



Master Thesis

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z_GIS)
der Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

**„Vergleich Mikro-UAV-gestützter und terrestrischer
Naturbestandsvermessung für Kommunalverwaltungen am Beispiel
der Stadt Gmunden“**

vorgelegt von

Michael Gerstmayr, BSc.
TKZ: 104247, UNIGIS MSc Jahrgang 2020

Betreuer/in:
Dr. Christian Neuwirth

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science – MSc“

Linz, 6. September 2021

Danksagung

Der Autor bedankt sich herzlich für die stets gute Zusammenarbeit mit dem Leiter des Stadtamtes Gmunden, Mag. Dr. Heimo Pseiner, und die Erlaubnis zur Verwendung gemeindeeigener Daten für die vorliegende Masterarbeit. Dadurch wurde dieses Projekt erst möglich. Darüber hinaus ein herzliches Dankeschön dem gesamten UNIGIS-Team und allen, die die Erstellungsphase dieser Arbeit begleitet haben.

Besonderer Dank gilt meiner Mutter, dank deren selbstloser Unterstützung ich die oftmaligen Mehrfachbelastungen der letzten Jahre gut meistern konnte.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich diese Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Linz, am 6.9.2021

Michael Gerstmayr

Abstract

Zusammenfassung: Eine Naturbestandsvermessung ist oftmals zentraler Bestandteil gemeindeeigener Geodateninfrastrukturen. Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der Frage, ob die zugehörigen Vermessungsarbeiten mittels Drohnenbefliegung (effizienter) zu bewerkstelligen sind. Die klassische Vermessung ist bei standardisierter Vorgehensweise zuverlässig in den Ergebnissen, aber auch zeit- und kostenintensiv. Durch die vorgestellte Herangehensweise wird die Machbarkeit einer drohnen-gestützten Vermessung anhand von zwei Use Cases evaluiert und der konventionellen Methode gegenübergestellt. Die Ansätze werden mittels Kostenvergleichsrechnung und nach Genauigkeitsaspekten sowie enthaltenen Informationen verglichen. Es zeigt sich, dass Drohnen eine ernst zu nehmende Alternative darstellen, wenngleich Einschränkungen durch Objektdeckungen und Verzerrungen die Ergebnisse beeinflussen. Mittels Drohnenbefliegungen könnten Kommunalverwaltungen räumliche Daten zügiger und kostengünstiger erheben und zudem umfangreiche Zusatzinformationen erheben. Aktuelle Entwicklungen im Bereich der automatischen Objektabgrenzung und Klassifikation lassen weitere Fortschritte erwarten.

Schlüsselwörter: Fernerkundung, Drohnenvermessung, Katastervermessung

Abstract: *A natural inventory survey is often a central component of municipal geodata infrastructures. The present master thesis deals with the question of whether the associated surveying work can be carried out (more efficiently) using drone flights. With a standardized procedure, classic surveying is reliable in terms of its results, but it is also time-consuming and cost-intensive. With the approach presented, the feasibility of a drone-based survey is evaluated on the basis of two use cases and compared to the conventional method. The approaches are compared by means of a cost comparison calculation and according to aspects of accuracy and the information contained. It turns out that drones are a serious alternative, even though restrictions due to object coverage and distortions influence the results. By means of drone flights, local administrations could collect spatial data more quickly and cheaply and also collect extensive additional information. Current developments in the fields of automatic object delineation and classification suggest that further progress can be expected.*

Keywords: *Remote sensing, drone survey, cadastral survey*

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Danksagung | I |
| Eidesstattliche Erklärung | II |
| Abstract | III |
| Abbildungsverzeichnis | VII |
| Tabellenverzeichnis | IX |
| Abkürzungsverzeichnis | X |
| 1 Einführung | 1 |
| 1.1 Motivation | 1 |
| 1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung | 3 |
| 1.3 Struktur der Arbeit | 3 |
| 1.4 Literaturüberblick und Forschungsstand | 4 |
| 2 Grundlagen | 9 |
| 2.1 Kommunale Aufgabenstellungen im 21. Jahrhundert | 9 |
| 2.1.1 Aufgabenfelder einer Kommunalverwaltung | 9 |
| 2.1.2 GIS und Drohnen im kommunalen Einsatz | 11 |
| 2.2 Grundlagen der UAV-gestützten Vermessung | 14 |
| 2.2.1 Drohnen: Recht, Anwendung und Anforderungen | 14 |
| 2.2.2 Kamerasysteme und Verortung | 17 |
| 2.2.3 Flugplanung, Parameterkonfiguration und Befliegung | 20 |
| 2.2.4 Structure from Motion und Datenauswertung | 21 |
| 2.3 Grundlagen terrestrischer Vermessungsmethoden | 24 |
| 2.3.1 Optische und optoelektronische Verfahren | 24 |
| 2.3.2 GNSS-Vermessung | 30 |
| 2.3.3 3D-Laser-Scanning | 31 |
| 2.3.4 Terrestrische Datenerfassung mittels mobiler Multisensor-Systeme | 33 |
| 2.3.5 Vergleich und Zusammenfassung der verschiedenen Verfahren | 35 |
| 3 Methoden | 37 |

| | |
|--|----|
| 3.1 Drohnenbefliegung..... | 37 |
| 3.1.1 Equipment | 37 |
| 3.1.2 Vorbereitung und Planung | 39 |
| 3.1.3 Georeferenzierung und Befliegung | 40 |
| 3.1.4 Processing und Digitalisierung | 41 |
| 3.1.5 Kosten der UAV-Befliegung..... | 43 |
| 3.2 Terrestrische Naturbestandsvermessung | 44 |
| 3.2.1 Vorbereitung und Planung | 44 |
| 3.2.2 Durchführung und Kostenermittlung | 45 |
| 3.3 Use Cases der Drohnenbefliegung | 49 |
| 3.3.1 Gmunden – In der Au..... | 49 |
| 3.3.2 Gmunden – Dienstleistungszentrum | 50 |
| 3.4 Vergleichsmodell UAV und konventionelle Vermessung | 52 |
| 3.4.1 Grundlagen und Auswahl des Kostenvergleichs | 52 |
| 3.4.2 Modell für die Durchführung des Kostenvergleichs | 54 |
| 3.4.3 Datenqualität | 55 |
| Genauigkeit | 55 |
| Qualitativer Informationsgehalt der Datensätze | 56 |
| 4 Untersuchungsergebnisse..... | 58 |
| 4.1 Befliegungsergebnisse | 58 |
| 4.1.1 Gmunden – In der Au..... | 58 |
| 4.1.2 Gmunden – Dienstleistungszentrum | 62 |
| 4.2 Kostenvergleichsrechnung | 66 |
| 4.2.1 Datenerhebung durch Geometer..... | 66 |
| 4.2.2 Datenerhebung mittels UAV-Befliegung | 67 |
| 4.2.3 Vergleich der Kosten..... | 68 |
| 4.3 Vergleich der Datenqualität | 70 |
| 4.3.1 Genauigkeit | 70 |

| | |
|--|----|
| 4.3.2 Informationsgehalt | 71 |
| 5 Diskussion des Methodenvergleichs..... | 74 |
| 6 Schlussfolgerung und Ausblick | 79 |
| Literatur | 82 |
| Anhang..... | 88 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Was Unsere Gemeinden leisten (ÖSTERREICHISCHER GEMEINDEBUND 2021). | 11 |
| Abbildung 2: EU-Verordnung 2019/947. Rechtliche Rahmenbedingungen (AUSTRO CONTROL GMBH 2021a). | 16 |
| Abbildung 3: Open Kategorie (AUSTRO CONTROL GMBH 2021a). | 17 |
| Abbildung 4: Structure from Motion-Prinzip (WESTOBY et al. 2012, 301). | 21 |
| Abbildung 5: Workflow der incremental SfM-Methode (JIANG et al. 2020, 232). | 22 |
| Abbildung 6: Entwicklung vom optischen Theodolit zu Tachymeter, Robotic Surveying und Smart Station. Eigene Darstellung nach INGENSAND (2010, 5). | 25 |
| Abbildung 7: Geländeaufnahme mittels Tachymeter (ZEISKE 2000, 18). | 26 |
| Abbildung 8: Erstellung einer Feldskizze mit Zusatzinformation (INGENSAND 2009, 14). | 27 |
| Abbildung 9: Feldaufnahmen für die Erfassung eines Wasserkatasters (GISQUADRAT GMBH 2021b). | 27 |
| Abbildung 10: Verbindung neu aufgenommener mit bestehenden Daten über mit einer Totalstation verbundenen Controller-Hard- und Software (TRIMBLE 2021). | 28 |
| Abbildung 11: Scannen eines Objekts mittels trackingfähigen Tachymeter (INGENSAND 2009, 3). | 28 |
| Abbildung 12: Hidden-Point-Verfahren (INGENSAND 2009, 16). | 29 |
| Abbildung 13: Einmessung eines Kanalschachts mittels GNSS-Vermessung (GISQUADRAT GMBH 2021a). | 30 |
| Abbildung 14: Erfassung der Wiener Praterbrücke mittels 3D-Laserscan (links: Aufnahme, rechts: Punktwolkenmodell) (MIP3D 2021a). | 32 |
| Abbildung 15: Idealisiertes mobiles Multisensorsystem mit Profillaserscanner und Sensor zur Trajektorienbestimmung (KUHLMANN & KLINGBEIL 2017, 95). | 34 |
| Abbildung 16: Bildsequenzen (oben) und Flächenscans (unten) (HOLZER & FORKERT 2004, 586). | 34 |
| Abbildung 17: Vom Blockmodell (links) über das Formmodell (mitte) zum texturierten Modell (rechts) (HOLZER & FORKERT 2004). | 35 |
| Abbildung 18: DJI Mavic 2 Enterprise Dual inklusive Smart Controller (OEHLER 2021). | 38 |
| Abbildung 19: Leica GG04 mit Tablet (LEICA GEOSYSTEMS 2021). | 39 |
| Abbildung 20: Planung einer Drohnenbefliegung (eigene Darstellung). | 40 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 21: Darstellung der im Use Case „In der Au“ mittels Drohne erhobenen Daten..... | 50 |
| Abbildung 22: Darstellung der im Use Case Dienstleistungszentrum mittels Drohne erhobenen Daten Gmunden – In der Au (eigene Darstellung). | 51 |
| Abbildung 23: Einteilung über Investitionsarten nach Investitionsanlass (GÖTZE & BLOECH 2013, 50 ff.). | 53 |
| Abbildung 24: Gmunden „In der Au“: Fläche des Untersuchungsgebietes: 3.500 m ² (eigene Darstellung). | 58 |
| Abbildung 25: Dachvorsprünge: Grün – UAV Vermessung, Rot – Naturbestandsvermessung (eigene Darstellung). | 60 |
| Abbildung 26: Gmunden – Dienstleistungszentrum: Fläche des Untersuchungsgebietes: 12.500 m ² (eigene Darstellung)..... | 62 |
| Abbildung 27: Abschattungen lassen sich auch durch Konstruktion lösen, da Teilbereiche sichtbar bleiben (eigene Darstellung). | 64 |
| Abbildung 28: Starke Verzerrung am äußersten Rand des Untersuchungsgebietes, ein gängiges Phänomen (eigene Darstellung). | 65 |
| Abbildung 29: Auflösungen von unter 1 cm/Pixel erlauben eine präzise Abgrenzung von Objekten (eigene Darstellung). | 70 |
| Abbildung 30: Direkter Vergleich beider Methoden: Durchgezogen: terrestrische Vermessung, strichliert: UAV-Vermessung (eigene Darstellung)..... | 80 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Raumbezogene Verwaltungsthemen (KOMMUNALE GEMEINSCHAFTSSTELLE FÜR VERWALTUNGSVEREINFACHUNG 2004)..... | 13 |
| Tabelle 2: Abrechnung Vermessungsarbeiten Naturbestandsaufnahme Gmunden 2017 (GMUNDEN 2017)..... | 46 |
| Tabelle 3: Übersicht über verwendete Abrechnungstarife 2017..... | 48 |
| Tabelle 4: Ermittlung Gesamtkosten je Verrechnungseinheit..... | 49 |
| Tabelle 5: Ermittlung Jährliche Gesamtkosten Datengewinnung mittels Drohne. | 54 |
| Tabelle 6: Ermittlung der Kosten der Beauftragung eines Geometers..... | 54 |
| Tabelle 7: Informationsgehalt von Naturbestandskategorien. | 57 |
| Tabelle 8: Übersicht über verwendete Abrechnungstarife 2017..... | 66 |
| Tabelle 9: Ermittlung Gesamtkosten je Verrechnungseinheit..... | 67 |
| Tabelle 10: Berechnung der Kosten für die Datenerfassung mittels Drohne und Digitalisierung. | 68 |
| Tabelle 11: Vergleich von Szenarien unterschiedlicher Intensität des Drohneneinsatzes..... | 69 |
| Tabelle 12: Längenanteil der terrestrischen Vermessung, der mit UAV innerhalb der Toleranz zugeordnet werden konnte. | 71 |
| Tabelle 13: Informationsgehalt von Naturbestandskategorien (Ja/Nein/unter Einschränkungen)..... | 72 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------|--|
| AGL: | Above Ground Level |
| APOS: | Austrian Positioning Service |
| GCP: | Ground Control Point |
| GIS: | Geographisches Informationssystem |
| GNSS: | Global Navigation Satellite System |
| gPb: | Globalized Probability of Boundary |
| GSD: | Ground Sampling Distance |
| IMU: | Inertial Measurement Unit |
| LiDAR: | Light (Imaging) Detection And Ranging |
| RMSE: | Root Mean Square Error |
| RTK: | Real Time Kinematic |
| SAR: | Synthetische Apertur |
| SLIC: | Simple Linear Iterative Clustering |
| UAV: | Unmanned Aerial Vehicle |
| UCAV: | Unmanned Combat Aerial Vehicles |
| uLFZ: | unbemanntes Luftfahrzeug |
| URAV: | Unmanned Reconnaissance Aerial Vehicle |

1 Einführung

Der Mensch hat seit jeher das Bedürfnis, seine Umwelt zu erkunden, kennenzulernen, und zu beschreiben. Dies ist wohl der zentrale Ursprung der Geowissenschaften und der Geographie. Ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts führten diese Wissenschaftszweige, die zunehmende Bedeutung raumrelevanter Fragen und die Kombination mit der Digitalisierung zu einem raschen Bedeutungsgewinn von Geoinformationssystemen.

Auch seit Urzeiten träumt der Mensch vom Fliegen, davon seine Umwelt aus der Vogelperspektive zu erkunden. Zuerst, ab Anfang des 20. Jahrhunderts, wurde mittels immer ausgereifter werdenden, motorisierten und bemannten Fluggeräten, dann auch mit unbemannten, ferngesteuerten Fluggeräten geflogen. Diese sind ebenfalls durch die Digitalisierung in hohem Tempo immer leistungsfähiger und breiter einsetzbar geworden.

Es ist naheliegend, dass Geoinformatik und Unmanned Aerial Vehicles – kurz UAV und im Volksmund „Drohnen“ genannt – Schnittpunkte mit hohem Potential haben. Dieses erweitert sich durch die immer schneller wachsende Leistungsfähigkeit der Drohnen fortlaufend. Diese Umstände machen geographische Informationssysteme (GIS) in Verbindung mit Drohnen zu einem interessanten und leistungsfähigen System für den öffentlichen Sektor, vom Bund bis hin zur kommunalen und Verbandsebene. Der Autor möchte seine Abschlussarbeit dem Aufzeigen der Potentiale dieser Verbindung – anhand des Beispiels kommunaler Naturbestandsvermessung – verschreiben und den Leser für die Möglichkeiten, die sie schafft, sensibilisieren. Auf den folgenden Seiten wird in einer Einführung skizziert, welche zentralen Fragenstellungen in der vorliegenden Arbeit behandelt werden, warum diese Fragen relevant sind, und auf welche Art und Weise sie beantwortet werden können.

1.1 Motivation

Der Autor der vorliegenden Arbeit beschäftigt sich bereits seit dem Jahr 2014 mit öffentlichen Geoinformationssystemen in kleineren Gemeinden und Regionalzentren Oberösterreichs. Im Zuge der tagtäglichen Arbeit mit Geodaten im heterogenen und kleinräumig strukturierten Raum des Salzkammerguts bildete sich ein konkretes Bild über die Fragestellungen, Möglichkeiten und auch Probleme, die einen Mitarbeiter im Einsatz von GIS auf einem Gemeinde- oder Stadtamt begleiten. Rasch offenbaren sich

die Potentiale, aber auch die Grenzen, die in diesem Bereich liegen, und wo Entwicklungsbereiche liegen könnten.

Die Geoinformatik wird in diesem Umfeld simpel und lösungsorientiert angewandt. Geoinformationssysteme werden meist nur als Tool zur Datenverarbeitung und Visualisierung eingesetzt. Je größer der Anwender ist, desto komplexer werden die Fragestellungen und auch die Infrastrukturen. In Städten wird oft das ganze Spektrum von Erfassung, Verarbeitung, Analyse und Präsentation abgedeckt, ohne auf externe Dienstleister zurückgreifen zu müssen.

Die Geoinformatik ist ein hochdynamisches, breit gefächertes und komplexes Fachgebiet, das einem stetigen Wandel unterliegt und ständig Neues hervorbringt – eine wertvolle Eigenschaft und ein Garant für immer wieder neu entstehende Pfade, die es wert sind, beschränkt zu werden. Einer dieser Bereiche sind die UAVs. Bereits seit vielen Jahren gibt es Drohnen, einer breiten Masse bekannt, zu vertretbaren Kosten leistungsfähig und kompakt wurden UAVs aber erst in den letzten Jahren. Dadurch wurde diese Technologie zunehmend für immer kleinere Institutionen, Unternehmen und auch Privatpersonen interessant und auch relevant. Für den Autor ist dies der ausschlaggebende Grund, sich eingehend mit dieser Thematik zu befassen, um die Sinnhaftigkeit des Drohneneinsatzes im kommunalen Auftrag zu diskutieren und seine Möglichkeiten und Grenzen auszuloten. Die Drohne soll dabei als ein Mittel zur Effizienzsteigerung gesehen werden, das etablierte Methoden ergänzen oder sogar ersetzen kann. Es liegt nahe, vor allem Anwendungen, die sich – aufgrund von definierten Standards – für einen qualitativen und quantitativen Vergleich eignen, zu diskutieren. Beispielhaft ist hier die Naturbestandsvermessung zu nennen. Diese folgt Standards, die sich meist an gesetzlichen Vorgaben orientieren und ist – wenn durch externes Fachpersonal durchgeführt – mit erheblichen Kosten, aber auch dementsprechender Qualität verbunden. Die terrestrische Naturbestandsvermessung eignet sich demnach hervorragend, um einen Vergleich zur Drohnenvermessung anzustellen und die Ergebnisse im Hinblick auf Kosten und Qualität zu prüfen. Die vorliegende Arbeit soll anhand der klassischen Naturbestandsvermessung die Potentiale dieser Technologie aufzeigen und befasst sich auch mit den Schwierigkeiten und Einschränkungen, die sich hinter dieser Vorgehensweise verbergen.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die vorliegende Masterarbeit hat zum Ziel, die Möglichkeiten und Limitierungen der drohnengestützten Primärdatenerfassung auf kommunaler Ebene anhand eines Vergleichs zur klassischen terrestrischen Naturbestandsvermessung herauszuarbeiten. Dabei werden sowohl Praxiswerte aus Befliegungen erhoben und bewertet als auch Wege einer effizienten Nutzung der gewonnenen Daten im Umfeld eines kommunalen Geoinformationssystems aufgezeigt. Aus dieser Intention heraus lassen sich folgende miteinander verbundene Forschungsfragen formulieren, die es zu beantworten gilt:

- **Können die Leistungen der konventionellen terrestrischen Naturbestandsvermessung auf kommunaler Ebene auch durch UAV-gestützte Vermessung erbracht werden?**

Hypothese: Die Naturbestandsvermessung kann ohne Leistungsverluste mit drohnengestützter Vermessung bewerkstelligt werden.

- **Kann mittels UAV-gestützter Vermessung (kosten-)effizienter gearbeitet werden?**

Hypothese: Drohnengestützte Vermessung ist kosten- und zeiteffizienter einzusetzen als konventionelle Vermessung, ohne dabei Abstriche in der Qualität und Fülle der Daten machen zu müssen.

Die Forschungsfragen sollen anhand von Use Cases auf dem Gemeindegebiet der Stadt Gmunden aufgearbeitet und beantwortet werden.

1.3 Struktur der Arbeit

Das Einführungskapitel befasst sich mit der Motivation des Autors zur Erstellung der vorliegenden Masterarbeit. Dabei werden persönliche Erfahrungen und grundlegende Einordnungen zur Thematik vorgestellt. Darüber hinaus wird die Aufgabenstellung mit Fokus auf die Formulierung und Erläuterung der Forschungsfragen, die daraus abgeleiteten Hypothesen und die Zielsetzung dieser wissenschaftlichen Arbeit behandelt.

Das Kapitel Grundlagen vermittelt relevante Informationen zu den Themenkreisen kommunale Aufgabenfelder mit Raumrelevanz, drohnengestützte Vermessungsmethoden und terrestrische Vermessungsmethoden. Es werden hierbei Fragestellungen kommunaler Tätigkeitsfelder im 21. Jahrhundert – im Hinblick auf moderne Verwaltung – erläutert und es werden Einsatzmöglichkeiten für UAVs abgeleitet. Die jeweiligen Unterkapitel zur Drohnenvermessung bzw. terrestrischen Vermessung erläutern die

technische Basis der Methoden und auch wie die zugehörigen Workflows lege artis ablaufen. Dazu gehören sowohl die Beschreibung gängiger Hardwares als auch die Vorstellung verwendeter Softwares.

Das Kapitel zur Methodik befasst sich mit dem Versuchsaufbau zur Beantwortung der Forschungsfragen und beschreibt die genaue Hardwareausstattung und Konfiguration des Equipments. Hier werden die einzelnen Arbeitsschritte und Prozessparameter des Versuchsablaufes genau definiert und von der Vorbereitung über die Befliegung bis hin zur Auswertung dargestellt. Auch für die Naturbestandsvermessung mit herkömmlichen Geometermethoden wird der Workflow unter Berücksichtigung der gültigen Vermessungsgesetze und -verordnungen strukturiert dargestellt. Sowohl Drohnenvermessung als auch terrestrische Vermessung liefern Grunddaten, die einer weiteren Adaptierung an die Anforderungen eines kommunalen Geoinformationssystems bedürfen. Die hierzu notwendigen Maßnahmen von der Datenkonvertierung bis zur notwendigen Digitalisierung/Vektorisierung von Luftbilddaten werden ebenso an dieser Stelle beschrieben. Darüber hinaus werden zwei Use Cases vorgestellt, anhand derer die Forschungsfragen behandelt und beantwortet werden.

Anhand dieser Beispiele werden Drohnenbefliegung und konventionelle Vermessung miteinander verglichen und mittels konkreter Naturbestandserhebungen gegenübergestellt. Dies geschieht in den Kapiteln 4 und 5, in denen die Ergebnisse zuerst objektiv dargestellt werden, um in weiterer Folge diskutiert und nach einem qualitativen und quantitativen Methodenvergleich – die Kostenfragen, Genauigkeit, Informationsgehalt und die Erkenntnisse der Praxis werden berücksichtigt – bewertet zu werden.

Schlussendlich werden die Erkenntnisse in Kapitel 6 nochmals zusammengefasst beurteilt und mögliche Perspektiven, offene Fragen und relevante Zukunftsentwicklungen angesprochen.

1.4 Literaturüberblick und Forschungsstand

Es wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass etwa 80 % aller Entscheidungen im Amtsalldag Raumrelevanz haben. Geodaten sind daher eine bedeutsame Entscheidungsgrundlage für Kommunalverwaltungen. Im deutschen Sprachraum ist die KGST als Fachverband deutscher Kommunen (KOMMUNALE GEMEINSCHAFTSSTELLE FÜR VERWALTUNGSVEREINFACHUNG 2004) die führende Institution zur Steuerung, Organisation und Management der Kommunalaufgaben. Die KGST hat sich daher auch mit

Geoinformationssystemen beschäftigt und grundlegende Feststellungen für den kommunalen Sektor getroffen.

Die terrestrische Vermessung (die in der vorliegenden Masterarbeit zum Vergleich mit der Drohnenvermessung herangezogen wird) von Daten erfolgt bis zum heutigen Zeitpunkt vornehmlich durch weiterentwickelte klassische Vermessungsmethoden wie beispielsweise KOHLSTOCK (2011) oder MATTHEWS (1997) sie beschreiben. Hilmar Ingsand (2010) verband durch seine Tätigkeit als Professor für Geodätische Messtechnik am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich in seinen Publikationen die klassische Vermessung mit der Photogrammetrie. Diese Verbindung ist auch Kernmaterie der vorliegenden Arbeit, in der Teilaspekte beider Vorgehensweisen verglichen werden. Im Zuge der zunehmenden Digitalisierung werden moderne Methoden der Photogrammetrie und Fernerkundung zunehmend interessanter für kleinere Anwender und UAVs als Trägersystem für die Datenaufnahme zunehmend populär. Ein Blick in die Publikationen von Gonzalo PAJARES (2015) gibt nicht nur einen umfangreichen Überblick über photogrammetrische Anwendungsfälle für UAVs – auch Photogrammetrie und Vermessung im urbanen Umfeld werden thematisiert. Der Fokus der Arbeit des Physikers liegt insbesondere in der Bildanalyse und -bearbeitung (PAJARES & LA MANUEL DE CRUZ 2004) sowie im Bereich der künstlichen Intelligenz, ein Bereich der für Drohnen zunehmend an Bedeutung gewinnt. Die ständige Weiterentwicklung photogrammetrischer Methoden, der steigende Automatisierungsgrad und die immer simplere Bedienbarkeit von Soft und Hardware bei abnehmender Größe und sinkenden Kosten wurden im Jahr 2014 von COLOMINA & MOLINA in einem viel beachteten Beitrag im *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* in bis heute unveränderter Gültigkeit beschrieben und zeigte auf, wohin der Weg führt. Diese Ausführungen sind von zentraler Bedeutung für die vorliegende Forschungsarbeit und für die in ihr erörterten kommunalen Anwendungen.

Aufgrund des fachübergreifenden und anwendungsorientierten Charakters der Thematik bietet sich die Aufbereitung von Wissen in Sammelbänden geradezu an. Die Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (DVW) widmet seit einigen Jahren regelmäßig Bände ihrer Schriftenreihe dem Thema Drohnen. Sie sind den Möglichkeiten des Drohneneinsatzes zur Vermessung gewidmet. Im aktuellen Band werden beispielsweise technische Grundlagen (SCHMECHTIG 2020), der Einsatz von Drohnen im amtlichen Vermessungswesen (SCHLÖSSER & KUHN 2020), bei der

Konfiguration zu berücksichtigende Parameter (PRZYBILLA 2020), Georeferenzierung mit integrierten RTK-Systemen (ELING & MÜNSTERMANN 2020) und die konkrete Auseinandersetzung mit Drohnen im kommunalen Einsatz durch MAIER (2020) besprochen. In früheren Bänden lassen sich umfassende Informationen zu essenziellen Grundfragen wie etwa zu Kamerasystemen finden (PRZYBILLA 2017). Damit runden diese Tagungsbände das Themengebiet um (kommunale) Drohnenvermessung ab und bieten einen umfangreichen Überblick an Grundlageninformationen, methodischen Ansätzen, Feldarbeit und Ausblicken in die Zukunft. Darüber hinaus ist es beim Arbeiten mit Drohnen von Bedeutung, von Anfang an Unwägbarkeiten der Technik und der Untersuchungsgebiete zu berücksichtigen und ihnen mit Lösungsansätzen – wie sie beispielsweise SEIFERT et al. (2019) in dem für Drohnenvermessung anspruchsvollen Bereich der Forstwirtschaft beschreiben – zu begegnen. SANZ-ABLANEDO et al. (2018) zeigen schließlich die für diese Arbeit zentrale Verbindung zwischen der Lagetreue UAV-generierter Daten und dem richtigen und ausreichenden Setzen von Ground Control Points (GCP) auf.

Der Vermessungsflug ist nur der erste Teil des Workflows und somit ist es nicht nur erforderlich, sich mit der klassischen Vermessung und der Methodik und Technik des Drohnenbefliegens zu befassen, sondern sich auch mit den Möglichkeiten der Datenauswertung auseinanderzusetzen. ALIDOOST & AREFI (2017) haben hierzu gängige hochautomatisierte Softwares einem Feldtest unterzogen, woraus Agisoft Photoscan und Pix4D Mapper als nahezu gleichwertige Alternativen hervorgegangen sind. Da diese Softwares jedoch Einschränkungen in der Flexibilität und Nachvollziehbarkeit des Processings mit sich bringen, ist eine Folge der simpleren Bedienung und erhöhten Benutzerfreundlichkeit (PRZYBILLA et al. 2015).

Einen Ausblick, wohin die Zukunft führt, geben beispielsweise PARK et al. (2020) in ihrem Paper zur automatisierten Inspektionsbefliegung von Hochspannungsleitungen oder NEX et al. (2019) in ihrer Abhandlung über eine günstige automatisierte Lösung, die beinahe in Echtzeit bereits mittels deep learning prozessierte Daten liefert, um die Reaktionszeiten bei Katastropheneinsätzen zu verkürzen.

Die auf den letzten Seiten genannten Forschungsfelder fließen als integrale Bestandteile in die Katastervermessung ein, in der sich diese Masterarbeit einordnen soll. Der Versuchsaufbau in den folgenden Kapiteln ist aufgrund der Fragestellung eng verwandt mit der Forschungsarbeit von MANYOKY et al. (2011), die bereits damals zeigen

konnten, dass Drohnenvermessung imstande ist, die Anforderungen der Schweizer Vermessungsregelwerke zu erfüllen. Im selben Jahr befassten sich CUNNINGHAM et al. (2011) mit drohnengestützter Katastererfassung, wobei auch Light (Imaging) Detection and Ranging (LiDAR) und synthetische Apertur (SAR) betrachtet wurden. Es soll hier jedoch vordergründig die Orthofotographie behandelt werden. In diesem Zusammenhang wurde ein Beitrag von STÖCKER et al. (2020) in *Remote Sensing* veröffentlicht, der sich mit den spezifischen Charakteristika der Bilddatenerfassung für Katastervermessungen auseinandersetzt und Chancen wie Probleme aufzeigt. Hierbei werden konkrete Handlungsempfehlungen – beispielsweise zur Kreuzbefliegung – gegeben, um die Genauigkeit der Datensätze zu erhöhen. Es gibt auch bereits eine Fülle an Ansätzen zur automatisierten Vektorisierung von Katastergrenzen, wie CROMMELINCK et al. (2018) zeigen. Hier sind die Möglichkeiten aufgrund von Limitierungen durch Abgrenzbarkeit von Objekten, Problemstellungen im Training der Classifier und der Übertragbarkeit jedoch begrenzt. Es finden sich aber mehrere vielversprechende Hinweise auf eine nennenswerte Teilautomatisierung des manuellen Vektorisierungsprozesses, wie CROMMELINCK, BENNETT, GERKE & KOEVA et al. (2017) in einer weiteren Forschungsarbeit zu Globalized Probability of Boundary (gPb)-Contour Detection zeigen konnten. CROMMELINCK, BENNETT, GERKE, YANG & VOSSELMAN (2017) befassten sich im selben Jahr auch mit Simple Linear Iterative Clustering (SLIC). Als alleinige Lösung ist im Moment keine der Varianten akkurat, es zeichnet sich jedoch ab, dass eine Kombination von mehreren Methoden mit einem zusätzlichen Oberflächenmodell entscheidende Fortschritte bringen kann. Aktuelle Beiträge wie von FETAI et al. (2021) zeigen das hohe Potential von deep learning auf, um zumindest eine Vorstufe von Katastergrenzen mit einer Korrektheit von über 95 % liefern zu können.

Schließlich geben ŠAFÁŘ et al. (2021) einen aktuellen Einblick in die drohnengestützte Katastervermessung in der Tschechischen Republik, bei der Gebäude, Zäune und Grundstücke durch eine Kombination von UAV und LiDAR mit einer Toleranz von 0,14 m vermessen wurden. Es zeigte sich, dass LiDAR der herkömmlichen 3D-Punktwolkengenerierung aus Bilddaten überlegen ist, aber unter der Inkaufnahme von Verlusten bei der Vollständigkeit. Es mussten etwa 25 % der Daten konventionell nachvermessen werden, um den Anforderungen des Katasters gerecht zu werden. Dennoch konnte eine Kostenersparnis von 18 % (unter Einbeziehung des Processings) erreicht werden.

Drohnen weisen ein hohes Potenzial zur Optimierung von Vermessungsarbeiten im Hinblick auf Aufwand und Kostenstruktur auf. Die zugehörigen Arbeitsprozesse können zurzeit jedoch nur teilautomatisiert ablaufen und verlangen eine weitgehend manuelle Digitalisierung oder zumindest Anpassung. Eine sukzessive Erhöhung des Automatisierungsgrades ist zentraler Forschungsgegenstand und im Hinblick auf Technologien wie deep learning nicht mehr in allzu weiter Ferne.

2 Grundlagen

Im Folgenden soll dem Leser ein einführender Überblick über die Aufgaben einer modernen Kommunalverwaltung und über die Arten räumlicher Fragestellungen im Gemeindealltag gegeben werden. Hieraus lassen sich in weiterer Folge Anwendungsmöglichkeiten für UAVs – unter anderem die Naturbestandsvermessung – ableiten. Für eine spätere Gegenüberstellung konventioneller Vermessungsmethoden mit der Drohnenvermessung werden in diesem Kapitel auch grundlegende technische und rechtliche Informationen zur Drohnenbefliegung aufbereitet. In gleicher Art und Weise wird eine kurze Einführung in die terrestrische Vermessung gegeben, wobei gängige Vermessungsmethoden einander gegenübergestellt werden.

2.1 Kommunale Aufgabenstellungen im 21. Jahrhundert

Die aktuelle Ausgestaltung von Strukturierung, Steuerung und Finanzierung kommunaler Aufgabenfelder ist aufwendig und vielschichtig geartet, aber weitgehend aus der Geschichte erklärbar. Die sich im 21. Jahrhundert dynamisch verändernden Rahmenbedingungen stellen Kommunalverwaltungen tagtäglich vor neue Problemstellungen, die sowohl aus dem Raum als auch aus der Gesellschaft heraus als interagierendes System entstehen (PROROK et al. 2013, 14 ff.).

Gemeinden sind wie die übergeordneten Instanzen Länder und Bund sogenannte Gebietskörperschaften, das heißt, dass sie jeweils für einen bestimmten geographischen und organisatorischen Bereich der Republik und für die dort ansässigen Menschen zuständig sind. Die drei Gebietskörperschaften haben zur Wahrnehmung ihrer Verantwortungen diverse Einrichtungen installiert (z. B. die Gemeindeämter), deren Organe in aller Regel gewählt werden. Fast alle dieser Ämter/Institutionen beschäftigen Mitarbeiter, die entweder als Vertragsbedienstete aufgenommen oder zur Wahrnehmung ihrer Aufgaben als Beamte bestellt worden sind. Die Gemeinden unterliegen der Selbstverwaltung, somit haben sie dementsprechend einen in der österreichischen Bundesverfassung eindeutig definierten und durch sie geschützten eigenen Wirkungsbereich (B-VG (2019), Art. 2, Art.155–120).

2.1.1 Aufgabenfelder einer Kommunalverwaltung

Die Aufgaben einer kommunalen Verwaltung sind breit gefächert – von der Umsetzung von Gesetzen über Planung, Bereitstellung und Wartung kommunaler Infrastruktur bis hin zur langfristigen Ressourcenplanung im Hinblick auf Raum, Zeit, finanzielle Mittel,

Material, demographische Entwicklungen und anderes. All dies dient der Gewährleistung und Sicherung eines geregelten Zusammenlebens und der Erhaltung sowie Verbesserung der Lebensqualität der Bewohner. Um diese Anforderungen abdecken zu können, bedarf es einer strukturierten Organisation und Handlungsweise.

HESSE & ELLWEIN (2012, 307 ff.) haben in ihrem weit verbreiteten Lehrbuch zum politischen System der Bundesrepublik Deutschland nach Ansicht des Autors eine treffende Abbildung einer allgemeinen Verwaltungsstruktur benannt, die im Allgemeinen auf Gemeindeverwaltungen anwendbar ist und die Notwendigkeiten sowie Prioritäten des öffentlichen Handelns erkennen lässt. Es werden folgende fünf Verwaltungsgrundtypen benannt:

- Ordnungsverwaltung:
Sie vollzieht und kontrolliert die Vorschriften und Gesetze, etwa in Form des Gemeindegewachkörpers (Polizei), Aufsichtsämter, Baurechtsangelegenheiten etc.
- Dienstleistungsverwaltung:
Diese Dienstleistung am Bürger, besser sind vermutlich die Begriffe Daseinsvorsorge oder Grundversorgung, ist ein Kernbereich kommunaler Verwaltung. Hierzu zählen die Erhaltung essenzieller Infrastruktur (Straßen, Wasserversorgung etc.), der Betrieb von Schulen oder kulturellen Einrichtungen bis hin zur (auch finanziellen) Unterstützung der unterprivilegierten Teile der Gesellschaft – dies ist die Domäne der Sozialämter.
- Wirtschaftende Verwaltung:
Die wirtschaftende Verwaltung betrachtet das Handeln der Gemeinde unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Dazu zählen Teile der Finanzverwaltung, Beschaffung, Controllingfunktionen etc.
- Organisationsverwaltung:
Hier findet die Verwaltung der eigenen Struktur statt. Personalabteilungen, Lohnverrechnung etc. sind Teile dieses Verwaltungstyps, der auch als allgemeine Verwaltung bezeichnet werden kann.
- Politische Verwaltung:
Diese bildet das Bindeglied zwischen Verwaltung und Politik. Auf Gemeindeebene lässt sich diese am ehesten in den Spitzen von

Geschäftsgruppen oder Abteilungen erkennen. Auf höheren Ebenen gehören hier Referate von Landesräten oder Ministern dazu.

Entlang dieser Grundtypen lässt sich eine Gemeindeverwaltung darstellen und die einzelnen Tätigkeiten werden zuordenbar und zueinander abgrenzbar. Nachfolgende Darstellung des Österr. Gemeindebundes (Abbildung 1) gibt am Beispiel Österreichs einen kurzen Überblick über die Tätigkeitsfelder und den Umfang der Leistungen von Gemeindeverwaltungen.

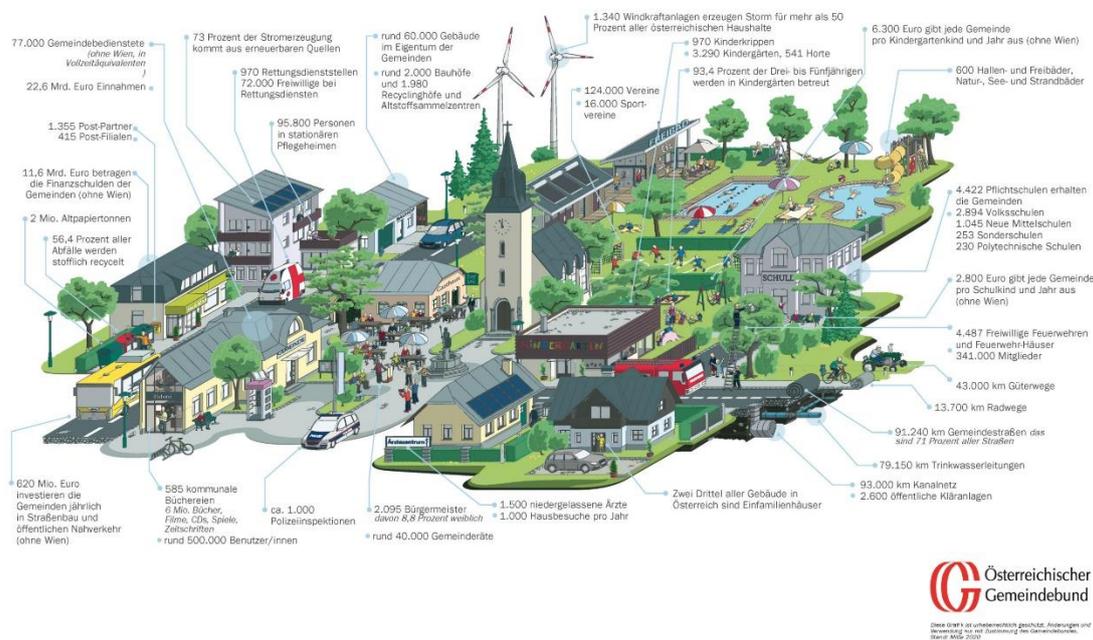


Abbildung 1: Was Unsere Gemeinden leisten (ÖSTERREICHISCHER GEMEINDEBUND 2021).

2.1.2 GIS und Drohnen im kommunalen Einsatz

Drohnen sind durch ihre militärische Herkunft von Anfang an eng mit der Informationsgewinnung im öffentlichen Auftrag verwoben. Staaten verwenden sie seit vielen Jahren auf Bundesebene und auch auf Landesebene haben Drohnen schon vor einiger Zeit Einzug gehalten, sei es zur Dokumentation landwirtschaftlicher Flächen, zur Brückeninspektion oder zur Gewinnung anderer (Geo-)Daten.

Auf kommunaler Ebene, in Verbänden und sonstigen lokal agierenden Organisationen ist die Landkarte – was Drohneneinsatz betrifft – oftmals noch weiß. Daraus ergibt sich ein Potential, Drohneneinsatz in diesen Institutionen zu forcieren und

Anwendungsmöglichkeiten zu finden bzw. weiterzuentwickeln. Da die öffentliche Verwaltung zentrale Bereiche des Lebens abdeckt, ermöglicht und regelt – Stichwort Daseinsvorsorge –, entstehen auch im Einsatzspektrum für UAVs Parallelen zum kommerziellen Einsatz in der Privatwirtschaft. Daraus ergeben sich in Kombination mit den klassischen Einsatzgebieten von Geoinformationssystemen aus Sicht des Autors folgende Grundaufgaben für Drohneneinsatz auf kommunaler Ebene:

- Foto-/Filmaufnahmen,
- Orthofotographie,
- 3D-Modelle,
- Naturbestandsvermessung,
- Dokumentation von Bausubstanz, Infrastruktur oder Naturprozessen,
- Thermographie,
- Straßenzustand sowie
- Vegetation.

Diese Aufgaben, die der klassischen Primärdatenaufnahme dienen, können dann in weiterer Folge zur Erstellung von Bildmaterial, zur Schaffung eines ersten Überblickes, als Grundlage für Planungen, zu Dokumentationszwecken in hoher Qualität und auf einem in der Regel bedeutend höheren Genauigkeitsniveau, als bestehende Datensätze es liefern, herangezogen werden.

Geoinformationssysteme werden im kommunalen Umfeld weitestgehend dazu genutzt, um Themenkreise und Arbeitsabläufe mit raumbezogenen Informationen abzuarbeiten, zu unterstützen und zu vernetzen. Es wird davon ausgegangen, dass mit einem Anteil von etwa 80 % die Mehrheit aller im Amt abzuarbeitenden Fragestellungen Raumrelevanz hat und somit für die Bearbeitung mit einem Geoinformationssystem infrage kommt.

Diese Fragen können von konkreten bautechnischen Sachverhalten über Grünflächenmanagement bis hin zur Veranstaltungsplanung oder demographischen Themen reichen. Die kommunale Gemeinschaftsstelle für Verwaltungsvereinfachung der Bundesrepublik Deutschland (KOMMUNALE GEMEINSCHAFTSSTELLE FÜR VERWALTUNGSVEREINFACHUNG 2004) hat hierzu vor einigen Jahren eine Aufstellung der Themenbereiche mit Raumrelevanz veröffentlicht. Diese eignet sich als Überblick und wird nachfolgend in *Tabelle 1* dargestellt:

Table 1: Raumbezogene Verwaltungsthemen (KOMMUNALE GEMEINSCHAFTSSTELLE FÜR VERWALTUNGSVEREINFACHUNG 2004).

| Fachbereich | Raumbezogene Informationen (auszugsweise) |
|-------------------------|---|
| Bauamt | Kataster, Bebauung |
| Liegenschaftsverwaltung | Liegenschaftsbuch, Eigentümer, Verträge |
| Stadtplanung/Baurecht | Bebauungspläne, Flächenwidmungspläne, Örtliches Entwicklungskonzept |
| Grünflächenmanagement | Baumkataster, Bepflanzung |
| Straßenverkehr | Straßen, Verkehrszeichen, Wegweiser, akt. Planungen |
| Umwelt | Abfallbeseitigung Standorte und Dimension, Routen |
| Tiefbau | Straßenzustand, Leitungskataster |
| Bildung | Standort, Typ |
| Vermessung | Orthofotos, Naturbestandsvermessung |

Die öffentliche Hand ist ein zentraler Produzent und Verwalter von Geodaten. Aus den verschiedensten Bereichen, wie Katastervermessung bis hin zu Gesundheitsthemen, werden diese erhoben, ausgewertet und weiterverarbeitet. Das Anforderungsprofil an kommunale Geoinformationssysteme lässt sich im Wesentlichen in drei Dimensionen darstellen. Diese sind Hardware, Software und Benutzerkenntnisse. Darüber hinaus gelten Grundprinzipien des Public Management wie Sparsamkeit, Zweckmäßigkeit und Wirtschaftlichkeit. Die vordefinierten Ziele, der gesetzliche Rahmen, mögliche Eigenleistung, notwendige Fremdleistung und vorhandene Finanzmittel geben vor, in welche Richtung sich ein kommunales GIS als Projekt entwickeln kann.

Die Strukturierung und Handhabung der Daten geschieht – je nach Größenordnung und Anforderungen der Institution – auf unterschiedlichste Weise. Vom grundlegenden Desktop-GIS mit lokaler Datenspeicherung bis hin zur Geodateninfrastruktur, die serverbasiert Kunden oder der Bevölkerung Geodaten abgestimmt auf die jeweiligen Bedürfnisse zur Verfügung stellt, existieren unterschiedlichste Ausprägungsformen. Je mehr Anwender in einer Institution in ein Geoinformationssystem involviert sind, desto

unkomplizierter gestaltet sich die Zusammenarbeit, wenn auf eine Netzwerk- oder Cloudlösung gesetzt wird, um Daten und Ressourcen unkompliziert teilen zu können. Geoinformationssysteme sind in ihrer Leistung und im Funktionsumfang idealerweise auf das Anforderungsprofil und die Kenntnisse des jeweiligen Endbenutzers abgestimmt und möglichst auf dem Stand der Technik. Ein modularer Aufbau mit einer engmaschigen Update- und Supportstruktur schafft die nötige Sicherheit und Flexibilität in der Anwendung. Erlaubt es die Anwenderstruktur, ist auch die Nutzung von Open Source Softwares wie QGIS ein effizient gangbarer Weg.

2.2 Grundlagen der UAV-gestützten Vermessung

2.2.1 Drohnen: Recht, Anwendung und Anforderungen

Unmanned Aerial Vehicles (UAV), in der Gesetzgebung auch als unbemanntes Luftfahrzeug (uLFZ) benannt, sind im militärischen Umfeld entstanden und oftmals wird der Angriff Österreich-Ungarns auf Venedig mittels Ballonbomben als die erste oder eine der ersten Nutzungen dieser Luftfahrzeugkategorie beschrieben (GREBER 2013). Im Ersten und Zweiten Weltkrieg wurden diese Versuche systematisch weiterentwickelt und kamen dann im Kalten Krieg ab den 1960er Jahren zu Aufklärungszwecken und später auch mit Waffensystemen bestückt zum Einsatz.

Anfang der 2000er Jahre begannen sich Drohnen auch langsam für eine zivile Nutzung und in der Nutzung des zivilen Luftraumes anzubieten. Durch die stetige Verbesserung der Leistung und Kosteneffizienz zentraler Bestandteile, wie Global Navigation Satellite System (GNSS), Real Time Kinematic (RTK), der Inertial Measurement Unit (IMU) der externen Sensorik und auch der Kameratechnik, steigt das Potential zum zivilen Einsatz der UAVs beständig (TURNER et al. 2012, 1393 ff.).

In den letzten Jahren ist diese Dynamik gestiegen und mittlerweile ist die Nutzung von Drohnen zu unterschiedlichsten Zwecken in der Mitte der modernen Gesellschaft angekommen, nach FELDMANN (2015) ersetzen diese auch bisherige digitale Workflows, wie etwa Orthofotographie oder Satellitenaufnahmen. Es ist ein situationsangepasstes Arbeiten mit Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten möglich und die niedrige Flughöhe (Above Ground Level – AGL) ermöglicht Auflösungen im Bereich von wenigen Zentimetern.

Man kann Drohnen nach der Bauart in Starrflügler und Copter differenzieren WIELAND (2018, 18 f.), diese weiter in Quad-, Hexa- und Octocopter, wobei die wachsende

Anzahl der Rotoren vor allem anspruchsvolleren Sicherheits- und Tragfähigkeitsnotwendigkeiten gerecht werden soll. Es gibt dementsprechend unterschiedliche Arten von UAVs: von Unmanned Reconnaissance Aerial Vehicle (URAV), das heißt Aufklärungsdrohnen, Unmanned Combat Aerial Vehicles (UCAVs – bewaffnete Drohnen), die der militärischen Nutzung unterliegen, bis hin zu den kleineren und kleinen und großteils für die zivile Nutzung relevanten Modellen wie klassischen Quad- oder Hexacoptern (Micro-/Mini-UAV). Beispielhaft ist hier die Modellpalette des chinesischen Herstellers DJI zu nennen. Diese Vielfältigkeit setzt sich auch in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen fort, die sich von militärischer Nutzung über Nutzung in Blaulichtorganisationen, Inspektionen und anderen Verwendungen z. B. im Bauwesen bis hin zu Befliegungen in der Land- und Forstwirtschaft oder zur gewerblichen bzw. privaten Erstellung von Foto-/und Filmmaterial erstrecken. Hierbei können Daten für 2D oder 3D optimiert gewonnen werden, Ist-Zustände dokumentiert werden oder aber auch in eine zeitliche Relation gesetzt und so Veränderungen erfasst werden.

Der sprunghafte Anstieg der Nutzung – vor allem der zivilen – machte es vor einigen Jahren notwendig, Regulative und Gesetze zu schaffen, die das Drohnenfliegen in einen (zumindest theoretisch) geregelten Rahmen transferieren. Bis zum Beginn des Jahres 2021 war die EU-Gesetzgebung zum Einsatz von Drohnen heterogen angelegt, es gab national unterschiedliche Regelungen, wobei in Österreich durch Regulative wie das Luftfahrtgesetz (LFG) und Vorgaben der Austro Control GmbH hohe Anforderungen an UAV gestellt wurden (z. B.: teilweise Redundanz der Steuerungssysteme). Abgelöst wurden diese nationalen Regulative durch die EU-Verordnung 2019/947, die die Rahmenbedingungen für den Drohneneinsatz europaweit optimieren und vereinheitlichen soll.

DROHNEN: Rechtliche Rahmenbedingungen ab 31.12.2020

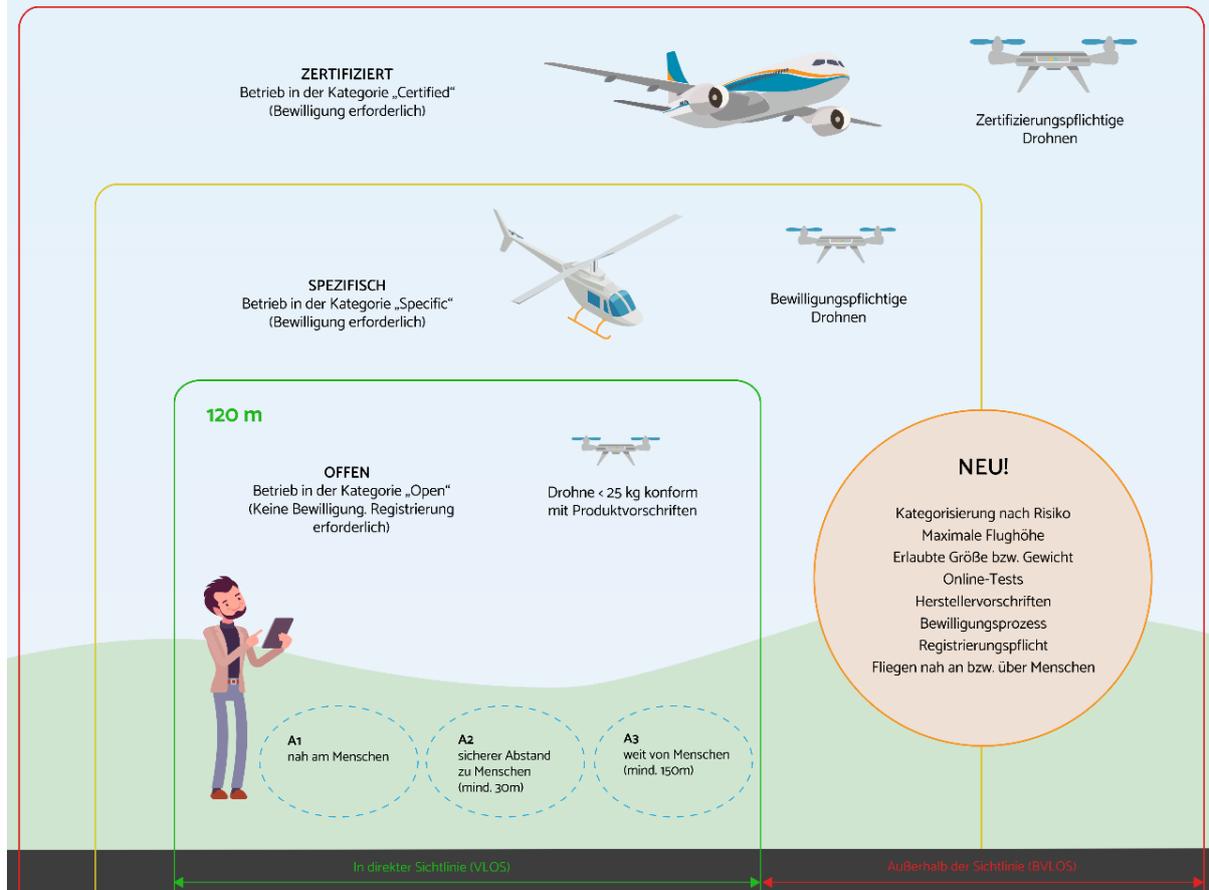


Abbildung 2: EU-Verordnung 2019/947. Rechtliche Rahmenbedingungen (AUSTRO CONTROL GMBH 2021a).

Mit Inkrafttreten der neuen Regelungen gibt es somit, wie aus *Abbildung 2* und *Abbildung 3* ersichtlich, eine Unterscheidung in **Open** (Unterkategorien A1, A2, A3), **Specific** und **Certified**. In der offenen Kategorie muss permanent echter Sichtkontakt zum UAV gewährleistet sein, es darf höchstens mit einer Flughöhe von 120 m über Grund (AGL) operiert werden und das Abfluggewicht darf 25 kg nicht übersteigen. Für die Unterkategorie Eins gelten ein maximales Abfluggewicht von < 900 g, C0/C1 Kennzeichnung oder Eigenbauten < 250 g (analog der vormaligen Spielzeugkategorie). Für die Unterkategorie A2 muss das maximale Abfluggewicht zwischen 900 g und 4 kg liegen. Für die Unterkategorie A3 muss das maximale Abfluggewicht zwischen 900g und 25 kg liegen und es sind zusätzliche Vorkehrungen zu treffen beziehungsweise Betriebseinschränkungen gegeben. In diese Klasse gehören C2-C4 Drohnen (AUSTRO CONTROL GMBH 2021a).

| OPEN Kategorie | | | | | | | | | |
|------------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|----------------------|--|---------------|-----------------|---|
| Unter- kategorie | Betrieb | | | Gerät | | | Betreiber | Pilot | |
| | Höhe | Sicht | Fluggebiet | CE-Kennzeichnung | MTOM/Geschwindigkeit | Ausrüstung | Registrierung | Mindestalter | Kompetenz |
| A1 (über Personen) | bis 120 m über Grund ¹ | in Sichtverbindung (VLOS) ² | Flüge über unbeteiligten Personen | „Spitzflug“ ³ | < 250 g | gemäß Spielzeugrichtlinie ⁴ | Nein | - | Mit Benutzerhandbuch vertraut |
| | | | Keine Flüge über Menschenansammlungen | keine (Eigenbau) | < 250 g und < 19 m/s | Nur wenn Sensor zur Erfassung persönlicher Daten (zB Kamera) oder über 80 J (zB „racing drones“) | | | |
| | | | | keine, aber vor 1.1.2023 in Verkehr gebracht | < 250 g | | | | |
| | | | Co | < 250 g und < 19 m/s | | | | | |
| | | | Flüge wo nicht zu erwarten ist, dass unbeteiligte Personen überfliegen werden | C1 | < 900 g oder < 80 J | direkte Fernidentifizierung, Geo-Sensibilisierung eingeschaltet/aktualisiert | Ja | 16 ⁵ | Mit Benutzerhandbuch vertraut Online-Kurs und Online-Test |
| | | Keine Flüge über Menschenansammlungen | | | | | | | |
| A2 (nahe Personen) | | | 30 m Abstand zu unbeteiligten Personen Verkürzung des Abstandes auf 5 m im „Low-Speed-Mode“ möglich | C2 | < 4 kg | direkte Fernidentifizierung, Geo-Sensibilisierung eingeschaltet/aktualisiert | | | Mit Benutzerhandbuch vertraut Online-Kurs und Online-Test Flugpraxis (Selbststudium) Theorie-Prüfung bei Behörde |
| A3 (weit entfernt von Personen) | | | Keine unbeteiligten Personen im Fluggebiet | C3 | < 25 kg | direkte Fernidentifizierung, Geo-Sensibilisierung eingeschaltet/aktualisiert | | | Mit Benutzerhandbuch vertraut Online-Kurs und Online-Test |
| | | | Abstand von 150 m zu Wohn-, Gewerbe-, Industrie- oder Erholungsgebieten | C4 | | | | | |
| | | | | keine (Eigenbau) | | | | | |
| | | | keine, aber vor 1.1.2023 in Verkehr gebracht | | | | | | |

¹ Ausnahme: Betrieb in einem Umkreis von 40 m um ein künstliches Hindernis oder ein natürliches Hindernis in Abhängigkeit der Höhe des Hindernisses. Die Höhe des Hindernisses ist die erlaubte Flughöhe bis zu 120 m über der Höhe des Hindernisses.
² Ausnahme: „Follow-me-Modus“ oder Flüge entlang eines Beweises.
³ Spitzflug im Sinne der Richtlinie 2009/67/EG.
⁴ Keine weitere Kennzeichnung des Herstellers notwendig und der Nutzer vor 10. Juni 2016 über die Sicherheit von Spielzeug.
⁵ Ausnahme für Piloten mit 16 Jahren bis 17 Jahren: Wenn das Gerät unter der direkten Aufsicht eines verantwortlichen Betreibers steht, welcher das Mindestalter von 15 Jahren sowie alle Kompetenzanforderungen erfüllt.
⁶ Wassten unter jeder Weise unbeteiligte Personen überfliegen bis über Flugweg so kurz wie möglich aufhalten.

Abbildung 3: Open Kategorie (AUSTRO CONTROL GMBH 2021a).

Erfüllt das UAV die Voraussetzungen für die Open Kategorie nicht, so wird eine Bewilligung für die Specific Kategorie benötigt, die in Österreich von der Austro Control GmbH erteilt wird. Dies betrifft in erster Linie Flüge außerhalb der Sichtweite, Flüge mit Drohnen > 25 kg maximalem Abfluggewicht und Flüge mit Drohnen über besiedeltem Gebiet und > 4 kg maximalem Abfluggewicht. In der Certified Kategorie wird das Risiko dann darüber hinaus als mit der bemannten Luftfahrt vergleichbar beschrieben, das heißt, wenn das UAV beispielsweise für Personen- oder Gefahrguttransport eingesetzt wird. Hier ist eine zusätzliche Zertifizierung der Drohne notwendig (AUSTRO CONTROL GMBH 2021a).

Neben der Erfüllung der im Einsatzgebiet geltenden rechtlichen Rahmenbedingungen werden weitere Anforderungen an UAVs gestellt. Diese betreffen vor allem Gewicht und Flugzeit (die bei begrenzter Akkukapazität direkt voneinander abhängen), Bauart und darüber hinaus auch die verwendeten Kamerasysteme und Wirtschaftlichkeitsaspekte (SCHLÖSSER & KUHN 2020, 46). Zusätzlich spielt die verwendete Sensorik eine Rolle, insbesondere, ob mit integrierten Lösungen oder leistungsfähigen Spezialkameras gearbeitet wird. In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf Ready-to-fly Quadcoptern im Low-Cost-Bereich.

2.2.2 Kamerasysteme und Verortung

In den letzten Jahren ist mit der Luftbildfotographie durch Drohnen eine weitere gängige Methode für die Erstellung von zwei- und dreidimensionalen Objekten entstanden.

Die Qualität der erstellten Aufnahmen und somit die Sensoren bilden eine zentrale Grundlage für eine vermessungstechnische oder photogrammetriebezogene Nutzung dieser. Es ist daher von entscheidender Bedeutung, welche Systeme hier genutzt werden. Laut PRZYBILLA (2017) können die Drohnenkamarasysteme grundsätzlich in für UAV- Anwendungen entwickelte proprietäre Systeme, Groß- und Mittelformatkameras, Bridge-/Systemkameras oder Systemkameras unterschieden werden.

Das Arbeiten mit UAV-gestützten Kamerasystemen zeigt laut MEIßNER, H., PRZYBILLA, H.-J., CRAMER, M., STEBNER, K. (2018, 47) besonders in der Kartierung begrenzter Areale in hohem Detaillierungsgrad seine Stärken durch flexible Anwendbarkeit und Verfügbarkeit. Drohnen werden immer häufiger zur ingenieurtechnischen Vermessung eingesetzt und ersetzen in einigen Bereichen bereits die klassische terrestrische Objektvermessung. Anwendungsfälle mit hohen Ansprüchen an die Genauigkeit, wie Inspektionen, bedingen eine feine Auflösung, die oftmals im Subzentimeterbereich liegt. Zusätzlich zur korrekten Bildgeometrie und der angewandten Processingmethode ist die Wahl des primären Sensors bedeutsam. Die Kamera nimmt Daten auf, aus denen weitere Erzeugnisse wie Orthomosaik und Punktwolken entstehen. Deshalb sind die Kalibrierung und die Kamerageometrie zu bedenken, wie CRAMER, M., PRZYBILLA, H.-J., MEIßNER, H., STEBNER, K. (2017, 67) ausführen. Auch die radiometrische Qualität der Systeme spielt eine Rolle, da sie einen Einfluss auf die optische Bildauflösung hat. Diese Kenngröße ist zusammen mit der Bildüberlappung grundlegend für die Güte des Bild-Matchings und die Ableitung von Bildmerkmalen sowie für die geometrische Konsistenz. Das automatisierte Erkennen von Verknüpfungspunkten hängt genau davon ab und beeinflusst auch die Präzision der Geometrie. Hier schließt sich der Kreis, da das Bild-Matching entscheidend auf die Grauwerte in den Aufnahmen angewiesen ist.

Die in handelsüblichen Drohnen verwendeten Kameras sind meist in Serie gefertigt und der Fokus ist eher auf Gewichtsminimierung und die einwandfreie Einpassung in ein Gesamtpaket der Drohne gerichtet. Photogrammetrische Überlegungen fließen aus diesen Gründen nur in geringem Ausmaß in die Komponentenwahl ein (MEIßNER, H., PRZYBILLA, H.-J., CRAMER, M., STEBNER, K. 2018, 48).

MEIßNER, H., PRZYBILLA, H.-J., CRAMER, M., STEBNER, K. (2018) haben in ihrem Beitrag zum DVW-Seminar 2018 zentrale Qualitätsmerkmale für drohnenbasierte Kamerasysteme erörtert:

Neben den Gesamtkosten und technischen Eckdaten der Kamera (Pixelwert etc.) spielt das Gesamtgewicht des Systems eine Rolle, die einfache Erreichbarkeit von Schnittstellen und die Zuordenbarkeit der Kameraorientierung zu Triggern – Stichwort direkte Georeferenzierung. Eine hohe effektive optische Bildauflösung und langzeitstabile innere Orientierung bilden zusätzliche Merkmale zur Qualitätsbestimmung. Die geometrische Auflösung eines Kamerasystems lässt Rückschlüsse auf die radiometrische Aufnahmegüte zu. Hohe Auflösungen erhöhen nicht nur den Detaillierungsgrad der Bildinformationen, sie wirken sich direkt auf die Detektion von Verknüpfungspunkten aus.

Mithilfe von Werkzeugen moderner Softwares, wie der Selbstkalibrierung in Pix4D, lassen sich Schwächen der Kamerageometrie zum Teil cachieren. Es sind jedoch zusätzliche Maßnahmen wie die Erstellung von Passpunkten notwendig, um die Lage-treue der erzeugten Daten sicherzustellen.

Neben der inneren Referenzierung und Orientierung von Bilddaten spielt bei Drohnenbefliegungen auch die Georeferenzierung eine maßgebende Rolle. In aller Regel sind in Ready-to-fly Drohnen verbaute GNSS Module von der Präzision mit in Smartphones verbauten zu vergleichen. Daraus ergibt sich eine Positionsgenauigkeit, die lediglich im Bereich von mehreren Metern liegt. Es ist daher für Vermessungsanwendungen notwendig, diesem Ungenauigkeitsproblem zu begegnen. Die indirekte Georeferenzierung ist hierbei die gängigste Variante. Es werden am Befliegungsareal Passpunkte (engl. Ground Control Points, GCP) installiert, die in der weiteren Bearbeitung mit Processingsoftwares oder GIS der konkreten Lage in den Aufnahmen über die jeweiligen Verbindungspunkte zugeordnet werden. Daraus wird in weiterer Folge die Kameraausrichtung errechnet. Die Anzahl und Verteilung der GCPs hat entscheidenden Einfluss auf die Gesamtqualität der Georeferenzierung und kann so den Root Mean Square Error (RMSE – eine Kennzahl zur Quantifizierung der Güte einer Georeferenzierung) auf etwa zwei Ground Sampling Distances (GSD) drücken. Als Richtwert kann hier ein Durchschnitt von mehr als zwei GCPs pro 100 Aufnahmen angenommen werden. Werden die Punkte näherungsweise in einem Dreiecks-Netz über die Bilddaten gelegt, lassen sich die zu erwartenden Fehler im Vergleich zu schlechter Verteilung nochmals halbieren. Vor allem in umfangreichen Projekten ist auf das ausreichende Setzen und eine ausgewogene Verteilung der Passpunkte zu achten (SANZ-ABLANEDO et al. 2018).

Zusätzlich zur eben beschriebenen Methodik gibt es die direkte Georeferenzierung. Mit dieser Vorgehensweise werden zum Beispiel durch integriertes RTK-GNSS die genauen Kamerapositionen im Raum dokumentiert und für das weitere Processing herangezogen. Die Kosten für RTK-Module sind stetig im Fallen begriffen und die Zugänglichkeit von Korrekturdaten ist in hohem Maße gegeben. Es werden Genauigkeiten im einstelligen Zentimeterbereich erzielt. Die oft zeitaufwendige Installation von GCPs entfällt.

Eine weitere Variante liegt in der integrierten Georeferenzierung. Hier wird die indirekte mit der direkten Georeferenzierung kombiniert und zu den GCPs kommen die präzisen Positionsdaten der Drohne hinzu. Es kann hier auch plakativ von Luftpasspunkten gesprochen werden (TOTH & JUTZI 2017, 57). Diese Kombination zweier Methoden – das Setzen von Passpunkten am Boden und in der Luft – verspricht eine weitere Reduktion von Fehlerwerten, die beispielsweise an geringeren RMSE-Werten festgemacht werden können (NEBIKER et al. 2013, 507; GERKE & PRZYBILLA 2016).

2.2.3 Flugplanung, Parameterkonfiguration und Befliegung

Eine Drohne ist grundsätzlich als Luftfahrzeug anzusehen und wird je nach Größe und Verwendungsart auch rechtlich als solches behandelt. Daher gelten jedenfalls die Vorgaben der International Civil Aviation Organization (ICAO). Diese werden einheitlich in Karten umgesetzt, an denen sich Drohnenpiloten in Kombination mit den jeweils gültigen nationalen Richtlinien das UAV und dessen Steuerung betreffend einen Überblick über die Anforderungen in der Flugzone bilden können. Des Weiteren sind für die Drohnenbefliegung relevante lokale Gegebenheiten, wie Jahreszeit, Beschattung und Witterung, zu berücksichtigen und zur Erstellung von 3D-Modellen oder Orthofotos notwendige Parameter ausreichend miteinzubeziehen.

Ein zentraler Punkt sind hierbei die Überlappungen der Bilder, wobei sowohl die Längsüberlappung (Front Overlap) als auch die Querüberlappung (Side Overlap) von entscheidender Bedeutung für die Qualität des Outputs sind. Gemäß SANZ-ABLANEDO et al. (2018) sind vor allem die Flughöhe im Sinne des Abstands zum Boden (AGL) und auch das Verhältnis zwischen der Abdeckungsbreite der Aufnahmen und der Überlappung entscheidend. Das Setzen von Ground Control Points hebt das Qualitätsniveau der Georeferenzierung (DRAEYER & STRECHA 2014) und eine gleichmäßige Verteilung der Punkte stellt eine akkurate Lagedarstellung des Untersuchungsgebietes sicher, wobei markante Stellen gesondert berücksichtigt werden sollten. Ein

integriertes RTK-System, wie es zunehmend in Mini- und Micro-UAVs zum Einsatz kommt, kann die Georeferenzierung erheblich optimieren und weiter automatisieren.

Die gewonnenen Befliegungsdaten müssen in aller Regel in weiterer Folge prozessiert werden, wobei Werkzeuge der Photogrammetrie, einem Teilgebiet der Fernerkundung, das sich mit der Konstruktion und Darstellung von 2D- und 3D-Objekten im Raum befasst, genutzt werden. Die Aufnahmen und die Metadaten – beispielsweise die Gimballausrichtung – werden zu einem Bild oder Modell geformt, aus dem dann in weiterer Folge beispielsweise Punktwolken, Meshes oder Orthomosaics exportiert werden können. Es gilt auch hier der allgemeine Grundsatz, dass die Qualität des Outputs direkt vom Input abhängt, somit davon, wie die Oberfläche beschaffen ist, wie hochwertig das Equipment und wie genau die Georeferenzierung der einzelnen Aufnahmen ist – inklusive Gimballparameter. Nach LOWE (2004) haben Micro UAVs naturgemäß Einschränkungen in diesen Bereichen, die beispielsweise bei bewegten Objekten oder reflektierenden Oberflächen wie Glas oder Schnee zum Tragen kommen.

2.2.4 Structure from Motion und Datenauswertung

Der in *Abbildung 4* skizzierte Structure from Motion (SfM)-Ansatz ist mit der stereoskopischen Photogrammetrie vergleichbar und bedient sich der Möglichkeit, aus sich überlappenden Bildaufnahmen verschiedener Blickwinkel auf eine Struktur diese dreidimensional darzustellen (WESTOBY et al. 2012, 301). Es werden sowohl die Struktur als auch die Kameraposition ableitbar. Die Kalibrationsparameter einer nicht kalibrierten Kamera können in diesem Prozess ebenso abgeschätzt werden.

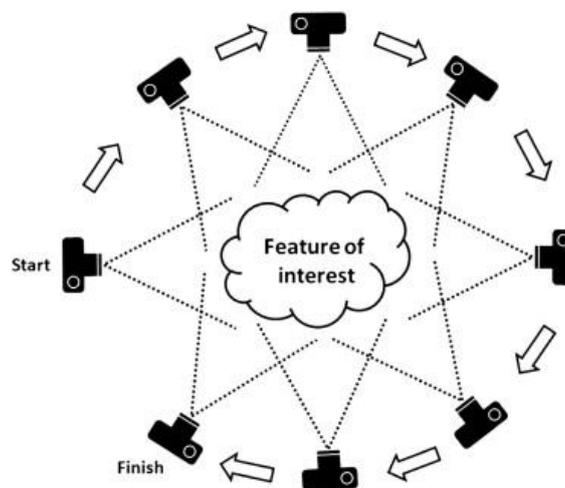


Abbildung 4: Structure from Motion-Prinzip (WESTOBY et al. 2012, 301).

SfM kann als zweistufiger Prozess verstanden werden, in dem Features zuerst erkannt und gematched werden, gefolgt von einer bundle adjustment-Phase, in der alle Kameraparameter und Koordinatenwerte ermittelt werden. Entstanden in den 1990er Jahren hat sich SfM in den letzten Jahren stark weiterentwickelt. Mithilfe dieser Technologie ist es nun möglich, aus Digitalfotographien einer Struktur 3D-Modelle zu erstellen und entzerrte sowie georeferenzierte (Ortho-)fotos zu exportieren. Es haben sich mehrere Ansätze zum SfM-Prinzip entwickelt, die als incremental, hierarchial und global bezeichnet werden. Incremental SfM, der Workflow wird in *Abbildung 5* skizziert, ist nach wie vor der beliebteste Ansatz. Er basiert auf einem kleinen Bildteil, der rekonstruiert wird. Schritt für Schritt werden iterativ weitere Elemente hinzugefügt. Dieser Ansatz hat jedoch auch Nachteile, wie eine gewisse Inflexibilität und hohen Zeitbedarf bei umfangreichen Projekten. An diesen Schwachpunkten soll global SfM ansetzen, mit vielversprechenden Ergebnissen, die jedoch mit Einbußen in der Robustheit des Processings einhergehen (ULLMAN 1979; SZELISKI 2011; REMONDINO et al. 2017, 594; JIANG et al. 2020, 247).

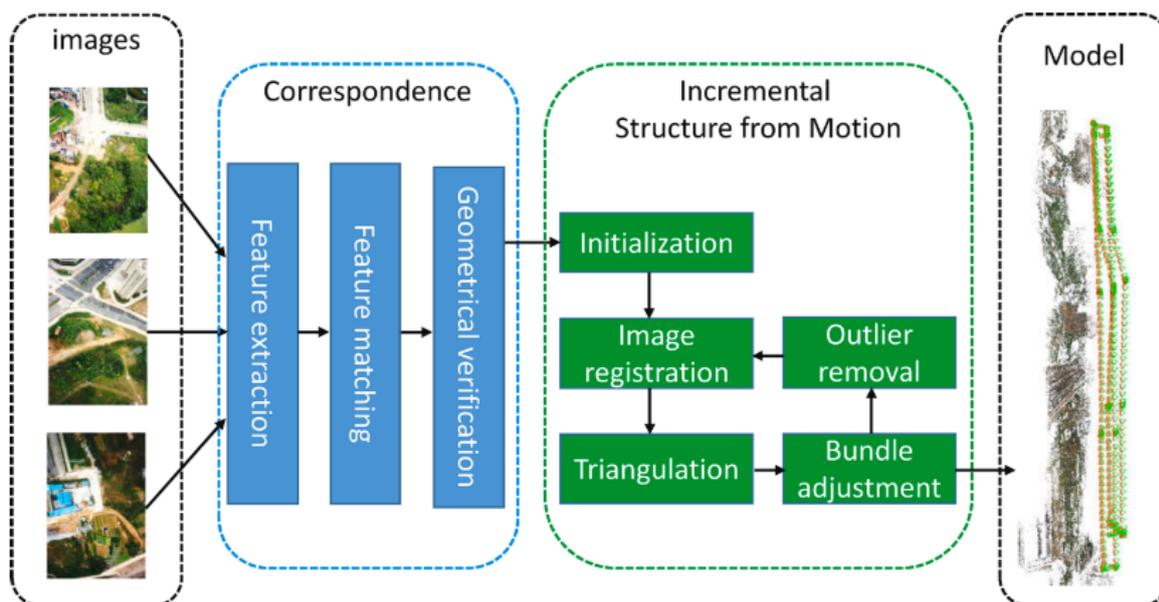


Abbildung 5: Workflow der incremental SfM-Methode (JIANG et al. 2020, 232).

Es lässt sich ableiten, dass sich Drohnen für das Processing mit SfM eignen. Es gilt allerdings, bekannte drohnenspezifische Besonderheiten zu berücksichtigen, wie beispielsweise stark reflektierende Oberflächen (Schnee, Wasser), wenig Textur, Belichtungsunterschiede oder bewegte Objekte wie Fahrzeuge. SfM ist ein Ansatz zur Festlegung der räumlichen Lage von in zwei oder mehreren Aufnahmen vorhandenen

Bildpunkten. Dazu müssen diese zuerst identifiziert werden. Hierzu wird oft der Scale Invariant Feature Transform (SIFT)-Algorithmus angewandt. Dieser filtert in jedem Bild die Punkte heraus, die konstant gegenüber Veränderungen der Auflösung und des Maßstabes, der Drehung und der Lichtverhältnisse bleiben. Oben genannte Punkte werden als Keypoints betitelt und helfen als Ankerpunkte bei der richtigen Zusammensetzung der Aufnahme. Die Menge der identifizierten Keypoints steht in direktem Zusammenhang mit Flughöhe, Auflösung und Textur des Geländes. Je detailreicher die Bildinformationen sind, desto mehr Punkte sind hieraus ableitbar. Die Keypoints werden in lokalen Regionen zusammengefasst und durch Deskriptorvektoren beschrieben. Es soll in der Folge der nearest-neighbor mit der kleinsten euklidischen Distanz zwischen zwei Deskriptorensätzen gefunden werden (WESTOBY et al. 2012, 301 ff.; JIANG et al. 2020, 231).

Da Aufnahmen starke Unterschiede bezüglich dieser Informationen aufweisen können, legen WESTOBY et al. (2012) nahe, möglichst umfangreiche – sowohl qualitativ als auch quantitativ – Bilddaten in das Processing aufzunehmen.

Das Konstruieren einer 3D-Struktur bedarf einer zugrundeliegenden dreidimensionalen Punktwolke. Zur Generierung dieser werden die Keypoints in Bezug gesetzt. In diesem Prozess werden *Tracks* angelegt, die die jeweiligen Bilder verbinden. Da der Fokus wie bereits erwähnt auf Bildkonstanten liegt, können bewegliche Objekte durch diese Vorgangsweise identifiziert und in der Point Cloud gezielt unberücksichtigt bleiben. Im folgenden Schritt wird die 3D-Struktur durch Triangulation gebildet und in einem relativen Koordinatensystem orientiert. Der ganze beschriebene Workflow verläuft vollautomatisch, weshalb Structure from Motion hier deutliche Vorteile im Vergleich zur Arbeitsweise der klassischen Photogrammetrie hat (WESTOBY et al. (2012, 301 ff.)). Auf diesen Ansätzen basierende Photogrammetrie-Softwares haben in den letzten Jahren umfangreiche Entwicklungen durchgemacht. Es gibt mittlerweile eine Vielzahl an Softwares und Softwarepaketen aus dem kommerziellen Bereich, wie Pix4D, Agisoft PhotoScan oder Metashape, aber auch Open Source Produkte wie Open Drone Map und Visual SFM. Wie bereits angedeutet, können sie hochautomatisiert und benutzerfreundlich verwendbare Outputs generieren. Die Automatisierung geht allerdings auch auf Kosten der Beeinflussbarkeit der Prozessierung und der Nachvollziehbarkeit der Qualität der zugrundeliegenden Berechnungen, wie PRZYBILLA et al. (2015, 4 ff.) und REMONDINO et al. (2017, 591) ausgeführt haben. Es wird ebenda

dringend empfohlen, nicht nur blind auf die leicht erzeugbaren Ergebnisse zu vertrauen, sondern sich mit den Prozessen dahinter vertraut zu machen.

Sowohl Fortschritte im Bereich der Soft- und Hardware im Hinblick auf Leistungsfähigkeit und Kosten als auch die Alternative der Cloudberechnung, wodurch das *Processing* ausgelagert und ortsunabhängig abgewickelt werden kann, eröffnen viele Möglichkeiten der Datenbearbeitung auf solidem Niveau. Im Gegenzug hat der Anwender gewisse Abstriche in Kauf zu nehmen, was Qualität, Beeinflussbarkeit der Parameter und der Dokumentation des Vorgangs betrifft. In der vorliegenden Arbeit wird aus genannten Gründen die Software PIX4D Cloud Advanced verwendet. Die Software ist intuitiv und benutzerfreundlich aufgebaut und verarbeitet die Daten in einem ersten Schritt in einer Input- und Processing Phase, in der die Bilder nach dem Hochladen geprüft, richtig angeordnet und nach Maßgabe aufbereitet werden. Die daraus entstehenden Darstellungen in Form von Orthomosaics, DSM, point clouds und meshes können in der Benutzeroberfläche begutachtet, nachjustiert und gefiltert werden – Bemerkungen und Beschriftungen sind mit wenigen Klicks platzierbar. Für eine weitere Verarbeitung, Analyse oder Präsentation können die erzeugten Daten und Modelle auf unkomplizierte Weise in allen gängigen Formaten in Geoinformationssysteme, CAD- oder Bildbearbeitungs- und Klassifikationssoftwares exportiert werden.

2.3 Grundlagen terrestrischer Vermessungsmethoden

2.3.1 Optische und optoelektronische Verfahren

Technische Entwicklung der Verfahren

Die konventionelle Vermessung beruht auf der Erfassung von Punktkoordinaten über die Messung von Winkeln und Distanzen. Distanzen werden dabei sowohl horizontal als auch vertikal für die Höhenermittlung gemessen. Die früher übliche optische Distanzmessung über Strichdistanzmessung, Reduktionstachymeter oder Basislatte ist schon seit mehr als 20 Jahren durch elektrooptische Distanzmessgeräte ersetzt worden (MATTHEWS 1997, 54). Die Entwicklung der Systeme vom optischen Theodolit hin zur modernen Smart-Station ist nachstehend in *Abbildung 6* skizziert.

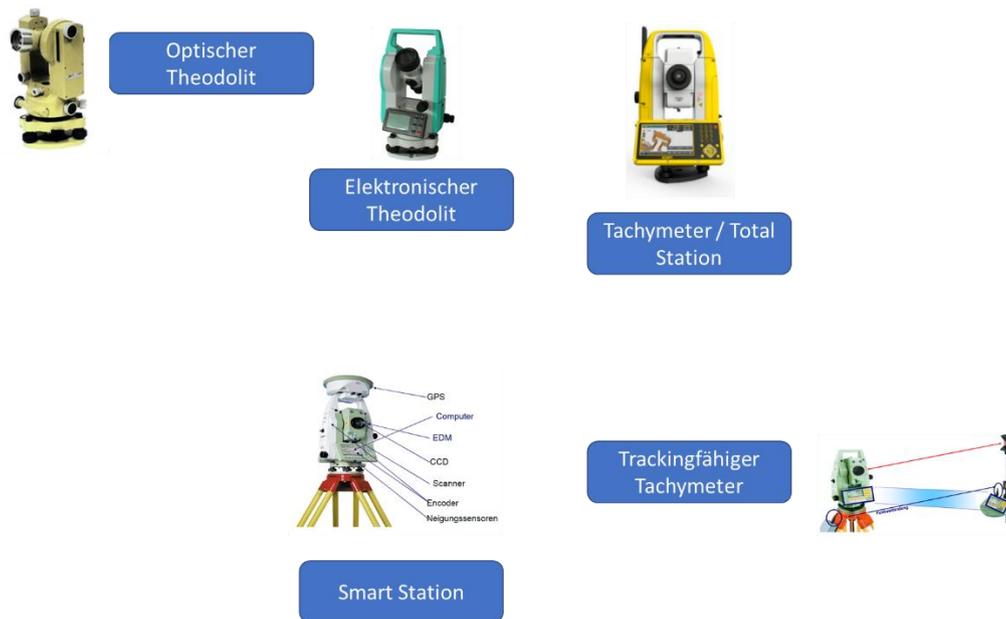


Abbildung 6: Entwicklung vom optischen Theodolit zu Tachymeter, Robotic Surveying und Smart Station. Eigene Darstellung nach INGENSAND (2010, 5).

Über optische Theodolite werden Winkel gemessen. Über die Messung der Winkel zu bekannten Punkten wird dabei durch Winkelfunktionen die Ermittlung der Position des Geräts sowie der Koordinaten unbekannter Punkte durchgeführt. Die Winkel werden dabei optisch durch den Bediener am Gerät abgelesen. Bei elektronischen Theodoliten erfolgt die Winkelmessung durch Sensoren im Gerät (elektronischer Teilkreisabgriff). Ein Tachymeter ist zusätzlich mit einer Vorrichtung zur elektronischen Entfernungsmessung ausgestattet. Dazu muss am Zielpunkt eine mit einem Reflektor ausgestattete Zielmarke durch eine zweite Person aufgestellt werden. Ein trackingfähiger Tachymeter erlaubt die Durchführung der Aufnahmearbeiten durch eine einzige Person. Das Gerät wird dabei von der Zieleinrichtung am Zielpunkt aus bedient und ist in der Lage, das Ziel automatisch zu erfassen. Eine Smart Station ist zusätzlich mit einem Präzision-GPS-Sensor ausgestattet, über den die Position des Geräts bestimmt wird. Bei dieser Technologie entfällt die Notwendigkeit, die Position des Geräts durch Anschluss an ein Festpunktnetz zu erfassen (INGENSAND 2010, 5 ff.).

Vorgangsweise beim Einsatz optischer und optoelektronischer Verfahren

Um den für terrestrische Aufnahmen mit den in Kapitel 2.3.1 vorgestellten Geräten notwendigen Aufwand zu veranschaulichen, wird an dieser Stelle kurz die übliche Vorgangsweise skizziert. Zunächst ist das Aufnahmeinstrument mittels eines Stativs auf einem koordinatenmäßig bekannten Punkt aufzustellen. Im ersten Schritt wird das Stativ über optische Kontrolle durch die bedienende Person so aufgestellt, dass der

Stativteller einigermaßen horizontal steht und senkrecht über dem Bodenpunkt liegt. Nach Befestigung des Geräts auf dem Stativ ist es im nächsten Schritt mittels optischem oder Laserlot waagrecht und senkrecht über dem Bodenpunkt zu positionieren (ZEISKE 2000, 9).

Sofern kein koordinatenmäßig bekannter Punkt vorhanden ist, muss die Geräteposition durch Messung zu zwei bekannten Punkten ermittelt werden. Während dies bei optischen Theodoliten durch Berechnungen des Bedieners oder eine dafür konzipierte Software durchgeführt wurde, erfolgt dies bei Geräten ab der Generation Tachymeter automatisch durch das Gerät selbst (ZEISKE 2000, 33). In *Abbildung 7* ist zu sehen, wie durch Messungen zu Reflektoren die Geländeaufnahme mittels Tachymeter durchgeführt wird. Nach Aufstellung des Geräts wird an den zu erfassenden Punkten ein Reflektor positioniert und die Lage des Punkts so in einem lokalen Koordinatensystem definiert.

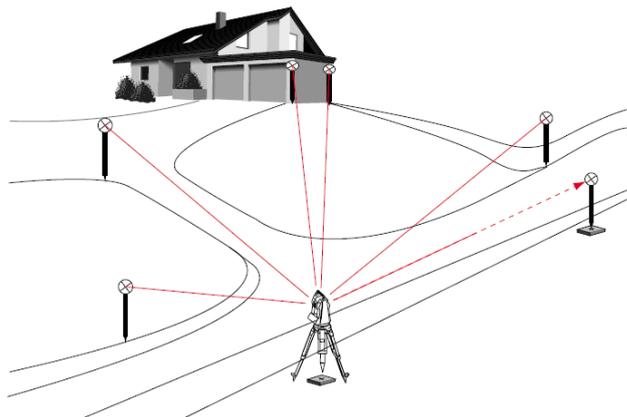


Abbildung 7: Geländeaufnahme mittels Tachymeter (ZEISKE 2000, 18).

Über Codes werden Informationen zum Punkt sowie zur späteren Verbindung der Punkte zu Linien oder Polygonen erfasst. Zusätzlich ist es notwendig, händisch eine Feldskizze anzulegen, um nicht über Codes erfassbare Informationen zu Attributen oder Verbindungen zu erfassen, wie aus *Abbildung 8* ersichtlich ist.

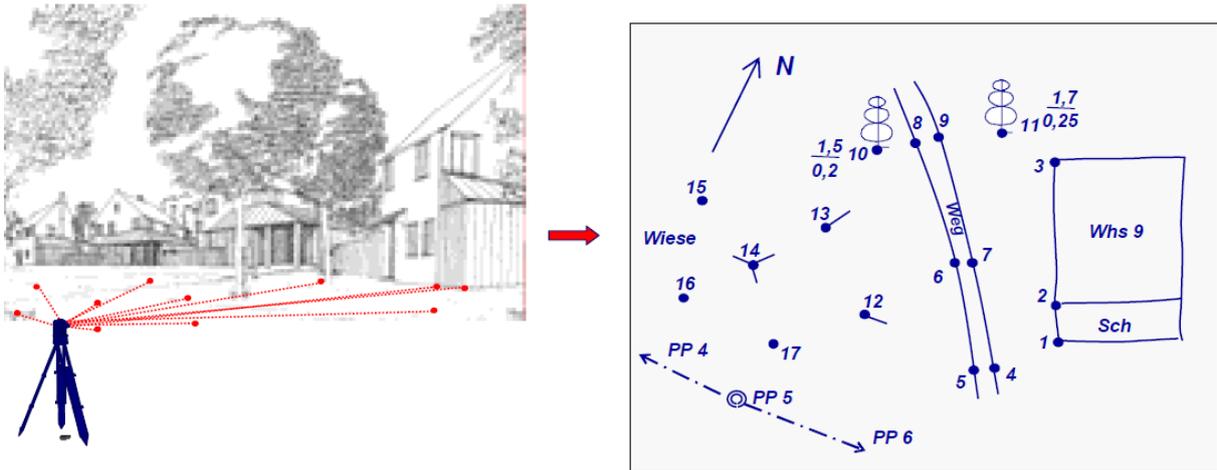


Abbildung 8: Erstellung einer Feldskizze mit Zusatzinformation (INGENSAND 2009, 14).

In einer Feldskizze, wie sie in *Abbildung 8* dargestellt ist, sind neben Informationen zum Datum und der erstellenden Person sowie Messpunktnummer, Instrumentenstandpunkt und Anschlussrichtung (zu bekannten Punkten) auch Nordpfeil, markante Geländepunkte, nicht Böschungen, Kuppen, Mulden sowie Gebäude (inklusive Hausnummer), Zäune, Grenzen, Straßen sowie auffallenden Einzelpunkte und Flächennutzungsarten zu vermerken (INGENSAND 2009, 14). In *Abbildung 9* sind Feldaufnahmen für die Erstellung eines Wasserkatasters dargestellt.



Abbildung 9: Feldaufnahmen für die Erfassung eines Wasserkatasters (GISQUADRAT GMBH 2021b).

Anstelle der händischen Führung einer Feldbuchskizze ist in den letzten Jahren die Führung eines elektronischen Feldbuchs mit tragbaren Feldcomputern getreten. Kontrolleinheiten für Totalstationen mit von den Geräteanbietern erstellter Software ermöglichen zudem die Echtzeitverbindung neu aufgenommener Daten mit bereits vorhandenen Geodaten, wie es in *Abbildung 10* dargestellt ist.



Abbildung 10: Verbindung neu aufgenommener mit bestehenden Daten über mit einer Totalstation verbundenen Controller-Hard- und Software (TRIMBLE 2021).

Einige trackingfähige Tachymeter mit nicht reflektorgebundener Entfernungsmessung verfügen zudem über die Möglichkeit, einzelne Objekte mit rechteckigem Querschnitt (Quader, Säulen) mit höherer Auflösung zu scannen. Schematisch ist dies in *Abbildung 11* visualisiert.

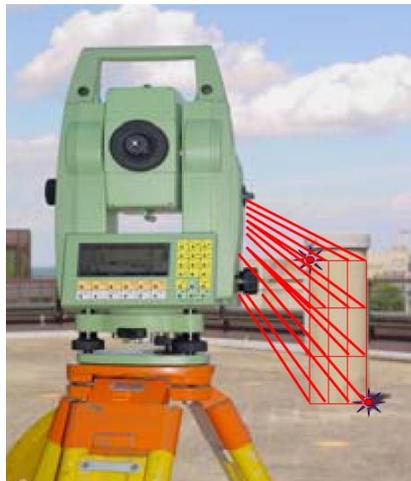


Abbildung 11: Scannen eines Objekts mittels trackingfähigen Tachymeter (INGENSAND 2009, 3).

Bei dem in *Abbildung 11* dargestellten Vorgang werden zwei gegenüberliegende Eckpunkte anvisiert und als Rastereckpunkte definiert. Anschließend werden die Rastergitterwerte eingegeben und das Gerät erfasst selbstständig die Rasterpunkte, indem die Messvorrichtung zu jedem Rasterpunkt gesteuert wird.

Messung unzugänglicher Punkte mit optischen und optoelektronischen Verfahren

Aus den vorangegangenen Ausführungen ist ersichtlich, dass die dort beschriebene Vorgangsweise nur die Erfassung von Punkten erlaubt, bei denen direkter Sichtkontakt zwischen dem Messgerät und dem Zielpunkt besteht und die zugänglich sind. Um auch Punkte, die diese Kriterien nicht erfüllen, zu erfassen, wurden Methoden entwickelt, die über Umwege auch die Erfassung nicht zugänglicher oder einsehbarer Punkte erlauben.

Um einen Hochpunkt wie beispielsweise eine Dachecke zu erfassen, wird der Reflektor senkrecht unter dieser positioniert und dessen Position bestimmt. Anschließend wird der Hochpunkt angezielt. Bei optischen Theodoliten kann aus der Vertikalwinkel-differenz die Höhe über Dreiecksfunktionen ermittelt werden. Optoelektronische Geräte verfügen über Berechnungsprogramme für die automatische Berechnung der Höhe des Hochpunkts (ZEISKE 2000, 31). Zu erwähnen ist, dass moderne Tachymeter nicht nur über Entfernungsmesseinrichtungen verfügen, die für die Messung einen auf dem Zielort befindlichen Reflektor benötigen, sondern auch über solche mit Lasermessvorrichtungen, die ohne Reflektor auskommen (ZEISKE 2000, 19).

Im Hidden-Point-Verfahren wird die Basis C eines Messstabs mit zwei Reflektoren A und B an den zu messenden Punkt gehalten. Anschließend misst der Tachymeter die Position von A und B. Über die bekannten Distanzen A-B und B-C wird anschließend die Position von C berechnet. Das Verfahren ist in *Abbildung 12* dargestellt.

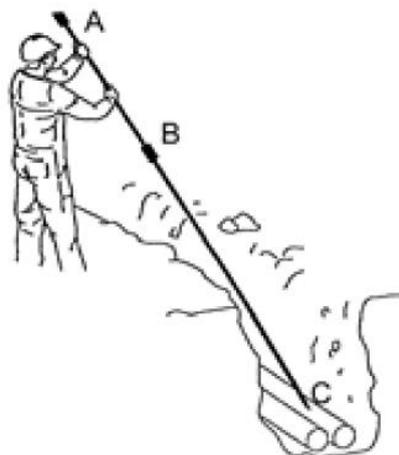


Abbildung 12: Hidden-Point-Verfahren (INGENSAND 2009, 16).

2.3.2 GNSS-Vermessung

Die Global Navigation Satellite Systems (GNSS)-Technologie ist heute in vielen Geräten verfügbar. Für die Verwendung in der Ingenieurgeodäsie kommen dabei Geräte mit deutlich höherer Genauigkeit als jene, die beispielsweise in Mobiltelefonen verbaut sind, zur Anwendung. Um diese Genauigkeit zu erzielen, werden die empfangenen Positionierungssignale mit den Daten einer oder mehrerer positionsmäßig bekannten Stationen verglichen, die ein Korrektursignal senden. In Österreich betreibt das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) das Austrian Positioning Service (APOS) als Netz von Referenzstationen. Diese Stationen sind positionsmäßig im cm-Bereich bestimmt und senden sowohl individuelle Korrekturen für einzelne Satellitenparameter als auch Stationsrohdaten für Post-Processing-Anwendungen.

GNSS-Technologie erlaubt die Erfassung von Punkten, die nicht in Sichtverbindung stehen. Im Gegensatz zu der aufwendigen Geräteaufstellung bei optischen und optoelektronischen Vermessungen können GNSS-Empfangsgeräte problemlos auf den zu messenden Punkten positioniert werden. Der Anwender kann auf dem Anzeigergerät auch die Genauigkeit der Messung ablesen. Die Bedienung solcher Geräte kann auch ohne Spezialausbildung nach kurzer Einweisung erfolgen, weshalb diese Methode auch durch gemeindeeigenes Personal angewendet werden kann (GISQUADRAT GMBH 2021a). In *Abbildung 13* ist die Vermessung eines im Rahmen von Bauarbeiten neu angelegten Kanalschachts mittels GNSS-Vermessung zu sehen.



Abbildung 13: Einmessung eines Kanalschachts mittels GNSS-Vermessung (GISQUADRAT GMBH 2021a).

Bei der Vermessung mittels GNSS wird zunächst der vorhandene GIS-Datenbestand der Messlokation in das digitale Feldbuch übernommen. Die Vermessung erfolgt über

das Zusammenspiel der Komponenten Satellitensignal, virtuelle Referenzstation und Korrektursignal. Bei der Messung mittels GNSS-Messgeräten werden Daten bereits im Feld georeferenziert erfasst und nicht zunächst mit lokalen Polarkoordinaten gespeichert. Problematisch ist die Nutzung dieser Technologie in Regionen mit Abschattungen des Satellitenempfangs (z. B. schmale Täler) sowie in Regionen mit schlechten oder nicht vorhandenen Gegebenheiten für Empfang und Senden von Mobilfunkdaten. Aus diesem Grund müssen Dienstleister, die generelle GNSS-Messung bevorzugt anbieten, über eine andere Technologie (z. B. Tachymeter) als Reserve verfügen (MOSEDER 2021).

Vorteile der GNSS-Messung sind (NETFOCUS GMBH 2021):

- Wegfall der Notwendigkeit einer Sichtverbindung zwischen Geräteaufstellungs-ort und Messpunkt,
- gleichbleibende Lagegenauigkeit innerhalb eines umfangreichen Vermessungsgebiets,
- keine Transformationen und Punkteinpassungen,
- keine Anschlussmessungen an das Festpunktfeld und
- reduzierte Feldarbeitszeit.

Nachteile der Methode lauten wie folgt (NETFOCUS GMBH 2021):

- Abschattungen in dicht verbautem Gebiet oder durch Bewuchs bzw. Topographie,
- Notwendigkeit der Kenntnis der Technologie für die Erkennung von Störungen oder Positionsungenauigkeiten und
- Ungenauigkeiten bei der Höhenbestimmung durch unterschiedliche Schwereverhältnisse auf der Erdoberfläche.

2.3.3 3D-Laser-Scanning

Die in Kapitel 2.3.1 und 2.3.2 beschriebenen Methoden erfassen Naturbestand dadurch, dass die Koordinaten von Einzelpunkten bestimmt werden und in einer anschließenden Nachbearbeitung Topologien (Punkte, Linien, Polygone) definiert werden. Das Grundprinzip der Positionsbestimmung durch Ermittlung von Distanz und Winkel ist beim 3D-Laser-Scanning gleich dem der Tachymetermessung. Die Winkelmessung erfolgt jedoch zusätzlich zum physikalischen Abgriff der Winkelposition durch

eine zeitliche Interpolation. Durch Messung der Intensität des reflektierten Signals kann eine Zusatzinformation zur gemessenen Geometrie gewonnen werden. Die Steuerung des Laserstrahls erfolgt über Spiegel. Terrestrische Laserscan-Stationen sind meist zusätzlich mit einer Kamera oder Stereokamera ausgestattet, sodass neben der Ermittlung von Punktwolken auch die Aufnahme und Wiedergabe optischer Merkmale der gescannten Objekte möglich sind (KUHLMANN & HOLST 2018, 170 ff.).

Terrestrische 3D-Laserscanner kommen meist in Projekten zum Einsatz, bei denen auch vielfältigste kleinste Details mit hoher Präzision erfasst werden müssen. Beispiele dafür sind historisch wertvolle Gebäude, Ingenieurbauwerke wie z. B. Brücken und Strommasten oder die Schaffung von Grundlagen für Gebäudeinformationssysteme (MIP3D 2021b). In *Abbildung 14* ist die Digitalisierung der Wiener Praterbrücke mittels terrestrischem 3D-Laserscan dargestellt.

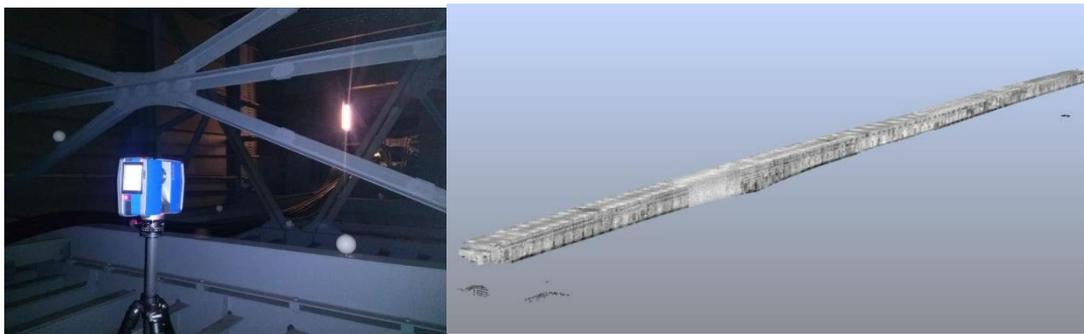


Abbildung 14: Erfassung der Wiener Praterbrücke mittels 3D-Laserscan (links: Aufnahme, rechts: Punktwolkenmodell) (MIP3D 2021a).

Aufgrund der zunehmend weiteren Verbreitung von 3D-Laserscannern bei Anbietern von Vermessungsdienstleistungen wird die Technologie vermehrt auch für die Naturaufnahme für Gemeindeinformationssysteme angeboten (INNOGEO 2021). Für die Positionsbestimmung des Erfassungsgeräts sind 3D-Laserscanner zusätzlich mit GNSS-Technologie ausgestattet. Die mit solchen Geräten ermittelten Punktwolkendaten sind somit bereits georeferenziert. Dies erlaubt auch die Kombination von Daten, die von unterschiedlichen Aufnahmeorten aus erfasst wurden. Die über 3D-Laserscanner erfassten Punktwolkendaten werden nach Erfassung in der Nachbearbeitung in Vektormodelle konvertiert. Dazu sind Annahmen über die Geometrie der erfassten Objekte notwendig. Während dies bei regelmäßigen Formen wie z. B. Straßeninventar oder Wohngebäude vergleichsweise unkompliziert ist, wird diese Vorgehensweise bei komplexen Formen wie z. B. Fassaden historischer Gebäude, Denkmäler, aber auch bei

Unregelmäßigkeiten in als regelmäßig angenommenen Objekten (z. B. Fassadenschäden) anspruchsvoll. Zusätzlich zu den Messunsicherheiten ist somit bei der Auswertung und weiteren Verarbeitung der Daten die Modellunsicherheit zu berücksichtigen. Für den Einsatz über längere Distanzen ist zu beachten, dass die mögliche Dichte der Punktwolke mit dem Quadrat der Entfernung abnimmt (KUHLMANN & HOLST 2018, 204 ff.).

Vorteile des terrestrischen Laserscanning lauten wie folgt (KUHLMANN & HOLST 2018, 206):

- hohe Datenerfassungsraten (ca. 1 Million Punkte/Sekunde),
- hohe Punktdichten (< 1 mm auf 10 m Distanz),
- zusätzliche geometrische Information aus Intensitätsmessung und
- Messablauf ist vollautomatisch und berührungslos durchführbar.

Nachteile des Verfahren sind (KUHLMANN & HOLST 2018, 206):

- Genauigkeit ist geringer als bei Tachymetervermessung,
- definierte, signalisierte Punkte können nicht angemessen werden,
- Gerät ist nur für die Datenerfassung und nicht für die Markierung koordinatenmäßig definierter Punkte im Gelände (Absteckung) verwendbar und
- Automatisierungsgrad der Auswertung ist noch nicht optimal.

2.3.4 Terrestrische Datenerfassung mittels mobiler Multisensor-Systeme

Durch die Kombination von passiven (Digitalkameras) und aktiven (z. B. Radar, Laserscanner) Sensorsystemen mit GNSS-Sensorik sowie anderen Positionierungssystemen (z. B. Trägheitsnavigation) ist es möglich, über terrestrische Vermessung beachtliche Datenmengen zu erfassen. Das Grundkonzept eines solchen Systems ist in *Abbildung 15* dargestellt.

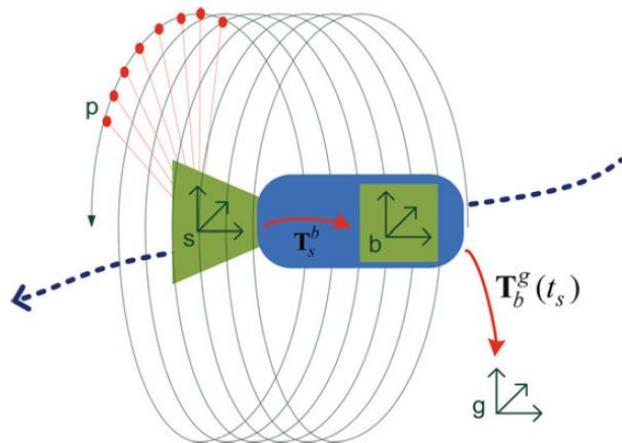


Abbildung 15: Idealisiertes mobiles Multisensorsystem mit Profillaserscanner und Sensor zur Trajektorienbestimmung (KUHLMANN & KLINGBEIL 2017, 95).

In Österreich wurde das System CityGrid durch zwei Privatunternehmen in Kooperation mit der Technischen Universität Wien und der Technischen Universität Graz sowie dem K+Zentrum VrVIS (Graz, Wien) entwickelt. Bei dem Verfahren fährt das mit der Sensorik ausgestattete Fahrzeug entweder in einem dynamischen Modus mit fünf km/h ohne Halt oder im Stop- and Go-Modus von Aufnahmepunkt zu Aufnahmepunkt in den Straßen der Gemeinde und erfasst dabei die Gebäudefronten mittels Laserscanner und mehreren Digitalkameras. In *Abbildung 16* ist ein Beispiel für die mittels des Verfahrens erfassten Bild- und Punktwolkendaten angeführt.



Abbildung 16: Bildsequenzen (oben) und Flächenscans (unten) (HOLZER & FORKERT 2004, 586).

In der Nachbearbeitung werden aus den Fassadendaten Gebäudegeometrien erzeugt. Dachlinien werden entweder aus den Fassadendaten extrapoliert oder über zusätzliche Photogrammetrie- oder Airborne-Laserscanning-Daten gewonnen. Die Gebäudemodellierung erfolgt in mehreren Stufen. Zunächst wird aus den Fassadendaten ein Blockmodell erzeugt, dieses wird anschließend mit den Dachdaten zum Formmodell und mit den optischen Daten zum texturierten Modell erweitert. Der Prozess ist in *Abbildung 17* dargestellt.

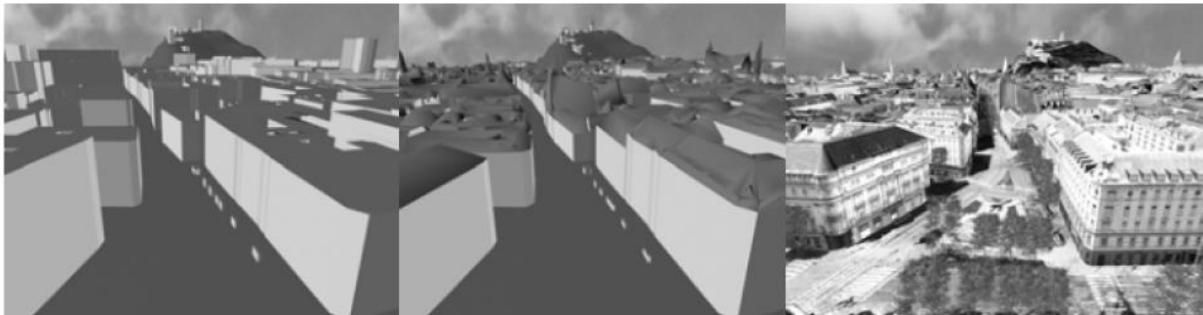


Abbildung 17: Vom Blockmodell (links) über das Formmodell (mitte) zum texturierten Modell (rechts) (HOLZER & FORKERT 2004).

2.3.5 Vergleich und Zusammenfassung der verschiedenen Verfahren

Optische und optoelektronische Verfahren basieren auf der Bestimmung von Polarkoordinaten in einem lokalen Koordinatensystem. Die Position des Aufnahmegeräts ist dabei entweder durch eine Anschlussmessung zu einem Punkt eines Festpunktnetzes oder durch eine GNSS-Messung durchzuführen. Alle diese Verfahren teilen die Gemeinsamkeit, dass die Aufstellung des Messgeräts mit hoher Präzision erfolgen muss und jede Neuaufstellung den Arbeitsaufwand beträchtlich erhöht. Mit diesen Verfahren können nur Punkte erfasst werden, die sich in direkter Sichtlinie des Messgeräts befinden. Alternativ ist es möglich, durch Spezialverfahren mit zusätzlichem Auswertungsaufwand auch nicht einsehbare Punkte zu vermessen.

Mit der GNSS-Messung entfällt die Notwendigkeit des Sichtlinienkontakts zwischen Messgerät und vermessenem Punkt. Die Messung erfolgt direkt am Messpunkt. Für die Bestandsaufnahme notwendige Genauigkeit müssen GNSS-Signale jedoch über ein Korrektursignal verbessert werden. Sowohl eine Abschattung der Satellitensignale durch Gelände oder Infrastruktur als auch unzulänglicher Mobildatenfunkempfang erschwert oder verunmöglicht den Einsatz von GNSS-Technologie. 3D-Laserscanning basiert auf demselben Messprinzip wie optoelektronische Polarmessungen, doch

werden nicht einzelne Punkte gezielt vermessen, sondern es wird eine Punktwolke mit einer durch die Gerätetechnologie vorgegebenen Dichte gemessen. Aus diesen Daten müssen in der Nachbearbeitung wiederum geometrische Objekte erzeugt werden. Die aufwendige Nachbearbeitung erschwert derzeit noch die Anwendung von 3D-Laserscanning. Durch Kombination von 3D-Laserscanning mit einer mobilen Aufnahmeplattform ist es möglich, Bestandsaufnahmen in dem für urbane Anwendungen notwendigen Maßstab durchzuführen.

In der Neubestanderfassung für Gemeindeinformationssysteme kommen derzeit vor allem optoelektronische Messtechnologien sowie GNSS-Messung zum Einsatz. Im beruflichen Umfeld des Autors wird vor allem mit optoelektronischen Messverfahren in der Datenerfassung gearbeitet. Diese sollen daher mit der UAV-gestützten Messung im Folgenden verglichen werden.

3 Methoden

Um die Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit beantworten zu können, wurde folgende Vorgehensweise gewählt. Anhand zweier Untersuchungsgebiete auf dem Gemeindegebiet Gmundens wurden die zu erörternden Themen abgearbeitet und Daten mittels standardisierter Befliegungen erhoben. Einheitlichkeit und Vergleichbarkeit der Daten hatten hierbei Priorität. Es wurden gleiche Parameter zur Befliegung gewählt und drei Kategorien der Naturbestandsvermessung stellvertretend für den gesamten Datensatz ausgewählt, die besonders hohen Arbeitsaufwand bedeuten und das Grundgerüst eines Naturbestandsdatensatzes bilden. Namentlich sind diese Kategorien Straßenränder, Gebäude und Zäune beziehungsweise Mauern. Die Befliegungen dienten dabei zur Datengewinnung, um Aussagen hinsichtlich der zu erwarteten Kostenstruktur und -effizienz, zur Genauigkeit und zu den beinhalteten Informationen der Datensätze im Hinblick auf Zusatzinformationen, die daraus ableitbar sind, zu treffen.

3.1 Drohnenbefliegung

Um die notwendigen Primärdaten zu gewinnen, die für eine Evaluierung der Sinnhaftigkeit konkreter Einsatzgebiete für Drohnen im kommunalen Bereich notwendig sind, bedarf es einer praktischen Auseinandersetzung mit UAVs und den gewonnenen Daten. Dazu werden für etwaige Anwendungsmöglichkeiten Datensätze mit einer Drohne produziert, an denen die Umsetzbarkeit und Praktikabilität geprüft wird.

Kriterien sind:

- quantitativ: Auflösung, Lagetreue, Zeitaufwand, Kostenaufwand,
- qualitativ: Bildqualität, Erkennbarkeit, Informationsgehalt.

Es wurden in zwei definierten Untersuchungsgebieten Befliegungen nach für die jeweilige Aufgabe optimierten Parametern und unter möglichst realen Einsatzbedingungen durchgeführt.

3.1.1 Equipment

Beim Equipment wurde darauf geachtet, einen Standard zu verwenden, der ein möglichst umfassendes Spektrum an Nutzungsmöglichkeiten abdeckt und für einen Großteil der Kommunen zugänglich ist. Demzufolge bildet die getroffene Wahl einen ausgewogenen Kompromiss, der auch aus wirtschaftlicher sowie rechtlicher Sicht

vertretbar ist. Des Weiteren sollte das Gesamtsystem für einen interessierten, technisch ausgebildeten Mitarbeiter einer Kommunalverwaltung beherrschbar sein.

Die Befliegungen wurden daher mit einer DJI Mavic 2 Enterprise Dual (EU-Verordnung Cat. C1), wie aus *Abbildung 18* ersichtlich, durchgeführt. Befliegungen, die darüber hinausgehende Anforderungen gestellt hätten, wären mit einem DJI M600 Hexacopter mit zusätzlichen Sicherheitsausstattungen, wie redundanter Steuerung, geflogen worden.



Abbildung 18: DJI Mavic 2 Enterprise Dual inklusive Smart Controller (OEHLER 2021).

Die DJI Mavic 2 Enterprise Dual ist das Einstiegsmodell von DJIs Sparte für betriebliche Anwender und ist ein kompakter Quadcopter mit 899 g Abfluggewicht in Standardkonfiguration, einer RGB-Kamera und einer FLIR-Thermalkamera. Der genannte Kompromiss war durch die Klassifizierung als C1 Drohne (Kategorie A2) mit einer Kostenbelastung von knapp 4.000 Euro (inkl. Zusatzausstattung) sowie einer standardisierten, benutzerfreundlichen und weit verbreiteten Technik mit diesem Modell erfüllt. Die Benutzung der Drohne erfreut sich aufgrund der Vielfältigkeit hoher Beliebtheit im Bereich des Ingenieurwesens, bei Feuerwehren und auch bei landwirtschaftlichen Anwendern und der Jägerschaft, wie die öffentlich zugänglichen Registrierungsstatistiken der Austro Control GmbH zeigen.

Die Bedienung der Mavic Enterprise erfolgt über einen DJI Smart Controller (vgl. *Abbildung 18*), über den die Steuerung, Routenplanung, Sichtung der Aufnahmen und auch der Datentransfer samt regelmäßiger Softwareaktualisierungen integriert auf einem Gerät abgewickelt werden können. Das stellt eine erhebliche Optimierung zu Lösungen dar, die mehrere Devices wie Smartphones oder Laptops für Betrieb, Wartung oder zum Auslesen der Daten benötigen. Auch Sicherheitsaspekte, wie eine stabilere

Verbindung von der Fernsteuerung zur Drohne und keine Störungen durch Anrufe oder Pop-Ups am Smartphone, spielten bei der Wahl dieser Steuerungsvariante eine Rolle.

Zusätzlich zur Drohne mit Controller wurde ein Leica CS35 Tablet mit externer GG04 GNSS-Antenne und der Vermessungssoftware Leica Zeno Field (inkl. Positionierungsdienst APOS des Bundesamtes f. Eich- und Vermessungswesen) verwendet, wie aus *Abbildung 19* ersichtlich. Dieses GPS-System mit einer horizontalen Genauigkeit von etwa +/- zwei cm soll die korrekte Georeferenzierung der Bilddaten anhand von Ground Control Points sicherstellen und eine hohe Lagetreue gewährleisten.



Abbildung 19: Leica GG04 mit Tablet (LEICA GEOSYSTEMS 2021).

3.1.2 Vorbereitung und Planung

Anfangs wird ein zur Beantwortung der konkreten Fragestellung geeignetes Untersuchungsgebiet gewählt. In weiterer Folge wird die geeignete Flugmethode bestimmt (Manueller Flug, automatisiert für Orthofoto, automatisiert für 3D-Oblique).

Im Falle der Automatisierung sind die Abgrenzung des Untersuchungsgebietes und die Parameter in der App des Smart Controllers so anzupassen, dass die bestmögliche Qualität für den konkreten Fall erreicht wird. Zentrale Kenngrößen sind hier die Flughöhe, die Fluggeschwindigkeit, die Side- und Frontal-Overlap-Ratio und die Definition der Margin und naheliegenderweise die Ausrichtung des Kameragimbals.

Die gewählten Untersuchungsgebiete wurden vom Autor hinsichtlich der topographischen, infrastrukturellen und vegetationsbedingten Besonderheiten überprüft. Darüber hinaus wurde sichergestellt, dass es sich um eine rechtskonforme und ungefährliche Befliegung handelt. Es wurde für die Befliegungen ein einheitlicher Workflow, ähnlich einer Checkliste erstellt, der eine Einordnung der örtlichen Gegebenheiten und der

Anforderungen der Aufgabenstellung nach zentralen Parametern ermöglicht. Dieser Workflow ist in *Abbildung 20* dargestellt. Es hat sich bewährt, die einzelnen Knoten beginnend mit dem Untersuchungsgebiet im Uhrzeigersinn der Reihe nach abzuarbeiten und zu bewerten.

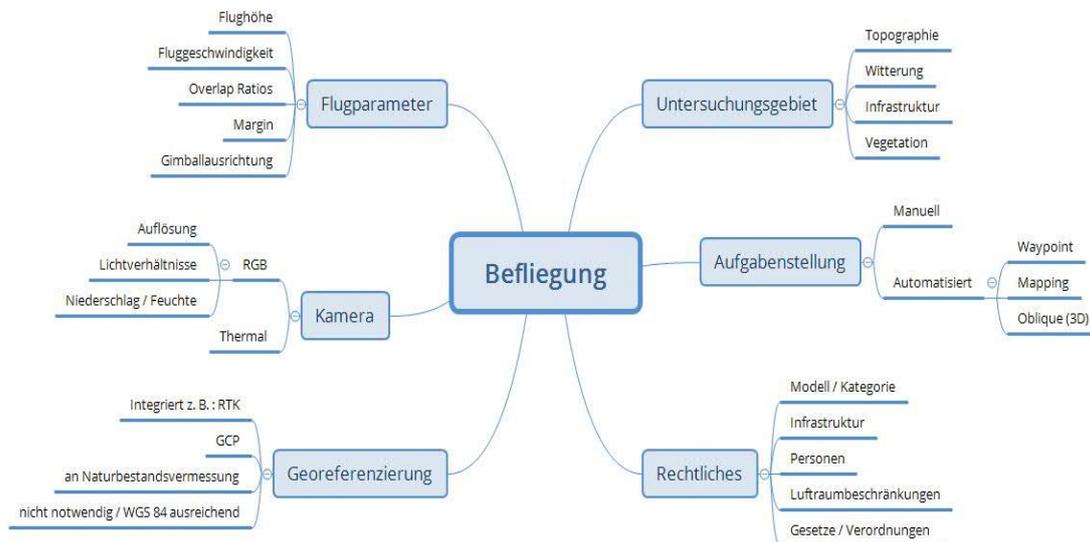


Abbildung 20: Planung einer Drohnenbefliegung (eigene Darstellung).

3.1.3 Georeferenzierung und Befliegung

Die Georeferenzierung erfolgte grundsätzlich mittels Ground Control Points (GCP), die mit einem Leica GPS-System erfasst und mit einer horizontalen Genauigkeit von +/- zwei cm verortet werden konnten. Diese GCPs können entweder direkt in der Processing Software berücksichtigt oder bei Bedarf im Nachhinein zur manuellen Georeferenzierung in ArcGIS herangezogen werden. Je umfangreicher das Untersuchungsgebiet ist, desto höher wird dementsprechend der Aufwand zur manuellen Georeferenzierung.

Im Bereich des kommunalen Einsatzes bieten sich auch manuelle Georeferenzierung an Naturbestandsvermessungen oder sichtbar gemachten Grenzpunkten an. Da diese durch Geometer erstellt und verortet werden, weisen sie eine hohe Lagetreue auf. Nach Erfahrung des Autors können hier ebenfalls Genauigkeitswerte vergleichbar zum GPS-Einsatz demnach mit Fehlern im einstelligen Zentimeterbereich erzielt werden. Diese Verfahren sind mit technischem Verständnis anwendbar und mit überschaubarem Zeitaufwand umsetzbar.

Anschließend wurden die Untersuchungsgebiete befliegen. Gemäß der Vorgangsweise in der Vorbereitung und Planung wurde jedes Untersuchungsgebiet nochmals vor Ort geprüft und eine Checkliste für den Flug abgearbeitet, die folgendermaßen zusammengefasst werden kann:

- Prüfung der Drohne mittels Selbstcheck-Modus und Sichtprüfung,
- Sichtprüfung Untersuchungsgebiet, Witterung,
- Kalibrierung der Kompasseinheit,
- Auslesen von Warnungen (Verbindungsschwächen, Interferenzen etc.),
- Versetzen in geplanten Flugmodus,
- Check der voreingestellten Parameter,
- Start des Fluges,
- Flugphase: Überwachung, ggf. Steuerung,
- Landung und
- Inspektion und Versorgung der Geräte.

3.1.4 Processing und Digitalisierung

Sämtliche Hard- und Softwares wurden gemäß der Schwerpunktsetzung der Thesis so gewählt, dass sie von einem Anwender mit technischem Verständnis im kommunalen Umfeld angewendet werden können. Die Anforderungen an Fachwissen im Bereich der Geoinformation und im speziellen der Photogrammetrie sollten dabei im Rahmen der erwartbaren Fachkenntnisse eines erfahrenen Mitarbeiters im kommunalen Umfeld bleiben. Es wurde von einem handelsüblichen PC beziehungsweise Laptop ausgegangen, der die Systemanforderungen für ArcGIS 10.7 beziehungsweise Synergis GeoOffice Analyst 10.7 erfüllt.

Die verwendete Processing Software Pix4D Cloud Advanced ist, analog zu Agisoft PhotoScan, eine kommerzielle Software für die Bearbeitung von Bildmaterial, beispielsweise aus Drohnenbefliegungen. Sie erstellt automatisiert 3D-Meshes mit Texturen, Point clouds, Geländemodellen, Isohypsen sowie Orthofotos in mehreren gängigen Dateiformaten (KERSTEN & LINDSTAEDT 2017). Dies erfolgt bei Bedarf bereits gerefrenziert. Zur Steigerung der Genauigkeit können zusätzliche Daten wie Passpunkte oder die präzise Ausrichtung der Aufnahmen eingespielt werden. Da Pix4D eine weit verbreitete Software ist, gibt es im Internet oftmals detaillierte Erfahrungsberichte sowie eine aktive Benutzergemeinschaft. In Kombination mit dem Support des

Herstellers, der auch einige Weiterbildungsangebote beinhaltet, ergibt sich ein starkes Netzwerk, das grundlegende Anwendungsprobleme oft schon im Ansatz zu lösen vermag.

Die mittels UAV erfassten Primärdaten wurden mit einer proprietären Software verarbeitet, da die Open Source Software wie Open Drone Map in aller Regel erweiterte Fachkenntnisse des Anwenders erfordert und da trotz der aktiven Communities die Benutzerfreundlichkeit und der Support oft eingeschränkt sind. Die jeweiligen Datensätze wurden nach dem Upload eigenständig in der Cloud nach den folgenden Parametrisierungen prozessiert und nach Abschluss zur weiteren Verarbeitung, Analyse oder Präsentation bereitgestellt. Die Prozessierung in Pix4D wurde einheitlich in der Variante 3D Maps ausgeführt, da diese Einstellung einen Kompromiss aus Orthofoto, Vermessbarkeit und 3D-Ansichten in der weiteren Bearbeitung ermöglicht.

Die Software ist intuitiv und benutzerfreundlich aufgebaut. Die Daten werden in einem ersten Schritt in einer Input- und Processing Phase verarbeitet, in der die Bilder nach dem Hochladen geprüft, richtig angeordnet sowie nach Maßgabe aufbereitet werden. Die daraus entstehenden Darstellungen in Form von Orthomosaics, DSM, point clouds und meshes können in der Benutzeroberfläche begutachtet, nachjustiert und gefiltert werden – Bemaßungen und Beschriftungen sind mit wenigen Klicks platzierbar. Für eine weitere Verarbeitung in ArcGIS oder Softwares wie Autodesk Map 3D oder MeshLab werden die Ergebnisse exportiert. Die weitere Bearbeitung der Daten erfolgte mit einem klassischen Desktop GIS (ArcGIS 10.X zw. QGIS 3.1X) mit den einschlägigen Funktionen zur Projektion, Georeferenzierung, Vermessung, zum Datenmanagement und zur Analyse.

Die korrekte Verortung der Orthomosaik im Raum wurde durch das bereits erwähnte Leica GPS-System sichergestellt. Dabei wurden möglichst gleichmäßig über das Untersuchungsgebiet verteilte Referenzpunkte erstellt, die im Orthofoto klar und schnell identifizierbar sind – wie beispielsweise markante und standardisierte Einbauten in Form von Kanaldeckeln.

Die Georeferenzierung des Bildmaterials im Desktop GIS wurde in weiterer Folge unter besonderer Bedachtnahme auf einschlägige Kennzahlen wie den Root-Mean-Square-Error (RMSE) durchgeführt. Nach Abschluss der Georeferenzierung und erfolgter Qualitätsprüfung, die anhand von Vermessungspunkten oder anderen Strukturen,

Einbauten oder Bemerkungen, deren exakte Koordinaten bekannt sind, erfolgen kann, galt es, die benötigten Daten aus dem Bildmaterial zu erheben.

Dies erfolgte in der vorliegenden Arbeit im Hinblick auf die fachlichen, ausstattungsbedingten und finanziellen Ressourcen einer klassischen Gemeindeverwaltung in Österreich durch manuelle Digitalisierung am Desktop-GIS. Dabei kamen einschlägige Werkzeuge zur Feature-Erstellung und -konstruktion zum Einsatz, die auch in gängigen Softwares wie QGIS oder dem – auf ESRI ArcGIS 10.X basierenden und in der Kommunalverwaltung weit verbreiteten – Synergis GeoOffice (Analyst) enthalten sind.

3.1.5 Kosten der UAV-Befliegung

Die Kosten einer UAV-Befliegung werden in folgende Kostenkategorien aufgeschlüsselt: Drohne, Software und Mitarbeiter. Die Befliegungen wurden mit dem Quadcopter Modell DJI Mavic Enterprise Dual (inklusive Smart Controller) durchgeführt. Aktuelle Angebote für dieses Modell bewegen sich nach Internetrecherche zwischen 3.100 und 3.600 Euro. Das für die Befliegungen verwendete Gerät wurde im April 2020 für 3.838 Euro inklusive eines DJI Fly More Package beschafft. Eine Drohne wird in der vorliegenden Arbeit steuerlich wie ein PC behandelt, da es zur Abschreibung weder in Österreich noch in Deutschland eine konkrete Einordnung in AFA-Tabellen gibt. Es gibt jedoch praktische Hinweise darauf, dass UAVs auf drei Jahre von der Steuer abgeschrieben werden können und daher von einer Nutzungsdauer von drei Jahren ausgegangen werden kann (BOCK 2021).

Die Kosten für die Absolvierung einer Drohnenpilotenprüfung (aktuell kostenlos), die Registrierung der Drohne und eine Drohnenversicherung seien hier der Form halber erwähnt. Für ersteres belaufen sich die Gebühren aktuell auf 31,50 Euro (AUSTRO CONTROL GMBH 2021b) und für zweiteres auf etwa 100 Euro jährlich (WIENER STÄDTISCHE VERSICHERUNG AG 2021). Ein weiterer Kostenpunkt ist die verwendete Software Pix4D Cloud Advanced. Die aktuellen Kosten für die Lizenz betragen 3990 Euro bei jährlicher Abrechnung (PIX4D 2021).

Der letzte Kostenpunkt von zentraler Bedeutung sind die Mitarbeiterkosten. In der vorliegenden Masterarbeit wurde davon ausgegangen, dass eine Gemeinde diese Tätigkeiten eigenständig erledigt und daher die Kosten eines Gemeindebediensteten in Vollzeitbeschäftigung zu veranschlagen sind. Die Jahressollarbeitszeit eines Vollzeitbeschäftigten beträgt in Österreich 1722,7 h bei einer Wochenarbeitszeit von 38,8

Stunden (WIRTSCHAFTSKAMMER ÖSTERREICH 2021). Dies kommt der Realität im Gemeindedienst nahe, da in der Praxis oft eine 39-Stunden-Woche in Bauhöfen und dem Bauwesen nahen Abteilungen üblich ist, wodurch eine Übernahme dieser Zahlen sinnvoll erscheint.

Im oberösterreichischen Gemeindedienst werden Bauamtsmitarbeiter (in diese Zuständigkeit fällt Vermessung im Allgemeinen) in einem Großteil der Gemeinden in den Einreihungsstufen GD14-GD16 eingereiht (AMT DER OÖ. LANDESREGIERUNG 2021b). Wird die Einstufung und auch die Vorrückung im Lohnschema gemittelt auf GD 15/8 festgesetzt, zuzüglich einer Pauschalzulage von 100 Euro netto, eine in der Praxis häufig vorkommende Postenbewertung, ergeben sich daraus Arbeitgeberkosten pro Personaleinheit von 57.462 Euro jährlich (BRUTTONETTO-RECHNER.AT 2021; AMT DER OÖ. LANDESREGIERUNG 2021a). Wird davon ausgegangen, dass nur ein Gemeindebediensteter die Befliegungen durchführen kann, so wird die jährliche Gesamtbelastung durch die Jahressollarbeitszeit dividiert, wodurch sich Personalkosten von **33,35 Euro/Stunde** ergeben.

3.2 Terrestrische Naturbestandsvermessung

3.2.1 Vorbereitung und Planung

Zur Beurteilung zahlreicher kommunaler Fragestellungen stellt es eine Erleichterung dar, eine genaue (digitale) geometrische Bestandserfassung des Ist-Zustandes der Strukturen im Gemeindegebiet zur Verfügung zu haben. Dies kann beispielsweise Lokalaugenscheine für weniger komplexe Anliegen ersparen, eine Arbeiterleichterung für interne und externe Techniker. Darüber hinaus geht diese Praxis stets mit hoher Datenqualität sowie daraus folgender Vertrauenswürdigkeit einher. Aus diesen und weiteren Gründen hat sich Gmunden wie auch andere Gemeinden bereits in der Vergangenheit entschlossen, durch beauftragte externe Vermesser den „Ist-Zustand“ der Infrastrukturen im Gemeindegebiet zu dokumentieren.

Dabei sind je nach Bedarf und Anforderungsprofil verschiedene Ausbaustufen möglich, wie im Folgenden beispielsweise anhand von Privatgrundstücken verdeutlicht wird: von der Grundstückserfassung inklusive Gebäude, Zäune, Carports, Nebengebäuden, Pools etc. bis hin zur bloßen Erfassung der straßenseitigen (zum öffentlichen Gut gewandten) Infrastrukturen der Privatgrundstücke oder dem völligen Fehlen der Aufnahme privater Infrastrukturen.

Somit lässt sich die Naturbestandsaufnahme individuell auf die Bedürfnisse einer Kommune anpassen. Im hier zur Verwendung gelangten Datensatz der Stadtgemeinde Gmunden wurden Straßenränder, Gehsteige, Einbauten, Böschungen, Mauern, Zäune, Gebäude und Nebengebäude, niedere Bauten, Gleiskörper, Gerinne, Verkehrszeichen und Signalanlagen aufgenommen. Entschließt sich eine Gemeinde zur Einführung einer Naturbestandsvermessung, so sind vorab die oben auszugsweise skizzierten Möglichkeiten abzuwägen und die individuell beste Variante ist zu wählen.

Vor allem in größeren Kommunen ergibt es Sinn, den Naturbestand in hohem Detaillierungsgrad zu führen, da tagtäglich raumbezogene Aufgaben anstehen, die zeitnahe, verlässliche Aussagen und Entscheidungen seitens der Beamten erfordern – und das ohne Möglichkeit eines Lokalaugenscheins. Es kann folglich durch dieses Instrument die Planungs- und Entscheidungssicherheit erhöht und es können objektivere Aussagen getroffen werden.

In einer Projektausschreibung können und sollten sämtliche Parameter der Erfordernisse an die künftige Naturbestandsdatenbank definiert werden. Ein Leistungs- und Kostenrahmen nach den Prinzipien der Wirtschaftlichkeit, Zweckmäßigkeit sowie Sparsamkeit ist sicherzustellen.

Dahingehend sind die Kategorien und Ausbaustufen der Bestandserfassung (Gebäude, Straßenränder etc.) festzulegen. Außerdem sind die Rahmenbedingungen für die Kostenstruktur zu definieren – wird nach tatsächlichen Kosten abgerechnet, gibt es Pauschalen oder Rahmenvereinbarungen. Darüber hinaus ist abzuklären, wie engmaschig – in Gmunden jährlich – eine Nachführung aktueller Änderungen zu erfolgen hat. Zur Sicherstellung der Qualität der Daten liegt es nahe, sich an den Maßstäben des Vermessungswesens zu orientieren und ein dementsprechend qualifiziertes Unternehmen mit der Umsetzung zu betrauen.

3.2.2 Durchführung und Kostenermittlung

Die terrestrische Naturbestandsvermessung wird für die Gemeinde durch einen extern beauftragten Geometer (Ingenieurkonsulent für Vermessungswesen) durchgeführt. Als Geräte werden dabei optoelektronische Geräte bzw. Totalstationen verwendet. Welche Geräte das Unternehmen für welchen Einsatzzweck einsetzt, wird nicht durch die Gemeinde vorgegeben. Die vertragliche Vereinbarung mit dem Geometerbüro beruht auf den in Richtlinien und im Leistungsverzeichnis für katastrale Vermessungen

im Wirkungsbereich der Länder (OÖ-SLBG 2010) definierten Leistungsbeschreibungen. Für den Bedarf der Naturbestandsaufnahme wird dabei seitens der Gemeinde in den Ausschreibungsunterlagen bzw. Lastenheften unter Bezug auf die zuzusichernde Lagegenauigkeit auf § 7 Verm V 1994 +/- zehn cm für Standpunkte bzw. +/- 15 cm für Grenzpunkte verlangt.

Die zu vermessenden Objekte sind aufgrund von Baugenehmigungsansuchen bzw. der im Jahresbudget der Gemeinde vorgesehenen baulichen Arbeiten im Vorhinein bekannt. Der Geometer wird dabei zu Jahresbeginn über einen Rahmenvertrag beauftragt. Die Abrechnung erfolgt über in diesem Jahresvertrag vereinbarte Kostensätze entsprechend den tatsächlich erbrachten Vermessungsleistungen. Die Leistungsvereinbarung mit dem Geometer-Büro verlangt eine Übergabe der Vermessungsdaten in unterschiedlichen DXF-Dateien, entsprechend der durch die Gemeinde vorgegebenen Layerstruktur, Topologie und Attributierung. Diese Vorgaben basieren auf den entsprechenden Standards des Gemeinde-GIS, das Grundlage dieser Sortierung ist. Die Pflege der Vermessungsdaten in das Gemeinde-GIS erfolgt durch gemeindeeigenes Personal. Im Zuge dieser Arbeiten erfolgt auch eine Überprüfung der gelieferten Daten. In *Tabelle 2* ist eine typische Kostenaufstellung für eine Abrechnung mit dem Geometerbüro angeführt.

Tabelle 2: Abrechnung Vermessungsarbeiten Naturbestandsaufnahme Gmunden 2017 (GMUNDEN 2017).

| GIS Gmunden 2017 | | GZ:3771-17 | | | STAND: 30.03.2017 | | | |
|-------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------|
| E16xx | Beschreibung | gemessen | hoch-gezeichnet | ein-gearbeitet | Abrechnungs-art | Kosten-schätzung | tatsächliche-kosten | abgerechnet |
| 1 | Um-Zubau Polyt. Schule | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 2 | Err. Stützmauer | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 3 | Err. Doppelgarage | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 4 | Err. überdachte Terrasse | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 5 | neubau Wohnhausanlage | | | | -- | -- | E1634 | |
| 6 | Err. Wohnhaus | | | | 160Lm x42,- | 6.720,00 | | |
| 7 | Err. Carport | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 8 | Abbruch und neuerr. Stützmauer | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 9 | Err. Garage | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 10 | Erweiterung Parkplatz Fliegerschule | | | | 250Lm x38,- | 9.500,00 | | |
| 11 | Err. Carport | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 12 | Zubau Wohnhaus | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 13 | Err. Steinschichtung | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 14 | Err. Fertigteilgarage | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 15 | Err. Carport, Zubau Wohnhaus | | | | 85Lm x66,- | 5.610,00 | | |
| 16 | Um- Zubau Wohnhaus | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 17 | Erweiterung Parkplatz | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 18 | Neubau Wohnhaus, Carport + Geräteraum | | | | 110Lm x48,- | 5.280,00 | | |
| 19 | Neubau Wohnhaus, Doppelgarage | | | | 120Lm x48,- | 5.760,00 | | |
| 20 | Neubau Wohnhaus, Garage | | | | 120Lm x48,- | 5.760,00 | | |
| 21 | Err. Doppelgarage | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 22 | Zubau Wohnhaus, Err. Gartenhütte | | | | 70Lm x80,- | 5.600,00 | | |
| 23 | Zubau Windfang, Kühltzelle GH Altmühl | | | | 140Lm x48,- | 6.720,00 | | |
| 24 | Err. 30 kv Trafostation | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 25 | Zubau Betriebsobjekt | | | | 85Lm x66,- | 5.610,00 | | |
| 26 | Err. Wohnhaus | | | | 110Lm x48,- | 5.280,00 | | |
| 27 | Um- Zubau Geschäftslokal | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 28 | Neubau Bootshaus | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 29 | Err. Lagerhalle | | | | 290Lm x38,- | 11.020,00 | | |
| 30 | Err. Bürohaus | | | | 210Lm x38,- | 7.980,00 | | |
| 31 | Zubau Wohnhaus | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 32 | Neubau Wohnhaus, Tiefgarage | | | | 110Lm x48,- | 5.280,00 | | |
| | | | | | Summe Seite 1= | 131.120,00 | | |

| E16xx | Beschreibung | gemessen | hoch- gezeichnet | ein- gearbeitet | Abrechnungs- art | Kosten- schätzung | tatsächliche- kosten | abgerechnet |
|-----------------------|--------------------------------------|----------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|-------------------------|-------------|
| 33 | Zubau eines Esszimmer | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 34 | Zubau Wohnhaus | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 35 | Zubau Halle | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 36 | Neubau Einfamilienhaus, Garage | | | | 160Lm x42,- | 6.720,00 | | |
| 37 | Um- Aufbau best. Wohnhaus | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 38 | Err. Einfriedungsmauer | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 39 | Err. Carport | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 40 | Umbau ehem. Bäckerei, Err. Bootshaus | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 41 | Err. Carport, Abstellräume | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 42 | Neubau | | | | 340Lm x35,- | 11.900,00 | | |
| 43 | Err. Carport + Abstellraum | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 44 | Err. Garage | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 45 | Err. Wintergarten | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 46 | Err. Gartenhaus | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 47 | Err. Carport | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 48 | Err. Carport | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 49 | Err. Carport | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 50 | Um- Zubau best. Objekt | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 51 | Err. Wohnhaus, Garage | | | | 170Lm x42,- | 7.140,00 | | |
| 52 | Neubau Wohnhaus + Carport | | | | 250Lm x38,- | 9.500,00 | | |
| 53 | Zu- Umbau Wohnhaus | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| 54 | Err. Neues Nebengebäude | | | | >30 Pkt. | 2.500,00 | | |
| Summe Seite 2= | | | | | | 65.760,00 | | |

| | | |
|-----------------------|-------------------|-----------------|
| Summe Seite 1= | 131.120,00 | 0,00 |
| Summe Seite 2= | 65.760,00 | 0,00 |
| SUMME (ATS)= | 196.880,00 | 0,00 ATS |
| SUMME (€)= | 14.307,83 | 0,00 € |
| Rabatt -10% | 12877,04 | 0,00 |
| MwST +20% | 15452,45 | 0,00 |

Aus *Tabelle 2* ist ersichtlich, dass im Jahr 2017 Kosten in Höhe von 15.452 Euro für geplante Naturbestandsvermessungsarbeiten angefallen sind. Da Gemeinden insbesondere im Rahmen ihrer hoheitlichen Tätigkeit nicht vorsteuerabzugsberechtigt sind, wird dieser Betrag in voller Höhe schlagend. Insgesamt betragen die Kosten für Vermessungsarbeiten in diesem Jahr rund 20.000 Euro, was auch dem langjährigen Durchschnitt der Gemeinde entspricht. Die Kosten werden zunächst in Österreichischen Schilling (ATS) angegeben, da die Kostensätze auf einer Vereinbarung aus den 1990er Jahren beruhen. Um den aufgrund des technischen Fortschritts für den Geometer geringer werdenden Aufwand bei Aufnahmearbeiten und EDV-technischer Verarbeitung zu berücksichtigen, werden Rabatte auf die ursprünglich vereinbarten Sätze gewährt.

Wie aus *Tabelle 2* ersichtlich ist, gibt es zunächst zwei Verrechnungseinheiten. Bei Vermessungen kleinerer Objekte wird ein für Vermessungen von Objekten, bei denen mehr als 30 Messpunkte aufzunehmen sind, vereinbarter Pauschalpreis von 2.500 ATS angesetzt. Bei aufwendigeren Objekten wird nach Laufmeter verrechnet, wobei sich der Laufmetersatz nach der Anzahl der Laufmeter richtet und nach zunehmender Länge degressiv strukturiert ist. Für die Verwendung in der vorliegenden Arbeit sind noch die Umrechnung in Euro sowie die Berücksichtigung des Rabatts zu bedenken. Die Aufstellung der geltenden Sätze ist somit aus *Tabelle 3* ersichtlich.

Tabelle 3: Übersicht über verwendete Abrechnungstarife 2017.

| Abrechnungsart | Kosten pro Abrechnungseinheit | | | |
|----------------|-------------------------------|--------------------------|---------------|-----------------|
| | ATS | Euro (1 EUR = 13,76 ATS) | | Häufigkeit 2017 |
| > 30 Punkte | 2500 | 181,69 | 163,52 | 40 |
| 70–79 lfm | 80 | 5,81 | 3,38 | 1 |
| 80–89 lfm | 66 | 4,80 | 2,30 | 2 |
| 90–99 lfm | 39 | 2,83 | 0,80 | 0 |
| 100–150 lfm | 48 | 3,49 | 1,22 | 3 |
| 150–199 lfm | 42 | 3,05 | 0,93 | 3 |
| 200–299 lfm | 38 | 2,76 | 0,76 | 4 |
| 300–399 lfm | 35 | 2,54 | 0,65 | 1 |

Wie in *Tabelle 3* erkennbar ist, ist die pauschale Abrechnungsform die am häufigsten angewendete. Mit diesem Ansatz abgerechnete Vermessungsaufträge machen mit einer Gesamtsumme von 6540,70 Euro, jedoch mit einem Anteil von 42 Prozent weniger als die Hälfte aller Vermessungsaufträge aus. Um für die Kosten pro Laufmeter einen Richtwert für den Vergleich mit der Vermessung mittels Drohnenbefliegung zu erhalten, wurde über die Anzahl der nach den einzelnen über Laufmeter abgerechneten Vermessungsaufträge ein gewichteter Mittelwert berechnet. Dabei wurde nur die Häufigkeit der Anwendung der Tarife und nicht die jeweils abgerechnete Laufmeterlänge berücksichtigt. Daraus ergibt sich ein Durchschnittswert von 1,29 Euro pro Laufmeter als Vergleichswert.

Für die Einarbeitung der durch den Geometer übermittelten Daten fallen pro Jahr zwei Arbeitsstunden zu je 33,25 Euro an. In Summe betragen diese Kosten somit 66,50 Euro. Da diese nicht einzelnen Vermessungsaufträgen zuzuordnen sind, wurden sie den Verrechnungsarten als Overhead zugeordnet, wobei die Zuordnung zu den unterschiedlichen Abrechnungsarten pauschal bzw. pro Laufmeter gleichteilend zu deren Anteilen an den Gesamtkosten erfolgte. Daraus ergibt sich die Aufstellung der Ermittlung der Gesamtkosten je Verrechnungseinheit, wie nachstehend in *Tabelle 4* dargestellt.

Tabelle 4: Ermittlung Gesamtkosten je Verrechnungseinheit.

| | Kosten Geometer (€) | Anteil (%) | Anteil Overhead (€) | Gesamtkosten (€) | Einheiten | Kosten/Einheit (€) |
|----------------------------|---------------------|--------------|---------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| Summe pauschale Abrechnung | 6541 | 42 % | 28 | 6569 | 40 Projekte | 164 |
| Summe Einzelabrechnung | 8911 | 58 % | 38 | 8950 | 6833 lfm | 1,31 |
| Gesamtsumme | 15452 | 100 % | 67 | 15519 | | |

Die Gesamtkosten je Laufmeter durch den Geometer gelieferter Vermessungsdaten betragen somit inklusive der an der Gemeinde anfallenden Personalkosten 1,31 Euro. Für pauschal abgerechnete Projekte belaufen sich die Kosten auf 164 Euro je Projekt.

3.3 Use Cases der Drohnenbefliegung

3.3.1 Gmunden – In der Au

Der Ortsteil „In der Au“ der Gemeinde Gmunden liegt am Ostufer der Traun zwischen der Traunbrücke und dem Energie AG-Laufkraftwerk Gmunden. Die Siedlungsstruktur in diesem Bereich der Stadt ist durch klassische heterogene Wohnbebauung mit Einfamilienhäusern und mehrgeschoßigem Wohnbau unterschiedlichster Stile und Altersklassen gekennzeichnet.

Zum Zwecke einer Baustellendokumentation wurde das Untersuchungsgebiet befliegen, woraus sich die Daten zur Naturbestandsvermessung ergeben. Es sollten sich auch weitere Erkenntnisse zu den Besonderheiten einer derartigen Siedlungsstruktur und Aufnahmen während einer laufenden Bautätigkeit ableiten lassen. Die Bildaufnahmen zeigen das klassische Bild eines Kreuzungsbereiches in einer Siedlung mit Einfamilienhäusern, schmalen Nebenstraßen mit üblichen Einbauten, einem Parkplatz und der bereits angesprochenen Baustelle der örtlichen Wasserversorgung.

Zur Befliegung wurde aus bereits genannten Gründen auch hier die Parametrisierung am Smart Controller so gewählt, dass eine GSD von knapp 1 cm/Pixel (0,92 cm/px) erreicht wurde. Es wurde, wie aus *Abbildung 21* ersichtlich, eine Flugstrecke mit einer Gesamtdistanz von 294 m und zwölf Wegpunkten in einer Zeit von etwa 2:30 Minuten

zurückgelegt, wobei 63 Aufnahmen angefertigt wurden. Die Fotos wurden als Timed Interval Shots aus einer Flughöhe von 30 m über dem Asphalt erstellt, wobei eine Fluggeschwindigkeit von etwa 2,2 m/s gehalten wurde. Die Side und Frontal Overlap Ratios wurde mit 80 % voreingestellt. Die Kurswinkel und der Aufnahmerand wurden auf maximale Zeiteffizienz unter Berücksichtigung ausreichender Daten zu den Randbereichen parametrisiert (147° und 3,9 m).

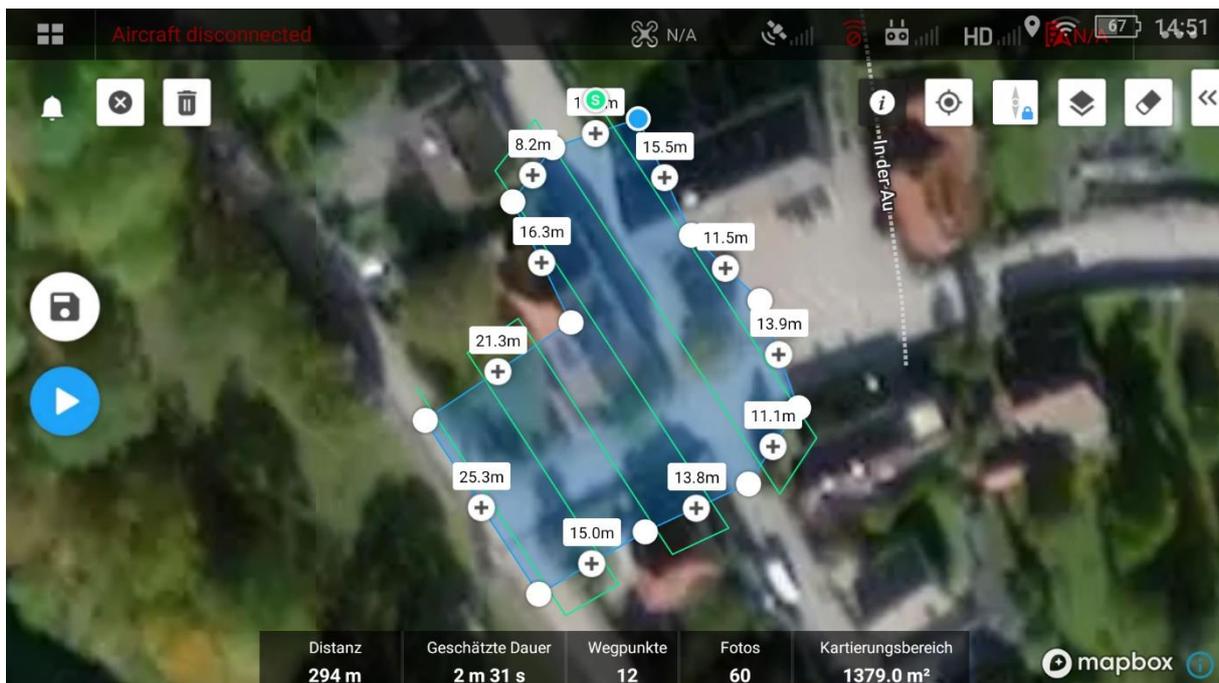


Abbildung 21: Darstellung der im Use Case „In der Au“ mittels Drohne erhobenen Daten
(eigene Darstellung).

3.3.2 Gmunden – Dienstleistungszentrum

Das Dienstleistungszentrum Gmunden ist ein Betriebsstandort und -gelände der Stadtgemeinde Gmunden, der im Jahr 2014 eröffnet wurde und die Stadtbetriebe beziehungsweise den Wirtschaftshof der Gemeindeverwaltung beherbergt. Das ebenda beflogene Areal hat eine Größe von 6.875 m² und weist eine Bebauungsstruktur auf, wie sie für ein Werksgelände in einer Kleinstadt charakteristisch ist. Einem Verwaltungs-/Bürogebäude sind Werkstätten und Hallen angegliedert, südseitig wird eine Asphaltfläche durch eine Reihe von Garagen zum bewaldeten Hochkogel abgegrenzt und im Westen erstreckt sich eine Lagerhalle.

Das Verwaltungsgebäude ist zweigeschossig ausgeführt, wobei die Werkshallen etwas niedriger ausfallen. Das Dach ist als klassisches Flachdach ausgeführt, wobei

einige Strukturen, die auf modernen Betriebsgebäuden zu erwarten sind, wie eine Photovoltaikanlage, Abluft- und Filteranlagen etc. installiert sind.

Zur Befliegung wurde hier wie auch im anderen Use Case aufgrund der Siedlungsstruktur und der damit verbundenen Möglichkeit zur Erhebung detaillierter Zusatzinformationen die Parametrisierung am Smart Controller so gewählt, dass eine GSD von knapp 1 cm/Pixel (0,95 cm/px) erreicht wurde. Es wurde, wie in *Abbildung 22* erkennbar, eine Flugstrecke mit einer Gesamtdistanz von 939 m und 17 Wegpunkten in einer Zeit von etwa 7:30 Minuten zurückgelegt, wobei 170 Aufnahmen angefertigt wurden. Die Fotos wurden als Timed Interval Shots aus einer Flughöhe von 31 m über dem Asphalt erstellt, wobei eine Fluggeschwindigkeit von etwa 2,2 m/s gehalten wurde. Die Side und Frontal Overlap Ratios wurde mit 80 % voreingestellt. Die Kurswinkel und der Aufnahmerand wurden aufgrund der Geländeverhältnisse und der Ausdehnung des Werksareales auf maximale Zeiteffizienz hin parametrisiert (238° und 0 m).

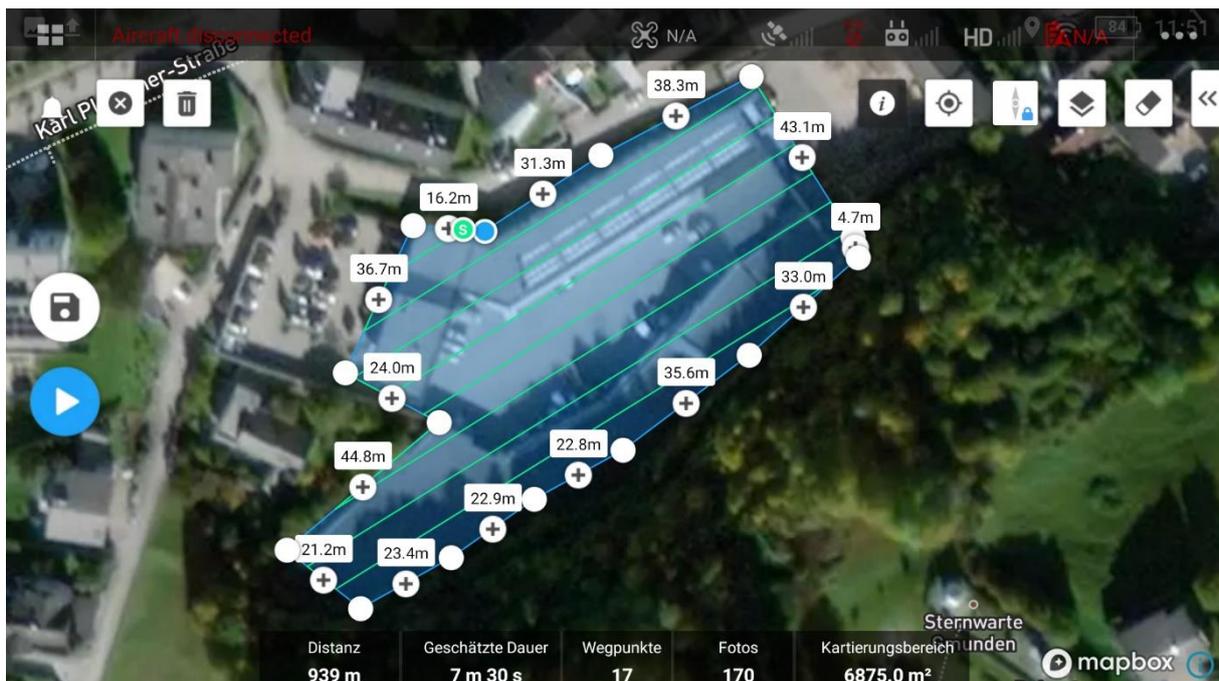


Abbildung 22: Darstellung der im Use Case Dienstleistungszentrum mittels Drohne erhobenen Daten Gmunden – In der Au (eigene Darstellung).

3.4 Vergleichsmodell UAV und konventionelle Vermessung

3.4.1 Grundlagen und Auswahl des Kostenvergleichs

Aus den verschiedenen in der Literatur verwendeten Investitionsbegriffen wird im Zusammenhang mit der hier vorliegenden Arbeit der Investitionsbegriff nach KERN (1974, 8) als zielführend erachtet:

„Eine Investition ist eine für längere Frist beabsichtigte Bindung finanzieller Mittel in materiellen oder immateriellen Objekten, mit der Absicht, diese Objekte in Verfolgung einer individuellen Zielsetzung zu nutzen.“

Bei Investitionsrechnungsverfahren handelt es sich um Instrumente der finanziellen Planung, die je nach Verortung der planenden Stelle im Unternehmen auf strategischer (oberer), taktischer (mittlerer) oder operativer (unterer) Ebene angesiedelt sein kann. Investitionsplanung wird dabei üblicherweise auf der mittleren oder oberen Ebene zugeordnet (GÖTZE & BLOECH 2013, 26).

Aufgabe der Investitionsrechnung ist es, die Vorteilhaftigkeit einer geplanten Investition entweder absolut, somit im Vergleich mit der Option, sie nicht zu tätigen, oder relativ, somit im Vergleich mit unterschiedlichen Alternativen, zu bewerten. Die Vorteilhaftigkeit kann wiederum als eine Optimierungsaufgabe im Hinblick auf eine oder mehrere Zielgrößen definiert werden. Auch die Ableitung eines Kriteriums aus mehreren monetär bewerteten Größen erlaubt die Anwendung von auf eine Zielgröße konzipierten Methoden. Entsprechende Verfahren der Investitionsrechnung werden zunächst in statische und dynamische unterteilt. Als statische Verfahren werden bezeichnet:

- Kostenvergleichsrechnung,
- Gewinnvergleichsrechnung,
- Rentabilitätsvergleichsrechnung und
- Statische Amortisationsrechnung.

Allen obigen Verfahren ist gemeinsam, dass sie sich lediglich auf eine Bewertungsperiode beziehen. Vereinfacht ausgedrückt werden Alternativen hinsichtlich des jeweils namensgebenden Kriteriums verglichen und jene als am vorteilhaftesten bewertet, die im Hinblick auf dieses Kriterium das beste Ergebnis erbringt (GÖTZE & BLOECH 2013, 48 ff.).

Dynamische Modelle wiederum beziehen sich auf mehrere Perioden. Ihnen ist gemeinsam, dass sie Ein- und Auszahlungen über mehrere Perioden berücksichtigen. Damit kommt bei diesen Verfahren der Berücksichtigung des Zeitpunkts der Zahlungen und damit der Verzinsung Bedeutung zu. Sie umfassen (GÖTZE & BLOECH 2013, 50 ff.)

Methoden mit einheitlichem Kalkulationszinssatz, wie

- Kapitalwertmethode,
- Annuitätenmethode,
- Interner-Zinssatz-Methode und
- Dynamische Amortisationsrechnung,

sowie Methoden mit unterschiedlichen Zinssätzen für Anlage und Aufnahme finanzieller Mittel, wie

- Vermögensendwertmethode,
- Sollzinssatzmethode und
- Methode der vollständigen Finanzpläne.

Eine prinzipielle Einteilung von Investitionsarten entsprechend dem Investitionsanlass ist nachstehend in *Abbildung 23* wiedergegeben.

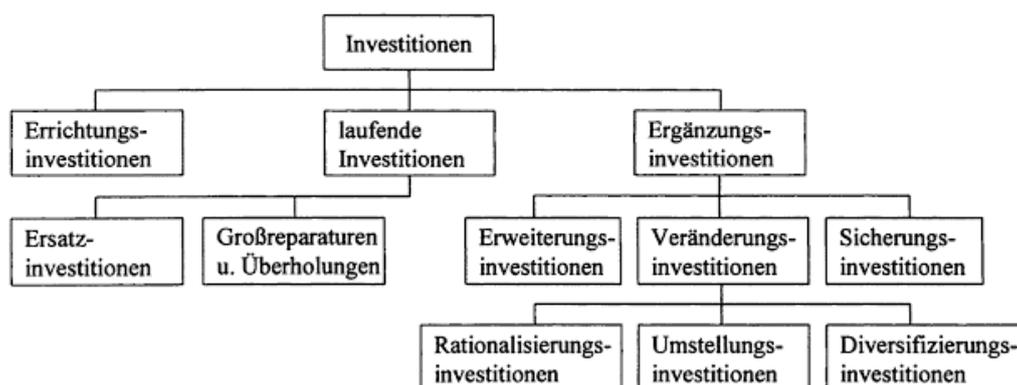


Abbildung 23: Einteilung über Investitionsarten nach Investitionsanlass (GÖTZE & BLOECH 2013, 50 ff.).

Entsprechend der Einteilung in *Abbildung 23* lässt sich die geplante Investition wie folgt charakterisieren. Es handelt sich um eine Realinvestition, die als Veränderungsinvestition die Einführung neuer Verfahren ermöglicht. Es wird dabei eine neue Technologie eingeführt.

Da eine Gebietskörperschaft keine doppelte Buchführung mit Bilanzierung von Eigen- und Fremdkapital bzw. Soll- und Haben-Seiten der Bilanz durchführt, kommt für die vorliegende Arbeit primär die Kostenvergleichsrechnung in Betracht.

3.4.2 Modell für die Durchführung des Kostenvergleichs

Für die Kosten der Datengewinnung mittels Drohnenbefliegung wird das in *Tabelle 5* dargestellte Modell angewendet.

Tabelle 5: Ermittlung Jährliche Gesamtkosten Datengewinnung mittels Drohne.

| Position | Art der Ermittlung |
|--|---|
| Jährliche Abschreibung Anschaffung Drohne | Anschaffungswert/Abschreibungszeitraum |
| Lizenzkosten Software für Bildauswertung | Monatliche Lizenzkosten x 12 |
| Zeitaufwand Befliegung | Summe aller Befliegungsstunden x Stundensatz |
| Zeitaufwand Auswertung | Summe aller Auswertungsstunden x Stundensatz |
| Kosten für Wartung und Instandhaltung | Summer aller aufgewendeten Kosten |
| Versicherung | Jährliche Kosten der Versicherungsprämie |
| Summe aller Kosten | Summe der obigen Positionen |
| Jährlich erhobene Daten in Laufmeter | Aus den Attributdaten der digitalisierten Daten |
| Kosten/lfm | Summe aller Kosten/jährlich erhobene Daten |

Für die Ermittlung der Kosten der Beauftragung eines Geometers mit der Erhebung von Daten des Naturbestands wurde das auf den Angaben aus Kapitel 3.4.2 Modell für die Durchführung des Kostenvergleichs basierende Kostenmodell herangezogen, dieses ist nachstehend in *Tabelle 6* aufgeführt.

Tabelle 6: Ermittlung der Kosten der Beauftragung eines Geometers.

| Position | Art der Ermittlung |
|--|---|
| Summe aller pauschal verrechneten Kosten | Rechnung des Geometers |
| Summer aller pro Laufmeter verrechneten Kosten | Rechnung des Geometers |
| Ermittlung durchschnittlicher Kosten je Laufmeter | Gewichtetes Mittel aus Rechnung des Geometers |
| Kosten je pauschal verrechnetem Projekt | Summe aller Kosten/Anzahl Projekte |
| Aufwand für die Integration der Geometerdaten in Gemeinde-GIS | Zeitaufzeichnungen |
| Anteilige Ermittlung von pauschal und pro Laufmeter verrechneten Kosten | Anteil an Gesamtkosten |

| | |
|---|--|
| Umlegung der Kosten für die Integration der Geometerdaten auf die Anteile von pauschal und pro Laufmeter verrechneten Kosten | Aufteilung nach Anteil an Gesamtkosten |
| Ermittlung Gesamtkosten je Verrechnungsart | Addition der anteiligen Kosten für Integration in das Gemeinde-GIS |
| Gesamtkosten je pauschal verrechnetem Projekt | Kosten aus Rechnung des Geometers zuzüglich anteiliger Kosten für Integration in das Gemeinde-GIS |
| Gesamtkosten je Laufmeter | Durchschnittliche Kosten Laufmeter zuzüglich anteiliger Kosten der Integration in das Gemeinde-GIS |

Über die beiden Berechnungsverfahren konnten die laufmeterbezogenen Kosten für die beiden Verfahren ermittelt werden. Diese wurden anschließend mit dem typischen jährlichen Bedarf an Vermessungsarbeiten, der auf Basis einer vorhandenen Abrechnung mit dem durch die Gemeinde beauftragten Geometerbüro ermittelt wurde, verglichen. Da für manche Vermessungsaufgaben davon auszugehen ist, dass sie mit der Methode Drohne und Digitalisierung nicht durchführbar sind, wurde im Weiteren eine Kalkulation für unterschiedliche Anteile von Vermessung mit Drohne und Vermessung durch den Geometer erstellt (jeweils Anteile von 0 % bis 100 % in Stufen von 10 %), um darzulegen, ab welchem Anteil der Durchführung von Vermessungsarbeiten mit Drohne die Anschaffung der Drohne für die Gemeinde finanziell vorteilhaft ist. Dies wird dann gegeben sein, wenn die jährlichen Gesamtkosten der Vermessung geringer sind als die jährlichen Fixkosten für die Drohnenbeschaffung zuzüglich der für den gegebenen Anteil ermittelten variablen Kosten der Drohnenvermessung.

3.4.3 Datenqualität

Genauigkeit

Es liegt nahe, die räumliche Genauigkeit eines Datensatzes an einer objektiv quantifizierbaren Kennzahl festzumachen. Die gewählte Methode ergibt sich aus der Fragestellung dieser Arbeit. Ziel ist es, die aus den UAV-Aufnahmen durch manuelle Digitalisierung gewonnenen Daten auf ihre Genauigkeit und Gleichwertigkeit zu terrestrischen Daten hin zu prüfen. Dabei wurden die Daten jeweils vom Geometer und vom Autor nach dem jeweiligen zum Zeitpunkt der Datenerfassung gültigen State of the Art

und nach der im Grundlagenkapitel der vorliegenden Arbeit beschriebenen Vorgehensweise georeferenziert.

Um den Vergleich anzustellen, mussten Mindestanforderungen festgesetzt werden, die von den Datensätzen zu erfüllen waren. Die gewählte Mindestanforderung (Toleranz) wurde in Anlehnung an das Vermessungsgesetz beziehungsweise die Vermessungsverordnung und aus praktischen Überlegungen gewählt. Die für Gemeindeanwendungen wie Bemaßung vor Ort durch Maßbänder und ähnliches anzunehmenden Fehler sind von vergleichbarem Ausmaß. Zur Gewährleistung einer transparenten Vergleichbarkeit beider Vorgehensweisen wurde die zu erreichende Genauigkeit analog zur Vermessungsverordnung 1994 für Grenzpunkte festgelegt. Dies war die zum Zeitpunkt der Erstellung der Naturbestandsdaten gültige Rechtsnorm. Diese besagt, dass für Grenzpunkte eine Genauigkeit von +/- 15cm sicherzustellen ist. Die akzeptable Messgenauigkeit wurde mittels eines 15 cm Puffers auf die vorhandenen linienförmigen terrestrischen Naturbestandsdaten evaluiert und in einer Prozentabdeckung der Gesamtlänge eben dieser ausgedrückt. Lagen die durch UAV Befliegung ermittelten linienförmigen Daten daher innerhalb des gesetzten Puffers, wurde zumindest von einer Erreichung der Standards bisheriger Arbeitsweisen ausgegangen. Zur Messung der Genauigkeit wurden die Werkzeuge Puffer, Verschneiden, Zuschneiden und Differenz angewandt und die Ergebnisse zueinander ins Verhältnis gesetzt.

Qualitativer Informationsgehalt der Datensätze

Neben der rein quantitativen Dimension der Genauigkeitsmessung kommt eine qualitative Dimension hinzu. Es geht darum, zu vergleichen, welche Informationen sich aus den Datensätzen ableiten lassen. Dabei wird der Fokus auf die Informationen zu den Objektkategorien, die aus der Naturbestandsvermessung zur Verfügung stehen, gelegt. Es wird somit gegenübergestellt, welche relevanten Informationen zu Straßenrändern, Gebäuden und Zäunen aus den Datensätzen ableitbar sind.

Dies betrifft für jede Kategorie Informationen, die für kommunale Fragestellungen von besonderer Relevanz sind und daher einen Mehrwert bedeuten. Diese Informationen wurden in einer Auflistung aufbereitet und danach bewertet, ob sie erfüllt werden oder nicht. Die untersuchten Kategorien werden nach den folgenden in *Tabelle 7* dargestellten Informationsinhalten bewertet:

Tabelle 7: Informationsgehalt von Naturbestandskategorien.

| Kategorie | Information |
|---------------------------------|--|
| Straßenränder | Straßenzustand, Belagsart, Fahrbahnfläche, Straßenbankette |
| Gebäude | Gebäudefläche, Umrisse, Art des Daches, Zustand, Korrektheit im Vergleich zur Planeinreichung |
| Zäune/Mauern | Art der Begrenzung (natürlich, baulich), Länge, Höhe, Zustand, Lage zur Grundstücksgrenze |
| Allgemeine Informationen | Höheninformationen, 3D, Aussagen über Einhaltung der Grundstücksgrenzen, Zusatzinformationen über weitere Kategorien, Planungsgrundlagen |

Anhand der gewonnenen Informationen aus den unterschiedlichen Erfassungsweisen lassen sich Aussagen und Einschätzungen über die Dichte und Diversität der gewonnenen Daten treffen. Des Weiteren zeigt sich, ob zusätzliches daraus abgeleitet werden kann.

4 Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Befliegungen an zwei Standorten im Gemeindegebiet der Stadt Gmunden vorgestellt. Es wurden Daten erhoben und manuell vektorisiert, um quantifizierbare und vergleichbare Aussagen treffen zu können. Als Resultat der Drohnenbefliegungen entstanden Orthofotos, aus denen sich Vergleichsdatensätze ableiten ließen. Diese werden anschließend nach Naturbestandskategorien, Aufwänden und Genauigkeitsaspekten aufgeschlüsselt dargestellt sowie im Kosten- und Qualitätsvergleich gegenübergestellt.

4.1 Befliegungsergebnisse

4.1.1 Gmunden – In der Au

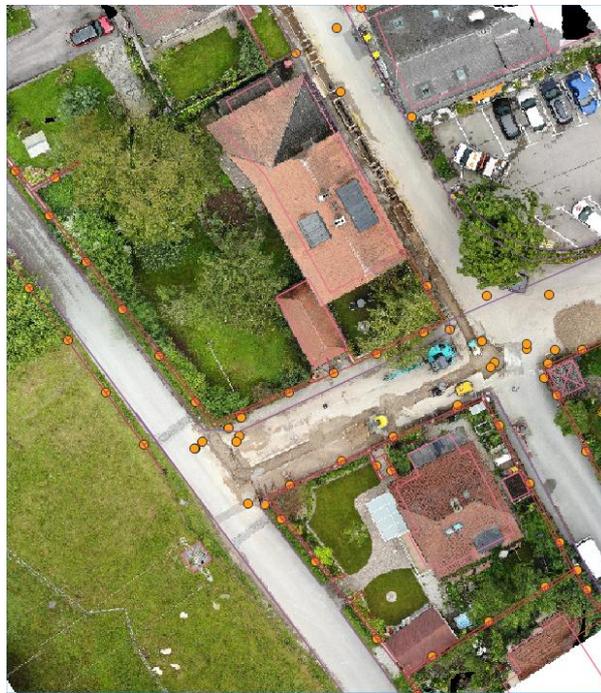


Abbildung 24: Gmunden „In der Au“: Fläche des Untersuchungsgebietes: 3.500 m² (eigene Darstellung).

Die Befliegung des in *Abbildung 24* dargestellten Untersuchungsgebietes fand im Jahr 2020 im Zuge der Dokumentation eines Wasserbauabschnitts der Gmundner Wasserversorgung statt. Die Befliegung wurde jedoch so gestaltet, dass sie zu Vermessungszwecken dienen konnte und in weiterer Folge für die vorliegende Masterarbeit herangezogen wurde.

Es wurde eine standardisierte Flugvorbereitung und -nachbereitung mit technischem Check gemäß Kapitel 3.1.2 Vorbereitung und Planung durchgeführt, die in insgesamt etwa 30 Minuten abgeschlossen war. Die Flugdauer für die automatisiert, unter

ständiger eingriffsbereiter Überwachung und nach in der Vorbereitung definierter Route, abgeflogene Strecke, betrug 2:30 Minuten.

Die Erstellung der Ground Control Points zur Georeferenzierung wurde mittels Leica GNSS durchgeführt und mit der Messung von Einbauten für die Wasserversorgung verbunden. Es wurden in etwa zehn Minuten möglichst gleichmäßig über das zugängliche Gebiet verteilte Passpunkte erstellt, die aus GPS-Punkten, markierten Vermessungsmarken und Einbauten bestanden. Zusätzlich bot es sich an, offensichtlich für Luftaufnahmen verdeckte Areale mittels GNSS abzudecken – hier kann GPS helfen, da ein einzelner Baum die Signalstärke kaum beeinträchtigt.

Anschließend erfolgte in wenigen Minuten der Download der Daten auf den PC und das Processing wurde gestartet. Da in dieser Zeit andere Arbeiten erledigt werden können und in der Praxis auch erledigt werden, wird die Wartezeit auf diese Operationen von etwas über einer Stunde nicht berücksichtigt.

Das Processing wurde in der Software Pix4D Cloud Advanced in den Konfigurationen 3D Maps und Quality durchgeführt und abgeschlossen.

Die Georeferenzierung wurde in QGIS anhand der Passpunkte durchgeführt, wobei auf die gleichmäßige Verteilung der zusätzlichen Punkte aus Einbauten und eine Minimierung des RMSE Wert gelegt wurde. Der Arbeitsschritt konnte aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten zur Referenzierung und der überschaubaren Größe des Areal in 20 Minuten abgeschlossen werden. Der mittlere RMSE der Digitalisierungsgrundlage beträgt 3,43 px.

Digitalisierung Straßenränder:

Es konnten mittels manueller Digitalisierung innerhalb von etwa 20 Minuten 254,25 lfm Daten zu den Straßenrändern gewonnen werden:

- Es konnten alle Straßenränder im Untersuchungsgebiet digitalisiert werden, kurze Abschattungen über Fluchten rekonstruiert und 36,83 lfm zusätzliche Naturbestandsdaten gewonnen werden, die bisher nicht vorhanden waren.

Digitalisierung Gebäude:

Es konnten innerhalb von 15 Minuten 199,73 lfm Daten zu Gebäudeumrissen digitalisiert werden:

- Es konnten alle Gebäudeflächen erfasst werden, bis auf einen kleinen Teil eines Wohngebäudes, der im äußersten Südosten ins Untersuchungsgebiet ragt und daher aufgrund von Verzerrungen nicht mehr eindeutig abgrenzbar war. Ein Nebengebäude mit einem Umfang von 19,41 lfm konnte zusätzlich erfasst werden.
- Es zeigte sich hier die erwartete klare Abgrenzbarkeit der Dachflächen, die jedoch bei der klassischen Giebelbauweise nicht der tatsächlichen Gebäudefläche entspricht. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Dachvorsprünge 30 bis 100 cm über die Grundmauern hinausragen und daher je nach Gebäudegröße die Grundfläche deutlich höher erscheinen lassen als sie tatsächlich ist. Im deutlichsten Fall war, wie in *Abbildung 25* dargestellt, der Unterschied beider Aufnahmemethoden 169,83 m² zu 213,30 m², was einer Flächenerhöhung von etwa 25 % entspricht. Das zweite gänzlich erfasste Einfamilienhaus im Untersuchungsgebiet wurde um 18 % zu groß dargestellt.

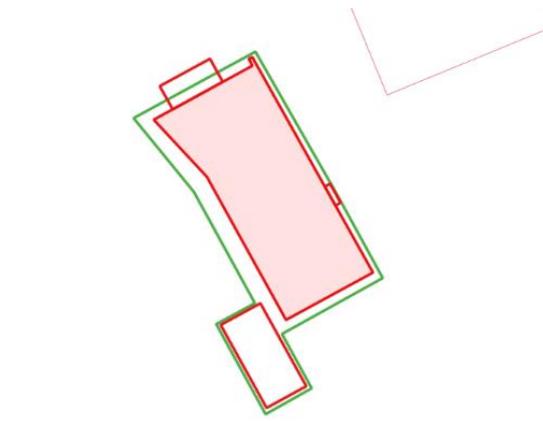


Abbildung 25: Dachvorsprünge: Grün – UAV Vermessung, Rot – Naturbestandsvermessung (eigene Darstellung).

Digitalisierung Zäune:

Es wurden innerhalb von 20 Minuten 204,91 lfm in der Kategorie Zäune/Mauern digitalisiert:

- 36,28 lfm in der Naturbestandsvermessung dokumentierter Zäune konnten aufgrund von Abdeckung nicht eindeutig abgegrenzt werden. Eine GPS-Vermessung war kurzfristig nicht möglich, da sich die Zäune auf Privatgrund befinden.
- Es konnten 25,46 lfm neue Naturbestandsdaten gewonnen werden.

Der Vergleich beider Datensätze zeigt ein ähnliches Ergebnis beider Vermessungsmethoden, wobei sich Einschränkungen bei der Abdeckung von Strukturen beispielsweise durch Vegetation und Dachvorsprünge ergeben. In der Diskussion der Ergebnisse wird hierauf genauer eingegangen.

Zur Bewertung der Kosten einer Drohnenbefliegung wird aus den benötigten Zeiträumen eine Gesamtarbeitszeit errechnet, die im vorliegenden Use Case 117,5 Minuten, demnach etwa zwei Stunden beträgt. In dieser Zeit konnten 658,89 lfm Naturbestandsdaten erfasst und digitalisiert werden.

Werden die erwarteten Kosten von 33,35 Euro/h für die Bearbeitung durch einen Gemeindebediensteten herangezogen, ergibt sich dadurch bei veranschlagten zwei Arbeitsstunden für das Projekt ein Laufmeterpreis von 0,10 Euro für eine Drohnenbefliegung mit Naturbestandserfassung. Dabei sind die zusätzlich gewonnenen Daten (3D, Point clouds, Vegetationsinformationen, Straßenzustand, sonstige Einbauten etc.) nicht berücksichtigt.

Die mittels UAV vermessenen Straßenränder entsprachen auf 208,54 lfm von 250,20 lfm Naturbestandsdaten der definierten Anforderung. Das heißt, es konnten 208,54 lfm der terrestrisch vermessenen Naturbestandskategorie Straßenränder so exakt aus den Befliegungsdaten rekonstruiert werden, dass sie innerhalb der Toleranzen lagen. Berücksichtigt man, dass eine beabsichtigte Genauigkeitsanpassung der terrestrischen Naturbestandsdaten auf der Länge von 40,94 lfm erfolgt ist, und wird diese von der maximal zu erreichenden Gesamtlänge abgezogen, so ergibt sich für die Umriss der Straßenränder im Untersuchungsgebiet Gmunden – In der Au eine Deckung von 99,6 %. Ein 3,31 lfm langer Abschnitt im zentralen Kreuzungsbereich des Untersuchungsgebietes war mittels Drohnenbefliegung nicht rekonstruierbar. Hierfür wäre gegebenenfalls eine ergänzende GNSS-Messung das Mittel der Wahl. Dieser Fehler dürfte durch eine präzisere Abrundung von Fahrbahntrompeten in etwa ausgeglichen worden sein, da ein realistisch abgerundeter Fahrbahnrand ein längeres Feature produziert als eine generalisierte Rundung mit wenigen Vertizes. Es ist daher geboten, diese Unsicherheit bei Anteil der prozentualen Deckung zu berücksichtigen und auf einen gesicherten Deckungswert auf 98,3 % zu korrigieren.

Aufgrund der bereits erwähnten Problematik mit Dachvorsprüngen konnte nur ein 7,96 lfm langer Betonsockel einer Stromleitung korrekt und gemäß der Toleranzen

gegenüber der Naturbestandsvermessung eingemessen werden, was einer Abdeckung von 3,7 % entspricht.

163,43 lfm der bestehenden Daten konnten innerhalb der Toleranzen digitalisiert werden, was einer Abdeckung von 95,4 % der aus der Luft vermessbaren Altdaten entspricht. Insgesamt wurden aufgrund nicht abgrenzbarer Zäune 70,4 % der terrestrischen Daten toleranzkonform vermessen.

4.1.2 Gmunden – Dienstleistungszentrum

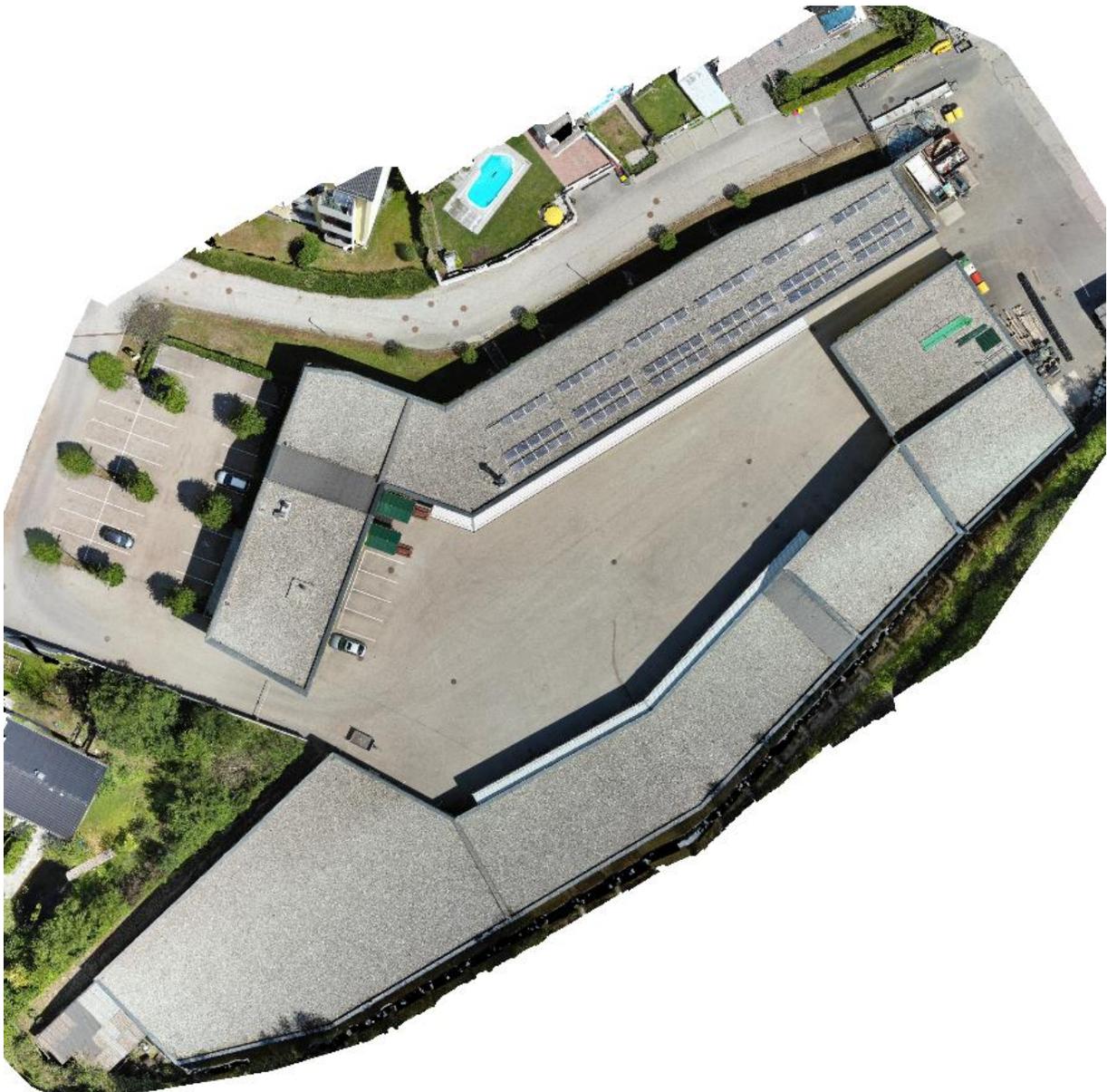


Abbildung 26: Gmunden – Dienstleistungszentrum: Fläche des Untersuchungsgebietes: 12.500 m² (eigene Darstellung).

Die Befliegung des in *Abbildung 26* abgebildeten Areals fand im Jahr 2021 zu Dokumentationszwecken statt und wurde ebenfalls im Hinblick auf eine Anwendung in der

vorliegenden Masterarbeit durchgeführt. Es wurde auch hier eine standardisierte Flugvorbereitung und -nachbereitung mit technischem Check gemäß Kapitel 3.1.2 Vorbereitung und Planung durchgeführt, die zusammen etwa 30 Minuten in Anspruch genommen hat. Die Flugdauer für die nach gleichen Parametern wie Use Case 1 abgeflogene Strecke lag bei 7:30 Minuten.

Die Passpunkterstellung zur Georeferenzierung verlief nach ähnlichen Gesichtspunkten wie im Use Case 1, wobei die Größe des Areals dementsprechend mehr GCPs erforderte und daher etwa 25 Minuten in Anspruch nahm. Auch hier wurde auf eine gleichmäßige Verteilung im Untersuchungsgebiet geachtet, wobei hauptsächlich vorhandene Einbauten (Kanaldeckel, Wasserschieber) und optisch exponierte Teile des Areals aufgrund ihrer formgegebenen Eignung herangezogen wurden. Etwaige verdeckte Areale konnten auch hier mittels GNSS-Messung und durch Konstruktion nach Fluchten abgedeckt werden. Der Passpunkterstellung kam aufgrund der Fläche des Areals noch eine zentralere Bedeutung zu als im ersten Use Case, darüber hinaus befindet sich ein Teil der Gebäudestruktur am Rand des Untersuchungsgebietes, was zu Ungenauigkeiten und Verzerrungen führen kann. Der mittlere RMSE der Digitalisierungsgrundlage beträgt 3,73 px. Der Download der gewonnenen Daten auf einen PC und der Processingvorgang nahmen knapp zwei Stunden in Anspruch, wobei aus oben genannten Gründen auch hier auf eine Hinzurechnung zur benötigten Zeit verzichtet wird.

Die verwendete Software Pix4D Cloud Advanced wurde auch hier in der Konfiguration 3D Maps und Quality ausgeführt.

Digitalisierung Straßenränder:

Es konnten in 45 Minuten 333,67 lfm Straßenränder digitalisiert werden:

- Es konnten alle Straßenränder im Untersuchungsgebiet digitalisiert und am Parkplatz des Dienstleistungszentrums vorhandene flächige Abschattungen über Fluchten und Konstruktion – wie in *Abbildung 27* gezeigt – überbrückt werden. Zur Absicherung der Konstruktion von großflächigen Elementen wäre eine ergänzende GNSS-Messung geboten, dies war jedoch im Nachhinein nicht mehr möglich.

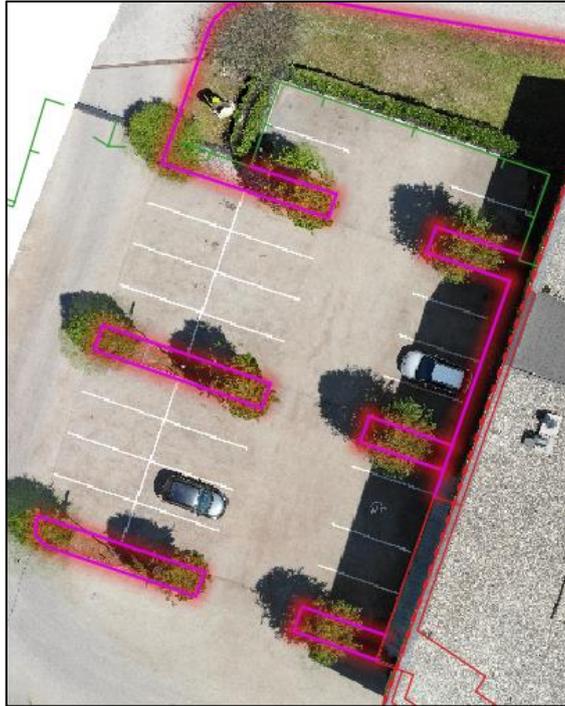


Abbildung 27: Abschattungen lassen sich auch durch Konstruktion lösen, da Teilbereiche sichtbar bleiben (eigene Darstellung).

Digitalisierung Gebäude:

Es konnten in zehn Minuten 614,73 lfm Gebäudeumrisse digitalisiert werden:

- Es konnten alle Gebäudeflächen des Dienstleistungszentrums Gmunden vollständig und korrekt erfasst werden.
- Geringfügige architektonische Besonderheiten im Erdgeschoss im Bereich der Hofeinfahrt konnten aufgrund der reinen Nadir-Befliegung nicht erfasst werden

Digitalisierung Zäune:

Es konnten in 15 Minuten 174,82 lfm Naturbestandsdaten im Bereich der Kategorie Zäune/Mauern erfasst werden:

- 34,18 lfm von in der Naturbestandsvermessung dokumentierten Zäunen konnten aufgrund von Abdeckung nicht eindeutig abgegrenzt werden. Eine ergänzende GPS-Vermessung war auch hier kurzfristig nicht möglich, da sich die Strukturen auf Privatgrund befanden. 11,92 lfm davon wurden durch Bildverzerrungen, wie in *Abbildung 28* dargestellt, am Rand des Befliegungsgebietes zu stark verändert, um eindeutige Aussagen treffen zu können. Diese Verzerrung wäre durch GNSS-Punkte höchstwahrscheinlich zu egalisieren.



Abbildung 28: Starke Verzerrung am äußersten Rand des Untersuchungsgebietes, ein gängiges Phänomen (eigene Darstellung).

Es ergibt sich eine Gesamtarbeitszeit von 122,5 Minuten, wiederum rund zwei Stunden für 1123,22 lfm Erfassung und Digitalisierung, somit 0,0017806 Stunden pro Laufmeter. Werden die Kosten von 33,35 Euro/h für die Bearbeitung durch einen Gemeindebediensteten herangezogen, ergibt sich dadurch bei veranschlagten zwei Arbeitsstunden für das Projekt ein Laufmeterpreis von 0,06 Euro für eine Drohnenbefliegung mit Naturbestandserfassung. Dabei sind die zusätzlich gewonnenen Daten (3D, Point clouds, Vegetationsinformationen, Straßenzustand, sonstige Einbauten etc.) nicht berücksichtigt.

Die Daten zu den Straßenrändern zeigen, dass von 323,24 lfm terrestrischer Naturbestandsvermessung bis auf 84,85 lfm alle Daten korrekt innerhalb der Toleranzen lagen. Von diesem Fehler waren 52,68 lfm beabsichtigt, um die Genauigkeit des Datensatzes zu verbessern. Der Rest war nicht korrekt dokumentierbar. Somit ergibt sich für die Kategorie Straßenränder in diesem Use Case eine Deckung von 90,4 %.

Die Naturbestandsdaten aus der UAV-Befliegung der Gebäudeumrisse entsprechen auf 581,31 lfm von 614,73 lfm den Erfordernissen der Toleranzwerte. Wird berücksichtigt, dass eine beabsichtigte Genauigkeitsanpassung der alten Naturbestandsdaten auf der Länge von 25,51 lfm im Südwesten des Areals erfolgt ist, und wird diese ein kalkuliert, so ergibt sich für die Gebäudeumrisse des Dienstleistungszentrums Gmunden eine Deckung von 98,6 %.

Die Zäune betreffend konnten 174,82 lfm von 220,98 lfm, somit 79,1 % der terrestrisch aufgenommenen Naturbestandsdaten auch aus der Luft vermessen werden, wobei auf

148,05 lfm die Toleranz eingehalten werden konnte. Das entspricht 67,0 % der vom Geometer vermessenen Daten.

4.2 Kostenvergleichsrechnung

4.2.1 Datenerhebung durch Geometer

Zur besseren Vergleichbarkeit wird die bereits in Kapitel 3.2.2 Durchführung und Kostenermittlung erklärte Kostenstruktur der Geometervermessung nochmals zusammenfassend dargestellt: Im Jahr 2017 sind der Stadt Gmunden Kosten in Höhe von 15.452 Euro für geplante Naturbestandsvermessungsarbeiten angefallen. Es gibt zwei Verrechnungseinheiten. Bei Vermessungen kleinerer Objekte wird ein Pauschalpreis von 2.500 Schilling angesetzt. Bei größeren Objekten wird nach Laufmeter verrechnet, wobei sich der Laufmetersatz nach der Anzahl der Laufmeter richtet und nach zunehmender Länge degressiv strukturiert ist. Für die Verwendung in der vorliegenden Masterarbeit sind auch die Umrechnung in Euro sowie die Berücksichtigung des Rabatts relevant. Die Aufstellung der geltenden Sätze ist somit aus *Tabelle 8* ersichtlich.

Tabelle 8: Übersicht über verwendete Abrechnungstarife 2017.

| Abrechnungsart | Kosten pro Abrechnungseinheit | | | Häufigkeit 2017 |
|----------------|-------------------------------|--------------------------|--------|-----------------|
| | ATS | Euro (1 EUR = 13,76 ATS) | | |
| > 30 Punkte | 2500 | 181,69 | 163,52 | 40 |
| 70–79 lfm | 80 | 5,81 | 3,38 | 1 |
| 80–89 lfm | 66 | 4,80 | 2,30 | 2 |
| 90–99 lfm | 39 | 2,83 | 0,80 | 0 |
| 100–150 lfm | 48 | 3,49 | 1,22 | 3 |
| 150–199 lfm | 42 | 3,05 | 0,93 | 3 |
| 200–299 lfm | 38 | 2,76 | 0,76 | 4 |
| 300–399 lfm | 35 | 2,54 | 0,65 | 1 |

Die pauschale Abrechnungsform ist die am häufigsten angewendete. Mit diesem Ansatz abgerechnete Vermessungsaufträge machen mit einem Anteil von 42 Prozent weniger als die Hälfte aller Vermessungsaufträge aus. Um einen Richtwert für den Vergleich mit der Vermessung mittels Drohnenbefliegung zu erhalten, wurde ein über die Vermessungsaufträge gewichteter Mittelwert berechnet. Daraus ergibt sich ein Durchschnittswert von 1,29 Euro pro Laufmeter als Vergleichswert. Für die Einarbeitung der terrestrischen Vermessungsdaten fallen pro Jahr Kosten von 66,70 Euro an.

Diese wurden den Verrechnungsarten als Overhead zugeordnet. Daraus ergibt sich die Aufstellung der Ermittlung der Gesamtkosten je Verrechnungseinheit, wie nachstehend in *Tabelle 9* dargestellt.

Tabelle 9: Ermittlung Gesamtkosten je Verrechnungseinheit.

| | Kosten Ge- ometer (€) | An- teil (%) | Anteil Overhead (€) | Gesamt- kosten (€) | Ein- hei- ten | Kos- ten/Ein- heit (€) |
|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| Summe pau- schale Abrech- nung | 6541 | 42 % | 28 | 6569 | 40 Pro- jekte | 164 |
| Summe Einzelab- rechnung | 8911 | 58 % | 38 | 8950 | 6833 lfm | 1,31 |
| Gesamtsumme | 15452 | 100 % | 67 | 15519 | | |

Die Gesamtkosten je Laufmeter durch den Geometer gelieferter Vermessungsdaten betragen somit inklusive der an der Gemeinde anfallenden Personalkosten 1,31 Euro.

Um für den abschließenden Vergleich geeignete Zahlen und Abrechnungseinheiten verwenden zu können, ist es notwendig, für die pauschal abgerechneten Projekte ein Laufmeteräquivalent zu errechnen. Es wurde davon ausgegangen, dass sich die jährlich zu erhebende Laufmeteranzahl gleichteilend zur Aufteilung der Kostenanteile von pauschal und per Laufmeter verrechneten Daten verhält. Die Summe der jährlich zu erhebenden Daten beträgt hochgerechnet 11.781 Laufmeter. Das gewichtete Mittel der Kosten für die Vermessung durch den Geometer wurde mit 1,31 Euro errechnet.

4.2.2 Datenerhebung mittels UAV-Befliegung

Nachstehend wird die Ermittlung jährlicher Kosten für die Datenermittlung mittels UAV-Befliegung dargestellt. Für die Ermittlung der jährlichen Befliegungsleistung werden die in Kapitel 4.2.1 Datenerhebung durch Geometer ermittelten Daten herangezogen.

In Kapitel 4.1.1 Gmunden – In der Au wurde ein Zeitaufwand von 0,003035 Stunden pro Laufmeter und in Kapitel 4.1.2 Gmunden – Dienstleistungszentrum ein Zeitaufwand von 0,0017806 Stunden je Laufmeter ermittelt. Der Mittelwert der beiden Werte beträgt 0,002408 Stunden je Laufmeter. Dies ist eine stark vereinfachte Berechnung, da nur zwei Projekte als Datenbasis verfügbar sind.

Tabelle 10: Berechnung der Kosten für die Datenerfassung mittels Drohne und Digitalisierung.

| Position | Wert |
|---|----------|
| Jährliche Abschreibung Anschaffung Drohne (DJI Mavic) 3.838 Euro/3 = 1279 € | 1279 |
| Lizenzkosten Software für Bildauswertung Pix4d Cloud & Mapper 3990 bei Einmalzahlung bei Abschreibung auf drei Jahre: 3990/3 = 1330 € | 1330 |
| Versicherung (€) | 120 |
| Summe Fixkosten (€) | 2729 |
| Zeitaufwand Befliegung und Auswertung pro lfm (h) | 0,002408 |
| Jährlich erhobene Daten in Laufmeter (lfm) | 11781 |
| Kosten je Arbeitsstunde (€) | 33,35 |
| Summe variable Kosten (€) | 946 |
| Fixkosten + Variable Kosten (€) | 3675 |
| Summe aller Kosten/lfm (€) | 0,31 |

Für den Betrieb der in der Arbeit verwendeten Drohne ist ein Drohnenführerschein notwendig. Dieser kann über einen von Austro-Control angebotenen Online-Kurs und eine Online-Prüfung erworben werden. Es werden hier durch Austro-Control keine Kosten verrechnet (AUSTRO CONTROL GMBH 2021b). Hier wäre die vom betreffenden Mitarbeiter aufzuwendende Zeit miteinzuberechnen. Für die vorliegende Arbeit erfolgt dies nicht, da interessierte Mitarbeiter oft ohnehin auch im Privaten Drohnen nutzen und daher über diese Qualifikation verfügen. Die Kosten lassen sich durch eine Verbandslösung mit zwei oder drei Gemeinden noch deutlich reduzieren, vor allem wenn Drohne und Software gemeinsam genutzt werden, um Stehzeiten zu vermeiden.

Mitarbeiterkosten könnten an andere Gemeinden weiterverrechnet werden, damit nur eine Person die Ausbildung machen muss. Verrechnungssätze bewegen sich hier in der Praxis um die 55 Euro/h. Für den weiteren Vergleich werden diese Überlegungen jedoch nicht weiter berücksichtigt.

4.2.3 Vergleich der Kosten

In Kapitel 4.2.1 wurden die laufmeterbezogenen Kosten der terrestrischen Vermessung mit 1,31 Euro ermittelt. In Kapitel 4.2.2 wurden die laufmeterbezogenen Kosten der Datenerhebung mittels Drohne und Digitalisierung mit 0,31 Euro festgestellt. Damit fallen für die Erhebung über Drohne und Digitalisierung 23,7 % der Kosten für die Erhebung durch einen Geometer an. Im Folgenden ist der Kostenvergleich auf Basis des

für die Gemeinde Gmunden ermittelten jährlichen Vermessungsbedarfs ersichtlich. In *Tabelle 11* werden verschiedene Szenarien unterschiedlicher Intensität des Drohneneinsatzes einander gegenübergestellt, da davon ausgegangen wird, dass für manche Erhebungen (z. B. Schachtvermessungen) weiterhin ein Geometer beauftragt werden muss.

Tabelle 11: Vergleich von Szenarien unterschiedlicher Intensität des Drohneneinsatzes.

| Szenario | Jährliche Vermessung durch Geometer (€ 1,31/lfm) | Jährliche Vermessung durch Drohne (€ 0,31/lfm) | Kosten Erhebung durch Geometer (€) | Kosten Erhebung durch Drohne und Digitalisierung (€) | Summe (€) | Verhältnis zu IST | Einsparung absolut (€) |
|-------------------------------|--|--|------------------------------------|--|-----------|-------------------|------------------------|
| Exklusiv durch Geometer (IST) | 11781 | 0 | 15452 | 0 | 15452 | 100 % | 0 |
| 10 % durch Drohne | 10603 | 1178 | 13907 | 365 | 14272 | 92 % | 1180 |
| 20 % durch Drohne | 9425 | 2356 | 12362 | 730 | 13092 | 85 % | 2360 |
| 30 % durch Drohne | 8247 | 3534 | 10816 | 1096 | 11912 | 77 % | 3540 |
| 40 % durch Drohne | 7069 | 4712 | 9271 | 1461 | 10732 | 69 % | 4720 |
| 50 % durch Drohne | 5891 | 5891 | 7726 | 1826 | 9552 | 62 % | 5900 |
| 60 % durch Drohne | 4712 | 7069 | 6181 | 2191 | 8372 | 54 % | 7080 |
| 70 % durch Drohne | 3534 | 8247 | 4636 | 2557 | 7193 | 47 % | 8259 |
| 80% durch Drohne | 2356 | 9425 | 3090 | 2922 | 6012 | 39 % | 9440 |
| 90 % durch Drohne | 1178 | 10603 | 1545 | 3287 | 4832 | 31 % | 10620 |
| Exklusiv durch Drohne | 0 | 11781 | 0 | 3652 | 3652 | 24 % | 11800 |

Wie aus *Tabelle 11* ersichtlich ist, sind bereits bei einem Anteil von 30 % der jährlichen Naturbestandsaufnahme die durch den Drohneneinsatz erzielbaren Einsparungen höher als die jährlichen Fixkosten für den Drohneneinsatz. Bei Erfassung von 3534 Laufmetern durch Drohne und Digitalisierung betragen gemäß der Berechnung in *Tabelle 10* die für die Drohne ermittelten variablen Kosten (analog zur Berechnung in *Tabelle 10*) 284 Euro, die jährlichen Gesamtkosten für den Drohneneinsatz sind somit 3.013 Euro. Somit liegen bei diesem Szenario die Kosten für die Datenerhebung mittels Drohne bereits um 527 Euro unter den durch den Drohneneinsatz möglichen Einsparungen, sofern davon ausgegangen wird, dass der Einsatz der Drohne durch bereits vorhandenes Personal durchgeführt werden kann.

4.3 Vergleich der Datenqualität

4.3.1 Genauigkeit

Werden die durch Drohnenbefliegung gewonnenen Naturbestandsdaten hinsichtlich ihrer Genauigkeit betrachtet, so fällt auf, dass, sobald eine klare Abgrenzbarkeit der zu erfassenden Objekte aus der Luft gegeben ist, die Qualität der Orthofotos eine einwandfreie Identifikation von Naturbestandsdaten zulässt, wie aus *Abbildung 29* ersichtlich.

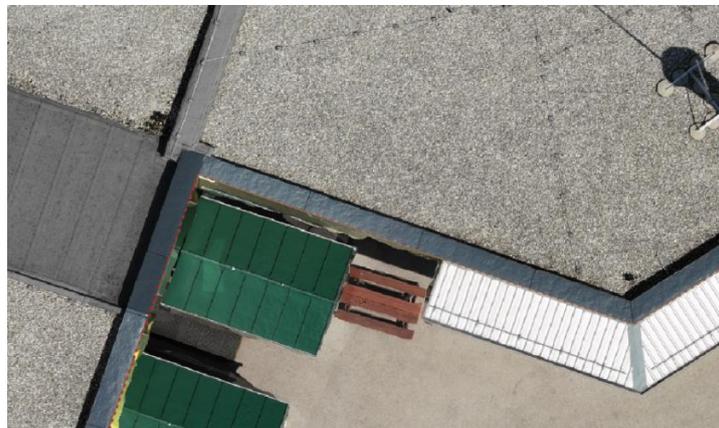


Abbildung 29: Auflösungen von unter 1 cm/Pixel erlauben eine präzise Abgrenzung von Objekten (eigene Darstellung).

Wie der *Tabelle 12* zu entnehmen ist, konnte in Teilbereichen beider Use Cases gezeigt werden, dass die Drohnenbefliegung zu über 98 % eine Verortung der zu vermessenden Objektklassen innerhalb des Toleranzbereiches gewährleistete. Im Use Case zwei konnte aufgrund der geeigneten Gebäudestruktur und der guten Flugbedingungen gezeigt werden, dass immer noch 88,2 % der beflogenen Gebäudeumrisse innerhalb der Toleranz lagen, wenn diese auf +/- fünf cm einschränkt wird. Im Untersuchungsgebiet Gmunden – In der Au konnte aufgrund der bereits erwähnten Problematik mit

Dachvorsprüngen nur eine Abdeckung von 3,7 % innerhalb der Toleranz erreicht werden. Die Daten zu den Straßenrändern im Bereich des Dienstleistungszentrums zeigen eine korrekte Darstellung innerhalb der Toleranzen von 90,4 %. Im Bereich Gmunden – In der Au wurden aufgrund nicht abgrenzbarer Zäune 70,4 % der terrestrischen Daten toleranzkonform vermessen, am Areal des Dienstleistungszentrums 67,0 % der vom Geometer vermessenen Daten.

Tabelle 12: Längenanteil der terrestrischen Vermessung, der mit UAV innerhalb der Toleranz zugeordnet werden konnte.

| Kategorie | In der Au | Dienstleistungszentrum |
|----------------------|------------------|-------------------------------|
| Straßenränder | 98,3 % | 90,4 % |
| Gebäude | 3,7 % | 98,6 % |
| Zäune/Mauern | 70,4 % | 67,0 % |

4.3.2 Informationsgehalt

Wie in Kapitel 3.4.3 Datenqualität beschrieben wurde, wurden die untersuchten Kategorien nach den genannten Informationsinhalten im Hinblick auf deren Erfüllung bewertet. Für beide Vermessungsmethoden, insbesondere für die UAV-Vermessung, gelten die im Verlauf der vorliegenden Arbeit beschriebenen und in Kapitel 4.1 Befliegungsergebnisse erkannten Einschränkungen.

Wie aus *Tabelle 13* ersichtlich ist, können aus der Drohnenbefliegung Aussagen zu Straßenzustand, Belagsart, Fahrbahnfläche sowie Art und Zustand der Straßenbankette getroffen werden, wohingegen aus der herkömmlichen Vermessung nur die Fahrbahnfläche abgeleitet werden kann.

Tabelle 13: Informationsgehalt von Naturbestandskategorien (Ja/Nein/unter Einschränkungen).

| Kategorie | Information | Terrestrisch | Drohne |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------|------------|
| Straßenränder | Straßenzustand | Nein | Ja |
| | Belagsart | Nein | Ja |
| | Fahrbahnfläche | Ja | Ja |
| | Straßenbankette | Nein | Ja |
| Gebäude | Gebäudefläche | Ja | Ja – u. E. |
| | Umriss | Ja | Ja – u. E. |
| | Art des Daches | Nein | Ja |
| | Zustand | Nein | Ja |
| | Korrektheit (Planeinreichung) | Ja – u. E. | Ja |
| Zäune/Mauern | Begrenzung (nat., baul.) | Ja | Ja |
| | Länge | Ja | Ja |
| | Höhe | Nein | Ja |
| | Zustand | Nein | Ja |
| | Lage zur Grundstücksgrenze | Ja | Ja |
| Allgemeine Informationen | Höheninformationen | Ja | Ja |
| | 3D | Nein | Ja |
| | Einhaltung DKM | Ja | Ja |
| | Zusatzinfo weitere Kategorien | Nein | Ja |
| | Planungsgrundlage | Ja | Ja |

Die Gebäude betreffend können Umrisse und Fläche aus der terrestrischen Naturbestandsvermessung korrekt abgeleitet werden. Für die Drohnenvermessung gilt dies nur mit den in Kapitel 4.1 Befliegungsergebnisse beschriebenen Einschränkungen bei Dachvorsprüngen. Die Art des Daches und der Zustand des Daches können hingegen nur mit einer Drohnenbefliegung ermittelt werden. Die Überprüfung einer Planeinreichung kann aus den Daten der Geometervermessung nur auf ihre flächenhaften Ausmaße und die Anwesenheit nicht genehmigter Nebengebäude, Pools etc. hin überprüft werden. Die UAV-Daten lassen zusätzlich auch weitere Rückschlüsse auf Dachkonstruktion, Aufbauten, wie Photovoltaikanlagen oder Blitzschutzanlagen, und ähnliches zu.

Bei Grundstücksbegrenzungen, das heißt bei der Naturbestandskategorie Zäune und Mauern, lassen sich in beiden Vorgangsweisen Aussagen über die Art der

Begrenzung, deren Länge und deren korrekte Lage im Vergleich zum Verlauf der Grundstücksgrenzen treffen.

Darüber hinaus lassen sich aus beiden Vermessungen relevante allgemeine Informationen ableiten. Dazu zählen Höheninformationen, die vom Geometer in Form von Höhenkoten an Vermessungspunkten vorliegen, und Daten, die aus Drohnenbefliegungen anhand der automatisch generierten 3D-Daten abgelesen werden können, wobei die Genauigkeit der Höhendarstellung und die zu berücksichtigenden Fehler (von etwa 2,5 GSD) wie auch SANZ-ABLANEDO et al. (2018) sie beschreiben zu berücksichtigen sind. Wie soeben erwähnt, lassen Befliegungen folglich bereits bei Nadirbefliegung Aussagen über dreidimensionale Informationen zu. Kreuzbefliegung oder zusätzliche Oblique-Perspektive könnten diese Informationen noch deutlich verdichten und präzisieren. Die terrestrische Vermessung kann bis auf die Höhe der Erdoberfläche und Fußpunkte von Gebäuden keinerlei Aussagen im dreidimensionalen Raum treffen. Ob das Grenzkataster eingehalten wird, können beide Methoden evaluieren, wobei die Drohnenbefliegung auch zusätzliche Aussagen über Nutzungsarten von Grundstücken ermöglicht. Die Orthofotographie erlaubt durch die Feststellung eines umfassenden Ist-Zustandes auch Aussagen über zusätzliche Naturbestandskategorien, wie Einbauten, Freileitungen, Vegetation und weitere. Die eigentliche Begrenzung ist hier die optische Erkennbarkeit von Bildinformationen. Anhand der gewonnenen Informationen aus den unterschiedlichen Erfassungsweisen lassen sich Aussagen und Einschätzungen über die Dichte und Diversität der gewonnenen Daten treffen und darüber, ob zusätzliche relevante Aussagen daraus abgeleitet werden können.

5 Diskussion des Methodenvergleichs

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit war es, zu evaluieren, ob eine Naturbestandsvermessung mittels einer simplen Mikrodrohne in Verbindung mit einer hochautomatisierten Software und soliden Anwenderkenntnissen im Bereich der Geoinformation für eine Gemeindeverwaltung eigenständig effizient und sinnvoll bewerkstelligbar ist. Dazu seien an dieser Stelle die Forschungsfragen und aufgestellten Hypothesen nochmals angeführt.

- **Können die Leistungen der konventionellen terrestrischen Naturbestandsvermessung auf kommunaler Ebene auch durch UAV-gestützte Vermessung erbracht werden?**

Hypothese: Die Naturbestandsvermessung kann ohne Leistungsverluste mit drohnengestützter Vermessung bewerkstelligt werden.

- **Kann mittels UAV-gestützter Vermessung (kosten-)effizienter gearbeitet werden?**

Hypothese: Drohnengestützte Vermessung ist kosten- und zeiteffizienter einzusetzen als konventionelle Vermessung, ohne dabei Abstriche in der Qualität und Fülle der Daten machen zu müssen.

Dazu wurden zwei Use Cases aus dem Gemeindealltag entnommen und der konventionellen Vermessung gegenübergestellt, um die getroffenen Annahmen verifizieren oder falsifizieren zu können. Geprüft wurden die gewonnenen Daten im Hinblick auf Kosteneffizienz anhand einer Kostenvergleichsrechnung, im Hinblick auf die erreichte Genauigkeit anhand einer festgelegten Toleranz, die nicht überschritten werden durfte, und den Informationsgehalt anhand einer Analyse der An- oder Abwesenheit einer Auswahl grundlegend relevanter Daten für Gemeindeverwaltungen. Die **Ergebnisse** werden im Folgenden kurz zusammengefasst dargestellt:

Kostenvergleich:

Es wurden beim Kostenvergleich die Gesamtkosten der terrestrischen Naturbestandsvermessung aus dem Beispieljahr den Gesamtkosten einer unter denselben Grundgrößen stattfindenden Drohnenbefliegung gegenübergestellt. Um verwendbare und übersichtliche Zahlen zu generieren, wurde ein Laufmeterpreis errechnet, mithilfe dessen beide Methoden abschließend verglichen werden können. Auf Basis dessen wurden die Kosten für unterschiedliche Verhältnisse zwischen Drohnenutzung und

terrestrischer Vermessung errechnet, da in der Realität wohl eine Mischnutzung die zielführendste Variante sein könnte. Die errechneten Laufmeterkosten betragen für die Geometervermessung 1,31 Euro und für die Drohnenvermessung 0,31 Euro. Eine Nutzung der Drohne würde sich bereits bei einer Quote von 30 % amortisiert haben und über 500 Euro Ersparnis gegenüber einer vollständigen terrestrischen Vermessung bringen. Bei reiner Drohnenvermessung kann in der besprochenen Konstellation von etwa 24 % der Kosten einer Geometervermessung ausgegangen werden.

Genauigkeitsvergleich:

Sobald Strukturen auf hochaufgelösten Orthofotos klar erkennbar werden, ergeben sich Möglichkeiten, sie präzise daraus zu extrahieren. Die Genauigkeit und Vollständigkeit der Ergebnisse variiert jedoch stark und offenbart die Schwächen und Einschränkungen dieser Vorgehensweise. Diese liegen vordergründig in der Abdeckung und Verfälschung von Strukturen (Dachvorsprünge, Vegetation). Sind diese Einschränkungen jedoch nicht gegeben oder können sie abgeschwächt beziehungsweise umgangen werden (zusätzliches GNSS), lassen sich vielversprechende Ergebnisse erzielen. Die Gebäudevermessung im Dienstleistungszentrum Gmunden konnte zu 98,6 % wie gefordert abgebildet werden und hätte eine auf +/- 5cm erhöhte Toleranzanforderung immer noch zu 88,2 % erreicht. In Bezug auf Schrägdächer mit Dachvorsprüngen zeigt die klassische Nadirbefliegung massive Schwächen und kann nur 3,7 % der Gebäude im alternativen Use Case korrekt darstellen. Die Darstellung der Straßenränder zeigt ein homogeneres Bild, im Use Case „In der Au“ können 98,3 % der terrestrischen Naturbestandsdaten wie gefordert nachgebildet werden, am Gelände des Dienstleistungszentrums sind es 90,4 %. Die Erhebung der Zäune und Mauern hatte in beiden Untersuchungsgebieten einen gleichmäßigen Qualitätsverlust zur Folge, 70,4 % zu 67,0 %, was auf flächiger Überdeckung durch Vegetation, Verzerrungen und auch unterschiedlichen Interpretationen des Verlaufs von Hecken beruht.

Informationsgehalt:

In einer Gegenüberstellung der Informationen, die aus den verglichenen Datensätzen ableitbar sind, ergeben sich klare Vorteile für die UAV-Befliegung in den Bereichen der Straßen(rand)vermessung. Über die Flächenmaße hinaus können hier grundlegende Einschätzungen zu Zustand, Belagsart und weitere Aussagen getroffen werden. Betreffend die Gebäude liegt die terrestrische Naturbestandsvermessung bei Flächen und Längenmaßen klar im Vorteil, die Orthofotodaten liefern durch Dachvorsprünge

bis zu 25 % zu große Gebäudeflächen. Die Zusatzinformationen der Befliegung lassen jedoch weitreichende Aussagen über Zustand und Rechts-/Plankonformität zu, die weit über die bloße Lagedarstellung und Bemaßung hinausgehen. Bezüglich der Zäune und Mauern geben beide Methoden ein ähnliches Bild ab, kämpfen mit ähnlichen Problemen, wie der tatsächlichen Abgrenzung einer dichten Hecke etc., die Drohne kann jedoch auch hier mit zusätzlichen Informationen zum Zustand (Bäume, baufällige schiefe Mauern) und auch zur Höhe aufwarten. Zu guter Letzt liefern beide Vorgehensweisen eine Fülle an Daten, die eine gediegene Planungsgrundlage für eine Gemeindeverwaltung sicherstellen können. Es sind klare Aussagen zur Einhaltung des Grenzkatasters möglich und Höheninformationen zum Gelände enthalten – bei der Drohnenbefliegung auch grundlegende zu Gebäuden. Die Drohne ermöglicht jedoch zwei entscheidende Erweiterungen. Ihre Daten ermöglichen das Erweitern der Bestandsdaten in die dritte Dimension (je nach Befliegungsart mit unterschiedlicher Qualität) und es wird eine vollinhaltliche hochaufgelöste Abbildung des Moments geliefert, somit lassen sich bei Bedarf auch im Nachhinein weitere Kategorien von Bestandsdaten einmessen oder Altstände evaluieren.

Werden die erlangten Ergebnisse betrachtet, so liegt der Schluss nahe, dass Drohnenvermessung – mit Einschränkungen und „Kinderkrankheiten“ – eine ernst zu nehmende Alternative zur terrestrischen Vermessung sein kann. Zu ähnlichen Einschätzungen gelangten auch schon MANYOKY et al. (2011) an der ETH Zürich, STÖCKER et al. (2020) aus der Perspektive der Entwicklung einer optimalen Methodik oder ŠAFÁŘ et al. (2021), die in einer aktuellen Publikation den Erfolg und die Schwierigkeiten einer Modernisierung eines Grenzkatasters (inklusive Gebäude) mittels UAVs beschreiben und hohes Potential darin erkennen.

Die in die Methodik gesetzten Erwartungen wurden weitgehend erfüllt und teilweise sogar übertroffen, beispielsweise anhand der Gebäudevermessung des Dienstleistungszentrums. Die Einschränkungen der Drohnenvermessung liegen klar in der Abdeckung durch Vegetation oder Vorsprünge und in Einschränkungen der Bildqualität, etwa durch Verzerrungen am Bildrand des Orthomosaiks. Einige Schwierigkeiten können umgangen oder durch eine ergänzende Vermessungsmethode abgedeckt werden. Dazu eignen sich etwa GNSS-Vermessungsgeräte, die in einigen Gemeinden schon zum Ausrüstungsstandard gehören. Mithilfe dieser können nicht nur die GCPs (etwa aus der Luft erkennbare markante Strukturen, wie Kanaldeckel oder

Wasserschieber, eignen sich vorzüglich) eingemessen werden, sondern auch offensichtlich abgedeckte Strukturen, wie Fahrbahntrompeten unter einem Baum oder ähnliches, können mittels GPS-Punkten ergänzend in Eigenregie vermessen werden. Es gilt hier noch zu erwähnen, dass die Abdeckung durch Vegetation nicht immer gleichförmig ist und sich im Winterhalbjahr (ohne Schneebedeckung), somit außerhalb der Vegetationsperiode, möglicherweise höhere Erfolgsraten in derartigen Arealen erzielen lassen als im Sommerhalbjahr.

Die massiven Probleme in der korrekten Abbildung der Gebäudeflächen bei Dachvorsprüngen liegen in der Art und Weise der Befliegung begründet und wären sicherlich durch Kreuzbefliegung mit Daten aus Nadir- und Oblique-Perspektiven behebbar. GERKE & PRZYBILLA (2016) und STÖCKER et al. (2020) haben noch einige zusätzliche Vorteile dieser Befliegungsweise beschrieben. Es wäre in Folge anzudenken, die Digitalisierung der Naturbestandsdaten in einem 3D-GIS vorzunehmen und die Gebäudemauern an der Basis zu vermessen und nicht am Rand des Daches. Aufgrund des inhaltlich begrenzten Rahmens einer Masterarbeit und in aller Regel völlig fehlender 3D-Darstellungsmöglichkeiten in einem Gemeinde-GIS wurde hierauf jedoch verzichtet.

Diesen wahrscheinlich lösbaren Einschränkungen gegenüber stehen massive Vorteile betreffend die Kostenstruktur, die bereits vielfach in Publikationen hervorgehoben wurden. Dazu kommt der Faktor der Zeitersparnis, je schneller ein Projekt abgearbeitet werden kann, desto günstiger und ressourcenschonender kann gearbeitet werden, bei gleichzeitig erhöhter Flexibilität. Flexibilität ist für sich eine Kategorie von zentraler Bedeutung. Durch eigenständige Drohnenbefliegung gewinnt eine Gemeinde oder ein Verband ein gewisses Maß an Unabhängigkeit und damit genau diese. Die Genauigkeit erreicht ohne Abdeckungen oder Verzerrungen die Genauigkeit der terrestrischen Vermessung, problematische Bereiche können mit Alternativmethoden der Vermessung wie GNSS unkompliziert abgedeckt werden. ŠAFÁŘ et al. (2021) bezifferten diesen Anteil mit etwa 25 %. Der Autor möchte sich dieser Einschätzung anschließen und sieht unter Berücksichtigung der Vektorisierung der Daten in 3D das Potential, diesen Anteil deutlich senken zu können.

Da diese Forschungsarbeit im Rahmen der Erlangung eines Mastergrades verfasst wurde, unterliegt sie naturgemäß gewissen Einschränkungen den Umfang und die Tiefe der Aufarbeitung der Thematik betreffend. Dies zeigt sich vor allem in der

begrenzten Datenfülle durch zwei Untersuchungsgebiete und den begrenzten Untersuchungszeitraum. Es wurden bewusst praktische, unkomplizierte Methoden gewählt, um die Daten aus den Drohnenbefliegungen zu generieren, nicht nur, weil auf einer Gemeindeverwaltung oder in einem Verband aller Wahrscheinlichkeit nach ressourcenmäßig begrenzte Tools zur Verfügung stehen, sondern auch, weil vielfach, wie die Problematik der Bildklassifikation zur automatischen Ableitung eines Grenzkatasters zeigt, diese Vorgehensweisen immer noch zu den verlässlichsten und robustesten gehören.

Die Forschungsfragen und Hypothesen konnten abschließend aus Sicht des Autors mit (erwarteten) Einschränkungen verifiziert werden. Diese Einschränkungen sind durch Schwächen der Nadir-Perspektive erklärbar und die Beseitigungsmöglichkeiten sind bereits erläutert worden. Die Frage der Effizienz konnte zu Gunsten der Drohne geklärt werden, die Drohne benötigt etwa ein Viertel des Kostenaufwandes einer terrestrischen Vermessung, ist in der Lage, in einem Vormittag Flächen in der Größenordnung von mehreren Hektar aufzunehmen, und generiert dabei ein Vielfaches der Daten einer terrestrischen Vermessung. Es ist jedoch geboten, aufgrund der Einschränkungen zur Sicherstellung hochwertiger Ergebnisse ergänzend auf GNSS-Messung zurückzugreifen. Die Befliegungsweise und die Vektorisierung sollten, wenn möglich, zusätzlich auf die Verwendung des dreidimensionalen Raums ausgelegt werden.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Eine extern in Auftrag gegebene terrestrische Naturbestandsvermessung unterliegt den Festlegungen der Ausschreibung und damit in aller Regel den Bestimmungen des Vermessungswesens. Dies garantiert eine gewisse Qualität, Planbarkeit, Einheitlichkeit und Struktur. Es geht aber zu Lasten der Flexibilität – Abhängigkeit von einem Dienstleister sachlich, strukturell und zeitlich ist vorprogrammiert – und schlägt sich Jahr für Jahr in beträchtlichen Kosten nieder. Drohnen ermöglichen eine flexible, objektive und umfassende Beschreibung der Erdoberfläche aus der Vogelperspektive. Genau das bietet aus Sicht des Autors die entscheidenden Vorteile für eine Kommunalverwaltung.

Es konnte gezeigt werden, dass günstige Ready-to-fly Drohnen in der Lage sind, adäquate Naturbestandsinformationen in kurzer Zeit und zu einem Bruchteil der Kosten einer konventionellen Naturbestandsvermessung zu liefern (vgl. Kapitel 4.2 Kostenvergleichsrechnung). Die Methode der Drohnenbefliegung unterliegt gewissen Einschränkungen, etwa bezüglich der Abdeckung durch Vegetation oder andere Objekte wie Dachvorsprünge. Dies macht gegebenenfalls die Verwendung einer zweiten Vermessungsmethode als Ergänzung notwendig. Es bietet sich hier an, mit GNSS zu arbeiten, wenn dies ohnehin ein Mittel der Wahl zur Sicherstellung einer präzisen Georeferenzierung ist. Das alternative RTK-GNSS liegt bei Drohnen aufgrund der gesunkenen Kosten und der Integration der Georeferenzierung stark im Trend. Auch wenn positive Effekte auf den Verlauf des Bildprocessings durch den Einsatz dieser Technologie beobachtbar sind, gibt es jedoch Hinweise darauf, dass sich trotz dieser Technologie immer noch das Setzen von GCPs rentiert (GERKE & PRZYBILLA 2016).

In Kombination mit einem leistungsfähigen GNSS mit Korrekturdaten wie dem verwendeten APOS sind, unter Berücksichtigung genannter Einschränkungen, gleichwertige Ergebnisse erzielt worden (vgl. Kapitel 4.3 Vergleich der Datenqualität). In schwierig zugänglichen und abgelegeneren Arealen ist die Drohne – solange keine Abdeckung vorliegt – im Vorteil und ermöglicht eine genauere sowie differenziertere Abgrenzung.

Der nach Ansicht des Autors gewichtigste Vorteil dieser Technologie liegt in den zusätzlich gewonnenen Daten (vgl. Kapitel 3.4.3 Datenqualität) und in den vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten einer Drohne für die ganze Gemeindeverwaltung. Im Gegensatz zur herkömmlichen Vermessung ist die Möglichkeit der Ableitung von

Objektstrukturen nur ein kleiner Teil dessen, was in den Möglichkeiten der Drohne steckt. Es werden nicht nur Vermessungsgrundlagen erstellt, es wird gleichzeitig eine vollinhaltliche, hochdetaillierte, farbechte Momentaufnahme eines Untersuchungsraumes angefertigt. Diese ermöglicht im Post Processing eine Vielzahl an Aussagen zu anderen Themen, etwa zur Straßenzustandserfassung im Zuge der Abschätzung des Gemeindevermögens. Ein hochaufgelöstes Orthofoto birgt auch nach einem Nadir-Flug oftmals schon hilfreiche grundlegende Informationen im 3D-Bereich, wie etwa näherungsweise Gebäudehöhen. Abseits der Nutzung in den Bereichen der Datenerfassung lässt sich die Auslastung einer Drohne durch eine Kooperation mit der örtlichen Feuerwehr, der Jägerschaft oder auch dem lokalen Tourismusverband beinahe beliebig steigern. Eine gemeindeübergreifende Nutzung oder eine Gemeindeverbandslösung könnte sowohl die Auslastung als auch die Kosteneffizienz nochmals deutlich verbessern.

Unter Beachtung der in der vorliegenden Masterarbeit erarbeiteten Besonderheiten ist die Micro-Drohne ein geeignetes Werkzeug, um in kurzer Zeit – beide Use Cases konnten in je etwa zwei Stunden bearbeitet werden – grundlegende Naturbestandsinformationen erheben zu können. Wie *Abbildung 30* zu entnehmen ist, konnte die Drohnenbefliegung mit anschließender Vektorisierung ein mit terrestrischer Vermessung vergleichbares Endprodukt liefern.



Abbildung 30: Direkter Vergleich beider Methoden: Durchgezogen: terrestrische Vermessung, strichliert: UAV-Vermessung (eigene Darstellung).

Die terrestrische Naturbestandsvermessung arbeitet nach den im Vermessungsgesetz und der Vermessungsverordnung vorgegebenen Richtlinien und erfüllt diese verbindlich. Im Vergleich dazu unterliegt die Vermessung mit einer Micro-Drohne einigen veränderlichen Einflussfaktoren, die das Messergebnis beeinflussen können. Die bedeutendsten wurden bereits in der vorliegenden Arbeit vorgestellt. Ist das System aus Drohne, Mensch und Software in den anfangs besprochenen Parametern passend eingestellt, ist das Erreichen bisheriger Standards bei konventioneller Vermessung möglich und wahrscheinlich.

Für weitere Optimierungen und zukünftige Entwicklungen spannt sich ein weites Feld auf. Dies beginnt bei der Optimierung der Kostenstruktur, die über Verbandslösungen zur gemeinsamen Beschaffung von Equipment bis hin zur Arbeitsteilung oder der gemeinsamen Nutzung der Fachexpertise eines Bediensteten reichen kann. Genauigkeitsaspekte unterliegen schon heute, wenn keine Einschränkungen gegeben sind, im hochauflösenden Bereich eher den Toleranzen, die für GNSS-Vermessung der GCPs, Georeferenzierung (RMSE) und Digitalisierungsfehler zu berücksichtigen sind, als der Drohnenvermessung selbst. Die zunehmende Nutzung der dritten Dimension, ergänzende Vermessungen und technischer Fortschritt haben auch hier das Potential, die offenen Lücken zu schließen.

Ein relevanter Themenbereich, den es in den nächsten Jahren genau zu beobachten gilt, ist die Klassifizierung von Bilddaten durch Methoden wie deep learning. Hier liegt das Potential, dass irgendwann die manuelle Vektorisierung und Prüfung automatisch generierter Daten durch den Menschen sukzessive minimiert werden können oder vielleicht ganz entfallen. Diese Möglichkeiten würden die Vorstellung einer Zukunft erlauben, in der Drohnen automatisch dreidimensionale Datensätze von Grundstücken und Gebäudestrukturen erheben könnten und diese automatisch einer Klasse zugeordnet werden. Die dreidimensionalen Daten könnten hierbei die Zuordnung und Präzisierung der Klassifizierungen weiter verfeinern und erleichtern. Es wäre bahnbrechend, wie Verwaltungs- und Erfassungsaufwände hierdurch weitaus effizienter gestaltet werden könnten. Der Autor ist überzeugt, dass die nächsten Jahre auch im Bereich der kommunalen Vermessungsmethoden von einer dynamischen Heterogenität geprägt sein werden und dass sich mehrere Ansätze durch ihre jeweiligen Stärken bereichern und ihre Schwächen gegenseitig ausgleichen.

Literatur

- ALIDOOST, F. & AREFI, H. (2017), COMPARISON OF UAS-BASED PHOTOGRAMMETRY SOFTWARE FOR 3D POINT CLOUD GENERATION: A SURVEY OVER A HISTORICAL SITE. In: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sciences, IV-4/W4, 55–61, doi: 10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-55-2017.
- AMT DER OÖ. LANDESREGIERUNG (2021a), Oö. Gemeinde-Dienstrechts- und Gehaltsgesetz 2002 - Landesrecht konsolidiert Oberösterreich, Fassung vom 13.08.2021. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LROO&Gesetzesnummer=20000190> (13.08.2021).
- AMT DER OÖ. LANDESREGIERUNG (2021b), Oö. Gemeinde-Einreichungsverordnung - Landesrecht konsolidiert Oberösterreich, Fassung vom 13.08.2021. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrOO&Gesetzesnummer=20000188> (13.08.2021).
- AUSTRO CONTROL GMBH (2021a), EU - Regulativ. https://www.dronespace.at/eu_regulativ (03.08.2021).
- AUSTRO CONTROL GMBH (2021b), Drohnenführerschein. <https://www.dronespace.at/drohnenfuehrerschein> (13.08.2021).
- BOCK, S. (2021), Betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer – Drohne. <https://www.waldlandwelt.de/cgi-bin/afa-tabellen.pl?Drohne> (31.08.2021).
- BRUTTONETTO-RECHNER.AT (2021), Lohnkostenrechner: Brutto Netto Rechner für Arbeitgeber 2021. <https://www.bruttonetto-rechner.at/arbeitgeber-lohnkostenrechner/> (13.08.2021).
- 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, doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
- CRAMER, M., PRZYBILLA, H.-J., MEIßNER, H., STEBNER, K. (2017), Kalibrierung und Qualitätsuntersuchungen UAV-basierter Kamerasysteme. In: DVW E.V. (Hrsg.), Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). Beiträge zum 156. DVW-Seminar am 9. und 10. Februar 2017 in Stuttgart. Wißner-Verlag, Augsburg, 67–84.
- CROMMELINCK, S., BENNETT, R., GERKE, M., KOEVA, M. N., YANG, M. Y. & VOSSELMAN, G. (2017), SLIC SUPERPIXELS FOR OBJECT DELINEATION FROM UAV DATA. In: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., IV-2/W3, 9–16, doi: 10.5194/isprs-annals-iv-2-w3-9-2017.

- CROMMELINCK, S., BENNETT, R., GERKE, M., YANG, M. & VOSSELMAN, G. (2017), Contour Detection for UAV-Based Cadastral Mapping. In: *Remote Sensing*, 9 (2), 171, doi: 10.3390/rs9020171.
- CROMMELINCK, S., HÖFLE, B., KOEVA, M. N., YANG, M. Y. & VOSSELMAN, G. (2018), INTERACTIVE CADASTRAL BOUNDARY DELINEATION FROM UAV DATA. In: *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-2, 81–88, doi: 10.5194/isprs-annals-iv-2-81-2018.
- CUNNINGHAM, K., WALKER, G., STAHLKE, E. & WILSON, R. (2011), CADASTRAL AUDIT AND ASSESSMENTS USING UNMANNED AERIAL SYSTEMS. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XXXVIII-1/C22, 213–216, doi: 10.5194/isprsarchives-xxxviii-1-c22-213-2011.
- DRAEYER, B. & STRECHA, C. (2014), How accurate are UAV surveying methods ?
White paper : How accurate are UAV surveying methods ?
- ELING, C. & MÜNSTERMANN, G. (2020), Direkte Georeferenzierung von Bildverbänden: Zum Leistungsstand von UAV-Systemen mit integrierten RTK-Modulen. In: DVW E.V. (Hrsg.), *UAV 2020 – The Sky is the Limit? Beiträge zum 185. DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2020 in Hattingen*. Wißner-Verlag, Augsburg, 77–90.
- FELDMANN, M., Sicherheitsrisiko Drohne. Neue Bedrohungsszenarien erfordern Gegenmaßnahmen. In: *Behörden Spiegel*, 2.
- FETAI, B., RAČIČ, M. & LISEC, A. (2021), Deep Learning for Detection of Visible Land Boundaries from UAV Imagery. In: *Remote Sensing*, 13 (11), 2077, doi: 10.3390/rs13112077.
- GERKE, M. & PRZYBILLA, H.-J. (2016), Accuracy Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks: Influence of Onboard RTK-GNSS and Cross Flight Patterns. In: *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2016 (1), 17–30, doi: 10.1127/pfg/2016/0284.
- GISQUADRAT GMBH (2021a), GPS-Vermessung mit Echtzeit-Datenverarbeitung. <https://www.gisquadrat.com/gis-software/gisq-tools/integrierte-gps-vermessung/> (03.08.2021).
- GISQUADRAT GMBH (2021b), Kanalkataster. <https://www.gisquadrat.com/gis-loesungen/kanalkataster/> (10.08.2021).
- GMUNDEN, S. (2017), *GIS Gmunden 2017*.
- GÖTZE, U. & BLOECH, J. (2013), *Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. Springer-Verlag, Berlin.

- GREBER, W. (2013), Von Venedig nach Afghanistan: Die Geschichte der Drohnen, Wien. <https://www.diepresse.com/1385181/von-venedig-nach-afghanistan-die-geschichte-der-drohnen> (29.01.2021).
- HESSE, J. J. & ELLWEIN, T. (2012), Das Regierungssystem der Bundesrepublik Deutschland. In: de Gruyter, i–vi, doi: 10.1515/9783110901245.fm.
- HOLZER, J. & FORKERT, G. (2004), Effiziente Erzeugung von 3D Stadtmodellen aus vorhandenen Vermessungsdaten, Wien.
- INGENSAND, H. (2009), Moderne Tachymetrie. ETH Zürich.
- INGENSAND, H. (2010), Moderne Tachymetrie. ETH Zürich.
- INNOGEO (2021), Laserscanning. <https://www.innogeo.at/vermessung/laserscanning> (03.08.2021).
- JIANG, S., JIANG, C. & JIANG, W. (2020), Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SfM tools. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 167, 230–251, doi: 10.1016/j.isprs.2020.04.016.
- KERN, W. (1974), Investitionsrechnung. Poeschel, Stuttgart.
- KERSTEN, T. & LINDSTAEDT, M. (2017), Photogrammetrie auf Knopfdruck – Auswertung und Resultate UAV-gestützter Bildflugdaten. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (1/2017), 3–13, doi: 10.12902/zfv-0145-2016.
- KOHLSTOCK, P. (2011), Topographie : Methoden und Modelle der Landesaufnahme. Berlin [u.a.] : de Gruyter.
- KOMMUNALE GEMEINSCHAFTSSTELLE FÜR VERWALTUNGSVEREINFACHUNG (Hrsg.) (2004), Anforderungen an das kommunale Geodatenmanagement, Köln.
- KUHLMANN, H. & HOLST, C. (2018), Flächenhafte Abtastung mit Laserscannern. In: SCHWARZ, W. (Hrsg.), Ingenieurgeodäsie: Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel. Springer, Berlin, Heidelberg, 168–212.
- KUHLMANN, H. & KLINGBEIL, L. (2017), Mobile Multisensorsysteme. In: SCHWARZ, W. (Hrsg.), Ingenieurgeodäsie. Handbuch der Geodäsie, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel. Springer, Berlin, Heidelberg, 93–129.
- LEICA GEOSYSTEMS (2021), Bestehende Anlagen vermessen. <https://leica-geosystems.com/de-at/industries/natural-resources/forestry/measure/measure-existing-assets> (30.08.2021).

- LOWE, D. (2004), Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. In: International Journal of Computer Vision, 60 (2), 91–110, doi: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
- MAIER, T. (2020), UAV im kommunalen Einsatz. In: DVW e.V. (Hrsg.), UAV 2020 – The Sky is the Limit? Beiträge zum 185. DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2020 in Hattingen. Wißner-Verlag, Augsburg, 197–218.
- MANYOKY, M., THEILER, P., STEUDLER, D. & EISENBEISS, H. (2011), Unmanned aerial vehicle in cadastral applications. ETH Zürich.
- MATTHEWS, V. (1997), Vermessungskunde. Fachgebiete Architektur - Bauingenieurwesen - Vermessungswesen. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- MEIßNER, H., PRZYBILLA, H.-J., CRAMER, M., STEBNER, K. (2018), UAV-Kameras – Bewertung von Kalibrierung, Langzeitstabilität und optischem Auflösungsvermögen. In: DVW e.V. (Hg.) 2018 – UAV 2018-Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. Beiträge zum 169. DVW-Seminar am 19. und 20. Februar 2018 in Hamburg. Wißner-Verlag, Augsburg, 47–59.
- MIP3D (2021a), Digitalisierung der Stahlkonstruktion der Praterbrücke in Wien zur Brückenerweiterung mittels 3D-Laserscanning. <https://www.mip3d.at/Projekt-Digitalisierung-Stahlkonstruktion-Praterbruecke.html> (03.08.2021).
- MIP3D (2021b), Laserscanning. <https://www.mip3d.at/3D-Laserscanning.html> (03.08.2021).
- MOOSEDER, P. (2021), Bericht GIS - Techniker. <https://www.netfocus.at/Newsletter/Bericht-GIS-Techniker.html> (03.08.2021).
- NEBIKER, S., KAMER, K. & EUGSTER, H. (2013), Integrierte Georeferenzierung von luft- und bodengestützten Stereobilddaten im Straßenbereich–Strategien und Ergebnisse. In: DGPF Tagungsband Jahrestagung, 22.
- NETFOCUS GMBH (2021), GPS -Vermessung vs. konventionelle Vermessung. <https://www.netfocus.at/Info> (24.03.2021).
- NEX, F., DUARTE, D., STEENBEEK, A. & KERLE, N. (2019), Towards Real-Time Building Damage Mapping with Low-Cost UAV Solutions. In: Remote Sensing, 11 (3), 287, doi: 10.3390/rs11030287.
- OEHLE, J. (2021), DJI Mavic 2 Enterprise Dual (M2ED): Test / Vergleich / Bewertung. <https://www.drohnen.de/22100/dji-mavic-2-enterprise-dual-test/> (30.08.2021).

- OÖ-SLBG, Z. (2010), Richtlinien und Leistungsverzeichnis für katastrale Vermessungen von Straßen-, Weg- und Wasserbauten im Wirkungsbereich der Länder.
- ÖSTERREICHISCHER GEMEINDEBUND (2021), Was unsere Gemeinden leisten.
<https://gemeindebund.at/buergermeister-und-buergermeisterinnen-was-unsere-gemeinden-leisten/> (03.08.2021).
- PAJARES, G. (2015), Overview and Current Status of Remote Sensing Applications Based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81 (4), 281–330, doi: 10.14358/PERS.81.4.281.
- PAJARES, G. & LA MANUEL DE CRUZ, J. (2004), A wavelet-based image fusion tutorial. In: *Pattern Recognition*, 37 (9), 1855–1872, doi: 10.1016/j.patcog.2004.03.010.
- PARK, J.-Y., KIM, S.-T., LEE, J.-K., HAM, J.-W. & OH, K.-Y. (2020), Method of operating a GIS-based autopilot drone to inspect ultrahigh voltage power lines and its field tests. In: *Journal of Field Robotics*, 37 (3), 345–361, doi: 10.1002/rob.21916.
- PIX4D (2021), Pix4D-Software und Hardware – Preismodelle | Pix4D.
<https://www.pix4d.com/de/preise> (13.08.2021).
- PROROK, T., MITTERER, K., HOCHHOLDINGER, N. & HAINDL, A. (2013), Struktur, Steuerung und Finanzierung von kommunalen Aufgaben in Stadtregionen. Österreichischer Städtetag 2013. Endbericht., Wien. https://www.staedtebund.gv.at/fileadmin/USERDATA/staedtetag/2013/tagungsunterlagen/endbericht_staedtetag13_gesamt_20130513.pdf (03.08.2021).
- PRZYBILLA, H.-J. (2017), Kameras für UAS – Eine Marktübersicht. In: DVW E.V. (Hrsg.), *Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)*. Beiträge zum 156. DVW-Seminar am 9. und 10. Februar 2017 in Stuttgart. Wißner-Verlag, Augsburg, 51–66.
- PRZYBILLA, H.-J. (2020), UAV-Befliegung – Alles klar? Über den Einfluss der Aufnahmekonfiguration. In: DVW E.V. (Hrsg.), *UAV 2020 – The Sky is the Limit?* Beiträge zum 185. DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2020 in Hattingen. Wißner-Verlag, Augsburg, 61–76.
- PRZYBILLA, H.-J., REUBER, C., BÄUMKER, M. & GERKE, M. (2015), Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. In: *DGPF Tagungsband 24/2015*, 45–54.
- REMONDINO, F., NOCERINO, E., TOSCHI, I. & MENNA, F. (2017), A CRITICAL REVIEW OF AUTOMATED PHOTOGRAMMETRIC PROCESSING OF LARGE

- DATASETS. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W5, 591–599, doi: 10.5194/isprs-archives-xlii-2-w5-591-2017.
- ŠAFÁŘ, V., POTŮČKOVÁ, M., KARAS, J., TLUSTÝ, J., ŠTEFANOVÁ, E., JANČOVIČ, M. & CÍGLER ŽOFKOVÁ, D. (2021), The Use of UAV in Cadastral Mapping of the Czech Republic. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10 (6), 380, doi: 10.3390/ijgi10060380.
- SANZ-ABLONEDO, E., CHANDLER, J. H., RODRÍGUEZ-PÉREZ, J. R. & ORDÓÑEZ, C. (2018), Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used. In: *Remote Sensing*, 10 (10), 1606, doi: 10.3390/rs10101606.
- SCHLÖSSER, L. & KUHN, S. (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? Beiträge zum 185. DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2020 in Hattingen*. Wißner-Verlag, Augsburg, 39–60.
- SCHMECHTIG, O. (2020), Unmanned Aerial Vehicle – Aktueller Stand und technische Entwicklungen. In: DVW E.V. (Hrsg.), *UAV 2020 – The Sky is the Limit? Beiträge zum 185. DVW-Seminar am 17. und 18. Februar 2020 in Hattingen*. Wißner-Verlag, Augsburg, 9–14.
- SEIFERT, E., SEIFERT, S., VOGT, H., DREW, D., VAN AARDT, J., KUNNEKE, A. & SEIFERT, T. (2019), Influence of Drone Altitude, Image Overlap, and Optical Sensor Resolution on Multi-View Reconstruction of Forest Images. In: *Remote Sensing*, 11 (10), 1252, doi: 10.3390/rs11101252.
- STÖCKER, C., NEX, F., KOEVA, M. & GERKE, M. (2020), High-Quality UAV-Based Orthophotos for Cadastral Mapping: Guidance for Optimal Flight Configurations. In: *Remote Sensing*, 12 (21), 3625, doi: 10.3390/rs12213625.
- SZELISKI, R. (2011), *Computer Vision*. Springer London, London.
- TOTH, C. & JUTZI, B. (2017), Plattformen und Sensoren für die Fernerkundung und deren Geopositionierung. In: HEIPKE, C. (Hrsg.), *Photogrammetrie und Fernerkundung. Handbuch der Geodäsie*, herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel. Springer, Berlin, Heidelberg, 29–64.
- TRIMBLE (2021), Trimble TSC 7. <https://de.geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-tsc7> (01.08.2021).
- TURNER, D., LUCIEER, A. & WATSON, C. (2012), An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle

(UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. In: Remote Sensing, 4(5), 1392–1410, doi: 10.3390/rs4051392.

ULLMAN, S. (1979), The interpretation of structure from motion. In: Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences, 203 (1153), 405–426, doi: 10.1098/rspb.1979.0006.

WESTOBY, M., BRASINGTON, J., GLASSER, N., HAMBREY, M. & REYNOLDS, J. (2012), 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. In: Geomorphology, 179, 300–314, doi: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.

WIELAND, M. (2018), Risiken, klassische Einstiegsprobleme und Strategien für den UAS-Einsatz in Ingenieurbüros. In: DVW e.V. (Hg.) 2018 – UAV 2018-Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. Beiträge zum 169. DVW-Seminar am 19. und 20. Februar 2018 in Hamburg. Wißner-Verlag, Augsburg, 13–22.

WIENER STÄDTISCHE VERSICHERUNG AG (2021), Drohnen-Versicherung.
<https://www.wienerstaedtsche.at/privatkunden/freizeit-reise/freizeitaktivitaeten/drohnenversicherung.html> (13.08.2021).

WIRTSCHAFTSKAMMER ÖSTERREICH (2021), Zahlen, Daten, Fakten.
https://www.wko.at/service/zahlen-daten-fakten/start.html?shorturl=wkoat_statistik (13.08.2021).

ZEISKE, K. (2000), Vermessen leicht gemacht. Leica Geosystems, Köln.

Anhang

Die dem Anhang zugehörigen Dokumente sind unter folgendem Link abrufbar:

<https://www.dropbox.com/sh/7ir5mb5rucpzkcw/AABK7qdSykmlkII1nXTHp7iaa?dl=0>