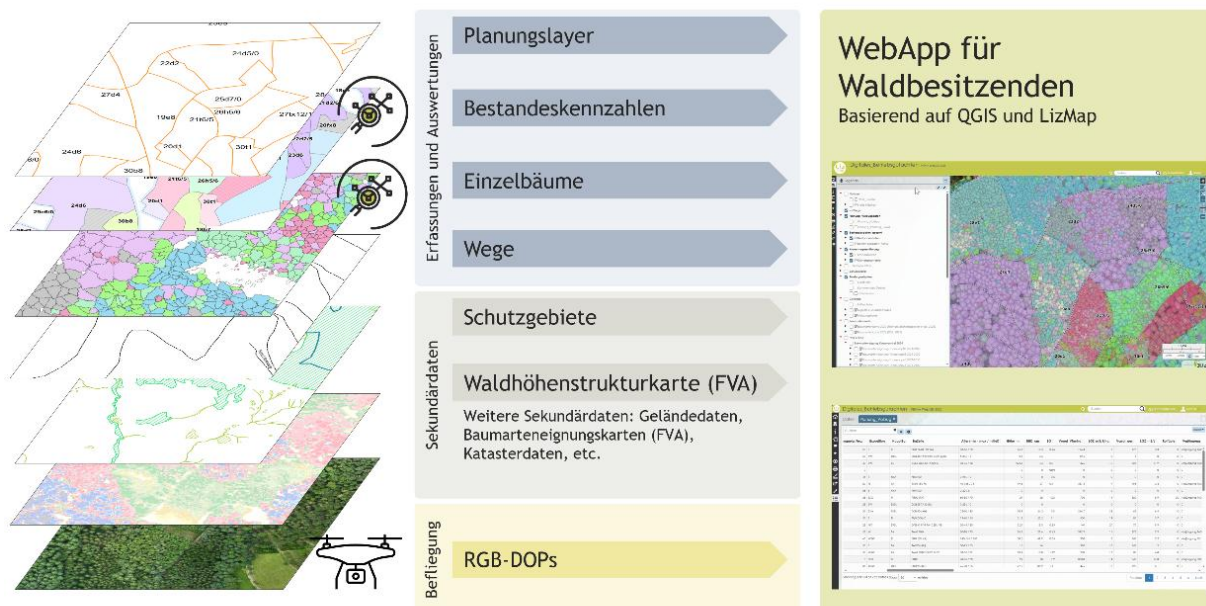


Abbildung 2.2.1 - 3: Eingangsdaten für die Plattform „digitales Betriebsgutachten“ für Waldbesitzende. Dazu zählen segmentierte Einzelbäume und Bestandskennzahlen, die aus den Befliegungsdaten (LIDAR, RGB und Multispektral) abgeleitet wurden sowie wichtige Daten zu Forstwegen und Maschinenwege. Ein Planungs- und Vollzugslayer gestattet Maßnahmen des Betriebsgutachtens in die Jahresplanung zu übernehmen und diese nach der Umsetzung zu registrieren. Zudem werden die Befliegungsdaten und relevante Sekundärdaten bereitgestellt, zum Beispiel die Waldhöhenstrukturkarte der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA, www.fva-bw.de).

Mehrwert und Übertragbarkeit

Die flächendeckende Erfassung aller Bäume bietet eine deutliche Zeitersparnis gegenüber rein geländebasierten Verfahren. Gleichzeitig wird eine höhere Datendichte und Transparenz erreicht. UAS-basierte Verfahren eignen sich nicht nur für Betriebsgutachten, sondern auch für weitere forstliche Fragestellungen, etwa in der Waldbewertung oder bei Flurneuordnungsverfahren.

Die Erfahrungen aus dem Pilotprojekt zeigen, dass die Kombination aus UAS-Datenerfassung, offenen Auswertewerkzeugen und GIS-basierter Bereitstellung eine praxistaugliche und wirtschaftliche Ergänzung klassischer Methoden darstellt. Sie leistet einen wichtigen Beitrag zur Digitalisierung der Forstwirtschaft und bietet eine belastbare Grundlage für fundierte forstliche Entscheidungen.

Referenzen / Weiterführende Links

- Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (2026): Geodatendienste, <https://www.fva-bw.de/daten-tools/geodaten/geodatendienste#c28927>
- Hologa, R., Scheffczyk, K., Dreiser, C., Gärtner, S. (2021): Tree Species Classification in a Temperate Mixed Mountain Forest Landscape Using Random Forest and Multiple Datasets. Remote Sensing 13, 4657. <https://doi.org/10.3390/rs13224657>
- Monnet, J.-M. (2025): lidaRtRee: Forest analysis with airborne laser scanning (LiDAR) data (Version 4.0.8) [R package]. Comprehensive R Archive Network (CRAN). <https://CRAN.R-project.org/package=lidaRtRee>
- Roussel, J.-R., Auty, D., De Boissieu, F., Sánchez Meador, A., Jean-François, B., Gatzolis, D., Steinmeier, L., Adaszewski, S., & St-Onge, B. (2026): lidR: Airborne LiDAR data manipulation and visualization for

forestry applications (Version 4.2.3) [R package]. Comprehensive R Archive Network (CRAN).
<https://CRAN.R-project.org/package=lidR>

Kontakt

Johannes Schlesinger | j.schlesinger@svgeosolutions.de

Steffen Vogt | s.vogt@svgeosolutions.de

svGeosolutions GmbH, Lise-Meitner-Str. 2, 79100 Freiburg

Patricia Holter | patricia.holter@unique-landuse.de

Axel Weinreich | axel.weinreich@unique-landuse.de

Unique land use GmbH, Schnewlinstr. 10, 79098 Freiburg im Breisgau

2.2.2 Drohnengestützte Rehkitzsuche vor der Mahd in einem landwirtschaftlichen Betrieb

Verfasser: Andreas Dörr

Hintergrund

In der modernen Landwirtschaft stellt die Mahd von Grünlandflächen eine erhebliche Gefahr für Rehkitze dar. In den ersten Lebenswochen besitzen Rehkitze einen ausgeprägten Drückinstinkt: Bei Gefahr fliehen sie nicht, sondern verharren reglos im hohen Gras. Besonders im Zeitraum von Mai bis Juni führt dies regelmäßig zu schweren Verletzungen oder zum Tod der Tiere durch landwirtschaftliche Maschinen.

Ziel der hier beschriebenen Anwendung ist es, durch den Einsatz von UAV mit Thermalsensorik Rehkitze frühzeitig zu lokalisieren, zu sichern und damit sowohl dem Tierschutz als auch der rechtlichen und ethischen Verantwortung landwirtschaftlicher Betriebe gerecht zu werden. Gleichzeitig wird gezeigt, wie die erhobenen Geodaten strukturiert dokumentiert und in einfache GIS-Workflows eingebunden werden können.

Der beschriebene Prozess wird bei Dörr Agrar seit mehreren Jahren nach einem standardisierten Verfahren durchgeführt und ist inzwischen fester Bestandteil nahezu jeder Mahd.

Organisation und Vorbereitung

Die Rehkitzsuche erfolgt in enger Abstimmung zwischen Landwirt und zuständigem Jagdpächter. Häufig sind zusätzlich lokale Vereine („Rehkitzretter“) eingebunden, die Organisation, Personal und teilweise auch die technische Ausstattung koordinieren. Die Finanzierung erfolgt meist gemeinschaftlich oder über Förderprogramme des Bundes.

Der Einsatzzeitraum ist klar definiert: Die Rehkitzsuche findet frühmorgens zwischen ca. 4:00 und 6:00 Uhr und überwiegend Juni bis Anfang Juli statt.

Zu diesen Zeiten ist der Temperaturkontrast zwischen Rehkitz und Umgebung am größten, was die Detektion mit Wärmebildkameras erheblich erleichtert. Tagsüber wären die Temperaturunterschiede zu gering.

Technische Ausstattung

Im beschriebenen Anwendungsfall kommt folgendes Setup zum Einsatz:

- UAS: DJI Matrice 30
- Sensorik: integrierte Thermalkamera (Bambi-Kit-Standard)
- Bediengerät: Galaxy Tab Active4 Pro
- Software: DJI-interne Flug- und Auswertungssoftware

Die Drohne wird manuell entlang der zu mähenden Fläche geflogen. Ein Pilot steuert das UAS und überwacht das Wärmebild, während eine zweite Person mit einem mobilen Endgerät die Positionen der detektierten Kitze übernimmt.

Datenerhebung und Sicherung der Tiere

Sobald ein Wärmesignal identifiziert wird, das auf ein Rehkitz hindeutet, wird die Position visuell bestätigt. Die Koordinate wird direkt im System markiert. Anschließend begibt sich die zweite Person zur markierten Stelle, nimmt das Kitz vorsichtig auf und legt es in einen luftdurchlässigen Karton am Feldrand.

Auf den Einsatz von Suchhunden wird bewusst verzichtet, da Rehkitze in den ersten Lebenstagen kaum Eigengeruch aufweisen. Nach Abschluss der Mahd werden die Tiere wieder an geeigneter Stelle freigelassen.

Typischerweise werden ca. 10 ha pro Stunde abgesucht. Dabei werden ca. 5-6 Kitze pro 100 ha gefunden bzw. in einer Gemarkung bis zu 10-15 Kitze pro Tag.

Datenverarbeitung

Die bei der Rehkitzsuche erfassten Daten werden aktuell nicht hochaufgelöst weiterverarbeitet, sondern primär zur Dokumentation und Nachvollziehbarkeit genutzt. Dennoch entsteht ein wertvoller Geodatensatz mit folgenden Informationen:

- Lage der abgesuchten Flächen
- Punktkoordinaten der gefundenen Kitze
- Datum und Uhrzeit der Befliegung
- Anzahl der gesicherten Tiere pro Fläche

Diese Daten können in einem GIS (z. B. QGIS oder ArcGIS) weiterverarbeitet werden, z.B. für:

- die Visualisierung von Fundpunkten im Kontext von Schlägen und Gemarkungen,
- die Analyse räumlicher Häufungen (Hotspots),
- die zeitliche Auswertung über mehrere Jahre,
- die Dokumentation gegenüber Behörden oder Fördermittelgebern.

Langfristig ermöglicht diese GIS-gestützte Dokumentation eine bessere Planung zukünftiger Einsätze und kann helfen, besonders sensible Flächen frühzeitig zu identifizieren.

Ergebnisse

Durch den Einsatz der UAS-gestützten Rehkitzsuche konnten in den letzten Jahren regelmäßig zahlreiche Tiere vor dem Mähtod bewahrt werden. Der Prozess hat sich als zuverlässig, effizient und praxistauglich erwiesen und wird inzwischen routinemäßig vor nahezu jeder Mahd eingesetzt.

Zusätzliche positive Effekte, die durch die UAV-gestützte Rehkitzsuche erreicht werden können, sind erhöhte Akzeptanz in der Öffentlichkeit, rechtliche Absicherung für den Betrieb sowie eine verbesserte Zusammenarbeit zwischen Landwirtschaft und Jagd. Es kann außerdem Mehrwert durch die dokumentierte Geodaten generiert werden.

Die Drohne wird außerhalb der Mahdzeiten zudem für weitere Zwecke eingesetzt, z.B. zur Ortung von Wildschweinen während der Ernte, was die Investition zusätzlich rechtfertigt.

Fazit

Die drohnengestützte Rehkitzsuche stellt ein anschauliches Beispiel für eine erfolgreiche UAS-Anwendung im landwirtschaftlichen Umfeld dar. Sie zeigt, wie moderne Sensorik, einfache Workflows und grundlegende GIS-Strukturen effektiv kombiniert werden können, um konkrete Probleme zu lösen.

Auch wenn die GIS-Auswertung aktuell noch vergleichsweise einfach ist, liegt hier großes Potenzial: Durch eine systematische Speicherung und Analyse der Geodaten können zukünftige Einsätze weiter optimiert und die Ergebnisse nachhaltig dokumentiert werden. Der Anwendungsfall verdeutlicht damit exemplarisch, wie UAS nicht nur zur Datenerhebung, sondern auch als Bestandteil geoinformationsgestützter Entscheidungsprozesse eingesetzt werden können.

Kontakt

Dipl.-Ing. agr. **Andreas Dörr** | info@doerr-agrar.de
Doerr-Agrar, Wasunger Weg 21, 98634 Oepfershausen

2.2.3 Drohnenbasierte 3D-Rekonstruktion von Hof- und Feldstrukturen

Verfasser: Johannes Bauer

Hintergrund

Durch die fortschreitende Modernisierung und Digitalisierung befindet sich der Agrarsektor seit einigen Jahren in einem tiefgreifenden Wandel. Zur Bewältigung gegenwärtiger und zukünftiger globaler Herausforderungen gewinnen daher innovative, geodatenbasierte Lösungsansätze zunehmend an Bedeutung. In diesem Zusammenhang hat sich insbesondere der Einsatz von UAS in Kombination mit GIS als wichtiges Werkzeug zur Datenerfassung, Analyse und Entscheidungsunterstützung in der landwirtschaftlichen Praxis etabliert (Quamar, 2023).

Im Rahmen meiner Masterarbeit im Studiengang Geodatentechnologie entwickelte ich einen methodischen Ansatz zur Nutzung geodatenbasierter Technologien im Kontext der Landwirtschaft. Gegenstand der Arbeit war u.a. die 3D-Rekonstruktion des landwirtschaftlichen Betriebsgeländes sowie angrenzender Felder von Doerr-Agrar auf Grundlage von Drohnendaten, die mithilfe photogrammetrischer Verfahren ausgewertet wurden. Das Vorgehen wurde in Zusammenarbeit mit dem Landwirt und Unternehmer Andreas Dörr sowie ESRI geplant und durchgeführt.

Das Untersuchungsgebiet bildete der landwirtschaftliche Betrieb von Andreas Dörr in der Gemeinde Oepfershausen im Bundesland Thüringen. Im Rahmen des Projekts wurden, wie in Abb. 2.2.3 - 1 dargestellt, das Betriebsgelände sowie drei angrenzende Felder befliegen. Diese waren zum Zeitpunkt der Datenerhebung bereits abgeerntet, was eine genaue Kartierung der Geländeoberfläche ermöglicht hat.

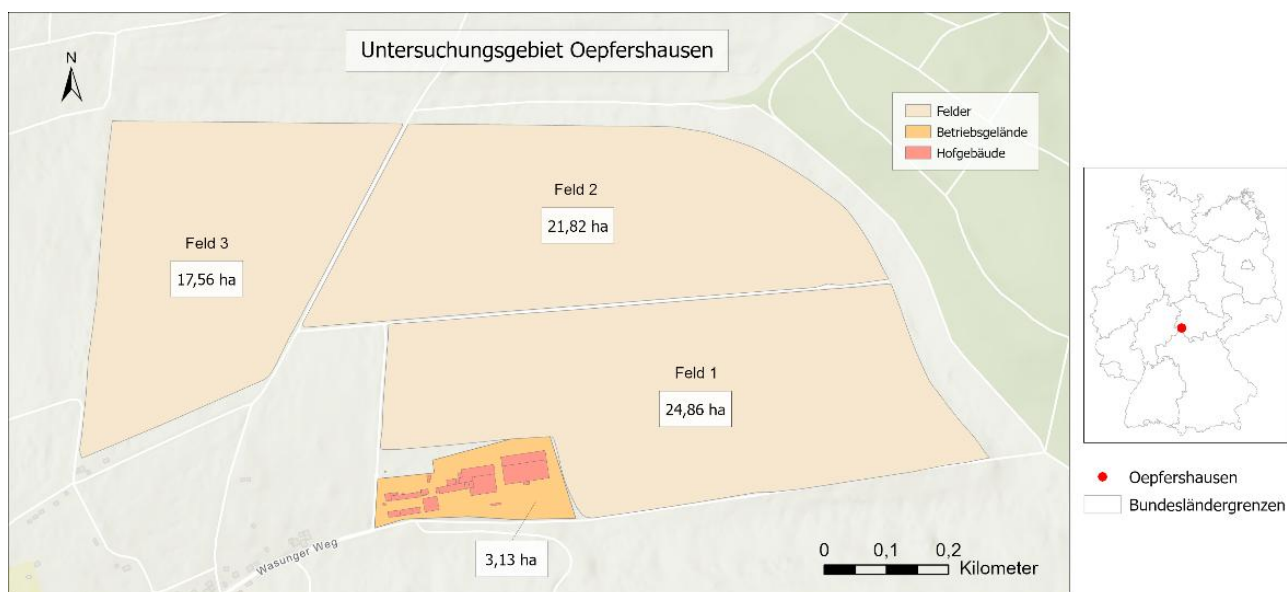


Abbildung 2.2.3 - 1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets

Methodik

Zur Erfassung der Daten ist eine DJI Mavic 2 Pro eingesetzt worden. Da diese über kein RTK-Modul zur zentimetergenauen Positionierung verfügt, war es erforderlich, vor der eigentlichen Datenaufnahme Ground Control Points (GCPs) festzulegen und zu kartieren. GCPs dienen dazu, die aufgenommenen Daten zu georeferenzieren und in ein übergeordnetes Koordinatensystem zu überführen (Martínez-Carricondo, 2018). Da im Untersuchungsgebiet noch keine Passpunkte mit bekannten Koordinaten vorhanden waren, sind diese vor der Befliegung im Gelände ausgewiesen worden. Dazu sind über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt Markierungen mit einer Spraydose aufgebracht worden. Zur Vermessung der GCPs kam ein von Andreas Dörr selbstgebauter RTK-Vermessungsstab zum Einsatz. Dieser kann mit einer SAPOS-Lizenz sowie einem Android-Smartphone bzw. -Tablet genutzt werden und erreicht eine Genauigkeit von ca. 2 cm. Zur Aufnahme der Koordinaten im Gelände ist die App ArcGIS Field Maps verwendet worden. Insgesamt konnten so 17 GCPs innerhalb des Untersuchungsgebiets festgelegt werden.

Die Planung der Drohnenflüge erfolgte mithilfe der mobilen App ArcGIS Flight. Für die Befliegung des Untersuchungsgebiets kam der Flugmodus Area Survey zum Einsatz, der sich besonders zur Kartierung großer

Flächen eignet. Ergänzend dazu wurde der Modus Crosshatch Survey gewählt, welcher speziell zur Erfassung von Bereichen mit vertikalen Strukturen wie Gebäuden verwendet wird (ESRI, 2024).

Ziel des ersten Projektabschnitts war es, ein 3D-Mesh des Betriebsgeländes aus Drohnenaufnahmen zur Integration in den Digitalen Zwilling von Doerr-Agrar zu rekonstruieren. Um ein möglichst detailliertes und den Großteil des Bereichs abdeckendes Modell zu erhalten, wurden sowohl Nadir- als auch Oblique-Befliegungen durchgeführt. Abb. 2.2.3 - 2 zeigt dazu exemplarisch einen Ausschnitt der Flugplanung mit den verwendeten Parametern für die Nadir-Aufnahmen.



Abbildung 2.2.3 - 2: Flugplanung der Nadir-Aufnahmen des Betriebsgeländes

Im zweiten Projektabschnitt sind die angrenzenden Felder befliegen worden, um daraus ebenfalls ein 3D-Mesh ableiten zu können. Im Gegensatz zur Befliegung des Hofgeländes lag der Fokus hierbei nicht auf dem Erreichen einer möglichst hohen Genauigkeit. Stattdessen sollte ein passender Mittelweg zwischen einer ausreichenden Genauigkeit, einer möglichst zeiteffizienten Kartierung sowie einer klaren Geländedarstellung gefunden werden.

Nach Abschluss der Befliegung erfolgte die Prozessierung der aufgenommenen Daten. Hierzu wurde von ESRI die Software Site Scan for ArcGIS zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um eine cloudbasierte End-to-End-Lösung zur Erfassung, Verarbeitung und Analyse von Drohnenbilddaten. Nach Zuweisung der zuvor erfassten GCPs sowie der Festlegung verschiedener Einstellungen konnten die vier primären Ausgabetypen generiert werden. Dazu gehören Orthomosaik, Digitale Geländemodelle, 3D-Punktwolken und 3D-Meshes.

Die aus Site Scan exportierten Daten wurden im Anschluss in ArcGIS Pro importiert, um sie dort mithilfe verschiedener Geoverarbeitungswerkzeuge analysieren und visualisieren zu können.

Ergebnisse

Das aus den Drohnenaufnahmen generierte Orthomosaik stellt eine hochauflösende, georeferenzierte Abbildung des Untersuchungsgebiets dar. Es handelt sich dabei um ein True Orthomosaik, welches auf Basis eines Digitalen Geländemodells erzeugt werden konnte und die Oberfläche verzerrungsfrei darstellt (Barrette, 2022). Dadurch können Veränderungen innerhalb landwirtschaftlicher Flächen präzise erfasst und über verschiedene Zeiträume hinweg überwacht werden.

Ein weiteres Produkt aus der Prozessierung der Drohnenaufnahmen ist das in Abb. 2.2.3 - 3 dargestellte 3D-Mesh, welches eine interaktive, dreidimensionale Darstellung des Untersuchungsgebiets ermöglicht. Das Modell basiert auf der Projektion der aufgenommenen Bilddaten auf das zuvor aus einer Punktwolke generierte Digitale Oberflächenmodell. Im Vergleich zum Orthomosaik können durch die plastische Darstellung räumliche und topographische Zusammenhänge besser verdeutlicht werden.



Abb. 2.2.3 - 3: 3D-Mesh des Betriebsgeländes

Neben dem Orthomosaik und dem 3D-Mesh gehört auch das Digitale Gelände- und Oberflächenmodell zu den Ergebnissen der 3D-Rekonstruktion. Da die Befliegung nach der Ernte stattgefunden hat, stellt vor allem das DGM eine sehr gute Möglichkeit zur Analyse der Geländeoberfläche dar. Hierzu sind verschiedene Parameter wie Hangneigung, Exposition und hydrologische Eigenschaften mithilfe von ArcGIS Pro untersucht worden. Einen Einblick dazu bietet Abb. 2.2.3 - 4.

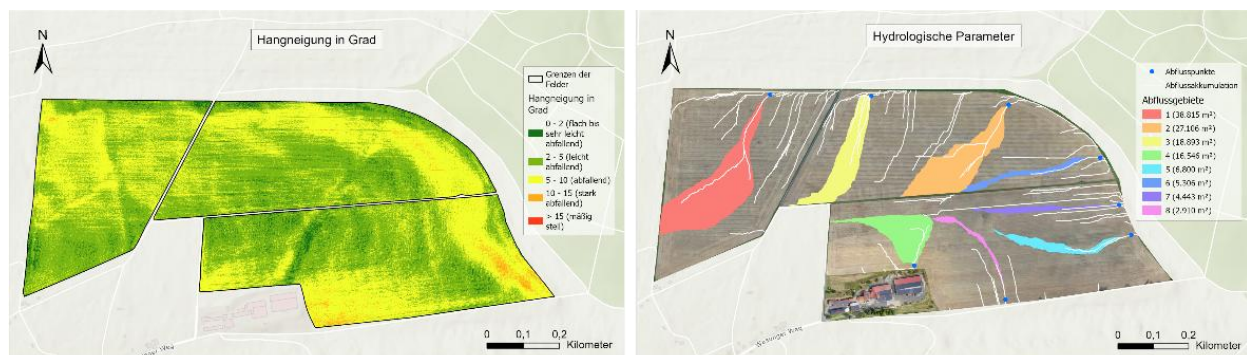


Abb. 2.2.3 - 4: Parameter, abgeleitet aus dem DGM

Die Genauigkeit und Qualität der Ergebnisse kann mithilfe eines Verarbeitungsberichts, der nach Abschluss der Prozessierung automatisch in Site Scan erzeugt wurde, begutachtet werden. Darin enthalten sind verschiedene Parameter zur Bewertung der Ergebnisse, wie etwa der Root Mean Square Error für die Residuen der GCPs. Die ermittelten Abweichungen in X- (0,015 m), Y- (0,01 m) und Z-Richtung (0,021 m) sind als gering einzustufen. Für die durchschnittliche Ground Sampling Distance konnte ein Wert von 0,019 m erreicht werden, was für eine hohe Detailtiefe der Ergebnisse spricht. Die erfolgreiche Kalibrierung von 99,62 % der Aufnahmen übersteigt zudem die empfohlene Mindestanforderung von 95 %. Darüber hinaus weist die mittlere Anzahl der Tie Point Beobachtungen mit einem Wert von 3,3 auf eine ausreichende Überlappung der Bilder hin (ESRI, ohne Datum).

Fazit

Die Ergebnisse des Projekts verdeutlichen das Potenzial von UAS in Kombination mit GIS-gestützten Analysen und liefern wertvolle Einblicke in die Struktur und Beschaffenheit landwirtschaftlich genutzter Flächen. Durch die Analyse topographischer Gegebenheiten ermöglichen sie die frühzeitige Identifikation potenzieller Problemzonen, etwa im Hinblick auf Staunässe oder Erosion, sowie die Ableitung gezielter Maßnahmen. Geodatenbasierte Ansätze stellen im Bereich der Landwirtschaft mittlerweile längst nicht mehr nur eine ergänzende Option dar, sondern sind vielmehr zu einer Schlüsseltechnologie herangewachsen.

Referenzen / Weiterführende Links

- Barrette, R. (2022) 'The Different Types of Ortho Images Created in ArcGIS'. <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgisrealitystudio/imagery/the-different-types-of-ortho-images-created-in-arcgis>.
- ESRI (ohne Datum) 'Adjustment report'. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/data/imagery/adjustment-report.htm>
- ESRI (2024) 'Learn ArcGIS Flight: Application User Manual'.
- Martínez-Carricondo, P. et al. (2018) 'Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points'. International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation, 72. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>
- Quamar, M.M. et al. (2023) 'Advancements and Applications of Drone-Integrated Geographic Information System Technology - A Review'. Remote Sensing, 15(20). <https://doi.org/10.3390/rs15205039>

Kontakt

Johannes Bauer | bauer.johannes1@t-online.de
St.-Rochus-Str. 23, 96157 Ebrach

2.3 Wasserwirtschaft und Hydrologie

2.3.1 Datenerhebung am Gewässer

Verfasser: Tobias Brehm, Florian Zimmermann

Der Einsatz von UAS zur Datenerhebung an Gewässern unterscheidet sich bei identischen Zielgrößen und Zielprodukten – etwa Orthomosaiken, Oberflächenmodellen, Punktwolken oder thematischen Klassifikationen – nur in Details von Befliegungen abseits von Gewässern. Die flugplanerischen Grundlagen und Auswertprozesse bleiben grundsätzlich gleich, insbesondere über Ufer- und Auenflächen sowie im Bereich von Bauwerken. Über offenen Wasserflächen hingegen führt die geringe Strukturvielfalt sowie die Dynamik des Wassers meist dazu, dass bildbasierte Verfahren nicht ausreichend markante Merkmale finden, um einen stabilen Bildverband zu erzeugen. Es ist daher hilfreich, die Befliegung so zu planen, dass auf den Aufnahmen möglichst stets ein Uferstreifen oder andere strukturreiche Bereiche enthalten sind, um ausreichend Referenzmerkmale für die Ausrichtung der Bilder bereitzustellen. Die wesentlichen zusätzlichen Herausforderungen ergeben sich nicht aus dem Gewässer als solchem, sondern aus optischen Effekten, starken Helligkeitskontrasten und Übergangszonen, die in Gewässernähe besonders ausgeprägt auftreten. Diese Besonderheiten sollen in diesem Artikel anhand von zwei Beispielanwendungen herausgearbeitet werden: Im mFund-Projekt mDRONES4rivers¹, wurden hochaufgelöste multispektrale UAS-Orthophotos erhoben als Basis für die Klassifikation von Uferzonen und Auenbereichen auf Vegetation und hydromorphologischen Strukturen eingesetzt. Im Kontext des Ressortforschungsprogramms BMV-Forschungsnetzwerk² wurden UAS-Daten zur Bauwerksüberwachung, d.h. der geometrischen Zustandserfassung von Infrastrukturbauwerken an Bundeswasserstraßen erhoben (Zimmermann & Artz, 2022; Witte & Zimmermann, 2024).

Allgemeine Aspekte der photogrammetrischen Datenerhebung an Gewässern

Ein zentrales, in beiden Praxisbeispielen wiederkehrendes Thema ist die Belichtung. Gewässerszenen sind häufig durch extreme Kontraste geprägt: Wasserflächen erscheinen – abhängig von Trübung und Lichteinfall – oft deutlich dunkler als angrenzende Ufer oder Bauwerksoberflächen. Automatische Belichtungsalgorithmen reagieren auf diese Kontraste, indem sie sich je nach Bildausschnitt entweder am dunklen Wasser oder an den hellen Land- bzw. Bauwerksbereichen orientieren. In der Folge sind jeweils andere Bildteile stark über- oder unterbelichtet. Für hochwertige, konsistente Datensätze ist es daher in vielen Fällen erforderlich, die Belichtung bewusst manuell zu steuern. Daher muss die Belichtung gezielt auf die zu analysierende Fläche eingestellt werden oder die Parameter müssen während des Fluges aktiv angepasst werden. Bildautomatiken führen unter diesen Bedingungen häufig zu optisch und/oder radiometrisch stark schwankenden Resultaten und verschlechtern die Auswertbarkeit erheblich.

Werden wasserbedeckte Bereiche in die Datenerfassung einbezogen, treten zusätzliche optische Effekte auf. Durch die Brechung des Lichts an der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser (Refraktion) können unter Wasser liegende Strukturen scheinbar versetzt oder verzerrt dargestellt werden, was zu räumlichen Ungenauigkeiten in bildbasierten Produkten führen kann. Für die Erfassung unter Wasser liegender Bereiche sind daher Algorithmen der Mehrmedienphotogrammetrie (z.B. Mulsow et al., 2018) einzusetzen. Spielen diese Bereiche keine Rolle, ist zu beachten, dass digitale Oberflächenmodelle sowie die zugrunde liegenden Punktwolken hinsichtlich der berechneten Geländehöhe lediglich bis zur Wasser-Land-Grenze aussagekräftig sind. Orthophotos wirken zwar auch jenseits der Wasser-Land-Grenze visuell realistisch, jedoch ist die geometrische Qualität der dargestellten Wasserflächen ebenfalls unzureichend, sofern keine Mehrmedienphotogrammetrie angewendet wird. Hinzu kommen Reflexionseffekte an der Wasseroberfläche, insbesondere sogenannter „sun glint“ (direkte Spiegelung der Sonne) und „sky glint“ (Reflexion des Himmels) die winkelabhängig auftreten, spektrale Informationen überdecken und die Nutzbarkeit der Bilddaten stark einschränken können. Diese Effekte machen eine sorgfältige Wahl des Aufnahmezeitpunkts und der Aufnahmewinkel notwendig. Um Reflexionen zu minimieren, müssen Flugrichtung, Kameraneigung und Sonnenstand aufeinander abgestimmt werden, was bestimmte Flugmuster und Blickwinkel erfordert und von einer einfachen Rasterbefliegung abweichen kann. Der Einsatz von Polarisationsfiltern kann helfen, Reflexionen an der Wasseroberfläche zu reduzieren, allerdings nur unter klar definierten Bedingungen. Polarisationsfilter sind dann wirksam, wenn Aufnahmen aus einem konstanten Winkel zur Sonne erfolgen. Bei Befliegungen, die gezielt aus einem festen Blickwinkel durchgeführt werden (z.B. schräg gerichtete Aufnahmen entlang eines Ufers), kann ein korrekt eingestellter Polarisationsfilter die Bildqualität deutlich verbessern. Bei klassischen Rasterbefliegungen mit nachgeführtem Gimbal, bei denen sich der Aufnahmewinkel zur Sonne kontinuierlich ändert, ist ein am Boden eingestellter Polarisationsfilter hingegen wirkungslos, da die Polarisationsrichtung nicht dynamisch während des Flugs angepasst werden kann.

Beispielanwendung Klassifikation

Die Erfassung von Vegetation und hydromorphologischen Strukturen an Gewässern erfordert i.A. zeitintensive Geländeerhebungen. Hier bietet der Einsatz von UAS die Möglichkeit, Aufwände zu reduzieren und Behördenaufgaben effizienter zu gestalten (s. Abbildung 2.3.1-1). Dazu sind übertragbare Klassifikationsverfahren und Auswerteroutinen für Monitoring-Einsätze im direkten Gewässerumfeld notwendig. Die Klassifikationsergebnisse hängen in hohem Maße von den Ergebnissen der UAS-Befliegungen ab.

Insbesondere Übergangsbereiche sind für Klassifikationsverfahren herausfordernd. Dazu gehören die Fragen, wo enden Wasserflächen und wo beginnen Uferbereiche, wie unterscheiden sich trockene und nasse Uferzonen und wie geht man mit schattigen und nicht-schattigen Bereichen von Flächen um, die eigentlich zu identischen Klassen gehören? Letzteres ist ein Problem, das auch von Befliegungen abseits von Gewässern bekannt ist. Aufgrund der Belichtung, die nur auf den schattigen oder nicht-schattigen Bereich optimiert sein kann, ist der jeweils andere Bereich radiometrisch und spektral nicht optimal dargestellt und führt dadurch zu stark abweichenden Klassifikationsergebnissen.

Auch bei hydromorphologischen Fragestellungen können Bereiche gleicher struktureller Klasse optisch und radiometrisch sehr unterschiedlich erscheinen, abhängig von Feuchtegrad, Substrat und Vegetationsbedeckung. Ein praktikabler Ansatz besteht darin, trockene und nasse bzw. schattige und nicht-schattige Bereiche derselben Zielklasse zunächst getrennt zu klassifizieren und erst in einem nachgelagerten Schritt - abhängig vom gewünschten Zielprodukt - zusammenzuführen. Details können in der angegebenen Literatur und den erarbeiteten Anwendungssteckbriefen des Projektes mDRONES4rivers nachgelesen werden.

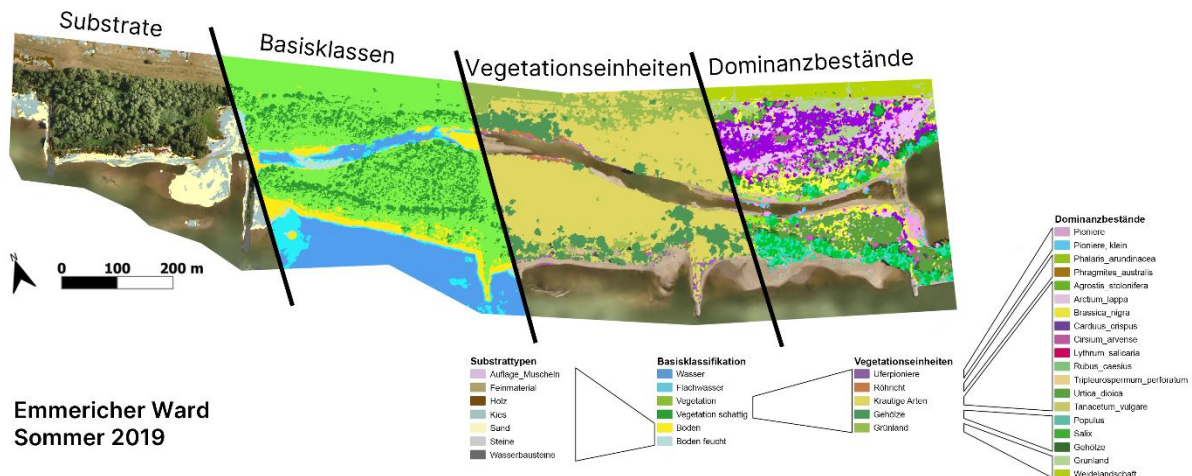


Abbildung 2.3.1 - 1: Produkte von vier verschiedenen Klassifikationsalgorithmen, die im Projekt mDRONES4rivers entwickelt wurden, hier angewendet auf RGB und multispektrale UAS-Orthophotos der Emmericher Ward.

Beispielanwendung Bauwerksüberwachung

Bei der UAS-gestützten Erfassung von Infrastrukturbauwerken wie bspw. Schleusenammern ist das Ziel, möglichst effizient in mehreren Messepochen die Geometrie der Bauwerke flächenhaft zu erfassen um anschließend eine punktwolkenbasierte Deformationsanalyse durchführen zu können. Für die Befliegungen kann der Betrieb der Kammern meist nicht eingestellt werden, sodass nur kurze Befliegungsfenster für die Datenerfassung bleiben, in denen sich kein Schiff in der Kammer befindet. Um einen möglichst großen Bereich über Wasser zu erfassen, wird der Kammerwasserstand für die Befliegung soweit möglich abgesenkt. Folglich treten auch hier vergleichbare Probleme wie bei der Beispielanwendung Klassifikation auf; insbesondere stellt die Durchfeuchtung der Schleusenwände eine Herausforderung dar. Nasse Wandbereiche erscheinen deutlich dunkler als trockene Bereiche, was wiederum starke Helligkeitsunterschiede innerhalb derselben Bauteilfläche erzeugt. Die Situation verschärft sich, wenn zusätzlich direkte Sonneneinstrahlung und Verschattung auftreten, wie es in tiefen, leergepumpten Schleusenammern häufig der Fall ist. Trockenen Teile einer Wand unterschiedlich schnell ab, entstehen sehr uneinheitliche Bildmuster, die eine zuverlässige Auswertung - beispielsweise zur Detektion von Deformationen oder zur Zustandsbewertung - erheblich erschweren oder sogar unmöglich machen (s. Abbildung 2.3.1-2 unten).

In solchen Fällen kann die zeitliche Planung der Befliegung entscheidend sein. Eine sinnvolle Strategie besteht darin, den Aufnahmezeitpunkt so zu wählen, dass nasse Wände einer Schleusenammer entweder

vollständig verschattet oder vollständig beleuchtet sind. Einheitliche Beleuchtungsverhältnisse sind häufig günstiger als Mischsituationen mit gleichzeitig sonnigen und schattigen Bereichen. Diffuse Lichtbedingungen, etwa bei bedecktem Himmel, können die Situation entschärfen, ersetzen jedoch nicht die Notwendigkeit einer bewussten Belichtungssteuerung. Auch bei der Bauwerksüberwachung bleibt eine manuelle Anpassung der Belichtungsparameter in der Regel Voraussetzung für qualitativ hochwertige Ergebnisse (s. Abbildung 2.3.1-2 oben).



Abbildung 2.3.1 - 2: Punktwolken einer Schleusenammer aus UAS-Befliegungen. Oben: trockengelegte Kammer mit abgetrockneten Wänden und Restwasser auf der Sohle. Unten: nasse Kammerwände nach Absenken des Wasserstandes und ohne Adaption der Beleuchtung und Flugplanung.

Zusammenfassend zeigen beide Beispiele, dass die „Datenerhebung am Gewässer“ methodisch keine grundsätzlich andere oder neue Disziplin darstellt. Die etablierten UAS-Workflows für Flugplanung, Datenerfassung und Auswertung sind weiterhin anwendbar. Auch die allgemein gültigen rechtlichen Vorgaben sind gleichwertig zu betrachten. Die zusätzlichen Anforderungen ergeben sich vor allem aus optischen Effekten an der Wasseroberfläche, aus Feuchte- und Übergangszonen sowie aus extremen Helligkeitskontrasten. Wer diese Aspekte bereits in der Planungsphase berücksichtigt, Belichtungs- und Aufnahmewinkel aktiv steuert und Klassifikationsstrategien entsprechend anpasst, kann auch im Gewässerumfeld robuste und hochwertige Geodatenprodukte erzeugen.

Referenzen / Weiterführende Links

¹ <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/mdrone4rivers.html>

² https://www.bmv-forschungsnetzwerk.bund.de/DE/Home/home_node.html

mDRONES4rivers (2022). mDRONES4rivers-Produktportfolio-Sammlung (DE). Zenodo. (https://zenodo.org/records/5877690/files/mDRONES4rivers_product_portfolio_collection_ger.pdf)

mDRONES4rivers (2022). Veröffentlichte Klassifikationsergebnisse und UAS-Produkte der Untersuchungsgebiete (Zenodo-Datensätze). Zenodo. (<https://zenodo.org/search?q=mDRONES4rivers>)

Mulsow, C., Kenner, R., Bühler, Y., Stoffel, A. & Maas, H.-G. (2018). Subaquatic Digital Elevation Models from UAV-Imagery. ISPRS Archives. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-739-2018.

Rommel, E., Giese, L., Fricke, K., Kathöfer, F., Heuner, M., Mölter, T., Deffert, P., Asgari, M., Nätke, P. & Dzunic, F. (2022). Very High-Resolution Imagery and Machine Learning for Detailed Mapping of Riparian Vegetation and Substrate Types. Remote Sensing, 14(4), 954. DOI: 10.3390/rs14040954.

- Witte, D. & Zimmermann, F. (2024). Multitemporale Zustandserfassung von Verkehrsinfrastrukturbauwerken. Forschungsergebnisse Kompakt des BMV-Forschungsnetzwerks. (https://www.bmv-forschungsnetzwerk.bund.de/DE/Publikationen/Kurzberichte/TF3/Witte_Zimmermann_12-2024.html?nn=2102580)
- Witte, D. & Zimmermann, F. (2024). Zwischenbericht des AP10 „Multitemporale Zustandserfassung, Modellentwicklung und Veränderungsanalyse von Verkehrsinfrastrukturbauwerken“ (SPT-301, AP10) im Themenfeld 3 des BMV-Experten Netzwerks. DOI: 10.5675/BfG-2196.
- Zimmermann, F. & Artz, T. (2022). Erfassung von Verkehrsinfrastrukturbauwerken mittels unbemannter Messsysteme. Forschungsergebnisse Kompakt des BMV-Forschungsnetzwerks. (https://www.bmv-forschungsnetzwerk.bund.de/DE/Publikationen/Kurzberichte/TF3/Zimmermann_Artz_2022.html?nn=2102580)

Kontakt

Tobias Brehm | uas@bafg.de

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz
+49 (0)261 1306 5983

Dr.-Ing. Florian Zimmermann | zimmermann@bafg.de

Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz
+49 (0)261 1306 5292

2.3.2 Präzision unter der Wasseroberfläche: Bathymetrie zum Überflutungsschutz mit Drohnen

Verfasser: MOST Robotics & Ingenieurbüro Wolf

Ein Fachbericht über den Einsatz von UAS-basiertem Grünlicht-LIDAR im modernen Flussmanagement.

UAS und GIS - Ein Zusammenspiel mit Tiefgang

In der modernen Geoinformatik hat sich die Kombination aus UAS (*Unmanned Aerial Systems*, umgangssprachlich Drohnen) und GIS (*Geographische Informationssysteme*) als Standard etabliert. Während Drohnen die Plattform für die Datenerfassung darstellen, bilden GIS-Systeme das digitale Gehirn, in dem diese Daten verarbeitet, analysiert und visualisiert werden.

Ein entscheidender Durchbruch der letzten Jahre sind leistungsfähige Laserscanner (LIDAR - *Light Detection and Ranging*), die von unbemannten Fluggeräten (UAV) getragen werden können. Im Gegensatz zur Photogrammetrie (Auswertung von Fotos) kann LIDAR Vegetation besser „durchdringen“ und zuverlässigere Geländemodelle erstellen. Eine Sonderform ist die Bathymetrie: Während herkömmliche Infrarot-Laser an der Wasseroberfläche absorbiert werden, nutzt ein bathymetrisches System einen grünen Laserstrahl, der die Wasseroberfläche durchdringt und den Gewässergrund bis zu doppelter Sichttiefe vermessen kann.

Beispiel: Renaturierung eines Grenzflusses

Warum muss ein Fluss vermessen werden?

Die Mur ist ein Grenzfluss zwischen Österreich und Slowenien. Er wurde in der Vergangenheit zur Landgewinnung begradigt. Die Folge: Das Wasser fließt schneller, gräbt sich tiefer ein und bei Starkregen drohen Dammbrüche und Überschwemmungen, da die natürlichen Rückhalteflächen fehlen. Gemeinsam mit einem Vermessungsbüro führte MOST Robotics ein Proof-of-Concept vor Ort durch. Ziel ist es, durch Renaturierung wieder Mäander (natürliche Flussschleifen) zu schaffen, um den Hochwasserschutz zu verbessern und Naturkatastrophen vorbeugen zu können.

Für die Planung der Erdmassenbewegungen, welche die Mäander wiederherstellen sollen, fehlten bisher präzise Daten über das Flussbett. Hier setzt die Bathymetrie mit einem drohnengetragenen LIDAR-System an.

Die Technik im Einsatz

Für dieses anspruchsvolle Projekt wurde eine Hochleistungskombination gewählt:

- Trägersystem: *Hexadrome Tundra 2*. Ein robuster, europäischer und C5/C6-zertifizierter Quadrocopter, der speziell für schwere Sensoren und widrige Bedingungen in besonderen Einsatzfällen entwickelt wurde.
- Sensor: *YellowScan Navigator*. Ein spezialisierter, bathymetrischer LIDAR-Scanner, der sowohl topografische Strukturen aufnimmt, als auch für die Erfassung von flachen Gewässern optimiert ist.

Flugparameter der Mission:

- Flugstrecke: 8 km Flussverlauf
- Geschwindigkeit: 5 m/s (konstant für gleichmäßige Punktdichte)
- Flughöhe: 80 m über Grund
- Überlappung: 50 % Seitenüberlappung (SingleGrid-Verfahren), um Lücken zu vermeiden

Drohne vs. klassische Vermessungsmethoden

Klassische Methoden wie das Echolot auf Booten scheitern oft an der geringen Wassertiefe, starken Strömungen oder unzugänglichen Uferbereichen. Die klassische Profilmessung mit einer GNSS-Antenne, bei der zu Fuß teils an sehr tiefen Stellen gemessen werden muss, bietet auf lange Strecken gesehen nur unzureichende und lückenhafte Messergebnisse, bei extrem hohem Zeitaufwand. Eine Drohne hingegen:

1. Erfasst Ufer und Gewässergrund simultan: Man erhält ein nahtloses Modell vom Land und Wasser.
2. Ist schneller: Über 8 km Flussverlauf in wenigen Tagen wären mit Trupps zu Fuß oder per Boot kaum realisierbar.
3. bietet Sicherheit: Kein Personal muss sich in das oft gefährliche Strömungsgewässer begeben.



Abbildung 2.3.2 - 1: Die Hexadrone Tundra 2 mit dem YellowScan Navigator



Abbildung 2.3.2 - 2: Das Drohnensystem über dem Grenzfluss "Mur"

Vom Laserstrahl zum digitalen Zwilling

Was für Daten entstehen?

Das System liefert eine Punktwolke. Jeder Punkt hat dabei nicht nur präzise X-, Y- und Z-Koordinaten, sondern auch eine Vielzahl von weiteren Metadaten. Diese umfassen unter anderem Echos des Lasers (Returns), Klassifizierungen, Farbwerte, Intensität des Lasers, Scanwinkel und Zeitstempel. Durch Klassifizierungsprozesse in der Cloud-Station kann in der Punktwolke sowohl Vegetations- und Bodenpunkte an Land, die Wasseroberfläche, der Gewässergrund als auch Objekte in der Wassersäule repräsentiert werden. Dies ist der große Unterschied zu Messmethoden an Land und zu herkömmlichen bathymetrischen Messmethoden.

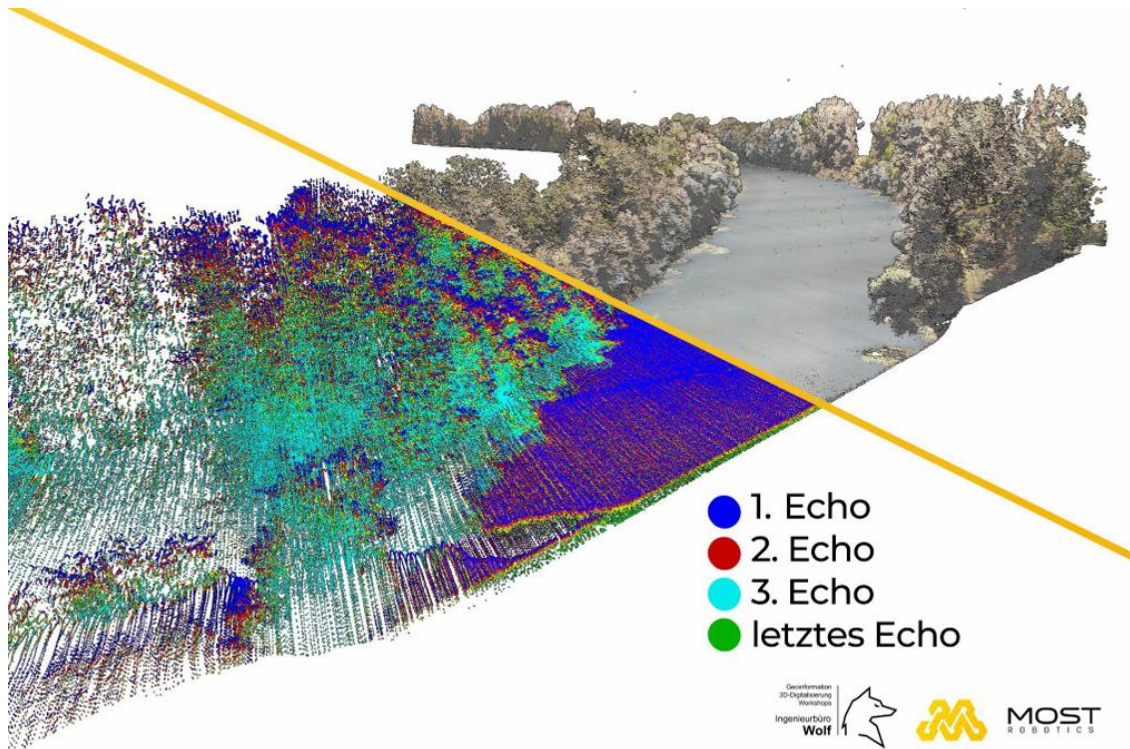


Abbildung 2.3.2 - 3: Darstellung des Flusses in Form von Echos und Einfärbung der Punktwolke in RGB-Farben

Wie werden die Daten verarbeitet?

1. Preprocessing: GNSS-Datenverarbeitung im PPK-Verfahren (Post-Processing Kinematic): Korrektur der Flugbahn (Trajektorie) mittels GNSS-Basisstationen in einer dafür vorgesehenen Software. Anhand der korrigierten Trajektorie werden die Einzelpunkte zu einer präzisen Punktwolke verarbeitet. Es folgen eine Streifenanpassung, eine Klassifizierung der Punkte und eine Einfärbung aus RGB-Bildern.
2. Filterung: Um ein digitales Geländemodell zu erzeugen, können Vegetation und Objekte entfernt werden. Dabei hilft die vorherige Klassifizierung, um nur gewünschte Metadaten anzuzeigen.
3. Analyse: In Geoinformationssystemen können beispielsweise verschiedene Epochen von Befliegungen miteinander verglichen werden. Daraus lassen sich Aussagen über Veränderungen im Flussverlauf, Sedimentverschiebungen und Fahrbarkeit treffen und Überflutungsszenarien simulieren. Durch tiefere Auswertung der Fullwaveform können zusätzlich Vegetation, Mikroorganismen und weitere Gegenstände unter Wasser analysiert werden.

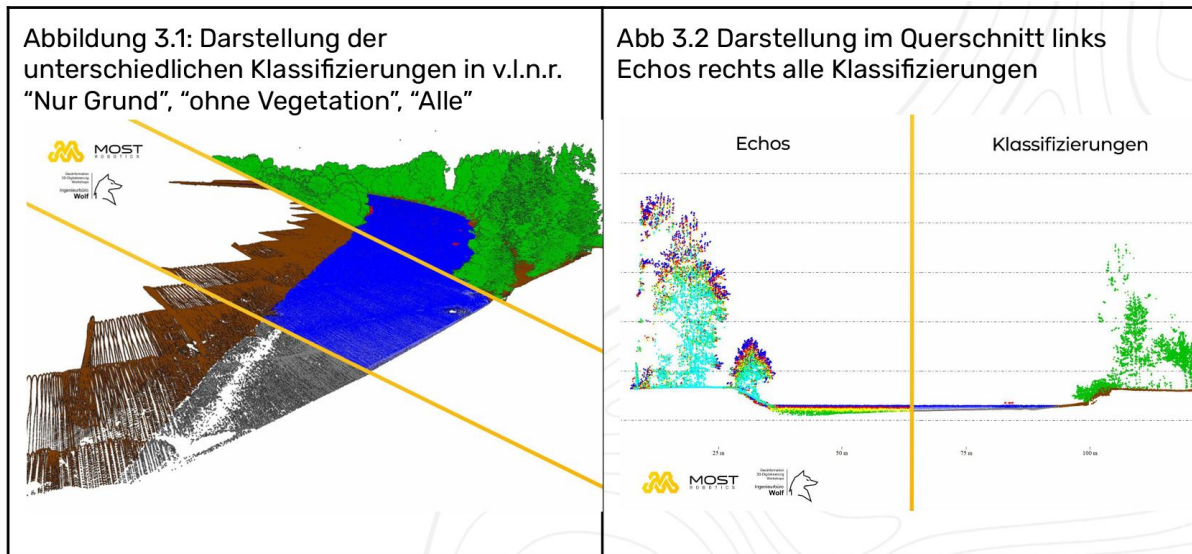


Abbildung 2.3.2 - 4

Möglichkeiten und Grenzen

Der YellowScan Navigator wird nicht nur in der Vermessung von Flüssen, sondern auch im Küstenmonitoring, der Inspektion von Unterwasserstrukturen oder für Forschungen in der Meeresbiologie eingesetzt.

5 kritische Leistungsgrenzen:

1. **Trübung (Secchi-Tiefe):** Ein entscheidender Faktor für die bathymetrische Vermessung ist die optische Klarheit des Wassers - und diese wird mit der sogenannten Secchi-Tiefe angegeben. Dabei wird eine schwarz-weiße Scheibe (Secchi-Scheibe) senkrecht ins Wasser abgesenkt, bis sie nicht mehr zu erkennen ist. Diese Tiefe beschreibt die Sichttiefe des Wassers. Auch kann bei einer Trübung der weißen Stellen auf der Scheibe von Verunreinigung des Wassers ausgegangen werden oder von beispielsweise kalkhaltigen Schwebeteilchen im Wasser, wenn die schwarzen Stellen der Secchi-Scheibe aufgehellert erscheinen. Helle Schwebeteilchen reflektieren den Grünlichtlaser schneller und können zu einem verfälschten Messergebnis führen. Dunkle Schwebeteilchen absorbieren das Licht eher und ein Laserstrahl kann durch fehlende Reflektion nicht vom Scanner aufgenommen und verarbeitet werden.

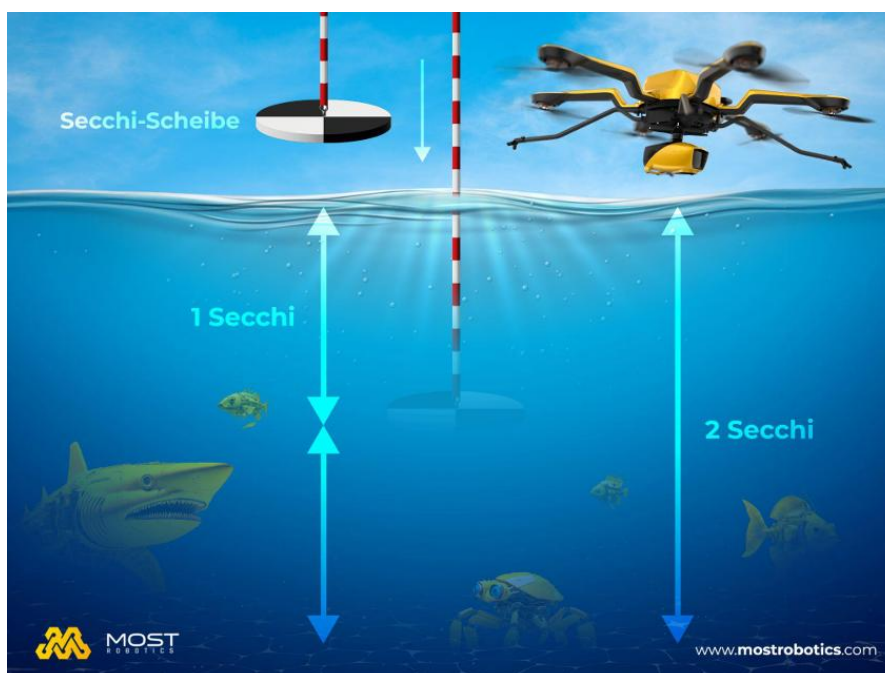


Abbildung 2.3.2 - 5: Secchitiefe

2. Wasseroberfläche: Starke Schaumbildung oder extreme Wellen können den Laserstrahl so stark streuen, dass keine Daten zurückkommen.
3. Vegetation im Wasser: Dichte Algenfelder am Grund können als „Boden“ missinterpretiert werden. Der Untergrund sollte immer gut reflektieren können - ein verunreinigtes Flussbett mit großen, dunklen Steinen und Verunreinigung durch zum Beispiel Laub absorbiert mehr Licht als ein heller, sauberer Kies.
4. Wetterabhängigkeit: Für die Bathymetrie ist eine leichte Wolkendecke mit diffusem Licht ideal. Zu viel Sonnenlicht enthält, wie auch der Laser, grünes Licht. Starker Regen trübt nicht nur die Sicht und schädigt womöglich den Laserscanner, sondern spült auch Sedimente von den Bergen in den Fluss, was die Durchlässigkeit sofort verschlechtert. Zu stilles Wasser mit einer spiegelnden Oberfläche kann nicht nur das menschliche Auge, sondern auch den LIDAR-Scanner stören.
5. Logistik: Das Finden geeigneter Start- und Landeplätze an einem dicht bewachsenen Grenzfluss ist oft schwieriger als der Flug selbst.

Fazit: Ein Meilenstein für Natur- und Katastrophenschutz

Die Mission an der Mur hat gezeigt: Trotz Herausforderungen wie Wind und wechselhafter Trübung liefern UAS-getragene LIDAR-Systeme sehr präzise Daten. Konventionelle Methoden kommen hier vor allem in puncto Zeit, Reichweite und Detailtiefe an Grenzen. Für Behörden und Ingenieurbüros ist diese Technik kein „Spielzeug“ mehr, sondern ein essenzielles Werkzeug für das Umweltmonitoring und den Katastrophenschutz. Gemeinsam können starke Partner wie das Ingenieurbüro Wolf zusammen mit All-in-One-Dienstleister MOST Robotics die Arbeit effizienter gestalten. Die Renaturierung des Flusses basiert nun auf einer soliden Datengrundlage - für einen Fluss, der wieder atmen und sich sicher ausbreiten darf.

Weiterführende Links

www.mostrobotics.de/blog
ibwolf.net

Kontakt

MOST Robotics GmbH

Peterstraße 42, 37199 Wulften am Harz
info@mostrobotics.de+49 (0)5556 850 96 31
 56 850 96 31

www.mostrobotics.com

Wolf Ingenieurbüro GmbH, Standort Grafenau, Freudenhain 10, 94481 Grafenau

info@ibwolf.com
 0+49 (0)8555 9602-0

2.3.3 UAS-gestützte Datenerfassung für die Starkregenvorsorge - Erfahrungen aus einem Forschungs- und Anwendungsprojekt

Verfasser: Johannes Schlesinger und Steffen Vogt, Florian Brodrecht, Dennis Sprute, Anette Eltner

Extreme Starkregenereignisse treten zunehmend häufiger auf. Große Niederschlagsmengen fallen innerhalb kurzer Zeit und können weder vollständig versickern noch über bestehende Infrastrukturen abgeführt werden. Die Folgen sind oberflächiger Abfluss, Überflutungen sowie Schäden an Gebäuden und Verkehrsanlagen. Für Kommunen ist es daher wichtig, potenziell gefährdete Bereiche frühzeitig zu erkennen und Vorsorgemaßnahmen gezielt zu planen.

Eine wesentliche Grundlage hierfür sind Starkregengefahrenkarten. Sie zeigen, wo Wasser bei Extremniederschlägen abfließt, sich sammelt oder staut. Die Qualität dieser Karten hängt maßgeblich von der Genauigkeit der zugrunde liegenden Geländedaten ab. Besonders kleinräumige Strukturen können den Abfluss beeinflussen und müssen daher möglichst realitätsnah erfasst und weiterverarbeitet werden.

Zielsetzung des Projekts UAV-SRGK

Im Forschungsprojekt UAV-SRGK wurde untersucht, wie sich hochauflösende Daten aus Drohnenbefliegungen mit bestehenden Airborne-Laserscanning-Daten kombinieren lassen. Ziel war es, Digitale Geländemodelle zu erzeugen, die sowohl flächendeckend als auch ausreichend detailliert sind, um sie für die Starkregenmodellierung nutzen zu können.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der möglichst automatisierten Verarbeitung der Daten und ihrer strukturierten Bereitstellung für die Weiterverwendung in GIS- und Modellierungsumgebungen.

Datenerfassung mit Drohnen

Für das Projekt wurden mehrere Untersuchungsgebiete in Bayern ausgewählt, die unterschiedliche topographische und siedlungsstrukturelle Rahmenbedingungen abbilden. Zum Einsatz kamen professionelle UAS-Systeme, mit denen sowohl senkrechte als auch schräge Luftbilder aufgenommen wurden.

Die Befliegungen lieferten:

- hochaufgelöste RGB-Orthophotos,
- dichte 3D-Punktwolken,
- sowie daraus abgeleitete Höheninformationen.
- Diese Datensätze bilden die Grundlage für die weitere Verarbeitung und Analyse und können direkt in GIS-Systemen visualisiert und geprüft werden.



Abbildung 2.3.3 - 1: Das aus der Drohnenbefliegung abgeleitete digitale Geländemodell enthält alle abflussrelevanten Details, wie beispielsweise Bordsteinkanten, Böschungen, Treppen.

Aufbereitung und Kombination der Daten

Die aus den UAS-Befliegungen gewonnenen Daten wurden mit vorhandenen ALS-Daten zusammengeführt. Dabei ergänzen sich beide Datentypen: ALS-Daten liefern eine flächendeckende Basis, während UAS-Daten die notwendige Detailtiefe bereitstellen.

Die Zusammenführung erfolgt in mehreren Schritten, bei denen die Datensätze aufeinander abgestimmt, Höhenunterschiede geprüft und ein einheitliches Digitales Geländemodell abgeleitet werden. GIS-Systeme dienen hierbei als Arbeitsumgebung zur Kontrolle, Korrektur und Dokumentation der Ergebnisse.



Abbildung 2.3.3 - 2: Die 3D-Punktwolke bildet eine der Datengrundlagen für die automatisierte Vektorisierung abflussrelevanter Objekte.

Ableitung abflussrelevanter Strukturen

Auf Basis der kombinierten Daten lassen sich abflussrelevante Strukturen identifizieren (Zamboni, 2024). Dazu zählen unter anderem Gebäude, Verkehrsflächen, Mauern, Bordsteine oder Böschungen. Ein Teil dieser Objekte wird automatisiert klassifiziert, ein anderer Teil kann bei Bedarf manuell überprüft oder ergänzt werden (Sprute, 2025).

Die Ergebnisse werden als thematische Datensätze gespeichert und stehen für weitere Analysen und Modellierungen zur Verfügung.

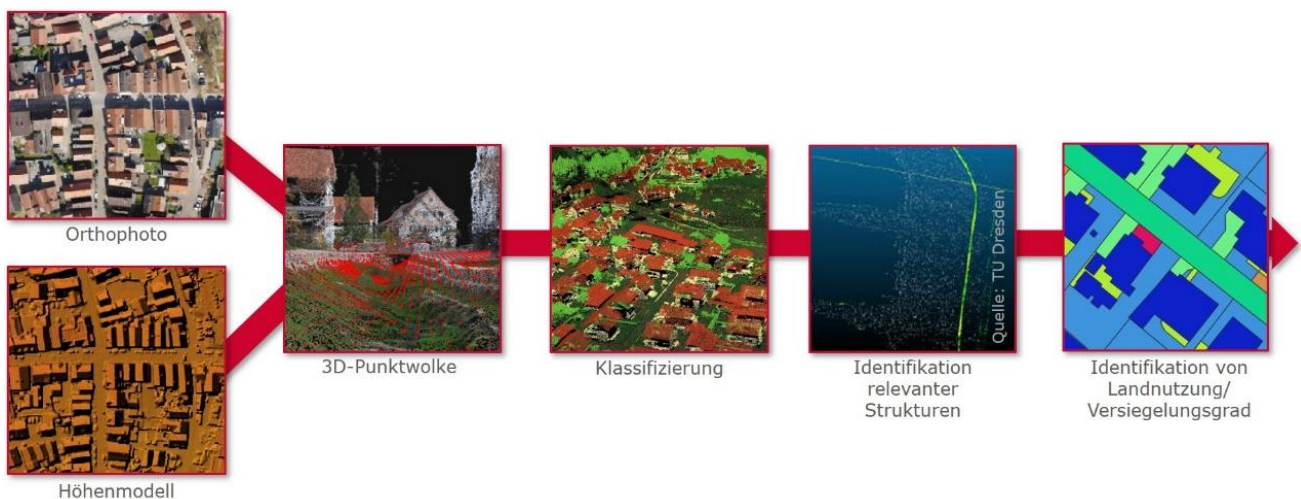


Abbildung 2.3.3 - 3: Workflow von der drohnengestützten Aufnahme der Rohdaten bis zur Ermittlung der Grundlagen für die Berechnung hochgenauer Starkregengefahrenkarten.

Nutzung der Daten für Starkregengefahrenkarten

Die hochaufgelösten Geländemodelle und Objektinformationen bilden die Grundlage für die hydraulische Modellierung von Starkregenereignissen. Die vorbereiteten Datensätze können in geeignete Simulationsmodelle überführt werden.

Die daraus abgeleiteten Starkregengefahrenkarten lassen sich wiederum in GIS-Systemen darstellen, auswerten und mit weiteren Geodaten kombinieren. So können beispielsweise gefährdete Bereiche identifiziert, Maßnahmen räumlich verortet und Szenarien miteinander verglichen werden.

Mehrwert für Planung und Praxis

Der Einsatz von UAS-Daten ermöglicht eine deutlich höhere räumliche Auflösung als klassische Datengrundlagen. Dadurch werden kleinräumige Strukturen sichtbar, die für den Wasserabfluss entscheidend sind. Gleichzeitig erlaubt die GIS-gestützte Verarbeitung eine nachvollziehbare und reproduzierbare Ableitung der Ergebnisse.

Für Kommunen und Fachbüros entsteht so eine belastbare Datengrundlage, die sowohl für die Starkregenvorsorge als auch für weiterführende Fragestellungen der Stadt- und Infrastrukturplanung genutzt werden kann.

Fazit

Die Kombination aus UAS-Befliegungen, bestehenden ALS-Daten und strukturierter Weiterverarbeitung stellt einen praktikablen Ansatz für die Erstellung von Starkregengefahrenkarten dar. GIS spielt dabei eine unterstützende Rolle bei der Datenaufbereitung, Analyse und Nutzung der Ergebnisse, ohne den Fokus von der eigentlichen Fragestellung zu lösen.

Die Erfahrungen aus dem Projekt zeigen, dass hochaufgelöste Drohnendaten insbesondere dann ihren Mehrwert entfalten, wenn sie gezielt in bestehende Planungs- und Auswertungsprozesse integriert werden.

Referenzen / Weiterführende Links

Sprute, D.; Hendrickx, H.; Zamboni, P.; Rushdi, M.; Brodrecht, F.; Eltner, A.; Flatt, H.: Land use and land cover classification on high-resolution UAV images for heavy rainfall hazard maps using deep neural networks. In Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2025, [10.1016/j.rsase.2025.101609](https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101609)

Zamboni, P.; Hendrickx, H.; Sprute, D.; Flatt, H.; Rushdi, M.; Brodrecht, F.; Eltner, A.: Synergetic image and point cloud processing to automatically extract curb in UAV data for flood modeling in urban centers. In: ISPRS Low-Cost 3D workshop, 2024, [10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W8-2024-483-2024](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W8-2024-483-2024)

Kontakt

Johannes Schlesinger | j.schlesinger@svgeosolutions.de

Steffen Vogt | s.vogt@svgeosolutions.de

svGeosolutions GmbH, Lise-Meitner-Str. 2, 79100 Freiburg

Florian Brodrecht | f.brodrecht@spekter.de

Spekter GmbH, Tölzer Straße 1, 82031 Grünwald

Dennis Sprute | dennis.sprute@iosb-ina.fraunhofer.de

Fraunhofer IOSB-INA, Campusallee 1, 32657 Lemgo

Anette Eltner | anette.eltner@tu-dresden.de

Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden

2.4 Katastrophenschutz und Umweltmonitoring

2.4.1 Neue Maßstäbe für die Überwachung kritischer Infrastrukturen: Drohneneinsätze zur Erstellung digitaler Zwillinge

Verfasser: Dr. Peter Saiger-Bonnas,

Kritische Infrastrukturen sind heute stärker gefährdet denn je. Netzbetreiber, Energieerzeuger, Wasserwerke, Bahn- und Industrieanlagen oder Verkehrsknotenpunkte tragen das Funktionieren moderner Gesellschaften. Gleichzeitig wachsen Bedrohungen durch Sabotage, Cyberattacken oder Naturereignisse. Sicherheit und Überwachung haben sich zu hochkomplexen Disziplinen entwickelt, die ohne moderne digitale Werkzeuge kaum mehr zu bewältigen sind. Eine Schlüsselrolle spielt dabei der digitale Zwilling, ein präzises dreidimensionales Abbild realer Anlagen, der Planungs-, Analyse- und Überwachungsprozesse grundlegend verändert.

Der Weg zu einem solchen digitalen Zwilling beginnt heute in vielen Fällen in der Luft - mit Drohnen, die das Gelände systematisch und hochauflösend erfassen. Während früher zeitintensive Bodenvermessungen notwendig waren, ermöglichen UAS eine schnelle, flexible und zugleich äußerst präzise Datenerhebung. Die Flugplanung folgt dabei klaren methodischen Vorgaben: Rasterflüge mit hoher Bildüberlappung und Oblique-Kameras gewährleisten, dass aus den Einzelbildern durch Photogrammetrie ein nahtloses 3D-Modell konstruiert werden kann.

Je nach Sicherheitsanforderung und Geländestruktur werden unterschiedliche Flughöhen gewählt, um sowohl großflächige Übersichtsaufnahmen als auch detailreiche Bilder kritischer Bereiche zu erzeugen. Hindernisse wie Strommasten- und Leitungen, Kräne, Tanks, Gebäude oder Vegetation erfordern intelligente Routenplanung, oft unterstützt durch softwarebasierte Kollisionsvermeidung und Oberflächenmodelle, welche die Sicherheit des Drohnenbetriebs erhöhen.



Abbildung 2.4.1 - 1: 3D Mesh einer Industrieanlage

Moderne Drohnen senken nicht nur die Kosten der Datenerhebung, sondern verbessern auch die Qualität. Sie erfassen Bildmaterial mit hoher Auflösung. Parallel dazu können LIDAR-Sensoren eingesetzt werden, um selbst dichte Vegetation zu durchdringen und präzise Punktwolken des Bodens und der darüberliegenden Strukturen zu gewinnen. Je nach Anforderung lässt sich das Sensorspektrum erweitern - etwa um multispektrale Kameras oder Thermalsensoren, die zusätzliche Informationen über Betriebssicherheit oder potenzielle Störstellen liefern.

Räumliche Präzision für intuitive Sicherheitsanalysen

Aus diesen vielfältigen Rohdaten lassen sich mit ArcGIS Reality Studio von Esri True-Ortho-Fotos realisieren, bei denen perspektivische Verzerrungen vollständig korrigiert sind. Darüber hinaus entstehen digitale Geländemodelle, welche die topographische Situation abbilden, sowie digitale Oberflächenmodelle, die bauliche Strukturen integrieren. Punktwolken und daraus abgeleitete Meshes verleihen dem digitalen Zwilling eine räumliche und geodätische Präzision, die weit über klassische 2D-Pläne hinausgeht.

Zunehmend ergänzt wird dies durch hochmoderne Verfahren wie *Gaussian Splatting*, das durch den Einsatz von Gauß-förmigen Volumenelementen eine fotorealistische Darstellung auch von kleinen und feinen Objekten wie Stromleitungen ermöglicht. Diese Methode erzeugt flüssige, detaillierte Modelle, in denen selbst kleinste architektonische oder bauliche Eigenschaften erkennbar bleiben, ohne die Rechenkapazitäten zu überlasten. Dadurch können Anlagen digital so realitätsnah erkundet werden, dass Sicherheitsanalysen intuitiver, schneller und umfassender möglich werden.



Abbildung 2.4.1 - 2: Hochdetaillierte Berechnung: *Gaussian Splatting* einer Industrieanlage

Digitale Zwillinge in der Sicherheitsplanung

Der wahre Mehrwert entsteht jedoch erst, wenn dieser digitale Zwilling in den Kontext der Sicherheitsplanung überführt wird. Mit seiner Hilfe lassen sich Sichtbarkeitsanalysen durchführen, die objektiv aufzeigen, welche Bereiche eines Geländes überwacht werden können und wo tote Winkel entstehen. Während solche Analysen früher oft auf Erfahrungswerten beruhten, ermöglichen die präzisen 3D-Daten heute eine vollautomatische Bewertung der Sichtlinien.

Kamerastandorte, Wachposten oder Sensoren lassen sich virtuell platzieren. Für jede Position wird berechnet, welche Flächen des Areals einsehbar sind. Sichtbare Zonen - die sogenannten „Green Spaces“ - werden identifiziert, ebenso wie „Red Spaces“, die sich durch Abschattungen oder ungünstige Geländeformen einer Überwachung entziehen.



Abbildung 2.4.1 - 3: Interaktive Berechnung von Red und Green Spaces bei einer Industrieanlage

Gerade im KRITIS-Bereich, wo Sicherheit und Betriebskontinuität von höchster Priorität sind, liefert diese Art der Analyse unverzichtbare Erkenntnisse. Betreiber können bereits in der Planungsphase beurteilen, ob zusätzliche Kameras notwendig sind, ob Patrouillenrouten angepasst werden müssen oder ob bauliche Ver-

änderungen indirekte Auswirkungen auf die Überwachung haben. Auch lassen sich Szenarien durchspielen, etwa jahreszeitliche Vegetationszunahmen, neue Gebäudeteile oder der Ausfall einzelner Systeme.

Ein gemeinsames digitales Lagebild

Durch die enge Verzahnung von digitalem Zwilling, analytischer Simulation und Echtzeitsystemen entsteht ein Werkzeug, das Risikoabschätzungen deutlich erleichtert und Entscheidungen datenbasiert unterstützt. Dies lässt sich mit ArcGIS Online oder ArcGIS Enterprise interaktiv, hochskalierbar und mit einem dedizierten Rollen- und Rechtekonzept online realisieren.

Darüber hinaus verbessert der digitale Zwilling die Kommunikation zwischen allen beteiligten Akteuren. Werksschutz, Betreiber, Behörden und externe Dienstleister arbeiten erstmals auf einer visuell eindeutigen Grundlage: einem gemeinsamen digitalen Lagebild. Schulungs- und Einsatzteams können das Gelände virtuell begehen, kritische Punkte studieren oder Bewegungsabläufe simulieren. Insbesondere bei großen oder sicherheitstechnisch sensiblen Anlagen ermöglicht dies eine detaillierte Vorbereitung, die früher nur eingeschränkt möglich war.

Digitale Zwillinge für resiliente Infrastrukturen

So zeigt sich, dass der digitale Zwilling längst mehr ist als ein technisches Hilfsmittel. Er bildet das Fundament einer modernen, vorausschauenden Sicherheitsarchitektur, die den komplexen Anforderungen kritischer Infrastrukturen gerecht wird. Neue Erfassungsmethoden aus der Drohnentechnologie, hochauflösende Geodaten, innovative Renderingverfahren wie Gaussian Splatting und automatisierte Sichtbarkeitsanalysen führen zu einem tiefen Verständnis der räumlichen Gegebenheiten - und damit zu einem deutlich höheren Sicherheitsniveau.

In Zeiten wachsender Bedrohungen ist dies ein entscheidender Fortschritt: Ein digitaler Zwilling schützt nicht nur Gebäude und Anlagen, sondern trägt zugleich zur Resilienz der gesamten Gesellschaft bei.

Referenzen / Weiterführende Links

ArcGIS Reality: <https://www.esri.com/de-de/arcgis/products/arcgis-reality/overview>

Bilddaten und Fernerkundung integriert in GIS: <https://www.esri.de/de-de/arcgis/produkte/bilddaten-und-fernerkundung/uebersicht>

E-Book „Das Potenzial von Bilddaten“: <https://www.esri.de/de-de/arcgis/produkte/bilddaten-und-fernerkundung/e-book-download>

Kontakt

Esri Deutschland GmbH, Ringstr. 7, 85402 Kranzberg
info@esri.de
 +49 (0)89 207 005 1200
www.esri.de

2.4.2 PyroScout - Waldbranderkennung mittels Drohne

Verfasser: Stefan Georgiev und Sebastian Greifeneder

Einleitung

Waldbrände sind in Österreich ein relevantes Präventions- und Sicherheitsrisiko. Die österreichische Waldbrand-Datenbasis weist für den Zeitraum 1993-2025 insgesamt 4.267 Waldbrände aus. Besonders auffällig sind Jahre mit hoher Ereigniszahl wie 2020 (234), 2022 (218) und 2025 (193). (BOKU Institut für Waldbau, 2026). Entscheidend für die Präventionsarbeit ist die Ursachenstruktur: 3.530 Ereignisse (≈83%) sind anthropogen verursacht. Waldbrandprävention ist damit in Österreich in hohem Ausmaß Verhaltens- und Kontextprävention.

Diese Einordnung wird durch die KfV-Dunkelfeldstudie zum Risikoverhalten im Wald gestützt: Brandgefährliches Verhalten ist verbreitet - 22% berichten brandrelevante Handlungen im Lebensverlauf, 5% in den letzten zwölf Monaten. Ein zentraler Risikotreiber ist Rauchen: 9% geben an, Zigarettenstummel oder Zündholz im Wald entsorgt zu haben; 12% rauchten trotz Verbots bei erhöhter Waldbrandgefahr im Wald (bei Raucher:innen 26%) (Georgiev, 2022). Damit wird sichtbar, dass riskante Handlungen häufig im Alltag entstehen und nicht ausschließlich über Ereignisstatistiken abgebildet werden.

Aus dieser Kombination - hoher anthropogener Anteil, verbreitetes Risikoverhalten und dynamische Rahmenbedingungen (z.B. Trockenphasen als Brandbeschleuniger) - entsteht die Notwendigkeit, klassische Prävention (Warnstufen, Beschilderung, Kontrollen, Kommunikation) um Ansätze zu ergänzen, die räumlich, situativ und frühzeitig unterstützen: Risikozonen identifizieren, Monitoring priorisieren und kritische Entwicklungen möglichst früh erkennen.

Motivation und Ziele

In einem Projekt hat das KfV gemeinsam mit Spatial Focus Aspekte der automatisierten Waldbranddetektion und der risikobasierten Bewertung analysiert und in einem Prototyp namens PyroScout umgesetzt. PyroScout folgt der Prämisse, dass Waldbrandprävention ihre Wirkung nur dann vollständig entfalten kann, wenn sie durch Instrumente ergänzt wird, die Risiken in der Fläche sichtbar, vergleichbar und priorisierbar machen.

PyroScout ist eine prototypische Anwendung, die Drohnen- und GIS-gestützte Informationen in einer integrierten Prozesskette zusammenführt. Im Fokus steht dabei die situative Perspektive der Früherkennung: Wärmebilddaten unterstützen die Erkennung und Verortung potenzieller Hitzequellen und liefern bei Bedarf ein belastbares Lagebild für Priorisierung und Ressourceneinsatz - insbesondere bei eingeschränkter Sicht oder zeitkritischen Entwicklungen.

Ein entscheidender Baustein ist die GIS-Anschlussfähigkeit. Der Nutzen entsteht nicht aus Einzelbildern, sondern aus der georeferenzierten Übersetzung in Produkte, die in der Praxis weiterverarbeitet und verstanden werden können - etwa Hotspots, Zeitvergleiche und nachvollziehbare Dokumentation. Gleichzeitig wurden Rahmenbedingungen realistisch mitgedacht: Die Wirksamkeit hängt von klaren Einsatzkonzepten, stabilen Datenwegen und einer sauberen organisatorischen Einbettung ab (Rollenverteilung, Bewertungskriterien, Zuständigkeiten).

Auf dieser Grundlage wurde PyroScout prototypisch so ausgelegt, dass ein praktischer Workflow entsteht - von der Datenerhebung über die Verarbeitung und Analyse bis zur Bereitstellung lagebildfähiger Ergebnisse. Im folgenden Abschnitt wird dargestellt, wie diese Prozesskette technisch umgesetzt wurde.

Drohnenplattform

Als Einstiegspunkt der Lösung wurde eine Website entworfen, welche als zentrales Benutzerinterface (Frontend) für die Überwachung, Verwaltung und Analyse der erfassten Drohrendaten dient. Sie ermöglicht es nicht nur dem Drohnenpiloten, sondern auch externen Personen, die Wärmebilder und Statusdaten der eingesetzten Drohne in Echtzeit anzusehen und potenzielle Brandherde schnell zu identifizieren. Um die Struktur und den Datenfluss innerhalb des Gesamtsystems zu veranschaulichen, zeigt Abbildung 2.4.2-1 den systematischen Aufbau. Dieser ist in drei Gruppen gegliedert: die Waldbrand-Mission, die PyroScout-Plattform und den Einsatz-Operator.

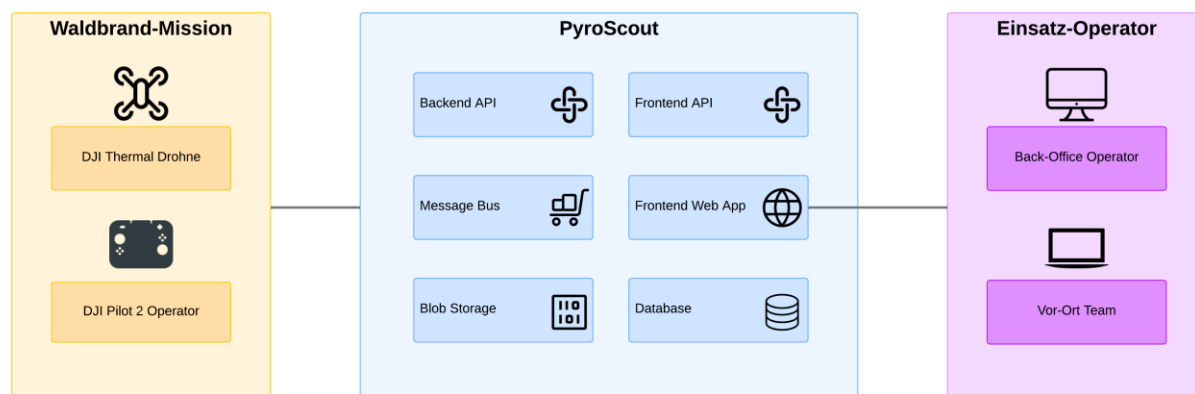


Abbildung 2.4.2 - 1: Plattform

Die Waldbrand-Mission umfasst die Drohne sowie den Piloten, der die Mission plant und die Datenübertragung an das System überwacht. Der Einsatz-Operator besteht aus einem Back-Office-Operator oder Vor-Ort-Team, die über das Frontend auf die ausgewerteten Daten zugreifen, Alarmmeldungen abrufen und auf neu erkannte Brandherde reagieren können. Die PyroScout-Plattform übernimmt mehrere zentrale Aufgaben:

- Sammeln und Verarbeiten von Daten, welche von der Drohne während der Flugmission erfasst werden
- Durchführung von automatischen Wärmebildanalysen und Ausgabe visueller Warnhinweise, wenn Brandherde erkannt werden
- Weiter ermöglicht das Frontend die Nachverfolgung der Mission in Echtzeit, sowie die Anzeige von drohnenspezifischen Daten

Technisches Konzept und Systemarchitektur

Für die Datenerfassung kommen handelsübliche Drohnen der DJI-Enterprise-Serie zum Einsatz. In diesem Projekt wurde das Modell DJI Mavic 3T Enterprise verwendet. Diese Drohne stellt eine moderne, kompakte und zugleich leistungsstarke Plattform dar, die speziell für industrielle und sicherheitsrelevante Anwendung entwickelt wurde. Sie vereint hohe Flugstabilität, gute Sensorik und eine präzise Wärmebildkamera, wodurch sie ideal für die Waldbrandfrüherkennung geeignet ist. Die DJI Mavic 3T Enterprise ist mit einer ungekühlten Vox-Wärmebildkamera ausgestattet, die eine Auflösung von 640x512 Pixel bietet und Temperaturbereiche von -20°C bis 500°C mit einer Messgenauigkeit von $\pm 2^{\circ}\text{C}$ abdeckt. Mit einer maximalen Flugzeit von 45 Minuten und einer Windwiderstandsfähigkeit von 12m/s ist die Drohne auch für längere Einsätze bei schwieriger Witterung geeignet. Die Drohne kann über das DJI Cloud SDK direkt mit der PyroScout Cloud API verbunden werden, wodurch die aufgenommenen Daten automatisch und nahezu in Echtzeit im Frontend angezeigt werden. Die Drohne lässt sich über Waypoint-Missionen programmieren, wodurch sie automatisiert eine Flugroute abfliegt und kontinuierlich thermale und visuelle Bilddaten liefert.

Das **Frontend** (Abbildung 2.4.2-2) der PyroScout-Plattform bildet die Schnittstelle zwischen den erfassten Drohrendaten und dem Endnutzer. Dieses wurde so entworfen, dass komplexe technische Daten intuitiv und übersichtlich für die Nutzer dargestellt werden. Es steht die schnelle Erkennung potenzieller Gefahren sowie die leichte Bedienbarkeit im Vordergrund. Auf der Startseite kann aus verschiedenen bereits erfolgten Flügen gewählt werden, um diese genauer zu untersuchen. In der Gefahren-tabelle werden alle erkannten Hitzequellen gelistet und die maximale erkannte Temperatur sowie deren Koordinaten angezeigt. In der Karte am Dashboard kann die Flugroute mittels Slider nachverfolgt bzw. mittels Play-Button automatisch abgespielt werden. Zudem werden in der Karte erkannte Hitzequellen, Homepoint und relevante Geländedaten visualisiert.

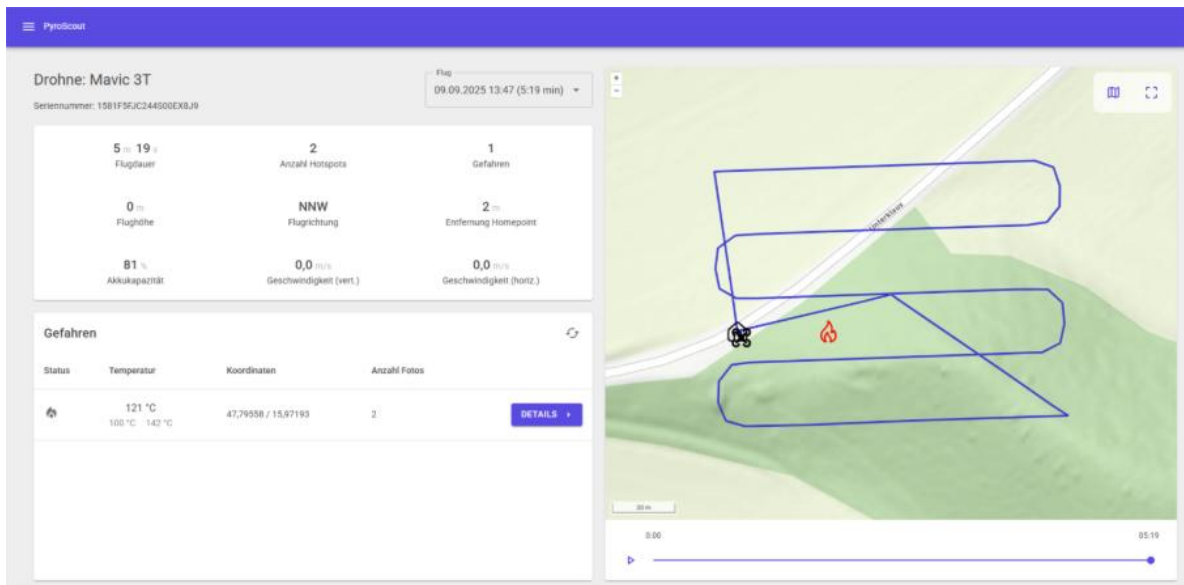


Abbildung 2.4.2 - 2: Dashboard PyroScout

In der Detailsicht (Abbildung 2.4.2 - 3) können Flüge mit erkannten Gefahren genauer untersucht werden. Diese Ansicht zeigt die aufgenommenen Wärmebilder mit zusätzlichen Analyseinformationen. Es werden Temperaturmaxima, Durchschnittswerte und erkannte Cluster mit deren Koordinaten angezeigt. Darüber hinaus kann die erkannte Gefahr in der Detailsicht gemeldet werden, wodurch die Alarmierungskette in Gang gesetzt wird. Diese Meldungsfunktion wird im aktuellen Projekt nur prototypisch dargestellt.

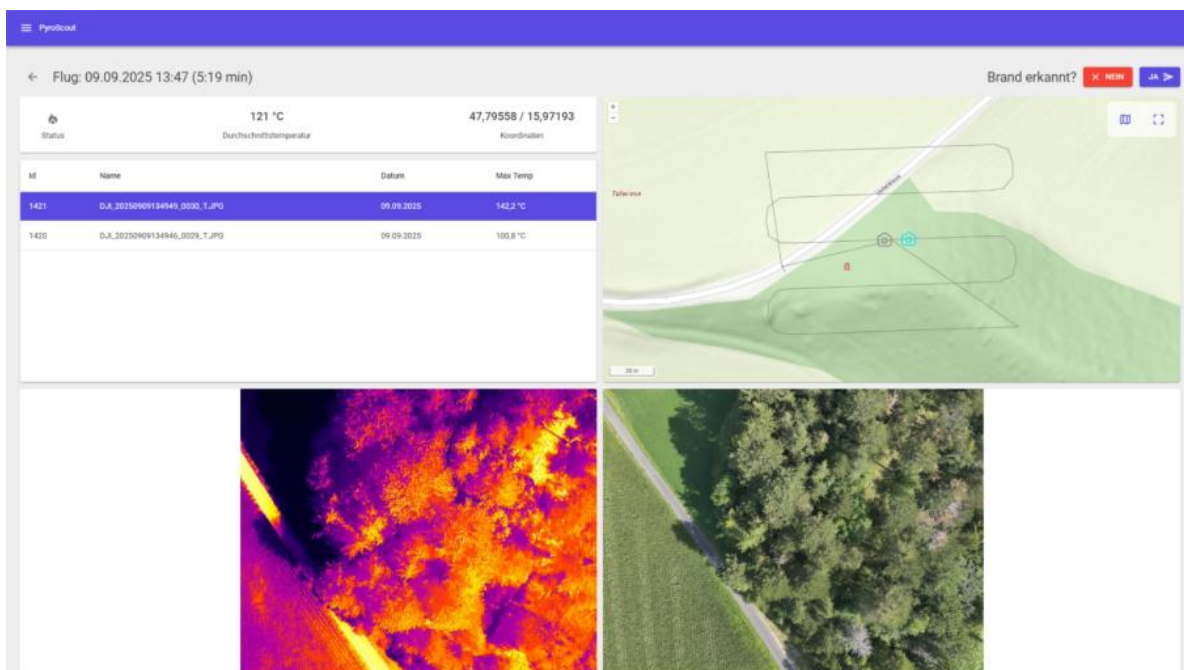


Abbildung 2.4.2 - 3: Detailsicht

Das Backend der PyroScout-Plattform verarbeitet die eingehenden Daten. Die Drohne, welche die Daten an die Plattform via Fernbedienung und mobilem Internethotspot übermittelt, kommuniziert per Message Bus (EMQX) mit dem DJI Cloud SDK Backend. Von dort gelangen die Metadaten der Flüge ins PyroScout-Backend. Die Aufnahmen werden via Cloud SDK Backend direkt in der Datenbank (MySQL) gespeichert, vom PyroScout Worker abgegriffen und nachfolgend analysiert. Die eigentlichen Fotos, bestehend aus RGB- und Wärmebildern, werden in einem S3-kompatiblen Blob-Store (Minio) gespeichert. Im Hintergrund läuft ein Service, welches die Daten auswertet, Hitzequellen identifiziert, Koordinaten der Hotspots berechnet und Cluster zur vereinfachten Darstellung bildet. Bei der Auswertung der Daten werden alle aufgenommenen Bilder auf Wärmequellen untersucht. Dabei kann im Frontend ein Schwellwert definiert werden, ab welcher Temperatur eine Gefahr angezeigt werden soll.

Das Thermalfoto wird in weiterer Folge in 8x8 Pixel große Zellen zerlegt und jede Zelle, in der die Höchsttemperatur den Schwellwert überschreitet, wird geflagged. Benachbarte Zellen werden zu Clustern zusammengefasst. Es kann somit pro Foto mehrere Hitzecluster geben, die im Frontend visualisiert werden. Die Georeferenzierung basiert dabei auf der GPS-Position der Drohne zum Aufnahmezeitpunkt, der Flughöhe, der Ausrichtung des Gimbals und der Sensorgeometrie (wie z.B. Sensorhöhe und -breite, Objektiv-Brennweite). Ein Geländemodell, das die Georeferenzierung weiter verbessern würde, wird momentan nicht verwendet. Die erzielte Genauigkeit (ohne D-GPS Modul und ohne Geländemodell) lag in praktischen Tests im hügeligen Gebiet konstant unter 5 Meter Abweichung, was für den Prototyp und wahrscheinlich selbst für den praktischen Einsatz als ausreichend erachtet wird.

Tests und Ergebnisse

Die Leistungsfähigkeit des Systems wurde durch praktische Tests zur Wärmebilderfassung unter realen Bedingungen überprüft. Ziel dieser Tests war es, eine geeignete Flughöhe zu bestimmen, mit der kleine lokale Wärmequellen zuverlässig detektiert werden können, ohne dabei die mögliche Flächenabdeckung unnötig zu reduzieren. Die Versuche wurden zwischen März und September 2025 in einem kleinen Waldgebiet durchgeführt, um unterschiedliche Vegetations- und Belaubungszustände zu berücksichtigen. Jahreszeitliche Veränderungen, insbesondere variierende Blattdichten, hatten im gewählten Testgebiet keinen erkennbaren Einfluss auf die Detektionsleistung. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass in dichter bewaldeten Gebieten Sichtbehinderungen auftreten können, die die Erkennung kleiner oder verdeckter Wärmequellen erschweren.

Als simulierte Brandquelle wurde ein elektrischer Heizstrahler eingesetzt, der eine punktuelle Wärmeentwicklung erzeugte. Die Flüge erfolgten in unterschiedlichen Höhen und Flugprofilen, während die Temperatur der Wärmequelle parallel dokumentiert wurde, um Abweichungen zwischen Referenzwerten und Drohendaten zu erfassen.

Die Auswertung zeigte, dass bei einer Flughöhe von etwa 80 Metern die beste Erkennungsqualität erreicht wurde. In dieser Höhe konnte der Heizstrahler eindeutig als Hotspot identifiziert werden, während gleichzeitig eine ausreichend große Fläche abgedeckt wurde. Bei geringeren Flughöhen verbesserte sich die Temporauflösung nur geringfügig, während die Flächenabdeckung deutlich abnahm und längere Flugzeiten erforderlich gewesen wären.

Zusätzlich ergaben die Tests, dass eine senkrechte Kameraposition (-90°) die zuverlässigsten Ergebnisse lieferte. Schrägaufnahmen führten aufgrund von Reflexionen und Abschattungen zu Messabweichungen. Die senkrechte Bildaufnahme erwies sich außerdem als vorteilhaft für eine präzise Georeferenzierung.

Weiterführende Links

PyroScout Demo Video: <https://youtu.be/biwtuDRpiTM>

Website: <https://www.pyroscout.com>

Literatur

BOKU Institut für Waldbau. (Januar 2026). Waldbrand-Datenbank Österreich. (U. f. (BOKU), Herausgeber) Abgerufen am 28. Januar 2026 von <https://fire.boku.ac.at/firedb/de/>

Georgiev, S. (2022). Waldbrand - Dunkelfeldstudie über Gefahren und Ursachen in Österreich. Eigentumschutz. Wien: KfV (Kuratorium für Verkehrssicherheit). Abgerufen am 28. 01 2026 von https://www.kfv.at/wp-content/uploads/2022/08/ENDBERICHT_Waldbrand.pdf

Kontakt

MA Stefan Georgiev

Kuratorium für Verkehrssicherheit

Forschungsbereich Eigentumschutz, Schleiergasse 18, 1100 Wien, Österreich

+43 5 77077 0

www.kfv.at

Spatial Focus GmbH, Absberggasse 27/7/3, 1100 Wien, Österreich

M.Sc. Sebastian Greifeneder

www.spatial-focus.net

2.4.3 Effizientes Monitoring alpinen Naturgefahren mit Photogrammetrie

Verfasser: Felix Piringer

Einleitung

Intensive Bautätigkeit, der rasche Gletscherrückgang sowie schwindender Permafrost erhöhen das Risiko durch alpine Naturgefahren, insbesondere geologische Massenverschiebungen wie Felsstürze oder Murgänge. Betroffen ist nebst Wohngebieten auch die stetig wachsende Infrastruktur der Verkehrswege, Energieproduktion und Bergsportgebiete.

Trotz technischer Limitationen (insb. bei Schlechtwetter und dichter Vegetation) hat sich die drohnen-gestützte Photogrammetrie nicht nur als komplementäre, sondern auch als primäre Methode für die Überwachung unterschiedlicher Naturgefahren im alpinen Raum bewährt. Am Beispiel des Brienzer Rutschs in Graubünden wird in diesem Beitrag aufgezeigt, welche photogrammetrischen Produkte, Analysemethoden und Visualisierungen einen wichtigen Beitrag zur laufenden Überwachung und Beurteilung der Gefahrensituation beigetragen haben. Zudem wird gezeigt, wie die Kombination aus hochwertiger Hardware, praxistauglichen Flugbewilligungen und Datenerfassungsprozesse sowie einem webbasierten Datenviewer mit Photogrammetrie- und GIS-Features eine grosse Effizienz- und Qualitätssteigerung gegenüber herkömmlichen Methoden ermöglicht.



Abbildung 2.4.3 - 1: WingtraOne GEN II der Grünenfelder und Partner AG im Einsatz in Brienzer GR

Messkonzept Brienzer Rutsch

Die Grünenfelder und Partner AG hat im Jahr 2025 11 photogrammetrische Aufnahmen des Brienzer Rutschs im Auftrag der Gemeinde Albula/Alvra prozessiert. Nebst eigenen Aufnahmen wurden Daten der Firma Sixense Helimap SA sowie des WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF verarbeitet. Die Genauigkeitsanforderungen im Vergleich zu anderen Monitoring-Projekten waren sehr moderat, da die Bewegungen schnell sind und der Hang mit zahlreichen Sensoren überwacht wird. Unter anderem sind automatische GNSS-Sensoren, Totalstationen, Radar-Interferometrie und ein Steinschlagradar im Einsatz. Die Aufnahmen mit einer Auflösung von 4 cm werden im Normalfall mittels CORS-Daten (Continuously Operating Reference Station) des Korrekturdienstes Refnet sowie mehreren Passpunkten georeferenziert. Zusätzlich wurde der Einsatz einer lokalen Referenzstation mit einem genau bestimmten Festpunkt ausserhalb des Rutschgebiets vorbereitet und getestet. Die Passpunkte befinden sich im Bereich der Straßen westlich und östlich ausserhalb des Rutschgebiets und werden periodisch kontrolliert. Im höher gelegenen Bereich des Gebiets können keine Passpunkte installiert oder temporär signalisiert werden. Die Datenerfassung erfolgte mit einer Flächendrohne vom Typ WingtraOne GEN II (Abb. 2.4.3 - 1), ausgestattet mit Vollformatkamera. Das Messintervall ist für dieses Projekt nicht fix definiert, sondern wird durch den Frühwarndienst der Gemeinde Albula

laufend an die aktuellen Entwicklungen angepasst. Eine mögliche dauerhafte Installation einer autonomen Drohnenlösung wurde diskutiert, aber im Gesamtbild als nicht lohnend betrachtet.

Kosten

Die Wahl des Messkonzepts inkl. Preisgestaltung hat sich für das Jahr 2025 als sinnvoll erwiesen. Trotz einer Zuspitzung der Ereignisse Ende November konnte eine ausreichende Anzahl Drohnenflüge durchgeführt und jeweils automatisiert über Nacht prozessiert werden. Da die Beschleunigung des Hangs im Bereich «Plateau Ost» nur über wenige Tage anhielt (Abb. 2.4.3 - 2) und sich von einem anbahnenden Felssturz in einen langsamen Schuttstrom umwandelte, bestätigte sich die gezielte Auslösung manueller Drohnenaufnahmen mit Abstand als kostengünstigste Variante. Gegenüber einer Variante mit autonomer Drohne (z.B. DJI Dock) konnten gemäß internen Schätzungen ca. 60 % an Kosten eingespart werden. Gegenüber Helikopter-Aufnahmen zu denselben Zeitpunkten konnten basierend auf groben Richtpreisen verschiedener Schweizer Anbieter über 80 % an Kosten gespart werden.

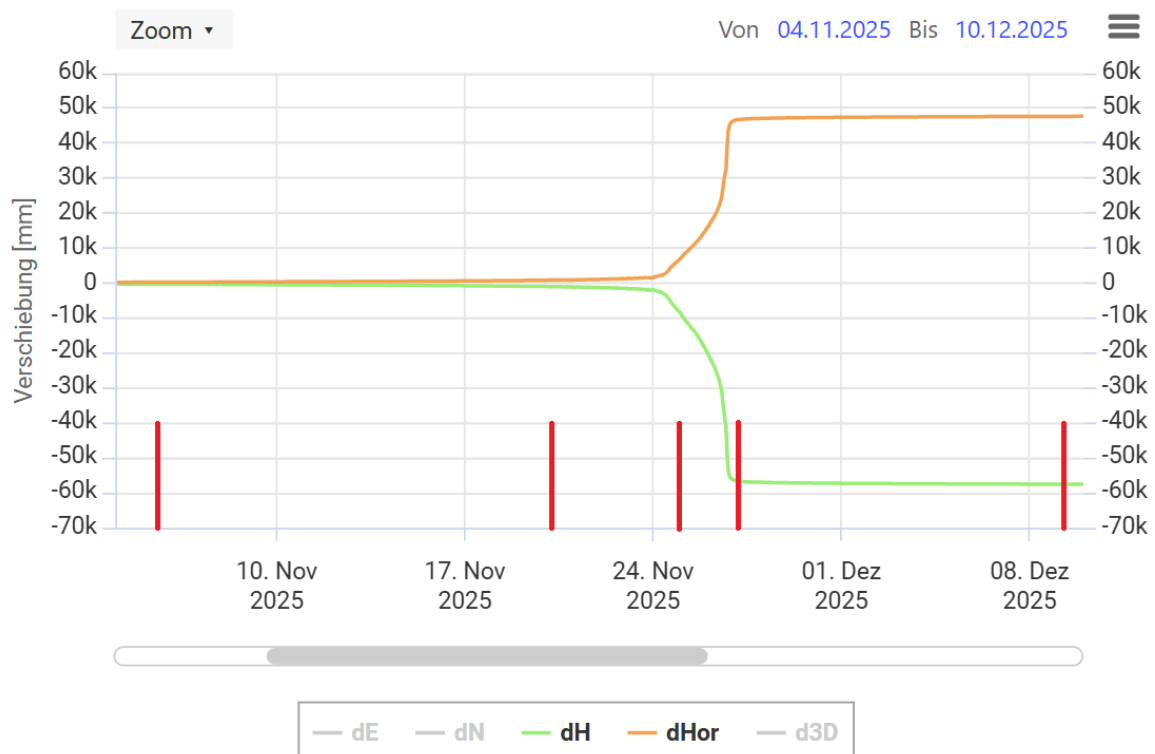


Abbildung 2.4.3 - 2: Weg-Zeit-Diagramm des permanenten GNSS-Sensors im Bereich „Plateau Ost“ im Zeitraum 04.11.2025 bis 10.12.2025. Durchgeführte Drohnenflüge sind auf der Zeitachse rot markiert.

Wahl der Drohne

Da die Durchführung von BVLOS-Einsätzen (Beyond Visual Line of Sight) erhebliche administrative und sicherheitstechnische Hürden mit sich bringt, ist der Einsatz einer Flächendrohne für diese Größe von Fluggebiet optimal. Trotz beschränkter Startmöglichkeiten am Rande der Sperrzone konnten die Flüge dank der großen und gut sichtbaren Drohne in VLOS (Visual Line of Sight) durchgeführt werden. Zudem konnten die Aufnahmen auch bei marginalen Wetterbedingungen in sehr kurzen Wetterfenstern erfolgen, was mit einer langsameren Multirotor-Drohne noch schwieriger gewesen wäre.

Aufgrund der Geländeform ist mit einer Flächendrohne eine Flughöhe deutlich höher als die nach EASA-Vorschriften üblichen 120 m über Grund erforderlich. Der sichere und legale Betrieb unter diesen Umständen ist mit der SORA-Bewilligung (Specific Operations Risk Assessment) und darauf abgestimmten Verfahren der Grünenfelder und Partner AG sichergestellt.

Photogrammetrische Resultate

Die photogrammetrischen Produkte erfüllen beim Brienzer Rutsch primär folgende Funktionen:

- Überwachung der Teilgebiete, welche von anderen Sensoren schlecht abgedeckt sind (insb. die höher sowie flach liegenden Zonen, welche vom terrestrischen Radar nur schleifend erfasst werden).
- Schnelle und zuverlässige geometrische Messungen und Berechnungen wie beispielsweise Abbruchvolumen und Höhenunterschiede zur Validierung geologischer Modelle und Prognosen

- Visueller Gesamtüberblick über die Entwicklungen am Rutschhang (gezeigt am Beispiel «Plateau Ost» in Abb. 2.4.3 - 3 sowie im flächendeckenden Höhenvergleich der Rastermodelle Abb. 2.4.3 - 4)

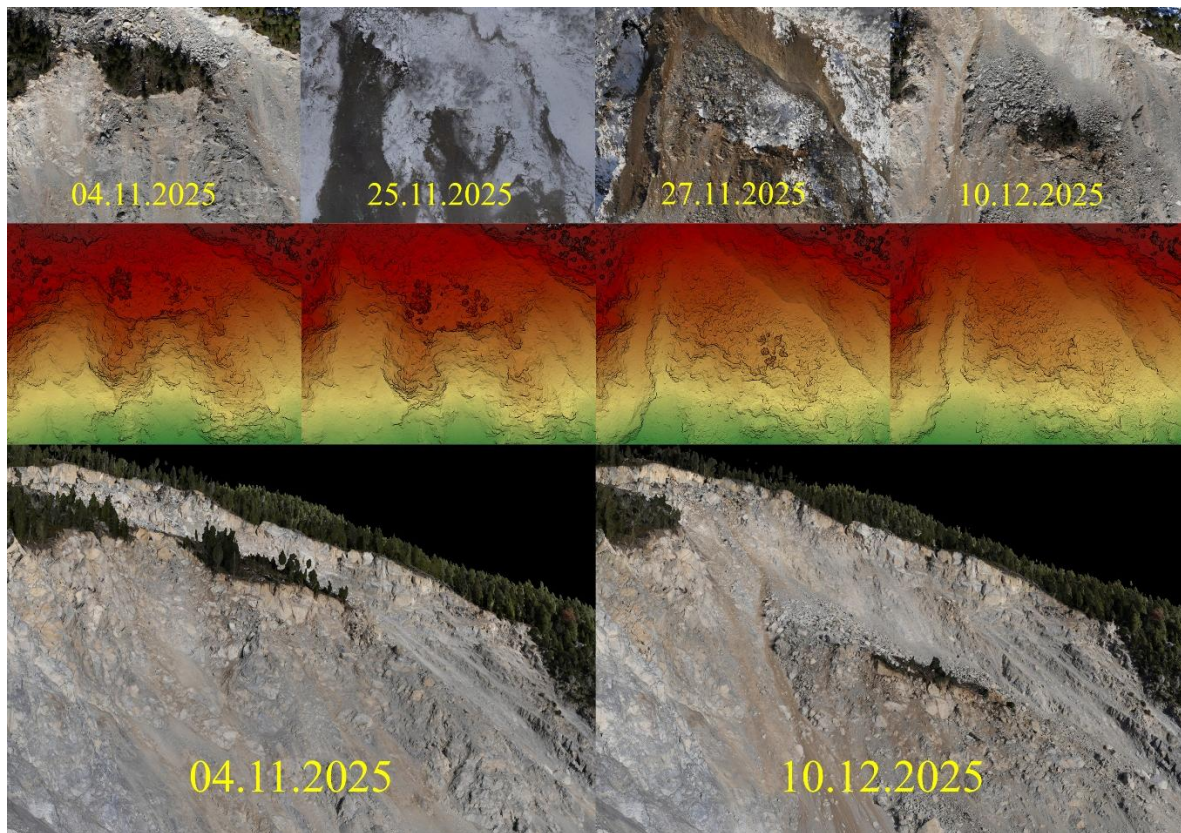


Abb. 2.4.3 - 3: Orthofoto (oben), Raster DSM (Mitte), und texturiertes Mesh (unten) des Plateau Ost im Zeitraum November bis Dezember 2025. Die horizontale und vertikale Verschiebung der Überreste des Plateaus beträgt jeweils ca. 50 m.

Diese Anforderungen werden über die Basisfunktionen des Datenviewers TEDAMOS mittels Orthofotos und Raster-Höhenmodellen inkl. Messwerkzeugen schnell und benutzerfreundlich abgedeckt. Die Überwachung der Rutschgeschwindigkeit erfolgt in diesem Projekt hauptsächlich über andere Systeme, welche kontinuierlich Daten liefern. Die photogrammetrischen Daten können aber zur unabhängigen Validierung oder Vervollständigung der Beurteilung beigezogen werden.

Fazit

Mit der Überwachung des Brienzer Rutschs konnten vorgestellten Methoden der Datenerfassung und -prozessierung mehrfach auf Zuverlässigkeit und Kosteneffizienz geprüft werden. Die bisherigen Ergebnisse entsprachen den Erwartungen und ermöglichten den Endkunden eine termingerechte und benutzerfreundliche Lösung der Aufgabenstellung. Die Methode hat sich in den Jahren 2024 und 2025 auch in diversen anderen Projekten mit höheren Genauigkeitsanforderungen bewährt. Weiterentwicklungspotenzial besteht vor allem im Bereich Datenvisualisierung für Prozesse, die weniger offensichtlich oder langsamer als der Brienzer Rutsch stattfinden.

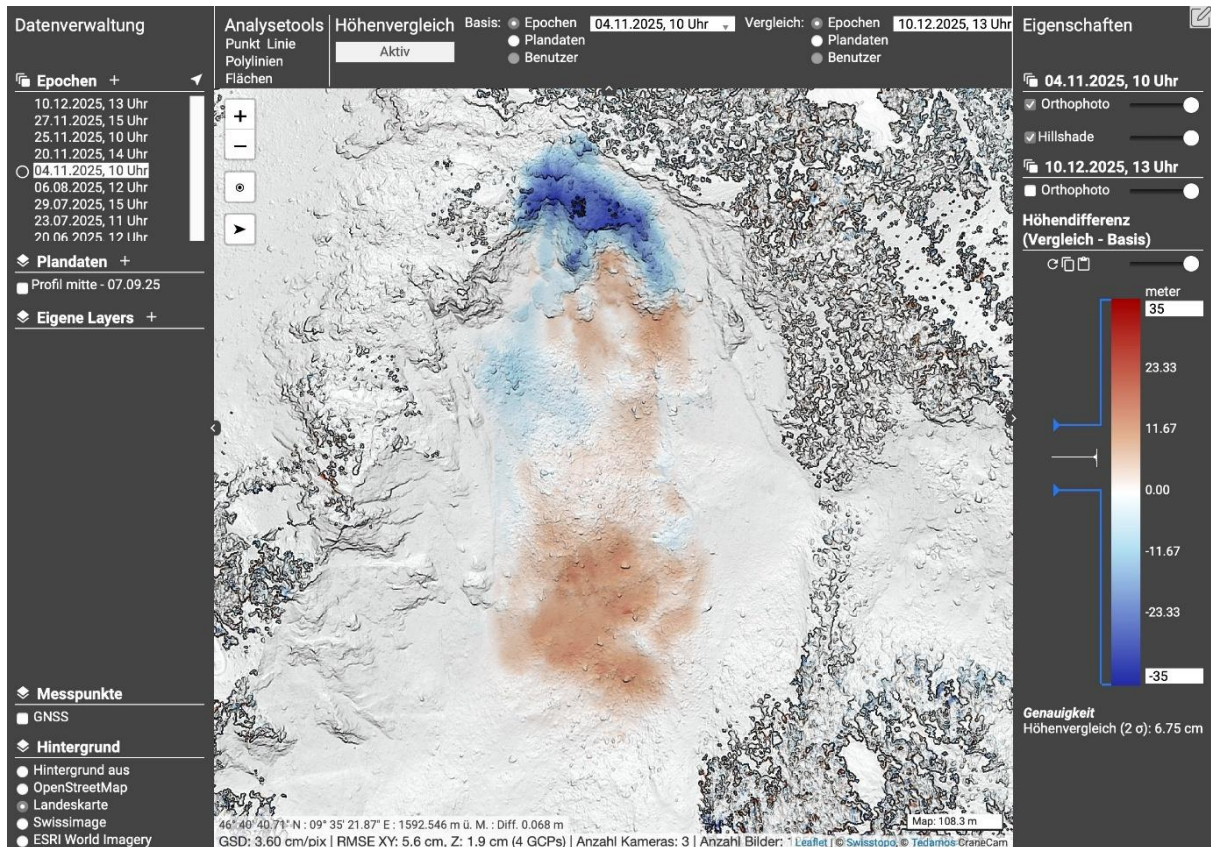


Abb. 2.4.3 - 4: Direkter Höhenvergleich der Epochen vom 04.11. und 10.12.2025 mit TEDAMOS.

Referenzen / Weiterführende Links

<https://www.gruenenfelder.ch>

<https://tedamos.ch>

<https://www.srf.ch/play/tv/schweiz-aktuell/video/schweiz-aktuell-vom-27-11-2025?urn=urn:srf:video:c3c19994-1a01-45e0-a417-1ff779b8a4a5>

Kontakt

Felix Piringer | felix.piringer@gruenenfelder.ch

Grünenfelder und Partner AG, Hofstättle 2, 7013 Domat/Ems, Schweiz

Originalbeitrag in voller Länge: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* (Peer Review im Gange)

2.5 Anwendungen in Kommunen und Städten

2.5.1 Eine 3D-Karte des Oktoberfests - Wie Drohnenmapping die Sicherheit auf der Wiesen unterstützen kann

Verfasser: Stadt München & GEOSYSTEMS GmbH & Geoplex GIS GmbH & DAT/EM

Jedes Jahr im Herbst verwandelt sich die Stadt München für gut zwei Wochen in ein riesiges Festival rund um das Oktoberfest. Weltweit bekannt als „die Wiesen“ zieht sie Millionen Besucherinnen und Besucher aus aller Welt an. Wo sonst mitten in München eine große Freifläche liegt, entsteht in kurzer Zeit eine eigene kleine Festivalstadt. Große Bierzelte, Fahrgeschäfte und Verkaufsstände füllen ein Gelände von rund 50 Hektar.

Diese besondere Situation bringt nicht nur ausgelassene Stimmung und Tradition mit sich, sondern auch große organisatorische und sicherheitsrelevante Herausforderungen. Genau hier setzt ein modernes digitales Werkzeug an: eine hochaufgelöste 2D- und 3D-Karte des gesamten Oktoberfestgeländes, erstellt mithilfe von UAS.

Ein neues digitales Sicherheitswerkzeug

Die dafür notwendigen Luftbilder wurden von der Firma DAT/EM Systems Europe mit einer Wingtra GenII erfasst und von der Zentralen Luftbildstelle des GeodatenService München mittels Skyline PhotoMesh von GEOSYSTEMS zu digitalen Karten verrechnet.

Das Besondere daran ist nicht nur die hohe Detailgenauigkeit, sondern auch die Aktualität der Daten. Die Karte zeigt das Festgelände so, wie es tatsächlich final aufgebaut ist - nicht theoretisch, sondern real.

Für die finale Visualisierung dieser massiven Datenmengen wird die Software PlexMap 3D von Geoplex eingesetzt. PlexMap dient als crossmediale Plattform für die Darstellung und Analyse der erfassten Geodaten in einer 3D-Webkarte.

Ein entscheidender technischer Vorteil von PlexMap liegt in der hoch performanten Weboptimierung. Da die durch Drohnenmapping erzeugten Datensätze extrem umfangreich sind, sorgt die Technologie von Geoplex dafür, dass diese Daten so aufbereitet werden, dass sie browserbasiert und ohne Zeitverzögerung gestreamt werden können.

Warum eine 3D-Karte des Oktoberfestes notwendig ist?

Die Bedeutung einer solchen Karte ist immens. Das Oktoberfest ist kein dauerhaftes Stadtviertel mit festen Straßen und Gebäuden. Es ist ein komplexes, dicht bestelltes Gelände, das in dieser Form nur wenige Tage existiert.

In einem Notfall - zum Beispiel bei einem Brand, einem medizinischen Großeinsatz oder einer Evakuierung - ist es entscheidend zu wissen:

- Wo genau befinden sich Ein- und Ausgänge?
- Welche Fluchtwege sind vorhanden?
- Wie groß sind Abstände zwischen Zelten oder Fahrgeschäften?
- Welche Wege sind für Einsatzkräfte und -fahrzeuge geeignet?

Früher basierten solche Informationen oft auf 2D-Plänen, Erfahrungen und mündlicher Weitergabe. Heute liefert die digitale 3D-Karte eine verlässliche Grundlage für schnelle und fundierte Entscheidungen.

Digitale Unterstützung für die Branddirektion München

Jedes Einsatzfahrzeug der Münchner Branddirektion ist während des Oktoberfests mit einem Tablet ausgestattet. Im Ernstfall können die Einsatzkräfte darauf und in der Einsatzzentrale sofort die detaillierte 3D-Karte des Festgeländes abrufen.

Sie ist also kein reines Planungswerkzeug, sondern ein echtes Hilfsmittel für den Alltag der Einsatzkräfte auf dem Oktoberfest.

Diese digitale Karte bietet viele Vorteile:

- Bessere Orientierung: Einsatzkräfte sehen sofort, wo sie sich befinden und wie das Umfeld aufgebaut ist
- Schnelle Entscheidungen: Entfernungen, Zugangswege und Alternativrouten lassen sich direkt einschätzen

- Mehr Sicherheit: Gefahrenstellen, sensible Bereiche oder gesperrte Zonen können eingeblendet werden
- Kombination mit weiteren Daten: Die Karte kann mit internen Informationen, Einsatzdaten oder Lagebildern angereichert werden

So entsteht ein digitales Lagebild, das die Einsatzkräfte aktiv bei ihrer Arbeit unterstützt, wertvolle Zeit spart - und im Ernstfall Leben rettet.

Warum ein UAS für die Vermessung eingesetzt wird?

Die Erstellung einer so aktuellen und präzisen Karte ist mit klassischen Vermessungsmethoden kaum möglich. Hier kommt DAT/EM Systems Europe mit ihrer Vermessungsdrohne Wingtra GenII zum Einsatz. Als senkrecht startende Festflügel-UAS ist sie besonders gut für diese Art von Auftrag geeignet.

Die Befliegung des Oktoberfestgeländes findet innerhalb der Festwochen statt - in einem sehr engen Zeitfenster. Geflogen wird nach Sonnenaufgang, aber bevor die ersten Besucherinnen und Besucher das Gelände betreten.

In maximal 45 Minuten Flugzeit wird das komplette Gelände von etwa 50 Hektar mit der Wingtra abgeflogen. Dabei erfasst die Drohne tausende hochaufgelöste Bilder aus der Luft und so nahezu jeden Winkel auf dem Gelände.

Diese Methode hat mehrere Vorteile:

- Das gesamte Gelände kann in kurzer Zeit erfasst werden
- Die Aufnahmen sind sehr detailliert und aktuell
- Es entstehen keine Störungen z.B. für den Lieferverkehr



Abbildung 2.5.1 - 1: Drohnenaufstieg am Oktoberfest

Von Luftbildern zur einsatzfähigen 3D-Karte

Nach dem Flug beginnt sofort die Datenverarbeitung. Hierbei werden die Drohnendaten zu akkuraten Orthophotos und einem 3D-Modell verrechnet. Zum Einsatz kommt die Software Skyline PhotoMesh von GEOSYSTEMS. GEOSYSTEMS ist Partner von Skyline in Deutschland und unterstützt Anwender bei der UAS-Photogrammetrie. PhotoMesh wandelt Drohnendaten über einen hochautomatisierten Prozess in digitale Karten um. Die Software lässt sich über eine intuitive Benutzeroberfläche einfach bedienen und liefert hochgenaue Ausgabe-Produkte, die die Anforderungen der Einsatzkräfte erfüllen. Die Orthophotos und das 3D-Modell sind dank der schnellen Prozessierung in kurzer Zeit verfügbar und zeigen einen beeindruckenden Detailreichtum. Viele Einzelheiten der Fahrgeschäfte, Festzelte und Wegstrukturen sind deutlich erkennbar. In der aktuellen Version von PhotoMesh wird die Qualität der 3D-Darstellung mittels Gaussian Splatting weiter erhöht; es entsteht ein nahezu artefakt-freies 3D-Modell.



Abbildung 2.5.1 - 2: Projektdarstellung in Skyline Photomesh von GEOSYSTEMS

Die durch PhotoMesh erzeugten Orthophotos für eine genaue lotrechte Draufsicht und das 3D-Modell des Veranstaltungsgeländes werden anschließend direkt an die Systeme der Feuerwehr und auf die Tablets in den Einsatzfahrzeugen übertragen. Die Einsatzkräfte arbeiten somit mit aktuellen und realitätsnahen Informationen, die speziell für den operativen Einsatz aufbereitet sind.

Drohnen als fester Bestandteil moderner Sicherheitskonzepte

Das Projekt zeigt eindrucksvoll, wie Drohnen-Dienstleistungen heute weit über klassische Luftaufnahmen hinausgehen. Sie sind ein fester Bestandteil moderner Planung-, Sicherheits- und Einsatzkonzepte geworden.

Die Kombination aus Drohnentechnologie, schneller Datenverarbeitung und direkter Bereitstellung für Einsatzkräfte schafft einen echten Mehrwert. Besonders bei großen, temporären Veranstaltungen wie dem Oktoberfest ist dieser Ansatz ideal geeignet.

Dieses Projekt zeigt, wie Digitalisierung und Drohnen-Dienstleistungen einen wichtigen Beitrag zur öffentlichen Sicherheit leisten können - effizient, präzise und praxisnah.

Kontakt

Florian Bernhard

Landeshauptstadt München, Zentrale Luftbildstelle, Denisstr. 2, 80335 München

Heike Weigand

GEOSYSTEMS GmbH, Friedrichshafener Str. 1, 82205 Gilching

<https://www.geosystems.de/pm-drone>

Volker Zirn

DAT/EM, Immenhäuser Straße 8, 72810 Gomaringen

Frederik Hilling

Geoplex GIS GmbH, Bohmter Straße 12, 49074 Osnabrück

2.5.2 Aktuelle Orthofotos trotz stark frequentiertem Luftraum

Verfasser: Christian Peterlein

Problemstellung

Die Stadt Zürich befindet sich teilweise in nächster Nähe zum internationalen Flughafen Zürich (ZRH) und dem Militärflughafen Dübendorf (LSMD). In der Folge ist ein Teil über dem Stadtgebiet gesperrter Luftraum. Weiter befindet sich die gesamte Stadt in der Kontrollzone der beiden Flughäfen und sie wird durch Starts und Landungen immer stärker frequentiert. Die vielen Aktivitäten im Luftraum machen die konventionelle Erfassung von Luftbildern aus einer bemannten Maschine zur planerischen Meisterleistung. Nicht selten muss eine periodische Befliegung aus Wettergründen oder Betriebsdichte im Luftraum verschoben werden.

Die Orthofotos wiederum gewinnen mit zunehmender Geodatennutzung durch die Bevölkerung an informativem Wert. Gerade bei großen Infrastrukturbauwerken mit Verbesserungen für die Mobilität ist die Nachfrage hoch.

Lösungsansatz

Um die Nachfrage nach aktuellen Orthofotos bedienen zu können, setzt Geomatik + Vermessung vermehrt auf UAS. Der Drohnentyp wird dabei so gewählt, dass ein Drohneneinsatz im ganzen Stadtraum mit geringstmöglichem Administrativaufwand, voller Gesetzeskonformität und höchstmöglichem Qualitätslevel ausgeführt werden kann. Die Einsätze werden durch einige wenige Mitarbeitende ausgeführt, denn eine hohe Flugpraxis ist wichtiger als eine Vielzahl von geschulten Pilot*innen.

Anwendungsfall

In Zürich Schwamendingen wurde der Autobahnzubringer A1L eingehaust. Auf dem Deckel der Autobahn entstand eine neue Parkanlage für die Bevölkerung - der Überlandpark. Dieser wurde im Frühling 2025 eröffnet und für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Zudem sollten die, von der Stadt Zürich bereitgestellten, Quartierkarten "Züri zFuess" erneuert werden. Im Normalfall werden diese aus den schweizweit zu Verfügung stehenden Orthofotos "SWISSIMAGE" abgeleitet. In diesem Fall waren zum Zeitpunkt der Eröffnung einzig Bilddaten aus dem Jahr 2022 vorhanden, die wiederum nicht den Park, sondern noch die Baustelle abbildeten. Aus diesem Grund wurde über ein Bereich von ca. 1.1 km² ein aktuelles Orthofoto mit einer DJI Mavic 3E RTK erzeugt.



Abbildung 2.5.2 - 1: Ausschnitt SWISSIMAGE, 2022

Der Abschnitt liegt mitten im Siedlungsgebiet sowie in den Flugverbotszonen der beiden angrenzenden Flughäfen. Die eingesetzte Drohne wiederum gehört zur Klasse C2. Drohnen der Klasse C2 dürfen von Mitarbei-

tern mit entsprechendem Fernpilotenzertifikat wiederum in den offenen Kategorien A2 oder A3 betrieben werden. Da bei beiden der aufgeführten Betriebsmöglichkeiten ein Überflug von unbeteiligten Personen untersagt ist, kann die Drohne nicht ohne Weiteres im besagten, dicht besiedelten, Perimeter eingesetzt werden.

Für einen gesetzlich konformen Einsatz braucht es also zusätzlich zu den geschulten Piloten folgende Bewilligungen:

- Flugfreigabe der Flugsicherung infolge Flugverbotszonen
- Spezielle Betriebserlaubnis für Überflug nicht beteiligter Personen

Flugfreigabe in Flugverbotszone

Die Flugsicherung der beiden betroffenen Flughäfen Zürich und Dübendorf wird durch die Flugüberwachung SKYGUIDE sichergestellt. Flugaktivitäten in Flugverbotszonen sind durch diese zu bewilligen. Die Einreichung erfolgt via Online-Tool nach einmaliger Registrierung durch den Fernpiloten selbst. Ein Vorhaben muss dabei mindestens 10 Kalendertage vor Flug gemeldet werden, dabei werden Perimeter, Betriebszeiten, Flughöhe und weitere Grundlagen erstmalig mitgeteilt und von der Flugsicherung genehmigt oder abgelehnt. 24 Stunden vor Durchführung wird auf dieser Grundlage eine effektive Aktivität angekündigt. Die finale Freigabe zum Start erfolgt wenige Minuten vor Durchführung telefonisch durch die Flugsicherung, ebenso die Abmeldung nach sicherer Landung.

Spezielle Betriebserlaubnis für Überflug nicht beteiligter Personen

Das Überfliegen von nicht beteiligten Personen wird durch eine spezielle Betriebserlaubnis sichergestellt. Die oben beschriebene Flugfreigabe durch die Flugsicherung beinhaltet diese nicht. Um im Stadtgebiet mit hohem intrinsischen Bodenrisiko für unbeteiligte Personen operieren zu können, arbeitet Geomatik + Vermessung mit dem Specific Operational Risk Assessment (SORA) des Vereins Drohnenbetrieb Geomatik Schweiz (VDGS). Die Fernpiloten sind Mitglied im Verein und speziell geschult, um alle SORA-spezifischen Richtlinien einzuhalten. Der Flug wird 48h vor Durchführung durch den beauftragten Piloten über ein Onlineportal gemeldet und anschließend durch den Verein summarisch geprüft.

Flugplanung

Die Flugplanung erfolgt mit der Software DJI Pilot 2. Die Flugplanung erfolgt initial über das gesamte Gebiet. Anschließend wird der Perimeter schrittweise aufgeteilt und als einzelne Planungen abgespeichert. Die Aufteilung erfolgt durch das systemunterstützte Hinzufügen von Stützpunkten in der Mitte der jeweiligen Seite. Für eine bessere Übersicht wird immer vom Gesamtperimeter ausgegangen. Die einzelnen Flüge werden so definiert, dass zwischen ihnen eine Überlappung von 25 % besteht.

Die Flüge an sich finden auf einer maximal bewilligten Flughöhe von 70 m über Grund, einer seitlichen Überlappung von 70% und einer Längsüberlappung von 80 % statt. Die Grundauflösung beträgt 19 mm pro Pixel. Auf das Messen von Passpunkten wurde aufgrund der Qualitätsanforderungen an das Endprodukt verzichtet.

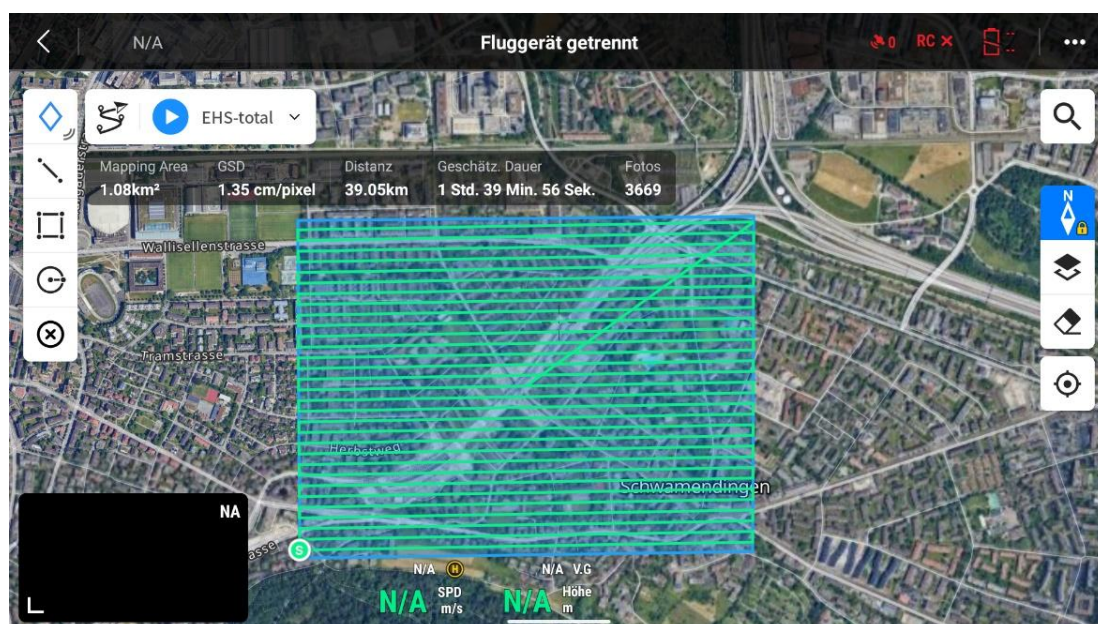


Abbildung 2.5.2 - 2: Gesamtperimeter

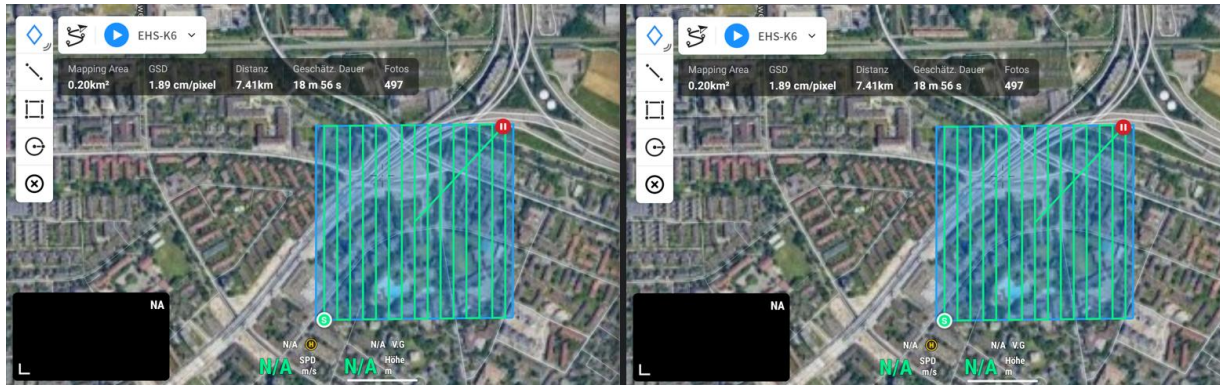


Abbildung 2.5.2 - 3: Einzelflüge, abgeleitet aus Gesamtperimeter

Befliegung

Start und Landung erfolgen manuell, die eigentliche Befliegung erfolgt automatisiert gemäß Flugplan. Während des Flugs überwacht der Fernpilot den übrigen Luftraum visuell und mit Hilfe der App SafeSky. SafeSky dient insbesondere dazu, tieffliegende Rettungshelikopter frühzeitig zu verorten, da diese visuell oft erst spät erkennbar sind. Die Dokumentation der Vorbereitung, Safety-Checks und Vorkommnisse erfolgt über betriebsinterne Checklisten. Für den Notfall wird immer ein Alarmierungsschema mit den nötigen Kontakten in der Grundausrüstung mitgeführt.

Auswertung

Für die Auswertung des Orthofotos wird die Software PIX4Dmapper verwendet. Da in diesem Projekt keine Passpunkte verwendet werden, läuft die Auswertung größtenteils automatisch. Im ersten Schritt wird die Kameraorientierung berechnet. Das Resultat ist stark von der gewählten Überlappung der Einzelfotos abhängig. In den weiteren Schritten werden danach Vermaschung und Punktwolke sowie zum Schluss das Orthofoto gerechnet.

Das Orthofoto wurde für eine Broschüre verwendet. Damit das Orthofoto gebraucht werden kann, wurde dieses zum Schluss komprimiert.

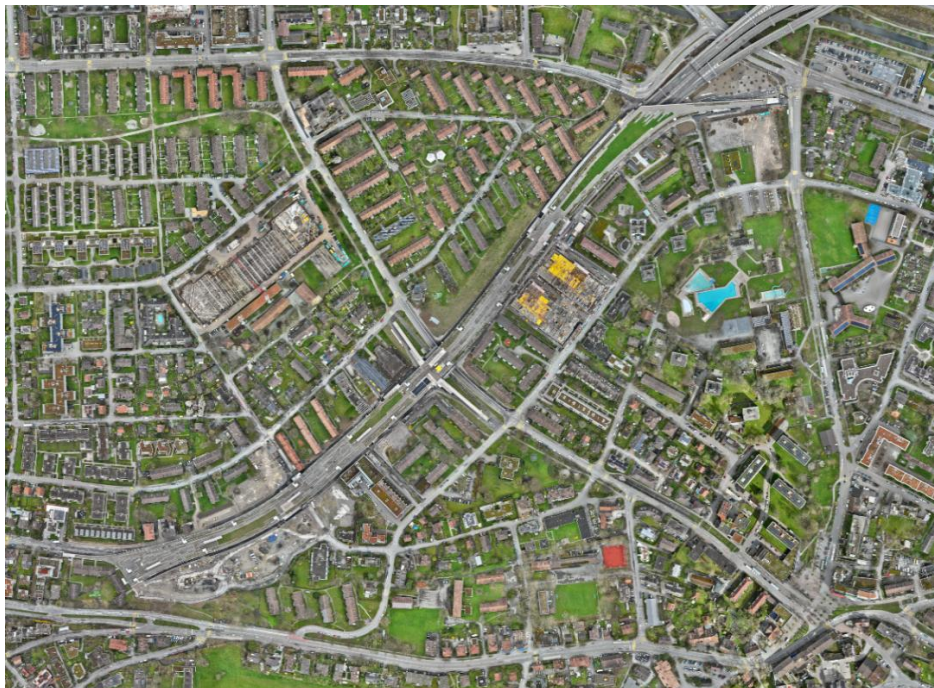


Abbildung 2.5.2 - 4: Endprodukt



Abbildung 2.5.2 - 5: Broschüre "Züri zFuess" mit neuem Orthofoto

Referenzen / Weiterführende Links

Anmeldung bei Skyguide Swiss U-Space: https://auth.swissuspace.ch/realms/airmap/protocol/openid-connect/auth?client_id=am-operations-app&redirect_uri=https%3A%2F%2Fsfso.skyguide.ch%2Foperator%2Frequests%2F525eca5a-b756-4e17-bc8b-ee7d3d5e714a&state=a7bef083-252d-42e0-8981-8c678a49e05f&response_mode=fragment&response_type=code%20id_token%20token&scope=openid%20sfo&nonce=749e7651-d0f0-47df-9163-5da8937af95b&code_challenge=xAM1Hv4wloYCCc0YzceiVbmZLB3vPlB9gkbgVlx9QU&code_challenge_method=S256

Flugregeln für Drohnen: <https://www.bazl.admin.ch/de/flugregeln-drohnen>

Geografische Flugeinschränkungen: <https://www.bazl.admin.ch/de/geografische-flugeinschraenkungen>

Informationen für Konsumenten: <https://www.bazl.admin.ch/de/konsumenten>

SORA Bodenrisiko: <https://www.bazl.admin.ch/de/sora-bodenrisiko>

Spezielle Kategorie: <https://www.bazl.admin.ch/de/spezielle-kategorie>

Stadtplan: https://www.maps.stadt-zuerich.ch/zueriplan3/Stadtplan.aspx?#route_visible=true&base-map=Stadtplan&map=&scale=8000&xkoord=2685135.6818827097&ykoord=1250881.9834807536&lang=&layer=Z%C3%BCri+zFuess%3A%3A0%2CZ%C3%BCri+zFuess%3A%3A0&window=&selectedObject=zzf32&selectedLayer=&toggleScreen=1&legacyUrl-State=&drawings=

Verein Drohnenbetrieb Geomatik Schweiz: <https://vdgs.ch/>

Kontakt

Christian Peterlein
Stadt Zürich, Geomatik + Vermessung
christian.peterlein@zuerich.ch

2.5.3 Die Erweiterung kommunaler Geoinformationssysteme durch UAS-Daten

Verfasser: Johannes Schlesinger und Steffen Vogt

Unbemannte Luftfahrtsysteme (UAS) haben sich in den vergangenen Jahren zu einem wichtigen Werkzeug für kommunale Geoinformationssysteme entwickelt. Sie liefern hochaktuelle, präzise und flächendeckende Geodaten, die sich direkt in bestehende GIS-Strukturen integrieren lassen. Für viele Kommunen stellen UAS-Daten heute eine praktikable Ergänzung zu klassischen Vermessungs- und Fernerkundungsverfahren dar.

Der besondere Mehrwert von UAS-Daten liegt in ihrer GIS-Tauglichkeit. Orthophotos, Punktwolken sowie daraus abgeleitete Höhen- und Oberflächenmodelle sind georeferenziert, maßstabsgetreu und konsistent (Unger, 2023). Sie können ohne Medienbrüche in kommunale GIS-Systeme übernommen werden. Damit schließen UAS eine Lücke zwischen punktueller Geländeaufnahme und großräumigen Landesbefliegungen und liefern genau die Daten, die in vielen kommunalen Anwendungen fehlen: aktuell, hochauflösend und flexibel erfassbar (Hu und Minner, 2023).

Viele Städte und Gemeinden verfügen bereits über umfangreiche 2D-GIS-Datenbestände. Liegenschaftskarten, Bebauungspläne, Flächennutzungspläne oder Infrastrukturdaten bilden das Rückgrat der kommunalen Planung und Verwaltung. UAS-Daten setzen genau hier an. Sie erweitern bestehende GIS-Daten nicht nur inhaltlich, sondern erschließen die dritte Dimension als integralen Bestandteil des GIS (Deutscher Städtetag, 2019).

GIS als Rückgrat kommunaler Arbeit

Entscheidend für den erfolgreichen Einsatz von UAS-Daten ist die konsequente Einbettung in bestehende GIS-Workflows. GIS bleibt das zentrale System zur Datenhaltung, Analyse, Qualitätssicherung und Bereitstellung. UAS liefern zusätzliche Geodaten, ersetzen aber keine bestehenden Strukturen.

Der Mehrwert entsteht dort, wo UAS-Daten:

- mit vorhandenen Vektor- und Sachdaten verknüpft werden,
- in bestehende Datenmodelle integriert sind,
- und über etablierte GIS- und WebGIS-Plattformen genutzt werden können.

Damit wird verhindert, dass neue Insellösungen entstehen. Stattdessen wird das GIS schrittweise um neue Dimensionen und Analyseoptionen erweitert.

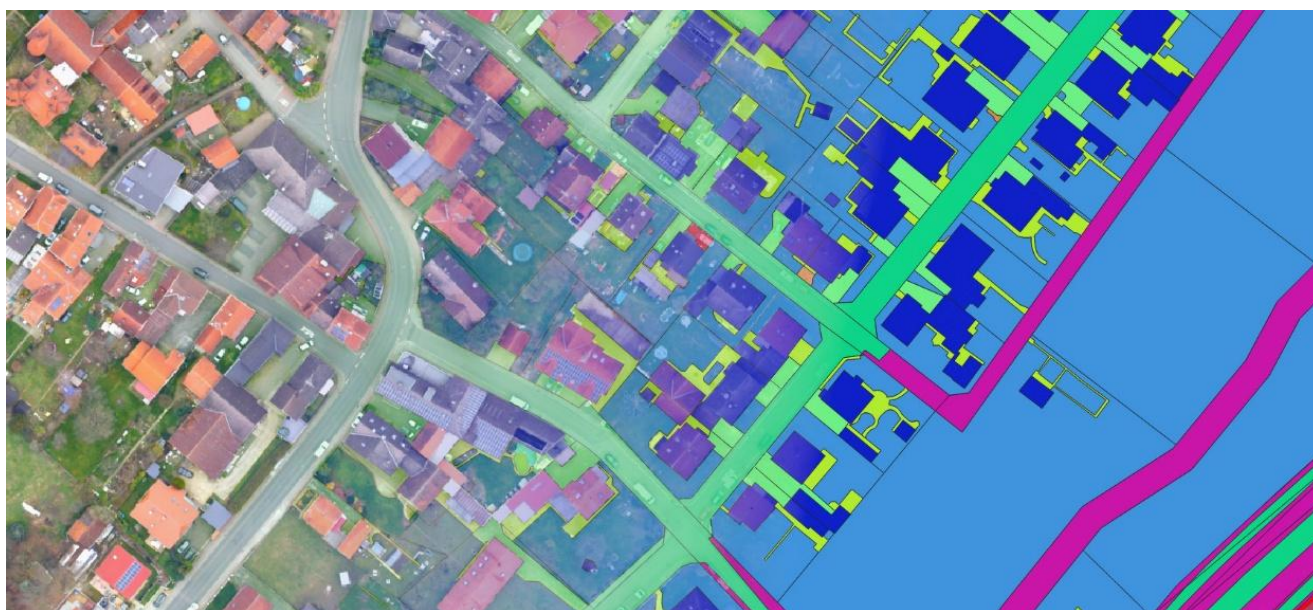


Abbildung 2.5.3 - 1: Die Verknüpfung bestehender Datensätze (z.B. ALKIS) mit dem hochauflösten Orthophoto aus einer Drohnenbefliegung erlaubt detaillierte Analysen, wie beispielsweise die flurstücks-scharfe Ermittlung der versiegelten Flächen

Vom UAS-Flug zum GIS-Datensatz: ein klarer Workflow

Die Nutzung von mittels UAS erzeugten Geodaten folgt einem klaren, GIS-orientierten Workflow. Die Drohnenbefliegung durch einen entsprechenden Dienstleister bildet den Ausgangspunkt, ist jedoch nur ein erster

Schritt. Nach der Datenerfassung werden die Rohdaten verarbeitet, geprüft und in standardisierte GIS-Formate überführt.

Im GIS erfolgen anschließend:

- die Integration der UAV-Daten in bestehende Datenbestände,
- die räumliche Verknüpfung mit vorhandenen Sachdaten,
- sowie Plausibilitäts- und Qualitätsprüfungen.

Die hohe Auflösung der UAS-Daten ermöglicht es, auch kleinräumige Strukturen präzise zu erfassen. Dazu zählen beispielsweise Bordsteine, Straßenränder, Treppen, Mauern, Schächte, Straßenmarkierungen oder Grünstrukturen. Gerade für kommunale Aufgaben wie Infrastrukturmanagement, Bauverwaltung oder Klimaanpassung sind diese Details von großer Bedeutung.

Erweiterung bestehender GIS-Strukturen um 3D-Daten

Viele Kommunen nutzen bereits webbasierte GIS-Plattformen zur internen Arbeit und zur Information der Öffentlichkeit. Ein Beispiel ist das GEonline-System der geonline Ingenieurgesellschaft, das in zahlreichen Kommunen als WebGIS und BürgerGIS im Einsatz ist. Über solche Plattformen werden klassische 2D-Themen strukturiert verwaltet und veröffentlicht.

Auf dieser Grundlage lässt sich der Einstieg in die dritte Dimension vergleichsweise einfach realisieren. Die benötigte Datengrundlage wird durch hochauflösende Drohnenaufnahmen geschaffen, wie sie von der svGeosolutions GmbH durchgeführt werden. Dabei entstehen:

- aktuelle Orthophotos mit sehr hoher Bodenauf Auflösung,
- dichte 3D-Punktwolken,
- sowie daraus abgeleitete 3D-Oberflächenmodelle und texturierte Vermaschungen.

Vorhandene LoD2-Stadtmodelle, die häufig bereits auf Grundlage von Landesbefelegungen erzeugt wurden und flächendeckend vorliegen, können mit diesen Daten ergänzt oder visuell aufgewertet werden. Wichtig ist dabei, dass alle Datensätze präzise georeferenziert sind und sich nahtlos in bestehende GIS-Strukturen einfügen.

3D-Visualisierung als Erweiterung des GIS

Die Visualisierung der 3D-Daten erfolgt in diesem Fall über einen webbasierten 3D-Viewer, der von virtualcitysystems entwickelt wurde. Dieser Viewer ist eng mit den bestehenden GIS- und WebGIS-Strukturen der geonline Ingenieurgesellschaft verknüpft und greift direkt auf die dort verwalteten Daten zu. Dazu gehören auch die durch die svGeosolutions GmbH erzeugten 2D- und 3D-Drohnenbilder.

Wesentlich ist, dass die 3D-Ansicht keine isolierte Anwendung darstellt. Sie ergänzt die bestehende Kartenansicht. Nutzerinnen und Nutzer können zwischen 2D- und 3D-Darstellung wechseln, ohne Datenkontext oder Sachdaten zu verlieren. Abfragen, Layerstrukturen und thematische Inhalte bleiben erhalten.

Da die Anwendung browserbasiert ist, sind keine speziellen Arbeitsplätze erforderlich. Dies erleichtert den Einsatz sowohl in Fachabteilungen als auch im Rahmen der Bürgerinformation.

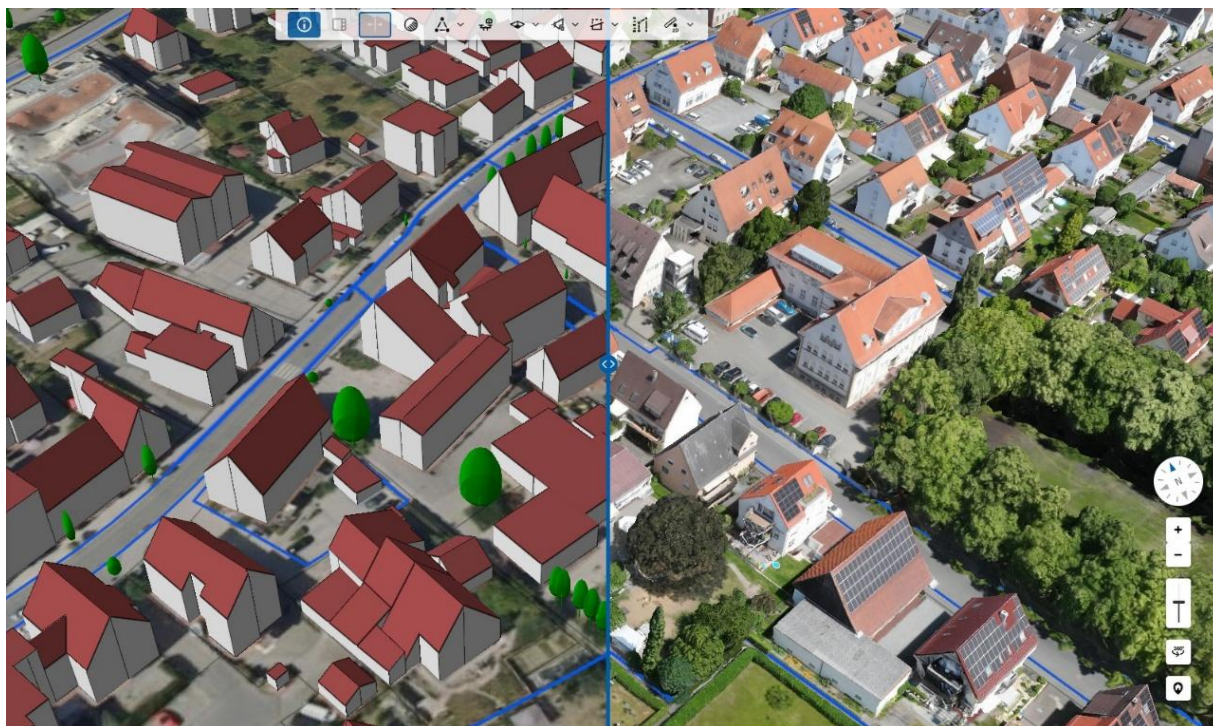


Abbildung 2.5.3 - 2: 3D-Daten aus Drohnenbefliegungen bieten Grundlagen, weiterführende Informationen und Visualisierungsmöglichkeiten für raumbezogene Entscheidungen in Kommunen

GIS-Analysen im 3D-Kontext

Der eigentliche Nutzen von UAS-Daten zeigt sich in der Kombination aus GIS-Analyse und dreidimensionaler Darstellung. Auf Grundlage der integrierten 3D-Daten lassen sich unter anderem:

- Sichtfeldanalysen durchführen,
- Schattenwürfe für unterschiedliche Tages- und Jahreszeiten berechnen,
- Gebäudehöhen und Volumina auswerten,
- Dachflächen für Solarpotenzialanalysen untersuchen,
- Geländeverläufe im Kontext von Starkregen oder Überflutung analysieren.

Diese Auswertungen basieren weiterhin auf klassischen GIS-Methoden. Die dritte Dimension erweitert den Analysehorizont, ohne bestehende Verfahren zu ersetzen.

Anwendungsfelder in der kommunalen Praxis

Für Kommunen ergeben sich vielfältige Einsatzmöglichkeiten. In der Stadtplanung lassen sich Bauvorhaben realistischer bewerten, da ihre Wirkung auf das Stadtbild unmittelbar nachvollziehbar wird. In Beteiligungsverfahren profitieren Bürgerinnen und Bürger von anschaulichen Darstellungen, die komplexe Planungen verständlich machen.

Auch im Bereich Klimaanpassung und Gefahrenvorsorge gewinnen UAS-gestützte 3D-Daten an Bedeutung. Starkregenszenarien, Verschattungen oder Sichtbeziehungen lassen sich differenziert analysieren. Für Bauverwaltung und Infrastrukturmanagement bieten die Modelle eine belastbare Grundlage zur Bestandsdokumentation und Wartungsplanung.

Fazit

Der Einsatz von UAS für GIS und Vermessung ist kein grundlegender Systemwechsel, sondern eine konsequente Weiterentwicklung bestehender Geodateninfrastrukturen. UAS-Daten liefern die geometrische Detailtiefe und Aktualität, GIS sorgt für Struktur, Analysefähigkeit und Integration, und webbasierte 3D-Viewer machen die Ergebnisse nutzbar.

Richtig eingebettet werden Daten aus Drohnenbefliegungen zu einem festen Bestandteil kommunaler GIS-Workflows. Sie unterstützen Planung, Verwaltung und Kommunikation gleichermaßen und bilden die Grundlage für einen digitalen Zwilling, der kommunale Entscheidungsprozesse langfristig verbessert.

Referenzen / Weiterführende Links

Deutscher Städtetag (2019): Einsatz von Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in der Vermessungsverwaltung. Berlin, 2019

Hu, D. und Minner, J. (2023): UAVs and 3D City Modeling to Aid Urban Planning and Historic Preservation: A Systematic Review. *Remote Sens.* 2023, 15(23), 5507; <https://doi.org/10.3390/rs15235507>

Unger, J. (2023): UAV-Einsatz in der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung. In: In: DVW e.V. (Hrsg.): UAV 2023 - Geodaten nach Maß, DVW-Schriftenreihe, Band 105, Augsburg, 2023, S. 75-94

Kontakt

Johannes Schlesinger | j.schlesinger@svgeosolutions.de

Steffen Vogt | s.vogt@svgeosolutions.de

svGeosolutions GmbH, Lise-Meitner-Str. 2, 79100 Freiburg

2.5.4 10 Jahre UAS-Betrieb in Osnabrück: Entwicklung, Herausforderungen und Innovationen in der Geodatenerfassung

Verfasser: Tim Reddehase

Der Fachdienst Geodaten der Stadt Osnabrück entwickelt regelmäßig neue Anwendungen und Lösungen. Gleichzeitig unterstützt er als Dienstleister andere Bereiche der Stadtverwaltung, insbesondere bei raumbezogenen Fragestellungen.

Vor allem die planerisch tätigen Abteilungen nutzen häufig das umfangreiche Angebot an Geodaten und Dienstleistungen. Dabei sind zwei Merkmale besonders wichtig für den weiteren Arbeitsprozess:

- Aktualität
- Genauigkeit

Während die Stadt Osnabrück anfänglich auf Daten des Landesvermessungsamtes zurückgriff, wurden in den letzten zwei Jahrzehnten zunehmend eigene Luftbildbefliegungen beauftragt.

Es zeigte sich jedoch, dass sowohl die Aktualität, die üblicherweise einem 3-Jahres-Rhythmus entsprach, als auch die Genauigkeit der Daten, insbesondere in Bezug auf die Bodenauflösung für die städtischen Anwendungsfälle oft nicht ausreichten. Daher wurde 2016 ein Pilotprojekt gestartet, um die Nutzung eines eigenen UAS (Unmanned Aerial System) zu prüfen.

Dabei handelt es sich nicht nur um das notwendige Fluggerät (im Folgenden „Drohne“), sondern vielmehr um ein komplettes System, das verschiedene Bestandteile umfasst. Neben der Drohne selbst war auch eine leistungsstarke Workstation notwendig, um die in der Befliegung gewonnenen Bilddaten mit einer entsprechenden Software im Post-Processing schnell und effizient zu verarbeiten.

Das Projekt wurde mit den notwendigen Schulungen für den sicheren Betrieb der Drohne und den Umgang mit der Software im Herbst 2016 abgeschlossen.



Abbildung 2.5.4 - 1: Erste Drohne im Dienst der Stadt (2016)

Herausfordernd ist, dass die rechtlichen Rahmenbedingungen für unbemannte Luftfahrzeuge ständigen Änderungen unterliegen. Zu Beginn des Vorhabens existierte der entsprechende Abschnitt in der Luftverkehrsordnung („Drohnenverordnung“) noch nicht, bis dieser im April 2017 in Kraft trat.

Spätere Änderungen, wie die 2022 neu gefasste Auslegung des Behördenbegriffs, führten vorübergehend zu Einschränkungen bis hin zur Aussetzung des Flugbetriebs. Anfang 2023 konnte nach umfangreichen Vorar-

beiten dann eine Genehmigung für die spezielle Kategorie beantragt werden, die seitdem einen rechtssicheren Flugbetrieb ermöglicht.

Der Fachdienst Geodaten blickt auf 10 Jahre Erfahrung zurück und die Geodatenerfassung mit Drohnen ist fest etabliert. Kontinuierlich wurde in Technik investiert und heute sind neben der mittlerweile dritten Drohne unterschiedliche Kameras, darunter eine mit hochauflösendem Wärmebild, und ein LIDAR-Scanner im Einsatz.

True-Orthophotos, 3D-Mesh und bildbasierte Punktwolken

Ein anschauliches Beispiel dafür ist der Katalog der Digitale Orthophotos: Seit 2017 wird dafür stets der aktuelle Datensatz aus dem gesamtstädtischen Bildflugprogramm (flugzeuggestützt in Kooperation mit dem LGLN Niedersachsen) genutzt. Ergänzend dazu werden mit der Drohne beflogene Teilflächen grafisch aufbereitet und als Mosaik über die bestehende Karte gelegt. Dieses Verfahren der schrittweisen Aktualisierung wird so lange fortgeführt, bis ein neuer gesamtstädtischer Datensatz vorliegt und der Prozess von vorne beginnt. Eine ähnliche Methodik wird intern bei der projektbezogenen Aktualisierung des 3D-Meshes angewandt, das insbesondere als visualisierender Bestandteil des Digitalen Zwillings eine zentrale Rolle bei städtebaulichen Planungen und der Entwicklung von Konversionsflächen einnimmt.

Deponieüberwachung / Setzungsmessungen / Starkregengefahrenkarten

Im Bereich des Piesberges betrieb die Stadt Osnabrück eine Zentraldeponie. Die Nachsorge und Eigenüberwachung umfassen neben der Kontrolle der Abdichtungssysteme, der Sickerwasserinfrastruktur und möglicher Deponiegasemissionen auch die vermessungstechnische Erfassung der Oberfläche. Hierzu erfolgt eine Kombination verschiedener Messmethoden, wobei insbesondere die luftgestützte LIDAR-Vermessung eine zentrale Rolle spielt. Diese Methode hat sich als besonders leistungsfähig für den Nachweis von Volumenveränderungen in diesem großflächigen Gebiet erwiesen.

Aus den LIDAR-Daten wird eine hochauflösende, georeferenzierte Punktwolke generiert, welche die Grundlage für die Erstellung eines Digitalen Geländemodells (DGM) bildet. Der epochale Vergleich mit Vorjahresdaten ermöglicht die Berechnung differenzieller Geländemodelle, mit denen Volumenänderungen präzise bestimmt werden können.

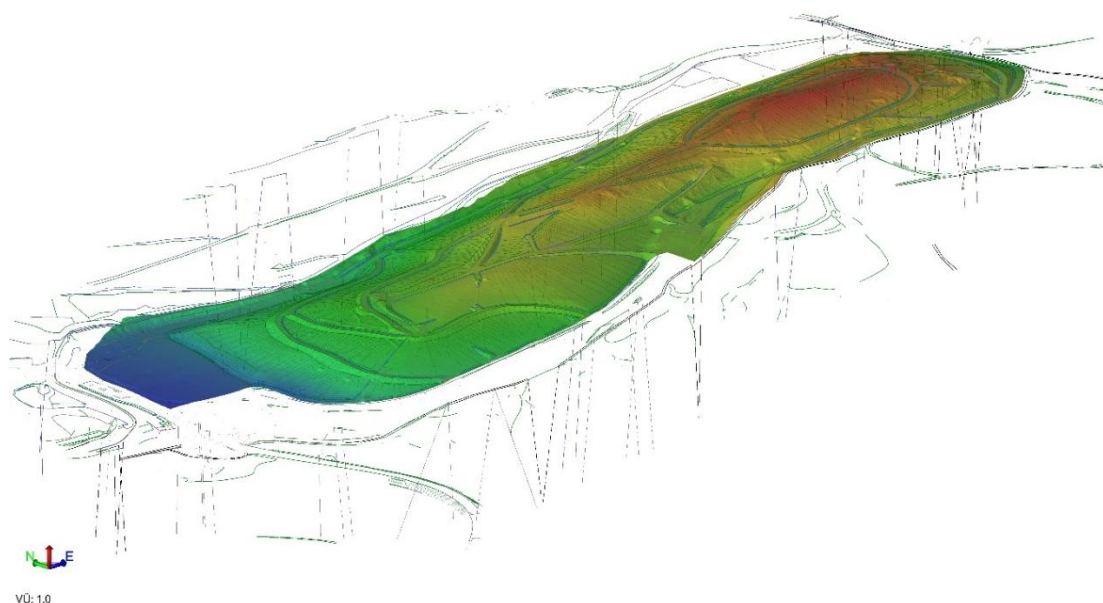


Abbildung 2.5.4 - 2: DGM / Auswertungen der LIDAR-Daten

Die dokumentierten Abtrags- und Setzungsvolumina dienen als belastbarer Nachweis für Veränderungen der Deponieoberfläche im Rahmen der gesetzlich vorgeschriebenen Überwachung.

Vergleichbar kamen die LiDAR-Daten auch bei der Erstellung der Starkregengefahrenkarten im Rahmen einer hydraulischen Gefährdungsanalyse zum Einsatz. Die mit der Drohne erfassten LIDAR-Daten ermöglichten die Erstellung eines hochaktuellen Digitalen Geländemodells (DGM), ergänzt durch eine detaillierte und präzise

Punktwolke für Digitalisierungen. Dies erlaubte zudem die Integration von Änderungen und Ergänzungen, wie beispielsweise Anpassungen an Regenrückhaltebecken oder die Überarbeitung ursprünglich vereinfacht dargestellter Bereiche, in das Analysemodell. Die Ergebnisse dieser Analyse wurden schließlich in einer interaktiven Starkregen Gefahrenkarte veröffentlicht.

Feuerwehr und Katastrophenschutz

Der Fachdienst Geodaten der Stadt Osnabrück arbeitet in vielen Bereichen, insbesondere bei der Bereitstellung von GIS-Applikationen, eng mit der Feuerwehr Osnabrück zusammen. Im Rahmen dieser Kooperation wurden auch die Fähigkeiten der Drohne, insbesondere die Nutzung der integrierten Wärmebildkamera, intensiv untersucht. Während viele Feuerwehren eigene Drohneneinheiten betreiben, hat Osnabrück bewusst einen anderen Ansatz gewählt: Anstatt eine separate Einheit aufzubauen, greift die Feuerwehr auf die Expertise und Erfahrung des Fachdienstes Geodaten zurück. Die regelmäßige Nutzung der Drohne im Vermessungswesen sorgt dafür, dass die dortigen Fernpiloten über eine hohe Routine und umfassende Fachkenntnisse verfügen, was eine verlässliche und sichere Handhabung des Systems gewährleistet.

Diese Kooperation ermöglicht es der Feuerwehr - und im Bedarfsfall auch der Polizei -, die Vorteile des „Blickes von oben“ zu nutzen. Zusätzlich ist auch eine Meldung als Katastrophenschutzeinheit des Landes Niedersachsen, als sog. Aufklärungstrupp-Luft erfolgt.

Beispiele für einen Einsatz sind hier die Unterstützung bei Personensuchen, Lokalisierung von Glutnestern bei ausgedehnten Bränden oder die leider häufig stattfindenden Evakuierungsmaßnahmen aufgrund von Kampfmittelfunden zu nennen.



Abbildung 2.5.4 - 3: Personen in der Wärmebildansicht (bei einer Übung)

In letztgenannten Fällen wird in guter Zusammenarbeit mit anderen Hilfsorganisationen die flächendeckende Kontrolle des Evakuierungsgebietes übernommen, um die dafür notwendigen Zeiträume und damit einhergehenden Einschränkungen der Bevölkerung so kurz wie möglich zu halten.

Zusammenfassung

Drohnen eröffnen vielfältige Einsatzmöglichkeiten und bieten in Kombination mit Geoinformationssystemen ein großes Potenzial. Sie ermöglichen es, hochwertige Daten zu vergleichsweise geringen Kosten zu erheben. Dank ihres flexiblen Einsatzes, der inzwischen in einem klar geregelten rechtlichen Rahmen erfolgt, können wir als Stadt Osnabrück die eingangs genannten Anforderungen an „Aktualität“ und „Genauigkeit“ optimal erfüllen.

Darüber hinaus entwickeln sich kontinuierlich neue Einsatzmöglichkeiten der Drohnentechnologie im städtischen Alltag. Ein anschauliches Beispiel hierfür liefert die enge Zusammenarbeit mit der Feuerwehr. Zusätzlich eröffnet sich mit der Erfassung von Verkehrsdaten ein weiterer zukunftsweisender Anwendungsbereich, der derzeit Gegenstand intensiver Überlegungen ist.

Kontakt

Tim Reddehase | reddehase@osnabrueck.de
Stadt Osnabrück, Fachdienst Geodaten, Digitaler Zwilling,
Hasemauer 1, 49074 Osnabrück
+49 (0)541 323-3068
www.geo.osnabrueck.de



2.5.5 UAS-Ergebnisse im Online-GIS nutzen - Stadt Koblenz

Verfasser: A. Bach, F. Müller, A. Weckbecker

Einleitung

Die Stadt Koblenz blickt auf eine über 2.000-jährige Geschichte zurück und zählt zu den kulturhistorisch bedeutendsten Städten Deutschlands. Gelegen am Zusammenfluss von Rhein und Mosel, dem Deutschen Eck, ist das Stadtbild und seine Umgebung geprägt von einer Vielzahl von Kulturdenkmälern unterschiedlichster Zeitepochen. Diese Vielfalt stellt hohe Anforderungen an Dokumentation, Analyse und nachhaltige Verwaltung des baulichen Erbes.



Abbildung 2.5.5 - 1: UAS Photo (Matrice 210 RTK), März 2021 (Hintergrund Festung Ehrenbreitstein, Koblenz)

Für die Erfassung von Bauwerken im Bereich der Denkmalpflege eignen sich vor allem flächenhaft erfassende Vermessungsverfahren, wie das 3D-Laserscanning oder die Photogrammetrie. Aufgrund des höheren Detailgrads nutzt die Stadt Koblenz die 3D-Laserscandaten für die 2D-Planerstellung und detaillierte 3D-Modellierung. In den meisten Fällen werden aber auch Grundlagen für die Schadenskartierung benötigt. Hier greifen wir auf die photogrammetrische Auswertung zurück und nutzen die aus der Auswertung generierten hochauflösenden Orthoansichten.

Die Integration dieser Bearbeitungen in ein Geoinformationssystem (GIS) bildet dabei einen zentralen Baustein für die interdisziplinäre Nutzung. Innerhalb der Stadtverwaltung Koblenz bestehen unterschiedliche Fachstellen mit jeweils eigenen Aufgaben und Fragestellungen, die jedoch auf dieselbe räumliche Datengrundlage zugreifen möchten. Ein zentralisiertes GIS ermöglicht es, photogrammetrische Produkte konsistent, aktuell und nachvollziehbar bereitzustellen. Dadurch werden Arbeitsprozesse effizienter gestaltet, redundante Datenerhebungen vermieden und eine gemeinsame, fachübergreifende Sicht auf den urbanen Raum geschaffen. Die Kombination aus Photogrammetrie und GIS leistet somit einen wesentlichen Beitrag zu einer modernen, datenbasierten Verwaltung und zum nachhaltigen Umgang mit dem kulturellen Erbe der Stadt Koblenz.

Praxisfall Deutsches Eck

Im Zuge anstehender Sanierungsmaßnahmen wurde eine umfassende Bestandserfassung des Deutschen Ecks durchgeführt. Neben terrestrischen 3D-Laserscanning wurde das ganze Objekt mit Hilfe eines UASphotogrammetrisch erfasst.



Abbildung 2.5.5 - 2: Deutsche Eck, Lage



Abbildung 2.5.5 - 3: Blick auf Rhein und Mosel

Zum Einsatz kam die DJI Matrice 210 RTK als Trägerplattform mit einer Zenmuse X7 als Kamerasystem. Es sei angemerkt, dass aufgrund jüngster Entwicklungen im Bereich der Drohnenverordnungen dieses System aufgrund des hohen Startgewichts nicht mehr zum Einsatz kommt. Während der Erfassung wurde das Deutsche Eck für die Öffentlichkeit gesperrt. Insgesamt wurden 935 Einzelbilder (6.000x4.000 px) mit mindestens 70 % Bildüberlappung aufgenommen. Für die Validierung wurden zusätzlich Passpunkte mit Hilfe von Tachymetrie eingemessen. Die nach der Auswertung berechneten Abweichungen zu den Passpunkten betrug $\pm 7\text{mm}$.



Abbildung 2.5.5 - 4: Photogrammetrisches 3D Modell

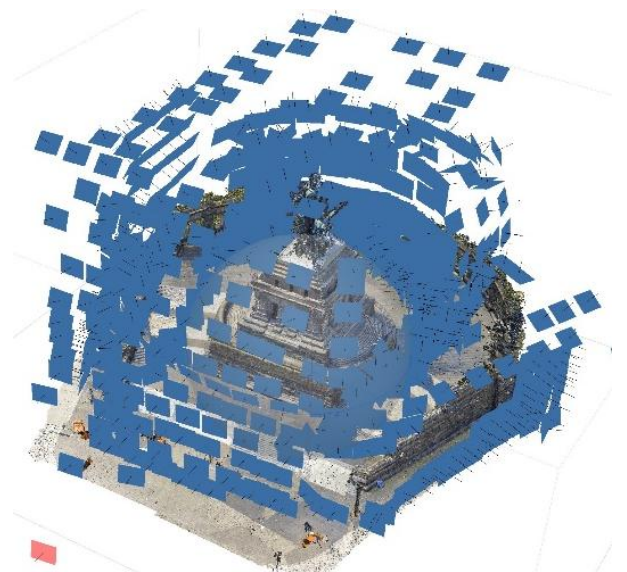


Abbildung 2.5.5 - 5: Positionen der 935 Einzelbilder

Aus der photogrammetrischen Gesamtauswertung wurden nun Orthoansichten abgeleitet. Zunächst die 4 Hauptansichten des Reitersockels, also auch umliegende Sockelbereiche. Besonderes Interesse galt dem halbrunden Arkadenbogen. Hier muss die Krümmung bei der Abwicklung bzw. der Erstellung dieser Orthoansicht mitberücksichtigt werden. Ferner haben wir das photogrammetrische 3D-Modell für unser GIS-System exportiert. Alle photogrammetrischen Auswertungen (Orthoansichten) wurden ferner in einem CAD-System zusätzlich aufbereitet.



Abbildung 2.5.5 - 6: Orthoansicht, Abwicklung des Arkadenbogens (Auflösung 2mm)

Kombination Photogrammetrie und GIS

Ziel ist es, eine webbasierte GIS Plattform zu generieren, auf die unsere Fachämter zentralisierten Zugriff haben. Unser bestehender digitaler Zwilling der Stadt Koblenz wird aktuell aus verschiedenen Datenquellen gespeist. Zu erwähnen sind hier die Ergebnisse der Airborne Laserscandatenbefliegungen seitens des Landes Rheinland-Pfalz, verschiedene WebMapServices (kurz: WMS) aber auch Ergebnisse unserer eigenen stadtweiten Befliegungsmissionen (Luftbildkacheln, 8cm Auflösung). Dies wurde nun im Hinblick auf photogrammetrische Auswertungen dahingehend erweitert, dass alle Ergebnisse im digitalen Zwilling ebenfalls abrufbar sind, sowohl die 2D-Orthoansichten als auch die photogrammetrischen 3D-Modelle. Auf diese Art und Weise bleibt alles aktuell organisiert und erspart in einigen Anwendungsfällen auch die Installation von Software zum Betrachten der Ergebnisse (vor allem im 3D-Bereich). Gerade die Installation von Software in Verwaltungen ist ein nicht immer einfaches Unterfangen. Dieses Vorgehen entspricht dem Grundgedanken der Koblenzer Geodateninfrastruktur, der auf eine verteilte Datenhaltung bei den jeweiligen Fachämtern setzt.

Dieses Photogrammetrie-Modul wird von uns kontinuierlich weiterentwickelt. Beispielweise möchten wir zukünftig auch in der Lage sein, in den angezeigten Orthoansichten Messungen durchzuführen oder die Ergebnisse mit anderen Metadaten zu verknüpfen, so dass die Ergebnisse im internen WebGIS abfragefähig werden.

Als Software für unseren digitalen GIS-Zwilling verwenden wir sowohl für die objektbasierte als auch für die fotorealistische Ansicht Open Source Software. Konkret stellt das Framework MapLibre die Basis zur Ansicht der Volumenkörper und die Cesium-Engine die Basisfunktionen für die Visualisierung des texturierten 3D Meshes bereit.

Um die Befliegungsergebnisse im GIS-Zwilling einzubinden, bilden Geodatentabellen das Herzstück. Sie verknüpfen klassische Sachdaten mit räumlichen Informationen. In diesen Tabellen (geojson, postgres, u. a.) werden im Wesentlichen die räumliche Lage (Koordinaten zur Platzierung der Icons), die Art des Datensatzes (zur Auswahl des Viewers und des Piktogramms für das Icon), sowie die anzusprechende Datenquelle (Speicherort und Datenformat des Datensatzes) geführt.

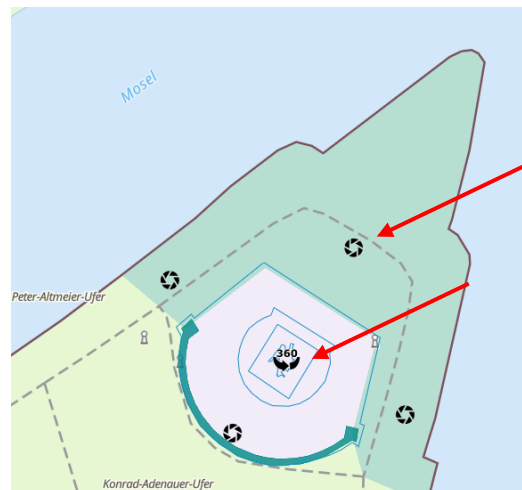


Abbildung 2.5.5 - 7: Platzierung der ausgewählten Piktogramme (klickbar) anhand der Geodatentabellen

Durch die zu Beginn beschriebene 3D-Geodatenerfassung entsteht nun der Mehrwert, dass in einem 2D-WebGIS auch 3D-Inhalte per Klick lagerichtig angesprochen und stadtwert standardisiert in einem einheitlichen Bezugssystem dargestellt werden können. Dazu zählen 3D-Modelle sowie 3D-Spheres aber auch hochauflösende 2D-Abwicklungen und CAD-Pläne. Die Geodaten werden als Layer in das WebGIS geladen. Anhand der Art wird das vorgenannte Piktogramm/ICON in der Karte platziert. Eine Programmierung für die Popup-Fenster erkennt anhand der Art, dass innerhalb des Info-PopUps ein Element dargestellt werden soll. Für die Darstellung der verschiedenen Datensätze werden unterschiedliche Open Source Libraries eingesetzt: babylon.js für 3D-Modelle, pannellum.js für 3D-Spheres und zoomist.js für detaillierte Bilder.

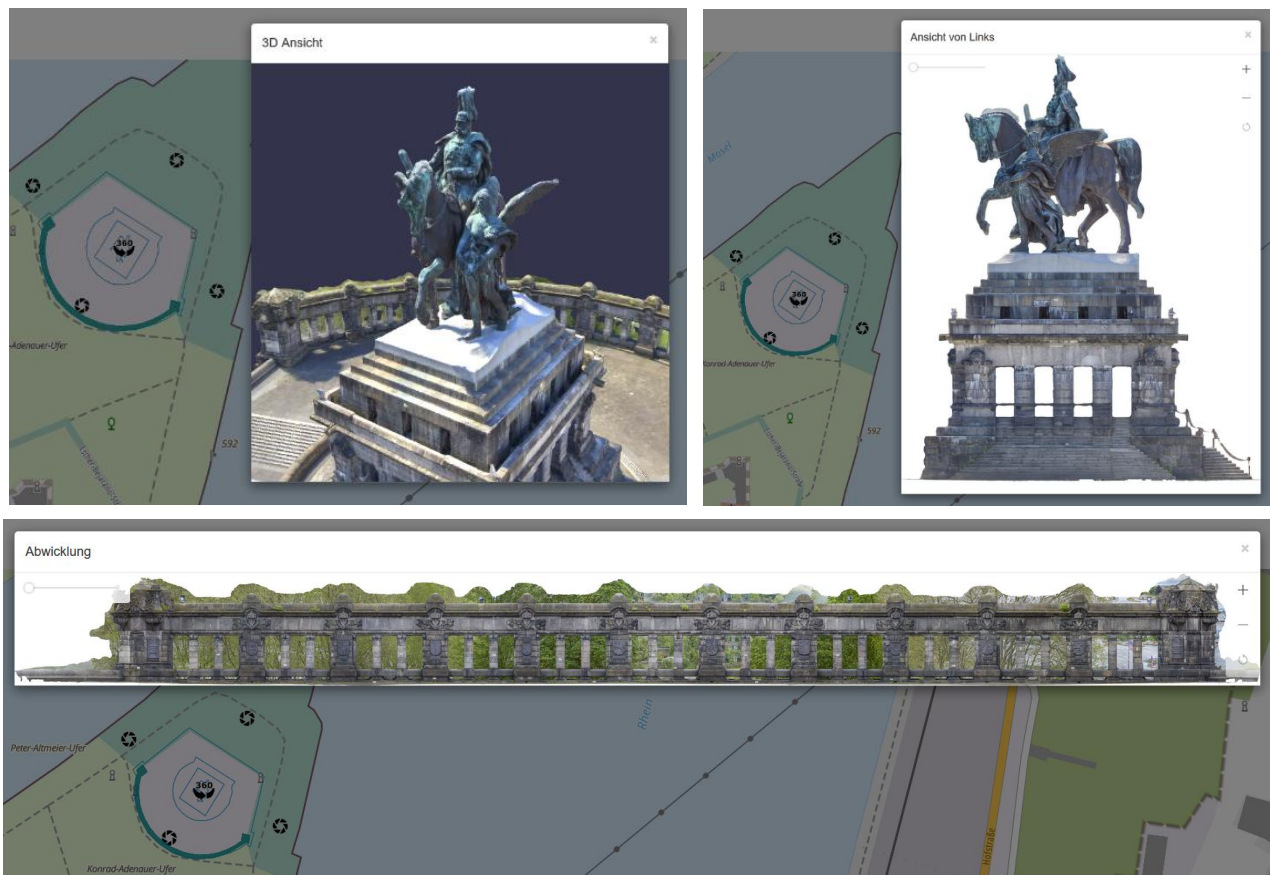


Abbildung 2.5.5 - 8: Rotier-/zoombare 3D Ansicht (linksoben), Orthoansicht (rechtsoben), zylindrische Abwicklung (unten) - „PopUps aus dem Digitalen Zwilling“

Von Natur aus können die Dateien entsprechend voluminös sein, was eine Darstellung in einem browserbasierten GIS u.U. nur schwer handhabbar macht. Um die Nutzererfahrung zu verbessern, können kleine Versionen der Darstellungen als Platzhalter geladen werden. Ist im Anschluss das große Bild geladen, so erfolgt ein Austausch. Momentan arbeiten wir an einer pyramidierten Darstellung komplexer 3D-texturierter Modelle, sogenannte „3D Tiles“. Diese können direkt in die Cesium-Engine geladen werden und erlauben flüssiges Streamen komplexer Modelle.

Das photogrammetrische Modul ist momentan nur für den internen Einsatz konzipiert, da es insbesondere bei der Verwendung von mobilen Datenübertragungen zu Problemen in der Darstellung kommt.

Gerne stehen wir für weitere Informationen sowie Ideen zur perspektivischen konzeptionellen Erweiterung des Systems bereit.

Weiterführende Links

www.geoportal.koblenz.de

www.dz.koblenz.de

www.koblenz.de/umwelt-und-planung/grundstuecke-und-geodaten/stadtvermessung-bodenmanagement/uav-flugroboter-kopter/

Kontakt

Amt für Stadtvermessung und Bodenmanagement Koblenz, Bahnhofstraße 47, 56068 Koblenz
0261/129-3202

vermessungsamt@stadt.koblenz.de

2.5.6 Regelkonforme Integration von aus-Navigation und GIS im 3D Urbanen Luftraum (KONFORMUS)

Verfasser: Jörg Schaller, Lisa Bareiss

Problemstellung und Ziel

Das vom Bundesministerium Forschung, Technologie und Raumfahrt geförderte Forschungsprojekt KONFORMUS entwickelte ein innovatives, sicheres, resilientes und leistungsfähiges Netzwerksystem, mit dessen Hilfe die unterbrechungs- und verlustfreie Kommunikation zwischen den relevanten Teilnehmenden an Betrieb und Überwachung unbemannter Luftfahrzeuge (UAS Drohnen) gewährleistet werden kann. Das Netzwerksystem kombiniert mehrere innovative Hard- und Software-Komponenten, um künftig zertifizierungsfähige U-Space-Dienste (U-Space: Unterer Luftraum für Drohnen) bereitzustellen. Zentrales Element ist ein integriertes, ausfallsicheres Kommunikationssystem auf Basis verschiedener Übertragungswege zur resilienten Übermittlung relevanter Fluggeräteinformationen zwischen Drohne und zentraler Datenverarbeitung. Für eine sichere, umweltfreundliche, hochpräzise und regelkonforme Flugdurchführung und Navigation von UAS im U-Space müssen hochpräzise 2D- und 3D-GIS Daten in einer zentralen Datenverarbeitung von einem USSP (U-Space Service Provider) regelkonform aufbereitet und den Stakeholdern über ein Dashboard in Echtzeit bereitgestellt und visualisiert werden.

Durchführung und Lösungsweg

PSU fungierte im Vorhaben als GIS-Datenprovider und erstellte eine umfassende 3D-Geodatenbasis für die Nutzung durch die Stakeholder. Als Testgebiet für die Datenbankgenerierung und der Durchführung von virtuellen Flügen zwischen mehreren Kliniken wurde der nördliche Bereich der Stadt München ausgewählt. Die Geodaten wurden mit ESRI ArcGIS® Pro, FME sowie Python aufbereitet und in einer Geodatenbank zusammengeführt, die alle für den U-Space relevanten statischen und dynamischen Geodaten für dieses Gebiet enthält. Zusätzlich wurden Notlandeplätze aus dem F&E-Projekt UmSiTrUL integriert. Das hochaufgelöste Stadtmodell mit 2D- und 3D-GIS Daten wurde sowohl für die Flugplanung als auch für das In-Flight-Monitoring und für simulierte Emergency Fälle, für autonome Notlandungen auf geeigneten Notlandeplätzen (Flachdächer, Gewässer, dichte Baumgruppen etc.) eingesetzt.

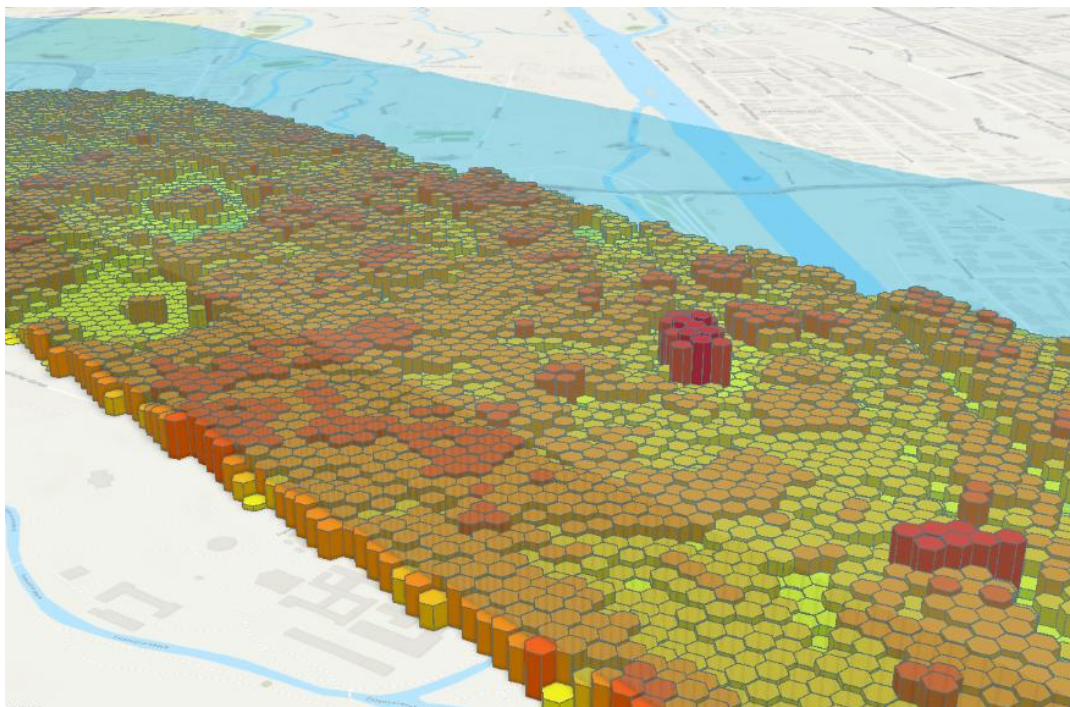


Abbildung 2.5.6 - 1: GIS-Datenaufbereitung als 3D Hexagone mit aggregierten Höhen,- Hindernissen -und Luftraum Beschränkungen zur vereinfachten Flugplanung. (Blau: 3D U-Space).

Die Schnittstellen zur zentralen Cloud des USSP und zu den übrigen Subsystemen zur Kommunikation und zur Datenbereitstellung wurden definiert und implementiert, um eine zuverlässige Datenübermittlung zwischen GIS-Provider und USSP sicherzustellen (Echtzeitflugpositionsdaten, Wetterdaten, Webcams der Start-

und Landeplätze, Flugpläne, Flugvolumen etc.). Hierzu wurde eine Architektur für die Übertragung von Geodaten, Echtzeitdaten und Flugplänen aufgebaut. Die Schnittstellen wurden über HTTP-basierte APIs realisiert, umfassend getestet und optimiert.

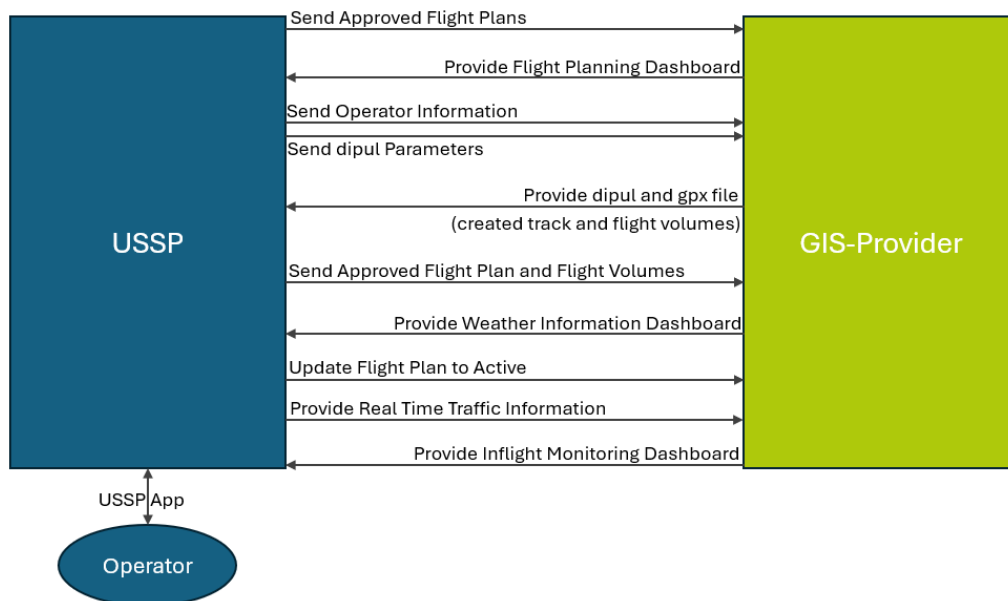


Abbildung 2.5.6 - 2: Schnittstellen zwischen U-Space Service Provider (USSP) und GIS-Provider (Bereitstellung von 2D und 3D- und Echtzeit GIS-Daten)

PSU entwickelte mit der ESRI Software „ArcGIS® Experience Builder“ einen Web-Dashboard Demonstrator für Routenplanung und Inflight-Monitoring. Das Dashboard visualisiert alle statischen und dynamischen GIS-Daten einschließlich Geometrien und Attributen in 2D und 3D. Relevante Schnittstellen zur Echtzeitdarstellung der Drohenposition im Flug wurden integriert.

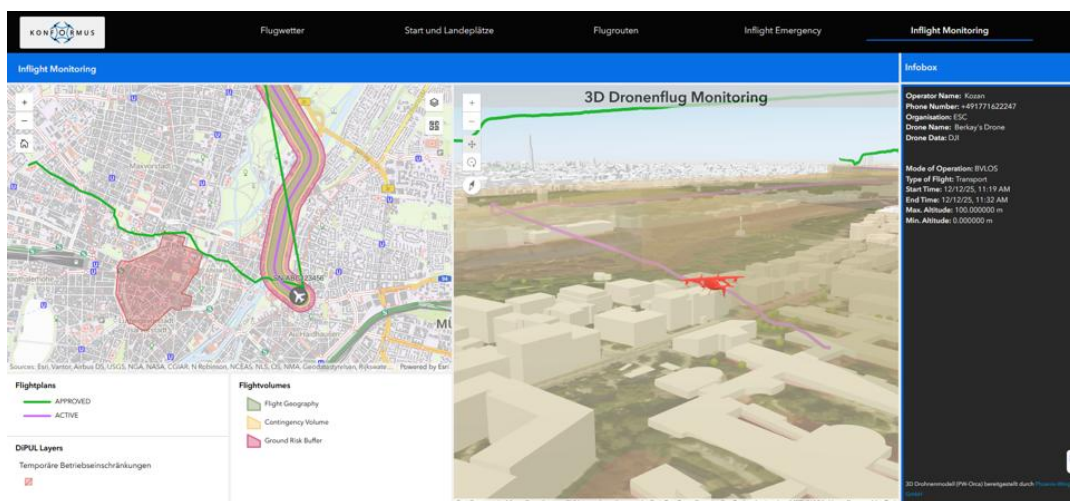


Abbildung 2.5.6 - 3: Dashboardansicht mit Inflight-Monitoring in 2D und 3D

Zum Abschluss des Projektes wurden Testfälle definiert, um das Gesamtsystem mittels systematischer Ende-zu-Ende-Tests zu optimieren und die unterschiedlichen Use Cases zu validieren. Zur Validierung der Ergebnisse wurden Hard- und Software sowie die Kommunikation mit einer Testdrohne demonstriert. Die Tests erfolgten in enger Abstimmung mit den Projektpartnern uVigilant und esc und umfassten sowohl Fehleridentifikation und -behebung als auch gezielte Systemverbesserungen.

Erfahrung, wesentliche Ergebnisse

Der Beitrag von PSU zu dem Forschungsprojekt wurde in sechs Arbeitspaketen für die Aufgaben des GIS-Datenproviders für autonome Transportflüge von medizinischen Gütern zwischen Münchner Kliniken und Laboren bereitgestellt.

1. Bezogen auf die Projekt Anforderungen für den GIS-Einsatz wurde ein verlässliches und skalierbares 2D- und 3D-Geodatenmodell für urbane Lufträume definiert, dessen Inhalte allen relevanten Stakeholdern für die Planung und Durchführung von unbemannten Drohnenflügen im U-Space zur Verfügung gestellt werden kann.
2. Entwicklung der Methodik zur Auswahl und Aufbereitung aller projektrelevanten GIS- und BIM-Daten für das Datenmodell wie z. B. 2D- und 3D-Geobasisdaten, Digitaler Zwilling der Stadt München, luftraumspezifische Daten und Umweltinformationen wie lärmempfindliche Gebiete und Schutzgebiete. Dazu wurden relevante Standards und Vorgaben für U-Space-Geodienste u. a. ED-269 (Minimum Operational Performance Standard for UAV Geo-Fencing, Eurocae), LuftVO § 21h, (Regelung für Geografische Gebiete) sowie das Konzept zur „Einrichtung von U-Spaces in Deutschland“ (BMDV 2022) als auch die Digitale Plattform Unbemannte Luftfahrt (DIPUL).
3. Die ausgewählten Geodaten wurden für die Nutzung in einer Webumgebung zur internen Kommunikation über gemeinsam mit den Projektpartnern festgelegte Datenformate und Schnittstellen zu dem Webserver des USSP bereitgestellt.
4. Im Projektverlauf wurden die Schnittstellen zu den übrigen Subsystemen definiert, um eine zuverlässige Datenübermittlung zwischen GIS-Provider und USSP sicherzustellen. Hierzu wurde eine Architektur für die Übertragung von Geodaten, Echtzeitdaten und Flugplänen aufgebaut. Die Schnittstellen wurden über HTTP-basierte APIs realisiert, umfassend getestet und optimiert.
5. Zur Visualisierung aller 2D- und 3D-GIS und Echtzeitdaten wurde für alle Stakeholder ein Dashboard mit der ESRI Software Experience Builder entwickelt und technisch in eine USSP-App integriert, um eine konsistente Nutzung der Informationen zu gewährleisten. Die Nutzeransichten des erweiterbaren Dashboards umfassen zunächst alle relevanten Daten zur Flugplanung, Flugwetter, Start- und Landeplätze, Flugrouten, Inflight Emergency, Inflight Monitoring sowie die Webcams der Start- und Landeplätze der Transportdrohnen.
6. Im abschließenden Arbeitspaket wurden Testfälle definiert, um das Gesamtsystem mittels systematischer Ende-zu-Ende-Tests zu optimieren und die unterschiedlichen Use Cases zu validieren. Die Tests erfolgten in enger Abstimmung mit den Projektpartnern uVigilant und esc und umfassten sowohl Fehleridentifikation und -behebung als auch gezielte Systemverbesserungen. Ergänzend wurde eine umfassende Anwenderdokumentation für die Nutzung des Dashboards erstellt. Die Ergebnisse aller sechs Arbeitspakete wurden in einem Abschlussbericht zusammengeführt und bei der Abschlusspräsentation mit einem Live-Demonstrationsflug mit einer Testdrohne zur Visualisierung der Echtzeit Flugpositionen im Dashboard dem Projektförderer vorgestellt.

Fazit

Das Vorhaben, das mit drei Partnern und zwei Unterauftragnehmern von PSU im Dezember 2025 mit 24 Monaten Bearbeitungszeit erfolgreich abgeschlossen wurde, hat mit den hier dargestellten Ergebnissen alle Projektziele für die Aufgaben eines GIS-Providers zur Aufbereitung, Bereitstellung und Visualisierung von projektrelevanten GIS-Daten für einen U-Space Service Provider (USSP) erreicht. Auf der Grundlage der Projektergebnisse können im nächsten Schritt erste Prototypen zu realen Tests mit interessierten Anwendern erfolgen.

Referenzen/ Weiterführende Links

Die Umsetzung und Programmierung der Dashboards erfolgte gemeinsam mit dem Unterauftragnehmer ili gis-services (info@ili-gis.com). Die Aufbereitung von Web Maps für die Einpflege von GIS-Daten in das System wurde von Holm Seifert (holm.seifert@smart-gismaps.de) unterstützt. Für die Verarbeitung von Echtzeit-Flugdaten wurde in Zusammenarbeit mit ESRI Deutschland die ESRI Cloud-Lösung „Velocity“ eingesetzt, mit der aktuelle Drohnenpositionen verarbeitet und in Web Maps in 2D und 3D im Digitalen Stadtmodell visualisiert werden können.

Kontakte

Jörg Schaller- | j.schaller@psu-schaller.de

Lisa Bareiss | l.bareiss@psu-schaller.de

Prof. Schaller UmweltConsult GmbH (PSU)

www.psu-schaller.de;

Bertram Zöllner | bertram.zoellner@uvigilant.de

Bearbeitung HAP 5: U-Space-Geodaten mit Dashboard

Andreas Hausotter | andreas.hausotter@esc-aerospace.de

Projektkoordinator KONFORMUS und Bearbeitung der USSP Anforderungen

Helmut Klanner | Helmut.Klanner@esc-aerospace.de

Bearbeitung Kommunikationssystem

2.6 Bauwesen und Denkmalschutz

2.6.1 3D-Rekonstruktion von Kulturgütern mit AliceVision Meshroom

Autor: Simon Schütte

Italien verfügt über eine Vielzahl historischer Klosteranlagen. Eine davon ist La Romita, ein über 800 Jahre altes Kloster in den umbrischen Bergen. Es befindet sich in geschützter Lage auf einer Bergnase in unmittelbarer Nähe der antiken römischen Stadt Carsulae bei Terni.

Im Zuge der Säkularisierung wurde die Anlage 1866 aufgelöst und verfiel in der Folgezeit. Erst 1991 begann Bruder Bernardino gemeinsam mit zahlreichen freiwilligen Helferinnen und Helfern mit dem Wiederaufbau¹. Seither hat sich La Romita zu einem lebendigen Ort franziskanischer Gemeinschaft entwickelt, der Pilger und Besucher gleichermaßen anzieht.

Bereits in den 1990er-Jahren wurde der Gebäudekomplex im Rahmen der Wiederaufbauarbeiten vermessungstechnisch erfasst, wenngleich einzelne Bauwerke zu diesem Zeitpunkt noch vollständig zerstört waren. Im Jahr 2019 erfolgten erstmals Drohnenbefliegungen (DJI Mavic Pro), deren Bilddaten als Grundlage für eine photogrammetrische Rekonstruktion des Klosterensembles dienten. Eine weitere, deutlich präzisere Datenerfassung wurde 2022 im Rahmen des F-Atlas-Projekts² durchgeführt, wobei sowohl Drohnenaufnahmen als auch LIDAR-Technologie zum Einsatz kamen. Im Zuge der fortschreitenden digitalen Erschließung ist vorgesehen, beide Datensätze miteinander zu kombinieren. Das nachfolgende Beispiel basiert auf den Befliegungsdaten aus dem Jahr 2019, da der Autor hier über die uneingeschränkten Nutzungsrechte verfügt.

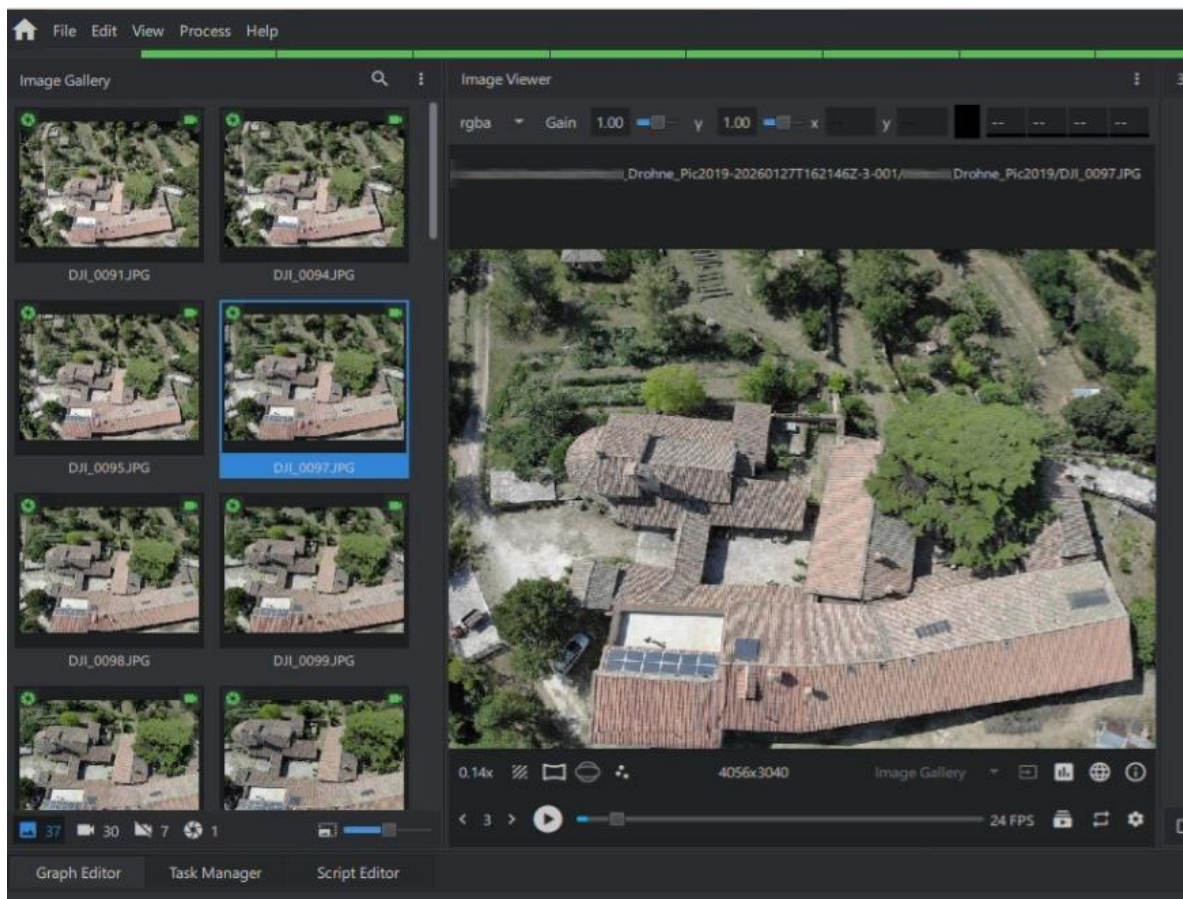


Abbildung 2.6.1 - 1 Meshroom: Vorschaubilder des Klosters

Ziel der digitalen Rekonstruktion ist in erster Linie eine umfassende Bestandsdokumentation sowie die Ableitung präziser Gebäudegrundrisse und Schnittdarstellungen, die eine wichtige Grundlage für die Bewirtschaftung und Instandhaltung der Anlage bilden. Darüber hinaus ermöglicht das 3D-Modell die räumliche Verortung historischer Fotografien und unterstützt die bauhistorische Forschung. So lassen sich etwa frühere Bauzustände rekonstruieren, indem jüngere Bauteile im Modell virtuell entfernt werden. Die photogram-

metrische Auswertung erfolgte mit der Open-Source-Software AliceVision Meshroom. Die zugrunde liegenden Bilddaten wurden aus unterschiedlichen Flughöhen aufgenommen und umfassen sowohl orthogonale als auch schräge (oblique) Perspektiven.

Mit Meshroom wurde bewusst eine offene und kostenfrei verfügbare Softwarelösung gewählt, die sowohl durch Benutzerfreundlichkeit als auch durch hohe Ergebnisqualität überzeugt. Im Gegensatz zu vielen proprietären Anwendungen bietet sie die Möglichkeit, in jeden einzelnen Verarbeitungsschritt des Rekonstruktionsprozesses einzugreifen. Zudem können sämtliche Zwischenergebnisse in offenen Formaten exportiert werden, wodurch eine langfristige, herstellerunabhängige Weiterverwendung der Daten gewährleistet ist.

Für die photogrammetrische Auswertung wurde in Meshroom das vordefinierte „*Photogrammetry*“-Template verwendet. Die im Rahmen der Drohnenbefliegung aufgenommenen Bilder lassen sich dabei komfortabel per Drag-and-Drop in den *Image Viewer* importieren (Abb. 2.6.1 - 1). Die weitere Verarbeitung erfolgt in Form eines node-basierten Workflows, der sämtliche Prozessierungsschritte transparent abbildet und eine gezielte Anpassung einzelner Parameter sowie ganzer Verarbeitungsketten ermöglicht.

Die Standardpipeline für photogrammetrische Rekonstruktionen umfasst elf aufeinander aufbauende Verarbeitungsschritte (Abb. 2.6.1 - 2). Zunächst werden im Schritt *CameraInit* die grundlegenden Metadaten des Datensatzes sowie Kameraparameter definiert. Es folgt die *FeatureExtraction*, bei der charakteristische Bildmerkmale mittels verschiedener Algorithmen identifiziert werden.

Im Anschluss bestimmt *ImageMatching* potenziell korrespondierende Bildpaare, während *FeatureMatching* eine detaillierte Zuordnung der Merkmale vornimmt.

Im zentralen Schritt *StructureFromMotion* werden diese Korrespondenzen genutzt, um aus den zweidimensionalen Beobachtungen die dreidimensionale Szenengeometrie sowie die Position und Orientierung der Kameras zu rekonstruieren. Die Rekonstruktion wird dabei inkrementell erweitert, wodurch eine erste Punktwolke entsteht. Nach der Vorbereitung der Szene durch *PrepareDenseScene*, einschließlich der Bereitstellung entzerrter Bilder, folgt mit *DepthMap* die Berechnung von Tiefeninformationen auf Basis von Multi-View-Stereo-Verfahren, wofür eine NVIDIA-GPU erforderlich ist.



Abbildung 2.6.1 - 4: Extrahierte Features, Structure from Motion Punktwolke, Tiefeninformationen (blau), Mesh, Texturiertes Mesh

Im Schritt *DepthMapFilter* werden fehlerhafte oder instabile Tiefenwerte bereinigt. Darauf aufbauend generiert *Meshing* ein dichtes Oberflächenmodell, das optional auch als rohe dichte Punktwolke exportiert werden kann. *MeshFiltering* dient der weiteren Qualitätsverbesserung durch Entfernung von Artefakten. Abschließend werden im Schritt *Texturing* die Oberflächentexturen berechnet und auf das Modell projiziert, sodass ein vollständig texturiertes 3D-Mesh entsteht.

Die ersten Verarbeitungsschritte sind dem *Structure-from-Motion-Verfahren* zuzuordnen, während die anschließenden Schritte auf *Multi-View-Stereo-Methoden* basieren. Das Ergebnis ist ein hochauflösendes, texturiertes 3D-Modell des Klosterkomplexes.

Die Standardkonfiguration der Pipeline ist so ausgelegt, dass in vielen Anwendungsfällen keine Anpassungen erforderlich sind. Für weiterführende Analysen oder Optimierungen können jedoch in jedem Verarbeitungsschritt zahlreiche Parameter angepasst und alternative Algorithmen ausgewählt werden. Zudem besteht die Möglichkeit, das Rekonstruktionsgebiet im *Meshing*-Node über eine Bounding Box räumlich zu begrenzen.

Eine Skalierung und grobe Georeferenzierung kann über den *SfMTransform*-Node (Option „*FromGPS*“) unter Nutzung der in den EXIF-Daten enthaltenen GPS-Informationen erfolgen, wodurch auch Teilrekonstruktionen effizient realisierbar sind.

Nach dem Import der Bilddaten und optionalen Anpassungen kann der Rekonstruktionsprozess gestartet werden.

Die resultierenden Modelle stehen in verschiedenen Ausgabeformaten zur Verfügung, die im *Texturing*-Node definiert werden können. Die erzeugten texturierten Meshes lassen sich direkt im integrierten 3D-Viewer visualisieren oder in externe Softwareumgebungen exportieren. Im vorliegenden Anwendungsfall wurde das generierte OBJ-Modell in *CloudCompare*³ weiterverarbeitet und in ein Rasterformat überführt, um eine Georeferenzierung und Integration in GIS-Systeme zu ermöglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass bereits mit handelsüblichen Drohnensystemen und frei verfügbarer Open-Source-Software qualitativ hochwertige 3D-Rekonstruktionen erzielt werden können.

Ein Anwendungsfall des 3D Modells liegt in der Verortung historischer Fotografien. So sind beispielsweise einer Fotografie aus dem Jahr 1906⁴ beim Zugang zum Klosterkomplex noch hohe Mauern zu erkennen, die heute nicht mehr so bestehen.

Nun kann einfacher rekonstruiert werden, wie der Zugang vor 120 Jahren aussah (Abb. 2.6.1 - 3).



Abbildung 2.6.1 - 3: Rekonstruktion: Zugang La Romita 1906

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich AliceVision Meshroom insbesondere für den Einstieg in die Photogrammetrie sowie für Anwendungsszenarien eignet, in denen Transparenz und Anpassbarkeit der einzelnen Verarbeitungsschritte von zentraler Bedeutung sind. Dies gilt sowohl für den Einsatz in der Denkmalpflege, der Archäologie sowie in Forschung und Lehre als auch für eine Vielzahl weiterer Anwendungsfelder.

Darüber hinaus ermöglicht die MIT-Lizenz eine unkomplizierte Integration in kommerzielle Workflows. Gleichzeitig werden durch den Verzicht auf proprietäre Software und Formate günstige Voraussetzungen für eine nachhaltige und langfristige Archivierung geschaffen.

Referenzen

¹ Bruder Bernardino: La Romita: Utopia?, Münster (2024), ISBN: 978-9-40374-971-6

² Cottini, Anastasia & Becherini, Pietro. (2023). Integrated investigation methodologies for architectural Heritage conservation and promotion: La Romita di Cesi (TR), Umbria, Italy. VITRUVIO - International Journal of Architectural Technology and Sustainability. 8. 84-93. 10.4995/vitruvio-ijats.2023.18842

³ CloudCompare, 3D point cloud and mesh processing software, Open-Source Project: <https://www.cloud-compare.org/>

⁴ L. Lanzi in: Augusta Perusia. Rivista di topografia, arte e costume dell' Umbria (1906), S.75

Kontakt

AliceVision Meshroom Team, private Mailing Liste:

alicevision-team@googlegroups.com

<https://github.com/alicevision/>

<https://alicevision.org>

<https://meshroom.org>

2.7 Sonstiges

2.7.1 Drohneneinsätze, LIDAR und Deep Learning zur Kollisionsvermeidung von Vegetation und Freileitungen

Verfasser: Peter Saiger-Bonnas

Die Bedeutung kritischer Infrastruktur rückt in Zeiten zunehmender Extremwetterereignisse, wachsender Netzlasten und steigender Anforderungen an Versorgungssicherheit immer stärker in den Fokus. Stromnetze stellen dabei einen elementaren Bestandteil dieser Infrastruktur dar, denn sie gewährleisten die kontinuierliche Versorgung von Bevölkerung, Industrie und öffentlichem Sektor.

Hoch-, Mittel- und Niederspannungsleitungen sind aufgrund ihrer geographischen Ausdehnung und exponierten Lage jedoch permanent Umwelteinflüssen ausgesetzt. Schäden an diesen Leitungen können gravierende Folgen haben - von regionalen Versorgungsausfällen bis hin zu Störungen überregionaler Verbundnetze. Vor diesem Hintergrund gewinnt die regelmäßige, präzise und möglichst effiziente Überwachung der Leitungsinfrastruktur zunehmend an Bedeutung.

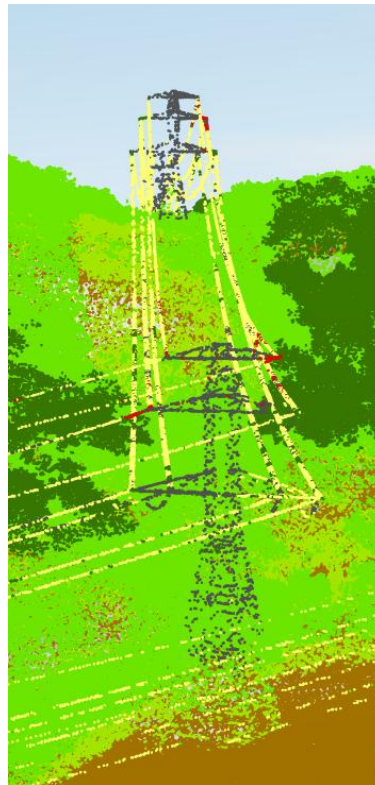


Abbildung 2.7.1 - 1: Mittels Deep Learning klassifizierte Punktwolke

Netzinspektion mit Drohnen

Die Nutzung von Drohnen in der Netzinspektion schafft dabei den entscheidenden Vorteil: Leitungen können flexibel, schnell und vergleichsweise kostengünstig befliegen werden. Die Drohne folgt einer programmierten Flugroute entlang der Trasse, während ein LIDAR-System laufend hochpräzise Distanzmessungen durchführt. Millionen einzelner Punkte entstehen so in jedem Flugabschnitt, die gemeinsam eine dichte dreidimensionale Punktwolke bilden.

Diese Punktwolke enthält alle für die Analyse relevanten Objekte: die Freileitungen selbst, Masten, Bodenstrukturen sowie die vollständige Vegetation im näheren Umfeld. Die Genauigkeit der LIDAR-Messung ermöglicht es, Objekte mit hoher Zuverlässigkeit zu erkennen und deren relative Lage zueinander millimetergenau zu bestimmen. Damit entsteht ein umfassendes Abbild der realen Situation entlang der gesamten Leitungstrasse, das als Datenbasis für automatisierte Analysen genutzt werden kann.

Automatisierte Klassifikation dank Deep Learning

Der Einsatz von Deep Learning hat die Verarbeitung solcher Punktwolken erheblich weiterentwickelt. Während klassische Analyseverfahren in der Regel auf geometrischen Regeln oder Schwellenwerten basierten und ihre Grenzen insbesondere bei komplexer Vegetation oder sich überlagernden Objekten fanden, erlauben neuronale Netze eine semantische Klassifikation auf hohem Abstraktionsniveau.

Das bedeutet, dass jeder Punkt der LIDAR-Daten automatisiert einer Objektklasse zugeordnet werden kann. Besonders relevant ist dabei die Einteilung der Vegetation in unterschiedliche Höhenkategorien. Diese Kategorisierung erfolgt in der Regel in die Klassen unterer, mittlerer und oberer Bewuchs.

- Unterer Bewuchs umfasst bodennahe Vegetation wie Gras und kleine Sträucher,
- während mittlerer Bewuchs beispielsweise niedrige Bäume oder dichter Buschbestand beinhaltet.
- Der obere Bewuchs umfasst schließlich ausgewachsene Bäume und hohe Vegetationsstrukturen, die potenziell eine direkte Gefährdung für Leitungen darstellen können.

Die präzise Unterscheidung dieser Kategorien ermöglicht eine differenzierte Gefährdungsanalyse, die weit über traditionelle Sichtprüfungen hinausgeht.

Reale Lage detailliert modellieren

Neben der Vegetation können auch die Freileitungen selbst durch Deep-Learning-Modelle erkannt und geometrisch rekonstruiert werden. In GIS-Umgebungen wie ArcGIS besteht die Möglichkeit, die Punktwolke automatisch auszuwerten und die einzelnen Leiterseile als vektorisierte, dreidimensionale Leitungsgeometrien zu extrahieren. Dieser Prozess bietet nicht nur eine saubere Trennung zwischen Vegetation und Infrastruktur, sondern bildet auch die Grundlage für anschließende Risikoanalysen, beispielsweise in Verbindung mit Echtzeit Wetterinformationen.

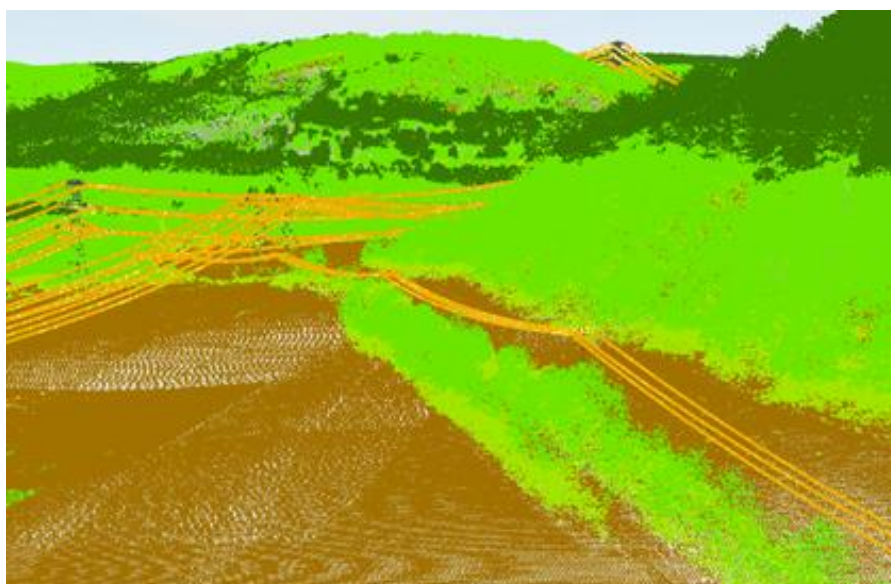


Abbildung 2.7.1 - 2: Mittels Deep Learning extrahierte Hochspannungsleitungen

Die geometrische Rekonstruktion erlaubt es, die reale Lage der Leiterseile detailliert zu modellieren, einschließlich der Seildurchhänge, Mastabstände und Spannfelder. Die resultierenden Leitungsmodelle können wiederum in simulationsbasierte Verfahren überführt werden, welche die dynamischen Veränderungen der Leitungsgeometrie unter verschiedenen Umweltbedingungen abbilden.

Dynamische Veränderungen abbilden

Freileitungen verändern ihre Position in Abhängigkeit von Temperatur, Witterung und mechanischen Belastungen. Besonders im Sommer, wenn hohe Temperaturen zu einer kapazitiven Wärmeausdehnung führen können, verlängern sich die Leiterseile und hängen stärker durch. Im Winter wiederum können Eis- und Schneelasten das Gewicht der Leitungen erhöhen und ebenfalls zu einem zusätzlichen Durchhang führen. Darüber hinaus können starke Windereignisse Schwingungen verursachen, die zu deutlichen Lageveränderungen der Leitungen führen.

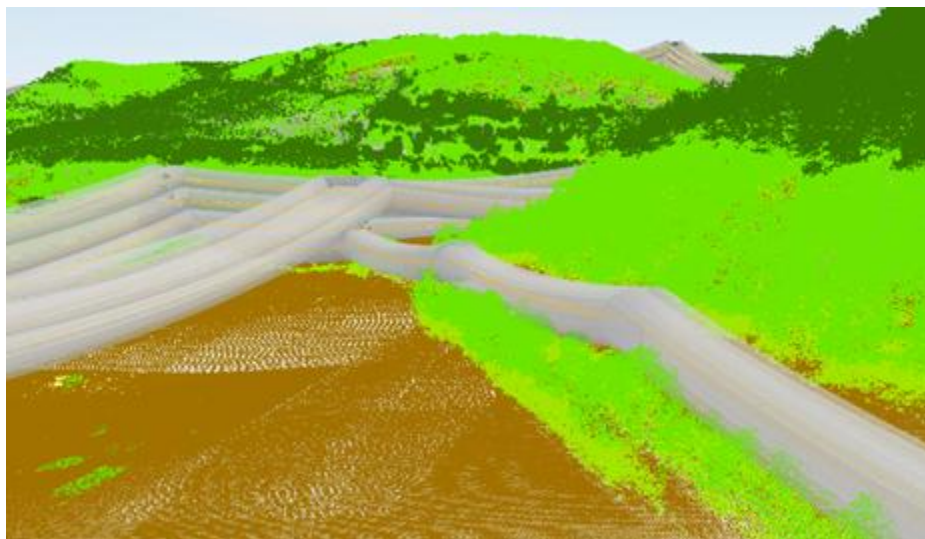


Abbildung 2.7.1 - 3: Pufferzonen um die extrahierten Leitungen

Diese Effekte machen eine rein statische Bewertung des Leitungsumfelds unzureichend. Stattdessen ist es erforderlich, um die modellierten Leitungen Pufferzonen zu definieren, die alle realistischen Lageveränderungen berücksichtigen. Diese Puffer repräsentieren den Raum, in dem sich die Leitungsseile unter Extrembedingungen bewegen können, ohne dass es zu einer Gefährdung kommen darf.

Risikobewertung und intelligente Überwachung

Da sowohl die Vegetation als auch die Leitungen bereits vollständig klassifiziert und geometrisch verfügbar sind, können diese Daten in einer räumlichen Analyse miteinander verschnitten werden. Dabei wird geprüft, ob Vegetationspunkte oder aus der Klassifikation abgeleitete Volumenkörper in die definierten Leitungspuffer hineinragen. Sobald dies der Fall ist, besteht ein potenzielles Risiko für eine Kollision zwischen Leitung und Vegetation. Solche Kollisionen sind unbedingt zu vermeiden, da sie Kurzschlüsse, mechanische Schäden oder großflächige Ausfälle verursachen können.

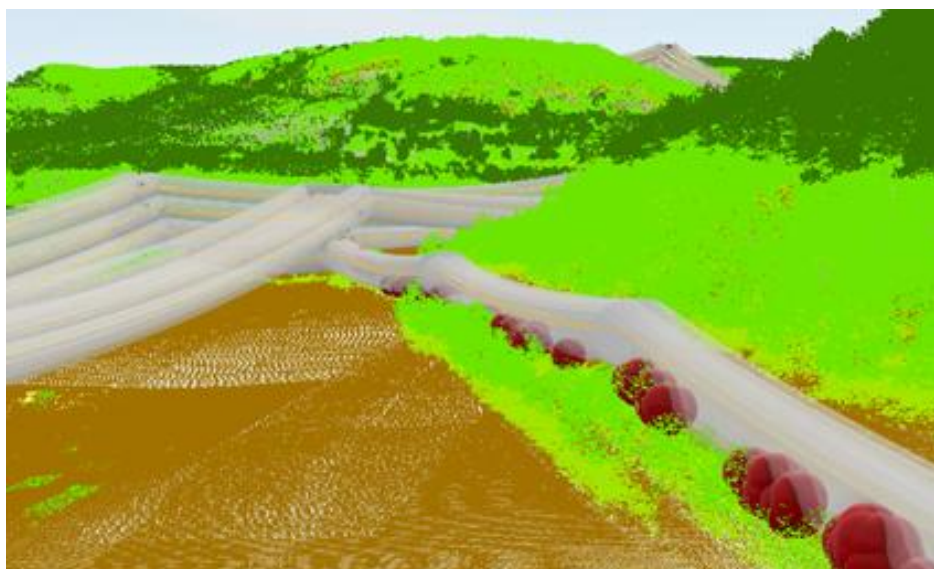


Abbildung 2.7.1 - 4: Rot markiert sind die Kollisionsbereiche des Bewuchses mit dem Leitungspuffer

Die Analyse liefert daher nicht nur einen Überblick über den aktuellen Zustand, sondern identifiziert konkret jene Bereiche, an denen unmittelbarer Handlungsbedarf besteht. Dies ermöglicht es Netzbetreibern, Rückschnittmaßnahmen gezielt zu planen und Prioritäten faktenbasiert festzulegen. Gleichzeitig wird durch die kontinuierliche Wiederholbarkeit der Drohnenbefliegungen eine zeitliche Überwachung möglich, die Veränderungen der Vegetationsentwicklung oder strukturelle Veränderungen an der Leitung frühzeitig erkennt.

Gefährdungen sichtbar machen und Resilienz steigern

Die Kombination aus Drohnentechnologie, LIDAR-Sensorik, Deep Learning und ArcGIS stellt somit einen Paradigmenwechsel in der Überwachung kritischer Infrastruktur dar. Sie ermöglicht eine objektive, hochpräzise und skalierbare Analyse des Leitungsumfelds, reduziert den Aufwand traditioneller Inspektionsmethoden und erhöht gleichzeitig die Sicherheit des gesamten Energieversorgungssystems.

Die automatisierte Datenauswertung führt zu deutlich kürzeren Inspektionszyklen, während der hohe Detaillierungsgrad der Daten zuverlässige Risikobewertungen erlaubt. Zudem trägt die Methode zur Erhöhung der Betriebssicherheit bei, da sie sowohl akute als auch potenziell zukünftige Gefährdungen sichtbar macht. In einer Zeit, in der die Resilienz des Energiesystems von zentraler Bedeutung ist, bieten diese Technologien einen wesentlichen Beitrag zur Stabilität und Leistungsfähigkeit der Netzinfrastuktur.

Referenzen / Weiterführende Links

Bilddaten und Fernerkundung integriert in GIS: <https://www.esri.de/de-de/arcgis/produkte/bilddaten-und-fernerkundung/uebersicht>

Drone Mapping mit ArcGIS: <https://www.esri.com/de-de/arcgis/products/arcgis-reality/platform/drone-mapping>

Kontakt

Peter Saiger-Bonnas

Esri Deutschland GmbH | info@esri.de Ringstr. 7, 85402 Kranzberg

+49 (0)89 207 005 1200

www.esri.de

2.7.2 Genauigkeit der Vermessung mit Drohnen - DJI Modelle im Vergleich

Verfasser: Samuel Werdecker

In der ingenieurgeodätischen Praxis spielt die Genauigkeit photogrammetrisch erfasster Punktwolken eine zentrale Rolle. Ziel dieses Projekts war es, die Leistungsfähigkeit und Genauigkeit verschiedener Drohnenmodelle bei der Erstellung von 3D-Punktwolken zu bewerten.

Im Fokus standen:

- Unterschiede durch Kameratechnologie (Global vs. Rolling Shutter)
- Einfluss eines RTK-Moduls
- Auswirkungen unterschiedlicher Flugmuster und Höhen



Abbildung 2.7.2 - 1: Die DJI Drohnen M3E, M4T und M4E

Technischer Hintergrund: Shutter-Arten

Rolling Shutter (z. B. DJI M3T, M4T):

Die Sensorzeilen werden nacheinander ausgelesen. Bei Bewegung entstehen dadurch Verzerrungen - besonders bei schnellen Flügen.

Global Shutter (z. B. DJI M3E, M4E):

Das gesamte Bildfeld wird gleichzeitig belichtet. Dadurch entstehen nahezu keine Verzerrungen - ein entscheidender Vorteil bei präziser Vermessung.

Testaufbau & Versuchsreihen

Die Tests wurden an mehreren Tagen unter identischen Bedingungen durchgeführt. Insgesamt wurden über 60 Flüge durchgeführt, berechnet und ausgewertet.

Jedes Modell absolvierte Flüge in:

- 20m und 40m Flughöhe AGL
- langsamer (0,5 m/s) und schneller (> 6 m/s) Geschwindigkeit
- Nadir-Modus (senkrecht)
- Ausgewertet wurden die Messdaten in 3Dsury und DJI Terra.

Zusätzliche Versuchsreihen

- RTK aktiv vs. RTK deaktiviert
- Rolling vs. Global Shutter (M3T vs. M3E)
- POI-Flug (Drohne umkreist Objekt)
- Geneigte Kamera (75° statt 90°)
- Smart-3D-Modus
- Oblique-Flug (5 Seiten)
- Zeitintervall vs. Distanzintervall-Aufnahme

Ergebnis: Die Global-Shutter-Modelle (M3E, M4E) liefern Abweichungen von nur wenigen Zentimetern (ca. 2cm). Rolling-Shutter-Drohnen weichen bei schlechten Bedingungen (hohe Fluggeschwindigkeit) oft mehr als 0,5m ab! Ähnliche Genauigkeiten konnten nur bei sehr langsamen Flügen unter 0,1m/s festgestellt werden.

Einfluss von RTK

Der Vergleich zwischen Flügen mit und ohne RTK zeigt:

Mit aktivem RTK sinken die Abweichungen deutlich. Ohne RTK traten ca. 20 % höhere Ungenauigkeiten auf. In der Höhengenaugkeit sind die Unterschiede weitaus gravierender (ca. 3cm vs. 9cm).

Einfluss der Flugplanung

- POI-Flüge zeigten die schlechtesten Ergebnisse.
- Langsamflüge ($\leq 0,5$ m/s) verbesserten die Genauigkeit deutlich - besonders bei Rolling-Shutter-Drohnen.
- Schrägaufnahmen (Oblique-Flüge) erhöhten die Höhengenaugkeit.
- Der Unterschied zwischen 20 m und 40 m Höhe war bei aktiviertem RTK gering, ohne RTK jedoch deutlich spürbar.

Interpretation & Empfehlungen

- Rolling Shutter → nur eingeschränkt geeignet für hochpräzise Vermessung.
- Langsame Fluggeschwindigkeit kann Fehler reduzieren.
- Global Shutter + RTK → liefert die besten und konstantesten Ergebnisse.
- Schrägaufnahmen (statt nur Nadir-Bilder) verbessern die Höhengenaugkeit.
- Vertikale Genauigkeit bleibt naturgemäß etwas schlechter als die horizontale (GNSS-Limitierungen).

Fazit

Für professionelle Vermessungszwecke sind Global-Shutter-Drohnen mit RTK (wie die DJI M3E und M4E) uneingeschränkt zu empfehlen.

- Rolling-Shutter-Drohnen (z. B. M3T, M4T) nur bedingt geeignet
- Mini 3 Pro liefert für Hobby- oder Grobausätze akzeptable, aber nicht präzise Ergebnisse
- Die optimale Genauigkeit lag bei etwa ± 3 cm (Global Shutter-Drohne mit RTK im Langsamflug, gute Lichtverhältnisse)

Weiterführende Links

<https://www.caddy-geomatics.de/wp-content/uploads/2025/11/Bericht-Genauigkeit-DJI-im-Vergleich-by-Samuel-Werdecker.pdf>

Kontakt

Samuel Werdecker | info@caddy-geomatics.de
 CADdy Geomatics GmbH, Schatzbogen 65, 81829 München
 +49 (0)89 427422 0

2.7.3 Brückenschlag durch geo-Cluster-Zwillinge auf Basis europäischer Referenzstandards

Verfasser: Roman Brylka

Föderierte räumliche Intelligenz für GNSS-unabhängige Drohnenavigation - GIS als Quelle der Kontextualisierung

Einleitung

Unbemannte Flugsysteme (UAS) haben sich in den vergangenen Jahren zu einem wichtigen Werkzeug für Vermessung, Infrastrukturmonitoring, Logistik, Katastrophenschutz und industrielle Anwendungen entwickelt. Moderne Drohnen erfassen hochaufgelöste Bilddaten, thermische Informationen, Punktwolken oder Sensordaten nahezu in Echtzeit und stellen diese für Geoinformationssysteme (GIS) bereit. Trotz dieser technologischen Fortschritte beruhen viele heutige Navigations- und Missionssysteme jedoch weiterhin stark auf satellitengestützten GNSS-Diensten wie GPS oder Galileo. In urbanen Räumen, Industrieanlagen, Tunneln, Waldgebieten oder kritischen Infrastrukturen stoßen solche Systeme jedoch an Grenzen. Abschattungen, Signalstörungen oder gezielte Manipulationen können dazu führen, dass eine stabile Positionsbestimmung nicht mehr zuverlässig möglich ist.



Abbildung 2.7.3 - 1

Vor diesem Hintergrund untersucht ein konsortiales Forschungs- und Entwicklungsprojekt einen alternativen Ansatz: die GNSS-unabhängige Navigation von Drohnen auf Basis föderierter geo-Cluster-Zwillinge. Im Mittelpunkt steht dabei nicht allein die Navigation selbst, sondern die Nutzung von GIS als Quelle der räumlichen Kontextualisierung. Ziel ist es, der Drohne ein räumliches Verständnis ihrer Umgebung zu vermitteln und dieses Verständnis direkt in die Missionslogik einzubinden.

Die technologische Grundlage bilden bestehende geo-Cluster-Zwillinge, die bereits produktiv in unterschiedlichen Bereichen eingesetzt werden. Dazu gehören Anwendungen in der Transportlogistik, im Baustellenmanagement, in der Klimaresilienzplanung sowie in dynamischen Lagebildsystemen. Das Forschungsprojekt erweitert diese Systeme nun um eine onboard-fähige räumliche Intelligenz für autonome oder teilautonome Drohnensysteme.

Geo-Cluster-Zwillinge als räumliche Wissenssysteme

Ein geo-Cluster-Zwilling ist ein räumlich strukturierter digitaler Zwilling, der Informationen nicht nur visualisiert, sondern in einen persistenten Raum-Zeit-Kontext einordnet. Grundlage dafür ist ein hierarchisches Referenzraster auf Basis sogenannter Open AreaSeals (OAS). Diese bilden standardisierte Rasterelemente unterschiedlicher Größenordnungen ab und ermöglichen eine konsistente räumliche Referenzierung von Daten - von einem Meter bis zu mehreren Kilometern Auflösung.

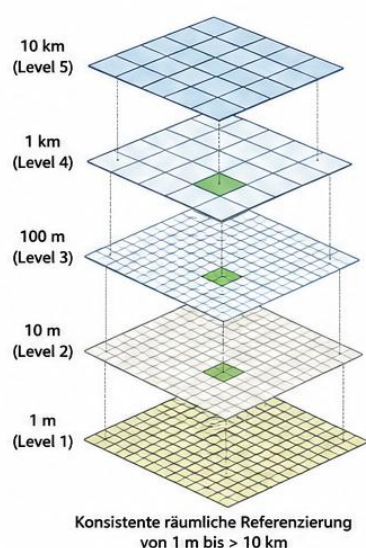


Abbildung 2.7.3 - 2

Die Speicherung und Organisation der Informationen erfolgt in der selbststrukturierenden Datenarchitektur Open geoGRIM. Während klassische GIS-Systeme häufig daten- oder layerorientiert arbeiten, verfolgt geoGRIM einen raumzentrierten Ansatz. Informationen werden direkt an räumliche Rasterelemente gekoppelt und dadurch automatisch in Beziehung zu Nachbarelementen, übergeordneten Bereichen oder zeitlichen Veränderungen gesetzt.

Dadurch entsteht ein System, das räumliche Zusammenhänge nicht nur speichert, sondern aktiv interpretierbar macht. Für Anwendungen wie Logistik oder Baustellenmanagement bedeutet dies beispielsweise, dass Bewegungen, Zustände oder Risiken unmittelbar räumlich kontextualisiert werden können. In der Klimaresilienzplanung lassen sich Wärmeinseln, Überflutungsbereiche oder kritische Infrastrukturzonen persistent analysieren und über unterschiedliche Maßstabsebenen hinweg miteinander verknüpfen.

Diese bereits produktiv eingesetzten geo-Cluster-Zwillinge bilden die Grundlage für die Erweiterung in Richtung intelligenter UAS-Navigation.

Ground Control als förderierter geo-Cluster-Zwilling

Im Forschungsprojekt übernimmt ein Ground-Control geo-Cluster-Zwilling die zentrale räumliche Missionskoordination. Dieser basiert auf Open AreaSeals und Open geoGRIM und fungiert als räumliches Wissens- und Kontextsystem für die Drohne.

Vor Beginn einer Mission werden durch das System die Missionsparameter erzeugt. Dazu gehören Flugrouten, Höheninformationen, operative Aufgaben oder sicherheitsrelevante Zonen. Gleichzeitig stellt der geo-Cluster-Zwilling den räumlichen Kontext der Mission bereit. Die Drohne erhält nicht nur Koordinaten, sondern Informationen über die räumliche Struktur ihrer Umgebung.

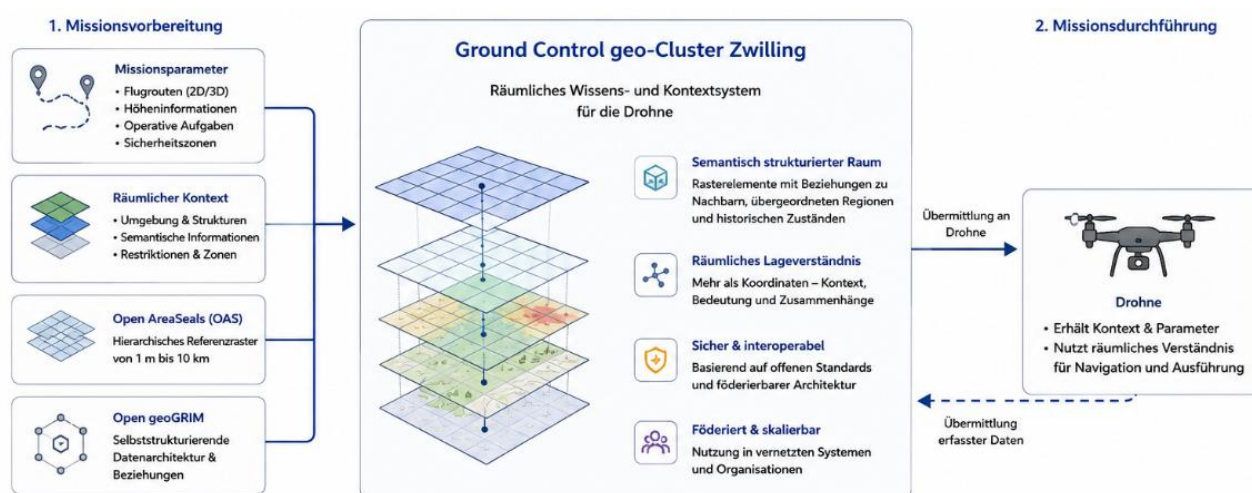


Abbildung 2.7.3 - 3

Ein entscheidender Unterschied zu klassischen Navigationssystemen liegt darin, dass die Umgebung nicht als abstrakter Koordinatenraum verstanden wird, sondern als semantisch strukturierter Raum. Rasterelemente besitzen Beziehungen zu Nachbarelementen, zu übergeordneten Regionen oder zu historischen Zuständen. Dadurch entsteht ein räumliches Lageverständnis, das über reine Positionsbestimmung hinausgeht.

Nach Abschluss der Mission werden die erfassten Daten wieder an den geo-Cluster-Zwilling zurückgeführt. Dort entstehen persistente Raum-Zeit-Reihen, die langfristig analysierbar bleiben und in bestehende Lagebildsysteme integriert werden können.

Die Drohne als räumlich denkendes System

Ein wesentlicher Bestandteil des Projektes ist die onboard implementierte OAS-engine mit lokalem geoGRIM-Speicher. Diese bildet einen eigenständigen geo-Cluster-Zwilling innerhalb der Drohne und fungiert als räumliches Gedächtnis sowie als kontinuierliches Lageverständnis.

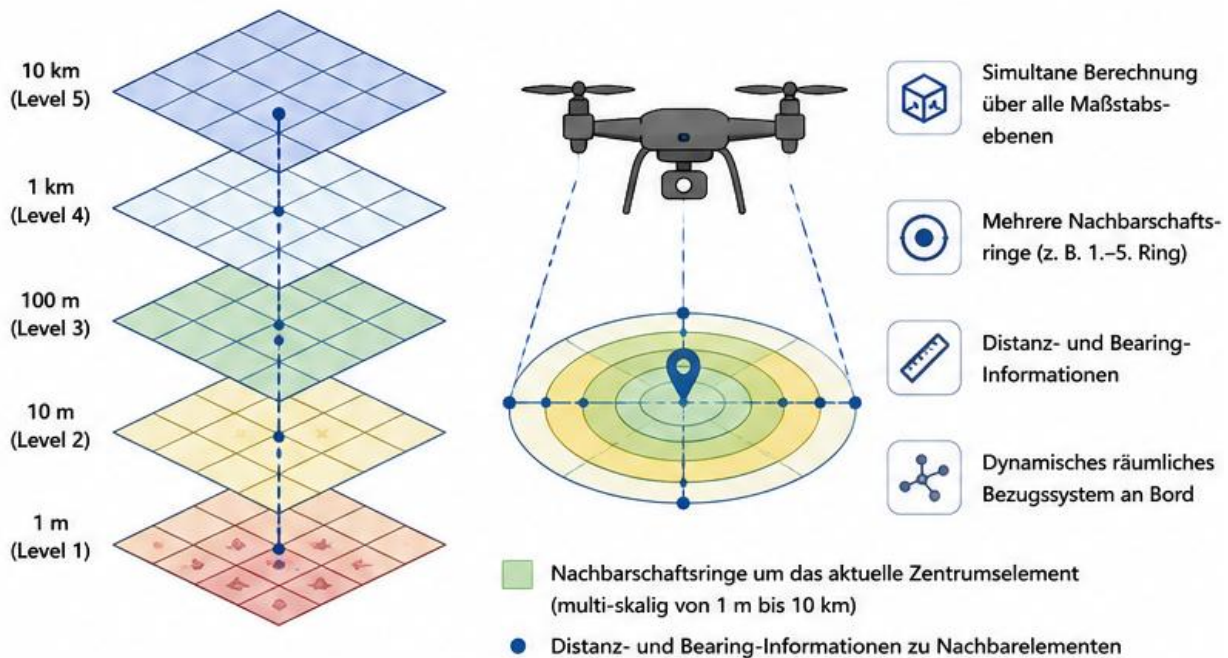


Abbildung 2.7.3 - 4

Die OAS-engine berechnet während des Fluges fortlaufend die umliegenden Rasterelemente auf Basis der Open AreaSeal-Struktur. Dabei werden simultan unterschiedliche Maßstabsebenen berücksichtigt - von hochaufgelösten 1-Meter-Rastern bis hin zu großräumigen 10-Kilometer-Strukturen. Um jedes aktuelle Zentrumselement werden mehrere Nachbarschaftsringe berechnet, einschließlich Distanz- und Bearing-Informationen.

Dadurch entsteht ein dynamisches räumliches Bezugssystem direkt innerhalb der Drohne. Die Navigation erfolgt nicht ausschließlich koordinatenbasiert, sondern über räumliche Relationen und Kontextinformationen.

Vor Missionsbeginn erhält die Drohne definierte Orientierungshilfen. In einer ersten Entwicklungsphase handelt es sich dabei um QR-Codes oder markante Referenzpunkte. Perspektivisch sollen zusätzlich topologische Merkmale, charakteristische Geländeformen oder visuelle Strukturen genutzt werden, die innerhalb des OAS-Rasters referenziert sind.

Zusätzlich werden die Missionsdaten vorab geladen. Dazu gehören zweidimensionale und dreidimensionale Flugrouten, vorgesehene Operationen innerhalb einzelner Rasterbereiche sowie relevante Kontextinformationen des Einsatzraumes.

Beim Start der Mission wird der Drohne mitgeteilt, in welchem Rasterelement sie sich initial befindet. Von diesem Punkt aus beginnt die onboard räumliche Navigation.

Navigation ohne GNSS

Während des Fluges berechnet die Drohne kontinuierlich ihre angenommene Position anhand von Geschwindigkeit, Bewegungsrichtung, Flughöhe und Zeit. Daraus wird fortlaufend die vermutete Position innerhalb des OAS-Rasters abgeleitet.

Parallel dazu berechnet die OAS-engine die umliegenden Nachbarelemente sowie deren räumliche Beziehungen. Durch den Abgleich mit den vorgeladenen Orientierungshilfen kann die Drohne ihre tatsächliche Position plausibilisieren und gegebenenfalls korrigieren.

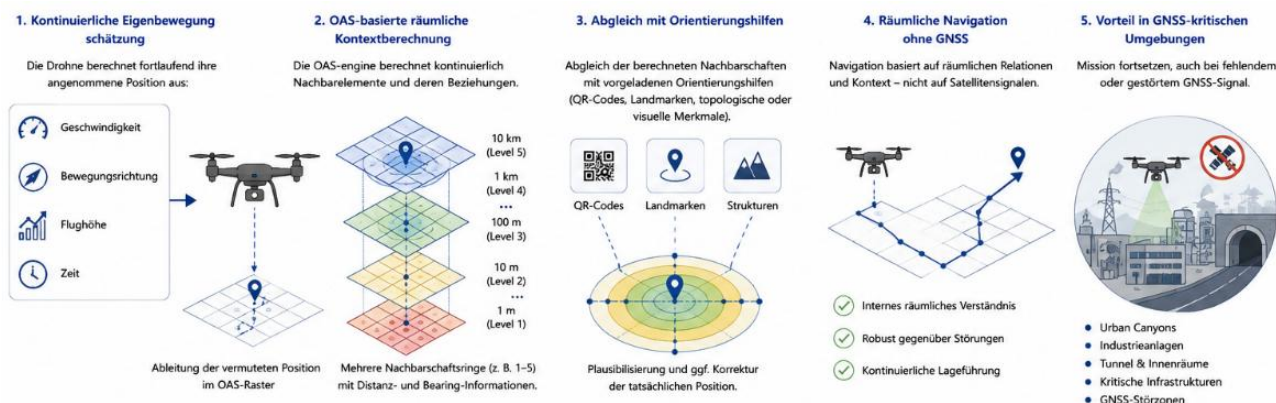


Abbildung 2.7.3 - 5

Der entscheidende Unterschied zu klassischen GNSS-Systemen besteht darin, dass die Navigation nicht ausschließlich auf externen Satellitensignalen basiert. Stattdessen nutzt die Drohne ein internes räumliches Verständnis ihrer Umgebung. Das GIS wird damit zur Quelle der Kontextualisierung und nicht lediglich zur nachgelagerten Visualisierung.

Gerade in kritischen Infrastrukturen, Industrieanlagen oder urbanen Räumen eröffnet dieser Ansatz neue Möglichkeiten. Selbst bei gestörtem oder fehlendem GNSS-Signal kann die Drohne ihre Mission innerhalb eines bekannten räumlichen Kontextes fortsetzen.

Dynamische Lagebilder und KI-Integration

Während der Mission erfasste Informationen werden unmittelbar mit Open AreaSeal-Codes versehen und damit räumlich referenziert. Dies ermöglicht eine direkte Integration in persistente Raum-Zeit-Strukturen des geo-Cluster-Zwillings.



Abbildung 2.7.3 - 6

In der ersten Projektphase erfolgt die Datenübertragung nach Abschluss der Mission. Perspektivisch ist jedoch vorgesehen, die Informationen bereits während des Fluges kontinuierlich an Ground Control zu übertragen. Dadurch entstehen hochdynamische Lagebilder nahezu in Echtzeit.

Die strukturierte räumliche Organisation der Daten schafft zugleich die Grundlage für weiterführende KI-Analysen. Business-Intelligence-Methoden, Machine-Learning-Verfahren oder Large Language Models können auf den persistenten Raum-Zeit-Reihen aufsetzen und Muster, Veränderungen oder Risiken erkennen.

Denkbar sind beispielsweise automatisierte Analysen von Infrastrukturzuständen, Anomalieerkennung in Industriearealen oder die kontinuierliche Beobachtung klimatischer Veränderungen in urbanen Räumen.

Bedeutung europäischer Referenzstandards

Ein zentraler Aspekt des Projektes ist die Orientierung an europäischen Referenzstandards und interoperablen räumlichen Strukturen. Open AreaSeals basieren auf standardisierten Rasterprinzipien, die eine konsistente Nutzung über unterschiedliche Systeme und Organisationen hinweg ermöglichen.

Gerade für föderierte Systeme gewinnt diese Interoperabilität zunehmend an Bedeutung. Unterschiedliche Akteure – etwa Infrastrukturbetreiber, Behörden, Rettungsdienste oder Industrieunternehmen – können räumliche Informationen austauschen, ohne vollständig identische Softwaresysteme nutzen zu müssen.

Damit entsteht ein Ansatz, der nicht nur für einzelne Drohnenmissionen relevant ist, sondern perspektivisch für vernetzte europäische Raum- und Lagebildsysteme genutzt werden kann.

Fazit und aktueller Projektstand

Das vorgestellte Forschungs- und Entwicklungsprojekt zeigt einen alternativen Ansatz zur klassischen GNSS-zentrierten Drohnenavigation. Durch die Kombination bestehender geo-Cluster-Zwillinge mit onboard-fähiger räumlicher Intelligenz entsteht ein System, das räumlichen Kontext unmittelbar in die Missionslogik integriert und GIS von einem primär visualisierenden Werkzeug zu einer aktiven Quelle der Kontextualisierung weiterentwickelt.



Abbildung 2.7.3 - 7

Die Nutzung föderierter geo-Cluster-Zwillinge auf Basis europäischer Referenzstandards ermöglicht dabei persistente, interoperable und mehrskalige Raum-Zeit-Strukturen. Dadurch entstehen neue Möglichkeiten für resiliente Navigationssysteme, dynamische Lagebilder sowie KI-gestützte räumliche Entscheidungsunterstützung in GNSS-kritischen Umgebungen.

Das Projekt befindet sich derzeit in einer fortgeschrittenen ersten Entwicklungs- und Integrationsphase. Der Ground-Control geo-Cluster-Zwilling ist bereits vollständig an bestehende GIS-Systeme sowie an die Missionsdatenverarbeitung der Drohnenplattform angebunden. Dadurch können erzeugte Missionsdaten unmittelbar mit weiteren raumbezogenen Informationsquellen fusioniert und für moderne analytische Verfahren bereitgestellt werden. Hierzu zählen insbesondere Business-Intelligence-Ansätze (BI), Machine-Learning-Verfahren (ML) sowie die Nutzung Large Language Models (LLM) zur Unterstützung dynamischer Lagebilder und interpretierbarer Entscheidungsprozesse.

Parallel dazu wurde eine graphische Benutzeroberfläche entwickelt, welche die missionsbezogene Interaktion mit dem geo-Cluster-Zwilling ermöglicht. Über diese Oberfläche können räumliche Missionsparameter definiert, operative Flugräume vorbereitet sowie kontextbezogene Basisinformationen für die Drohne generiert werden. Der geo-Cluster-Zwilling übernimmt hierbei die konsistente Bereitstellung der relevanten räumlichen Strukturen auf Basis des hierarchischen Open-AreaSeal-Referenzrasters.

Ein wesentlicher technologischer Meilenstein konnte zudem mit der erfolgreichen Anpassung der OAS-engine für den air-gapped Einsatz innerhalb der Drohnenplattform erreicht werden. Die Engine wurde hinsichtlich Speicherbedarf, Laufzeitverhalten und Stabilität für eingebettete Systeme optimiert und kann die relevanten räumlichen Nachbarschafts- und Kontextberechnungen in Echtzeit innerhalb der Flugplattform ausführen. Ergänzend dazu wurde ein adaptiertes Open-geoGRIM-Schema implementiert, das der Drohne einen zusätzlichen semantischen Layer für räumliches Gedächtnis und räumliches Verständnis bereitstellt.

Dadurch kann die Flugplattform räumliche Beziehungen nicht nur geometrisch, sondern auch kontextbasiert interpretieren.

Zur Absicherung der Systemarchitektur wurde parallel ein virtueller Simulationsraum aufgebaut. Dieser dient insbesondere der Analyse und Validierung der Wechselwirkungen zwischen Flugparametern, Missionslogik und räumlicher Orientierung innerhalb des geo-referenzierten OAS-Rasters. Der Simulator ermöglicht die kontrollierte Untersuchung unterschiedlicher Navigations- und Kontextualisierungsszenarien sowie die iterative Optimierung der zugrunde liegenden räumlichen Algorithmen.

Aktuell erfolgt die technische Vorbereitung und Umrüstung einer Drohnenplattform für reale Flugversuche. Ziel ist die schrittweise Evaluierung unterschiedlicher Betriebsmodi unter variierenden Navigationsbedingungen. Hierzu zählen insbesondere:

- klassische GNSS-Navigation ohne OAS-Unterstützung,
- degradierte GNSS-Szenarien mit zusätzlicher OAS-Kontextualisierung,
- sowie vollständig GNSS-unabhängige Navigationsansätze auf Basis der förderierten geo-Cluster Zwillinge.

Die bisherigen Ergebnisse und Systemtests zeigen eine hohe funktionale Stabilität der räumlichen Architektur sowie ein vielversprechendes Potenzial für resiliente Navigations- und Lagebildsysteme der nächsten Generation. Insbesondere die Kombination aus persistentem räumlichem Kontext, onboard-fähiger Kontextintelligenz und förderierter GIS-Integration eröffnet neue Perspektiven für autonome UAS-Anwendungen in Infrastruktur, Industrie, Katastrophenschutz und Umweltmonitoring.

Referenzen / Weiterführende Links

European Commission (2023): European Interoperability Framework for Smart Spatial Data Infrastructures. Brüssel.

Goodchild, M.F. (2020): Geographic Information Systems and Science. Wiley, Hoboken.

Batty, M. (2018): Digital Twins. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science.

Open Geospatial Consortium (OGC) (2022): OGC Standards and Interoperability Frameworks.

United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management (UN-GGIM) (2021): Future Trends in Geospatial Information Management.

European Union Agency for the Space Programme (EUSPA) (2024): GNSS and Resilient Navigation Systems in Europe.

TGB - THE GREEN BRIDGE (2025): Open AreaSeals und Open geoGRIM - Architektur förderierter geo-Cluster Zwillinge. Technische Projektdokumentation.Muster

INSPIRE Directive 2007/2/EC: Infrastructure for Spatial Information in the European Community.

Kontakt

Roman Brylka
 THE GREEN BRIDGE GmbH (TGB)
bry@the-green-bridge.com
 +49 (0)176 23985451
www.the-green-bridge.com



Präzision aus der Luft – Sicherheit am Boden

Drohnenanalysen mit ArcGIS für verlässliche
Risikobewertung und mehr Versorgungssicherheit

Weitere
Informationen



PhotoMesh

Hochperformante 3D-Modellierung von UAV-Daten



GEOSYSTEMS
THE GEOSPATIAL EXPERTS

An OHB Company



www.geosystems.de

Drohnen sind das Einfachste an der Drohnenvermessung.

Professionelle UAV-Vermessung verbindet komplexe **Hardware**, anspruchsvolle **Auswerte-Workflows** und ein dynamisches luftrechtliches Regelwerk in der **Speziellen Kategorie**.

Wir begleiten Fachanwender aus **Vermessung, Industrie und Verwaltung** auf genau diesem Weg – von der **Systemauswahl** über die SORA-konforme **Betriebsgenehmigung** bis zur **produktiven Auswertung** in Punktwolke, Mesh und Orthofoto.

Vermessung 

**Aus geodätischer Praxis.
Für anspruchsvolle Aufgaben.**

www.Vermessung3D.de

+49(0)2331 - 18 634 96
info@vermessung3d.de



ENTERPRISE
AUTHORIZED DEALER



OFFICIAL
RESELLER

3 Produktvorstellungen

3.1 Kommerzielle Software

3.1.1 3DF Zephyr

Author: 3DFlow

Key Features

3DF Zephyr is a complete photogrammetry pipeline that automatically reconstructs 3D models from photos or video, using structure-from-motion and multiview stereo algorithms to generate dense point clouds and high-resolution textured meshes for both small-scale objects and large-scale environments. It offers full multi-GPU support (NVIDIA CUDA and OpenCL), unlimited image input, comprehensive export capabilities covering point clouds, meshes, textured meshes and camera positions, as well as built-in GIS, CAD and survey tools including orthophoto, DEM and contour line generation and much more.

Special Features

The software supports native laser scan file formats and includes a multi-ICP registration algorithm for accurate laser-to-laser and laser-to-photogrammetry alignment, alongside batch processing via XML configuration, workspace merging, and video animation export with direct YouTube upload. Developed entirely in-house by Italian software house 3Dflow rather than relying on third-party computer vision libraries, 3DF Zephyr is available in multiple editions - including Lite, Pro, Aerial and Education - and runs on Windows. It comes with bundled a dedicated masking software (3DF Masquerade) in all versions, and the full version also comes bundled with a laser scan registration suite (3DF Scarlet) at no additional cost.

General information	
Manufacturer / provider	3Dflow SRL
Supported drone types	independent
Platform	Desktop (Windows 10, Windows 11)
Supported (input) data formats	.png, .jpeg, .tiff, .obj, .fbx, .ptx, .pts, .las, .e57, raw formats, heic, .fls, .rdbx, .dp, .etc
Output data formats	DSM, DEM, Mesh, Orthophoto, Point Clouds, Textured Mesh, etc.
Hardware requirements	OS: Windows 11/10 Processor: Quad-core Intel or AMD CPU Memory: 32GB System RAM Hard Disk: 20GB free HDD Space - SSD drive Video Card: video card with 4GB of RAM and Cuda Capabilities >= 3.5 or OpenCL >= 1.2
License models	Perpetual, Monthly Subscription, Yearly Sub.
Offline capabilities	Reserved for government entities
Price range RRP	€199+vat to €4200+vat
Additional information: Photogrammetry software	
Intermediate results accessible?	Yes, modern workspace allows for multiple workspace items (multiple dense clouds, Meshes and textured meshes), including both structured and non-structured elements. 3D editor for cleaning / manipulation at any stage is available.
Batch-processing	Yes
Additional information: Point cloud and LiDAR processing tools	
Classification tools	Yes, presets (trees, roads, buildings)
Registration options	ICP, Multi ICP, dedicated bundled software (3DF Scarlet)

Kontakt

3Dflow SRL

Viale del Lavoro, 33, 37135 Verona (VR) - ITALY

support@3dflow.net



3.1.2 3Dsurvey - All-in-One-Software für Photogrammetrie

Author: 3Dsurvey

3Dsurvey ist eine umfassende Plattform für Photogrammetrie und Geodatenverarbeitung, die speziell für reale Vermessungs-Workflows entwickelt wurde. Von erfahrenen Vermessern erstellt, wandelt sie Drohnenbilder, terrestrische Fotos, LiDAR-Scans, RTK/GNSS-Messungen und Videomaterial in präzise, vermessungstaugliche Ergebnisse um. Dank intuitiver Werkzeuge, gleichbleibender Genauigkeit und reaktionsschnellem Kundensupport ermöglicht 3Dsurvey Fachleuten aus den Bereichen Vermessung, Bauwesen, Bergbau, Steinbruchbetrieb und Infrastruktur, schneller zu arbeiten, die Feldzeit zu verkürzen und fundierte Entscheidungen zu treffen.

Die überlegenen Computer-Vision-Algorithmen und die vollständige GPU-Beschleunigung von 3Dsurvey liefern hochdetaillierte Punktwolken, texturierte 3D-Modelle und zentimetergenaue Orthofotos. Die Plattform bildet traditionelle Vermessungs-Workflows nach und gewährleistet so vorhersehbare und reproduzierbare Ergebnisse bei gleichzeitig deutlich reduziertem manuellem Aufwand. Von der Punktwolkenverarbeitung und Konturgenerierung über Volumenberechnung, Profillinien und Querschnitte bis hin zu integrierten CAD-Zeichenwerkzeugen, vereint 3Dsurvey alle wesentlichen Vermessungsfunktionen in einer einzigen Umgebung. Nutzer können verschiedene Datentypen importieren und bearbeiten, ohne die Plattform wechseln oder externe Software verwenden zu müssen.

3Dsurvey Cloud ermöglicht die sofortige Freigabe von Ergebnissen über einen einfachen Link - Downloads oder leistungsstarke Hardware sind nicht erforderlich. Kunden und Projektpartner können 2D-/3D-Daten auf jedem Gerät anzeigen, auf Projektsicherungen zugreifen und zeitbasierte Vergleiche für Überwachungsanwendungen durchführen.

Die CADdy Geomatics GmbH ist der offizielle deutsche Vertriebspartner für 3Dsurvey.



All-in-One-Software für Photogrammetrie

Allgemeine Informationen	
Hersteller/Anbieter	3Dsury d.o.o.
Unterstützte Drohnentypen	Alle
Plattform	Desktop (Windows, Linux)
Unterstützte Eingabedatenformate	jpg, .png, .dxf, .xml, .landxml, .e57, .obj, .las, .mp4, .tiff, .kmz, .ply, .pdf, .txt, .xyz, .shp, .koo
Ausgabedatenformate	.jpg, .png, .dxf, .xml, .landxml, .e57, .obj, .las, .tiff, .kmz, .ply, .pdf, .txt, .xyz, .txt, .koo, .docx
Hardwareanforderungen (empfohlen)	64 Bit, Intel i7 oder Ryzen 7, 32-64 GB RAM, NVIDIA RTX 5060 Ti 16 GB RAM, 2 TB SSD (NVMe)
Lizenzmodelle	Dauerlizenz, Abonnement
Offline-fähig	Ja
Preis UVP	3399 €
Hauptmerkmale	Photogrammetrie-Engine, Integrierte CAD-Tools, Messung und Analyse, Multi-Source-Projekte
Weitere Spezifikationen/Besonderheiten	Optionale Zusatzmodule (Scan- und RTK-Videogrammetrie)
Zusätzliche Informationen: Flugplanungs-/Missionsplanungssoftware	
Unterstützte Missionstypen	Nadir, Korridor, 3D-Schrägaufnahme, LiDAR usw.
Zusätzliche Informationen: Photogrammetrie-Software	
Zwischenergebnisse verfügbar?	Ja
Stapelverarbeitung	Ja
Zusätzliche Informationen: Punktwolken- und LiDAR-Verarbeitungstools	
Klassifizierungstools	2-Klassen-Punktwolkenklassifizierung
Registrierungsmöglichkeiten	GCP (verschiedene Typen)

Kontakt

Michael Wenninger | mw@caddy-geomatics.de
 CADdy Geomatics GmbH



3.1.3 ArcGIS Reality Mapping - Produktsuite

Autor: Dr. Peter Saiger-Bonnas, André Dehus, Esri Deutschland

Die ArcGIS-Reality-Produktfamilie von Esri hat sich in den vergangenen Jahren zu einer konsistenten Plattform für photogrammetrische 2D- und 3D-Datenerzeugung entwickelt. Im Zentrum stehen vier Lösungen: ArcGIS Reality Studio, ArcGIS Reality for ArcGIS Pro, Site Scan for ArcGIS und ArcGIS Drone2Map. Obwohl sie unterschiedliche Einsatzszenarien adressieren, basieren sie auf einer gemeinsamen technologischen Grundlage und erzeugen vergleichbare Ergebnisprodukte. Gleichzeitig zeigen sich klare Unterschiede hinsichtlich Skalierung, Automatisierung und Zielgruppenorientierung.

Allen Produkten gemeinsam ist die Nutzung einer durchgängigen photogrammetrischen Prozessierungspipeline, die häufig als Reality Engine bezeichnet wird. Diese umfasst die klassischen Schritte der Bildorientierung, des Bündelblockausgleichs sowie der dichten Bildzuordnung zur Generierung von Punktwolken. Aufbauend darauf werden standardisierte Geodatenprodukte abgeleitet, die sich in der Praxis als De-facto-Standard etabliert haben. Dazu zählen insbesondere True Orthophotos, die durch die Eliminierung von Gebäudeverkippen eine lagegetreue Darstellung ermöglichen, digitale Geländemodelle (DGM) zur Beschreibung der reinen Topographie, digitale Oberflächenmodelle (DSM), die zusätzlich Vegetation und Bebauung berücksichtigen, sowie dichte Punktwolken und texturierte 3D-Meshes, die sich nahtlos in ArcGIS Pro, ArcGIS Enterprise und ArcGIS Online integrieren lassen. Dadurch entsteht ein durchgängiger Datenfluss. Diese Produkte sind innerhalb der ArcGIS-Umgebung vollständig interoperabel und bilden die Grundlage von der Erfassung, über die Prozessierung, weiterführenden Analysen, bis zu Visualisierungen und Digital-Twin-Anwendungen.

Eine wesentliche Neuerung in der aktuellen Generation der ArcGIS-Reality-Produkte ist die Integration von Gaussian Splatting. Dieses Verfahren stellt einen Paradigmenwechsel in der 3D-Rekonstruktion dar, da es nicht mehr ausschließlich auf polygonalen Netzen basiert, sondern auf probabilistischen Punktrepräsentationen. Dadurch lassen sich insbesondere komplexe oder schwer zu modellierende Strukturen wie Vegetation, Leitungen oder semitransparente Objekte deutlich realistischer abbilden. Im Vergleich zu klassischen Meshes bietet Gaussian Splatting Vorteile hinsichtlich visueller Qualität, Detailtreue und Darstellung von Licht- und Transparenzeffekten. Die Tatsache, dass dieses Verfahren inzwischen in mehreren Produkten der ArcGIS-Reality-Suite verfügbar ist, unterstreicht den technologischen Fortschritt innerhalb der ArcGIS Plattform.

Trotz dieser gemeinsamen Basis unterscheiden sich die einzelnen Lösungen deutlich in ihrer Ausrichtung. ArcGIS Reality Studio ist klar auf großskalige Produktionsumgebungen ausgelegt. Die Software adressiert insbesondere Organisationen, die umfangreiche Luftbilddatensätze - etwa auf Stadt- oder Landesebene - verarbeiten müssen. Charakteristisch ist die Fähigkeit zur verteilten Prozessierung, wodurch sich auch sehr große Datenmengen effizient handhaben lassen. Reality Studio eignet sich damit vor allem für nationale Kartierungsbehörden, große Infrastrukturbetreiber oder Projekte im Kontext urbaner digitaler Zwillinge. Der Fokus liegt hier weniger auf der Datenerfassung selbst als vielmehr auf der industriellen Verarbeitung und Qualitätssicherung großer Bildbestände.

Demgegenüber ist ArcGIS Reality for ArcGIS Pro stärker in analytische GIS-Workflows eingebettet. Als Erweiterung innerhalb von ArcGIS Pro ermöglicht es die direkte Verbindung von Photogrammetrie und Geodatenanalyse. Anwender können Bilddaten verarbeiten und die daraus entstehenden Produkte unmittelbar in räumliche Analysen, Modellierungen oder kartographische Darstellungen integrieren. Diese enge Verzahnung macht die Lösung besonders attraktiv für GIS-Analysten, die nicht nur Daten erzeugen, sondern diese auch unmittelbar auswerten möchten. Im Vergleich zu Reality Studio ist die Skalierbarkeit geringer, dafür ist die Integrationstiefe in Desktop-GIS-Prozesse deutlich höher.

Eine andere strategische Ausrichtung verfolgt Site Scan for ArcGIS. Hier steht ein cloudbasierter End-to-End-Workflow für Drohnenanwendungen im Vordergrund. Die Plattform deckt den gesamten Prozess von der Flugplanung über die Datenerfassung bis hin zur Prozessierung und Verteilung der Ergebnisse ab. Durch die Cloudarchitektur lassen sich Projekte zentral verwalten und teamübergreifend bearbeiten, was insbesondere für größere Organisationen mit mehreren Drohnenteams von Vorteil ist. Gleichzeitig ermöglicht die Plattform eine hohe Automatisierung der Prozessierung. Site Scan ist damit prädestiniert für wiederkehrende Inspektionsaufgaben, Bauprojekte oder Monitoring-Anwendungen, bei denen Effizienz und Skalierbarkeit entscheidend sind.

Im Gegensatz dazu ist ArcGIS Drone2Map konsequent auf den operativen Einsatz im Feld ausgelegt. Die Software ermöglicht die schnelle Verarbeitung von Drohnenbildern direkt auf einem lokalen Rechner und ist auch ohne Internetverbindung einsetzbar. Dies ist insbesondere in Szenarien relevant, in denen eine unmittelbare Auswertung erforderlich ist, etwa im Katastrophenmanagement, bei Vermessungsarbeiten oder in der Baufortschrittskontrolle. Drone2Map bietet vereinfachte Workflows und eine vergleichsweise schnelle Ergebniserzeugung, ist jedoch hinsichtlich Automatisierung und Skalierbarkeit bewusst schlanker gehalten als die anderen Lösungen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die vier Produkte ein abgestuftes, komplementäres Portfolio bilden. Die Gemeinsamkeiten - insbesondere die einheitliche Prozessierung, die konsistenten Ausgabeformate sowie die Integration moderner Verfahren wie Gaussian Splatting - sorgen für eine hohe Durchgängigkeit innerhalb der ArcGIS Plattform. Gleichzeitig ermöglichen die unterschiedlichen Spezialisierungen eine passgenaue Auswahl je nach Anwendungsfall: von der schnellen Vor-Ort-Auswertung über cloudbasierte Drohnenoperationen bis hin zur großskaligen Produktionsumgebung für nationale Datensätze. Diese Kombination aus technologischer Einheitlichkeit und funktionaler Differenzierung ist ein wesentlicher Faktor für die zunehmende Bedeutung der ArcGIS-Reality-Suite im Bereich der realitätsbasierten Geodatenverarbeitung.



3D-Rekonstruktion einer Kapelle, erzeugt aus 448 Einzelaufnahmen mittels ArcGIS Drone2Map. Besonders bei hochdetaillierten und filigranen Strukturen - wie der dargestellten Marienstatue - wird die Leistungsfähigkeit des Gaussian Splatting-Verfahrens deutlich sichtbar.

3.1.3.1 ArcGIS Reality Mapping - ArcGIS Reality Studio

Allgemeine Informationen	
Hersteller / Anbieter	Esri
Unterstützte UAVs	Herstellerunabhängig; unterstützt Daten aus gängigen Luftbild- und Multikamerasystemen (inkl. UAV, Flugzeug)
Plattform	Desktop-Anwendung (Windows)
Unterstützte (Input)Datenformate	Luftbilder (JPEG, TIFF), EXIF/XMP, Kameramodelle, GCPs, GNSS/IMU-Daten
Ausgabedaten	True-Ortho, DGM, DOM, 3D-Meshes, Punktwolken, Gaussian Splats
Hardwareanforderungen	Leistungsstarker Windows-Rechner (Windows 10/11, 64-bit); CPU: min. 6 Kerne, empfohlen ≥ 24 Kerne (bis 48 Threads nutzbar); RAM: min. 32 GB, empfohlen ≥ 64 GB (bis 256 GB je nach Projektgröße); GPU: dedizierte NVIDIA-GPU empfohlen (mind. 4 GB VRAM, empfohlen ≥ 16 GB); Speicher: mind. 1 TB SSD lokal + zusätzlicher Netzwerk-/NAS-Speicher je nach Projektgröße (mehrere TB); Hochleistungs-Netzwerk für verteiltes Rechnen empfohlen (z. B. NAS, ≥ 10 Gbps).
Schnittstellen	ArcGIS Pro, ArcGIS Online, ArcGIS Enterprise, Export gängiger GIS-Formate
Lizenzmodell	Desktop-Lizenz (Named User / Subscription im ArcGIS-System)
Offline-Nutzung	Ja
Key-Features	Hochpräzise Blockausgleichung für Multikamera- und Mehrflug-Daten, Verarbeitung großer Bilddatensätze; verteiltes Rechnen; automatisierte Workflows; Integration in ArcGIS
Sonstige Spezifikationen / Besonderheiten	Skalierbarkeit für Großprojekte
Zusätzliche Informationen: Photogrammetrie Software	
Zwischenergebnisse abfragbar?	Nein, Processing Report erzeugbar
Batch-Verarbeitung	Ja
Zusätzliche Informationen: Punktwolken- und LiDAR-Verarbeitungstools	
Klassifizierungstools	Nein. Weiterverarbeitung in ArcGIS Plattform
Registrierungsmöglichkeiten	Nein. Weiterverarbeitung in ArcGIS Plattform

Kontakt

Dr. Peter Saiger-Bonnas | p.saiger-bonnas@esri.de
Esri Deutschland GmbH, www.esri.de

3.1.3.2 ArcGIS Reality Mapping - ArcGIS Reality for ArcGIS Pro

Allgemeine Informationen	
Hersteller / Anbieter	Esri
Unterstützte UAVs	Herstellerunabhängig; unterstützt Daten aus gängigen Luftbild- und Multikamerasystemen (inkl. UAV, Flugzeug)
Plattform	Desktop (ArcGIS Pro Extension)
Unterstützte (Input)Datenformate	Bilddaten (JPEG, TIFF), Drohnenbilder, Luftbilder, Satellitenbilder, Kamerakalibrierungsdaten, GCPs
Ausgabedaten	True Ortho, DGM, DOM, Punktwolke, 3D-Mesh, Gaussian Splats
Hardwareanforderungen	Leistungsstarker Windows-PC mit Mehrkern-CPU (empfohlen ≥ 8 -24 Kerne, AVX2-Unterstützung), hoher RAM-Ausstattung (mind. 32 GB, empfohlen 64 GB oder mehr, je nach Projektgröße deutlich höher), schnelle SSD-Speicherlösung (≥ 1 TB für Projektdaten), sowie dedizierte NVIDIA-GPU mit CUDA-Unterstützung (empfohlen ≥ 8 -16 GB VRAM, Compute Capability ≥ 7.5). Für anspruchsvolle Workflows wie Gaussian Splatting sind mindestens 64 GB RAM und eine leistungsfähige GPU erforderlich. Der Ressourcenbedarf steigt stark mit der Anzahl der Bilder und kann bei großen Projekten deutlich über 128 GB RAM und mehrere TB Speicher betragen.
Schnittstellen	ArcGIS Pro, ArcGIS Online, ArcGIS Enterprise, Scene Viewer, Web Scene, REST
Lizenzmodell	Proprietär, kostenpflichtige Erweiterung (Extension) für ArcGIS Pro
Offline-Nutzung	Ja (vollständige lokale Verarbeitung möglich), Veröffentlichung später optional
Key-Features	Großflächige Verarbeitung (Stadt/Land), Integration in GIS-Workflows, Erweiterung für ArcGIS Pro
Sonstige Spezifikationen / Besonderheiten	geeignet für digitale Zwillinge, skalierbar auf sehr große Projekte
Zusätzliche Informationen: Punktwolken- und LiDAR-Verarbeitungstools	
Klassifizierungstools	Klassifizierung innerhalb ArcGIS Pro möglich (z. B. Boden, Gebäude)
Registrierungsmöglichkeiten	Unterstützung über ArcGIS Pro

Kontakt

Dr. Peter Saiger-Bonnas | p.saiger-bonnas@esri.de
 Esri Deutschland GmbH, www.esri.de

3.1.3.3 ArcGIS Reality Mapping - Site Scan for ArcGIS

Allgemeine Informationen	
Hersteller / Anbieter	Esri
Unterstützte UAVs	Herstellerunabhängig; kompatibel mit gängigen Drohnen (z. B. DJI)
Plattform	Cloudbasierte Webanwendung (SaaS) + mobile App (iOS)
Unterstützte (Input)Datenformate	Drohnenbilder (JPEG, TIFF), EXIF-/Flight Logs, GCPs, GNSS-Daten
Ausgabedaten	True-Ortho, DGM, DOM, DSM-Mesh, Punktwolken, 3D-Meshes, Gaussian Splats
Hardwareanforderungen	Standard-PC/Mac mit Browser, iOS-Gerät für Flugsteuerung
Schnittstellen	ArcGIS Online, ArcGIS Enterprise, REST APIs, Export/Import in GIS-Formate
Lizenzmodell	Subscription / SaaS (benutzer- oder organisationsbasiert)
Offline-Nutzung	Teilweise (Flugplanung/-durchführung offline möglich, Verarbeitung cloudbasiert)
Key-Features	Cloudbasierte Bildverarbeitung, Automatisches Flottenmanagement, Wiederholbare Flugpläne, 2D/3D-Datenerstellung, Webbasierte Analyse und Sharing
Sonstige Spezifikationen / Besonderheiten	Enge Integration in ArcGIS-Ökosystem, skalierbare Cloud-Verarbeitung, zentrale Datenverwaltung
Zusätzliche Informationen: Flugplanung / Missionsplanung Software	
Unterstützte Missionsarten	Nadir, Corridor, 3D Oblique
Zusätzliche Informationen: Photogrammetrie Software	
Zwischenergebnisse abfragbar?	Nein, Processing Report erzeugbar
Batch-Verarbeitung	Ja (Cloud-basiert und skalierbar)
Zusätzliche Informationen: Punktwolken- und LiDAR-Verarbeitungstools	
Klassifizierungstools	Nein. Weiterverarbeitung in ArcGIS Plattform
Registrierungsmöglichkeiten	Nein. Weiterverarbeitung in ArcGIS Plattform

Kontakt

Dr. Peter Saiger-Bonnas | p.saiger-bonnas@esri.de
Esri Deutschland GmbH, www.esri.de

3.1.3.4 ArcGIS Reality Mapping - ArcGIS Drone2Map

Allgemeine Informationen	
Hersteller / Anbieter	Esri
Unterstützte UAVs	Herstellerunabhängig; kompatibel mit gängigen Drohnen (z. B. DJI)
Plattform	Desktop
Unterstützte (Input)Datenformate	Drohnenbilder (RGB, ggf. multispektral) mit Georeferenzierung (GPS/EXIF)
Ausgabedaten	True-Ortho, DGM, DOM, DSM-Mesh, Punktwolken, 3D-Meshes, Gaussian Splats
Hardwareanforderungen	Windows 64-bit; Mehrkern-CPU; min. 4 GB RAM (empfohlen ≥ 8 GB+); GPU-Unterstützung (DirectX/OpenGL); ausreichend Speicherplatz (SSD empfohlen)
Schnittstellen	Integration in die ArcGIS-Plattform
Lizenzmodell	Proprietär; kommerzielle Lizenz (Esri)
Offline-Nutzung	Ja
Key-Features	Erzeugung standardisierter Bildprodukte, Schnelle lokale Verarbeitung, Feldtauglichkeit (offline), Einfache Workflows, Nahtlose ArcGIS-Integration
Sonstige Spezifikationen / Besonderheiten	Fokus auf schnelle Ergebnisverfügbarkeit und Flexibilität
Zusätzliche Informationen: Flugplanung / Missionsplanung Software	
Unterstützte Missionsarten	Keine integrierte Flugplanung
Zusätzliche Informationen: Photogrammetrie Software	
Zwischenergebnisse abfragbar?	Nein, Processing Report erzeugbar
Batch-Verarbeitung	Nein
Zusätzliche Informationen: Punktwolken- und LiDAR-Verarbeitungstools	
Klassifizierungstools	Nein. Weiterverarbeitung in ArcGIS Plattform
Registrierungsmöglichkeiten	Weiterverarbeitung in ArcGIS Plattform

Kontakt

Dr. Peter Saiger-Bonnas | p.saiger-bonnas@esri.de
 Esri Deutschland GmbH, www.esri.de

3.1.4 CityGRID - Gebäudemodellierung aus Drohnenaufnahmen mit CityGRID

Autor: Gerald Forkert, UVM Systems GmbH

Mittels Drohnen können 3D Stadtmodelle aktualisiert oder kleinere bebaute Gebiete neu modelliert werden. Besonders interessant ist dies in Gebieten, wo aufgrund von naheliegenden Flughäfen die Zeitfenster für herkömmliche flugzeuggestützte Bildflüge begrenzt sind. Idealerweise erfolgt die Bilderfassung mittels Drohne sowohl mit nach unten gerichteter als auch mittels schräggestellter Kamera, ca. 80m bis 120m über Grund. Für die automatische Bildorientierung und das Matching einer 3D Punktwolke stehen mehrere Softwarepakete zur Verfügung.

Ausgehend von diesen Daten können mit dem Modul **CityGRID Shaper** Dachebenen vorberechnet werden. Anschließend erfolgt die 3D Modellierung automatisiert Gebäude für Gebäude, wahlweise mit Hilfe der 3D Punktwolke oder in den Luftbildern. Bei Bedarf können daraus mit **CityGRID Modeler** CityGML konforme LoD 3 Gebäudemodelle erzeugt werden. Mit **CityGRID Texturiser** lassen sich schließlich ganze Stadtmodelle automatisch aus den Drohnenbildern photorealistisch texturieren.



LoD3 Gebäudemodellierung aus Punktwolken und Luftbildern

Allgemeine Informationen	
Hersteller / Anbieter	UVM Systems GmbH
Unterstützte UAVs	Alle UAVs mit Kamera
Plattform	Desktop
Unterstützte (Input)Datenformate	JPEG, PNG für Bilddaten, Inpho PRJ und BlocksExchange XML für die Georeferenzierung
Ausgabedaten	CityGML Gebäudemodelle
Hardwareanforderungen	Empfohlene optimale Hardware: Prozessor (CPU): z.B. Intel Core i9-13900K/KF (13. Generation) oder AMD Ryzen 9 7950X3D Arbeitsspeicher (RAM): 64 GB DDR5-5600 Graphikkarte (GPU): z.B. NVIDIA GeForce RTX 4080 oder AMD Radeon RX 7900 XTX Festplatte (SSD): 2 TB NVMe PCIe 4.0 SSD + 4 TB HDD
Lizenzmodell	Permanente Lizenz mit jährlicher Softwarewartung
Offline-Nutzung	Ja
Preisbereich UVP	€ 10.000 bis € 20.000 je nach Konfiguration
Key-Features	Automatisierte Gebäudemodellierung bis hin zu LOD 2,5 Automatische Texturierung aus Luftbildern KI unterstützte LOD 3 Modellierung (z.B. Fenster- und Türöffnungen) in Vorbereitung
Zusätzliche Informationen: Photogrammetrie Software	
Zwischenergebnisse abfragbar?	CityGRID hat keine klassischen Photogrammetrie Funktionen, eine Bildorientierung wird vorausgesetzt

Kontakt

Gerald Forkert | gerald.forkert@uvmsystems.com
 UVM Systems GmbH, www.uvmsystems.com



UVM
SYSTEMS

3.1.5 Correlator3D - High-Performance Photogrammetry for Drone Mapping

Author: SimActive Inc.

Correlator3D is a photogrammetry software solution designed for the processing of aerial and drone imagery into accurate geospatial products. It supports a complete workflow from image alignment and calibration to the generation of dense point clouds, digital surface models (DSM), digital terrain models (DTM), orthomosaics, 3D meshes and Gaussian splat models.

The software is optimized for large datasets and high-resolution imagery, making it suitable for applications such as surveying, mapping, infrastructure inspection, mining and environmental monitoring. Correlator3D supports data acquired from UAVs as well as manned aerial platforms.

Advanced processing capabilities include automated aerial triangulation, dense image matching, and the generation of orthomosaics, point clouds, 3D models and Gaussian Splats. LiDAR data can also be integrated as a complementary data source to support specific workflows and applications.

Correlator3D provides flexible control over processing parameters while maintaining a high level of automation. Outputs are compatible with standard GIS and CAD systems, facilitating integration into existing geospatial workflows.



Correlator3D interface showing DSM visualization

General information	
Manufacturer / provider	SimActive Inc.
Supported drone types	Compatible with all UAV platforms producing georeferenced imagery. Also supports medium and large-format aerial systems, satellite and pushbroom sensors.
Platform	Desktop software (Windows, 64-bit)
Supported (input) data formats	TIFF / GeoTIFF / BigTIFF, JPEG, JPEG2000, NITF, IIQ; LiDAR (LAS/LAZ)
Output data formats	DSM/DTM (GeoTIFF, ASCII), orthomosaics (GeoTIFF), point clouds (LAS/LAZ), 3D models (OBJ, TMF), contours (SHP, DXF), Gaussian Splats (PLY)
Hardware requirements	Multi-core CPU, 12 GB RAM capacity, GPU NVIDIA
Interfaces	GIS/CAD-compatible formats, LiDAR integration, external GNSS/IMU data
License models	Perpetual and subscription licenses
Offline capabilities	Yes (fully offline processing available)
Price range RRP	On request
Key features	Automated aerial triangulation; Dense image matching; High-speed processing of large datasets; LiDAR and imagery integration (complementary use); Generation and visualization of Gaussian splat models; Parallel and distributed processing; High-accuracy geospatial outputs
Other specifications / special features	Supports corridor mapping, large-scale mapping projects, engineering-grade outputs and photorealistic 3D visualization
Additional information: Photogrammetry software	
Intermediate results accessible?	Yes - detailed control over processing steps and parameters
Batch-processing	Yes - automated workflows and scripting capabilities allow processing via command prompt (bypassing the graphical user interface)
Additional information: Point cloud and LiDAR processing tools	
Classification tools	Manual and automated classification (plugins)
Registration options	ICP, point-pair based alignment

Contact

www.simactive.com

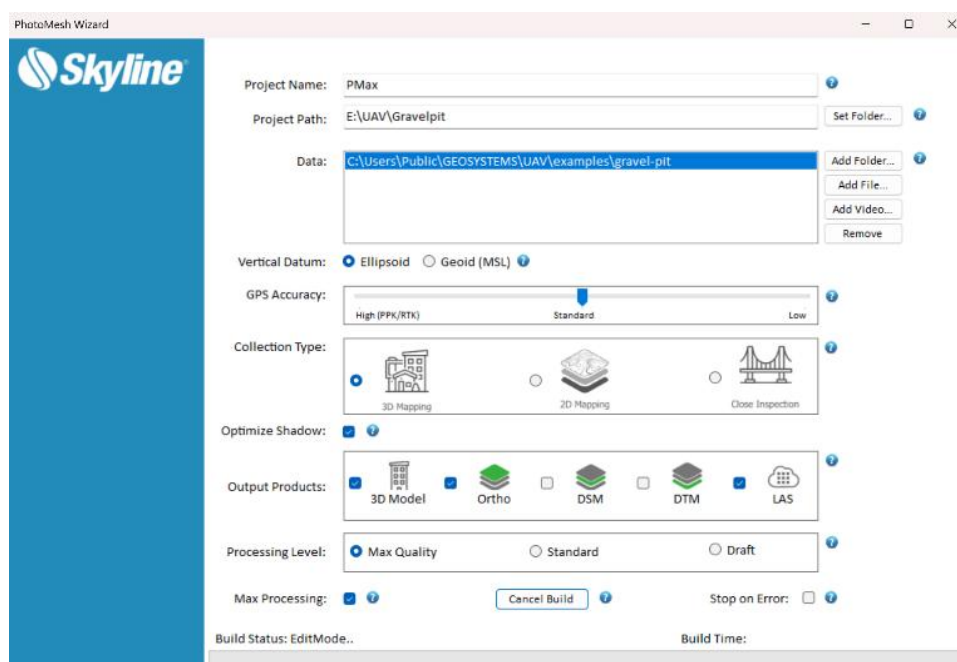
3.1.6 PhotoMesh - UAV-Datenauswertung mit PhotoMesh

Autor: Heike Weigand, GEOSYSTEMS GmbH

PhotoMesh von Skyline Software Systems, Inc. setzt UAV-Bilddaten, einschließlich multispektraler Daten, Videos und LiDAR-Daten aus einer Vielzahl von Sensoren in hochdetaillierte 2D- und 3D-Produkte um.

Die Ausgabeformate umfassen unter anderem 3D-Meshes mit verschiedenen Auflösungsstufen (3DML, 3D Tiles, OSGB, SLPK, DAE, OBJ), Orthophoto/True Orthophoto, Digitales Oberflächenmodell (DOM), Digitales Höhenmodell (DHM) und Punktwolken (LAS/LAZ).

Optional kann PhotoMesh Drone über den GEOSYSTEMS IMAGINE PMD Connector in die ERDAS IMAGINE Arbeitsumgebung integriert werden.



PhotoMesh Wizard



Detailreiche 3D-Darstellung mit Gaussian Splattin

Allgemeine Informationen	
Hersteller / Anbieter	Skyline Software Systems / GEOSYSTEMS GmbH
Plattform	Desktop
Unterstützte (Input)Datenformate	Photos: JPEG, TIFF, IIQ, Others Photo Lists: Excel, XML, CSV, Inpho, Bingo, Stellacore Video: MPEG, AVI, MOV, WMV, MP4, Others LiDAR: LAS/LAZ, E57
Ausgabedaten	3D Mesh: 3DML, 3D Tiles, DAE, OBJ, OSGB, I3S/SLPK Point Cloud: LAS Orthophoto: Tiff (4 bands) DTM: Tiff DSM: Tiff, LAS/LAZ AT Results: XML, SQLite
Hardwareanforderungen	Abhängig von Lizenzierung, min. 16 GB RAM. Leistungsfähige GPU wird empfohlen.
Lizenzmodell	Subscription und permanente Lizenzen
Offline-Nutzung	Ja
Preisbereich UVP	Auf Anfrage
Key-Features	Gaussian-Splatting Wizard-geführte Bedienung Herausragende Qualität der Orthophotos Eingebettet und erweiterbar durch Skyline Produktsuite Hochperformant durch Multicomputer-Prozessierung
Zusätzliche Informationen: Photogrammetrie Software	
Zwischenergebnisse abfragbar?	Ja
Batch-Verarbeitung	Ja
Zusätzliche Informationen: Punktwolken- und LiDAR-Verarbeitungstools	
Klassifizierungstools	Durch Add-on Produkte
Registrierungsmöglichkeiten	Durch Add-on Produkte

Kontakt

GEOSYSTEMS GmbH
Friedrichshafener Str. 1
82205 Gilching
+49 (0)8153 39883 50
skyline@geosystems.de
www.geosystems.de



3.1.7 Pointly Plattform - für KI basierte Punktwolkenanalyse

Autor: Moritz Hartmann, Pointly GmbH

Die Pointly Plattform ist eine Softwarelösung zur automatisierten Analyse, Klassifizierung und Vektorisierung großer 3D Punktwolken. Sie richtet sich an Unternehmen oder öffentliche Akteure, die regelmäßig Punktwolken aus luftgestützten Befliegungen, Mobile Mapping oder terrestrischen Scans verarbeiten. Pointly ermöglicht es, wiederkehrende manuelle Auswertungen vollständig zu automatisieren und qualitativ konsistente Ergebnisse auch bei sehr großen Datenmengen zu erzielen.

Ein zentrales Merkmal von Pointly ist der Service, dass die KI Modelle individuell auf kundenspezifische Daten und Anwendungsfälle trainiert werden.

Dadurch lassen sich auch sehr spezielle Objektklassen zuverlässig erkennen, zum Beispiel Infrastrukturelemente, Energieanlagen oder schienenspezifische Objekte.

Neben der Klassifizierung unterstützt die Plattform die Vektorisierung von Objekten, sodass aus Punktwolken direkt weiterverwendbare Geodaten entstehen, etwa für GIS Systeme, Planungsprozesse oder Asset Management.



Beispielhafte Anwendungsfälle, bei denen Pointly die Analyse von Punktwolken bereits automatisiert hat.

Allgemeine Informationen	
Hersteller / Anbieter	Pointly
Unterstützte UAVs	Nicht spezifiziert
Plattform	Cloud basierte Plattform mit API Integration sowie On Premise Option
Unterstützte (Input)Datenformate	.LAS/ .LAZ
Ausgabedaten	Klassifizierte .LAS oder .LAZ Dateien sowie offene Vektordateien für die Vektorisierung
Hardwareanforderungen	Internetverbindung erforderlich
Schnittstellen	API Schnittstelle verfügbar
Lizenzmodell	Pay as you go Modell oder Abonnement Modell
Offline-Nutzung	Ja, ist möglich
Preisbereich UVP	Auf Anfrage
Key-Features	Präzise automatische Klassifizierung von Punktwolken Präzise automatische Vektorisierung von Objekten Punktwolken Management System Manuelle Klassifizierung und Nachbearbeitung
Sonstige Spezifikationen / Besonderheiten	Individuell trainierbare KI Modelle für kundenspezifische Anwendungsfälle
Zusätzliche Informationen: Punktwolken- und LiDAR-Verarbeitungstools	
Klassifizierungstools	Ja, vollautomatisiert und präzise
Registrierungsmöglichkeiten	Nicht spezifiziert

Kontakt

Pointly GmbH | info@pointly.ai
<https://pointly.ai>

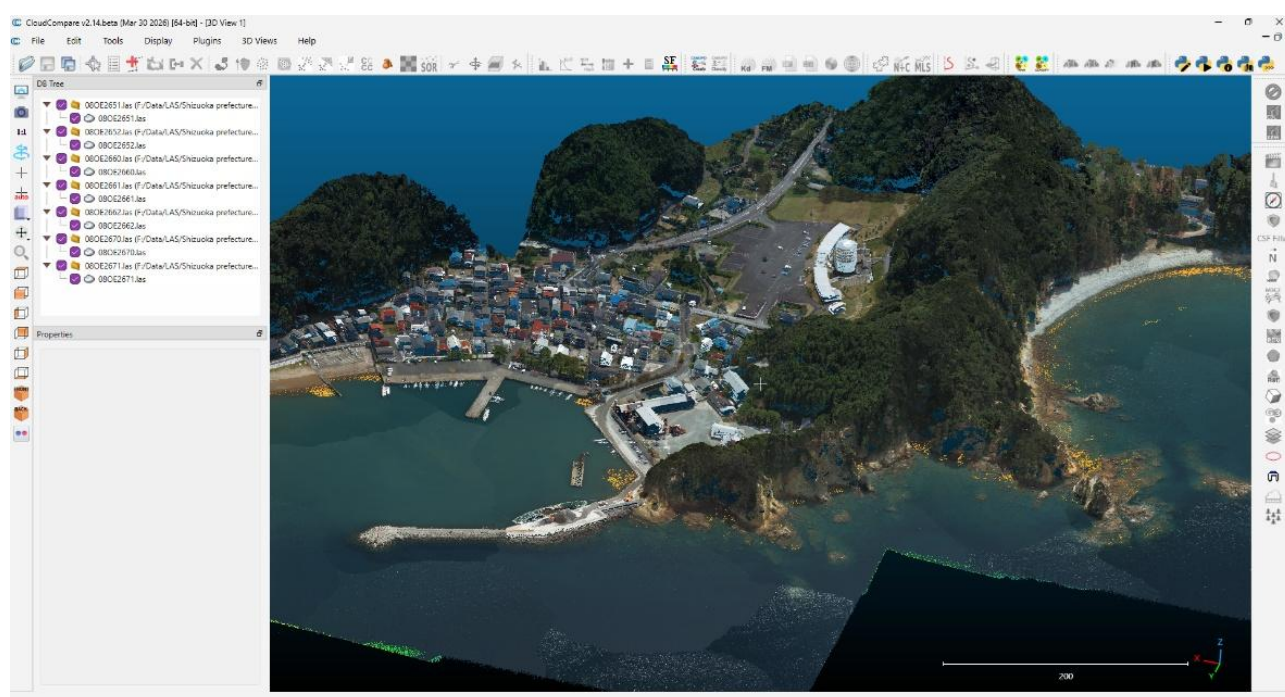


3.2 Open-Source / Non-commercial Software

3.2.1 CloudCompare - “Open-source 3D point cloud processing software”

Author: Daniel Girardeau-Montaut, CloudCompare

CloudCompare is a 3D point cloud (and triangular mesh) processing software. It has been originally designed to perform comparisons between dense 3D points clouds or between a point cloud and a triangular mesh. It relies on a specific octree structure particularly efficient for such a task. It is now a more generic point cloud processing software, including many advanced algorithms (registration, resampling, color/normal/scalar fields management, statistics computation, sensor management, interactive or automatic segmentation, display enhancement, etc.).



CloudCompare (version 2.14)

General information	
Manufacturer / provider	CloudCompare (open source project)
Platform	Windows, Linux, macOS
Supported (input) data formats	Point clouds, triangular meshes, etc.
Output data formats	Point clouds, triangular meshes, geotiff, images
Hardware requirements	GPU or recent Intel chipset
License models	GPL
Offline capabilities	Yes
Price range RRP	0€ (donations are welcome!)
Key features	Point cloud edition, registration, comparison
Other specifications / special features	Command line mode, Python wrappers
Additional information: Point cloud and LiDAR processing tools	
Classification tools	Manual and automated classification (plugins)
Registration options	ICP, point-pair based alignment

Contact

<https://www.cloudcompare.org/>
admin@cloudcompare.org



3.2.2 Meshroom - Software für 3D Rekonstruktion

Autor: Simon Schütte, AliceVision Association

Mit AliceVision Meshroom können aus Fotos oder Videos per Photogrammetrie 3D Punktwolken und texturierte 3D-Meshes erzeugt werden. Meshroom hat den Anspruch, nachvollziehbare und wiederholbare Ergebnisse zu liefern, die sich qualitativ mit kommerziellen Softwareprodukten messen können.

Meshroom hebt sich insbesondere durch seine node-basierte Darstellung (Abb. 13.2-1) und Konfiguration aller Rekonstruktionsschritte von anderer Photogrammetrie-Software ab. Dies ermöglicht den Zugriff auf alle Zwischenprodukte und Konfigurationsparameter, wodurch die Rekonstruktionsprozesse präzise auf die individuellen Anforderungen angepasst werden können.

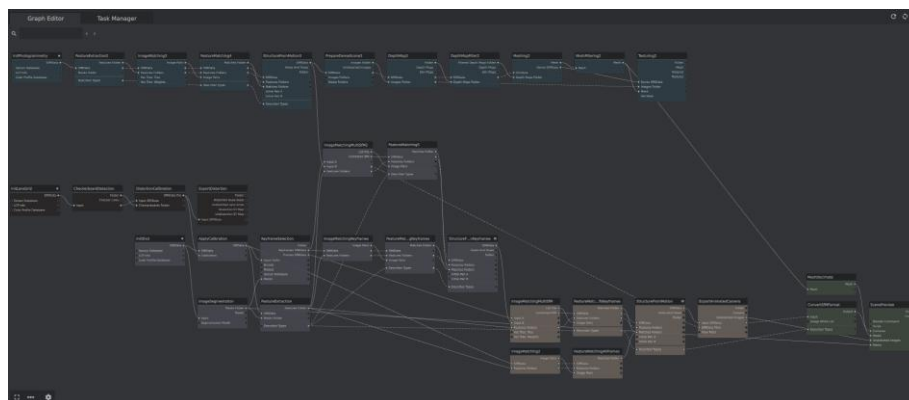


Abbildung 13.2-1: Node-Basierte Workflows in Meshroom

Meshroom eignet sich hervorragend für die 3D-Rekonstruktion auf Basis von Fotos und Videos (Abb. 13.2-2). Die erzeugten Meshes und Texturen überzeugen durch ihre hohe Qualität und Genauigkeit. Darüber hinaus unterstützt Meshroom eine Vielzahl von Eingabe- und Ausgabeformaten.

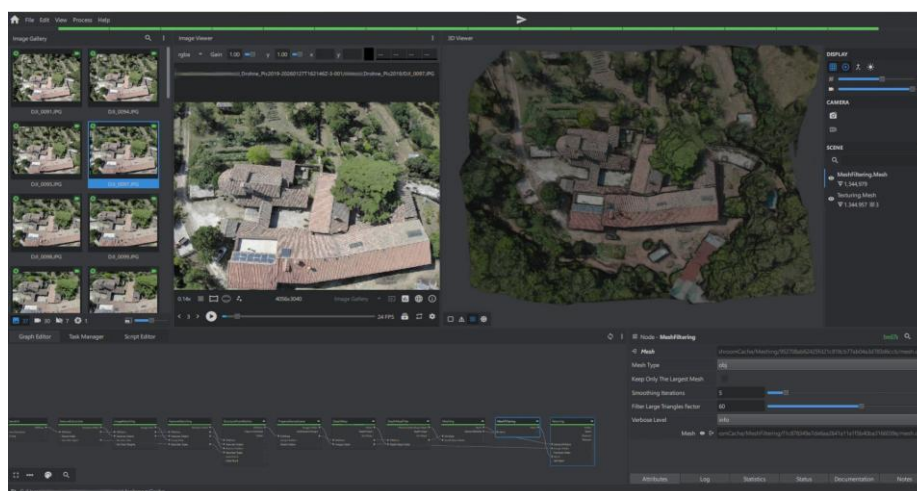


Abbildung 13.2-2: AliceVision Meshroom: 3D Rekonstruktion aus einer Befliegung

AliceVision ist die Meshroom-eigene Photogrammetrie-Engine, die auch per CLI angesprochen werden kann.

Meshroom ist die graphische Benutzeroberfläche für AliceVision, und kann umfangreich modifiziert werden.

Plugins für Meshroom ergänzen Funktionen wie Bildsegmentierung und Maskierung, Geolocation oder Nodes zur Nutzung der Open Source Photogrammetrie-Software MicMac oder Colmap. Experimentelle Plugins ermöglichen die Nutzung von Gaussian Splatting (Gsplat), Sam3D und weiteren Funktionalitäten.

Meshroom wird von der Nonprofit AliceVision Association entwickelt. Als Open Source Software steht Meshroom nativ für Windows und Linux bereit und kann dank MPL2 Lizenz kommerziell genutzt werden.

Allgemeine Informationen	
Hersteller / Anbieter	AliceVision Association
Plattform	Desktop: Windows, Linux, Renderfarm, HPC
Unterstützte (Input)Datenformate	Bilder: jpg, tif, png, exr, rw2, cr2, nef, uvm. (OpenImageIO unterstützte Formate), 360° Formate: DualFisheye, Equirectangular, Videoformate: avi, mov, mp4, uvm. Experimentell: E57
Ausgabedaten	Punktwolken (abc, sfm, json, ply, baf) DepthImages (exr), Mesh (obj, gltf,fbx, stl) Textur (exr, png, tiff, jpg) uvm.
Hardwareanforderungen	NVIDIA GPU mit Compute Capability 5+ für AliceVision
Schnittstellen	CLI, GUI
Lizenzmodell	MPL 2.0
Offline-Nutzung	Ja
Preisbereich UVP	Kostenfrei, finanziert sich durch Spenden und Sponsoring
Key-Features	Photogrammetrie, 3D Mesh Erstellung, Bildsegmentierung und Maskierung, Panorama Stitching
Sonstige Spezifikationen / Besonderheiten	Plugin-System
Zusätzliche Informationen: Photogrammetrie Software	
Zwischenergebnisse abfragbar?	Ja, es ist möglich auf alle Zwischenergebnisse zuzugreifen: Features, Matches, Kamerapositionen, Punktwolke, Depth Maps, Texturen
Batch-Verarbeitung	Ja, per Befehlszeile

Kontakt

AliceVision Meshroom Team, private Mailing Liste:

alicevision-team@googlegroups.com

<https://github.com/alicevision/>

<https://alicevision.org>

<https://meshroom.org>



AliceVision

Anhang

Ansprechpartner und Autoren

Hier finden Sie eine alphabetische Auflistung aller Ansprechpartner und Autoren, die an diesem Leitfaden mitgewirkt haben.

3Dflow SRL:

support@3dflow.net, Italien.

A

Alamouri, Dr. Ahmed:

a.alamouri@tu-braunschweig.de, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.

B

Bach, A.:

vermessungsamt@stadt.koblenz.de, Amt für Stadtvermessung und Bodenmanagement, Koblenz.

Bareiss, M.Sc. Lisa :

l.bareiss@psu-schaller.de, Prof. Schaller UmweltConsult GmbH (PSU), München.

Bauer, M.Eng. Johannes:

bauer.johannes1@t-online.de.

Bernhard, B.Eng. Florian:

florian.bernhard@muenchen.de, Landeshauptstadt München, Zentrale Luftbildstelle, München.

Bolte, Clemens:

vermessung@geo.bremen.de, Projektgruppe UAV der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV).

Brand, Dr. Klaus:

k.brand@gi-geoinformatik.de, GI Geoinformatik GmbH, Augsburg.

Brehm, M.Sc. Tobias:

uas@bafg.de, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

Brodrecht, Florian:

f.brodrecht@spekter.de, Spekter GmbH, Grünwald.

Brylka, Prof. Dr. hc. Roman:

bry@the-green-bridge.com, THE GREEN BRIDGE GmbH (TGB), München.

C

Cramer, Dr. Michael:

michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de, Universität Stuttgart, Stuttgart.

D

Dahmen, Christian:

c.dahmen@conterra.de, conterra GmbH, Münster.

Degel, Dipl.-Ing. Björn:

b.degel@lvgl.saarland.de, Projektgruppe UAV der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV).

Dehus, M.Sc. André:

info@esri.de, Esri Deutschland GmbH, Kranzberg.

Donaubauer, Dr. Andreas:

Andreas.donaubauer@tum.de, Technische Universität München, München.

Dörpmund, B.A. Cara:

cara.doerpmund@mostrobotics.de, MOST Robotics, Wulften am Harz.

Dörr, Dipl.-Ing. agr. Andreas:

info@doerr-agrar.de, Doerr Agrar GmbH, Oepfershausen.

E

Elias, Prof. Dr. Melanie:

melanie.elias@htw-dresden.de, HTW Dresden, Dresden.

Eltner, Prof. Dr. Anette:

anette.eltner@tu-dresden.de, Technische Universität Dresden, Dresden.

F

Forkert, Gerald:

gerald.forkert@uvmsystems.com, UVM Systems GmbH, Klosterneuburg.

Fröch, M.Sc. Thomas:

thomas.froech@tum.de, Technische Universität München, München.

G

Georgiev, M.A. Stefan:

Stefan.georgiev@kfv.at, Kuratorium für Verkehrssicherheit (KFV), Wien.

Gerke, Prof. Dr. Markus:

m.gerke@tu-braunschweig.de, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.

Girardeau-Montaut, Daniel:

admin@cloudcompare.org, CloudCompare.

Greifeneder, M.Sc. Sebastian:

sebastian.greifeneder@spatial-focus.net, Spatial Focus GmbH, Wien.

Grenzdörffer, Dr. Görres:

goerres.grenzdorffer@uni-rostock.de, Uni Rostock, Rostock.

H

Hartmann, MBE Moritz:

info@pointly.ai, Pointly GmbH, Berlin.

Heinrich, Dr. Oliver:

Oliver.heinrich@bho-legal.com, BHO Legal, Köln.

Hilling, Dipl. Geogr. Frederik:

hilling@geoplex.de, Geoplex GIS GmbH, Osnabrück.

Holter, M.Sc. Patricia:

patricia.holter@unique-landuse.de, Unique land use GmbH, Freiburg.

Hülsen, M.Sc. Markus:

Markus.Huelsen@lgl.niedersachsen.de, Projektgruppe UAV der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV).

J**Jutzi, Prof. Dr. Boris:**

Boris.jutzi@kit.edu, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.

K**Kaiser, Dipl.-Geogr. Peter:**

p.kaiser@gi-geoinformatik.de, GI Geoinformatik GmbH, Augsburg.

Kolbe, Prof. Dr. Thomas H.:

thomas.kolbe@tum.de, Technische Universität München, München.

L**Lehner, Mag.a Dagmar:**

Kuratorium für Verkehrssicherheit (KFV), Wien.

M**Mandlbürger, Prof. Dr. Gottfried:**

gottfried.mandlbürger@tuwien.ac.at, TU Wien, Wien.

Marzolff, Dr. Irene:

marzolff@em.uni-frankfurt.de, Institut für Physische Geographie, Goethe Universität Frankfurt am Main.

Müller, F.:

vermessungsamt@stadt.koblenz.de, Amt für Stadtvermessung und Bodenmanagement, Koblenz.

N**Neumann, Dr. Andreas:**

andreas.neumann@ethz.ch, ETH Zürich, Zürich.

O**O'Sullivan, Michael:**

mosullivan@simactive.com, SimActive Inc., Kanada.

P**Peterlein, Christian**

christian.peterlein@zuerich.ch, Abteilung Koordination und Entwicklung, Stadt Zürich.

Piringer, Felix:

Felix.piringer@gruenenfelder.ch, Grünenfelder und Partner AG, Domat/Ems.

R**Reddehase, Tim:**

reddehase@osnabrueck.de, Fachdienst Geodaten, Stadt Osnabrück.

S**Saiger-Bonnas, Dr. Peter:**

p.saiger-bonnas@esri.de, Esri Deutschland GmbH, Kranzberg.

Salbach, Dipl.-Ing. Christiane:

Christiane.salbach@tum.de, Runder Tisch GIS e.V., München.

Schaller, Prof. Dr. Jörg:

j.schaller@psu-schaller.de, Prof. Schaller UmweltConsult GmbH (PSU), München.

Schleehahn, David:

david.schleehahn@gv.hamburg.de, Projektgruppe UAV der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV).

Schlesinger, Dr. Johannes:

j.schlesinger@svgeosolutions.de, svGeosolutions GmbH, Freiburg.

Schneider, Prof. Dr. Danilo:

danilo.schneider@htw-dresden.de, HTW Dresden, Dresden.

Schütte, Simon:

alicevision-team@googlegroups.com, AliceVision Association.

Schwab, M.Sc. Benedikt:

benedikt.schwab@tum.de, TU München, München.

Seelus, Norbert:

Norbert.Seelus@adbv-n.bayern.de, Projektgruppe UAV der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV).

Seidel, Marvin:

Marvin.Seidel@tlbg.thueringen.de, Projektgruppe UAV der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV).

Sieberth, Prof. Dr. Till:

Till.sieberth@jade-hs.de, Jade Hochschule,

Sprute, Dr. Dennis:

dennis.sprute@iosb-ina.fraunhofer.de, Fraunhofer IOSB-INA, Lemgo.

U**Unger, Dr. Jakob:**

Jakob.Unger@lgl.niedersachsen.de, Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung (LGLN), Hannover.

V**Vogt, Steffen:**

s.vogt@svgeosolutions.de, svGeosolutions GmbH, Freiburg.

W**Walter, Torsten:**

Torsten.Walter@mlw.bwl.de, Projektgruppe UAV der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV).

Wasmeier, Prof. Dr. Peter:

Peter.wasmeier@hm.edu, Hochschule München, München.

Weckbecker, Andreas:

andreas.weckbecker@stadt.koblenz.de, Amt für Stadtvermessung und Bodenmanagement, Koblenz.

Weigand, Dipl. Geogr. Heike:

h.weigand@geosystems.de, GEOSYSTEMS
GmbH, Gilching.

Weinreich, Axel:

axel.weinreich@unique-landuse.de, Uni-
que land use GmbH, Freiburg.

Wenninger, Michael:

mw@caddy-geomatics.de, CADdy Geomat-
ics GmbH, München.

Werdecker, B.E. Samuel:

info@caddy-geomatics.de, CADdy Geoma-
tics GmbH, München.

Wieland, MBA Michael:

Michael.wieland@uavdach.org, UAV DACH
European Association for Unmanned Avia-
tion.

Wolf, Alexander:

info@ibwolf.com, Wolf Ingenieurbüro
GmbH, Grafenau.

Wörle, B.Sc. Aylin:

A.woerle@gi-geoinformatik.de, GI Geoin-
formatik GmbH, Augsburg.

Z

Zimmermann, Florian:

zimmermann@bafg.de, Bundesanstalt für
Gewässerkunde, Koblenz.

Zirn, Dipl.-Ing. Volker:

volker_zirn@datem-systems.com,
DAT/EM, Gomaringen.

Reviewer

Hier finden Sie eine alphabetische Auflistung aller Reviewer, die an diesem Leitfaden mitgewirkt haben. Personen konnten sowohl als Autor am Leitfaden mitwirken als auch als Reviewer für Abschnitte anderer Autoren.

B

Bernhard, B.Eng. Florian:

florian.bernhard@muenchen.de, Landeshauptstadt München, Zentrale Luftbildstelle, München.

E

Eltner, Prof. Dr. Anette:

anette.eltner@tu-dresden.de, Technische Universität Dresden, Dresden.

G

Grenzdörffer, Dr. Görres:

goerres.grenzdoerffer@uni-rostock.de, Uni Rostock, Rostock.

H

Haala, Prof. Dr. Norbert:

Norbert.haala@ipf.uni-stuttgart.de, Universität Stuttgart, Stuttgart.

K

Kaiser, Dipl.-Geogr. Peter:

p.kaiser@gi-geoinformatik.de, GI Geoinformatik GmbH, Augsburg.

Knittel, Jens:

j.knittel@geoplana.de, geoplana Ingenieurgesellschaft mbH, Marbach-Rielingshausen.

Kolbe, Prof. Dr. Thomas H.:

thomas.kolbe@tum.de, TU München, München.

Krüger, Dr. Nina:

nkrueger@moss.de, M.O.S.S. Computer Grafik Systeme GmbH, Taufkirchen.

Krull, Marten:

krull@vermessung3d.de, Vermessung3D GmbH, Hagen.

L

Leucht, Jürgen:

leucht@geodrones3d.de, geoplana Ingenieurgesellschaft mbH, Marbach-Rielingshausen.

M

Meßner, Florian:

florian.messner@muenchen.de, Landeshauptstadt München, Zentrale Luftbildstelle, München.

Möller, Valentin:

Valentin.Moeller@mostrobotics.de, MOST Robotics, Wulften am Harz.

W

Wasmeier, Prof. Dr. Peter:

Peter.wasmeier@hm.edu, Hochschule München, München.