



# Master Thesis

im Rahmen des  
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“  
(UNIGIS M.Sc.) am interfakultären Fachbereich für Geoinformatik (Z\_GIS)  
der Paris-Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

## „Open Source Software und Drohnen?“ Systematischer Plattformvergleich für die geographische Inwertsetzung von UAV-Bildaufnahmen

vorgelegt von

**Charlotte Toma**  
104858, UNIGIS MSc Jahrgang 2017

Zur Erlangung des Grades

„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc (GIS)“

Bonn 17.12.2019

# OPEN SOURCE SOFTWARE UND DROHNEN?

SYSTEMATISCHER PLATTFORMVERGLEICH FÜR DIE GEOGRAPHISCHE  
INWERTSETZUNG VON UAV-BILDAUFNAHMEN

Zur Erlangung des „MSc (GIS)“

an der Paris-Lodron-Universität Salzburg

Eingereicht von: Charlotte Toma

Gutachter: Prof. apl. Dr. rer. nat. habil. Matthias Möller

Salzburg, Dezember 2019

## Danksagung

Diese Arbeit wurde betreut durch Prof. apl. Dr. rer. nat. habil. Matthias Möller von der Beuth Hochschule für Technik in Berlin. Ich danke meinem Betreuer für die durchgehende fachliche Unterstützung. Ein großer Dank gilt auch der Firma WhereGroup GmbH, die dank der Bereitstellung der Server und Hardware, der UAV und dem Arbeitsplatz die Durchführung ermöglicht hat. Des Weiteren danke ich der Hatzfeldt-Wildenburg'schen Forstverwaltung und dem Stadtwerk am See für die Bereitstellung von Untersuchungsdaten.

Allen Beteiligten danke ich für Ihre Geduld, Ihre Unterstützung und Ihr Engagement in dem Zeitraum der Entstehung dieser Arbeit und darüber hinaus. Ein ganz besonderer Dank geht an meine Familie, die mich stets in allen Bereichen meines Lebens unterstützt.

## Erklärung - eigenständige Abfassung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Die Stellen dieser Arbeit, die anderen Quellen im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet.

Bonn, 17.12.2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Toma', with a stylized initial 'C'.

Charlotte Toma

## Abstract

Diese Arbeit evaluiert anhand eines systematischen Vergleichs zwischen vier Anwendungen, welche Plattform sich für die Prozessierung von UAV-Bildaufnahmen am besten eignet. Hierfür wurden die Bildaufnahmen von zwei Untersuchungsgebieten mit der jeweiligen Standardkonfiguration in Agisoft Metashape, Pix4Dmapper, WebODM und VisualSFM verarbeitet. Anschließend erfolgte auf Basis der angepassten Konfigurationsparameter in einem zweiten Durchlauf eine möglichst optimierte Prozessierung der Ausgangsdaten. Das erste Untersuchungsgebiet war ein ländlich gelegener Campingplatz; das zweite Untersuchungsgebiet ein Bürokomplex in einer Stadt. Die genutzte Drohne war je eine Micro-UAV von DJI.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eruiert, welche Software sich eignet, welche Kenntnisse im Bereich Photogrammetrie erforderlich sind und welche Minimalanforderungen das System (Hard-/Software) aufweisen sollte. Des Weiteren wurde evaluiert, inwieweit die Qualität der ursprünglichen Daten das Resultat der Prozessierung beeinflusst.

Die Forschungsfrage war, ob Open Source Software am effizientesten und daher empfehlenswert ist. Zudem wurde die These aufgestellt, dass die Primärdatenerfassungen durch Micro-UAVs qualitativ hochwertige Rohdaten erzeugen, die auch mit der Rechnerausstattung einer Privatperson verarbeitet werden können. Eine weitere Null-Hypothese war, dass unabhängig von der gewählten Plattform die Qualität der Ursprungsdaten nicht den erfolgreichen Abschluss der Prozessschritte behindert oder die Qualität der Ergebnisse tangiert.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass äußere Umweltfaktoren, sowie die Aufnahmeart und die genutzte UAV die Datenqualität maßgeblich beeinflussen. Limitierender Faktor bei der Verarbeitung sind die Rechnerleistung, sowie photogrammetrische Kenntnisse. Die These, dass Open Source Software am besten geeignet ist, konnte durch die vorliegende Arbeit nicht bestätigt werden. Am geeignetsten in Bezug auf die funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen wurden Pix4Dmapper und Agisoft Metashape eingestuft.

*Keywords: Open Source, Photogrammetry, Photogrammetrie, Drohnen, Drone, MicroUAV, UAS, UAV, Agisoft Metashape, Pix4Dmapper, VisualSFM, OpenDroneMap, WebODM, OSS, GIS*

## Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	3
Erklärung - eigenständige Abfassung.....	4
Abstract.....	5
Inhaltsverzeichnis.....	6
Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis.....	10
Abkürzungsverzeichnis.....	11
1. Einleitung.....	12
1.1. Konzeption.....	12
1.2. Motivation.....	12
1.3. Forschungsfrage.....	13
1.3.1. Operative Teilschritte.....	13
1.3.2. Leitziele.....	14
1.4. Stand der Forschung.....	15
1.4.1. Datenerhebung.....	15
1.4.1.1. UAVs.....	15
1.4.1.2. Missionsplanung und Befliegung.....	18
1.4.2. Datenverarbeitung.....	20
1.4.2.1. Photogrammetrie.....	20
1.4.2.2. Software.....	27
1.4.2.3. Hardware.....	35
2. Methodik.....	36
2.1. Datenerhebung.....	36
2.1.1. UAVs.....	36
2.1.2. Untersuchungsgebiete.....	37
2.1.3. Missionsplanung und Befliegung.....	38
2.2. Datenverarbeitung.....	42
2.2.1. Hardware.....	42
2.2.2. Software.....	44
2.3. Datenverarbeitung Agisoft Metashape.....	47
2.3.1. Konfiguration für U1 (Metashape).....	47
2.3.2. Konfiguration für U2 (Metashape).....	49
2.4. Datenverarbeitung Pix4Dmapper.....	50
2.4.1. Konfiguration für U1 (Pix4Dmapper).....	50
2.4.2. Konfiguration für U2 (Pix4Dmapper).....	52
2.5. Datenverarbeitung WebODM.....	52

2.5.1.	Konfiguration für U1 (WebODM) .....	52
2.5.2.	Konfiguration für U2 (WebODM) .....	53
2.6.	Datenverarbeitung VisualSFM .....	54
2.6.1.	Konfiguration für U1 (VisualSFM).....	54
2.6.2.	Konfiguration für U2 (VisualSFM).....	55
2.7.	Analyse .....	56
2.7.1.	Kriterienkatalog .....	56
2.7.1.1.	Qualitätsanforderungen .....	56
2.7.1.2.	Anforderungen an die Prozessierung .....	57
2.7.2.	Exportvergleich.....	59
3.	Ergebnisse .....	61
3.1.	Datenerhebung .....	61
3.2.	Datenverarbeitung .....	62
3.2.1.	Kameraorientierung.....	62
3.2.2.	Bildverknüpfung .....	63
3.2.3.	Punktwolke .....	64
3.2.4.	3D-Modell.....	69
3.2.5.	Export - Orthomosaik .....	74
3.2.5.1.	UG 1 - Campingplatz .....	75
3.2.5.2.	UG 2 - Firmenstandort .....	75
3.2.6.	Export - DSM.....	76
3.2.7.	GCPs.....	79
3.2.8.	Performance / Zeitaufwand.....	84
3.2.9.	Hardwareauslastung .....	89
3.3.	Qualitätsanforderungen .....	91
4.	Diskussion.....	97
4.1.	Eignung der Plattform .....	97
4.2.	Nötige Ausstattung .....	103
4.3.	Auswirkung der Datenqualität .....	105
5.	Ausblick.....	112
5.1.	Datenerhebung .....	112
5.2.	Datenverarbeitung .....	113
6.	Literaturverzeichnis.....	119
7.	Anhang.....	129

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bildüberlappung bei Linienflug (eigene Darstellung) .....	19
Abbildung 2: Prozesskette der Photogrammetrie (eigene Darstellung) .....	21
Abbildung 3: Passpunktabgleich zwischen Bildpunkten (eigene Darstellung) .....	23
Abbildung 4: Zentralperspektive (eigene Darstellung) .....	24
Abbildung 5: Automatischer Verknüpfungspunkt in Pix4D .....	25
Abbildung 6: Größenvergleich und Verortung - U1 und U2 (eigene Darstellung) .....	37
Abbildung 7: Geländestruktur U1 (Export von 3D-Modell aus Metashape).....	39
Abbildung 8: Geländestruktur U2 (Export von 3D-Modell aus Metashape).....	39
Abbildung 9: Fluggitter und Kameras bei U1 (links) und U2 (rechts) - Pix4Dmapper Screenshot .....	40
Abbildung 10: Verortung der vier GCPs in der 2D-Ansicht bei U2 (QGIS-Projekt Screenshot) .....	42
Abbildung 11: Triangulation bei niedriger Punktzahl in U1 (Mesh-Export aus Metashape) .....	58
Abbildung 12: Triangulation bei hoher Punktzahl in U1 (Mesh-Export aus Metashape) ....	58
Abbildung 13: Höhenprofillinie je Untersuchungsgebiet.....	60
Abbildung 14: Vergleich 3D-Modell mit Originalbild bei U1 (Links Ausschnitt aus Originalbild, Rechts 3D-Modell Export aus Metashape Standardprojekt).....	62
Abbildung 15: Anteil der 3D-Punkte von 2D-Keypoint Matches in Agisoft Metashape .....	64
Abbildung 16: Anteil der 3D-Punkte von 2D-Keypoint Matches in Pix4Dmapper .....	65
Abbildung 17: Anzahl der 3D-Punkte in dichter Punktwolke .....	66
Abbildung 18: Durchschnittliche 3D-Punktdichte pro m <sup>3</sup> je Gebiet und Software .....	67
Abbildung 19: Punktwolke von U2S aus VisualSFM in CloudCompare .....	68
Abbildung 20: Punktwolkenvergleich (U1S und U1O, Pix4Dmapper) .....	69
Abbildung 21: Flächen des 3D-Modells.....	70
Abbildung 22: Stützpunkte des 3D-Modells.....	71
Abbildung 23: Punktwolke und 3D-Modell von U2S aus VisualSFM in CloudCompare.....	72
Abbildung 24: Solaranlagen und entfernte bewegte Objekte in 3D-Modell bei U2 (Oben Ausschnitt aus Originalbild mit Autos, unten 3D-Modell Export aus Metashape ohne Autos) .....	73
Abbildung 25: Entfernte bewegte Objekte in 3D-Modell bei U2 (Oben Ausschnitt aus Originalbild mit Objekten, unten 3D-Modell Export aus Agisoft Metashape ohne Objekte)..	73

Abbildung 26: Flächengröße des Orthomosaiks aus r.report in QGIS (km <sup>2</sup> ) .....	74
Abbildung 27: Höhenprofil von DSM bei U1S (blau = Agisoft Metashape, rot = Pix4Dmapper, grün = WebODM) .....	77
Abbildung 28: Höhenprofil von DSM bei U2S (blau = Agisoft Metashape, rot = Pix4Dmapper, grün = WebODM) .....	78
Abbildung 29: Höhenprofil von DSM aus U1 bei Agisoft Metashape ( rot = optimale Konfiguration, schwarz = Standardkonfiguration).....	78
Abbildung 30: Höhenprofil von DSM aus U1 bei Pix4Dmapper (rot = optimale Konfiguration, schwarz = Standardkonfiguration).....	79
Abbildung 31: GCP-Lage und Fehlerschätzung bei Agisoft Metashape (U2O) .....	81
Abbildung 32: GCP-Textdatei mit Bildverweis für WebODM .....	81
Abbildung 33: Setzen der GCPs in 2D-Ansicht von U2 bei VisualSFM.....	82
Abbildung 34: Höhenprofil von DSM aus U2 bei Agisoft Metashape (rot = optimale Konfiguration, schwarz = Standardkonfiguration).....	82
Abbildung 35: Höhenprofil von DSM aus U2 bei Pix4Dmapper (rot = optimale Konfiguration, schwarz = Standardkonfiguration).....	83
Abbildung 36: DSM aus Pix4Dmapper von U2S und U2O (rot = Optimale Konfiguration, Schwarz = Standardkonfiguration).....	83
Abbildung 37: Höhenprofil von DSM aus U2 bei WebODM (rot = optimale Konfiguration, schwarz = Standardkonfiguration) .....	84
Abbildung 38: Zeitaufwand für Prozessierung in Stunden je Software und UG.....	85
Abbildung 39: Zeitaufwand der Prozessierung für U1S .....	86
Abbildung 40: Zeitaufwand der Prozessierung für U1O .....	86
Abbildung 41: Zeitaufwand der Prozessierung für U2S .....	87
Abbildung 42: Zeitaufwand der Prozessierung für U2O .....	88
Abbildung 43: Optimierte Befliegungsdaten nach Geländeform in der Flugplanung (eigene Darstellung).....	108
Abbildung 44: 3D-Modelldruck mit weißem Filament (eigene Darstellung) .....	116
Abbildung 45: Texturiertes Modell (Eigene Darstellung) .....	116
Abbildung 46: WebGIS Demoaufbau mit Open Source Software .....	117

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Befliegungsdaten von U1 und U2.....	41
Tabelle 2: Hardwareausstattung .....	43
Tabelle 3: Software-Funktionsmatrix.....	46
Tabelle 4: Softwareversion .....	46
Tabelle 5: Anzahl kalibrierter Bilder pro Untersuchungsgebiet und Software.....	63
Tabelle 6: Anzahl und Verteilung der GCPs pro Projekt von U2.....	79
Tabelle 7: Ergebnismatrix zu Qualitätsanforderungen.....	92
Tabelle 8: Alternative Photogrammetriesoftware .....	115
Tabelle 9: Ausstattung der UAV - DJI Phantom 3 Advanced .....	129
Tabelle 10: Ausstattung der UAV - DJI Phantom 4 Pro .....	129
Tabelle 11: Unterstützte In- und Exportformate Agisoft Metashape .....	130
Tabelle 12: Unterstützte In- und Exportformate Pix4D Mapper .....	131
Tabelle 13: Unterstützte In- und Exportprodukte WebODM .....	132
Tabelle 14: Unterstützte In- und Exportformate VisualSFM .....	132
Tabelle 15: Konfiguration in Agisoft Metashape - U1.....	133
Tabelle 16: Konfiguration mit Skript in Agisoft Metashape – U1.....	134
Tabelle 17: Konfiguration in Agisoft Metashape – U2 .....	134
Tabelle 18: Konfiguration mit Skript in Agisoft Metashape - U2 .....	136
Tabelle 19: Konfiguration in Pix4Dmapper - U1.....	136
Tabelle 20: Konfiguration in Pix4Dmapper - U2.....	137
Tabelle 21: Konfiguration in WebODM - U1 und U2 .....	138
Tabelle 22: Konfiguration in VisualSFM - U1 und U2.....	140
Tabelle 23: Konfiguration in MeshLab - U1 und U2.....	142
Tabelle 24: Zeitaufwand je Prozessschritt und Software (in Sekunden).....	142

## Abkürzungsverzeichnis

AR.....	Argumented Reality
BBA.....	Bundle Block Adjustment
DSM.....	Digital Surface Model
Exif.....	Exchangeable Image File Format
GCPs.....	Ground Control Points
GNSS.....	Global Navigation Satellite System
GPS.....	Global Positioning System
GSD.....	Ground Sampling Distance
IMU.....	Inertial Measurement Unit
ISO.....	International Organization for Standardization
LuftVG.....	Luftverkehrsgesetz
ODM.....	OpenDroneMap
OSS.....	Open Source Software
PC.....	Personal Computer
RMSE.....	Root Mean Square Error
RTK-GPS.....	Real Time Kinematic GPS
SaaS.....	Service-as-a-Software-Substitute
SBAS.....	Space Based Augmentation Systems
SfM.....	Structure from Motion
SIFT.....	Scale-Invariant Feature Transform
UAS.....	Unmanned Aerial System
UAV.....	Unmanned Aerial Vehicle
VR.....	Virtual Reality

## 1. Einleitung

### 1.1. Konzeption

Zunächst wird auf die eigentliche Problemstellung und Motivation eingegangen (siehe Kapitel 1.2). Kapitel 1.3 beschreibt die operativen Teilschritte zur Herleitung der Forschungsfrage und die Leitziele der vorgestellten Arbeit. In Kapitel 1.4 wird der bisherige Stand der Forschung für die Themen Datenerhebung und -verarbeitung in dem betrachteten Untersuchungsgebiet aufgeführt.

Das zweite Kapitel umfasst die Methodik für die eigentliche Durchführung der Prozessierung in den vier Anwendungen (siehe Kapitel 1.4.2.3). In Kapitel 2.1 wird zunächst auf die Datenerhebung über die Befliegung und die dazugehörige Missionsplanung eingegangen. Die Datenverarbeitung über die Photogrammetrie und die zugehörige Software und Hardware wird in Kapitel 2.2 und 2.2.1 erläutert. Danach wird die methodische Auswertung über einen Kriterienkatalog und Exportvergleich vorgestellt (siehe Kapitel 2.7).

Im dritten Kapitel erfolgt die Evaluierung der Ergebnisse, die mit den vorgestellten Methoden generiert wurden (siehe Kapitel 3). Darauf folgen die Kapitel mit der Diskussion der Arbeit und dem Ausblick für weitere mögliche Forschungen (Siehe Kapitel 4 und 5).

Alle im Text vermerkten Quellenangaben befinden sich in dem Literaturverzeichnis (siehe Kapitel 6). Der Anhang enthält die im Text vermerkten Tabellen (siehe Kapitel 7). Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die Verwendung geschlechtsspezifischer Sprachformen verzichtet. Die Verwendung der männlichen Form beinhaltet keinerlei Wertung.

### 1.2. Motivation

Viele Prozesse im modernen Geoinformationswesen basieren noch auf traditionellen Vermessungstechniken oder ineffizienten Methoden der digitalen Datenerhebung und sind beispielsweise auf kostspielige Satellitenbilder angewiesen. Mittlerweile wurde hinreichend belegt, dass digitale Prozesse mehrere Vorteile im Vergleich zu den traditionellen Ansätzen besitzen (Carrivick/Smith/J. Quincey 2016, S. 9–10). Da die geometrische Auflösung und Aktualität bestehender digitaler Ergebnisse jedoch nicht immer für den Anwendungsfall ausreichend sind und der Zeit- und Kostenaufwand stets optimiert werden muss, wird kontinuierlich nach kostengünstigen und effizienteren Alternativen zur Inwertsetzung von satellitengestützten Bilddaten gesucht.

Eine der Alternativen ist die Nutzung von Drohnen, die korrelierend mit dem Preis und den nötigen Anforderungen an den Piloten dank hochqualitativer Sensoren und Kameras, sowie langer Akkulaufzeit die Aufnahme eigener Daten ermöglichen. Der Kauf von Drohnen ist für Privatpersonen preislich gesehen tragbar und die damit einhergehende Bildgenerierung ohne viel Vorwissen möglich. Eine professionelle Bildauswertung und Weiterverarbeitung hingegen benötigt KnowHow und teilweise kostenintensive Software- und Hardwareausstattung angeeignet werden. Vor allem die Sensoren für die Bildaufnahme und Verortung, sowie die Ausstattung des Rechners sind limitierende Faktoren. Da für die Analyse drohnengenerierter Bilder spezielle Bildanalysetools benötigt werden, muss bei der Anschaffung dieser Systeme auch die Rechnerleistung entsprechend dimensioniert sein.

Im Rahmen der Masterarbeit soll eine möglichst automatisierte, offene Lösung der Bilddatenprozessierung und Analyse erarbeitet werden. Idealerweise ist diese kostengünstiger und effizienter im Vergleich zu den derzeitig verwendeten Methoden. Leittheorie der vorliegenden Arbeit ist, dass jeder aus Rohdatensätzen mit Hilfe von Open Source Software für seinen Anwendungsfall adäquate Ergebnisse generieren kann. Hauptmotivation meiner Arbeit ist es folglich auch, Institutionen und Privatpersonen zu ermutigen, Drohnen für die unabhängige eigenständige Kartierung, Analyse und Überwachung von Prozessen zu nutzen.

### 1.3. Forschungsfrage

#### 1.3.1. Operative Teilschritte

Im Rahmen der Arbeit soll ein systematischer Plattformvergleich von Open Source und proprietärer Software durchgeführt werden. Die vorgestellten Methoden sollen der Evaluierung der geeignetsten Softwareplattform für die Prozessierung von UAV-Bildaufnahmen dienen.

Nach der eigenständigen Erhebung (Siehe Kapitel 2.1) werden die Bilder in den ausgewählten Plattformen weiterverarbeitet und nachbereitet (Siehe Kapitel 2.2 und 2.2.1). Für die Machbarkeitsanalyse in verschiedenen Anwendungsbereichen ist die Veränderung der Begebenheiten, die durch variierendes Gelände oder Unterschiede in den generierten Bilddaten entstehen können, zu berücksichtigen. Bestehende Unterschiede und ihren Einfluss auf die Datenauswertung wurden daher elaboriert. Über die photogrammetrische Datenauswertung von den Einzelbildern zu einem orthorektifiziertem Luftbild und zu einem digitalen Geländemodell soll eine kostengünstige, möglichst automatisierte und einfache Datenverarbeitung evaluiert werden. Infolgedessen werden die Ergebnisse der vier vorgestellten Anwendungen Agisoft Metashape, Pix4Dmapper, WebODM und VisualSFM miteinander verglichen. Es erfolgt keine

bevorzugte Wertung von Open Source Software (OSS). Zudem werden keine Hardware oder weitere Verarbeitungsschritte außerhalb der vier Anwendungen näher untersucht, als es für die Analyse nötig ist, da es den Rahmen der Arbeit sprengen würde. Im Laufe der Verarbeitung werden diverse Algorithmen und Techniken der Photogrammetrie genutzt – die Analyse von anderen Fernerkundungsmethoden oder weiteren Exportformaten wird nicht näher untersucht. Lediglich die Komplexität der Verarbeitung und der Einfluss von den Algorithmen auf das Ergebnis werden evaluiert.

Die Auswertung der Verarbeitungsergebnisse erfolgt nach den Testreihen gegliedert, im Rahmen einer qualitativen Bewertung der ausgewählten Anwendungen und der jeweiligen Untersuchungsgebiete (Siehe Kapitel 2.7). Durch die Auswertung dieser Testreihen soll beantwortet werden, welche Ausstattung empfehlenswert ist (Siehe Kapitel 4.2).

### 1.3.2. Leitziele

Leitziel dieser Arbeit ist es, die Unterschiede, die zwischen den Anwendungen bestehen, und diejenigen, die durch variierendes Gelände der Untersuchungsdaten verursacht werden, herauszuarbeiten und darzustellen.

Die Arbeit eruiert, welche Software für die aufgeführten Anforderungsbereiche aus den genannten Parametern der Kosten, Effizienz und Einfachheit am besten geeignet ist. Als Ausstattung werden hier die Hardware und Software, KnowHow und die nötigen Techniken und Methoden gesehen.

Dabei entstehende Teilfragen und Ziele zur Beantwortung dieser Fragestellung werden nun einzeln aufgeführt und erörtert.

#### **1) Welche Software eignet sich für die Prozessierung von UAV-Bildaufnahmen?**

Null Hypothese: Bei den gegebenen Rahmenbedingungen amortisiert sich die Investition in proprietäre Software, um qualitativ hochwertige Resultate zu erzielen im Vergleich zu Open Source Software nicht. OSS stellt sich als Optimum in puncto Kosten und Zeit heraus und erlaubt einen langfristigen stabilen Einsatz. Sie ist demnach aufgrund einer transparenten und effizienten Prozessierung von UAV-Bildaufnahmen empfehlenswert. Die technischen Hintergründe, wie verwendete Algorithmen und Verarbeitungsschritte in den Open Source Anwendungen, erzeugen mit möglichst geringem manuellem Anpassungsaufwand hochqualitative Ergebnisse. Der gemeinsame Einsatz von OSS und einer Micro-UAV bilden eine gute Plattform.

Die Arbeit erhebt nicht den Anspruch, den gesamten Arbeitsprozess der photogrammetrischen Verarbeitung und Inwertsetzung zu realisieren und zu bewerten. Diese Arbeit soll als Ansatz einer transparenten und vergleichbaren Umsetzung der Drohnenbildverarbeitung dienen und wertvolle Resultate in Hinblick auf den Vergleich zwischen Open Source zu nicht Open Source Software aufführen.

## **2) Welche Ausstattungen im Bereich Wissen, Hard- und Software sind minimal nötig?**

Hypothese: Im Bereich Hardware sind Micro-UAVs für die Datenerfassung nutzbar und erzeugen für den Anwendungsfall ausreichend qualitative Bilddaten. Die Rechnerausstattung einer Privatperson in Form eines handelsüblichen PCs erlaubt die Verarbeitung dieser Bilder. Im Bereich Software sind die Open Source Anwendungen kostengünstig und entsprechen sowohl den funktionalen als auch nicht funktionalen Anforderungen des Nutzers. Eine allgemein anwendbare Methode mit OSS wäre für alle beteiligten Disziplinen relevant, da die technischen Lösungswege und die erarbeiteten Methoden so transparent vorlägen und übertragbar wären. Dies hätte zur Folge, dass viele Prozesse der Datenverarbeitung interdisziplinär effizienter und letztendlich kostengünstiger gestaltet werden können. Die photogrammetrischen Techniken und das damit einhergehende KnowHow können, soweit für die Prozessierung nötig, auch von Laien erworben werden.

## **3) Wie weit beeinflusst die Datenqualität (Form, Größe, Aufnahmeart) die Fähigkeit der UAV-Prozessierung?**

Null Hypothese: Die Datenqualität beeinflusst, unabhängig von der gewählten Plattform, nicht die Fähigkeit der UAV-Prozessierung. Ungehindert von der Größe des Untersuchungsgebiets, der Beschaffenheit der dargestellten Objekte und Oberflächen und der Aufnahmeart der Daten kann die Verarbeitung erfolgen. Die Menge und Qualität der Rohdaten sind nicht entscheidend für die Berechnungen.

### 1.4. Stand der Forschung

#### 1.4.1. Datenerhebung

##### 1.4.1.1. UAVs

Das Unmanned Aerial System (UAS) ist das Gesamtsystem aus Flugplattform (UAV), Steuereinheit und Sensorsystem inklusive Datennachbereitung über eine photogrammetrische Bild- und Videobearbeitungssoftware. Das Unmanned Aerial Vehicle (UAV) ist im Rahmen

des UAS das unbemannte autonom fliegende Luftfahrzeug – umgangssprachlich: die Drohne (Dalamagkidis 2015, S. 43–55). Die Basisausstattung eines UAV-Systems ist eine Kamera für die Bildaufnahme und das GPS für die Verortung der Bilder. Das globale Navigationssatellitensystem (GNSS) bestehend aus dem Navigationssysteme GPS (USA), GLONASS (Russland), Compass (China) und Galileo (Europa) ermöglicht die Verortung der Drohne im Erdraum. Das Global Positioning System (GPS) ist das bekanntestes Satellitennavigationssystem (GPS.gov 2017).

Für den Einsatz von UAVs gibt es eine Vielzahl weiterer Einflussfaktoren zu berücksichtigen, wichtigster Faktor innerhalb des Fluggeräts sind die Sensoren. In der Inertial Measurement Unit (IMU) sind für die Messung der Winkel-, Rotations- und Beschleunigungsgeschwindigkeit das Gyroskop und der Beschleunigungssensor verbaut. Durch die stetigen Verbesserungen in der Verfügbarkeit und Genauigkeit von GNSS und IMU, zusammen mit der fortschrittlichen Qualität von Digitalkameras und anderen miniaturisierten Sensoren steigt der Einsatz von UAVs im zivilen Bereich (Turner/Lucieer/Watson 2012a, S. 1393). UAVs zur Fernerkundung wurden bislang weniger von Privatpersonen, sondern eher von Militär, öffentlichen Institutionen oder Industrie eingesetzt (European Aviation Safety Agency 2018, S. 5). Um Gefahrensituationen zu vermeiden ist je nach Größe ein Drohnenführerschein nötig - der steigende Einsatz von Flugplattformen durch Privatpersonen im öffentlichen Luftraum und der Missbrauch in Verbotszonen könnten diese Bestimmungen in Zukunft weiter einschränken (BMVI 2017a).

Ab dem Jahr 2012 wurden UAS als eigenständige Kategorie eines Luftfahrzeuges in das Luftverkehrsgesetz (LuftVG) unter §1 eingetragen (Bundesamt für Justiz 2019). Der Betrieb von UAV für die gewerbliche Nutzung ist demnach in Deutschland nur mit Einschränkungen möglich, beim Einsatz müssen die Richtlinien und Flugverbotszonen der Drohnenverordnung eingehalten werden - pro EU-Land gelten derzeit jeweils unterschiedliche Vorschriften (BMVI 2017a). Bei der Nutzung von Kameras an dem UAV sollte man neben diesen auch auf das Datenschutzrecht, die EU Datenschutzgrundverordnung (DS-GVO), Bundesdatenschutzgesetz §4 und Kunsturhebergesetz §§ 22 und 23 beachten (BMVI 2017b).

Diverse Arbeiten, wie die von Tonkin et al (2014), belegen, dass digitale Prozesse den analogen Ansätzen in vielen Bereichen überlegen sind (Tonkin et al. 2014, S. 42). Wie bereits von Feldmann und Marco (2015) beschrieben, sind Drohnenbefliegungen nicht mehr im Innovationsstadium, sondern schon in mehreren Anwendungsfeldern im Einsatz und ersetzen die bisherigen digitalen Ansätze, wie zum Beispiel Helikopter- oder Satellitenaufnahmen

(Feldmann, Marco 2015). Dank des Flugs in niedrigerer Höhe kann eine Bodenerfassung mit genauerer Auflösung erfolgen, als es bei Satelliten oder bemannten Flugzeugen der Fall ist (Harwin/Lucieer 2012a, S. 1574). Die Aufnahme von kleinen Gebieten und dies in mehreren Zeitreihen ist flexibel und mit wenigen Einschränkungen möglich (Harwin/Lucieer 2012b, S. 1575; Turner/Lucieer/Watson 2012b, S. 1393; Woodget 2015, S. 28). Der Markt für erwerbbarer Trägerplattformen wird von Jahr zu Jahr diverser und Sensoren können nach Bedarf modular ausgetauscht werden, um die Geo- und Bilddatenerfassung je nach Anwendungsfall zu ermöglichen (Grenzdörffer 2013).

Die Verwendung von UAS als Fernerkundungswerkzeug bietet somit eine Vielzahl an Anwendungsfällen. Da die Methoden skalierbar sind, können UAV-Bilddaten in jedem Themengebiet in Wert gesetzt werden. Einige Beispiele sind:

- Aufnahme der zeitlichen Veränderung von natürlichen und anthropogenen Phänomenen, wie Küstenbewegungen oder Grundstücksbebauungen
- Aktuelle Volumenberechnung im Steinbruch
- Semi-automatische Erfassung und Klassifizierung von Gebieten, wie Friedhofsanlagen oder Campingplätzen und die Bestandsaufnahme von Bäumen
- Modellierung von 3D-Ansichten für den allgemeinen Gebrauch und das Geomarketing, zum Beispiel für die Präsentation von Sehenswürdigkeiten im Stadtplan oder der Erfassung von Kanalabschnitten im Kataster

Weitere Anwendungsfelder, wie zum Beispiel der Einsatz von UAVs für die Inventur (Laun 2017) oder in der Automobilbranche (Nusser 2017) wurden in der Vergangenheit bereits erfolgreich umgesetzt. Sehr gute methodische Erkenntnisse zur kostengünstigen Befliegung, Datenerfassung und Analyse über Drohnen in der Praxis bieten die Beiträge von Unger et al und Lehmann et al aus den letzten Jahren (Lehmann et al. 2017, S. 3–8; Unger/Knopf/Monetti 2017).

Kühen (2014) evaluiert in seiner Arbeit bereits den Workflow für die automatisierte Bereitstellung der Aufnahmen als Webdienst, bei diesen wurde auf die Nutzung von OSS verzichtet (Kühen 2014). Dieser Ansatz wird von Remondino und Kersten (2012) aufgegriffen, die Analysemöglichkeiten von Open Source und kommerziellen Softwareprodukten miteinander vergleichen (Remondino/Kersten 2012). Einen Vergleich von zwei Micro-UAVs und der 3D-Modell Generierung aus den erhobenen Luftbildern bietet die Arbeit von Honkavaara et al (Honkavaara et al. 2012). Vielversprechende Ergebnisse wurden ebenfalls bei der Verarbeitung hochauflösender Daten durch die proprietäre Software Agisoft

PhotoScan erzielt (Mancini et al. 2013). Bereits Chu et al haben im Jahr 2016 untersucht, inwieweit die durch UAVs erzeugten Daten und Ihre Verarbeitungsergebnisse eine Verbindung und Verortung in der realen Welt zulassen und Prozesse der Geodäsie optimieren können (Chu et al. 2016). Einer dieser Optimierungsmaßnahmen ist die Vermeidung menschlicher Fehler bei der Aufnahme von Daten (Chao/Cao/Chen 2010, S. 40–42).

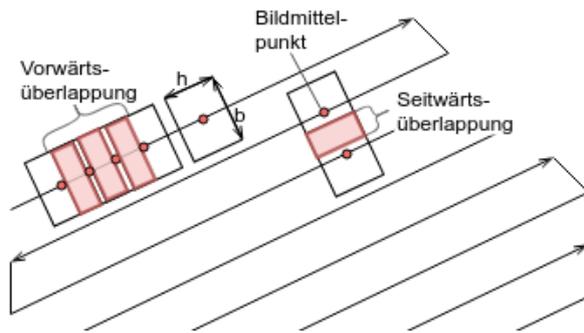
Laut Grenzdörffer und Engel bestand schon vor zehn Jahren verfügbare Software, die einen nahezu vollautomatischen Workflow ermöglichen konnte - durch den hohen Nachbearbeitungsaufwand der Verarbeitungsergebnisse und die geringe Ausrichtung der Technik auf die Geoinformatik, besaßen diese Möglichkeiten zu diesem Zeitpunkt jedoch weniger Relevanz (Grenzdörffer/Engel 2008). Erst in den letzten Jahren wurde die Fragestellung, wie UAV-Bildaufnahmen die Entscheidungen in diversen Bereichen unterstützen können, relevanter und in der Literatur zunehmend diskutiert (Sanz-Ablanedo et al. 2018; Unger/Knopf/Monetti 2017; Nusser 2017; Laun 2017; Grenzdörffer/Schröder 2017; Graham 2016; Chu et al. 2016).

#### 1.4.1.2. Missionsplanung und Befliegung

Die UAV-Befliegung eines Gebiets erfordert eine Missionsplanung. Meist dienen die nach den Richtlinien der internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) gestalteten Luftfahrtkarten als Orientierungsbasis. Sie enthalten alle wichtigen Flugsicherungsangaben und Sichtflugregeln (International Federation of Air Traffic Controllers' Association, 2017).

Bei der Flugplanung sollte man die Tages- und Jahreszeit beachten, da hier nur ein begrenztes Befliegungsfenster für optimale Bilder vorliegt. Die Höhe der einzelnen Bilder setzt sich zusammen aus der vordefinierten Flughöhe von dem Startpunkt aus und dem Abstand zum Boden ausgehend von diesem Höhenlevel während der Befliegung (Draeyer/Strecha 2014).

Für die Erstellung von hochauflösenden und genauen Modellen dienen georeferenzierte Bilder mit hoher Überlappung. Die folgende Abbildung zeigt, dass sowohl zu den Seiten als auch nach vorne und nach hinten hin ein bestimmter Überschneidungswert vorhanden sein muss, um die jeweiligen Oberflächen auf möglichst vielen Bildern in möglichst vielen Positionen abzubilden (Siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1: Bildüberlappung bei Linienflug (eigene Darstellung)**

Laut einer Studie von Sanz-Ablanedo et al ist eine höhere Überlappung nicht zwangsläufig besser für die Befliegung - relevant ist das Verhältnis von Flughöhe zum Boden und, dass die Breite der Bildstreifen und der Überschneidung zueinander passen (Sanz-Ablanedo et al. 2018). Eine Überlappung von 60 % bis 80 % sind gängiger Empfehlungswert für die Befliegung. Die Empfehlung bei Pix4D sind bei einer konstant gehaltenen Höhe mindestens 75% frontal und 60% zu beiden Seiten an Überlappung zu nutzen (Agisoft LLC 2019a; Grenzdörffer/Schröder 2017; Pix4D 2019a). Bei einer älteren Genauigkeitsstudie mit PIX4D wurde eine Bildüberlappung von 95% für die Befliegung eingestellt (Draeyer/Strecha 2014, S. 5).

Der Bodenabtabstand, im Englischen die Ground Sampling Distance (GSD) ist der Abstand zwischen dem Mittelpunkt zweier aufeinanderfolgender Pixel auf der Oberfläche und verdeutlicht somit die Genauigkeit, Detailgrad und Qualität der Endergebnisse. Durch unterschiedliche Höhen im Gelände und Kamerawinkel kann die GSD pro Bild stark variieren - die Angaben in dem jeweiligen Qualitätsbericht sind durchschnittliche Werte (Pix4D 2019b).

Die Genauigkeit und Qualität der Georeferenzierung wird zudem über den Root Mean Square Error (RMSE) gemessen. Er beschreibt die Distanz zwischen den eingegebenen Koordinaten in den Einzelbildern und den Passpunkt-Koordinaten beziehungsweise Ground Control Points (GCPs). Daher ist er ein beliebter Qualitätsfaktor für die Prozessierung, da er aussagt, wie weit die Schätzung durchschnittlich von der tatsächlichen Messung abweicht (Morad/Chalmers/O'Regan 1996). Der RMSE liegt üblicherweise bei dem 0,5 bis 2-fachen der GSD und sollte unter der GSD liegen (Grenzdörffer 2013).

GCPs dienen der verbesserten Genauigkeit und Verweis in einem Koordinatensystem (Draeyer/Strecha 2014). Die GCPs verbessern nicht nur die Genauigkeit innerhalb des jeweiligen Projekts, sondern auch die relative Genauigkeit zur Umgebung, daher sind sie vor allem bei Luftbildern wichtig (Harwin/Lucieer 2012a). Die Verteilung von 5 bis 10 GCPs sind für große Gebiete eine geeignete Anzahl, mehr bringen keine signifikante Besserung, außer es

liegen Geländeextrema vor (Strecha 2012). Die erfassten Punkte können neben der GCP-Funktion, auch als Kontroll- oder Referenzpunkte für den Verzerrungsgrad und die Genauigkeit an den verschiedenen Stellen dienen. Wenn eine höhere Genauigkeit der Messungen gewünscht ist, kann über Real Time Kinematic GPS (RTK-GPS), die GCPs und differentielles GPS (DGPS) eine Genauigkeit im Zentimeterbereich erzeugt werden (European GSA 2016; Pix4D 2017). Die absolute Genauigkeit erhöht sich abhängig von der Qualität von RTK-GPS, der gemessenen GCPs, ihrer Anzahl und ihrer Verteilung (Strecha 2012). Die Genauigkeit der erzeugten Modelle kann nicht auf alle Bereiche übertragen werden, daher sollten erfasste Messpunkte statt als GCPs auch als unabhängige Kontrollpunkte genutzt werden (Sanz-Ablanedo et al. 2018; Eisenbeiss/Stempfhuber/Kolb 2009a, S. 412–414).

#### 1.4.2. Datenverarbeitung

##### 1.4.2.1. Photogrammetrie

Die Photogrammetrie besteht aus mehreren passiven Messmethoden der Fernerkundung für die Auswertung der Lage und dreidimensionale Form eines Objekts im Raum über berührungslose Rekonstruktionsmechanismen (Kraus 2004a). Die Untergruppe Aerophotogrammetrie umfasst hierbei die Luftbildmessung für topographische Karten und Katastervermessungen über Messkameras auf Fluggeräten, wobei meist Mehrbildmessungen für die spätere Verknüpfung durchgeführt werden (Lehmann 2019, S. 78). Die Messmethoden ermöglichen die Bildausrichtung für Panoramaansichten, Objekterkennung, 3D-Rekonstruktion, Bewegungserfassung im Zeitverlauf, Indizierung und inhaltsbasierter Abruf und die autonome Navigation (Förstner/Wrobel 2016). Der dahinterstehende methodische Arbeitsablauf wurde in der folgenden eigenen Abbildung schematisch visualisiert, die genutzten Algorithmen und Ergebnisse variieren je nach Software (Siehe Abbildung 2).

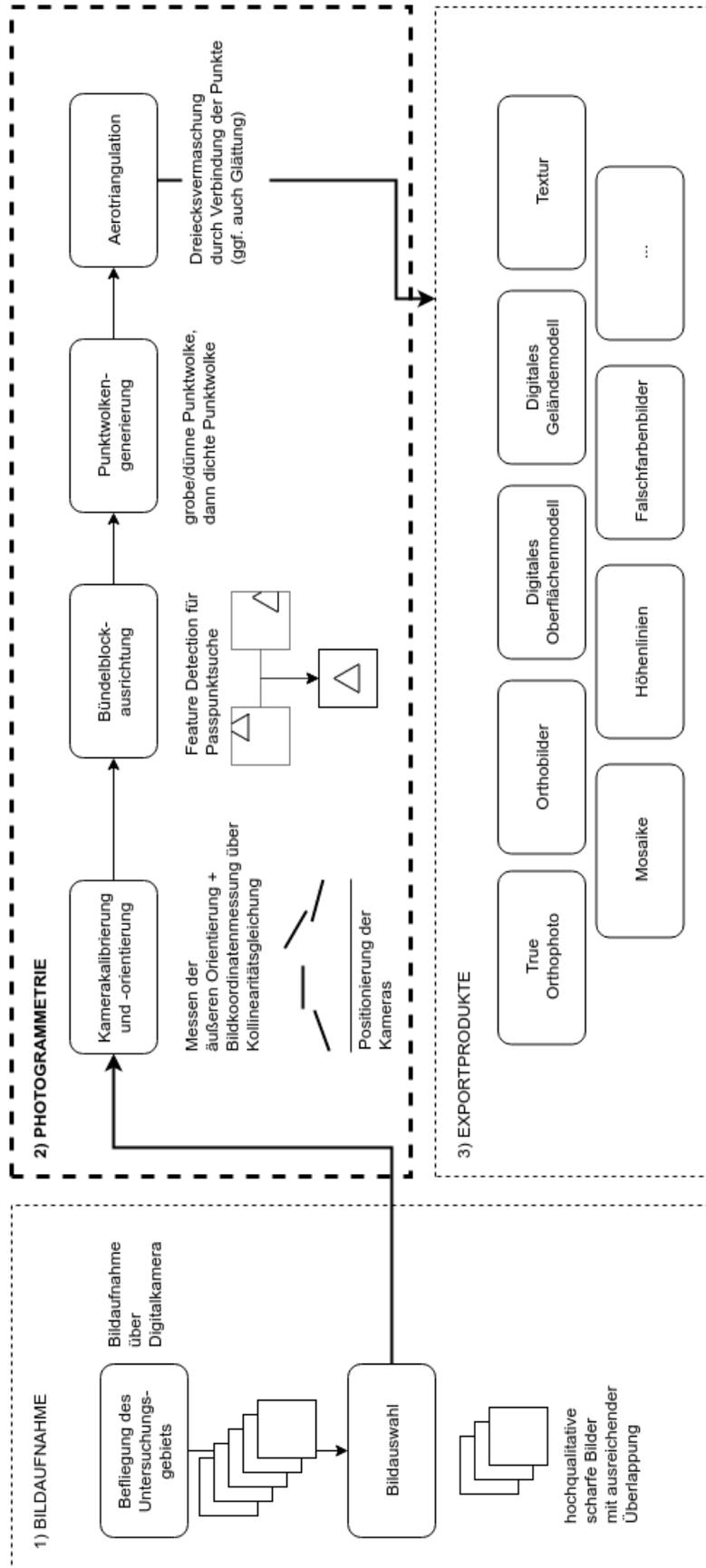
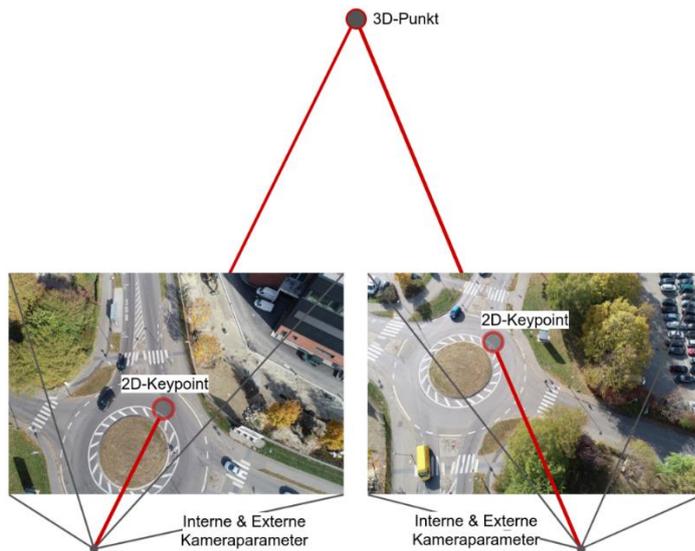


Abbildung 2: Prozesskette der Photogrammetrie (eigene Darstellung)

Jede der im Verlauf der Arbeit getesteten Anwendungen nutzt Methoden der Photogrammetrie für die Verarbeitung der Bilddaten (Schritt 2) aus der Bildaufnahme (Schritt 1). Ergebnis der Berechnungen sind verschiedene Exportprodukte (Schritt 3), wie zum Beispiel das digitale Geländemodell und Höhenlinien, die für weitere Analysen integriert werden können. Der zweite Schritt, die eigentliche Verarbeitung setzt sich zusammen aus der Kamerakalibrierung und -orientierung, Bündelblockausrichtung, Punktwolkengenerierung und Dreiecksvermaschung. Diese einzelnen Schritte werden im Folgenden näher erläutert.

Die ersten Ansätze für die photogrammetrische Analyse lieferten Daguerre und Niepce bereits im Jahr 1839 (Daniel 2004). Bereits 1987 untersuchte A. Grün im Rahmen der Photogrammetric Week in seinem Paper die derzeit herrschenden Beschränkungen und Möglichkeiten - Limitationen waren vor allem die Bilderfassung, Auflösung und Schnelligkeit (Gruen 1987). Die automatische Orientierung terrestrischer Bilder ohne GCP-Zielmarken, zum Beispiel einer Platte mit Schachbrettmuster, erfolgte bereits ab den 1990er Jahre über den Structure from Motion (SfM) Ansatz (Beardsley/Zisserman/Murray 1997, S. 235; Fitzgibbon/Cross/Zisserman 1998). Der SfM-Ansatz in den Anwendungen ermöglicht die Erzeugung von komplexen Modellen aus zweidimensionalen Bildern heraus, die wie der Name schon andeutet, in Bewegung und aus verschiedenen Winkeln gemacht wurden (Green/Bevan/Shapland 2014; Schwind 2016). SfM wird meist für die Visualisierung oder objektbasierte Navigation, also weniger für Kartierungsaufgaben genutzt, da die Zuverlässigkeit und Wiederholbarkeit bei komplexen und langen Bildsequenzen problematisch ist (Grenzdörffer 2013). Der Algorithmus für die automatische Bildorientierung unterliegt jedoch stetigen Verbesserungen (Remondino/Kersten 2012).

Die äußere Orientierung beschreibt den Standort und die Blickrichtung im Raum. Dies ermöglicht die räumlich eindeutige Rekonstruktion der Bildlage. Die innere Orientierung beschreibt die abbildungsrelevanten Parameter, zum Beispiel die Brennweite des Objektivs und der Bildhauptpunkt (Lehmann 2019, S. 112–128). Ist der Bildhauptpunkt bekannt, kann die Transformation eines gemessenen 3D-Koordinatenpunktes in das Bildkoordinatensystem erfolgen (Kraus 2004a, S. 195). Somit kann aus möglichst vielen genauen zweidimensionalen Passpunkten im Bild ein dreidimensionaler 3D-Punkt in dem späteren Modell erzeugt werden (Siehe Abbildung 3).

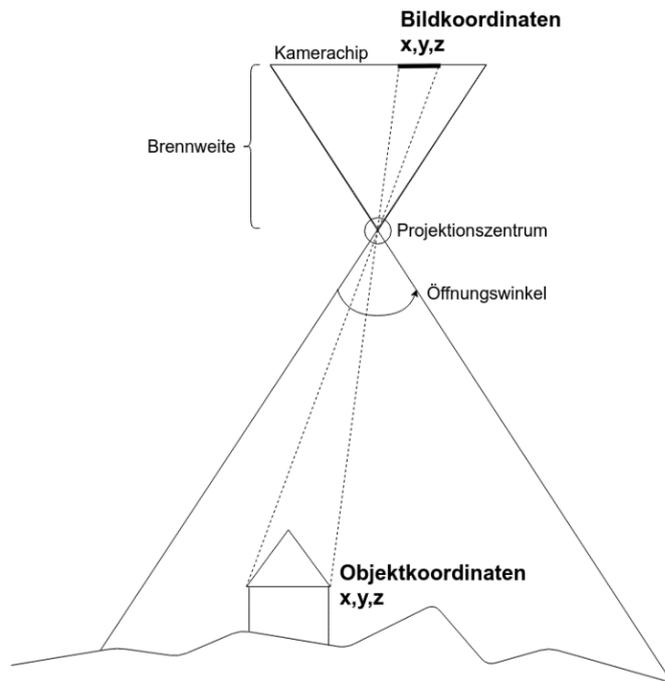


**Abbildung 3: Passpunktgleichung zwischen Bildpunkten (eigene Darstellung)**

Die Kameraparameter der äußeren Orientierung werden meist direkt über die IMU-Angaben übertragen und während der Kameraorientierung gegengeprüft. Vor allem relevant für die Bildorientierung über die Kollinearitätsgleichung sind die inneren Orientierungsdaten, wie Projektionszentrum und Rotationswinkeln (Kraus 2004b, S. 276–284). Die Drehung des geodätischen Koordinatensystems erfolgt über die Angabe der Bildkoordinaten ( $X, Y, Z$ ). Die Ausrichtung an der Bildkoordinate - die Kameraorientierung - erfolgt über die drei Winkel Omega, Phi und Kappa ( $\omega, \phi, \kappa$ ) (Pix4D 2011a). Die Georeferenzierung in der Software erfolgt über die Informationen aus der IMU beziehungsweise aus den GPS-Daten und Zeitstempel, die pro JPEG-Bild als Informationen im Exchangeable Image File Format (Exif) vorliegen. Dieses Standardformat für die Weitergabe von Metadaten in digitalen Bildern enthält Angaben zu Datum, Uhrzeit, Orientierung, Brennweite, Belichtungszeit, Blendenzahl, Geographische Koordinaten, Höhe und weiteren Informationen (Liu et al. 2010).

Bekannt ist, dass die Qualität in der Photogrammetrie von vielen Faktoren, wie der Nutzungsform, Oberflächentextur und dem Terrain abhängig ist - die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Bildorientierung und Kamerakalibrierung beeinflussen daher erheblich die Qualität der weiteren Prozesse (Remondino/Kersten 2012). Bei der Datenbasis von Micro-UAVs sind Grenzen gesetzt, sodass beispielsweise bewegte Objekte, wie Menschen oder Autos weniger gut erfasst werden können. Bei Reflektionen, einfarbigen Oberflächen, detaillierten Objekten und auch Transparenzen kann es zu Qualitätseinbrüchen bei der Wiedergabe kommen (Lowe 2004).

Sind innere und äußere Orientierung der Bilder bekannt, kann die Bündelblockausgleichung, im Englischen Bundle Block Adjustment (BBA) bzw. die Aerotriangulation erfolgen. Die Bildpunkte in dem jeweiligen Messbild entsprechen dem Strahl durch das Projektionszentrum, also dem Kameraobjektiv und bilden somit Bündel (Kraus 2004a, S. 269). Relevant für die Ausprägung der Bündelstreuung sind die Brennweite und somit verbunden der Öffnungswinkel. In der folgenden Abbildung wird dieses Prinzip der Zentralperspektive bezogen auf eine Kameraaufnahme von einem Haus schematisch visualisiert (Abbildung 4).



**Abbildung 4: Zentralperspektive (eigene Darstellung)**

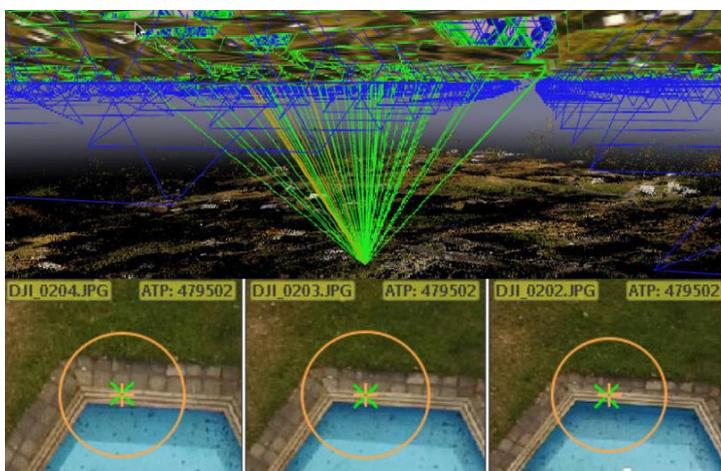
Durch diverse Faktoren kann es bei der Kamerakalibrierung mit zentralperspektivischer Aufnahme zu Abweichungen kommen, die durch Fehlervektoren abgefragt werden können (Pix4D 2011a). Der Reprojektionsfehler beschreibt beispielsweise den Abstand zwischen dem Punkt auf dem jeweiligen Kamerabild und dem reprojiziertem 3D-Punkt und erlaubt die Qualitätsanalyse der Kamera- beziehungsweise Bildverbandorientierung (Pix4D 2011b).

Für die Erstellung eines 3D-Modells werden die korrespondierende Punkte auf überlappenden Bildern über automatische Algorithmen oder manuelle Muster erkannt und trianguliert (Jäger/Müller/Saler 2003). Brown entwickelte das erste Programm für die Ausrichtung der Bündelblöcke (BBA) in den späten Sechzigern und verbesserte somit die Genauigkeit von Triangulationsberechnungen signifikant (Brown 1976, S. 1–3). Über die Merkmalerkennung bei dem SfM-Ansatz, auch Feature Detection genannt, und Verknüpfung dieser Punkte zu

einem Modell, können somit über BBA Bildverbände bei einer genügenden Bildüberlappung orientiert werden (Bäumker/Heimes 2002, S. 5–6).

Für diese Objekterkennung wird jedes Foto analysiert und die besonderen Merkmale, auch Keyfeatures oder Keypoints genannt, werden unabhängig von der Skalierung und Drehung zum Ausrichten der Fotos genutzt. Für die Ausrichtung wird eine Kostenschätzung durchgeführt und die Orientierung mit der höchsten Wahrscheinlichkeit in einer Kostenfunktion übernommen. Die Mustererkennung ist dabei am besten, wenn keinerlei geometrische Transformation, wie zum Beispiel Rotationen, das Aussehen verändert. Zudem sollte keine photometrische Transformation das Aussehen verändern, dies wäre zum Beispiel durch extreme Helligkeitsunterschiede durch Wolken oder Kontrast bei Wasserflächen der Fall (Kraus 2004a).

Das bekannteste Verfahren ist der Scale Invariant Feature Transform (SIFT) Algorithmus von Lowe. Sowohl bei dem Multiscale Oriented PatchS descriptor (MOPS) von Brown, als auch bei dem SIFT Keypoint Detector von Lowe wird die Gauß-Pyramide genutzt (Lowe 2005; Brown/Szeliski/Winder 2015). Eine Alternative dazu ist der Speeded Up Robust Features (SURF) Algorithmus. Dieser basiert auf SIFT, ist aber weniger komplex (Bay et al. 2008, S. 405–407; Lowe 2004, S. 92). Ein quadratisches Pixelfenster um den Punkt herum, auch Feature Descriptor genannt, beschreibt bei dem Algorithmus möglichst genau das Objekt und dient der Kontrolle, ob der Passpunkt wirklich das gleiche Objekt auf mehreren Bildern repräsentiert (VLFeat 2017; Bay et al. 2008). Der folgende Screenshot zeigt einen automatischen Verknüpfungspunkt, der auf 40 Bildern gefunden, jedoch nur in 5 Bildern als eindeutig genug für die Berechnungen markiert wurde (Siehe Abbildung 5). Grün hervorgehoben sind die potentiellen Verknüpfungspunkte, gelb markiert sind die für die weitere Berechnung genutzten eindeutigen Punkte.



**Abbildung 5: Automatischer Verknüpfungspunkt in Pix4D**

Der Bildinhalt liegt dank der Algorithmen als Objektpunktwolke vor, die unveränderlich in Bezug auf Rotation und Maßstab sind (Furukawa/Ponce 2007a, S. 3). Bei einer starken Überlappung werden mehr Punkte zwischen den Bildern gefunden, somit werden auch mehr Tiefeninformationen zum Oberflächenabstand gefunden und es entstehen weniger Ausreißer (Furukawa/Ponce 2007b). Algorithmen, wie RANSAC (RANDOM Sample Consensus) entfernen mögliche Ausreißer in dem Punktwolkenmodell über robuste Schätzungen und werden vor allem bei dem automatisieren Einsatz von Messungen eingesetzt (Remondino/Kersten 2012, S. 67). Sekundäre Produkte wie digitale Geländemodelle, digitale Oberflächenmodelle, Reflektionskarten und orthogestützte Mosaikbilder können aus dieser Punktwolke erstellt werden.

Das digitale Oberflächenmodell (DOM), im Englischen „Digital Surface Model“ (DSM), beschreibt die Erdoberfläche samt allen sich darauf befindenden Objekten, zum Beispiel Häusern oder Bäumen (Rabchevsky 1984). Das digitale Geländemodell (DGM) hingegen beschreibt nur die Erdoberfläche, also das Terrain und vermerkt somit die Höhenstruktur des Bodens, daher wird dieses auch oft auch als digitales Höhenmodell (DHM), digitales Terrainmodell (DTM) oder im Englischen "Digital Elevation Model" (DEM) bezeichnet (Rabchevsky 1984). Die Ableitung des DEM erfolgt durch eine Klassifikation der 3D-Punktwolke und somit durch eine Extraktion der Geländetopografie, also ein Exkludieren der Objekte auf der Oberfläche (Akenine-Möller/Haines/Hoffman 2008, S. 8–9). Die Auflösung bei dem DGM ist laut Grenzdörffer und Schröder (2017) im Allgemeinen um den Faktor 4 bis 9 geringer als bei dem Luftbild, da bereits im DSM bestehende Artefakten die Klassifizierung behindern (Grenzdörffer/Schröder 2017). Wege für die Erstellung der verzerrungsfreien und maßstabsgetreuen Oberfläche sind Interpolation über feste Passpunkte, ein Resampling über Grauwerte oder ein parametrisches Verfahren mit Hilfe eines vorliegenden Geländemodells und Sensororientierung (Kraus 2004a, S. 376; Grenzdörffer 2013). Die Textur für die Oberfläche wird über die Rektifizierung aus den Quellbildern generiert, diese funktioniert über die Verblendung der Bilder und UV-Mapping, also der Herstellung des zweidimensionalen Bildes aus dem 3D-Modell (Akenine-Möller/Haines/Hoffman 2008, S. 8–9; Kraus 2004a, S. 374–376).

Weiteres beliebtes Exportformat für Messungen ist das digitale Orthofoto, welches ein projiziertes Bild ist, in dem alle Verzerrungen durch Kamera oder Gelände korrigiert sind (Amhar/Jansa/Ries 1998, S. 16). Für die Orthomosaik-Generierung müssen mehrere Bilder des dargestellten Objekts aus unterschiedlichen Winkeln vorliegen, da diese auf einer Orthorektifizierungs-Methode basiert, die perspektivischen Verzerrungen mit Hilfe des

digitalen Oberflächenmodells aus den Bildern entfernt (Strecha/Van Gool/Fua 2008). Die Genauigkeit ist abhängig von dem Detailliertheitsgrad des Oberflächenmodells, Menge an Ausreißer, der Qualität der Tiefenkarte und dem abgebildeten Objekt (Kraus 2004a). Faktoren, wie große Höhenunterschiede, steile Kanten und Bildartefakte durch bewegende Objekte erschweren die Orthoreferenzierung (Grenzdörffer 2013). Je tiefer geflogen wird, desto höher wird die radiale Verzeichnung; durch die Okklusion, also Verdeckung kommt es zu Datenlöchern und Bildpixel werden öfter falsch verwiesen (Amhar/Jansa/Ries 1998, S. 17). Ein True Orthophoto wird zur Vermeidung dieser Löcher aus mehreren Bildern generiert (Habib/Kim/Kim 2007, S. 25–30). Weitere Exportformate sind beispielsweise die Reflektanz- oder Indexkarte, welche die jeweiligen Reflektanz- oder Farbwerte pro Pixel vermerken (Blinn/Newell 1976).

#### 1.4.2.2. Software

Da die vorliegende Arbeit ein großes Augenmerk auf den Vergleich zwischen Open Source Software und proprietärer Software legt, werden in dem folgenden Kapitel die unterschiedlichen Typen und deren Lizenzmodelle erläutert. Es werden jeweils zwei geeignete Anwendungen des jeweiligen Typs ausführlicher vorgestellt:

1. **Agisoft Metashape** (proprietäre Software)
2. **Pix4Dmapper** (proprietäre Software)
3. **WebODM** (Open Source Software)
4. **VisualSFM** (hauptsächlich Open Source Software)

Der Begriff "Freie Software" steht für die Freiheit des Nutzers, die Software auszuführen, sie zu kopieren, weiter zu verteilen, zu studieren, sie zu ändern und zu verbessern (Free Software Foundation Inc 2019). Open Source Software, ist Software, bei der der Quellcode lesbar ist, also mitgeliefert wird und je nach Lizenzmodell frei weitergegeben, bearbeitet und erweitert werden kann (Debian 2004; Grassmuck 2004a, S. 233). Im Gegensatz zu der freien Software stehen hier die philosophischen Wertansichten der Freiheit des Nutzers nicht im Vordergrund, sondern eher die Vorteile von frei verfügbarer, leistungsstarker und auch zuverlässiger Software. Laut Stallman (2019) steht daher der Begriff Open Source für eine Entwicklungsmethodik, wohingegen der Begriff Freie Software eine soziale Bewegung repräsentiert (Stallman 2019). Da über Lizenzkosten oder den Verkauf der Software bei Freier Open Source Software (FOSS) keine Gelder akkumuliert werden können, müssen Hersteller solcher Software über weitere Tätigkeiten, wie zum Beispiel Schulungen oder

Supportdienstleistungen die Weiterentwicklung der Produkte intern finanzieren (Grassmuck 2004a, S. 209). Hilfestellungen bei dem Aufbau, Fortführung und Wartung von Systemen werden meist in Anspruch genommen und erlauben die performante Weiterentwicklung der Software über ein stabiles Entwicklerteam. Die Unterstützung von Institutionen, wie der Open Source Geospatial Foundation (OSGeo) oder Free Software Foundation (FSF) erlaubt auch Privatpersonen oder kleineren Firmen den Aufbau leistungsstarker Open Source Software. OSS löst immer öfter kommerzielle proprietäre Software ab und vor allem im Bereich von DesktopGIS stellt diese eine ernst zu nehmende Alternative dar (Kinberger, Pucher, Michaela Kinberger & Alexander Pucher, 2019 S. 467).

Kommerzielle Software wurde mit dem Ziel entwickelt, aus der Nutzung dieser Software Geld zu generieren. Viele kommerzielle Softwareprodukte sind zwar proprietär, es gibt jedoch auch kommerzielle freie Software. Firmen wird über freie Software eine Chance geboten mit OSS Geld zu verdienen und OSS kommerziell zu nutzen (Kumar/Gordon/Srinivasan 2011, S. 1076–1077). Proprietäre Software verbietet oft die Veränderungen oder die Weiterverbreitung des Codes. Wenn dem nicht so ist, wird verlangt, dass eine Erlaubnis dafür vorliegt. Diese Erlaubnis ist oft so stark eingeschränkt, dass die Software effektiv nicht verändert oder verbreitet werden darf (Grassmuck 2004a, S. 234). Meist genannter Grund für die beschränkte Freigabe der zu Grunde liegenden Mechanismen ist der Schutz des geistigen Eigentums (Grassmuck 2004b, S. 209). Diese Beschränkung führt jedoch zu technischen Einschränkungen und vermeidet die Erweiterung und Modifikation der Anwendungen und Datenformate. Eine Dokumentation der Schnittstellen und der jeweiligen proprietären Datenformate ist meist nur bedingt gegeben und teilweise sogar auch über die Lizenz eingeschränkt (Grassmuck 2004b). Einerseits wird daher in Frage gestellt, inwieweit bei solcher Software die Kompatibilität gegeben ist, andererseits wird jedoch die Kompatibilität und durchgehendes Bestehen von Open Source Software kritisch gesehen, da keine Garantie auf das Fortbestehen der jeweils weiterentwickelnden Instanzen besteht.

### **Agisoft Metashape (proprietär)**

Agisoft Metashape ist ein proprietäres Softwareprodukt, welches die photogrammetrische Verarbeitung digitaler Bilder ermöglicht und dabei räumliche 3D-Daten für diverse Anwendungsfälle generiert. Nativ läuft Agisoft Metashape unter Windows, Linux und Mac OS. Die einmaligen Kosten für die „professional“ Edition ohne Einschränkungen auf einem Rechner sind 3.499 Dollar, dies entspricht rund 3.114,53 Euro (Stand 04 2019).

Die Passpunktverknüpfung bei der Software PhotoScan ermittelt Punkte in den Bildern, die stabil in Hinblick auf den Viewpoint und Belichtung sind und generiert für jeden dieser Punkte eine Beschreibung (Deskriptor) basierend auf den lokalen Nachbarn. Dieser Descriptor wird dann für den Abgleich mit anderen Bildern und deren Punkten genutzt, um die Bilder korrekt zueinander auszurichten (Agisoft LLC 2019a). Dieser Ansatz ist ähnlich zu dem SIFT Algorithmus, erzeugt laut Agisoft jedoch eine etwas höhere Genauigkeit bei der Ausrichtung und somit eine bessere Qualität. Danach werden die Kameraparameter zur äußeren und inneren Orientierung über einen Algorithmus in das Projekt geladen und in einem späteren Prozess bei dem BBA korrigiert. Somit werden auch Rolling-Shutter-Effekte wenn möglich behoben. Bei der dichten Oberflächenrekonstruktion wird eine paarweise Tiefenkartenberechnung durchgeführt. Diese basiert auf ähnlichen Algorithmen wie auch PMVS2, SMVS und CMVS von VisualSFM und ODM aufbauen (Semyonov 2011a). Für die texturierte Vermaschung wird eine triangulierte Oberfläche geschätzt und soweit gewünscht, auf kleinere Instanzen heruntergebrochen, um dann mit Hilfe eines Bildes diese Oberfläche mit einer Texturierung zu versehen. Über die Nutzung von Hochkontrastbildern (HDR) und dem „Multi-view-delighting“ Algorithmus werden visuelle Fehler durch starke Helligkeitsunterschiede, wie zum Beispiel Schatten bei der Textur entfernt. Die Algorithmen wurden an bestehenden Algorithmen angelehnt und für eine bessere Genauigkeit optimiert, teilweise sogar neu aufgebaut. Ziel war eine hochgenaue Berechnung auf Kosten der Schnelligkeit (Semyonov 2011b).

Eine Besonderheit bei der Software ist die 4D Prozessierung über die Berücksichtigung der zeitlichen Ebene, sowie die Python3-Schnittstelle für die Erweiterung des Funktionsumfangs über weitere und eigene Skripte. Das von Agisoft bereitgestellte Skript `split_in_chunks.py` ermöglicht beispielsweise die Blockaufteilung in mehrere Blöcke mit kleineren Begrenzungsrahmen, die ein benutzerdefiniertes Raster bilden (Agisoft LLC 2017). Das Skript nutzt dabei die ursprüngliche Ausrichtung und passt nur den Begrenzungsrahmen in den Blockduplikaten über einen quadratischen Umring (BBOX) an. Die weitere Rekonstruktion von der dichten Punktwolke und Vermaschung wird dann in diesen kleineren Projektbereichen durchgeführt.

Des Weiteren ist der Export als 3D PDF für die einfache Weitergabe von Modellen möglich. Die Berechnung der Prozesse über eine Cloud ist derzeit in einer experimentellen Phase und wird noch getestet (Pasumansky 2019). Dank der automatischen GCP-Erkennung auf Bildern nach manuellem Setzen einiger weniger Punkte und der Editierfunktion dieser Punkte innerhalb der Software können Passpunkte innerhalb des Projekts eingebunden und für die Projektoptimierung genutzt werden. Nach dem erfolgreichen Durchlauf bei Agisoft Metashape

kann ein Qualitätsbericht erzeugt werden, der die weiteren Informationen zu den Prozessen und Exportprodukten enthält. In Tabelle 11 im Anhang sind die unterstützten In- und Exportformate für die Software aufgeführt (Agisoft LLC 2019a).

### **Pix4Dmapper (proprietär)**

Pix4D ist eine Sammlung an proprietären Softwareprodukten für die Photogrammetrie und computerbasierte Verarbeitung von RGB (Rot, Grün, Blau) und multispektralen Bildern in 3D Karten und Modelle. Die Software Pix4Dmapper besitzt eine graphische Oberfläche und kann über die API Pix4Dengine Cloud oder die Python-SDK Pix4Dengine Server um weitere Funktionen erweitert und optimiert werden. Pix4Dmapper läuft unter Windows, Linux und MacOS. Für die Nutzung unter Linux ist eine „Enterprise Lizenz“ nötig und Mac OS ist nur bis v3.0 Beta möglich (Pix4D 2019a). Die einmaligen Kosten sind 3.990 Euro. Eine Alternative sind laufende Kosten von 2.600 Euro pro Jahr oder 260 Euro pro Monat (Stand 04 2019). Enthalten sind 2.500 Bilder pro Monat für die Verarbeitung, Visualisierung und Weitergabe über die Cloud von Pix4D.

Neben der getesteten Desktop- und Cloud-Lösung Pix4Dmapper gibt es noch Pix4Dbin für die Modellierung und Analyse von Gebäuden und zugehörigen Plänen, Pix4Dfields für die agrarwirtschaftliche Modellierung und Analyse und Pix4Dmodel für die Weitergabe von 3D-Modellen. Zudem kann die mobile Anwendung Pix4Dcapture für die Flugplanung genutzt werden. In dieser können der Weg in vordefinierten Optionen (Netzmission, Doppelgitter-/Kreuzmission, Kreissmission) und die Flughöhen nach GSD, sowie die Geschwindigkeit, Start- und Landepunkt, Kamerawinkel und Bildüberlappung definiert werden (Pix4D 2019c).

Für die schnelle und erfolgreiche Durchführung von Berechnungen können vorhandene Prozessierungsvorlagen, sogenannte Templates genutzt werden. In diesen ist keine händische Konfiguration nötig, sondern die Erstellung der gewünschten Ergebnisse verläuft über vordefinierte Standardwerte automatisiert. Nach dem erfolgreichen Durchlauf wird ein Qualitätsbericht erzeugt, der die weiteren Informationen zu den Prozessen und Exportprodukten enthält. Die Optimierung der Kamerakalibrierung, Korrektur von Rolling-Shutter-Effekten und die automatisierte Helligkeits- und Farbkorrektur zwischen Bildern ist über weitere Konfigurationen möglich. Außerdem kann eine automatische Punktwolkenklassifizierung über machine-learning Algorithmen erfolgen (Pix4D 2019a).

Die Kameraorientierung und -kalibrierung erfolgt bei Pix4D über Fritz Ackermanns entwickeltes Photogrammetric Aero-Triangulation System (PATB) mit unabhängigen

Bündelblöcken (Bäumker/Heimes 2002, S. 5–6). Pix4Dmapper nutzt binäre Deskriptoren für die Objektverknüpfung. Über den Binary Robust Independent Elementary Features (BRIEF) Deskriptor ist die Performance schneller und die Software erkennen eine höhere Rate an Objektpunkten (Calonder et al. 2010, S. 791–792). Für die Verbindung der 3D-Kalibrierungspunkte in das Dreiecksnetz wird als Interpolationsverfahren die Inverse Distanzgewichtung (IDW) oder Delaunay-Triangulation genutzt (Pix4D 2019d).

Für die Verarbeitung von größeren Projekten ist eine Projektaufteilung und -Zusammenführung möglich. Zudem könne GCPs und MTPs integriert werden (Pix4D 2019e). Die Editierung und Projektreoptimierung basierend auf diesen Änderungen ist in der Softwareoberfläche möglich. Zudem erlaubt die Software die automatische GCP-Erkennung auf Bildern nach dem manuellen Setzen weniger Punkte.

Für die einfache Weitergabe der Ergebnisse wird das Format 3D-PDF unterstützt. Für die dynamische Visualisierung am Bildschirm sind außerdem 3D-Fluganimationen im Projekt möglich. Als Export wird neben den klassischen Formaten auch über die Indexberechnung die Ausgabe von Thermalkarten oder Vegetationsanalysen (DVI, NDVI, SAVI) ermöglicht (Pix4D 2019a). Wie auch bei Agisoft Metashape ist ein Import von Videos möglich. In der

Tabelle 12 im Anhang sind alle unterstützten In- und Exportformate für die Software aufgeführt (Pix4D 2019e).

### **WebODM (Open Source)**

OpenDroneMap (ODM) ist eine Open Source-Softwaresammlung für die Prozessierung von Bildern, die über ein Python-Skript oder eine graphische Oberfläche gesteuert werden können. Die Software läuft unter der GNU General Public License v3.0 und kann auch kommerziell genutzt werden (Dakota 2016). Durch die Integration in Docker läuft die Software plattformunabhängig und daher sowohl auf Windows als auch Linux und MacOS. Über LiveODM können sowohl ODM, NodeODM, als auch WebODM über ein ISO-Abbild auf DVD oder USB-Stick ohne eigenständige Installation von Docker und den anderen nötigen Paketen genutzt werden. Für die Nutzung von LiveODM werden einmalige Kosten von 50 bis 104 Euro (Stand 04 2019) aufgeführt (Toffanin 2018).

Node-ODM ist eine erweiterte Programmieroberfläche zur Steuerung von ODM. WebODM ist die webbasierte grafische Benutzeroberfläche mit Benutzermanagement zur Bedienung von ODM und ermöglicht die Verwaltung mehrerer Server auf denen ODM und Node-ODM laufen. Diese ist für die einfache Handhabung mit weniger editierbaren Funktionen ausgestattet, basiert

jedoch auf den gleichen Berechnungsmechanismen. Mehr Konfigurationsmöglichkeiten bietet daher die Nutzung von ODM über die Kommandozeile oder die Adaption der festen Werte in dem WebODM-Code. Laut der Dokumentation von ODM wurden die Parameter mit dem meisten Einfluss auf die Berechnung in die Weboberfläche integriert (OpenDroneMap 2019a). Somit ist eine standort- und plattformunabhängige Prozessierung über den Browser möglich. WebODM kann seit Anfang 2019 auch die Software MicMac über NodeMicMac als Verarbeitungsmodul verwenden (Toffanin 2019a) Außerdem wurde dieses Jahr CloudODM und PyODM veröffentlicht (Toffanin 2019b). CloudODM dient als Kommandozeilentool für die Verarbeitung von cloudbasierten Prozessen über die NodeODM-API (Toffanin 2019c). Die Python-Bibliothek PyODM, spricht die NodeODM-API an und ermöglicht Entwicklern komplexe Bildverarbeitungsfunktionen in wenigen Codezeilen zu implementieren (Toffanin 2019d).

Die Auswertung der Ergebnisse kann über die Logdatei und Report-Ansätze erfolgen. Für diese wird OpenSfM als Python-SfM Bibliothek genutzt und schreibt im JSON-Format kompakte Berichte über die einzelnen Arbeitsschritte (Floros/Gargallo 2018).

Über die NodeODM-API können weitere Funktionen eingebaut werden, zum Beispiel die Weiterverarbeitung der Ergebnisse über externe Programme wie GrassGIS. Eine Nachbereitung der Ergebnisse in der Oberfläche ist nicht möglich, Analysen wie zum Beispiel Volumenberechnungen sind über WebGL und GRASS GIS Mechanismen implementiert.

ODM nutzt für die 3D-Rekonstruktion und hochqualitative Texturierung die Algorithmen von Wächter et al (Waechter/Moehrl/Goesele 2014, S. 849). Auch in dieser Software wurde der Videoimport integriert. Dieser ist derzeit jedoch noch experimentell und basiert auf ORB-SLAM als Bibliothek für die simultane Positionsbestimmung und Kartenerstellung (OpenDroneMap 2018a). Das Paket muss dafür nachträglich installiert werden und die Kamera muss manuell für die Software kalibriert werden.

Wie auch bei Pix4D und Agisoft ist die GCP Integration und Projektreoptimierung basierend auf diesen Punkten möglich. ODM unterstützt zwar die Integration von GCPs, hat jedoch wie auch VisualSfM keine automatische Erkennungsfunktion, sodass die Verknüpfung händisch erfolgen muss (OpenDroneMap 2019b). Die Empfehlung für die Verknüpfung der GCPs mit den Bildern ist es fünf Punkte mit je drei Passbildern je GCP zu setzen (Gargallo/Floros 2019). Die GCPs werden, wie auch die Berichte über OpenSfM integriert. Die Anpassung der Koordinate und Weitergabe der Verknüpfungsbilder erfolgt jedoch händisch und teilweise außerhalb der Weboberfläche. Die Kamerakalibrierung kann nicht direkt in der Oberfläche

erfolge, kann jedoch über ein Skript durchgeführt werden (Dakota 2018). In der Tabelle 13 im Anhang sind alle unterstützten In- und Exportformate für die Software aufgeführt (OpenDroneMap 2019c).

### **VisualSfM (Open Source)**

VisualSfM ist eine Open Source Sammlung an Softwareprodukten für die Bildverarbeitung über den SfM-Ansatz, die nur eingeschränkt Open Source und nicht für den kommerziellen Gebrauch gedacht ist (Van Rossum 2015). Die graphische Oberfläche ist nicht Open Source, die beiden Pakete SiftGPU (Feature Detection & Matching) und PBA (Multicore Bundle Adjustment) sind es. Die Benutzeroberfläche mit den Basisfunktionen von VisualSfM wurden an der Universität Washington entwickelt mit dem Ziel das SfM-System für ein Fototourismusprojekt neu zu implementieren (Wu 2013a, 2015a). Wu hat jedoch schon vor einigen Jahren die Algorithmen für die Erstellung von Punktwolken bereitgestellt (Wu 2011a). VisualSfM basiert laut Wu (2012) nicht auf dem Code von Bundler – sowohl die GUI, als auch die SfM-Methoden wurden vorher im Rahmen der Universitätsarbeit angefangen, jedoch später erst veröffentlicht, nachdem bekannte Fehler behoben wurden (Wu 2012). Die Installation ist auf Windows, Linux und MacOS möglich.

Durch die Kombination verschiedener Softwarekomponenten (SiftGPU, PBA, PMVS-2, CMVS und Graclus) kann in der graphischen Oberfläche eine Punktwolke erzeugt werden, die dann über weitere Anwendungen zum Beispiel mit MeshLab, Blender oder CloudCompare zu einem texturierten Modell verarbeitet werden kann (Wu 2015a).

Die Parameter der Kamera werden automatisch aus den Exif-Daten extrahiert. Bei dem Prozess wird neben dem eigentlichen Bild auch eine Datei je für die Sift- und die Punktwolkenberechnung angelegt, die sich neben der Bilddatei in dem Originalordner befinden. Zu beachten ist, dass die Software nur einen radialen Verzerrungswert verwendet, dies ist unter Umständen problematisch bei Projekten mit größeren Verzerrungen. Zudem erfolgt die Schätzung von nur einem Parametersatz der inneren Orientierung für jedes Bild (Wu 2015b).

Die Software nutzt SiftGPU für die Merkmalsextraktion und Verknüpfung (Wu 2013b). Das Paket basiert auf Lowe's SIFT Algorithmus und nutzt die Graphikprozessoren, um Pixel und enthaltene Features parallel zu verarbeiten. Für die Merkmalsverknüpfung können auch die Algorithmen von Lowe oder VLFeat SIFT genutzt werden, die ähnliche Ergebnisse liefern (VLFeat 2017). Zudem wird die gaußsche Bildpyramide erstellt und die

Schlüsselpunkterkennung durchgeführt. Dazu erfolgt die Generierung kompakter Feature-Listen mit GPU-Histogramm-Reduzierung und die Berechnung der Merkmalsorientierungen und Deskriptoren (Wu 2013b). Die Algorithmen wie SIFT nutzen Mehrskalenshelligkeit und Farbgradienten, um konjugierte Punkte in Bildern zu identifizieren. Darüber hinaus bedeutet die Verwendung von Gradienten und nicht von absoluten Pixelwerten, dass ein Objekt, das aus vielen Blickwinkeln betrachtet wird, immer noch identifiziert werden kann (Fonstad et al. 2013, S. 422). Die Transformation der 3D-Punktwolke aus den Passpunkten basiert auf der "Least-Squares Estimation of Transformation Parameters Between Two Point Patterns" von Umeyama (Wu 2013c; Umeyama 1991).

Das Paket Parallel Bundle Adjustment (PBA) wird für die grobe Punktwolkenrekonstruktion genutzt (Furukawa/Ponce 2007a; Wu 2011b). Das BBA für die Multicore-Verarbeitung ist eine Kombination aus dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus (Methode der kleinsten Quadrate) und dem Verfahren der konjugierten Gradienten (Preconditioned CG) (Wu 2011c; d). Für die dichte Punktwolkengenerierung sind die Patch- oder Cluster-basierte Multi-View-Stereo-Software (PMVS/ CMVS) von Furukawa nötig (Wu 2015a; Moulon 2019). Die Software CMVS enthält PMVS2 und weitere Verbesserungen, die zum Beispiel vorher auftretende Speicherlimitationen verhindern (Furukawa/Ponce 2019).

Bei ODM wurde bis vor kurzem auch PMVS genutzt, dies wurde zugunsten SMVS ersetzt (OpenDroneMap 2018b). Die GCP Integration und Projektroptimierung basierend auf diesen Punkten ist möglich. Wie auch bei ODM ist nur eingeschränkt eine automatisierte Verknüpfung und Optimierung implementiert (Wu 2011b).

Über die Integration von SIFT in die Grafikverarbeitungseinheit (Sift-GPU) und das Multicore-BBA ist laut Wu eine optimierte Berechnung möglich (Wu 2011d). SiftGPU enthält SiftGPU-Servers und SiftGPU-Client, somit kann auf verschiedenen Graphikprozessoren auf dem eigenen Computer oder Remote-Computer für die gesamte Berechnung gearbeitet werden (Wu 2013b).

Die 3D Animation des Projekts ist möglich und erlaubt die einfache Präsentation der Ergebnisse. Eine Integration von Videos als Datenquelle ist nicht möglich. Hier wird in der Doku jedoch auf den gleichen Algorithmus (SLAM), wie auch bei ODM verwiesen (Wu 2011e). Im Anhang in der Tabelle 14 sind alle unterstützten In- und Exportformate für die Software aufgeführt.

### 1.4.2.3. Hardware

Jede der vier vorgestellten Anwendungen liefert Vorschläge für die Hardware, die sich im Detailgrad und der Verbindlichkeit unterscheiden. Laut VisualSFM sollte ein Graphikprozessor von ATI, nVidia oder Intel mit mindestens 1GB Hauptspeicher für die Feature Detection vorhanden sein. Für das Ausrichten der Bündel wird nVidia CUDA oder Zentralprozessor vorgeschlagen. Die Empfehlung für den Hauptspeicher liegt sowohl bei VisualSFM, als auch bei Agisoft bei 32 GB (Agisoft LLC 2019b; Wu 2015a). In der Dokumentation von ODM wird auf einen Hauptspeicher von mindestens 4 GB verwiesen, sowie mindestens 20 GB Speicherplatz (OpenDroneMap 2019a). In der Dokumentation von Pix4D wird als Empfehlung eine OpenGL 3.2 kompatibler Graphikprozessor mit mindestens 2 GB Hauptspeicher vorgelegt. Zusätzlich wird ein Zentralprozessor mit 4 bis 8 Kernen von Intel i7 Xeon und je nach Anwendungsfall ein Hauptspeicher von 16 bis 60 GB vorgeschlagen. Weitere Empfehlungen sind zudem einen Sekundärspeicher zu nutzen und mindestens 40 GB Hauptspeicherplatz zu haben (Pix4D 2019f).

## 2. Methodik

### 2.1. Datenerhebung

#### 2.1.1. UAVs

Alle Methoden wurden möglichst automatisiert ohne menschliche Einflüsse oder Störfaktoren durchgeführt, dies gilt sowohl für die Erfassung als auch für die Verarbeitung.

Da für die Prozessierung die Datenqualität aus der Befliegung entscheidend ist, wurde im Rahmen der Arbeit auch die Beeinflussung der Rohdaten für die Fähigkeit der UAV-Prozessierung und Volumenberechnung untersucht. Aufgrund der limitierenden Faktoren bei der Nutzung von größeren Flugsystemen wurde zur Generierung der Datensätze eine Drohne bezogen, die mit ausreichend Kenntnissen ohne Führerschein geflogen werden kann und zu den Micro-UAVs zählt (Bundesamt für Justiz 2015).

Einbezogene Faktoren bei der Anschaffung des Fluggeräts für die eigene Erfassung im Rahmen der Firma WhereGroup waren geringe Anschaffungskosten, ein robuster Bau und verlässliche Qualität bei hoher Flugzeit durch austauschbare langlebige Akkus für die vollständige und schnelle Aufnahme vom Untersuchungsgebieten. Zudem waren eine einfache Montage und Transportmöglichkeit entscheidend, wobei das Gewicht für die Micro-UAV Klasse nicht überschritten werden durfte. Für die DJI-Drohne wurde sich hauptsächlich entschieden auf Grund des Preis-Leistungsverhältnisses und der einfachen Handhabung als Einsteiger, damit eine effiziente schnelle Datenerfassung in den Untersuchungsgebieten durchgeführt werden kann. Wichtig für die Weiterverarbeitung waren die im theoretischen Ansatz aufgeführten Einbindungsmöglichkeiten (automatische Prozesse, geringer Kalibrierungsaufwand pro Flug und die eigenständige Reperaturmöglichkeit bei langfristig und bezahlbaren Ersatzteilen). Diese Anforderungen waren zum Kaufdatum im Jahr 2018 für die DJI Phantom 3 Advanced gegeben (DJI 2019a).

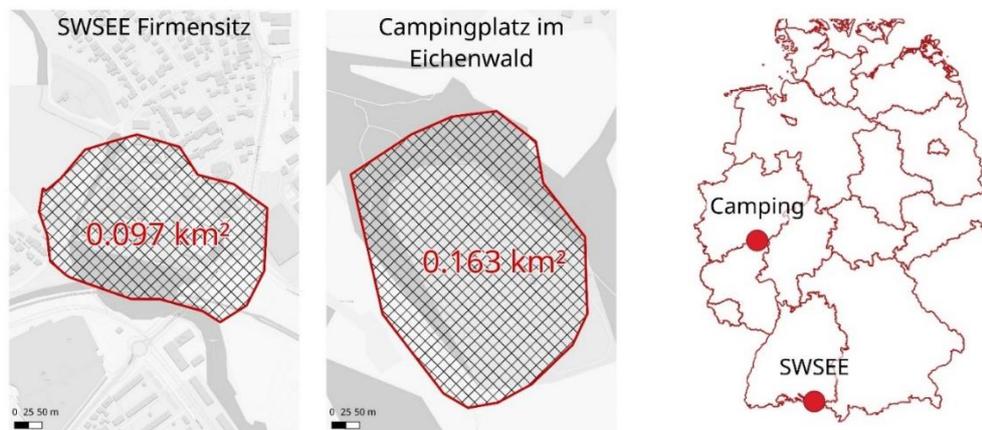
Das zweite Fluggerät, die DJI Phantom 4 Pro wurde von dem Stadtwerk am See erworben und wird seit rund drei Jahren für diverse Befliegungen genutzt. Als Fluggerät für die Bilderfassung wurden in der vorliegenden Arbeit daher die beiden Multirotorsysteme und Micro-UAVs von DJI eingesetzt. Bei den beiden eingesetzten UAVs sind Kameras mit CMOS-Sensor im Einsatz und ein vertikaler Start beziehungsweise Landung sind möglich. Die beiden Tabellen im Anhang listen die Spezifikationen der genutzten Plattformen auf (Siehe

Tabelle 9 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) und wurden den Herstellerangaben entnommen (DJI 2019b; c).

### 2.1.2. Untersuchungsgebiete

Die beiden Untersuchungsgebiete befinden sich in Deutschland. Es handelt sich um den Firmensitz des Stadtwerks am See in Friedrichshafen und den Campingplatz im Eichenwald. Bei der Auswahl der Untersuchungsgebiete und dem Zeitpunkt des Fluges wurde darauf geachtet möglichst diverse Gebietsstrukturen zu erfassen. Die beiden Gebiete wurden gewählt, da sich die Oberflächenstruktur unterscheidet, die Gebietsgröße jedoch ähnlich ist. Wichtiger Faktor war zudem die Erlaubnis die Daten zu erheben und mit diesen im Rahmen der Arbeit die gewünschten Untersuchungen durchführen zu können.

Abbildung 7 visualisiert die grobe Verortung der Gebiete und den Größenvergleich von U1 und U2 im gleichen Maßstab zueinander (Abbildung 6). Erstellt wurde die Ansicht mit dem DesktopGIS QGIS und einer OSM-Hintergrundkarte. Die genauen Parameter zu den Befliegungen und Gebietsstrukturen werden im weiteren Text genauer erläutert.



**Abbildung 6: Größenvergleich und Verortung - U1 und U2 (eigene Darstellung)**

Bei U1 handelt es sich um eine ebene Fläche für den Campingplatz, die umrahmt ist von einem kleinen Graben. Das Gebiet hat eine Fläche von ca. 0,163 km<sup>2</sup>. Auf dem Gebiet des Campingplatzes, vor allem im Randbereich befindet sich eine Vielzahl an Bäumen. Es existieren zwar keine Geländeextrema (steiler Abhang oder Berg), durch die vorhandenen Gebäude und Camping-Fahrzeuge ist jedoch eine starke Oberflächenvarianz gegeben. Homogene Strukturen, wie zum Beispiel der Untergrund in einer Kiesgrube oder spiegelnde größere Wasserflächen sind weniger stark vorhanden.

Das zweite Untersuchungsgebiet von dem Firmensitz in Friedrichshafen (U2) hatte eine Fläche von ca. 0,097 km<sup>2</sup>. In U2 existierten keine extremen Höhenunterschiede des Geländes. Die Struktur der Oberfläche ist geprägt durch eine Vielzahl an Gebäuden und geparkten Fahrzeuge. Insgesamt ist in diesem Gebiet ein stärkerer menschlicher Einfluss in Form einer dichten Bebauung und ausgeprägten Infrastruktur zu sehen. Zu vermerken sind weniger starker Vegetationsbewuchs über relevanten Stellen, jedoch mehr bewegte Objekte (Fahrzeuge und Personen) und homogene betonierte Oberflächenstrukturen.

### 2.1.3. Missionsplanung und Befliegung

Bei der Missionsplanung und Evaluierung des gewünschten Untersuchungsgebiets auf Flugverbotszonen oder andere Beschränkungen wurde auf Grund der gewonnenen Erkenntnisse aus Map2Fly gearbeitet. Diese bietet nur Erstinformationen an, jedoch keine Rechtssicherheit (FlyNex GmbH 2019). Für die Flugplanung wurde die Software Pix4D Capture, sowie ICAO-Luftfahrkarten als Referenz genutzt.

Vorab wurde eine Haftpflichtversicherung abgeschlossen, um etwaige Schäden durch Flugfehler abzudecken. Pro Befliegung wurde ein Logbucheintrag, sowie der Eintrag der Gegebenheiten in einer Checkliste durchgeführt. Vor jedem Missionsstart wurde gegengeprüft, ob die Soft- und Hardware auf aktuellem Stand und betriebsbereit war und zur Vermeidung von negativen Einflussfaktoren auf das Ergebnis wurden die IMU und der Kompass vor jedem Flug an der Startposition nach einer kurzen Ruhezeit neu kalibriert. Dabei wurden zunächst die Sensoren der IMU im Kaltmodus kalibriert, damit die Drohne nach dem nächsten Start direkt betriebsbereit war.

Nach der Gegenprüfung der groben Flugbereiche wurde das genaue Untersuchungsgebiet definiert, dabei wurde der Bereich der Befliegung größer aufgezogen, damit das gesamte zu untersuchende Kerngebiet mit mehreren Bildern erfasst wird. Da beide Gebiete keine Gelände-Extrema vorwiesen wurde auf einen ergänzenden Flug in abweichender Höhe für die qualitativ gleichmäßige Aufnahme verzichtet (Siehe Abbildung 7 und Abbildung 8). Laut der Benutzerdokumentation von Pix4D fallen die Untersuchungsgebiete unter den "normalen Bereich", daher wurde mit einer zweifachen Kreuzbefliegung in konstanten 50 bis 100 Metern Höhe geplant (Pix4D 2019g, S. 4).



**Abbildung 7: Geländestruktur U1 (Export von 3D-Modell aus Metashape)**



**Abbildung 8: Geländestruktur U2 (Export von 3D-Modell aus Metashape)**

Im Oktober 2018 wurde die erste UAS-Flugkampagne durchgeführt und dabei das erste Untersuchungsgebiet „Campingplatz im Eichenwald“ (U1) mit einer Längs- und Querüberlappung von 80 % in einem Kreuzgitter überflogen. Die Flughöhe betrug rund 66,5 Meter. Der Campingplatz ist als Luftsperrgebiet markiert, somit durfte der Luftraum laut § 26 LuftVG mit Einschränkung durchfolgen werden. Die Zustimmung des Eigentümers, der zeitgleich die Befliegung beauftragte, wurde ausdrücklich erteilt.

Im fast gleichen Zeitraum (Oktober 2018) wurde die zweite UAS-Flugkampagne durchgeführt und dabei das zweite Untersuchungsgebiet „SWSee in Friedrichshafen“ (U2) überflogen. Dabei erfolgte einmal ein Flug mit Längsstreifen und einmal ein Flug mit Kreuzgitter in einer Flughöhe von rund 61,5 Metern. Das Stadtwerk hat bereits 2018 die Allgemeinerlaubnis für zugelassene Ausnahmen von Betriebsverboten nach § 21b LuftVO beantragt (§21b Absatz 1, Nummer 7 LuftVO). Diese wurde von dem Regierungspräsidium Stuttgart zugelassen und umfasst den Betrieb von unbemannten Fluggeräten mit einer Gesamtmasse von maximal fünf Kilogramm. Erlaubt wurden hiermit die Beschränkungen von §21b Absatz 1 Nummer 2, 5 und 7 LuftVO in dem Bundesland Baden-Württemberg. Das Gebiet von dem Stadtwerk am See

liegt in der Verbotszone des Flughafens Friedrichshafen, daher musste nach §21 LuftVO die Freigabe bei der Flugverkehrskontrolle erfolgen.

Die Form und Ausrichtung der Gebietsmission in U1 und U2 können der folgenden Abbildung entnommen werden. Zu erkennen sind dabei zwei Screenshots einer Pix4Dmapper Projektansicht mit einer OSM Karte als Hintergrund und im Vordergrund die jeweiligen Flugrouten und Kamerapositionen der Bildaufnahmen (Abbildung 9).



**Abbildung 9: Fluggitter und Kameras bei U1 (links) und U2 (rechts) - Pix4Dmapper Screenshot**

Die folgende Tabelle listet die wichtigsten Befliegungsdaten zu den zwei Untersuchungsgebieten auf und vermerkt die genutzten Kameraparameter (Siehe Tabelle 1).

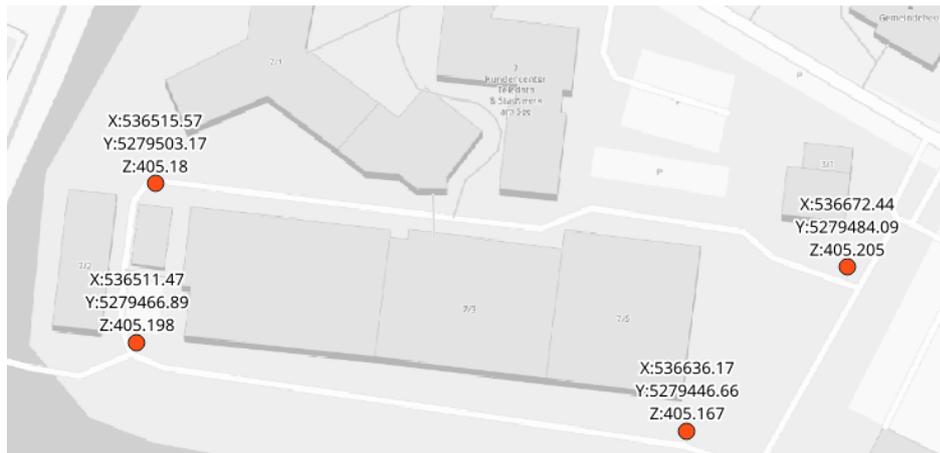
<b>Befliegungsdaten</b>		
Kriterien	Campingplatz im Eichenwald (U1)	SWSee in Friedrichshafen (U2)
UAV und Kamera	DJI Phantom 3 Advanced FC300S	DJI Phantom 4 Pro FC6310
Bild Typ	.jpeg (JPG)	.jpeg (JPG)
Anzahl der Bilder	782	597
Aufnahmedatum	12.10.2018 ca. 12:30 Uhr	25.10.2019 ca. 12:30 Uhr
Größe des Gebiets	0,163 km <sup>2</sup>	0,097 km <sup>2</sup>
Brennweite	3,61 mm	8,8 mm
Bildbreite und -höhe	4000 x 3000 px	5472 x 3648 px
Belichtungszeit	1/800 Sek.	1/240 Sek.
Blendenwert	2,00 EV (f/2,0)	4,64 EV (f/5,0)
ISO-Empfindlichkeit	100	100
Blitzlicht	-	-
Messverfahren	Mittenbetontes Integral	Mittenbetontes Integral
Belichtungsprogramm	Manuell	Normalprogramm

<b>Befliegungsdaten</b>		
Koordinatensystem der Bilder	WGS84 (EGM96Geoid), 4326	WGS84 (EGM96Geoid), 4326
Referenzdaten	Trigonometrische Punkte liegen außerhalb von U1	GCPs und weitere grobe Passpunkte aufgenommen (UTM 32)
Pilot	Frau Toma (WhereGroup GmbH)	Herr Mildner (Stadtwerk am See)
Auftraggeber	WhereGroup GmbH und Hatzfeldt-Wildenburg'schen Forstverwaltung	Stadtwerk am See

**Tabelle 1: Befliegungsdaten von U1 und U2**

Jede Befliegung wurde möglichst automatisiert durchgeführt, um die menschlichen Fehler in den Bilddaten während des Bilderfassungsprozesses zu minimieren. Die Aufnahme der Bilder erfolgte in vertikaler Richtung (Nadir). Die Kameraachse wurde nicht schräg nach vorne ausgerichtet und stand senkrecht mit 90° zum Untersuchungsgebiet. In der vorgestellten Arbeit wurde dank der einzelnen Micro-UAV je mit einer sequenziellen Kameraaufnahme, nicht mit mehreren gleichzeitigen Bildaufnahmen gearbeitet. Voraussetzung für die weiteren Prozesse war die regelmäßige, streifenweise angeordnete Aufnahme dieser Bildverbände, in denen sich benachbarte Bereiche somit deutlich überlappen. Dank der im UAV integrierten Sensoren konnten die geplanten Missionsrouten exakt befliegen werden und die Bilder im gewünschten Abstand ohne manuelles Eingreifen über die Missionsplanungssoftware erfasst werden. Die spektrale und radiometrische Auflösung, somit auch der Farbton, Sättigung und Helligkeit der Bilder wurde nicht manuell verändert. Alle vom Piloten erfassten Testbilder während oder zwischen den automatisierten Befliegungen wurden entfernt.

Bei U1 wurden keine GCPs aufgenommen, da bewusst ein Prozess mit und ohne GCPs untersucht werden sollte, um Qualitätsunterschiede in den Berechnungsergebnissen aufführen zu können. Nach der Auswahl passender Punkte in einem möglichst homogenen Verteilungsmuster erfolgte vor der Befliegung die GPC-Aufnahme in U2. Die gewählten Punkte lagen im Zentrum eines Gasschiebers und von drei Abwasserschächten, gemessen auf den jeweiligen Kanaldeckeln. Für U2 wurde die Auswahl und Aufnahme von GPCs durch das Stadtwerk am See durchgeführt. Die Koordinatenerfassung in möglichst hoher Auflösung erfolgte durch den GNSS-Empfänger HiPer SR von Topcon (Topcon Deutschland Positioning GmbH 2015). Die Lage der GCPs innerhalb des zweiten Untersuchungsgebiets kann der folgenden Abbildung entnommen werden. Dargestellt werden in diesem Screenshot von einem QGIS-Projekt die GCPs mit jeweiligen X-, Y- und Z-Koordinaten in UTM Zone 32 (Abbildung 10).



**Abbildung 10: Verortung der vier GCPs in der 2D-Ansicht bei U2 (QGIS-Projekt Screenshot)**

Auf die Durchführung einer oder mehrerer weiterer Befliegungen wurde verzichtet, da das Konzept auf Laien ausgerichtet wurde und diese mit der erzeugten Datenbasis aus dem ersten Flug arbeiten würden. Die Annahme, dass gegebenenfalls zu dieser Datenbasis noch GCPs von externen Quellen übergeben werden, bereits vorliegen oder erfasst werden, führte zu der weiteren Testreihe mit den GCPs bei einem der Gebiete. Die Nutzung der Rohdaten von zwei Gebieten aus der Befliegung mit zwei unterschiedlichen UAVs und den GCPs lässt Rückschlüsse zu mehreren Anwendungsfällen zu. Da der Verarbeitungsprozess pro Software jedoch identisch ist, kann eine Vergleichbarkeit hergestellt werden.

## 2.2. Datenverarbeitung

### 2.2.1. Hardware

Neben der bereits vorgestellten Hard- und Software zur Primärdatenerfassung stützt sich der empirische Teil der Arbeit vor allem auf die vier ausgewählten Anwendungen, die erfolgreich auf einem handelsüblichen Personal Computer (PC) betrieben wurden. Die folgende Tabelle fasst die relevanten Spezifikationen des Systems im Bereich Hardware und Software zusammen (Siehe Tabelle 2).

Die jeweilige erste Zeile listet die tatsächlich eingesetzte Komponente auf. Um der Ableitung persönlicher Präferenzen bei der Auswahl der Hardwarekomponenten vorzubeugen, enthält die Tabelle je die eingesetzte Komponente und darunter eine mögliche gleichwertige Alternative (kursive Zeile), unter der die ausgewählten Anwendungen auch uneingeschränkt lauffähig wären.

Software und Hardware	
Software	
<b>Unified Extensible Firmware Interface (UEFI)</b>	M5A99X EVO R2.0 UEFI-BIOS 2501
	<i>AMI BIOS 7B22v21</i>
<b>Betriebssystem</b>	Windows10 Education, Version 1607
	<i>Ubuntu Linux, Version 18.04.2 LTS (Debian)</i>
<b>Dateisystem</b>	NTFS
	<i>ext4</i>
Hardware	
<b>Hauptplatine, Chipsatz, Sockel</b>	ASUS M5A99X EVO R2, AMD 990X / SB950, AMD Sockel AM3+
	<i>MSI B360-A PRO, Intel B360, Intel Sockel LGA 1151</i>
<b>Zentralprozessor (CPU)</b>	AMD FX-6350, 6 Kerne, 3,90GHz-Standardtakt
	<i>Intel Core i3, 2 Kerne, 3,30 GHz-Standardtakt</i>
<b>Hauptspeicher (RAM)</b>	Corsair Vengeance (CMZ8GX3M2A1600C9), je 8 GB, DDR3-1600, CL9-9-9-24 im Dual-Channel
	<i>Kingston HyperX (HX318C10FBK2/16), je 8 GB, DDR3-1866, CL10 im Dual-Channel</i>
<b>Speicher</b>	Samsung SSD 850 EVO (MZ-75E250RW), 250 GB, r:540 MB/s, w:520 MB/s, AHCI, angebunden über SATA 6 GB/s
	<i>Western Digital WD Blue SSD (WDS250G1B0A), 250 GB, r:540 MB/s, w:500MB/s, AHCI, angebunden über SATA 6 GB/s</i>
<b>Sekundärspeicher</b>	Seagate Barracuda 7200, SATA 6 GB/s, 1000GB (HDD)
<b>Graphikkarte</b>	ASUS Radeon HD 7870 V2 (HD7870-DC2-2GD5-V2), PCI Express 3.0 x16, GPU-Standardtakt 1000 MHz, 2 GB GDDR5 (Treiber 25.20.15011.1004)
	<i>MSI GeForce GTX 760 (GK104-225-A2), PCI Express 3.0 x16, GPU-Standardtakt 1085 MHz, 2 GB GDDR5</i>

Tabelle 2: Hardwareausstattung

Die Kosten für das Hilfsmittel in Höhe von ca. 790 Euro wurden quantifiziert und dienen neben der weiterhin guten Verfügbarkeit der einzelnen Komponenten (Q2 2018) zur Qualifizierung des modularen Systems als „handelsüblichen PC“ für den Privatgebrauch. Die Formulierung „handelsüblicher PC“ im Rahmen dieser Arbeit referenziert dieses oder ein vergleichbares System.

Das System wurde hinsichtlich der Hardwarekombination und Softwarekonfiguration für den Einsatzszweck optimiert, jedoch wurde aufgrund der konzeptionellen Ausrichtung dieser Arbeit der Einsatz einer Workstation oder eines Serversystems ausgeschlossen. Das Bestreben ein besonders zukunftsträchtiges Forschungsfeld für einen möglichst breiten Anwenderkreis zu öffnen, legt diesen Schluss nahe.

Aus Sicht eines potenziellen Anwenders ist neben der UAV auch das prozessierende System als limitierende Faktoren in Hinblick auf die Anschaffungskosten zu identifizieren. Insofern

wurde die Einstiegshürde sowohl durch den adäquaten Investitionsumfang als auch die möglichst reduzierte nötige Fachkenntnis geringgehalten. Grundkenntnisse der Photogrammetrie sind für die korrekte Verwendung der verarbeitenden proprietären und Open Source Softwares sicherlich essenziell, müssen im Serverbereich allerdings nicht unbedingt vorausgesetzt werden.

Abschließend sei noch betont, dass die Modularität in diesem Zusammenhang die grundsätzliche Austauschbarkeit der Hardwarekomponenten impliziert und dementsprechend irrelevant der Hersteller der Komponenten war, solange den Kompatibilitätsgrundsätzen und den konkreten Systemanforderungen der jeweiligen Softwarehersteller Rechnung getragen wurde (Siehe Kapitel 1.4.2.3). Nach erfolgreichem Funktions- und Performancetest des Systems wurde der Sekundärspeicher vollständig formatiert und das Betriebssystem neu installiert. Die Auslagerungsdatei (Swap) lag auf dem Sekundärspeicher. Das Betriebssystem wurde durch die Deaktivierung und Entfernung aller nicht benötigten Funktionen, wie zum Beispiel Cortana und der Firewall optimiert. Bis auf die untersuchten Softwares wurde keine Drittsoftware, wie zum Beispiel Virenschutzprogramme installiert. Die Netzwerkschnittstelle wurde für die Dauer der Prozessierung gänzlich deaktiviert.

Auf die weitere Optimierung oder Anpassung des Systems wurde verzichtet, da ein Laie die Fähigkeiten dieses in größerem Umfang zu verbessern vermutlich nicht besitzt, zum Beispiel durch den Einbau neuer Komponenten oder Übertaktung. Die Annahme, dass bei vergleichenden Testreihen und Anwendungsfällen ein ähnlicher PC genutzt wird, ist die Voraussetzung für die weiteren Verarbeitungen.

### 2.2.2. Software

In der vorliegenden Arbeit wurden vier Anwendungen für die photogrammetrische Bildverarbeitung miteinander verglichen. Die Auswahl der Anwendungen erfolgte in Hinblick auf den Vergleich von Open Source Software zu proprietärer Software (Siehe Kapitel 1.3.2). Wichtig war zudem aus technischer Sicht das Vorhandensein einer graphischen Oberfläche und die Unterstützung von Windows, Linux oder MacOS als Betriebssystem. Voraussetzung für den Vergleich der Prozesse pro Anwendung und Untersuchungsgebiet war das Vorhandensein ähnlicher Algorithmen und Verarbeitungsschritte.

Die Verarbeitung der digitalen Rohdaten erfolgte mit den Anwendungen Pix4Dmapper, Agisoft Metashape, VisualSFM und WebODM. Die vier Anwendungen besaßen alle die nötigen Grundfunktionen für die photogrammetrische Verarbeitung. In bestimmten Bereichen besaßen

diese weiterführenden Funktionen, die einzelne Anwendungsfälle erleichtern oder sogar erst ermöglichen. Der Funktionsumfang ist in der folgenden Tabelle „Software-Funktionsmatrix“ visualisiert (Siehe Tabelle 3). Die aufgeführten Parameter spiegeln einen für den Anwendungsfall und ähnliche Anwendungsfälle relevanten Funktionsumfang wieder, der Anspruch auf eine vollumfängliche Funktionsauflistung wird dieser daher nicht gerecht.

<b>Funktionsumfang (Stand 04 2019)</b>	<b>Pix4D mapper</b>	<b>Agisoft Metashape</b>	<b>Visual SFM</b>	<b>WebODM</b>
RGB Bildprozessierung	✓	✓	✓	✓
Video Bildprozessierung	✓	✓	x	✓
Multispektrale Bildprozessierung	✓	✓	x	x
NIR Bildprozessierung	x	✓	x	x
Thermale Bildprozessierung	✓	✓	x	x
360° Bildprozessierung	✓	✓	x	x
Rig Bildprozessierung	✓	✓	x	x
Fischauge Bildprozessierung	✓	✓	x	x
sphärische Korrektur/ Bildprozessierung	x	✓	x	x
Photogrammetrische Triangulation	✓	✓	✓	✓
Dichte Punktwolken Generierung	✓	✓	✓	✓
Dichte Punktwolken Klassifizierung	✓	✓	x	✓
3D Modell Generierung	✓	✓	✓	✓
4D Modell Generierung (zeitl. Achse)	x	✓	x	x
DSM Generierung	✓	✓	x	✓
Fassaden DSM Generierung	✓	x	x	x
DEM Generierung	✓	✓	x	✓
Orthomosaik Generierung	✓	✓	x	x
Fassaden Orthomosaik Generierung	✓	x	x	x
Thermalkarten Generierung	✓	x	x	x
Konturlinien Generierung	✓	x	x	x
Reflektanzkarten Generierung	✓	x	x	x
Indexkarten Generierung	✓	x	x	x
Volumen-, Distanz und Flächenberechnungen	x	✓	x	✓
GCP Einbindung	✓	✓	x	✓
EPSG Support	x	✓	x	x
Echtzeitvisualisierung			x	x
Videoexport	✓		x	x
Python Skript Schnittstelle	x	✓	x	x
Sketchfab Schnittstelle f.d. 3D Texturierung	x	✓	x	x
Netzwerkprozessierung über multiple Nodes	x	✓	x	✓
Statistischer Report	✓	✓	x	x
<b>Bedienbarkeit / Konfigurierbarkeit</b>				
Graphisches User Interface	✓	✓	✓	✓
Kommandozeile	✓	x	✓	✓

Dokumentation in Benutzerhandbuch	✓	✓	✓	✓
Testdaten und Anleitung für Demo	✓	✓	✓	✗
Support	✓	✓	✗	✓

**Tabelle 3: Software-Funktionsmatrix**

Die Software wurden Anfang 2019 nach den jeweiligen Anleitungen der Hersteller auf dem Rechner installiert. Die Vorgängerversion von Metashape namens „PhotoScan Pro“ wurde nicht verwendet. Da in dem Jahr 2019 die neue Version namens Metashape veröffentlicht wurde sind die Prozesse mit Metashape in der Version 1.5.1 (Veröffentlicht am 02.02.2019) durchgeführt worden. Pix4Dmapper wurde in der Version 4.4.10 (Veröffentlicht am 13.03.2019) und VisualSFM in der Version 0.5.26 (Veröffentlicht 2012) getestet. Die jeweils genutzten Versionen und ein Vergleich der Kosten finden sich in der folgenden Tabelle zu den vier Open Source und proprietären Anwendungen (Siehe Tabelle 4).

Kriterium	Pix4D Desktop mapper (Proprietär)	Agisoft Metashape Pro (Proprietär)	Visual SFM (eingeschränkt Open Source)	WebODM (Open Source)
Software-version	4.4.10	1.5.1 (Build 7618)	0.5.26	0.6.0 (ODM) 0.9.0 (WebODM)
Release Datum	13.03.2019	02.02.2019	2012	09.04.2019
Einmalige Kosten (Stand 04 2019)	3.990 € (Alternativ 2.600€ pro Jahr / 260€ pro Monat)	3.499 \$ / 3.114,53 €	✗	Für LiveODM ISO: 57 - 117 \$ / 50 - 104 €

**Tabelle 4: Softwareversion**

Die Installation von Pix4Dmapper und Agisoft Metashape erfolgte über eine ausführbare Installationsdatei. Für die Nutzung von VisualSFM mussten die Pakete heruntergeladen und entpackt werden, es war keine Ausführung weiterer Installationsschritte notwendig. Für die Nutzung von WebODM in der vorhandenen Systemlandschaft wurde WebODM, ODM und Docker installiert. Für die Installation von Docker musste vorher Git und Pip installiert werden. Bei Docker wurden 6 Zentralprozessoren, sowie 12 GB Hauptspeicher vergeben. Die restliche Menge an 4 GB Hauptspeicher wurde wie empfohlen für den reibungslosen Betrieb von Windows zurückgehalten (Toffanin 2019a).

Das jeweilige Programm wurde minimiert und nur für den jeweiligen Start der Berechnungen geöffnet. Während der Berechnung wurde der Bildausschnitt nicht bewegt, um die Stabilität der Prozesse nicht zu beeinträchtigen (Wu 2015a). Kommandozeilenbasierte Befehle wurden nicht genutzt und eigene Skripte wurden nicht erstellt. Die Graphikprozessor-Einbindung für

die Prozesse wurde bei VisualSFM, Agisoft Metashape und Pix4Dmapper aktiviert. Bei ODM und WebODM ist diese Funktion bisher nicht implementiert (Siehe Kapitel 5.2).

Nach dem Durchlauf der Prozessierung in der Standardkonfiguration wurden Anpassungen für die optimalsten Einstellungen vorgenommen, um die für die jeweilige Software besten Ergebnisse zu erreichen. Der erste Durchlauf sollte dabei immer die einfache und schnelle Verarbeitung mit möglichst geringen Investitionskosten repräsentieren, während der zweite Durchlauf für die Ausgabe einer besseren Datenbasis den optimierten Durchlauf verbunden mit höheren Investitionskosten repräsentiert. Soweit möglich wurden die Konfigurationen hinsichtlich der Hardwareausstattung in dem jeweiligen zweiten Durchlauf optimiert. Die Investitionskosten beziehen sich in diesem Fall auf den Zeitaufwand, nötigen Wissensstand und damit verbundene Hardware- und Softwarekosten. Die jeweiligen Konfigurationsparameter wurden tabellarisch pro Prozess vermerkt. Die Extraktion der genutzten Parameter und erzeugten Genauigkeiten erfolgte aus den Logfiles, Konfigurationsdateien und graphischen Berichten der jeweiligen Software.

## 2.3. Datenverarbeitung Agisoft Metashape

### 2.3.1. Konfiguration für U1 (Metashape)

Für die Durchführung der Projektverarbeitung wurden im ersten Schritt die **Standardeinstellungen** als automatischer Workflow (Batch Process) mit Speicherung nach jedem Schritt vordefiniert und abgespielt. Dieser war wie folgt:

- Laden und Ausrichtung der Bilder
- Optimierung der Kameraausrichtung
- Generierung der dichten Punktwolke
- Dreiecksvermaschung
- Texturierung und Bau des gekachelten Modells
- Erzeugung des DEM/DSM
- Generierung des Orthomosaiks

Tabelle 15 im Anhang führt die genutzten Parameter bei der Prozessierung mit der Standardkonfiguration in Metashape für U1 auf (Siehe

Tabelle 15). Es wurde auf eine händische Anpassung dieser Konfigurationswerte verzichtet und die jeweiligen vorkonfigurierten Standardwerte wurden beibehalten; meist entsprach dies der Qualitätsangabe "Medium". Über die Standardeinstellungen wurde eine grobe und dichte Punktwolke erzeugt, sowie die Depth Maps generiert. Des Weiteren wurde ein 3D-Modell mit Textur und ein gekacheltes Modell, sowie ein DEM/DSM und Orthomosaik erzeugt.

Als Oberflächentyp für das 3D-Modell in dem Standardprojekt (U1) von Metashape wurde "Arbitrary" als vordefinierter Wert übernommen. Bei der Texturierung in dem optimierten Metashape-Projekt von U1 wurde der „Ghosting Filter“ aktiviert um Fehler in der Aufnahme, zum Beispiel durch bewegte Objekte zu minimieren. Bei der Dreiecksvermaschung wurde als Oberflächenform das Höhenmodell (Height field) gewählt. Dieses wird für die Verarbeitung von Geländeaufnahmen empfohlen, da weniger Speicherplatz belegt wird und somit größere Datenmengen verarbeitet werden können (Agisoft LLC 2019a, S. 27). Neben der Erstellung von den genannten Ergebnissen sind weitere Exportergebnisse möglich (Siehe Kapitel 1.4.2.1), wurden jedoch nicht untersucht.

Für die Durchführung der **optimierten Projektverarbeitung** von U1 wurden die Einstellungen in dem vorher bereits genutzten Workflow (Siehe 2.3.1) angepasst und der gleiche Prozess mit den bestmöglichen Einstellungen abgespielt. Dabei kam es trotz schrittweiser Reduktion der Qualität von den Ausgabedaten mehrfach zu Abbrüchen aufgrund der RAM-Überlastung. Für die Verarbeitung wurde das Projekt folglich über das Skript „Split in Chunks“ (Siehe Kapitel 0) in mehrere kleinen Gebiete unterteilt werden. Tabelle 16 im Anhang führt die genutzten Parameter der Prozessierung nach der Anpassung und Nutzung des Skriptes in Agisoft Metashape für U1 auf. Für die Minimierung von Fehlern wurde die Bildqualität der Eingangsdaten gegengeprüft. Alle Bilder mit einem hohen RMSE von mindestens 1 wurden vor der Verarbeitung deaktiviert, um Rekonstruktionsunsicherheiten zu vermeiden.

Die Prozessierung über das Skript wurde mit einer 10 % Überlappung und Aufteilung des Gebiets in ein 2x2 Feld, also vier kleine Gebiete durchgeführt. Bei einer Testreihe mit 4x4 Raster konnten die Gebiete nach der Aufteilung nicht wieder zusammengeführt werden, daher wurde dieses Testprojekt auch verworfen. Die einzelnen Verarbeitungsschritte wurden nach dem Aufteilen der Gebiete pro kleinem Bereich durchgeführt und gespeichert. Über das Skript wurde die grobe Punktwolke erstellt, darauf basierend die dichte Punktwolke und das 3D-Modell. Für die Modellierung wurde die hohe Qualität und das Höhenfeld als Oberflächentyp definiert. Die weiteren Parameter wurden automatisch den gesetzten Projekteinstellungen

entnommen und konnten in der Oberfläche des Skripts nicht definiert werden. Eine Texturierung oder die Generierung weiterer Exportmodelle wurde nicht unterstützt.

Die aufgeteilten Gebiete konnten nach der Berechnung nicht über Verknüpfungspunkte durch die Softwarealgorithmen zusammengeführt werden, daher lagen zwei unabhängige Bildgruppen vor. Bei der Ausgabe der Ergebnisse wurde der jeweilige Zeitaufwand und die Parameter der einzelnen Verarbeitungsschritte über die Software in der graphischen Oberfläche und den Berichten nicht mit ausgegeben und konnte daher nicht direkt reproduziert werden. Die Abfrage der Berechnungsdauer und genutzten Parameter konnte auch über weitere manuelle Durchläufe nicht ermittelt werden, da diese weder in der Oberfläche noch in einem Bericht ausgegeben wurden. Alle vorliegenden Informationen sind in Tabelle 16 im Anhang aufgeführt.

Ein dritter Durchlauf wurde händisch ohne das Skript durchgeführt. In diesem wurde bei jedem Arbeitsschritt die möglichst beste Option ausgewählt und sobald kein Abbruch erfolgte für die weitere Verarbeitung genutzt. Die Erstellung der Dreiecksvermaschung und Tiled Model musste mit reduzierter Qualität erstellt werden, da bei der Nutzung der Punktwolke als Verarbeitungsbasis die Prozesse abbrachen.

Tabelle 15 im Anhang führt die genutzten Parameter nach den Testläufen bei der Prozessierung und diversen Abbrüchen ohne die Nutzung des halbautomatisierten Skripts für U1 in Agisoft Metashape auf.

### 2.3.2. Konfiguration für U2 (Metashape)

Für die Durchführung der Prozessierung von dem zweiten Untersuchungsgebiet wurden zunächst im Projekt die **Standardeinstellungen** als automatischer Workflow mit Speicherung nach jedem Schritt vordefiniert und abgespielt. Dieser entspricht der gleichen Konfiguration wie sie bereits in U1 genutzt wurde (Siehe Kapitel 2.3.1). Tabelle 17 im Anhang führt die genutzten Parameter bei der Prozessierung mit der Standardkonfiguration für U2 auf. Es wurde auf eine händische Anpassung dieser Konfigurationswerte verzichtet. Die jeweiligen vorkonfigurierten Standardwerte wurden beibehalten und die gleichen Exportergebnisse wurden ausgegeben. Bei der Standardkonfiguration wurden jeweils die vordefinierten Werte übernommen, meist entsprach dies wie auch bei U1 der Qualität "Medium". Der Oberflächentyp "Arbitrary" wurde für das 3D-Modell genutzt und das Orthomosaik wurde auf Basis der Dreiecksvermaschung (Mesh) erzeugt.

Für die **optimierte Durchführung** der Prozessierung wurde das bei U1 genutzte Skript mit den gleichen Einstellungen ausgeführt (Siehe Kapitel 2.3.1). Tabelle 18 führt die genutzten Parameter nach der Anpassung bei der Prozessierung und Nutzung des Skripts für U2 in Agisoft Metashape auf. Alle Bilder mit einem hohen RMSE von mindestens 1 wurden vor der Verarbeitung deaktiviert (Siehe Kapitel 2.3.1). Als Oberflächentyp für das 3D-Modell wurde zunächst "Height Field" und die hohe Qualität ausgewählt. Nach einem erneuten Fehler und Abbruch des Prozesses wurde statt der dichten Punktwolke mit der dünnen Punktwolke gearbeitet.

Zur weiteren Optimierung der Projektqualität wurden die vier vorher erfassten GCPs (Siehe Kapitel 2.1.3) über eine händische Eingabe der X-, Y- und Z-Werte pro GCP integriert. Die Genauigkeitstoleranz von X, Y und Z wurde bei dem vorgegebenen Wert von 10 Metern belassen. Für die Verknüpfung wurden die GCPs in den einzelnen Bildern verifiziert, dazu wurde jeder GCP in möglichst vielen Bildern markiert und die automatisch erkannten Verknüpfungen gegengeprüft. Nach der ersten Abfrage der Qualität waren im Z-Bereich hohe Fehlerwerte zu erkennen, daher wurde die Qualität der manuell kontrollierten Punkte erneut gegengeprüft. Es wurden nur Punkte mit einem RMSE-Wert von unter 1 behalten, die anderen Punkte wurden entfernt. Nach dieser Optimierung erfolgte eine erneute Berechnung der Ergebnisse über das Skript und manuellem Anstoß der weiteren Exportergebnisse.

Tabelle 17 im Anhang führt die genutzten Parameter nach der Einbindung der GCPs bei der Prozessierung auf (Siehe Tabelle 17). Wie auch bei den Standardeinstellungen wurde nach der Bildverknüpfung mit GCPs und Punktwolken-Generierung das texturierte 3D-Modell, sowie ein DEM und Orthomosaik erzeugt.

## 2.4. Datenverarbeitung Pix4Dmapper

### 2.4.1. Konfiguration für U1 (Pix4Dmapper)

Die Durchführung der Prozessierung von U1 in Pix4Dmapper erfolgte im ersten Schritt mit den **Standardeinstellungen** über die Vorlage „3D Maps“. Diese erlaubt die Nutzung von automatisierten Arbeitsschritten mit Sicherung nach jedem Schritt. Der Standardablauf der Prozesse in Pix4Dmapper gliedert sich in drei Schritte und ist wie folgt aufgebaut:

- Import von Bildern, Ausrichtung und Verknüpfung (Initial processing)
- Punktwolkengenerierung, Texturierung und Vermaschung (Point cloud and mesh)
- Export von DSM, Orthomosaik und weiteren Ergebnissen (DSM, orthomosaic and index)

Tabelle 19 im Anhang führt die genutzten Parameter bei der Prozessierung von U1 in Pix4D mit der Standardkonfiguration auf. Es wurde auf eine händische Anpassung dieser Konfigurationswerte verzichtet und die jeweiligen vorkonfigurierten Standardwerte wurden beibehalten.

In dem ersten Schritt identifiziert die Software die Passpunkte aus den Bildern und die Bilder werden miteinander verknüpft. Zudem erfolgte die Kalibrierung und Optimierung der Kameraparameter, da bei der gewählten Vorlage von Pix4Dmapper dies zum Standardverfahren gehört. Bei dem zweiten Schritt wurden die „Automatic Tie Points“ erstellt, die für die Generierung der groben Punktwolke mit Hilfe der halben Bildgröße genutzt werden. Aus diesen Punkten wurde im nächsten Schritt die dichte Punktwolke erstellt. Basierend auf der dichten Punktwolke wurde die texturierte Dreiecksvermaschung für das 3D-Modell durchgeführt. Als letzter Schritt erfolgte der Export des DSM und Orthomosaiks.

Die Durchführung der **optimierten Prozessierung** erfolgte auf Basis des Standardprojekts von U1 mit der Vorlage „3D Maps“, die für die Einbindung optimiert wurde (Siehe Kapitel 2.4.1). Tabelle 19 im Anhang führt die genutzten Parameter nach der Anpassung bei der Prozessierung für U1 in Pix4Dmapper auf.

Wie auch bei Agisoft Metashape (Siehe Kapitel 2.3.1) wurde eine geometrische Bildverknüpfung aktiviert, um die Prozesse zu beschleunigen. Für die korrekte Kameraausrichtung wurde bei den Kameraparametern die Geoidhöhe über dem GRS 1980 aktivieren. Als vertikales Koordinatensystem wurde EGM 96 Geoid genutzt. Für die Minimierung von Fehlern wurde die Bildqualität der Eingangsdaten gegengeprüft. Alle Bilder mit einem Reprojektionsfehler von über 1 und mit einem Wert von 0 bei der Angabe der Bildqualität wurden deaktiviert, um Fehler durch verschwommene oder unscharfe Bilder zu vermeiden. Für die Minimierung der Fehler bei Z-Werten wurde die horizontale Genauigkeit zweimal so hoch eingestellt, wie die vertikale Genauigkeit.

Für die optimale Punktwolkengenerierung wurde die minimale Anzahl an Bildverknüpfungspunkten um einen Punkt erhöht und mit der originalen Bildgröße gerechnet. Es wurde mit der hohen Auflösung für die 3D-texturierte Dreiecksvermaschung gearbeitet. Die restlichen Einstellungen blieben unverändert und haben auf dieser optimierten Datenbasis gerechnet.

### 2.4.2. Konfiguration für U2 (Pix4Dmapper)

Die Durchführung mit Standardparametern als automatisierter Prozess mit Speicherung nach jedem Schritt erfolgte wie auch bei U1 über die Vorlage „3D Maps“ (Siehe Kapitel 2.4.1). Tabelle 20 im Anhang führt die genutzten Parameter bei der Prozessierung mit der **Standardkonfiguration** in Pix4Dmapper für U2 auf. Es wurde auf eine händische Anpassung dieser Konfigurationswerte verzichtet. Die jeweiligen vorkonfigurierten Standardwerte wurden beibehalten.

Die Durchführung der **optimierten Prozessierung** erfolgte auf Basis des Standardprojekts von U2 mit der Vorlage „3D Maps“, die für die Einbindung optimiert wurde (Siehe Kapitel 2.4.2). Dazu gehört die Markierung und Einbindung der GCPs und die Reoptimierung des Projekts. Tabelle 20 im Anhang führt die genutzten Parameter der Prozessierung nach der Optimierung der Konfiguration in Pix4Dmapper für U2 auf.

Die Orientierung des Modells erfolgte über GPS und GCPs, die für die Berechnung wie auch vorab die Bilder in das Projekt eingebunden wurden. Dies geschah über den GCP/ Manual Tie Point (MTP) Manager. Nach der Durchführung des ersten Berechnungsschrittes konnten diese dann in der Punktwolke über die rayCloud markiert werden. Der Import der Passpunkte erfolgte im gleichen Koordinatenreferenzsystem. Über die Iteration von nahem Heranzoomen, genauerer Erfassung auf dem Bild und Rekalkulierung konnte die Genauigkeit und automatische Wiedererkennungsquote der Punkte erhöht werden. Danach erfolgte die Reoptimierung und der Durchlauf der zweiten und dritten Bearbeitungsschritte mit Berücksichtigung der GCPs.

## 2.5. Datenverarbeitung WebODM

### 2.5.1. Konfiguration für U1 (WebODM)

Für die Durchführung der Projektverarbeitung von U1 wurden zunächst die **Standardeinstellungen** als automatischer Workflow genutzt. Dieser war wie folgt:

- Laden und Ausrichtung der Bilder, ggf. noch Hoch-/Runterskalierung (images + images\_resize)
- Generierung der dichten Punktwolke und Depth Map (opensfm + opensfm/depthmaps + odm\_georeferencing)
- Dreiecksvermaschung (odm\_meshing)
- Texturierung und Bau des gekachelten Modells (odm\_texturing)

- Erzeugung weiterer Exporte, wie Orthomosaik oder DEM (odm\_orthophoto + odm\_dem)

Tabelle 21 im Anhang führt die genutzten Parameter bei der Prozessierung von U1 mit den Standardkonfigurationen in WebODM auf. Es wurde wie auch bei Agisoft Metashape und Pix4Dmapper eine händische Anpassung dieser Konfigurationswerte verzichtet und die jeweiligen vorkonfigurierten Standardwerte wurden beibehalten (Siehe Kapitel 2.3.1 und 2.4.1). Bei der standardisierten Verarbeitung wird für die Berechnung über OpenSfM die Bildgröße einheitlich auf 2048 Pixel runterskaliert (längste Seite). Für die optimierten Prozesse wurde diese Funktion deaktiviert.

Für die **optimierte Durchführung** der Prozessierung von U1 wurden die besten Einstellungen als automatischer Workflow definiert. Tabelle 21 im Anhang führt die genutzten Parameter bei der Prozessierung mit den optimalen Konfigurationen für U1 in WebODM auf.

Bei der optimierten Konfiguration auf Basis der Vorlage „hochqualitative Orthomosaik“ wurde nach 302 Stunden der Prozess abgebrochen, da dieser nach der dichten Punktwolkenrekonstruktion keinerlei Fortschritte vermerkte. Die letzte Meldung „Reconstructing all views“ verweist auf den Versuch, die dichte Punktwolke in ein Modell zu verbinden. Da der Abbruch des Prozesses das System lahmlegte wurde Docker und WebODM neu gestartet und der Prozess erneut mit geringeren Einstellungen versucht, dieser wurde auch nach 300 Stunden abgebrochen. Das Abbrechen des Prozesses in WebODM führt bei beiden Testläufen zur Blockade aller weiterer Prozesse für mehrere Stunden. So wurde in der Software 30 Stunden lang versucht über WebODM den Prozess zu canceln und der Node für die Verarbeitung der weiteren Projekte wurde dadurch blockiert. Daher musste ODM neu gestartet werden, um diesen Workflow zu unterbrechen.

### 2.5.2. Konfiguration für U2 (WebODM)

Für die Durchführung der Projektverarbeitung von U2 wurden wie auch bei U1 zunächst die **Standardeinstellungen** als automatischer Workflow genutzt (Siehe Kapitel 2.5.1). Tabelle 21 im Anhang führt die genutzten Parameter bei der Prozessierung von U2 mit den Standardkonfigurationen in WebODM auf. Es wurde auf eine händische Anpassung dieser Konfigurationswerte verzichtet und die jeweiligen vorkonfigurierten Standardwerte wurden beibehalten (Siehe 2.3.1 und 2.4.1).

Für die Durchführung der **verbesserten Projektverarbeitung** wurden wie bereits bei U1 die optimierten Einstellungen als automatischer Workflow genutzt (Siehe Kapitel 2.5.1) und die

GCPs integriert. Tabelle 21 im Anhang führt die genutzten Parameter bei der Prozessierung mit den optimalen Konfigurationen von WebODM für U2 auf (Siehe Tabelle 21).

Für die Verknüpfung der GCPs wurde eine Datei mit der Position der vier GCPs auf den Pixelpunkten der jeweiligen Originalbilder erstellt. Diese Textdatei wurde in das Projekt eingebunden, danach erfolgte die Berechnung des Projekts (Siehe Kapitel 3).

## 2.6. Datenverarbeitung VisualSFM

### 2.6.1. Konfiguration für U1 (VisualSFM)

Für die Durchführung der Projektverarbeitung von U1 wurden zunächst die **Standardeinstellungen** in einem händischen angestoßenen Workflow genutzt. Die Basisschritte sind wie folgt:

- Bilder ins Projekt laden (Open Multiple Images)
- Verknüpfung der Bilder (Compute Missing Matches)
- Grobe Punktwolke generieren (Compute 3D Reconstruction)
- Dichte Punktwolke generieren (Run Dense Reconstruction)

Tabelle 22 im Anhang führt die genutzten Parameter bei der Prozessierung von U1 mit der Standardkonfiguration in VisualSFM auf (Siehe Tabelle 22). Es wurde auf eine händische Anpassung dieser Konfigurationswerte verzichtet und die jeweiligen vorkonfigurierten Standardwerte beibehalten (Siehe Kapitel 2.3.1, 2.4.1 und 2.5.1).

Da die Anzeige der Vorschaubilder in der Oberfläche für die Prozesse nicht nötig ist, wurde der Parameter „param\_less\_visualization\_data“ in der Konfigurationsdatei auf 1 gesetzt. Somit mussten in den folgenden Projekten die Vorschaubilder nicht in der graphischen Oberfläche geladen und keine Ressourcen für diesen Schritt aufgewendet werden. Nach dem Laden des Bilderverbands in das Projekt wurden die Bilder über Passpunkte mit Hilfe des Sift-Algorithmus und der vollständigen paarweisen Bildverknüpfung in der Software verbunden. Daraufhin wurde die Punktwolke erstellt, indem die 3D Rekonstruktion, BBA und eine dichte Rekonstruktion durchgeführt wurden.

Für die Durchführung der **verbesserten Projektverarbeitung** sollten die Standardeinstellungen optimiert werden. Die folgende Tabelle führt die genutzten Parameter bei der Prozessierung mit diesen optimierten Konfigurationen in VisualSFM für U1 auf (Siehe Tabelle 22). Soweit möglich wurden die Konfigurationen hinsichtlich der Hardwareausstattung optimiert, jedoch führten die Anpassungen zu Abstürzen der Projekte, daher konnte keine

verbesserte Projektverarbeitung erfolgen. Der Versuch mehr Passpunkte nach der Verarbeitung zu finden führte weder bei U1, noch bei U2 zu einem veränderten Ergebnis (SfM > More Functions > Find More Points).

Für die Oberflächenrekonstruktion der Punktwolke wurde in MeshLab die Funktion "Screened Poisson Surface Reconstruction" genutzt (MeshLab > Filters > Remeshing, Simplification and Reconstruction). Dabei wurde zunächst die Standardkonfiguration mit einem Index von 8 beibehalten, um ein grobes 3D-Modell aus der Punktwolke zu erzeugen. In diesem Modell wurde für die Texturierung der jeweilige Farbwert der Punkte übernommen und für die flächenhafte Darstellung interpoliert. Die Indexoptimierung auf den Faktor 12 führte zu einem Abbruch der Berechnung bedingt durch die Speicherlimitation des Rechners.

Für die weiteren Berechnungen wurde die Dreiecksvermaschung optimiert, indem die "Cleaning and Repairing" Funktionen angewandt wurden (Filters > Cleaning and Repairing > Remove duplicate Vertices + Remove Zero Area Faces + Remove Unreferenced + Remove Faces from Non-Manifold Edges). Die Bereinigung der Stützpunkte und Flächen führte zu einem saubereren Ergebnis bei der Texturierung und verhinderte Abstürze bei dieser. Danach erfolgte die Texturierung des Rasters (Filters > Texture > Parameterize + Texturing from registered Raster) mit einer Größe von 1024. Die Konfigurationsparameter der externen Software finden sich im Anhang in Tabelle 23.

Da die Qualität des 3D-Modells extrem niedrig war und weitere Exportergebnisse ohne weitere externe Software und erheblichen Aufwand und Wissensaufbau nicht möglich war, wurden weitere Exporte nicht erstellt (Siehe Abbildung 23 und Kapitel 3.2.4). Es entstanden somit weder DSM, noch Orthomosaik.

#### 2.6.2. Konfiguration für U2 (VisualSfM)

Für die Durchführung der Projektverarbeitung von U2 wurde im ersten Schritt wie auch bei U1 die **Standardeinstellungen** in einem manuellen Arbeitsablauf genutzt (Siehe Kapitel 2.6.1). Tabelle 22 im Anhang führt die genutzten Parameter bei der Prozessierung von U2 mit den Standardkonfigurationen in VisualSfM auf.

Für die **verbesserte Projektverarbeitung** wurden wie bereits bei U1, die optimierten Einstellungen als manueller Arbeitsablauf genutzt (Siehe Kapitel 2.6.1). Zusätzlich wurden die vier GCPs für die Berechnungen integriert. Tabelle 22 im Anhang führt die genutzten Parameter bei der Prozessierung mit den optimalen Konfigurationen für U2 auf.

Für die Eingabe der GCPs wurde die grobe Punktwolke generiert. Nach dem manuellen Eintrag der vier Punktkoordinaten und Setzen von den GCPs in mehreren Bildern, erfolgte die automatisierte Berücksichtigung dieser Punkte für die Punktwolkenausrichtung (Funktion „GCP-basierte Transformation“).

Mit den gleichen Einstellungen, wie bereits bei der Punktwolkeneinbindung von U1, wurde bei MeshLab eine Dreiecksvermaschung auf Basis der Punktwolke von U2 durchgeführt. Die Konfigurationsparameter der externen Software finden sich im Anhang in Tabelle 23. Da die Qualität des 3D-Modells extrem niedrig war und weitere Exportergebnisse ohne weitere externe Software und erheblichen Aufwand und Wissensaufbau nicht möglich war, wurden weitere Exporte nicht erstellt. Es entstanden somit weder DSM, noch Orthomosaik.

## 2.7. Analyse

### 2.7.1. Kriterienkatalog

#### 2.7.1.1. Qualitätsanforderungen

Neben den funktionalen Anforderungen wurden auch die nicht funktionalen Anforderungen evaluiert. Diese beschreiben die Qualität, in welcher die definierten funktionalen Leistungen erbracht werden mussten. Zu diesen Qualitätsanforderungen gehörten die Bereiche Gestaltung, Benutzerfreundlichkeit, Dokumentation und Zuverlässigkeit als Teile der ISO 9241 von der International Organization for Standardization (ISO). Weitere Faktoren für die Qualitätsanalyse waren die Bereiche Updatefähigkeit und Sicherheit der Software, die anhand der Kriterien der ISO für die Prüfung und Bewertung der Sicherheit von Informationstechnik evaluiert wurden (International Organization for Standardization 2011).

Eine optisch gute Gestaltung der Software unterstützt den Anwender bei der Durchführung des Arbeitsprozesses in der Anwendung. Das Hervorheben wichtiger Elemente, kontextbezogene Anordnung von Funktionen, einfache Lesbarkeit von Texten und eine dem Zweck dienliche farbliche Markierung von Bereichen unterstützen den Arbeitsprozess (Deutsches Institut für Normung e. V. 2018a).

Die Benutzeroberfläche sollte möglichst einfach und intuitiv aufgebaut sein. Sowohl die Dateneingabe als auch die Nutzung der Funktionen in korrekter Reihenfolge sollten durch eine verständliche Anordnung gewährleistet werden. Komplexere Funktionen für weiterführende Arbeitsschritte sollten den Basisablauf des Prozesses nicht behindern und mit möglichst wenig Einarbeitungsaufwand nutzbar sein. Entscheidend in diesem Bereich ist die Verständlichkeit,

Erlernbarkeit und Bedienbarkeit des Systems durch den Nutzer (Deutsches Institut für Normung e. V. 2018b; a).

Dank einer klaren, ausführlichen und verständlichen Dokumentation der Komponenten und Funktionen sollte die korrekte Datenverarbeitung ohne direkte Zuhilfenahme von externem Support möglich sein. Das eigenständige Einarbeiten in die jeweilige Software sollte durch die Benutzerdokumentation und Forenbeiträge möglich sein. Die Installation, der technische Betrieb, sowie die Nutzung von Schnittstellen sollte durch eine transparente und offene Schnittstellenbeschreibung und ein Administrationshandbuch gewährleistet werden. Jede dieser Dokumentationen sollte in aktueller Form vorliegen und bei Änderungen oder Updates aktualisiert werden, dazu gehören neben den Versionshinweisen und Änderungsvermerken auch Aktualisierungen des Anwender- und Administrationshandbuchs (Deutsches Institut für Normung e. V. 2018b; a).

#### 2.7.1.2. Anforderungen an die Prozessierung

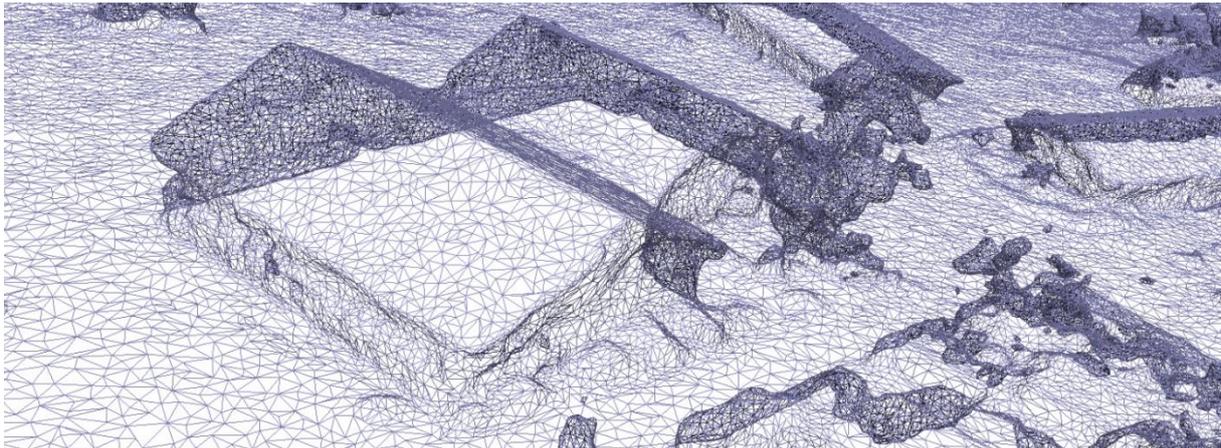
Die genutzten Prozesse und erzeugten Ergebnisse wurden über einen Kriterienkatalog qualitativ evaluiert (Siehe Kapitel 3.2). Der Vergleich der Ergebnisse aus den digital erfassten Daten im Vergleich zur traditionellen manuellen Erfassung wurden nicht durchgeführt. Für den intuitiven zeitlichen und sachlichen Vergleich der Ergebnisse wurden Tabellen und Säulendiagramme als Visualisierungsform gewählt.

Für den Abgleich der Projekte wurden die Flächengröße in Quadratkilometern und die GSD erfasst. Die Flächengröße allein ist zwar nicht ausschlaggebend, kann jedoch in Kombination mit den Fehlerwerten und der Auflösung eine entscheidende Aussage zu der Qualität des Modells geben.

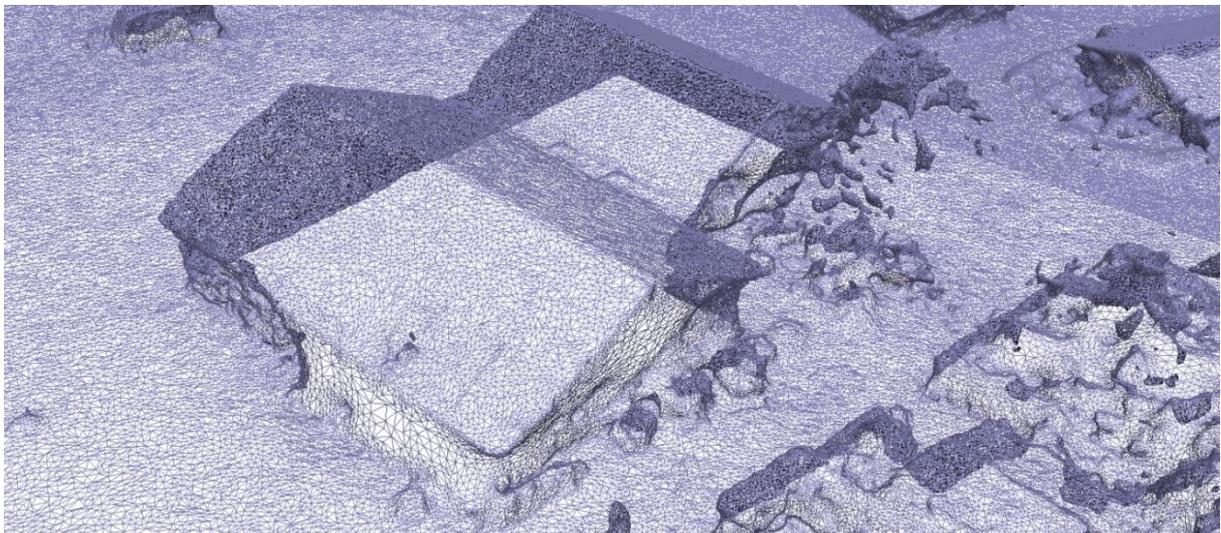
Die Abweichung der absoluten Kameraposition nach der Kameraorientierung wird über die durchschnittlichen Fehlerwerte von X, Y, Z in Metern und Omega, Phi und Kappa in Grad gemessen. Um eine Aussage zu der Genauigkeit und Qualität der Georeferenzierung zu erlauben wird, daher in einigen Berichten die absolute und relative Geolokalisationsabweichung über den RMSE gemessen und ausgegeben. Somit können genaue Aussagen über die durchschnittlichen Reprojektionsfehler der Modelle getroffen werden (Siehe Kapitel 1.4.1.2).

Eine Aussage zu der Bildqualität und Eignung der Daten für die danach folgenden Punktwolkengenerierung bietet die Anzahl an erkannten 2D-Punkten auf den Bildern und die

Anzahl der erfolgreichen Verknüpfungen dieser Punkte. Eine große Menge an Passpunkten (Keypoints) auf den Bildern ist optimal für die Verknüpfung. Je mehr dieser Punkte verknüpft werden können, desto besser ist die spätere Punktwolkenqualität (Siehe Abbildung 11 und Abbildung 12). Der abnehmende Detailgrad bei einer geringen Punktzahl ist in dem ersten Screenshot zu erkennen. In dem zweiten Bild sind Objektgrenzen zu erkennen, so beispielsweise die begrenzenden Büsche auf der Grundstücksgrenze oder die Dachkante.



**Abbildung 11: Triangulation bei niedriger Punktzahl in U1 (Mesh-Export aus Metashape)**



**Abbildung 12: Triangulation bei hoher Punktzahl in U1 (Mesh-Export aus Metashape)**

Für die Abfrage der Genauigkeit und Qualität der Georeferenzierung über die GCPs wurde der Abweichungsfehler (RMSE) der vier GCPs für X, Y und Z verglichen (Siehe Kapitel 3.2.7).

Durch die Berechnung der 3D-Punktzahl für das BBA ausgehend aus den potenziellen gefundenen 2D Keypoint Matches und die Abfrage der gesamten 3D-Punktzahl ist ein statistischer Vergleich der dichten Punktwolke möglich. Zudem wurde die durchschnittliche

3D-Punktdichte pro Kubikmeter erfasst, die bezogen auf die Flächengröße eine Aussage zu der Punktwolkenqualität erlaubt (Siehe Kapitel 3.2.3).

Für den Vergleich der 3D-Modelle wurde die Anzahl an Flächen und Stützpunkten nach der Triangulation gemessen. Eine hohe Anzahl an Stützpunkten führt zu einer hohen Anzahl an Flächen und somit einem genaueren an die reale Oberfläche angepassten Modell (Siehe Kapitel 3.2.4).

Die Orthomosaik konnten sowohl anhand der Flächengröße in Quadratkilometern als auch der Auflösung miteinander verglichen werden (Siehe Kapitel 3.2.5).

Die Kriterien für das DEM waren die möglichst realitätsgetreue Abbildung der Höhe in einem Höhenprofil und die durchschnittliche 3D-Punktdichte pro Quadratmeter (Siehe Kapitel 3.2.6). Die Dichte sollte wie auch bei der Punktwolke möglichst hoch sein.

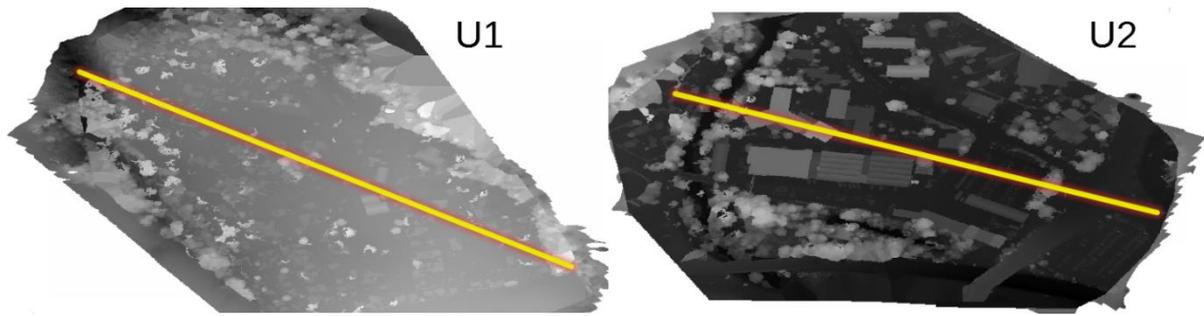
Da ein möglichst effizienter Ablauf der Prozesse entscheidend ist wurde der Zeitaufwand der Verarbeitungsschritte evaluiert (Siehe Kapitel 1.3.2). Für die folgenden Bearbeitungsschritte wurde daher die Dauer der Verarbeitung verglichen. Die Aufteilung war dabei wie folgt:

1. Bildabgleich / -ausrichtung
2. Punktwolkengenerierung
3. Mesh- und Mosaik
4. DSM
5. Orthomosaik

Enthalten in dem ersten Schritt ist die Kameraparameteroptimierung und Depth Maps Generierung. Die Dreiecksvermaschung und Texturierung des 3D-Modells gehört zu dem dritten Schritt (Siehe Kapitel 3.2.7).

### 2.7.2. Exportvergleich

Im Rahmen der Prozessierung der zwei Untersuchungsgebiete in den vier Anwendungen sollten sechzehn Punktwolken, texturierte Modelle und Orthomosaik entstehen. Der Vergleich dieser und anderer Ergebnisse erfolgte neben dem Kriterienkatalog auch auf visueller Basis. Dazu wurden die Höhenprofile des DSMs miteinander verglichen (siehe Kapitel 3.2.5). Da vor allem in diesen sichttoten Bereichen die Genauigkeit abnimmt, wurde an den Gebäudekanten und der Vegetation die Qualität des Orthofotos untersucht. Für den Vergleich der Höhenprofile wurden zwei Profilachsen je Untersuchungsgebiet definiert, die möglichst alle Geländeformen abdecken sollten (siehe Abbildung 13).



**Abbildung 13: Höhenprofillinie je Untersuchungsgebiet**

Zusätzlich erfolgte ein Vergleich der Punktwolken über die OSS CloudCompare (CloudCompare 2019). Hier wurde die Funktion Cloud to Cloud Distance (C2C) für die Messung der Abweichungen zwischen zwei Punktwolken genutzt. Da innerhalb einer Software unter gleichen Projektbedingungen der Export der Punktwolken erfolgte, können diese verglichen werden. Die Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich finden sich in Kapitel 3.2.3. Für den Vergleich zwischen den Programmen müsste erst eine Transformation oder Lageverschiebung der Punktwolken erfolgen, sodass in dem gleichen Referenzsystem gearbeitet werden kann.

Über den Eintrag der Werte in die "Gaussian-Curve" wurde die globale Fehlerverteilung pro Projekt über ein Histogramm visualisiert. Zudem konnte die Standardverteilung der gemessenen GCPs erfasst werden.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Datenerhebung

In dem ersten Untersuchungsgebiet (Campingplatz; U1) sind 782 Bilder erfasst worden. Die Befliegung des zweiten Untersuchungsgebiets (Firmenstandort; U2) ergab 597 Bilder. Somit lag die maximale Anzahl der zu kalibrierenden Bilder bei 782 beziehungsweise 597 Stück.

Da die Aufnahme von U1 im Herbst erfolgte, trugen die Bäume auf den Bildern eine recht umfangreiche meist orange-rote Krone. Laub auf der Wiese war kaum bis nicht sichtbar. Durch die gewählte Tages- und Jahreszeit, sowie der Kooperation mit dem Platzbetreiber waren während der Befliegung kaum bewegliche Objekte vorhanden, da die meisten Fahrzeuge nicht fuhren und sich nur wenige Menschen auf dem Gelände aufhielten.

Da die Aufnahme von U2 in einem städtischen Gebiet erfolgte, konnten bewegte Objekte kaum vermieden werden. Im Vergleich zu U1 sind daher eine Vielzahl an Verkehrsmittel und mehrere Personen auf den Bildern zu erkennen. Beide Aufnahmen wurden während der Mittagszeit im Oktober 2018 durchgeführt, die Bäume trugen bei U2 daher ebenfalls Blätter. Bedingt durch eine schwache Wolkendecke waren die Lichtverhältnisse bei U2 besser, da keine extremen Schatten oder Spiegelungen durch die Sonne auftraten. Die Wolkenbedeckung war während der Befliegung von U1 weniger konstant. Bedingt durch direkten Lichteinfall der Sonne kam es in einigen Regionen bei dem Campingplatz zur starken Schattenbildung.

Weitere Faktoren, wie zum Beispiel Wind, Regen oder Schnee behinderten beide Aufnahmen nicht. Die Geschwindigkeit der Befliegung und der Drehwinkel wurden bei den Geländeaufnahmen nicht händisch angepasst. Da bei beiden Geländetypen keine größeren Höhenunterschiede vorhanden waren, sind keine stark variierenden Ergebnisse der Auflösung vorhanden und die definierte Flughöhe war für die Befliegung ausreichend.

Bedingt durch die Aufnahmehöhe waren bei der gegebenen Auflösung keine homogenen Strukturen auf einzelnen Bildern zu erkennen. Da das Gelände von U1 gut begehbar war und keine Restriktionen durch Flugverbotszonen vorlagen, konnten hier ohne Limitationen mehrere Flugreihen durchgeführt werden. Sowohl bei U1 als auch bei U2 boten die Solaranlagen auf den Dächern eine gute Vergleichbarkeitsgrundlage für die Qualität der Exporte an (Siehe Abbildung 14).



**Abbildung 14: Vergleich 3D-Modell mit Originalbild bei U1 (Links Ausschnitt aus Originalbild, Rechts 3D-Modell Export aus Metashape Standardprojekt)**

Bedingt durch die geometrischen rechtwinkligen Kanten konnten die Ergebnisse einheitlich verglichen werden. Die linearen kontrastreichen und optimal beleuchteten Oberflächenstrukturen konnten gut verarbeitet werden und sind auch bei geringerem Ausmaß als Pixelauflösung erkennbar (Siehe Abbildung 7 und Abbildung 8).

Eine große GSD zeigt, dass die Flughöhe hoch und die räumliche Auflösung gering waren. Die GSD betrug bei U1 ca. 2,5 cm und bei U2 ca. 1,5 cm. Einige Punkte konnten genauer ermittelt werden als andere, basierend auf der Anzahl und Qualität der Bilder, auf denen sie sichtbar sind (Überlappung, Schärfe, Objektart). Je nach Abstand zum nächsten GCP und der gemittelten GSD in diesem Bereich variierten daher der Genauigkeitswert im Projekt. Die Auflösung ist bei beiden Gebieten zu gering, als dass millimetergenaue Aussagen möglich wären.

## 3.2. Datenverarbeitung

### 3.2.1. Kameraorientierung

Nach der erfolgreichen Bildaufnahme des gesamten Untersuchungsgebiets über die digitale Kamera (Siehe Kapitel 2.1), erfolgte aus diesen Bildsequenzen die Prozessierungen in meist automatisierten Teilschritten (Siehe Kapitel 2.2). Die Ausrichtung der Kamera, des Gimbals und aller Sensoren verringert negative Einflussfaktoren, wie zum Beispiel die Wanderung des Bildhauptpunktes, Veränderung der Brennweite und Radialverzeichnungen (Agisoft LLC 2019a).

Für die Ausrichtung der Bilder fand bei Agisoft Metashape und WebODM bereits in der Standardeinstellungen eine geographische Vorauswahl statt (Siehe

Tabelle 15 - Tabelle 18, Tabelle 21). Über die Vorauswahl werden nur innerhalb eines definierten Radius um den Bildmittelpunkt gelegene Bilder für die Verknüpfung mit dem jeweiligen Bild berücksichtigt. Ohne diese V wird jedes Bild mit jedem weiteren Bild verglichen und der Algorithmus versucht unabhängig von der Lage alle Bilder miteinander zu verknüpfen. Für die Kameraoptimierung wurden nach der Bildausrichtung die aus den Exif-Daten kommenden Parameter gegengeprüft und durch die Software angepasst. Bei VisualSFM und Pix4D fand keine geographische Vorauswahl statt (Siehe Tabelle 19, Tabelle 20 und Tabelle 22).

Wie die folgende Tabelle zeigt wurden sowohl bei Agisoft Metashape, als auch bei Pix4Dmapper bereits beim ersten Schritt mehrere Bilder entfernt und nicht für die weiteren Prozesse genutzt (Siehe Tabelle 5). Die im folgenden Ergebnisteil genutzten Abkürzungen U1S, U1O, U2S und U2O stehen jeweils für das erste und zweite Untersuchungsgebiet (U1/ U2) und den jeweiligen Standarddurchlauf, sowie optimierten Durchlauf (S / O) der Berechnung.

Software	U1S	U1O	U2S	U2O
<b>A Metashape</b>	454	672	597	597
<b>Pix4Dmapper</b>	777	776	594	594
<b>VisualSFM</b>	782	782	597	597
<b>WebODM</b>	782	782	597	597

**Tabelle 5: Anzahl kalibrierter Bilder pro Untersuchungsgebiet und Software**

### 3.2.2. Bildverknüpfung

Die Qualität der Bilderverknüpfung ist entscheidend für die Erstellung der Punktwolke, daher wurden für U1 und U2 die Ergebnisse dieses Schrittes verglichen. Danach erfolgte der Vergleich des durchschnittliche RMSE.

Bei Agisoft Metashape und Pix4Dmapper wird der RMSE ausgegeben, bei WebODM und VisualSFM ist keine Ausgabe möglich. Der durchschnittliche RMSE lag bei U1 ungefähr bei 0,23 und bei U2 ungefähr bei 0,14 Pixel.

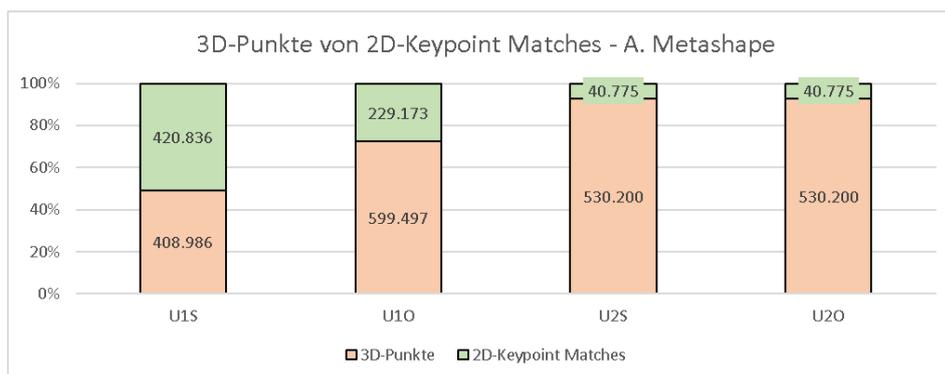
Weitere die Genauigkeit beeinflussende Faktoren sind scharfe Bilder, GCPs und eine hohe Anzahl charakteristischer Objekte auf den jeweiligen Bildausschnitten (Pix4D 2019h). Abgesehen von den GCPs waren diese Faktoren bei beiden Gebieten gegeben (Siehe Kapitel 3.1 und 3.2). Die GCPs wurden zudem in U2 für einen höheren Genauigkeitsgrad in allen optimierten Projekten eingebunden (Siehe 3.2.7).

VisualSFM wandelt die RGB-Werte in Lumen-Werte um und führt ein Up- beziehungsweise Down-Sampling der Bilder durch. Bei Speicherlimitationen werden die Bilder herunterskaliert. Inwieweit dieser Schritt die Bildverknüpfung beeinflusst, konnte nicht evaluiert werden, zu bemerken war jedoch ein extrem hoher Zeitaufwand für die Kameraorientierung und Bildverknüpfung (Siehe Kapitel 3.2.8).

### 3.2.3. Punktwolke

Die Ergebnisse der Punktwolkengenerierung wurden über gestapelte Säulendiagramme je Prozess visualisiert (Siehe Abbildung 17). Zudem wurde die Anzahl an 3D-Punkten, die für das BBA genutzt wurden im Vergleich zu den potentiellen gefundenen 2D-Keypoint Matches aufgeführt. Da diese Wertberechnung für die Passpunkte jedoch nur für Agisoft Metashape und Pix4Dmapper ausgegeben wurde, konnte in diesem Bereich kein Vergleich der vier Systeme erfolgen.

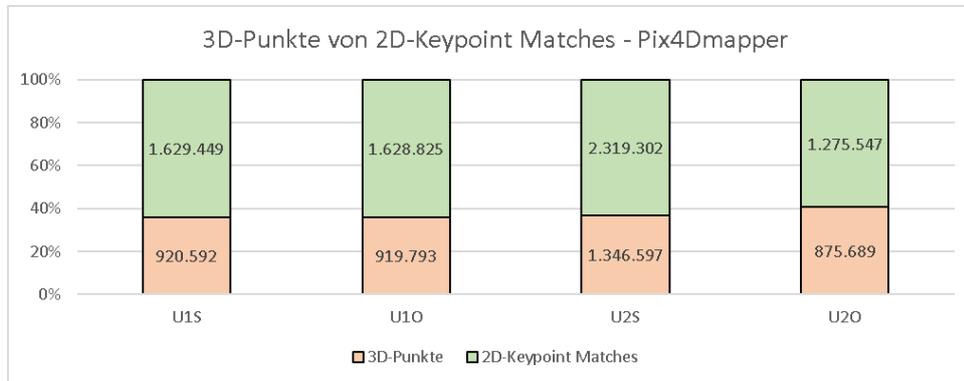
Die folgende Abbildung zeigt den Anteil der 3D-Punkte von 2D-Keypoint Matches in Agisoft Metashape (Siehe Abbildung 15). Der Anteil der 3D-Punkte ist dabei rot hervorgehoben und ergibt summiert mit dem Anteil der 2D-Keypoint Matches die Anzahl der anfangs vorliegenden Passpunkte. Auffällig ist dabei, dass bei U1S die Hälfte der Passpunkte genutzt wurde, sowie bei U1O die dreifache Menge der Passpunkte. Bei U2 wurden in Agisoft Metashape fast alle potentiellen Punkte für die Punktwolke eingebunden. Nicht genutzt für die weiteren Prozesse wurden bei U2 weniger als zehn Prozent der 2D-Keypoint Matches.



**Abbildung 15: Anteil der 3D-Punkte von 2D-Keypoint Matches in Agisoft Metashape**

Nach der gleichen Struktur wurde der Anteil der 3D-Punkte von 2D-Keypoint Matches in Pix4Dmapper gemessen (Vgl. Abbildung 16). Die Gesamtmenge der 2D-Keypoint Matches war bei Pix4Dmapper sehr viel höher, als bei Agisoft Metashape. Von den potentiellen Punkten wurden jedoch immer unter vierzig Prozent als 3D-Punkte weiterverarbeitet. Der Anteil an 3D-Punkten ist somit deutlich geringer, obgleich die Gesamtmenge der 3D-Punkte verglichen mit

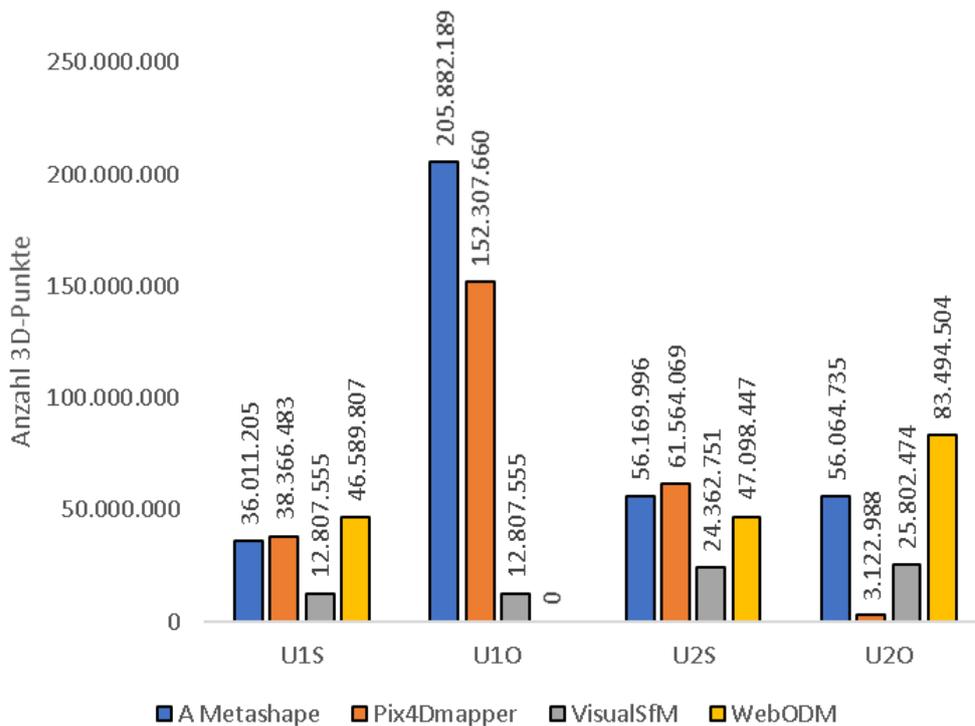
der Gesamtmenge bei Agisoft Metashape höher ist. Bei Pix4Dmapper ist die Punktzahl für die weitere Verarbeitung somit etwa doppelt so hoch, wie bei Agisoft Metashape. und bietet somit eine bessere Berechnungsbasis.



**Abbildung 16: Anteil der 3D-Punkte von 2D-Keypoint Matches in Pix4Dmapper**

Die Anteile der 3D-Punkten zu 2D-Keypoint Matches wurden weder für VisualSFM, noch für WebODM ausgegeben und konnten daher nicht verglichen werden.

Weiterhin wurde die Anzahl der Punkte in der Punktwolke verglichen (Siehe Abbildung 17). Die Anzahl der 3D-Punkte bei Pix4Dmapper weicht bei den Standarddurchläufen kaum von der Anzahl bei Agisoft Metashape ab. Bei Pix4Dmapper ist trotz des vorher festgestellten hohen Anteiles an genutzten 3D-Punkten die Gesamtzahl der Punkte in der dichten Punktwolke geringer ausgefallen, als bei Agisoft Metashape.



**Abbildung 17: Anzahl der 3D-Punkte in dichter Punktvolke**

Auffallend ist die extrem hohe Punktzahl in der Punktvolke von U1O bei Agisoft Metashape. Für die Depth Maps Generierung wurde in diesem Projekt die beste Qualität ausgewählt. Außerdem wurde bei der dichten Punktvolkengenerierung die hohe Qualität gewählt. Bedingt durch diese Konfigurationsparameter liegt nach der Berechnung für U1O in Agisoft Metashape eine sehr dichte Punktvolke vor.

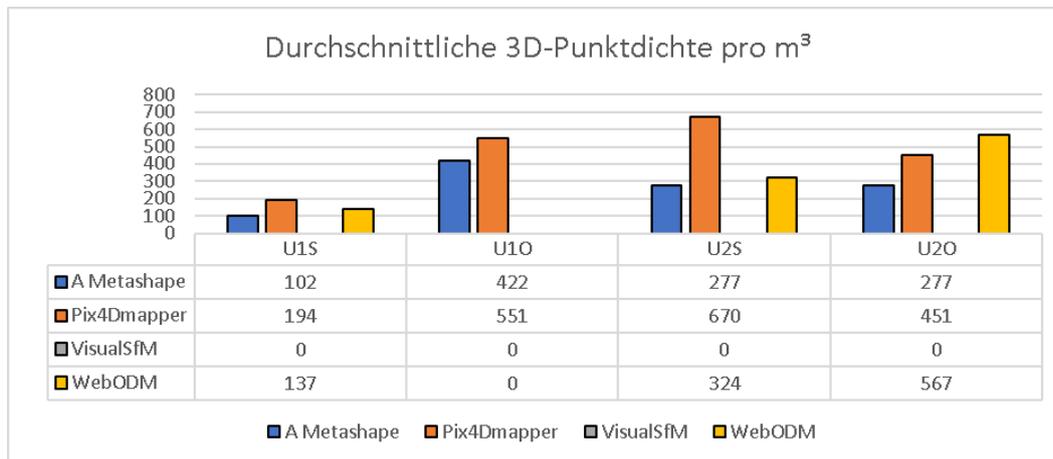
Bessere Konfigurationsparameter bei der Depth Maps Generierung und der dichten Punktvolkengenerierung führten bei U2O in Agisoft Metashape zu Prozessabbrüchen. Laut Fehlerprotokoll war der Hauptspeicher der limitierende Faktor. Aufgrund dessen wurde die mittlere Qualität beibehalten und U2O weist bei Agisoft Metashape eine geringere Dichte auf.

Bei dem optimierten Durchlauf von U2 wurde eine sehr geringe Anzahl an 3D-Punkten aus den 2D-Keypoint Matches extrahiert. Dementsprechend niedrig ist daher bei U2O die Punktzahl der dichten Punktvolke.

VisualSfM weist bei den dichten Punktvolken die niedrigste Punktzahl auf. Außer bei dem in WebODM abgebrochenen Prozess von U1O und der geringen Punktzahl von Pix4Dmapper bei U2O, sind bei VisualSfM die dünnsten Punktvolken zu vermerken (Siehe Abbildung 19). Die Open Source Software WebODM liegt bei den Standarddurchläufen

gleichauf mit den proprietären Systemen. In dem Durchlauf von U2O ist die Punktwolke von WebODM mit Abstand am dichtesten.

In einem darauffolgenden Schritt wurde die Punktwolkenqualität über einen Vergleich der durchschnittlichen 3D-Punktdichte pro Kubikmeter validiert. Für die bessere Vergleichbarkeit wurde auf ganze Zahlen gerundet (Siehe Abbildung 18).



**Abbildung 18: Durchschnittliche 3D-Punktdichte pro m<sup>3</sup> je Gebiet und Software**

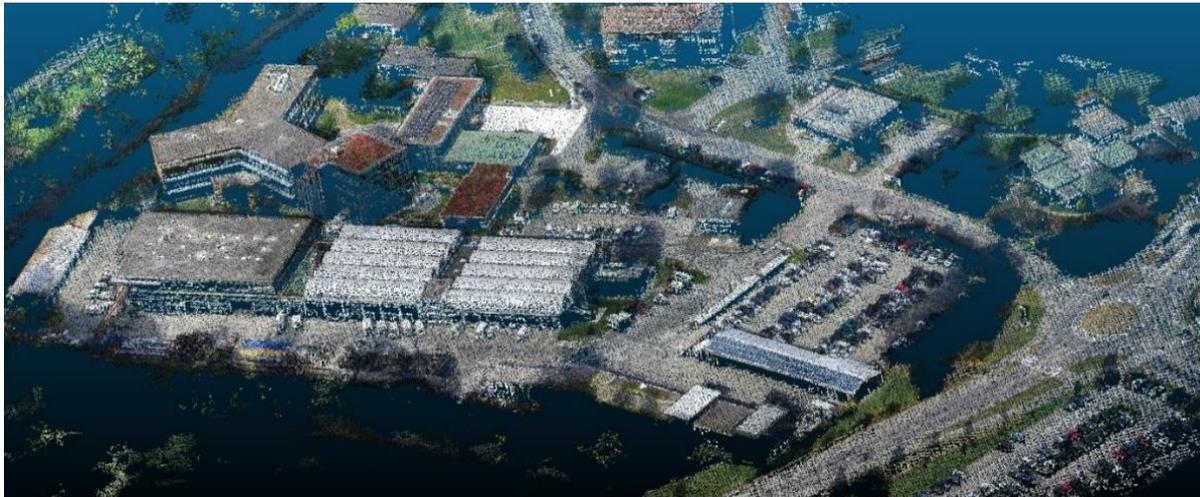
Bedingt durch die hohe Anzahl an 3D-Punkten ist die Punktdichte bei U1O höher, als bei U1S (U1S = 195 Punkte pro m<sup>3</sup>, U1O = 551 Punkte pro m<sup>3</sup>). Bei dem zweiten Untersuchungsgebiet lag bei dem optimierten Durchlauf eine niedrigere Anzahl an 3D-Punkten vor. Somit ist die Punktdichte in der optimierten Konfiguration niedriger (U2S = 670 Punkte pro m<sup>3</sup>, U2O = 451 Punkte pro m<sup>3</sup>). Verglichen mit allen Ergebnissen ist die Punktdichte bei Pix4Dmapper in U2S am höchsten.

Agisoft Metashape nutzt in allen Prozessen die dichte Punktwolke als Basis für die Erstellung des DEMs. Die Punktdichte wird in dem jeweiligen Bericht für das DEM ausgegeben und entspricht der dichten Punktwolke. Bei dem Standarddurchlauf des ersten Untersuchungsgebiets lag eine fast dreimal geringere Punktdichte, als in dem optimierten Durchlauf vor (U1S=102 Punkten pro m<sup>3</sup>, U1O=422 Punkten pro m<sup>3</sup>). Dies spiegelt sich auch in der Flächen- und Stützpunktanzahl von U1O wieder (Siehe Abbildung 21 und Abbildung 22). Bedingt durch die gleiche Konfiguration in den Prozessen von U2 ist bei Agisoft Metashape die Punktdichte von 277 Punkte pro m<sup>3</sup> identisch (Siehe Tabelle 17).

WebODM gibt die durchschnittliche Punktdichte der Punktwolke in dem Logfile aus. Bei dem Standarddurchlauf von dem ersten Untersuchungsgebiet lag WebODM zwischen den Werten von Agisoft Metashape und Pix4Dmapper. Da bei U1O keine Punktwolke erzeugt wurde, kann

der Vergleich mit U1S nicht hergestellt werden. Bei dem zweiten Untersuchungsgebiet ist die Punktdichte bei dem optimierten Durchlauf fast doppelt so hoch, wie bei dem Standarddurchlauf (U2S= 324 Punkte pro  $m^3$ , U2O= 567 Punkte pro  $m^3$ ). Der zweite Durchlauf in WebODM enthält somit die dichteste Punktwolke für U2O.

Die Punktdichte der Exportergebnisse von VisualSFM wurde nicht automatisiert in Berichten oder Logfiles ausgegeben. Auf die manuelle Berechnung der Punktdichten in VisualSFM wurde verzichtet, da die Anzahl der 3D-Punkte vorlag und eine Vergleichbarkeit somit gegeben ist. Bedingt durch die extrem niedrige Anzahl entstand eine Vielzahl an Löchern in der Punktwolke und Gebiete konnten nicht abgedeckt werden. Diese groben Fehler in der Datenbasis sind durch eine visuelle Prüfung bereits im kleinen Maßstab sichtbar (Siehe Abbildung 19). Die weitere Verarbeitung dieses Ergebnisses in den externen Anwendungen war daher kaum möglich.

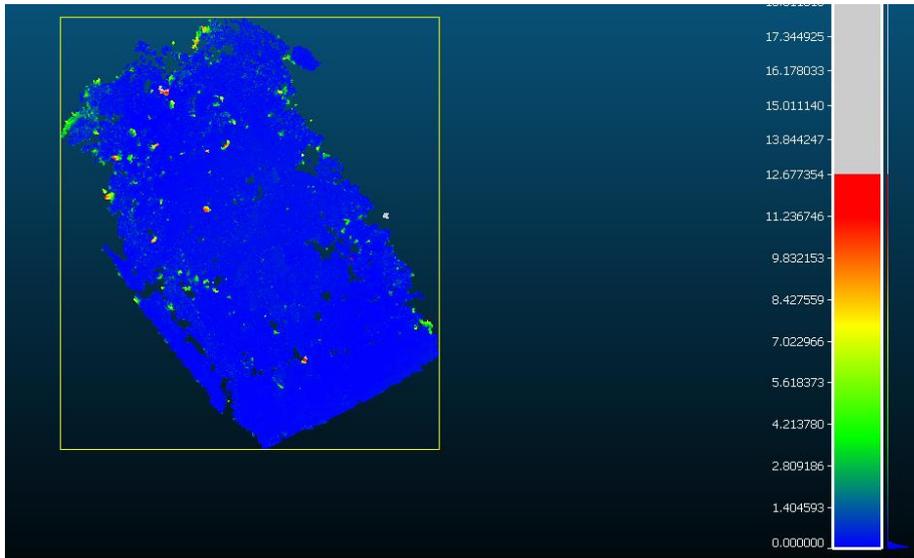


**Abbildung 19: Punktwolke von U2S aus VisualSFM in CloudCompare**

Für den Abgleich der Punktwolken untereinander wurde, wie bereits in Kapitel 2.7.2 beschrieben, je Untersuchungsgebiet und Durchlauf pro Software in CloudCompare ein Vergleich durchgeführt.

Bedingt durch verschiedene Ausgabeformate, unterschiedliche Koordinatenreferenzsysteme und fehlende geographische Transformation bei VisualSFM, war die Vergleichbarkeit der vier Systeme nicht gegeben. Ein Vergleich der Punktwolken für U1S, U1O, U2S und U2O konnte nicht durchgeführt werden. Lediglich der Vergleich von U1S und U1O aus dem System Pix4Dmapper konnte durchgeführt werden (Siehe Abbildung 20). Grund dafür war der mehrfache Absturz von CloudCompare bei der Berechnung. Die „Gaussian-Curves“ sollten die

globale Fehlerverteilung pro Punktwolke visualisieren. Diese konnten aufgrund der Abstürze ebenfalls nicht exportiert werden.



**Abbildung 20: Punktwolkenvergleich (U1S und U1O, Pix4Dmapper)**

In dem Vergleich der Punktwolken von Pix4Dmapper fällt auf, dass bei U1 kaum Abweichungen oder Ausreißer zwischen den Punktwolken vorhanden sind. Belegt wird diese Aussage durch das Höhenprofil des DEMs, in dem kaum Abweichungen in Richtung X-, Y- und Z-Richtung festzustellen sind (Siehe Abbildung 30). Lediglich bei dem zweiten Untersuchungsgebiet ist eine starke Abweichung in Z-Richtung zu vermerken (Siehe Kapitel 3.2.6).

#### 3.2.4. 3D-Modell

Für den Vergleich der Ergebnisse der 3D-Modellierung wurden die absoluten Mengen der Flächen und Stützpunkte nach der Triangulation je Prozess miteinander verglichen (Siehe Abbildung 21 und Abbildung 22).

Das folgende Diagramm zeigt, dass vor allem bei Agisoft Metashape eine extrem hohe Anzahl an Flächen und Stützpunkten bei U1S, U2S und U2O vorliegt und somit eine sehr fein modellierte Oberfläche entsteht. Verglichen mit den sehr niedrigen Werten bei WebODM und VisualSFM ist bei Pix4Dmapper eine hohe Anzahl an Flächen und Stützpunkten in jedem Durchlauf zu vermerken. Vor allem bei U1O ist die Menge mit Abstand höher, als in den anderen drei Systemen und übertrifft das Ergebnis von Agisoft Metashape um mehr als das Doppelte. Bedingt durch den vorherigen Absturz des Durchlaufs und dem Wechsel der 3D-Modellberechnung über Depth Maps, statt der dichten Punktwolke ist bei Agisoft Metashape in U1O die Anzahl der Flächen- und Stützpunkte extrem niedrig (Siehe

Tabelle 15).

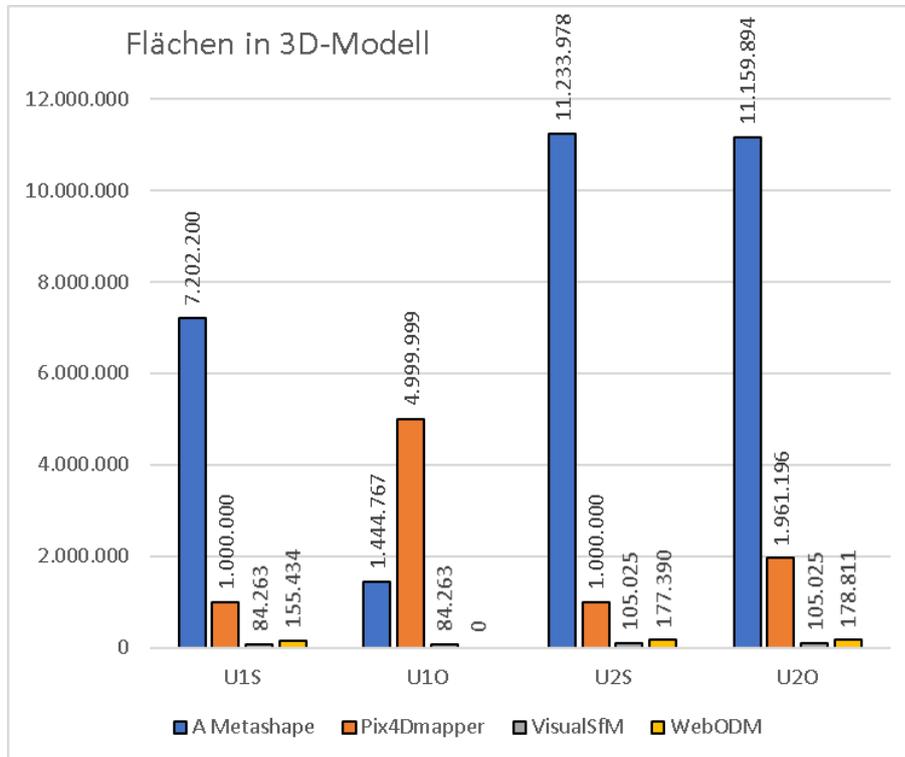
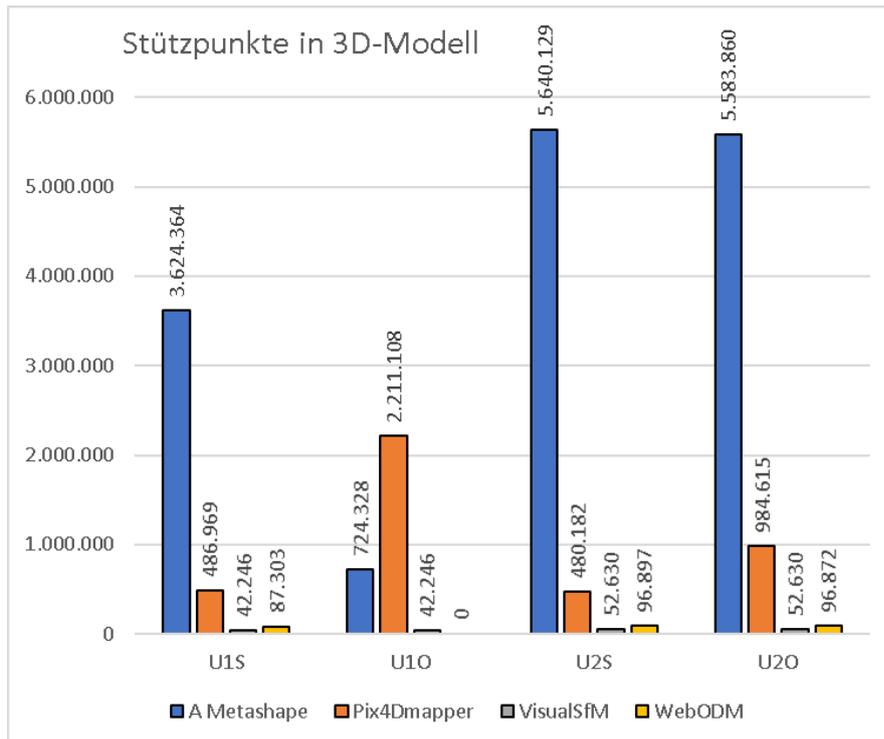


Abbildung 21: Flächen des 3D-Modells



**Abbildung 22: Stützpunkte des 3D-Modells**

Da in WebODM die dichte Punktwolkenrekonstruktion bei der optimierten Durchführung von dem ersten Untersuchungsgebiet abgebrochen werden musste, ist für U1O kein 3D-Modell erzeugt worden. Der Parameter „mesh-octree-depth“ ist bei WebODM eine Schlüsselvariable für die Vermaschung aus der Punktwolke über den Screened Possion Reconstruction Algorithmus (Kazhdan/Hoppe 2013). Sowohl dieser Parameter als auch die Anzahl der Dreiecke für die Vermaschung wurden hochgesetzt (Siehe Tabelle 21). Eine Testreihe mit dem Parameter „mesh-point-weight“ ergab, dass der Standardwert die besten Ergebnisse liefert. Bei Deaktivierung werden die Kanten schlecht dargestellt, bei Hochsetzen werden die Flächen verformt.

Da die Erstellung von einer Punktwolke der letzte Exportschritt ist, der in VisualSfM durchgeführt werden kann, ist die Erstellung aller folgenden Exporte nicht erfolgt und es entstanden kein 3D-Modell, DSM oder Orthophoto (Siehe Kapitel 3.2.3). Für VisualSfM wurde wie unter Kapitel 2.6 beschrieben in CloudCompare ein Mesh erzeugt. Der folgende Screenshot von dem U2O-Projekt zeigt den immensen Unterschied zwischen der lückenhaft vorliegenden dichten Punktwolke und dem daraus erstellten groben 3D-Modell (Siehe Abbildung 23). Bedingt durch die schlechte Qualität konnte dieses kaum für weitere Verarbeitungen, z.B. Orthomosaik oder DEM genutzt werden.



**Abbildung 23: Punktwolke und 3D-Modell von U2S aus VisualSFM in CloudCompare**

Neben dem Vergleich der groben Oberflächenstruktur wurde zudem das Verhalten bei bewegten Objekten untersucht. Bei den genutzten zwei Kameras mit CMOS-Sensor (Complementary Metal Oxide on Silicon) kann ein stärkeres Bildrauschen und der „Rolling-Shutter“-Effekt durch die bandweise Belichtung der Punkte auftreten. Dieser Effekt trat unabhängig von der genutzten Anwendung bei bewegten Objekten auf. Die verursachten Lagefehler auf den Bildern mussten nach der Erfassung über die Photogrammetrie-Prozesse neutralisiert werden. Sichtbar ist dies an den zwei folgenden Abbildungen, die jeweils das 3D-Modell von dem Standardprojekt in Agisoft Metashape und ein zugehöriges Originalbild mit bewegtem Objekt darstellen. Rot gekennzeichnet sind in diesen Abbildungen die bewegten Objekte, in diesem Fall Autos auf der Straße, die in den Originalbildern mit unterschiedlichen Positionen erfasst wurden (Siehe Abbildung 24 und Abbildung 25).

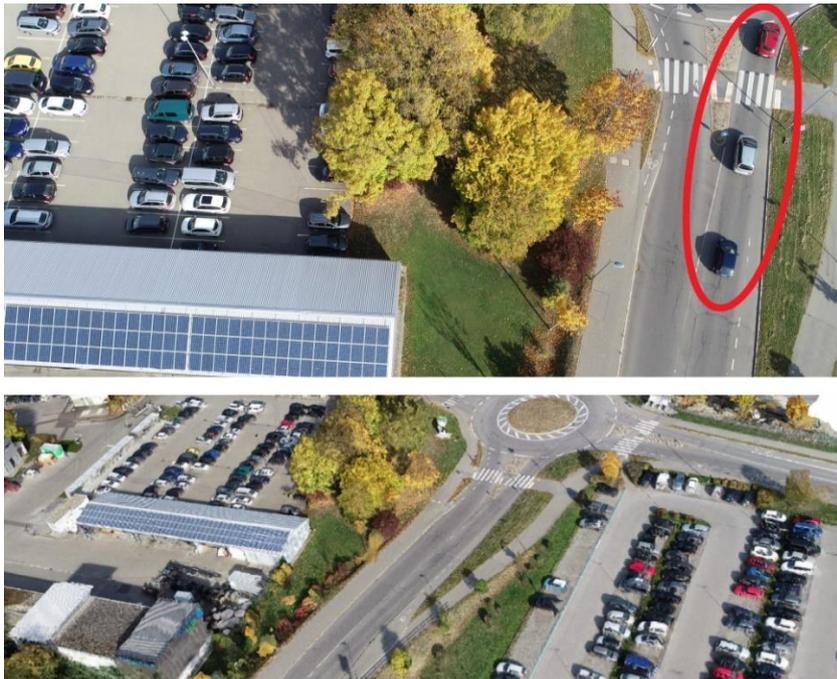


Abbildung 24: Solaranlagen und entfernte bewegte Objekte in 3D-Modell bei U2 (Oben Ausschnitt aus Originalbild mit Autos, unten 3D-Modell Export aus Metashape ohne Autos)

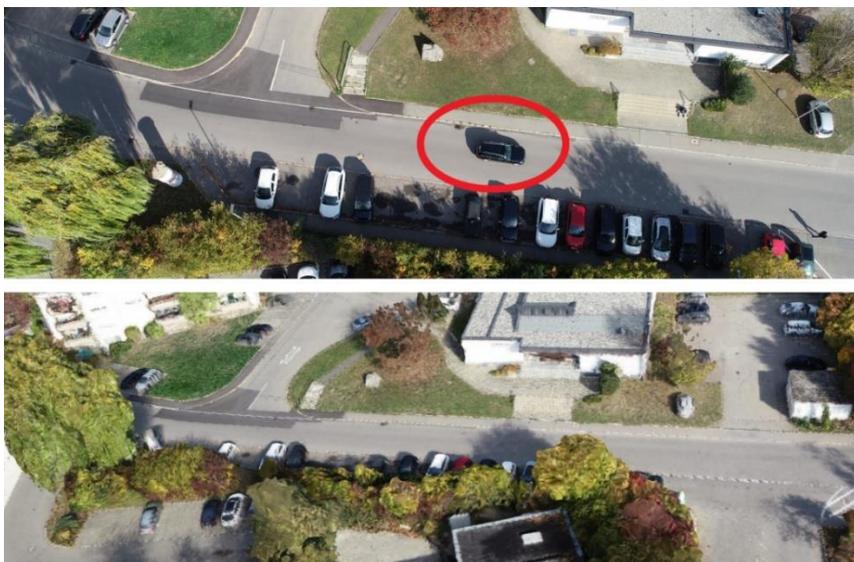


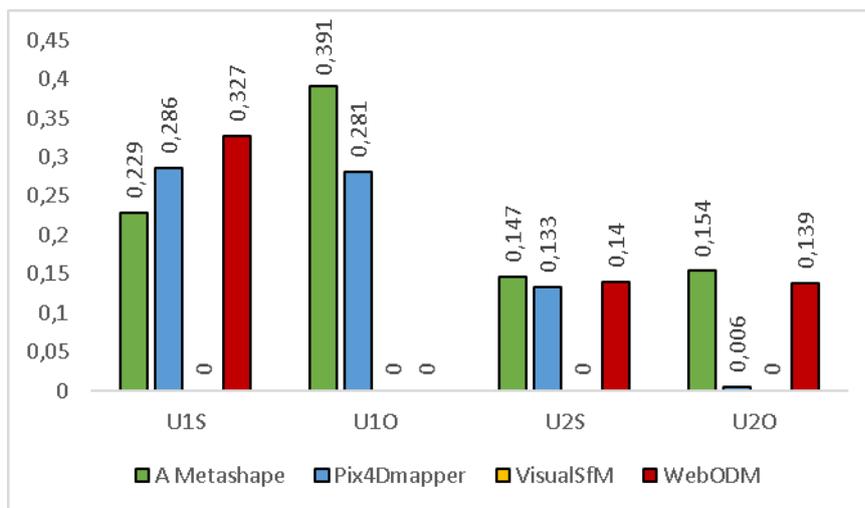
Abbildung 25: Entfernte bewegte Objekte in 3D-Modell bei U2 (Oben Ausschnitt aus Originalbild mit Objekten, unten 3D-Modell Export aus Agisoft Metashape ohne Objekte)

Mehr zu der Qualität der Oberflächenstruktur und Umgang mit verschiedenen Objekttypen findet sich in dem Exportvergleich der Orthomosaike (Siehe Kapitel 3.2.5).

### 3.2.5. Export - Orthomosaik

Für den Vergleich der Orthomosaik wurden die absoluten Flächengrößen und Auflösung der Exporte je Prozess miteinander verglichen. Es sollten zwölf Orthomosaik erstellt werden. Der Vergleich der Höhenprofile aus den jeweiligen vier Anwendungen erfolgte pro Untersuchungsgebiet und Durchlauf für das DSM (Siehe Kapitel 3.2.6). Da nach dem Punktwolkenexport der Prozess in VisualSfM beendet war, liegt für diesen Schritt kein Exportprodukt aus VisualSfM vor (Siehe Kapitel 2.6).

Die Größe der Exportergebnisse variierte stark. Die folgende Tabelle zeigt die jeweiligen Flächengrößen der Orthomosaik in Quadratkilometern gerundet auf drei Nachkommastellen (Siehe Abbildung 26). Da die Ausgabe in den jeweiligen Berichten von der eigenen Messung abwich und teils keine Werte aus Berichten der Software vorlagen, erfolgte die einheitliche Berechnung der Flächengröße je Durchlauf über das Plugin r.report in QGIS. Je größer die Fläche, desto mehr Bilder konnten erfolgreich miteinander verknüpft werden - die Auflösung der dargestellten Objekte nahm jedoch zum Rand hin stark ab.



**Abbildung 26: Flächengröße des Orthomosaiks aus r.report in QGIS (km<sup>2</sup>)**

Das Orthomosaik wurde in Agisoft Metashape bei dem Standardprojekt (U1) auf Basis der Dreiecksvermaschung erzeugt. Bei dem optimierten Projekt von U1 wurde das Orthomosaik auf Basis des DEM, für eine langsamere, aber genauere Berechnung erzeugt. Da die Berechnungsbasis bei U20 das DEM war, wurde die Texturierung nicht erstellt und taucht daher im Zeitvergleich nicht auf (Siehe Kapitel 3.2.8). Pix4Dmapper und WebODM zeigten ähnliche Flächengrößen des Orthomosaiks. Die jeweiligen Unterschiede sind bedingt durch die teils abweichenden Umgrenzungen in dem jeweiligen Randbereich der Modelle. WebODM hat

beispielsweise bei U1S ein größeres Randgebiet mit in das Orthophoto aufgenommen. Das abgebildete Gebiet ist jedoch kaum realitätsgetreu abgebildet und weist Lücken auf.

Die Auflösung ist, soweit beim visuellen Vergleich erkennbar, pro Untersuchungsgebiet fast identisch (Siehe Tabelle 1). Partielle Abweichungen von der ermittelten GSD waren pro untersuchtem Gebietstyp zu vermerken. Vor allem in den Randbereichen und den kaum erfassten Bereichen waren Verzerrungen zu erkennen und die Auflösung lag unter der GSD.

#### 3.2.5.1. UG 1 - Campingplatz

Die Ergebnisse der Standardverarbeitung und der optimierten Verarbeitung sind grob geographisch übereinanderliegend und weichen in X-, Y- und Z-Richtung kaum voneinander ab, beziehungsweise sind bei jeder Software ähnlich stark verschoben um den Faktor X-, Y- und Z. Da die dichte Punktwolkenrekonstruktion bei der optimierten Durchführung in WebODM gestoppt werden musste, ist für U1O kein Orthophoto vorhanden.

Erster Vergleichspunkt für die realitätsgetreue Objektwiedergabe waren die von Solarzellen bedeckten Gebäude in den Orthophotos von U1. Bei dem Vergleich dieser Flächen fielen kaum Unterschiede zwischen den verschiedenen Anwendungsergebnissen auf. Sowohl die Standardverarbeitung, als auch die optimierte Verarbeitung erzeugten eine vollständige Abbildung des untersuchten Bildausschnitts und wiesen keine bemerkenswerten Abweichungen, z.B. verschwommene Umgrenzungen der Solarzellen, auf.

Zweiter Vergleichspunkt war der Abgleich schlecht belichteter Regionen, beispielsweise Schattenbereiche unter den Baumkronen. Sowohl bei Agisoft Metashape, als auch bei WebODM sind die Baumschatten in der Standardansicht extrem ausgeprägt und somit weniger Bereiche der Geländeoberfläche sichtbar. In dem jeweiligen optimierten Projektergebnis sind dafür jedoch mehr Gebiete unterhalb der Baumkronen erkennbar, beispielsweise Wege, deren Abgrenzungen in der Standardansicht nicht vollständig erkenntlich waren. Bedingt durch weniger Verknüpfungspunkte in den Randgebieten des Untersuchungsgebiets, fehlen diese Gebiete. Im Vergleich zu dem Ergebnis von Pix4Dmapper fielen die Ergebnisse sowohl für U1S, als auch für U1O in Agisoft Metashape und WebODM besser aus.

#### 3.2.5.2. UG 2 - Firmenstandort

Die Ergebnisse der Standardprojekte sind geographisch übereinanderliegend und fast gleich verortet, bzw. sind gleich stark verschoben um den Faktor X-, Y- und Z. Die Ergebnisse der

optimierten Konfigurationen mit jeweiligen GCPs unterscheiden sich hingegen voneinander und weichen sichtbar voneinander ab. Dies spiegelt sich auch in dem Vergleich der Höhenprofile wieder (Siehe 3.2.6 und 3.2.7).

Wie bereits bei U1 wurden zunächst die Solarzellen untersucht, um die realitätsgetreue Oberflächenabbildung auf den Orthophotos zu analysiert. Danach erfolgte ein Abgleich der bewegten Objekte auf dem Untersuchungsgebiet. Bei der Software Agisoft Metashape ist die Auflösung im Bereich des untersuchten Dachs bei dem optimierten Verarbeitungsergebnis sehr viel schlechter - das Bild ist verschwommen, jedoch sind dafür auf dem gesamten Gebiet weniger bewegte Objekte zu erkennen. Diese wurden bei der Verarbeitung entfernt, dazu gehören sowohl Autos, als auch Fahrräder und Fußgänger. Es sind weniger Artefakte oder Schatten von Objekten in U2O sichtbar, als es bei U2S der Fall war. Hier waren nach der Berechnung weiterhin viele Artefakte sichtbar.

Bei dem Ergebnis von WebODM sind sowohl bei der Standardverarbeitung, als auch bei der optimierten Verarbeitung die Objektgrenzen, zum Beispiel von den Solarzellen oder Containern wellenhaft und nicht realitätsgetreu abgebildet. Diese Verzerrung ist bei allen Kanten gut sichtbar und bedingt durch das 3D-Modell als Berechnungsbasis. Die Darstellung der bewegten Objekte ist bei beiden Ergebnissen von WebODM nicht perfekt, die teilweise abgebildeten Fahrzeugteile sind bei beiden Orthophotos als Artefakte sichtbar, jedoch in geringerem Ausmaß als bei der Standardverarbeitung von Agisoft Metashape. Im Vergleich zwischen der optimierten und der Standardeinstellung von U2 liefert die Standardeinstellung bei ODM bessere Ergebnisse bezogen auf die Auflösung, realitätsgetreue Abbildung und Entfernen der bewegten Objekte.

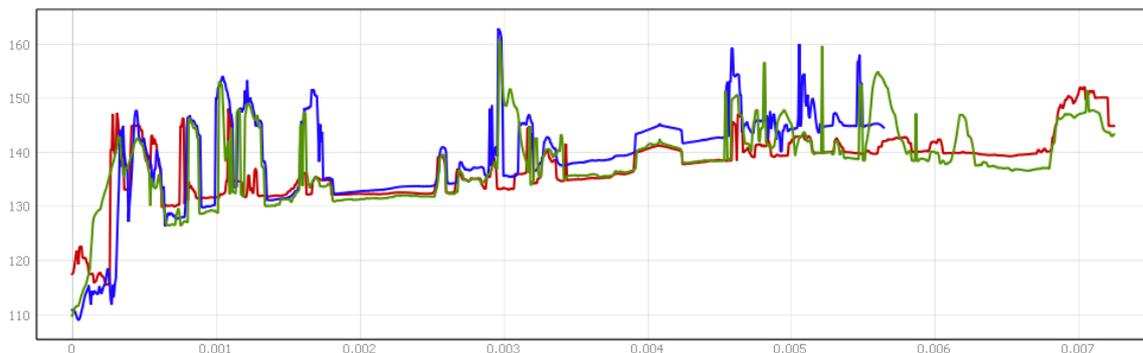
Bei der Standardeinstellung von Pix4Dmapper ist die Auflösung sehr hoch und eine realitätsgetreue Abbildung gegeben - die Solarzellen und Gebäudegrenzen weisen kaum Fehler auf. Die bewegten Objekte wurden fast vollständig entfernt, jedoch sind bei größeren Objekten noch Artefakte in Form von transparent durchscheinenden Objekten sichtbar, z.B. Autoumriss. Das DSM von Pix4Dmapper aus dem optimierten Durchlauf zeigt nur die Hälfte des Untersuchungsgebiets und ist daher qualitativ nicht auswertbar (Siehe Abbildung 36).

### 3.2.6. Export - DSM

Für den Vergleich der DSM-Exporte sollten die absoluten Flächengrößen und Auflösungen der Exporte je Prozess miteinander verglichen werden. Da die durchschnittliche 3D Punktdichte

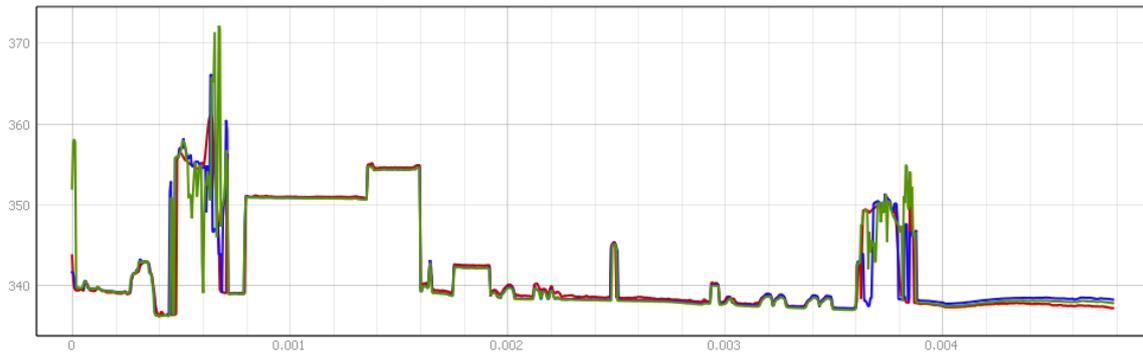
der Punktwolken bereits verglichen wurde und die Punktdichte des DSMs nur bei Agisoft Metashape extrahiert wird, wurde von dem Vergleich der Punktwolke abgesehen.

Die Visualisierung der Genauigkeit der Höhenberechnung pro DSM je für das erste und zweite Untersuchungsgebiet wurde über die folgenden Profile ermöglicht (Siehe Abbildung 27 und Abbildung 28). Ähnlich zu Draeyer und Strecha ist hier die Abweichung zwischen den Modellen sichtbar, nur dass in diesem Fall keine Punkte verglichen wurden, sondern ein Schnitt durch das Gelände erfolgte, der repräsentativ für das jeweilige DSM-Exportprodukt steht (Draeyer/Strecha 2014).



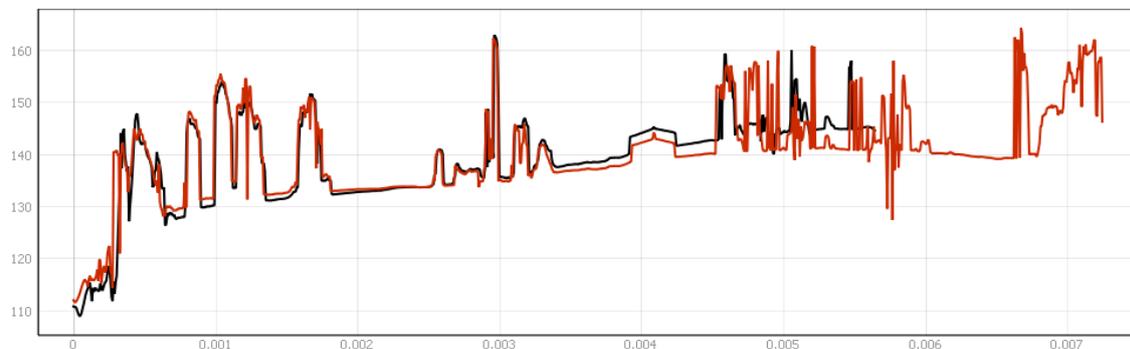
**Abbildung 27: Höhenprofil von DSM bei U1S (blau = Agisoft Metashape, rot = Pix4Dmapper, grün = WebODM)**

In dem ersten Höhenprofil wurden das DSM von Agisoft Metashape (blau), Pix4Dmapper (rot) und WebODM (grün) für U1S verglichen. Es fällt auf, dass in jedem Modell Abweichungen und Ausreißer erkennbar sind, die vor allem bei Strukturen auf dem Gelände bemerkbar sind. Baumgruppen und einzelne Bäume sind extrem unterschiedlich in Ausmaß und Höhe der Baumkrone. Die Geländeoberfläche hingegen wird auf freien Flächen fast identisch abgebildet, lediglich bei Agisoft Metashape ist nach rechts hin eine steigende Höhenverschiebung und Abbruch des Profils sichtbar. Unregelmäßigkeiten bei flachen Oberflächen, wie zum Beispiel dem Häuserdach in der Mitte des Profils und eine starke Abweichung bei dem Graben im linken Bereich des Höhenprofils sind bei WebODM zu vermerken. Das Höhenprofil von Pix4Dmapper verhält sich ähnlich dem von WebODM. Bei den Baumgruppen wurden bei Pix4Dmapper jedoch viele Bäume nicht korrekt aufgenommen, fehlen dementsprechend oder weisen eine andere Höhe auf.



**Abbildung 28: Höhenprofil von DSM bei U2S (blau = Agisoft Metashape, rot = Pix4Dmapper, grün = WebODM)**

In dem zweiten Höhenprofil wurde, wie bereits bei U1S, ebenfalls das DSM von Agisoft Metashape (blau), Pix4Dmapper (rot) und WebODM (grün) für U2S verglichen. In dieser Darstellung sind kaum Abweichungen der Profile zu vermerken. Alle Systeme haben die Geländeoberfläche und unbewegte Objekte, wie zum Beispiel Gebäude und Autos fast identisch aufgenommen. In den Baumgruppen an beiden Randbereichen sind vor allem bei WebODM Ausreißer zu vermerken, die eine extreme Höhe der Bäume suggerieren. Da bei Agisoft Metashape für das erste Untersuchungsgebiet sowohl für die optimierte (rot), als auch die Standardkonfiguration (schwarz) ein DSM vorlagen wurde der Vergleich des Profils innerhalb der Software durchgeführt (Siehe Abbildung 29).



**Abbildung 29: Höhenprofil von DSM aus U1 bei Agisoft Metashape ( rot = optimale Konfiguration, schwarz = Standardkonfiguration)**

Das Modell der Standardkonfiguration bricht im rechten Bereich, wie bereits vorab vermerkt ab und ermöglicht an dieser Stelle keinen Vergleich (Siehe Abbildung 27). Betrachtet man die optimierte Konfiguration ist zu erkennen, dass keine Verschiebung vorhanden ist und der korrekte Oberflächenverlauf von U2O abgebildet wird. Negativ anzumerken sind jedoch die Vielzahl an Ausreißern in dem optimierten Modell, die vor allem im rechten Profilbereich zu erkennen sind, da extreme Höhenausreißer unter der Geländeoberfläche sichtbar sind. Vor

allem im Vergleich mit den anderen Systemen fallen hier die fehlerhaften Modelloberflächen auf.

Für Pix4Dmapper wurden ebenfalls für das erste Untersuchungsgebiet sowohl die optimierte (rot), als auch die Standardkonfiguration (schwarz) durchgeführt und ein Vergleich des DEM-Profiles ermöglicht (Siehe Abbildung 30).



**Abbildung 30: Höhenprofil von DSM aus U1 bei Pix4Dmapper (rot = optimale Konfiguration, schwarz = Standardkonfiguration)**

Abweichungen von dem Profil zwischen den zwei Prozessen sind hier kaum zu erkennen. In dem linken Randbereich sind bei dem optimierten Durchlauf fehlende Bäume abgebildet und ein höherer Detailgrad gegeben.

Da bei der optimierten Konfiguration von U1 in WebODM kein DSM erstellt wurde, ist ein Vergleich dieses Profils nicht möglich. Ebenso verhält es sich mit der Software VisualSFM - da hier kein DSM-Export möglich ist, konnte kein Vergleich über ein Höhenprofil erfolgen.

### 3.2.7. GCPs

Vier GCPs wurden bei dem zweiten Untersuchungsgebiet für die Ausrichtung des Modells genutzt. Es wurde auf eine gleichmäßige Verteilung der GCPs pro Anwendung geachtet. Jedoch sind zwischen den jeweiligen Anwendungen große Abweichungen in der Gesamtanzahl zu beobachten (Siehe Tabelle 6).

Software	Nr.1	Nr.2	Nr.3	Nr.4	Gesamt
Agisoft Metashape	39	46	42	59	<b>186</b>
Pix4Dmapper	41	58	41	70	<b>210</b>
VisualSFM	32	29	36	38	<b>135</b>
WebODM	15	16	20	21	<b>72</b>

**Tabelle 6: Anzahl und Verteilung der GCPs pro Projekt von U2**

Bei dem ersten Versuch die GCPs für die Berechnung in VisualSFM zu berücksichtigen, wurden 135 Marker eingetragen. Die GCPs werden bei VisualSFM nicht für die grobe Punktwolkengenerierung oder BBA genutzt. Es erfolgt daher keine Reoptimierung der Punktwolke im eigentlichen Sinne, sondern eine nachträgliche 3D-Transformation nach den neuen GCP-Angaben. Nach dem ersten Durchlauf lagen der RMSE bei 63,372 und der durchschnittliche absolute Fehler bei 61,996. Da die gesetzte Lage der Punkte durch das manuelle Referenzieren im Bild maßgebliche Qualitätsmängel aufwies, wurde ein zweiter Projektdurchlauf gestartet. Dabei wurden weniger Punkte aufgenommen, jedoch auf eine extrem genaue Verortung der Punkte geachtet und gegebenenfalls für die Bearbeitung ungenügende Bilder ausgelassen. Der RMSE der GCPs lag nach dem zweiten Durchlauf bei 45,643 und der durchschnittliche absolute Fehler bei 43,428. Somit lag eine geringfügige Verbesserung im Vergleich zu dem ersten Durchlauf vor. Die Fehlerwerte waren jedoch weiterhin zu hoch.

Bei Pix4Dmapper werden sowohl die absoluten Werte für den Abgleich mit den GCPs, als auch die relativen Werte für die Qualitätsanalyse innerhalb des Modells mitgegeben. Diese sind sowohl bei U1, als auch bei U2 geringer als die absoluten Werte. Die absoluten Genauigkeitsfehler bei Agisoft Metashape waren mindestens doppelt so hoch, wie bei Pix4Dmapper. Laut Draeyer und Strecha sollten sowohl die absoluten, als auch die relativen Genauigkeitsfehler der GSD entsprechen oder um ein vielfaches größer sein (ebd., S. 8). Dies war nicht der Fall, somit sind keine Abweichungen sichtbar, da sie unter einem Pixel liegen.

Über manuelle Kontrolle der Bilder und GCPs wurden Ausrichtungsfehler bedingt durch verdeckende Objekte über dem GCP erkannt. Diese erzeugen bei allen Modellen höhere Fehlerwerte in X-, Y- und Z-Richtung. Die Lage der GCPs und die Abweichung bei dem optimierten Projekt von U2 wurde in Metashape visuell aufbereitet. Der Z-Fehler wird durch die Ellipsenfarbe dargestellt. X-/Y-Fehler werden durch die Ellipsenform dargestellt. Die geschätzten GCP-Standorte sind mit einem Punkt markiert (Siehe Abbildung 31). Visualisiert wird bei der folgenden Abbildung von U2O, dass der Z-Fehler bei 2,9 m und die Abweichung von X und Y bei 0,24 m liegen. Die Qualität der GCPs in den anderen Anwendungen konnte nur visuell ermittelt werden.



Abbildung 31: GCP-Lage und Fehlerschätzung bei Agisoft Metashape (U2O)

Der Aufwand für die Erfassung, Markierung und Einbindung der GCPs variiert je Anwendung sehr stark. Bei Agisoft Metashape und Pix4Dmapper werden nach der Angabe von einigen wenigen, manuell definierten Markierungen die weiteren potenziellen GCPs auf den Bildern erkannt und vorgeschlagen. Bei VisualSFM und WebODM müssen alle Markierung aktiv definiert werden. In beiden Systemen ist dafür eine graphische Oberfläche vorgesehen.

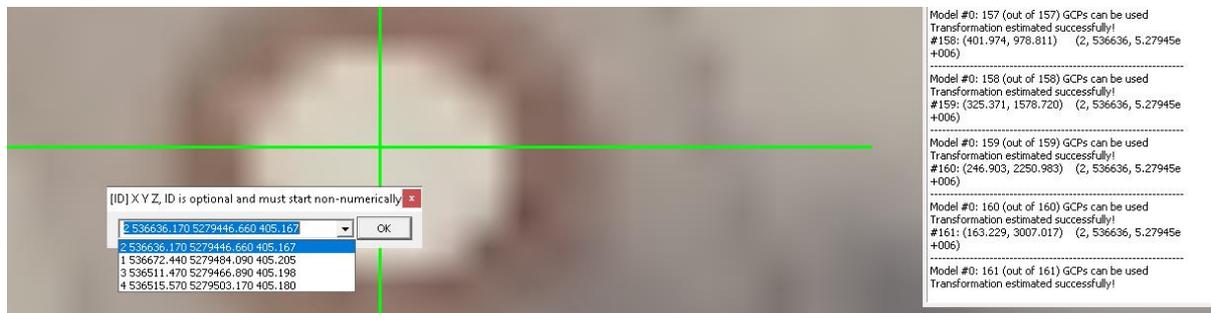
Bedingt durch einen fehlenden eigenen Hintergrunddienst und Abstürzen war die GCP-Erfassung in der Benutzeroberfläche von WebODM nicht möglich. Eine GCP-Liste musste daher nach der Aufnahme der Punkte in einem externem QGIS Projekt über die Importfunktion übertragen werden. Die Erstellung der GCP-Liste als Datei war somit mit erheblichem Aufwand verbunden. Ähnlich wie bei VisualSFM musste dazu jedes Bild einzeln betrachtet werden und der jeweilige GCP pro Bild verwiesen werden. Für die händische Verknüpfung der Originaldaten mit den GCPs wurden die Bilder jeweils in QGIS geladen und der Pixelwert für X und Y je GCP mit Bildname in der Textdatei für die Integration in WebODM vermerkt (Siehe Abbildung 32).

```
+proj=utm +zone=32 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs
```

X-/Y-/Z-Kordinate von GCP	X-/Y-Pixelpunkt in Bild	Bildname
536515.57 5279503.17 405.18	5254.09 390.234	DJI_0050.JPG
536515.57 5279503.17 405.18	752.510 2804.152	DJI_0030.JPG
536515.57 5279503.17 405.18	781.876 2138.908	DJI_0035.JPG
536515.57 5279503.17 405.18	806.459 969.418	DJI_0033.JPG
536511.47 5279466.89 405.198	1260.383 3208.598	DJI_0033.JPG
536511.47 5279466.89 405.198	1238.133 2501.812	DJI_0033.JPG

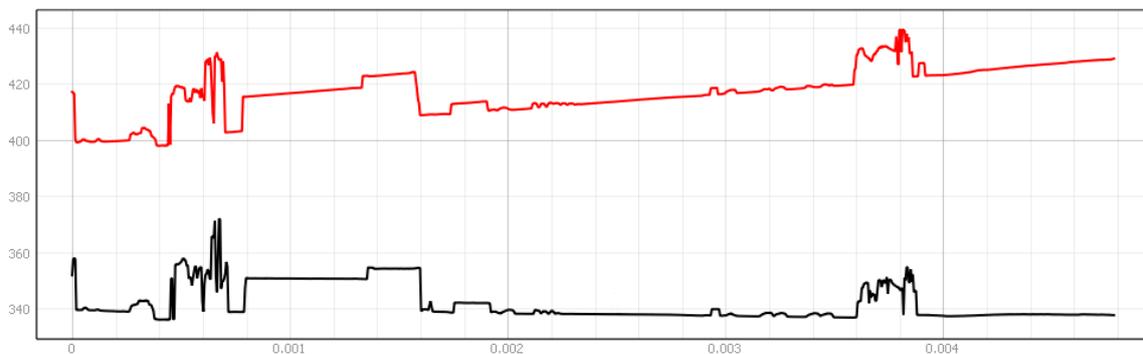
Abbildung 32: GCP-Textdatei mit Bildverweis für WebODM

In VisualSFM erfolgte das Setzen der GCPs pro Bild in der 2D-Ansicht, z.B. auf dem Zentrum eines Kanaldeckels (Siehe Abbildung 33). Bei dem Wechsel in die 3D-Ansicht wurde das Modell bereits an die vermerkten GCP ausgerichtet. Jedes Bild muss somit einzeln betrachtet und bei Abbildung des Punktes muss der GCP verwiesen werden.



**Abbildung 33: Setzen der GCPs in 2D-Ansicht von U2 bei VisualSFM**

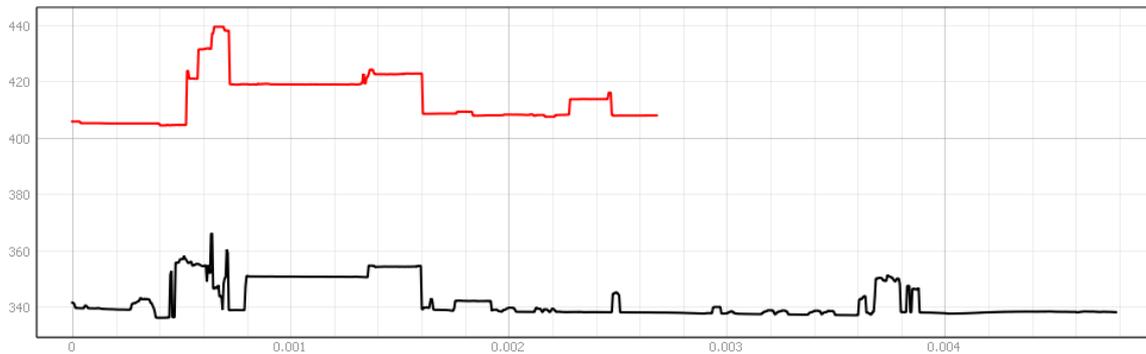
Nach der Durchführung der weiteren Verarbeitungsschritte wurde das Höhenprofil der DSMs pro Software in der Standardkonfiguration ohne GCPs, sowie in der optimierten Konfiguration mit GCPs verglichen. Die folgenden Abbildungen zeigen den Höhenunterschied in Metern nach der Ausrichtung über die Referenzpunkte (rote Linie), sowie der vorher ermittelten Höhe (schwarze Linie). Sie zeigen, dass die Höhendifferenz bei jedem Modell ca. 60-80 Meter beträgt (Siehe Abbildung 34, Abbildung 35 und Abbildung 37).



**Abbildung 34: Höhenprofil von DSM aus U2 bei Agisoft Metashape (rot = optimale Konfiguration, schwarz = Standardkonfiguration)**

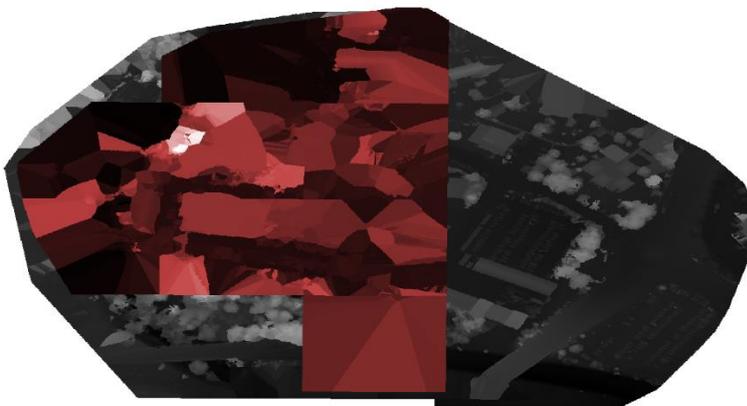
Der Vergleich der DEM-Höhenprofile aus Agisoft Metashape wurde für das zweite Untersuchungsgebiet sowohl mit der optimierte (rot), als auch Standardkonfiguration (schwarz) durchgeführt (Siehe Abbildung 34). Die GCP-Ausrichtung führt zu einem nach oben hin verschobenem Modell und einer nach oben hin ausgerichteten Verzerrung im rechten Bereich des Modells. Problematisch ist nicht nur die Höhenverzerrung, sondern auch die Verschiebung der Gebäudewände, welche bereits im linken Bereich liegenden Gebäude ersichtlich ist.

Gegebenenfalls ist diese Verzerrung bedingt durch die Verteilung der GCPs und dem Fehlen eines Punktes in diesem Bereich.



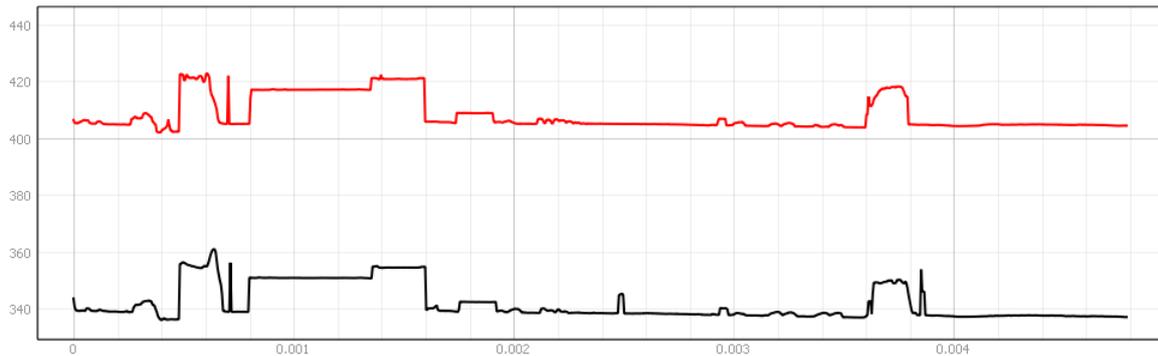
**Abbildung 35: Höhenprofil von DSM aus U2 bei Pix4Dmapper (rot = optimale Konfiguration, schwarz = Standardkonfiguration)**

Wie bereits vorab bei Agisoft Metashape wurde der Vergleich des DSMs von U2 bei dem optimierten (rot), als auch bei dem Standarddurchlauf (schwarz) in Pix4Dmapper durchgeführt (Siehe Abbildung 35). Die Erstellung des DSMs bei der optimierten Konfiguration war nicht für das gesamte Untersuchungsgebiet möglich, somit kann nur die linke Profilhälfte verglichen werden (Siehe Abbildung 36).



**Abbildung 36: DSM aus Pix4Dmapper von U2S und U2O (rot = Optimale Konfiguration, Schwarz = Standardkonfiguration)**

Bei U2O wurde in Pix4Dmapper die originale Bildgröße für die Punktwolke genutzt und eine hohe „3D Textured Mesh Auflösung“ gewählt. Sowohl in dem Höhenprofil, als auch in der Ansicht des DSMs ist ersichtlich, dass der geringe Detailgrad der Oberfläche bei U2O durch die geringe Auflösung des DEMs bedingt ist und kaum Objekte oder Oberflächenstrukturen sichtbar sind.



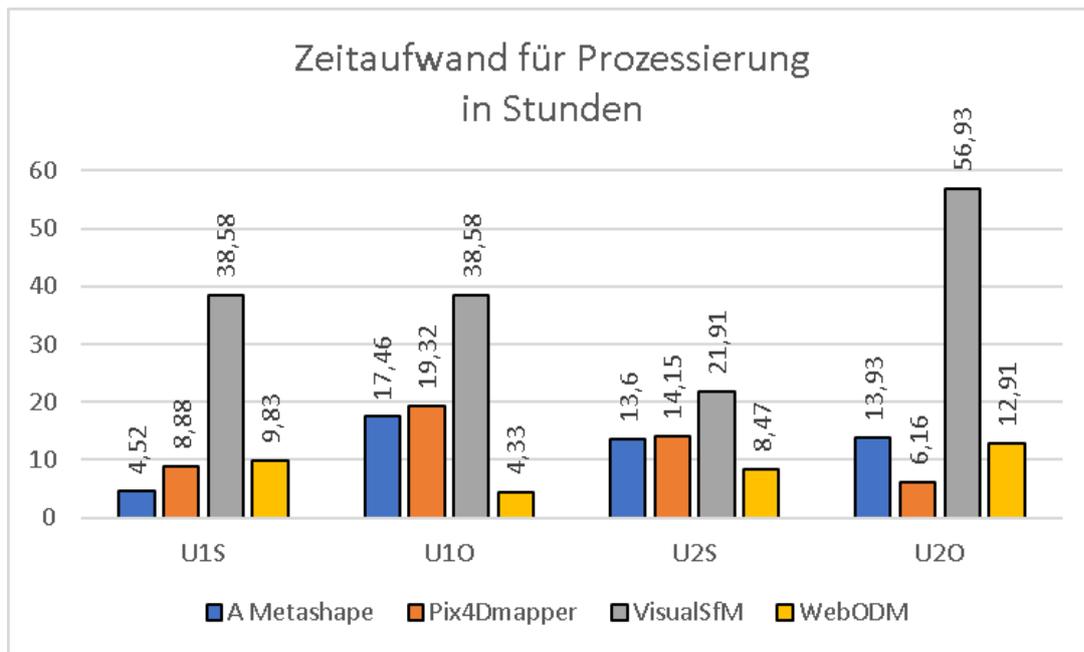
**Abbildung 37: Höhenprofil von DSM aus U2 bei WebODM (rot = optimale Konfiguration, schwarz = Standardkonfiguration)**

Zuletzt wurde der Höhenprofilvergleich für das zweite Untersuchungsgebiet sowohl für die optimierte (rot), als auch die Standardkonfiguration (schwarz) in WebODM durchgeführt (Siehe Abbildung 37). Wie bereits bei Agisoft Metashape wurde auch hier bei der optimierten Konfiguration zwar die Höhendifferenz beglichen, jedoch wurden Objekte auf der Oberfläche, beispielsweise die Bäume im rechten Bereich nicht abgebildet. Extreme Ausreißer konnten nicht beobachtet werden.

Da nach dem Punktwolkenexport der Prozess in VisualSFM beendet war, liegt für diesen Schritt kein Exportprodukt vor.

### 3.2.8. Performance / Zeitaufwand

Die folgenden Säulendiagramme visualisieren die jeweiligen Zeitaufwände der Prozesse je Verarbeitungsdurchlauf und summieren die relativen Zahlenwerte der einzelnen Arbeitsschritte. Für den Vergleich der Gesamtaufwände der Prozesse wurden die einzelnen Schritte summiert und in dem folgenden Diagramm der Aufwand in Stunden verglichen (Siehe Abbildung 38). Die Nutzung der hochqualitativsten Einstellungen war in allen optimierten Projekten nicht möglich, die Abbrüche dieser Prozesse wurden nicht gemessen. Berücksichtigt wurde bei dem Vergleich der erfolgreich beendete Prozess für die Standard- und möglichst optimierten Durchläufe (U1S, U1O, U2S und U2O). Der erste Prozess mit den Standardeinstellungen lief ohne Schwierigkeiten in jeder Anwendung durch.



**Abbildung 38: Zeitaufwand für Prozessierung in Stunden je Software und UG**

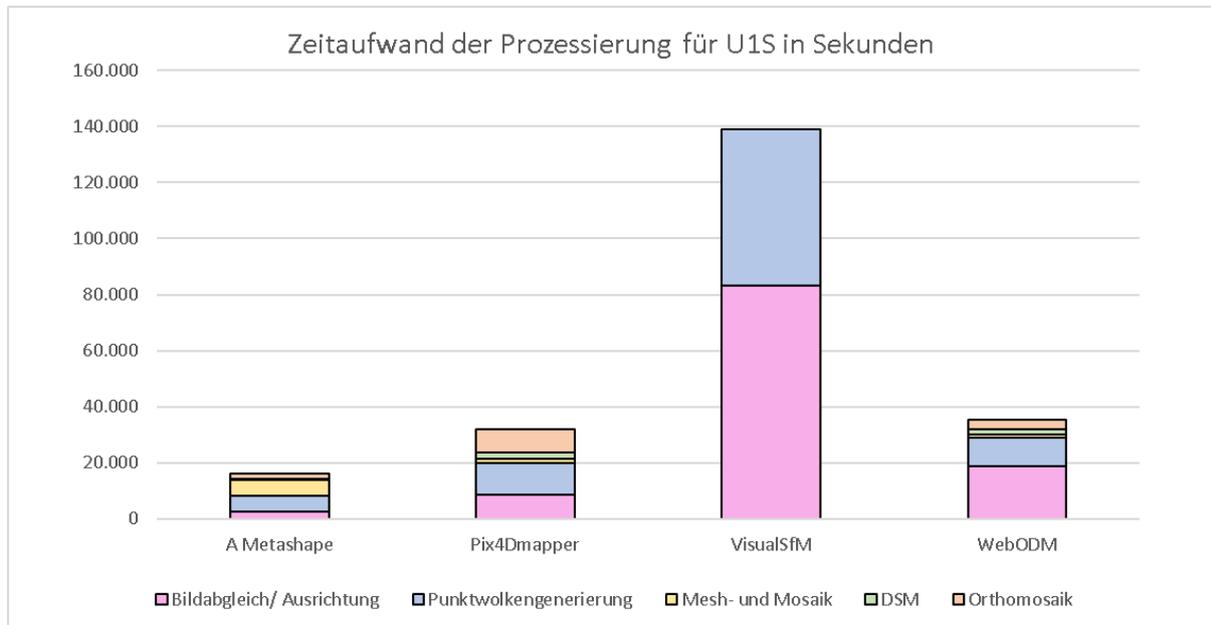
Der Standarddurchlauf hat außer bei Pix4Dmapper in dem zweiten Untersuchungsgebiet und bei WebODM in dem ersten Untersuchungsgebiet weniger Zeit in Anspruch genommen, als der optimierte Durchlauf. Bei WebODM brach der Prozess bei U1O nach dem Bildabgleich/-ausrichtung ab, daher ist der gesamte Zeitaufwand extrem gering (Siehe Abbildung 40).

Besonders hervorzuheben ist der hohe Zeitaufwand der Berechnungen von VisualSfM im Vergleich zu den anderen Prozessen und Systemen. Die Zeitaufwände von Metashape, Pix4Dmapper und WebODM variieren zwar um einige Stunden, sind jedoch unter 20 Stunden angeordnet und decken abgesehen von wenigen Abbrüchen den gesamten Prozess ab. Die Prozesse von VisualSfM sind außer bei U2S deutlich über der 20 Stunden Grenze und decken dabei nur die Schritte der Bildausrichtung und Punktwolkenerstellung ab. Der Zeitaufwand ist also exorbitant höher, trotz geringer Ergebnismenge.

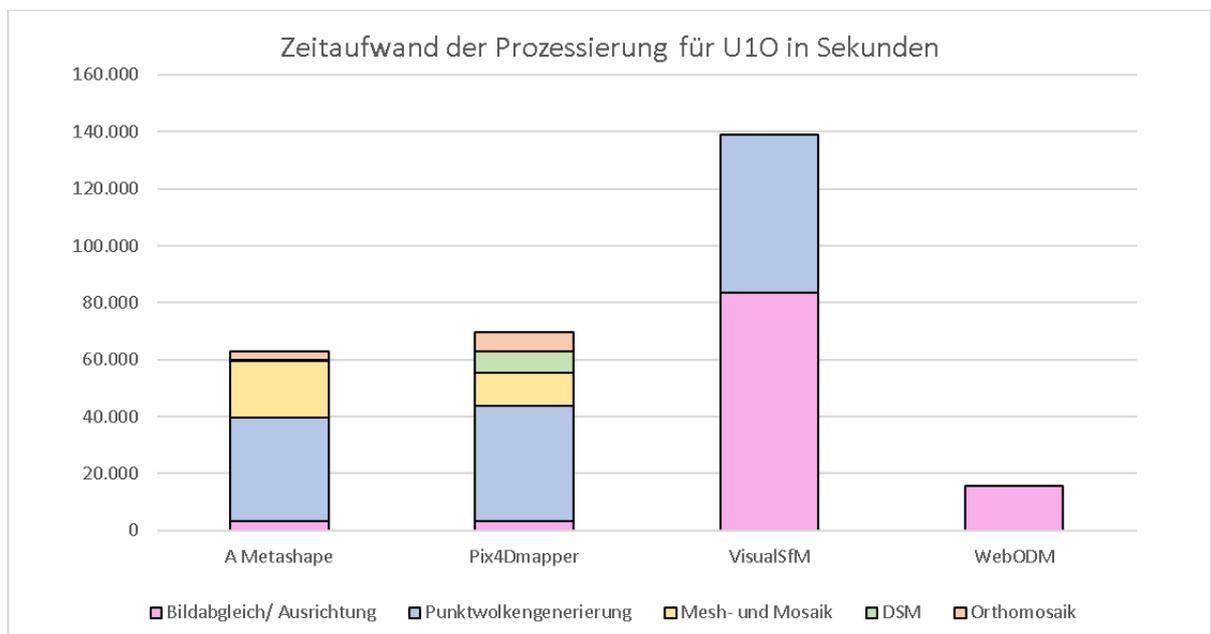
Der Zeitaufwand für die Standardberechnung lag mit den Prozessen von VisualSfM im Durchschnitt bei 15 Stunden, ohne VisualSfM bei 10 Stunden. Der Zeitaufwand für die optimierte Berechnung lag mit den Prozessen von VisualSfM im Durchschnitt bei 21 Stunden, ohne VisualSfM bei 12 Stunden.

Im Vergleich der einzelnen Systeme ist der Zeitaufwand bei WebODM durchschnittlich mit ca. 9 Stunden am geringsten. Zu beachten ist dabei der Abbruch bei U1O nach der Bildausrichtung in WebODM. Danach folgen Agisoft Metashape und Pix4Dmapper mit durchschnittlich ca. 12 Stunden. Bei VisualSfM liegt der durchschnittliche Zeitaufwand bei ca. 39 Stunden.

Für die genaue Analyse der einzelnen Prozesse dient die tabellarische Auflistung der Werte je Prozessschritt im Anhang (Siehe Tabelle 24). Die Angabe von Null dient dem Verweis auf einen nicht durchgeführten oder abgebrochenen Prozess. Die enthaltenen Werte wurden über gruppierte Balkendiagramme in den folgenden vier Abbildungen visualisiert (Siehe Abbildung 39, Abbildung 40, Abbildung 41 und Abbildung 42).



**Abbildung 39: Zeitaufwand der Prozessierung für U1S**



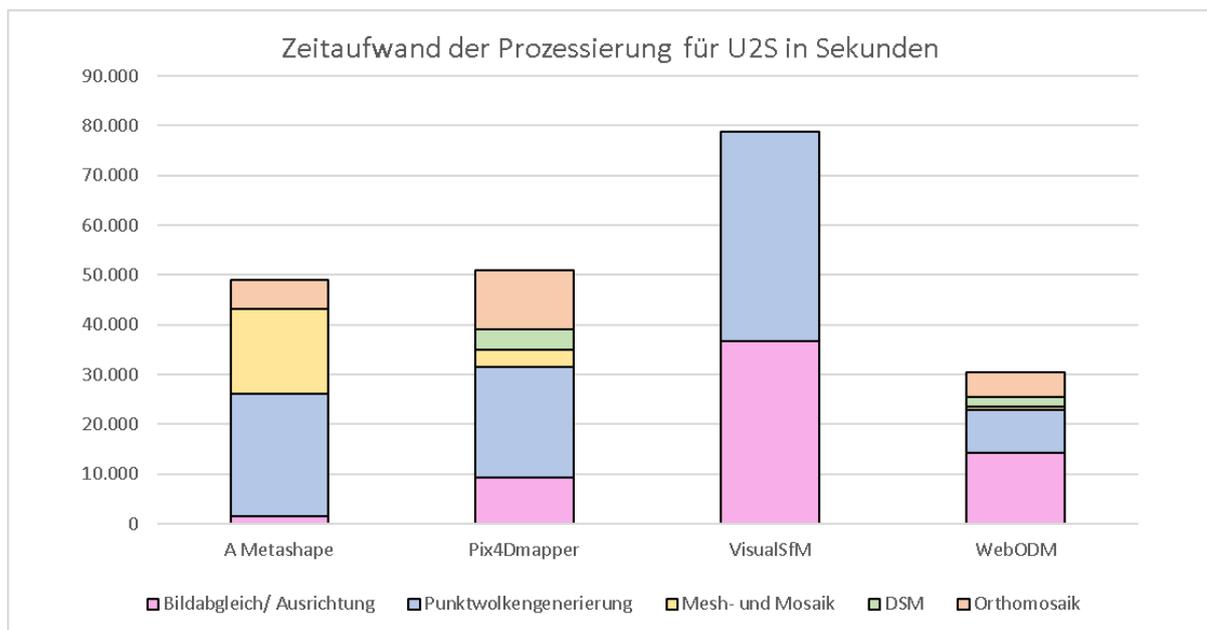
**Abbildung 40: Zeitaufwand der Prozessierung für U10**

Die geographische Vorauswahl beschleunigte die Prozesse bei Agisoft Metashape und WebODM (Siehe Kapitel 3.2). Da die Lage der Bilder und somit die Ausrichtung dank der

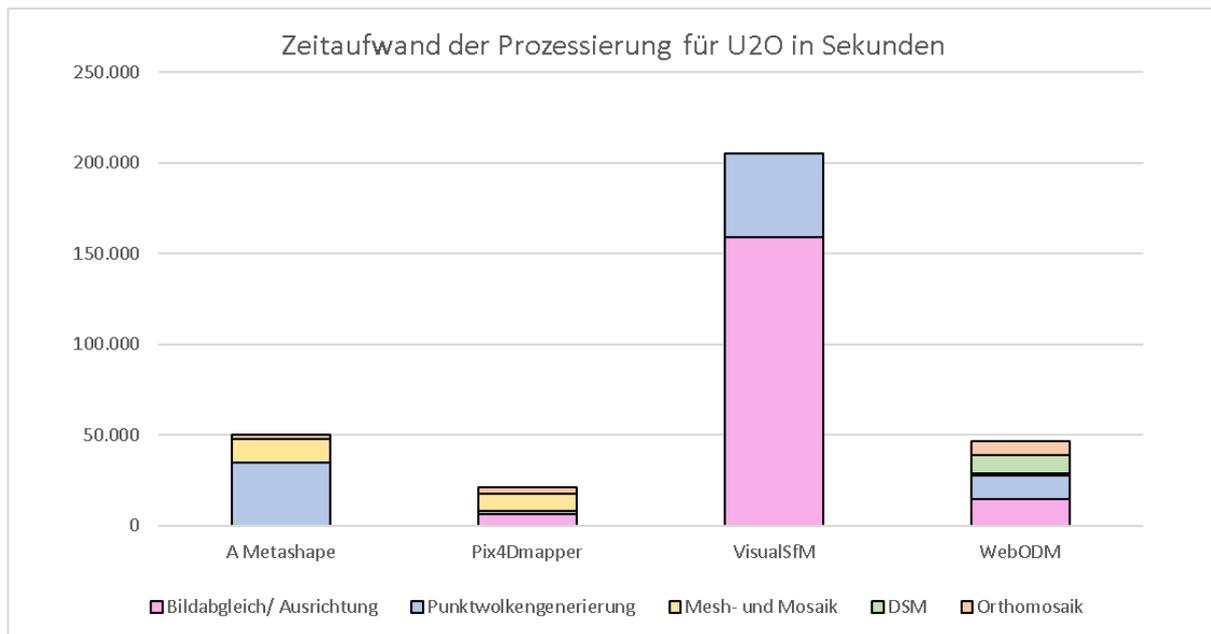
EXIF-Daten bekannt war, konnte man auf die Verknüpfung aller Bilder miteinander verzichten. Der optimierte Durchlauf (U10) bei WebODM führte nach der Bildausrichtung zum Abbruch, somit wurde hier nur der erste Prozessschritt vermerkt.

Die Verarbeitungsaufwände sind bei VisualSfM gleich, da keinerlei Optimierungsmöglichkeiten die Ergebnisse verbesserten. Bei den Versuchen die Parameter anzupassen, brach die Software die Prozesse ab (Siehe Tabelle 22). Anzumerken ist, dass trotz der langen Berechnungszeit bei beiden Standarddurchläufen in VisualSfM kein Prozessabbruch.

Trotz der, im Vergleich zu Agisoft Metashape, schnelleren Berechnung des Meshs und Mosaiks ist Pix4Dmapper nicht am schnellsten bei der Prozessierung von U10. Wenngleich die Punktwolkengenerierung ähnlich lang dauerte, wurde sowohl bei der DSM-, als auch bei der Orthomosaik-Generierung ein längerer Zeitraum benötigt. Somit liegt Agisoft Metashape bezogen auf den zeitlichen Gesamtaufwand der Verarbeitung bei dem ersten Untersuchungsgebiet vorne.



**Abbildung 41: Zeitaufwand der Prozessierung für U2S**



**Abbildung 42: Zeitaufwand der Prozessierung für U2O**

Die zwei obigen Abbildungen visualisieren den Zeitaufwand der einzelnen Schritte für den Standarddurchlauf und den optimierten Durchlauf des zweiten Untersuchungsgebiets (Siehe Abbildung 41 und Abbildung 42). Agisoft Metashape weist bedingt durch die hohe Ausgabequalität des 3D-Modells und hoher Punktzahl der Punktwolke (Siehe 3.2.4) sehr viel längere Berechnungszeit bei dem Mesh- und Mosaik auf, führte jedoch sehr viel schneller den Bildabgleich/-ausrichtung aus. Besonders zu bemerken ist die fast identische Dauer von Agisoft Metashape und Pix4Dmapper.

Die einzelnen Aufwände bei dem optimierten Durchlauf wurden in Pix4Dmapper nicht im Report ausgegeben und mussten manuell erfasst werden. Der Zeitaufwand der Prozesse verhält sich bei U2S ähnlich zu U1S, lange dauerte vor allem die Punktwolkengenerierung und der Bildabgleich/-ausrichtung. Der schnelle Durchlauf der Mesh- und Mosaikgenerierung bei U2O liegt bei Pix4D an dem Abbruch des Prozesses (Siehe Abbildung 36) und der somit der kleineren zu berechnenden Gebietsgröße. Die Aufwände für die Punktwolkengenerierung und der gesamte Zeitaufwand sind bei dem zweiten Durchlauf von U2 in Pix4Dmapper verglichen mit den vorherigen Prozessen und anderen Systemen extrem gering.

Ein fast identischer Zeitaufwand konnte bei den beiden Schritten Bildabgleich/-Ausrichtung und Punktwolkengenerierung in VisualSfM vermerkt werden. Im Gegensatz dazu war der Aufwand für den ersten Prozessierungsschritt in dem zweiten Durchlauf (U2O) exorbitant höher. Die Ausrichtung der Bilder dauere in U2O grob viermal so lang wie in dem Standarddurchlauf ohne GCPs.

Ein extremer Zeitunterschied konnte auch bei WebODM festgestellt werden. In dem optimierten Durchlauf hat die Generierung des DEMS zehnmals so lange gedauert, wie bei dem Standarddurchlauf.

### 3.2.9. Hardwareauslastung

Der verarbeitende PC nahm die Rolle eines technischen Hilfsmittels ein. Der Fokus war auf die untersuchten Anwendungen, die eingesetzte UAV und die erzielten Resultate gerichtet. Deshalb und zwecks besserer Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde auf die nachträgliche Leistungssteigerung durch Übertakten von RAM, Graphik- und Zentralprozessor verzichtet. Da in dieser Arbeit das Augenmerk auf die Umsetzung der Prozesse als „normaler Nutzer“ gelegt wurde, sind weitere Komponenten gezielt nicht mit einbezogen worden.

Pro Berechnungsdurchlauf musste der verfügbare Speicherplatz beachtet werden. Vor allem bei der automatischen Erzeugung von Ausgabeprodukten, wie dem Orthomosaik (Pix4D) oder der Ablage von Zusatzdateien pro Bild (VisualSFM) entstanden oft große Datenmengen, die aufgrund der verwendeten Prozesse zu Projektabbrüchen führten. Die Auslagerung von Projekten auf einen Sekundärspeicher war durch die Speicherlimitationen ein zeitaufwändiges Muss.

Allgemein lässt sich sagen, dass bei der Punktwolkengenerierung, Texturierung und Vermaschung die Kapazität des Zentralprozessors vollumfänglich genutzt wurde und der Hauptspeicher ebenfalls vollständig ausgelastet wurde. Der Sekundärspeicher und die Graphikprozessoreinheit nehmen im Rahmen dieser Berechnung eine untergeordnete Rolle ein.

Für den Export von DSM, Orthomosaik und weiteren Ergebnissen wird der Zentralprozessor kaum und die Graphikprozessor nicht benötigt. Vor allem relevant ist in diesem Prozess der Sekundärspeicher – die Geschwindigkeit dieser bestimmt die Dauer des Verarbeitungsschrittes (Siehe Kapitel 3.2.8). Limitierender Faktor war hier desweiteren der RAM. Für die Erstellung der Punktwolken wurde kaum der Zentralprozessor, Hauptspeicher und der Sekundärspeicher genutzt. Hier stellte sich der Graphikprozessor als ein entscheidender Faktor heraus. Die Beschleunigung der Prozesse über den Graphikprozessor wird derzeit bei ODM noch nicht unterstützt, daher sind die Graphikkarten in dieser Software weniger relevant für die Prozessgeschwindigkeit (Sprague/Toffanin 2018; Mather/Dakota 2017).

Die Kombination von Zentral- und Graphikprozessor erfolgt bei VisualSFM nur bei der Generierung der Feature-Listen, also bei der Aufnahme der Passpunkte. Die Aktivierung der Graphikprozessor-Nutzung sollte bei VisualSFM den Vorteil bieten, dass der Bildabgleich

schnell erfolgen kann, die Tiefenkarte qualitativ hochwertig rekonstruiert wird und die spätere Vermaschung eine gute Qualität aufweist (Wu 2013b). Belegt durch den hohen Zeitaufwand der Prozesse ist ein schneller Durchlauf nicht erfolgt, sowie eine gute Vermaschung bzw. hohe Punktzahl der Punktwolke nicht gegeben (Siehe Kapitel 3.2.3 und 3.2.8). Aufgrund der Nutzung der gleichen Kamera bei der Primärdatenerfassung haben alle Bilder bereits die gleiche Größe und müssen nicht skaliert werden. Verbunden mit einem Down-Sampling der Bilder und den genannten Optimierungsversuchen wurde jedoch kein besseres Ergebnis erzielt. Bei der SIFT-Merkmalserkennung mit Lowe's Algorithmus werden die Bilder ebenfalls auf die doppelte Größe hochskaliert und sollten somit, wie auch bei den anderen Anwendungen zu besseren Ergebnissen führen. Die Aktivierung von Lowe, statt VLFeat führte jedoch zum Absturz, vermutlich wegen Limitationen hinsichtlich von Graphik- und Zentralprozessor. Die Vorschläge der Dokumentation den Parameter `param_model_auto_saving` zu nutzen und die Speicherlimitierung zu entfernen über den Parameter `"-nomc"` führten zu keinem verbesserten Ergebnis. Ein Absturz wurde durch die zusätzliche Anpassung der drei Parameter `„maximum_working_dimension“` und `„param_bundle_full_iteration/-frequency“` ausgelöst. Diese sollten zu einer erhöhten Punktzahl im Modell, sowie einer schnelleren Rekonstruktionsgeschwindigkeit führen. Der Versuch die Prozessierungszeit über die Parameter `„param_asynchronous_write“` und `„param_bundle_full_frequency“` zu optimieren führte zu einem Abbruch des Projekts.

Laut dem Benutzerhandbuch von Agisoft Metashape soll die Nutzung des Graphikprozessors vor allem bei der Bildverknüpfung, Tiefenkartenerstellung und Generierung der Vermaschung zu schnelleren Verarbeitungen führen (Agisoft LLC 2019a, S. 2). Die gemessenen Aufwände belegen, dass der Prozess `„Mesh- und Mosaik“` bei Agisoft Metashape im Vergleich zu den anderen Systemen am längsten gebraucht hat. Bei dem ersten Schritt `„Bildabgleich/ Ausrichtung“` war Agisoft Metashape durchaus am schnellsten und nutzte dabei den Graphikprozessor (Siehe Kapitel 3.2.8).

Wie bereits in dem Methodenteil vermerkt, sind die Prozesse von Agisoft Metashape mit dem Skript für die Projektaufteilung öfters abgebrochen (Siehe Kapitel 2.3). Da das Skript hauptsächlich Zentralprozessor und Arbeitsspeicher auslastet, und nur teilweise Prozesse auf den Graphikprozessor auslagert, kommt es hier bei rechenintensiven Berechnungen auch nach der Aufteilung der Gebiete zu Abbrüchen.

### 3.3. Qualitätsanforderungen

Die folgende Tabelle führt die Ergebnisse eines qualitativen Vergleichs der vier Anwendungen in Bezug auf die Anforderungen aus Kapitel 2.7.1.1 auf (Siehe Tabelle 7). Die einzelnen Faktoren wurden mit einer Skala von 0-3 bewertet und erlauben einen signifikanten Vergleich und Priorisierung der Ergebnisse. Die Vergabe von einer Null steht für das vollständige Fehlen der Anforderung. Ein Punkt steht für eine ausreichend erfüllte Anforderung. Zwei Punkte für eine gut erfüllte Anforderung und drei Punkte für eine zu vollster Zufriedenheit erfüllte Anforderung. Die maximale Punktzahl beläuft sich auf 69 Punkten. Eine hohe Punktzahl steht für eine sehr gute Umsetzung der Qualitätsanforderungen.

Qualitätsanforderung	Pix4Dmapper	Agisoft Metashape	Visual SFM	WebODM
<b>Gestaltung und Ergonomie</b>				
Highlight	3	1	0	1
Anordnung	3	2	2	1
Lesbarkeit	3	3	2	3
Farbliche Markierung	3	3	0	2
Sprache (DE)	3	3	0	0
<b>Benutzerfreundlichkeit und Benutzbarkeit</b>				
Verständliche Reihenfolge	3	3	0	1
Aufwand Erlernen komplexer Funktionen	3	2	1	2
Aufwand Verständlichkeit, Erlernbarkeit und Bedienbarkeit	3	2	1	2
Hilfetexte	3	3	1	2
Rückmeldung über Erfolg/ Misserfolg	3	3	2	3
Konstruktive Fehlermeldungen	3	3	0	2
<b>Dokumentation</b>				
Installationsanleitung	3	3	1	2
API-Dokumentation	0	3	0	3
Ausführliche, verständliche Benutzerdokumentation	3	3	1	1
Aktuelle Hilfe über Diskussionsforen	3	3	0	3
<b>Zuverlässigkeit</b>				
Plausibilitätsprüfung	0	0	0	0

Qualitätsanforderung	Pix4Dmapper	Agisoft Metashape	Visual SFM	WebODM
Hinweis fehlerhafte Angabe	0	0	0	0
Warnung bei Datenverlust	3	3	0	3
<b>Updatefähigkeit und Fehlertoleranz</b>				
Updatefähigkeit	3	3	2	2
Aktive Software	3	3	0	3
<b>Sicherheit und Datenschutz</b>				
Datenschutz	3	3	3	3
Zugriffsschutz	3	3	3	3
Benutzervermerk in Logfile	3	3	3	3
<b>Punktzahl</b>				
Summe (Max. 69 Punkte)	<b>45</b>	<b>58</b>	<b>22</b>	<b>45</b>

Tabelle 7: Ergebnismatrix zu Qualitätsanforderungen

Die erste untersuchte Qualitätsanforderung war die **Gestaltung und Ergonomie** der Software für eine möglichst einfache Durchführung des Arbeitsprozesses. Vor allem bei der Software Pix4Dmapper wird der Arbeitsprozess durch die in der Tabelle aufgeführten Faktoren unterstützt (Siehe Tabelle 7). Die Hervorhebung wichtiger Funktionen für die korrekte Reihenfolge des Arbeitsprozesses wurde bei VisualSFM nicht umgesetzt. Zwar wurden durchaus zusammenhängende Funktionen kontextbezogen im Menü gruppiert und die wichtigsten Funktionen außerhalb der Menüs auf der Leiste hervorgehoben, jedoch ist die Reihenfolge für den korrekten Ablauf durch Mechanismen, wie zum Beispiel einer Nummerierung, nicht gegeben. Zudem sind bei den drei anderen Anwendungen durch vordefinierte Standardparameter und Vorlagen, automatisierte Durchläufe der Prozesse möglich. Diese automatisierte Verarbeitung ist bei VisualSFM nicht gegeben.

Die kontextbezogene Anordnung von Funktionen und eine einfache Lesbarkeit der Texte ist in jeder Software umgesetzt worden. Durch die farbliche und symbolische Hervorhebung von Meldungen und aktiven Bereichen weiß der Nutzer jederzeit um den Status des Prozesses. Dies ist bei allen Anwendungen, außer bei VisualSFM gegeben. Die Dokumentationen, graphischen Benutzeroberflächen, sowie Fehlermeldungen und auch Berichte werden in englischer Sprache ausgegeben. Bei Pix4Dmapper und auch Metashape kann die Sprache der Benutzeroberfläche und auch Berichte auf Deutsch umgestellt werden.

Für den intuitiven Ablauf der Prozesse ist die **Benutzeroberfläche** ebenfalls ein wichtiger Faktor, der die Qualität der Datenprozessierung beeinflusst. Die Dateneingabe ist in jeder der vier Systeme intuitiv möglich. Insbesondere in dem Menü von Pix4Dmapper und Metashape

ist die Nutzung der Funktionen in korrekter Reihenfolge durch eine numerische und prozessbezogene Anordnung verständlich gestaltet. Die Nutzung der Vorlagen erlaubt bei Pix4Dmapper und WebODM den schnellen Einstieg in die Verarbeitung. Die Einarbeitung in die weiterführenden Funktionen über Python bei Metashape und PyODM sind zudem mit einem hohen Aufwand verbunden und erschweren den Einstieg für alle Nutzer, die keinerlei Python-Erfahrung haben.

Zu bemängeln ist die Anordnung der Parameter bei WebODM, da hier keinerlei Gruppierung oder erkennbare Gliederung nach Prozessschritten erkennbar ist. Bei VisualSfM ist die Reihenfolge der Prozesse nicht klar ersichtlich. Zudem müssen Teile der Arbeitsschritte in weitere Software ausgelagert werden. Hinzu kommt ein hoher Einarbeitungsaufwand für das Verständnis von VisualSfM und die Bedienung dessen Benutzeroberfläche, implementierter Funktionen und der nutzbaren Tastenkombinationen. Die Dokumentation ist minimalistisch und wurde in den letzten Jahren kaum aktualisiert. Änderungen, wie zum Beispiel die Nutzung von GCPs, die in den späteren Changelogs vermerkt sind, tauchen nicht auf. Die komplexeren Funktionen für weiterführende Analysen behindern sowohl bei WebODM als auch VisualSfM den Basisablauf des Prozesses. Der Aufwand, das jeweilige Konzept der Software zu verstehen, war bei VisualSfM höher, als bei den anderen Anwendungen.

Jeweilige Hilfetexte für Prozessschritte und Funktionen wurden in unterschiedlichem Detailgrad in jedem System gefunden. Dank der Logfiles und Berichte war eine Rückmeldung über den Erfolg und Misserfolg jederzeit gegeben. Die jeweiligen Fehlermeldungen bei Agisoft und Pix4D waren meist recht minimalistisch. Durch eigenständige Fehlersuche in den Logfiles konnte dank der verständlichen Ausgabe der Fehler meist der Auslöser gefunden werden. Die Ausgabe von Prozessstatistiken und Fehlern nachträglich bei VisualSfM und WebODM ist nur durch ein Logfile gegeben, welches jedoch teilweise unverständliche oder irrelevante Meldungen ausgab. Oft konnten die Statusangaben von VisualSfM nur durch Forenbeiträge oder gar nicht identifiziert werden, da eine Dokumentation dieser fehlt. Ein modularer Aufbau der Rückmeldung und Reporte ist durch die konfigurierbaren Dateien von ODM und OpenSfM gegeben. Die Nutzung der Berichte von OpenSfM für die weiterführende Informationsausgabe ist jedoch standardmäßig bei der Installation deaktiviert. Zu bemängeln sind daher die wenigen automatisiert vorhandenen statistische Auskünfte zu den Qualitätsfaktoren in VisualSfM und ODM.

Dank einer klaren, ausführlichen und verständlichen **Dokumentation** der Komponenten und Funktionen wurde die korrekte Datenverarbeitung vor allem bei Pix4Dmapper und Agisoft

Metashape erleichtert. Das eigenständige Einarbeiten in die jeweilige Software wurde bei jedem der Systeme durch die Benutzerdokumentation und Forenbeiträge ermöglicht. Die Validierung, ob die jeweiligen Forenbeiträge jedoch für die Beantwortung der jeweiligen Fragestellung geeignet sind, musste jedes Mal durch den Nutzer erfolgen. Eine offizielle ausführliche Dokumentation oder Forenantwort durch den Hersteller wurde bei Pix4Dmapper und Metashape erfolgreich umgesetzt (Pix4D 2019a; Agisoft LLC 2019a). Ähnlich scheint es sich bald mit ODM zu verhalten, da derzeit die Anwendermenge von WebODM stetig steigt und durch das bald erscheinende Buch zu WebODM vermutlich auch die webbasierte Dokumentation erweitert wird (OpenDroneMap 2019d; Toffanin/Mather/Dakota 2019; GitHub Statistics 2019). Die schnellen und stetigen Rückmeldungen bei Pix4Dmapper, Metashape und (Web)ODM zeigen jedoch, dass diese drei Systeme aktiv sind und im Gegensatz zu VisualSFM weiterhin durch den Hersteller weiterentwickelt werden. Anhand der regelmäßigen Veröffentlichung neuer Versionen lässt sich diese These validieren (Pix4D 2019i; Toffanin/Dakota 2019; Agisoft LLC 2019c; Wu 2015c).

Es wurde ersichtlich, dass die Software VisualSFM auf erfahrene Nutzer ausgerichtet ist. Dies kann vor allem durch erläuternde Kommentare direkt im Quellcode belegt werden. Grundlegende photogrammetrische Konzepte werden nicht anschaulich erläutert, wie dies etwa bei Pix4Dmapper der Fall ist. Allerdings sollte nicht unerwähnt bleiben, dass die Algorithmen über mathematische Formeln beschrieben wurden, welche von Laien jedoch nicht vollständig durchdrungen werden können. Außerdem präsentiert sich der Bearbeitungsprozess nicht transparent wodurch die Wahl geeigneter Parameter erschwert wird beziehungsweise mögliche Zusammenhänge verborgen bleiben.

Ausweislich der veröffentlichten Versionshistorie erfolgt keine kontinuierliche Weiterentwicklung der Software VisualSFM. Die letzte Partizipation des Entwicklers in Diskussionsforen liegen bereits mehrere Jahre zurück; der letzte Beitrag stammt aus Oktober 2015 (Wu 2015d). Somit kann konstatiert werden, dass die Software aktuelle technologische Entwicklungen nicht mehr berücksichtigt.

Festzustellen ist, dass Versionshinweise und Änderungsvermerke in jedem der vier Systeme mehr oder weniger ausführlich und teilweise im Code nachvollziehbar vorliegen. Simultan zu den Updates und den Upgrades wird die Dokumentation von Pix4Dmapper, Metashape und (Web)ODM aktualisiert, wobei die Dokumentation von WebODM dabei deutlich kürzer ausfällt. Die Aktualisierungen des Anwender- und Administrationshandbuchs erfolgt bei Metashape immer auch als PDF. Ähnliches können die anderen Hersteller durchaus auch

erzeugen, dort wird mit HTML-Seiten gearbeitet, die dank einer Suche und thematischen Struktur sowohl bei WebODM als auch Pix4Dmapper gut nutzbar sind. Aufgefallen ist, dass bei den Open Source Softwares WebODM und VisualSFM mit der getesteten Version die Installation und der technische Betrieb schwieriger sind, als bei der proprietären Alternative. Es gibt abgesehen von dem kostenpflichtigen LiveODM keine einfache Installation, zum Beispiel über eine ausführbare Datei mit automatisierter Installation. Zudem sind für die Installation weitere Pakete und Systeme, wie zum Beispiel Docker und GIT nötig.

Die Nutzung weiterführender Funktionen bei Metashape wird durch die Python-API über Skripte ermöglicht. Diese Schnittstelle besitzt ein eigenes Handbuch und sowohl Hilfestellung in Foren als auch Beispielskripte liegen vor. Das gleiche gilt für PyODM von ODM, jedoch in deutlich eingeschränkterem Umfang an Beiträgen und Dokumentationen der Parameter. Dafür liegt hier der Quellcode bedingt durch die Versionskontrolle in GitHub frei zur Verfügung und erlaubt die transparente Schnittstellenbeschreibung (Toffanin 2019d). Bei WebODM, Pix4Dmapper und Metashape ist die Prozessierung über Service-as-a-Software-Substitute (SaaS), in dem Fall der CloudODM, Metashape Cloud und Pix4Dmapper Cloud, gegeben. Bei CloudODM kann der Server eigenständig definiert werden, somit können auch eigene Strukturen genutzt werden und die Daten müssen nicht über externe Quellen verarbeitet werden.

Keine der vier Anwendungen wurde so konzeptioniert, dass Fehler durch Benutzereingaben minimiert werden. Wenn möglich, wurde durch Hilfetexte, Vorlagen und weitere Anleitungen versucht diese in Pix4Dmapper und Agisoft zu vermeiden. Erste Ansätze finden sich dazu auch bei WebODM, wobei die **Zuverlässigkeit** durch die hohe Anzahl unklarer Parameter um einiges geringer ist. Eine Plausibilitätsprüfung gegen Fehler bei der Dateneingabe konnte bei keiner Software gefunden werden. Weder wurde die Eingabe in einer Anwendung verhindert, noch gab es einen Hinweis bei fehlerhaften Angaben. Erst die Fehlermeldungen in den Ausgaben erlaubten dem Nutzer nach einem Abbruch des Prozesses eine Korrektur. Die Warnung, dass kritische Funktionen gegebenenfalls zu einem Datenverlust führen, wurde bei Pix4D explizit eingebunden. Die Warnung, dass ohne Speicherung beim Beenden der Anwendung eventuell Daten verloren gehen, ist bei Metashape, Pix4Dmapper und WebODM gegeben. VisualSFM vermerkt lediglich, dass noch ein Prozess läuft, der dadurch unterbrochen wird.

Inkonsistente Datenzustände durch unvorhergesehene Eingaben oder Ereignisse wurden bei keiner Anwendung erzeugt. Die gespeicherten Projekte konnten außer bei VisualSFM auch

nach einem Systemabsturz wiederhergestellt werden. Laufende Prozesse wurden jedoch beendet und mussten neu gestartet werden. Die jeweilige Software arbeitete nach dem Systemabsturz zuverlässig weiter und die volle Programmfunktionalität konnte wiederhergestellt werden. Bei VisualSFM wird der Nutzer nicht auf das Anlegen weiterer Dateien in dem originalen Bildordner hingewiesen und vor der Ausführung von Funktionen wird keine Warnung zum Datenverlust ausgegeben. Die Daten werden bei dieser Software zwar nicht verändert, jedoch wird die Struktur der originalen Ordner verändert. Alle Daten, die von der Software ausgegeben wurden oder im Nachgang erzeugt werden konnten, waren vollständig und korrekt. Die Qualität dieser Ausgaben ist in Kapitel 3.2 näher erläutert. Eventuell auftretende Fehlfunktionen können, wenn dies gewünscht ist, bei Metashape und Pix4Dmapper den jeweiligen Herstellern gemeldet werden. Ähnlich verhält es sich auch mit Docker für den Betrieb von WebODM.

Die **Updatefähigkeit** ist bei allen Systemen gegeben. Bei VisualSFM werden, soweit erkennbar jedoch keine weiteren Versionen veröffentlicht. Bei VisualSFM und WebODM muss auf die Kompatibilität der weiteren Komponenten bei der Installation geachtet werden (Siehe Kapitel 2.2.1). Die ausführliche Dokumentation zur Installation und der strukturierte Softwareaufbau bilden bei allen Systemen außer VisualSFM jedoch die Grundlage für Updates und erlauben das Upgrade nach Programmänderungen. Der Aufwand durch Vor- und Nacharbeiten ist sowohl durch das Docker System bei WebODM, als durch die Exe-Installationsdateien von Metashape und Pix4Dmapper ähnlich gering. Projekte aus den vorherigen Versionen können bei kleineren Versionssprüngen weiterhin genutzt werden.

Ohne die Zuhilfenahme von SaaS wird die **Sicherheit** der Software und der verknüpften Daten innerhalb der Projekte grundsätzlich gewährleistet und ein unberechtigter Zugriff wird verhindert. Die Zugriffe auf den Rohdatenbestand erfolgen aus dem jeweiligen Projekt heraus, jedoch verändern Funktionen diese Datensätze nicht und Zugriffe werden in dem jeweiligen Logfile der Software vermerkt. Die Authentifizierung des Anwenders erfolgt beim Start der Prozesse in Pix4Dmapper und Agisoft Metashape und gewährleistet zu jedem Zeitpunkt die Zuordnung des Benutzers zu dem Projekt – ohne diesen Authentifizierungsschritt können bestimmte Funktionen nicht genutzt werden.

## 4. Diskussion

### 4.1. Eignung der Plattform

Wie bereits in Kapitel 1.2 geschildert besagt die Leittheorie, dass ein Laie aus Rohdatensätzen mit Hilfe von Open Source Software für seinen Anwendungsfall adäquate Ergebnisse generieren kann. Diese Prozessierung ist möglich, ohne dass tiefgreifendes Wissen über Photogrammetrie und IT vorliegen muss. Zudem kann die Verarbeitung mit der Hardwareausstattung einer Privatperson durchgeführt werden. Dank der Nutzung von Open Source Software müssen keine initialen oder laufenden Kosten durch die Verarbeitung berücksichtigt werden.

Der vorgestellte Ansatz der Datenverarbeitung öffnet die Tür für einen breiteren Anwenderkreis. Dank der adaptierbaren Weiterverarbeitung von UAV-Bildern über diverse Exportschnittstellen ist eine Integration in weiterführende geographische Informationssysteme möglich. Eine Exportschnittstelle oder De-facto-Standard für ein Austauschformat existiert nicht. In allen Anwendungen - außer bei VisualSFM - ist der Export über eine Vielzahl an Formaten möglich, etwa das etablierte Format GeoTIFF für Luftbilder (Siehe Kapitel 3.2.6).

Um einen Export der in VisualSFM vorgehaltenen Daten zu realisieren sind externe Programme erforderlich, ähnlich zu der Integration in CloudCompare bei Morgan und Brogan (Morgan/Brogan 2016). VisualSFM kann nicht als Einzellösung für den gesamten Arbeitsablauf genutzt werden kann. Der manuelle Anstoß der einzelnen Arbeitsschritte war bei VisualSFM nötig. In den drei anderen Systemen wird möglichst automatisiert jeder Prozessschritt aneinandergelinkt.

Die fast automatisierte Verarbeitung reduziert die Arbeitskosten von in diversen Anwendungsszenarien, erzeugt innerhalb eines abschätzbaren Zeitraums qualitative Datenmengen und es entstehen weniger Fehler durch manuelle Eingriffe (Siehe Kapitel 3.2.7). Somit entsteht weniger Aufwand, bietet jedoch keine Garantie auf valide Daten. Eine qualifizierte Aussage hinsichtlich der Effizienzsteigerung bei der Datenerhebung und -weiterbearbeitung kann nicht getroffen werden.

Die technischen Hintergründe, sowie jeweils verwendete Algorithmen konnten bei den proprietären Anwendungen nicht vollständig evaluiert werden, da Codebereiche nicht veröffentlicht oder deren Algorithmen nicht dokumentiert wurden. Durch mangelnde Transparenz ist bei Agisoft Metashape und Pix4Dmapper ist ein Vergleich der Berechnungsmethoden nicht zuverlässig möglich.

VisualSFM ist nur eingeschränkt Open Source und nicht für den kommerziellen Gebrauch bestimmt. Der Quellcode für die graphische Oberfläche wurde nicht veröffentlicht, lediglich die dahinterliegenden Berechnungsmechanismen. Der Aufwand die im Code von WebODM und VisualSFM implementierte Systemprozesse zu verstehen ist hoch. Neben dem hohen Aufwand für das Verständnis der Algorithmen muss zudem die Komplexität des Themas Photogrammetrie berücksichtigt werden (Siehe Kapitel 1.4.2.1). Der Einarbeitungsaufwand bei weiterführenden Funktionen ist bei allen vier Systemen ähnlich hoch anzusetzen.

Man darf das hohe Potential von Open Source Software nicht unterschätzen. Qualitätsgesicherter, ein sicherer Code und die stetige Weiterentwicklung entscheiden über den langfristigen Erfolg der Produkte. Neben der Veröffentlichung neuer Feature-Versionen mit erweitertem Funktionsumfang wurden während des Untersuchungszeitraums bekannte Fehler behoben. Vor allem bei der recht jungen Software ODM lassen die Vielzahl an Codeanpassungen in GitHub auf eine rasante Verbesserung der Verarbeitung und Nutzbarkeit der Software in der nächsten Zeit schließen (Toffanin 2019c, 2018, 2019e; a). Ein neues WebODM-Feature seit April 2019 ist die Erstellung von Höhenlinien aus dem GeoTIFF des DEM (Toffanin 2019e). Der Export von Volumenberechnungen und die Weitergabe von WebODM Projekten wurden in der webbasierten Oberfläche implementiert (Toffanin 2019f).

Sowohl die proprietären, als auch die Open Source Anwendungen waren während des Untersuchungszeitraums einem stetigen Verbesserungsprozess unterworfen. Beispielsweise wurde bei Pix4D Capture die Unterstützung von größeren Gebieten realisiert.

Die heutigen Möglichkeiten erlauben unabhängig von der gewählten Plattform eine einfache Inwertsetzung von UAV-Daten und somit neue Geschäftsmodelle, benötigen jedoch weiterhin individuelle Konfigurationen je nach Gebiet und Anwendungsfall (Siehe Kapitel 2.2.1). Bereits vor zehn Jahren betonte Eisenbeiss et al. (2009), dass die stetige Weiterentwicklung der kostengünstigen Sensoren für GPS, IMU und Kamera den Einstieg beziehungsweise die Nutzung von UAVs erleichtert (Eisenbeiss/Stempfhuber/Kolb 2009a, S. 409). Da neben der Senkung der Investitionskosten auch die Verkleinerung der Komponenten und die Gewichtsoptimierung der UAVs im Fokus steht, werden künftig qualitativ hochwertigere UAV zu angemessenen Preisen zur Verfügung stehen (Eisenbeiss/Stempfhuber/Kolb 2009b). Abgesehen von der erforderlichen technischen Grundausstattung werden jedoch auch Verbesserungen der korrespondierenden Applikationen im UAS angestrebt, etwa zwecks Flugplanung. Dies gilt für die funktionalen als auch hinsichtlich der nicht funktionalen Anforderungen, welche an diese Applikationen gestellt werden, gleichermaßen.

Es ist absehbar, dass sich durch eine einfachere Bedienbarkeit verbesserter Ergonomie, optimierte Benutzbarkeit und einem erweiterten Funktionsumfang potentielle Anwender leichter akquirieren lassen. Aufgrund dieser Entwicklung wird auch Laien - Personen ohne fundierte Kenntnisse in der Fernerkundungsmethode Photogrammetrie und Informationstechnologie – der Einstieg in die Materie erleichtert. Momentan unterschieden sich die analysierten Programme diesbezüglich noch sehr stark, vor allem bezüglich Benutzerfreundlichkeit und Konfigurationsaufwand. Pro Anwendung gibt es eine Vielzahl individueller Einstellungsmöglichkeiten, die sich nach dem Anwendungsfall richten. Durch Hilfestellungen, wie zum Beispiel die Prozessierungsvorlagen von Pix4D wird die Wahl adäquater Parameter für die jeweiligen Prozeduren erleichtert (Siehe Tabelle 7). Sollten trotzdem Fehler auftreten oder das Resultat nicht den Anforderungen entsprechen (z.B. unzureichende Auflösung) sind für die Analyse respektive Optimierung der Prozesse fundierte Fachkenntnisse unentbehrlich. Es muss festgehalten werden das dies eher die Regel statt der Ausnahme darstellt, denn mit keiner der analysierten Applikationen konnte ein voll automatisierter Arbeitsprozess realisiert werden um ein qualitativ hochwertiges Ergebnis zu erzielen. Insofern müssen Fachkenntnisse als Grundvoraussetzung angesehen werden, die auch durch optimale Programme nicht vollständig ersetzt werden können.

Die Verarbeitung großer Datenmengen in ODM könnte über das Skript „run\_all.sh: split.py“ in der Kommandozeile erfolgen, dass diese vorher in mehrere kleine Bereiche aufteilt. Jedoch wird bei diesem bisher nur ein Orthophoto (GeoTIFF) als Ausgabeformat unterstützt, somit keine Punktwolke oder DSM/ DEM ausgegeben. Diese Verbesserung über das Split-Skript und Berechnung mit OpenSfM wurde bisher noch nicht in der graphischen Oberfläche von WebODM umgesetzt (Piracés/Dakota/Toffanin 2019), würde jedoch vermutlich zu einem erfolgreichen Durchlauf des abgebrochenen Projekt (U10) führen. Da jedoch nur mit der graphischen Oberfläche gearbeitet werden sollte und keine Schnittstelle für die Integration des Skripts in diese existiert, wurde auf einen Test dieser Funktion für U10 verzichtet. Eine weitere Alternative wäre die Auslagerung von Berechnungsprozessen über webbasierte Lösungen zum Beispiel über CloudODM (Toffanin 2019c). Dementsprechend hoch skaliert müssen dann jedoch auch die Rechnerausstattung und Ressourcen von Docker sein. Diese und ähnliche Ansätze zwecks Auslagerung von Prozessen erfordern jedoch die Erarbeitung entsprechender Tests-/Anforderungskonzepte sowohl für die Berechnung-per-se, als auch hinsichtlich geeigneter Soft- und Hardware. In diesem Zusammenhang müssen ebenfalls Aspekte des Datenschutzes und -sicherheit berücksichtigt werden.

Ohne fundierte Kenntnisse sind die Installation und Erweiterung um Module bei VisualSFM und WebODM mit Hürden verbunden, beispielsweise die Nutzung von Docker als weiteres Programm für WebODM oder die ausgelagerten Paketquellen bei VisualSFM (Siehe Kapitel 2.2). Im Vergleich zu einer automatisierten Installation z.B. unter Nutzung von Installationsarchiven oder ausführbaren Dateien wie bei Pix4Dmapper oder Agisoft Metashape (Siehe Kapitel 2.2) sind diese weitaus fehleranfälliger (Toffanin 2019a). Aufgrund einer minimalistischen Dokumentation und teils veralteten Links zu Paketen und obsoleten Webseiten ist die Einstiegshürde bei VisualSFM vergleichsweise hoch gesetzt (Wu 2015a).

Im Gegensatz zu proprietären Anwendungen, deren Weiterentwicklungen in der Regel über entsprechende Verträge zwischen Kunden und Hersteller gesichert sind, ist die kontinuierliche Adaption von Open Source Applikationen generell mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Maßgebliche Faktoren wie zum Beispiel ein festes Entwicklungsteam, regelmäßige Updatezyklen und eine aktive Community sollten vorab im Rahmen einer Marktanalyse eruiert werden. Als positive Referenz können Projekte der OSGeo genannt werden, die diesen Aspekten genügen. Ebenso sollten Abspaltungen („forks“) über die einschlägigen Plattformen wie zum Beispiel GitHub analysiert werden (Moulon 2019).

Eine ausführliche aber trotzdem verständliche Dokumentation, Tutorials oder Benutzerhandbücher sind für die Bedien- und Benutzbarkeit der untersuchten Photogrammetrie-Applikation essenziell. Testdaten für die Verarbeitung, sowie Anleitungen ermöglichen in allen Anwendungen außer VisualSFM auch Laien die Umsetzung von Projekten (Agisoft LLC; Pix4Ds; Dakota et al. 2019). Die Dokumentation von Agisoft Metashape und Pix4Dmapper sind für Einsteiger gut verständlich. Vor allem bei Pix4Dmapper werden bei komplizierten Einstellungen die Grundkonzepte der Photogrammetrie mit anschaulichen Beispielen und Schemata beschrieben, zum Beispiel zu der Beeinflussung der Genauigkeit durch GPS (Pix4D 2011c).

Sowohl bei Agisoft Metashape als auch Pix4Dmapper und WebODM gibt es eine aktive Community, die sich gegenseitig bei der Beantwortung von Fragen unterstützt. Außerdem geben die Supportkontakte in den Foren bereitwillig Auskunft zu Konfigurationsfragen. Erwähnenswert ist, dass Fragen zu den proprietären Algorithmen eher umgangen werden und bei der vergleichsweise neuen Software ODM die Dokumentation und Anleitung zu Funktionen teilweise unausgereift ist (Toffanin 2019a; Semyonov 2011a). Die beschreibenden Texte in der GUI von WebODM sind für die Durchführung der Prozesse nur bedingt hilfreich, da zum Beispiel die Zuordnung von Parametern zu korrespondierenden Funktionen nicht erläutert wird.

Die Benutzeroberfläche sollte optimiert werden. Als positives Beispiel ist Pix4Dmapper zu nennen, da hier mit Hilfe von Tabs, Ribbons und erklärenden Bildern/ Anleitungen eine optimale Benutzerführung realisiert wird. Die aktuellen Planungen im ODM Projekt sehen eine ausführliche Dokumentation zu jedem Parameter in Form eines begleitendes Handbuchs vor (OpenDroneMap 2019d). Da die Entwicklungsgemeinschaft von ODM einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess der Software vorantreibt wird sowohl der Funktionsumfang erweitert, als auch die Nutzbarkeit verbessert. Voraussichtlich wird durch diese Bemühungen ein breiter Anwenderkreis erschlossen.

Wenn die Bedienung der Software beziehungsweise der einzelnen Funktionen nach Recherche in den Foren nicht eindeutig geklärt werden kann, ist ein qualifizierter Ansprechpartner erforderlich. Diese sind zum Beispiel über die Hotline oder diversen Supportangebote erreichbar. Lediglich bei VisualSFM konnten grundlegende Fragen weder über die referenzierten Kontaktmöglichkeiten noch über die Dokumentationsseiten beantwortet werden. Auch weitergehende Fragen zu Algorithmen wurden nicht beantwortet und die Bedienungsanleitung ist als minimalistisch zu qualifizieren (Wu 2015a).

Die Messungen könnten durch eine optimierte Missionsplanung, qualitativ hochwertigere Rohdaten, leistungsstärkere Hardware und mehr Testreihen mit unterschiedlichen Parametern definitiv optimiert werden. Nichtsdestotrotz ist die Validität der Messungen obgleich der Einschränkungen gegeben und es wurden keine Daten verfälscht. Weiterhin sollte herausgestellt werden, dass die Konsistenz und Qualität der erhobenen Rohdaten nicht tangiert wird, wodurch die Geeignetheit im Kontext dieser Arbeit attestiert werden kann. Sowohl die Standard- als auch optimierten Parameter wurden dokumentiert ebenso wie die Systemausstattung/-konfiguration, als auch die äußeren Einflussfaktoren im Rahmen der Primärdatenerfassung. Zusammenfassend ergibt sich daraus ein vollständig dokumentierter Versuchsaufbau. Die Wiederholbarkeit der Ergebnisse ist durch die automatischen Abläufe und Dokumentation aller genutzten Parameter und Randbedingungen gegeben. Aufgrund der wiederholten Prozessdurchführung, Nutzung identischer Ausgangsdaten und des Ergebnisvergleichs ist eine hohe Reliabilität gewährleistet.

Wie bereits erwähnt spielen externe Einflussfaktoren bei der Primärdatenerfassung eine entscheidende Rolle. Das zum Aufnahmezeitpunkt vorherrschende Szenario ist immer einzigartig; dies impliziert, dass die Rohdaten nie exakt reproduziert werden können. Die Genauigkeit und Verlässlichkeit von den Messungen wurden über die Ergebnisse in Kapitel 3.1 und 3.2.7 belegt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass weder eine Aussage zu optimalen Projekteinstellungen, noch eine Empfehlung für eine Software getroffen werden kann. Je nach Anwendungsfall und Untersuchungsgebiet müssen die Anforderungen priorisiert werden und pro Software können die jeweiligen gewünschten Ergebnisse erzielt werden. Dabei müssen die jeweiligen Vor- und Nachteile je System berücksichtigt werden, ist beispielsweise nur eine Punktwolke gewünscht, reicht gegebenenfalls die Durchführung mit WebODM vollkommen aus.

Bezugnehmend auf die Ergebnisse ist die eingangs erwähneter erster Hypothese zu falsifizieren (Siehe Kapitel 1.3.2). Die Aussage, dass Open Source Software sich für die Prozessierung von UAV-Bildaufnahmen am ehesten eignet kann durch die Ergebnisse nicht belegt werden. Diese Systeme bieten zwar durchaus den kostengünstigsten Ansatz, schnitten jedoch bezogen auf alle untersuchten Aspekte schlechter ab. Die Investition in proprietäre Software, um qualitativ hochwertige Resultate zu erzielen, amortisiert sich je nach Anwendungsfall. Wesentliche Faktoren sind diesbezüglich die gewünschte Auflösung und der Detailgrad.

Mit geringem manuellem Anpassungsaufwand der Verarbeitungsschritte wurde vor allem in den Anwendungen Pix4Dmapper und Agisoft Metashape hochqualitative Ergebnisse erzeugt. Der RMSE lag bei beiden Systemen um ein zehnfaches unter der GSD und zeugt von einer hohen Genauigkeit der Georeferenzierung bei Agisoft Metashape und Pix4Dmapper (Vgl. Kapitel 3.2.1).

Da die Punktzahl und Dichte der Punktwolken bei den Ergebnissen von Pix4Dmapper am höchsten war, wurde bei Pix4Dmapper die beste Berechnungsbasis für die weiteren Verarbeitungen geboten (Vgl. Kapitel 3.2.3). Die höhere Anzahl an Punkten bei U10 führten in Agisoft Metashape zur Auslastung von dem Hauptspeicher und somit zum Abbruch, daher sind nach der Generierung der Dreiecksvermaschung weniger Stützpunkte und somit Flächen vorhanden, obwohl die Datenbasis aus dem vorherigen Schritt ein besseres Modell ermöglicht hätte. Wäre die Berechnung mit Hilfe der dichten Punktwolke durchgeführt worden, so wäre der Detailgrad des 3D-Modells bei U10 in Agisoft Metashape extrem hoch, da die Punktzahl dieses Exportprodukts sehr hoch war (Vgl. Kapitel 3.2.4).

Die Aussage, dass eine hohe Anzahl an Stützpunkten zu einer hohen Flächenanzahl und somit einem genaueren an die reale Oberfläche angepassten Modell führt (Siehe Kapitel 3.2.4) konnte durch die Abfrage der Stützpunkte und Flächen des jeweiligen 3D-Modells validiert werden.

Dank der Berechnung des Orthomosaiks über das DEM konnte bei Agisoft Metashape das recht große und teilweise weniger detailliert vorliegende Gebiet bei U10 in einer besseren Qualität als bei U1S ausgegeben werden.

Die fehlende geographische Vorauswahl bei den Prozessen von VisualSFM und Pix4Dmapper spiegelt sich in dem hohen Zeitaufwand des Bildabgleichs und -ausrichtung wieder (Siehe Kapitel 3.2.8). Bedingt durch den Abgleich aller Bilder ist daher der erste Schritt sehr rechen- und zeitintensiv und entsprechend ausgeprägter, als bei Agisoft Metashape. In Pix4Dmapper war der Grund für die schnelle Berechnung trotz höherer Einstellungen in U20 die geringere Gebietsgröße (Siehe Abbildung 36). Der genaue Grund für diese Gebietsgröße konnte nicht evaluiert werden. Die Projekteinstellungen hätten eine längere Dauer der Prozessierung vermuten lassen (Siehe Tabelle 20). Bedingt ist die schnelle Berechnung gegebenenfalls durch den Verweis der GCPs und die damit einhergehende einfachere Verortung (Siehe Kapitel 3.2.7).

Beim Vergleich der Zeitaufwände schnitten im Gesamtprozess Pix4Dmapper und Agisoft Metashape am besten ab. Dies liegt darin begründet, dass bei den zwei Open Source Systemen einige Prozesse abbrachen oder vergleichsweise lange Berechnungsphasen hatten (Siehe Kapitel 3.2.8).

Angesichts der automatisierten Arbeitsschritte und anschaulichen Vorlagenbeispiele, sowie einer ausgeprägten Dokumentation ist Pix4Dmapper für Anfänger am geeignetsten (Siehe Kapitel 3.3). Eine einfache Einrichtung des Systems ist gegeben ist und effizienter Ablauf der Verarbeitung liegt vor.

#### 4.2. Nötige Ausstattung

Die zweite Forschungsfrage war, welche minimalen Ausstattungen bezüglich Hard- und Software erforderlich sind und welche Grundkenntnisse vorhanden sein müssen. Die Hypothese war, dass im Bereich Hardware die Micro-UAVs qualitativ ausreichende Bilddaten generieren und mit Hilfe eines handelsüblichen PCs für den Privatgebrauch verarbeitet werden können (Siehe Kapitel 1.3.2). Die Nutzung einer Micro-UAV bietet diverse Vor- und Nachteile. Da der Pilot kaum Vorwissen benötigt, entstehen geringere Investitionskosten in Bezug auf Ausbildung und Hardware im Vergleich zu Hubschrauber und Flugzeug.

Der CMOS-Sensor ist für den Anwendungsfall mit einer bewegten Kamera, also an einem UAV weniger empfehlenswert. Da dieser Sensor jedoch günstig ist, wurde er bei den vergleichsweise weniger teuren UAV's dieser Arbeit verbaut. Der CCD-Sensor (Charge Coupled Device)

hingegen würde zu weniger Bildrauschen und Lagefehlern führen, da hier ein „Global Shutter“ verwendet wird und die Belichtung aller Punkte zum gleichen Zeitpunkt erfolgt (Lange 2006). Generell sind durch einen größeren Sensor mehr Bildaufnahmen pro Zeitintervall möglich. Größere Linsen sind jedoch teurer, außerdem schwerer und deshalb weniger häufig bei Micro-UAVs verbaut. Zu beachten ist die stärkere Anfälligkeit von Micro-UAVs gegenüber äußeren Einwirkungen, wie Wind und Regenschauer. Solche Einflussfaktoren tangieren die grundsätzlich hohe Flexibilität von UAV-Einsatzmöglichkeiten (Siehe Kapitel 1.4.1.2).

Durch benutzerfreundliche Software, wie Pix4capture, erfolgte eine effiziente Missionsplanung und -durchführung. Auch bei weniger guten Flugbedingungen wurden gute Ergebnisse geliefert, da beispielsweise bei Wind versucht wurde, weiterhin den vorgegebenen Kurs einzuhalten (Siehe Kapitel 2.1.3).

Insbesondere bei zeitkritischen Anwendungsszenarien bietet die Primärdatenerfassung über UAVs erhebliche Vorteile. In diesem Zusammenhang ist beispielsweise die Erfassung von Schlaglöchern auf stark befahrenen Straßen zu nennen. Dank der Micro-UAV ist ein tiefer Flug an gleicher Stelle trotz Verkehr möglich und sowohl hochauflösende Bildqualität, als auch hoher Zeitintervall der möglichen Befliegungsreihen gegeben.

Die Rechnerausstattung ist ein stark limitierender Faktor bei der Berechnung von Modellen (Siehe Kapitel 3.2.9). Schnellere und fehlerreduziertere Berechnungen könnten gewiss mit einer besseren Ausstattung erreicht werden (Agisoft LLC 2019b; Pix4D 2019f; Sprague/Toffanin 2018; Wu 2015a). Entgegen der anfangs getroffenen Aussage, dass die genutzte Hard- und Software die Durchführung der Prozesse als Privatperson erlaubt, kann pauschal nicht zugesagt werden, dass die Verarbeitung möglich ist. Hier kommt es stark auf den Anwendungsfall an und inwieweit die Kosten wieder getragen werden.

Da neben der Hardware auch bei der Software mit begrenzten Mitteln gearbeitet wurde, kann in diesen Bereichen bei genügend Investitionskapital durchaus eine bessere Rohdatenbasis und Verarbeitungsplattform geboten werden. Der Flug bei optimalen Bedingungen und mit hochqualitativer Ausstattung ist durch einen Laien kaum realisierbar und war nicht Fokus dieser Arbeit.

Wie bereits von Moutinho festgestellt, korrelieren der Zeitaufwand, die Datenmenge und die erforderliche Verarbeitungsleistung miteinander (Moutinho 2015). Die Aussage von Strecha (2012), dass die Genauigkeit sich abhängig von der Qualität der gemessenen GCPs, ihrer Anzahl und ihrer Verteilung erhöht, konnte durch die Testreihen mit GCPs (Siehe Kapitel 3.2.7)

verifiziert werden (Strecha 2012). Der Hinweis, dass die nötige Ausstattung für die Aufnahme weiterer GCPs zu teuer und das KnowHow für die Nutzung dieser Technik vorhanden sein muss, ist hier aufzugreifen. Die eigene Aufnahme dieser durch einen Laien ist schwer umsetzbar. Vorausgesetzt GCPs sind jedoch vorhanden, kann die Genauigkeit verbessert werden. Die eigene Aufnahme dieser durch einen Laien ist schwer umsetzbar ist.

Die photogrammetrischen Grundkonzepte können, soweit für die Prozessierung nötig, auch von technikaffinen Personen ohne Vorwissen erworben werden. Detailliertere Kenntnisse zu den zugrundeliegenden Algorithmen und Berechnungsformeln dient jedoch dem Verständnis der Prozesse. Die Durchführung mit den Basiseinstellungen benötigt kaum Vorwissen oder technische Affinität (Siehe Kapitel 2.2.1). Die Optimierung der Ergebnisse einzelner Schritte bedingt viel Erfahrung und Verständnis. Zudem ist der Zeitaufwand bei den jeweiligen Schritten höher anzusetzen, als vorher abgeschätzt (Siehe Kapitel 3.2.7).

Die jeweiligen Logfiles, Konfigurationsdateien und graphischen Reports vermerken alle für die Berechnung verwendeten Parameter. Die Qualität der Ergebnisse, Status von Zwischenschritten und erläuternde Berechnungsergebnisse von statistischen Auswertungen werden nur teilweise ausgegeben. Somit ist die Optimierung der Parameter basierend auf den Aussagen dieser Merkmale nicht zwangsläufig möglich. In der Software Pix4Dmapper wurde beispielsweise bei U2O der zeitliche Rahmen der jeweiligen Prozessschritte nicht in dem Report vermerkt. Die Zeitaufwände für Teilschritte in U2O bei Pix4Dmapper, einige Teilschritte in WebODM und für alle Schritte in VisualSFM mussten über externe Tools und Extraktion von Zeitstempeln mithilfe der Logfiles ermittelt werden.

#### 4.3. Auswirkung der Datenqualität

Die Datenbasis war ein entscheidender Faktor für die gute oder schlechte Qualität der Ergebnisse und die Berechnungsdauer. Wie bereits 1987 durch Grün festgestellt, sind bei der photogrammetrischen Auswertung die Bereiche Datenerfassung, Auflösung und Dauer der Prozessierung stark limitierende Faktoren (Gruen 1987). Anzumerken ist, dass keine Garantie auf qualitativ hochwertige Ergebnisse nach der maschinellen Modellierung vorliegt. Zusätzlich kann durch menschliche Gegenprüfung die Qualität der Endprodukte korrekt beurteilt werden (Grenzdörffer 2013).

Vergleicht man die Ergebnisse mit denen der anderen in Kapitel 1.2 vorgestellten Arbeiten zur Datenerfassung über Micro-UAVs und Prozessierung dieser Primärdaten, lassen sich ähnliche Ergebnisse erkennen (Siehe 3.2.5 und 3.2.6). Bei Grenzdörffer und Engel beispielsweise wurde

festgestellt, dass der Nachbearbeitungsaufwand für die gewünschten Geoinformationen sehr hoch ist und bei Green et al. wurde auf die im Vergleich zu anderen Techniken günstige und einfache Datenaufnahme verwiesen, die teilweise jedoch weniger genaue Ergebnisse erzeugt (Grenzdörffer/Engel 2008; Green/Bevan/Shapland 2014).

Trotz zwei unterschiedlichen Primärdatenerfassungen sind soweit vergleichbar pro Software ähnliche Ergebnisse generiert worden (Siehe Kapitel 3.2). Beispielsweise ließ sich erkennen, dass die Höhenprofile durch die GCP-Einbindung in U2O einheitlich in Z-Richtung verschoben wurden (Siehe Kapitel 3.2.7). Bezogen auf die Repräsentativität lässt sich feststellen, dass durch die Untersuchung von nur zwei Gebieten, je nach Gebiet und Durchlauf der Datenerfassung und -verarbeitung unterschiedliche Ergebnisse erzeugt wurden. Bereits geringe Unterschiede im Gelände, Aufnahmezeitraum oder leicht abgeänderte Parameter in der Software veränderten die Ergebnisse. Dies ist jedoch ein unumgekehrter Aspekt des Untersuchungsthemas. Bedingt durch die geringere GDS ist die Genauigkeit, der Detailgrad und die Qualität der Endergebnisse bei dem zweiten Untersuchungsgebiet höher (Siehe Kapitel 1.4.1.2 und 3.2). Pix4Dmapper, WebODM und Agisoft Metashape haben bei beiden Gebieten fast alle gewünschten Ergebnisse geliefert.

Eine quantitative Untersuchung wäre über mehr Gebiete und mehr Prozesse mit anderen Hardwaresystemen möglich. Der vorgestellte Prozess mit den zwei Untersuchungsgebieten wurde repräsentativ für die Grundgesamtheit in dem Bereich Micro-UAV-Datenprozessierung durchgeführt. Diese Arbeit kann daher nur Aussagen zur Verarbeitungsqualität in diesem oder einem ähnlichen Anwendungsfall in einer der vier vorgestellten Systeme geben.

Je nach Größe des Untersuchungsgebiets, Beschaffenheit der dargestellten Objekte und Oberflächen muss eine andere Aufnahmeart gewählt werden, um möglichst gute Ergebnisse zu erzeugen (Pix4D 2019g; Agisoft LLC 2019a; Grenzdörffer/Schröder 2017). Die Menge und Qualität der Rohdaten sind entscheidend für die Berechnungen. Dank der eigenen Datenerfassung konnte auf eine aktuelle Datenbasis aus verschiedenen Untersuchungsreihen zurückgegriffen werden (Siehe Kapitel 3.1). Die Differenzen in der Geländestruktur erlaubten die Abfrage der Verarbeitungsqualität in verschiedenen Problemsituationen. Somit konnte die Verarbeitungsqualität von kritischen Objekten, wie zum Beispiel Gewässerflächen, Gebäudekanten, Solaranlagen und Bäumen in den einzelnen Exportergebnissen verglichen werden (Siehe Kapitel 3.2.5 und 3.2.6). Bei Reflektionen, etwa durch Solaranlagen und Wasser, einfarbigen Oberflächen, detaillierten Objekte, wie zum Beispiel Blättern und auch Transparenzen, zum Beispiel bei Gebäudefenstern kam es zu Qualitätseinbrüchen bei der

Wiedergabe (Siehe Kapitel 3.2.5 ), die in der Form auch in der Arbeit von Lowe auftraten (Lowe 2004). Diese Flächen könnten, mit erheblichem Zeitaufwand verbunden, manuell in der RayCloud von Pix4D eingetragen werden, um Fehler in der Vermaschung zu vermeiden.

In quantitativer Hinsicht ist somit bei U1 ein höherer Faktor gegeben, da mehr Bilder erfasst wurden (Siehe Kapitel 3.1). Qualitativ gesehen sind die Bilder von dem zweiten Gebiet (U2) jedoch besser, da diese mit einer besseren Drohne mit höherer Kameraauflösung aufgenommen wurden (Siehe

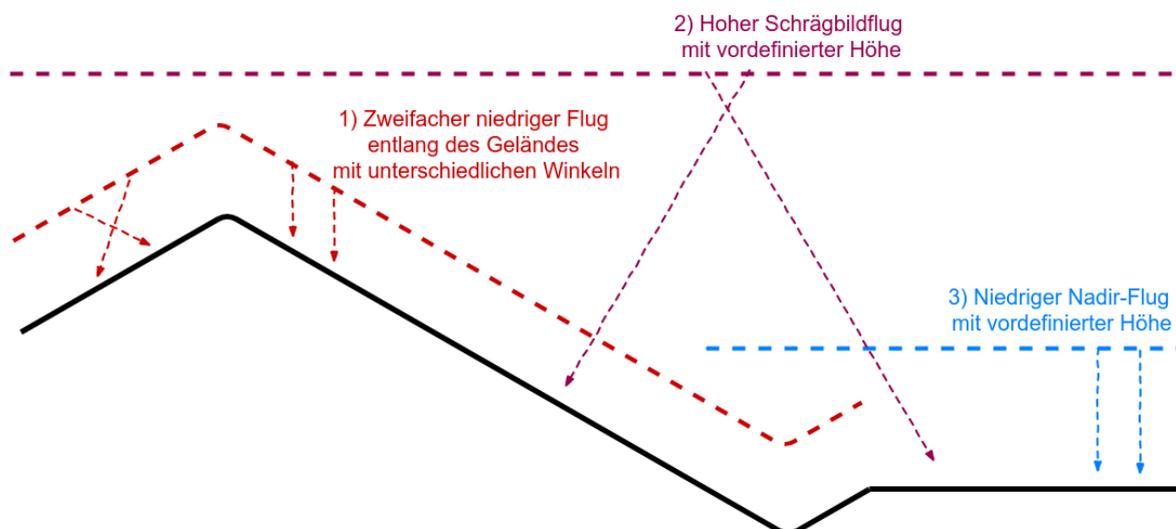
Tabelle 9 und Tabelle 10). Der Flug im diffusen Licht, also bei durchgehender leichter Wolkendecke war am besten für die Bildaufnahme, da weder Schattenwürfe noch eine extreme Belichtung die Bildqualität beeinflussten. Wäre die Befliegung mit einer besseren UAV, Kamerakalibrierung und optimalen Lichtverhältnissen durchgeführt worden, wäre eine bessere Datenbasis entstanden und somit weniger Fehler. Durch eine höhere Überlappung und größeren Flugbereich um das eigentliche Untersuchungsgebiet hätte man die Qualität des Projekts noch optimieren können (Bäumker/Heimes 2002).

Die Anzahl der kalibrierten Bilder ist entscheidend für die weiteren Prozessschritte. Wären alle Bilder in den Rohdaten mit optimalen Bedingungen und hochqualitativer Ausstattung erfasst worden, dann wäre eine möglichst hohe Anzahl an kalibrierten Bildern gut. Eine große Menge kalibrierter Bilder bildet mit dieser Datenquelle eine gute Berechnungsbasis.

Es wurde bei den beiden Missionen jedoch nicht unter optimalen Bedingungen geflogen. Somit entstanden unscharfe, schlecht aufgelöste, verschwommene oder durch Belichtung nicht geeignete Bilder. Das Entfernen dieser Bilder ermöglicht somit eine bessere Berechnungsbasis und genauere Ergebnisse trotz geringerer Bildanzahl. Alle bei Agisoft Metashape und Pix4Dmapper entfernten Bilder waren soweit durch das menschliche Auge erkennbar für die Berechnung suboptimal. Da bei VisualSFM und WebODM keine Bilder entfernt wurden ist somit in diesen Prozessen eine voraussichtlich schlechtere Berechnungsbasis gegeben (Vgl. Kapitel 3.2.1).

Da pro Durchlauf je Untersuchungsgebiet in der Software gegebenenfalls Anpassungen bei den internen Kameraparametern und Kamerakalibrierungen gemacht wurden, hätten gegebenenfalls die Ausgangswerte der Brennweite, des Bildmittelpunktes, der radialen Verzerrung und tangentialen Verzerrung mit den optimierten Werte verglichen werden sollen. Bisher werden die Basis- und angepassten Werte nur bei Pix4Dmapper in der Ausgabe vermerkt und ein Vergleich war in dem Arbeitsumfang der Arbeit nicht möglich.

Die Datenbasis wurde nach der Befliegung nicht angepasst. Vermutlich könnte durch das Duplizieren und Optimieren von Bildern eine bessere Verknüpfung der Bilder und Textur entstehen, so könnten zum Beispiel dunkle Objektbereiche im Schatten durch eine erhöhte Helligkeit hervorkommen oder zu helle Objektbereiche durch einen stärkeren Kontrast erkannt werden. Bei einem Flugbuffer von mindestens 10 % um das Gebiet und das Beschneiden der Punktwolke auf das eigentliche Gebiet könnten auch Randgebiete in dem späteren Orthomosaik ohne Lücken und mit weniger Ausreißern generiert werden. Für die hochqualitative Visualisierung von derzeit mit Ausreißern und Löchern versehenen Objekten, wie Bäumen und Gebäudefassaden empfehlen sich neben der bisherigen Drohnenbildaufnahme die Erfassung mit verschiedenen Flugtypen (Pix4D 2019j). Um Modellfehler auszugleichen hätte es bei beiden Gebieten die Möglichkeit gegeben, die Objekte von allen Seiten zu erfassen und in unterschiedlichen Höhen und Winkeln zu überfliegen. Eine Kombination aus Nadir- und Schrägbildaufnahmen in diversen Richtungen und Höhen wäre empfehlenswert, um eine Vielzahl an Bildern von der Oberfläche, Dächern, Gebäudefassaden und Bereichen unterhalb des Blätterdachs zu erstellen.



**Abbildung 43: Optimierte Befliegungsdaten nach Geländeform in der Flugplanung (eigene Darstellung)**

Über den in der obigen Abbildung dargestellten groben Flugplan hätte man beispielsweise durch den niedrigen Flug entlang des Geländes mit unterschiedlichen Winkeln die Fassaden von Häusern oder den Raum unter dem Kronendach von dichten Bäumen beziehungsweise deren Wuchs auf mehreren Bildern vermerken können (Abbildung 43). Zudem hätte dieser Flug auch eine gleichbleibende Auflösung trotz extremer Höhenunterschiede und die Erfassung von Daten bei natürlichen und künstlichen Extrema des Geländes ermöglicht. Ein hoher

Schrägbildflug mit vordefinierter Höhe erzeugt zwar eine sehr viel niedrigere Auflösung, erlaubt jedoch die Modellverknüpfung von Geländeteilen in schwer sichtbaren Bereichen, wie zum Beispiel Häuserschluchten in dicht bebauten Siedlungen (Pix4D 2019g). Für möglichst hochauflösende Orthomosaik hätte ein niedriger Nadir-Flug mit vordefinierter Höhe auf einer Ebene bessere Rohdaten geliefert (Pix4D 2019j).

Bei der zeitlichen Auflösung sind kaum Grenzen gesetzt, so ist zum Beispiel auch eine 4-dimensionale Analyse der zwei Gebiete möglich, zum Beispiel für die Überwachung von Pachtgrenzen. Die zeitliche Veränderung der Bilder von U1 lässt sich pauschal nicht einordnen, je nachdem welcher Bereich betrachtet wird, verändert sich das Bild kaum bis sehr stark. Die festen Gebäude und meisten Dauercamping-Parzellen bleiben unverändert. Die Bäume wechseln pro Jahreszeit ihre Kronenform, bleiben jedoch bis auf einzelne Ausnahmen bestehen. Nur durch Zelte und Saisoncampingwagen kommt es zu starken Differenzen im Bereich der Wiesen. Für die Erstellung eines Lageplans würde sich ein Geländemodell oder die Extraktion der Objekte daher eignen. Für die Visualisierung der saisonalen Belegung des Platzes wären die Bäume hinderlich.

Möglicher Anwendungsfall für die weitere Verwendung der Ergebnisse bei dem Campingplatz wäre ein digitaler Lageplan oder dreidimensionales Geländemodell an der Rezeption des Platzes. Relevant für die Verwaltung der Parzellen und Übersicht über Belegungen wäre das Orthomosaik, da mit diesem eine digitale Flächenverwaltung aufgebaut werden könnte. Die Ausgabe eines 3D-Modells für die Planung neuer Gebäude oder Umbaumaßnahmen, wie zum Beispiel der Bau eines Parkhauses, wären mögliche Anwendungsfälle für das Stadtwerk am See. Ein weiteres Untersuchungsfeld wäre die Planung der internen Gebäudestrukturen und die Verknüpfung von BIM im Rahmen möglicher neuer Gebäude.

Aufgrund der Satellitenentfernung, Blockade der Ionosphäre und Empfangsfehler bei der Erfassung der Bildposition sind horizontale Projektungenauigkeiten von 3 Metern und vertikale Ungenauigkeiten von 5 Metern bei dem Positionierungssystem gegeben (Grimes 2008). Der atmosphärische Fehler kann durch das Mitteln der georeferenzierten Bilder nicht erkannt und somit reduziert werden - dies ist die durch die GPS-Methode gegebene Genauigkeit (Pix4D 2011c; Grimes 2008). Durch satellitenbasierte Ergänzungssysteme, im englischen Based Augmentation Systems (SBAS) hätte vermutlich eine sehr viel höhere Genauigkeit der Position erreicht werden können (Grimes 2008).

Über standardisierte Dienste hätte ohne erheblichen Mehraufwand, jedoch verbunden mit Kosten, die Nutzung der Signalkorrektur über SBAS erfolgen können (European GSA 2016).

Mit dem RTK-GPS hätte mit Hilfe von stationären Systemen auf der Erde eine Positionsgenauigkeit von 1 bis 2 cm erreicht werden können (Pix4D 2017). Die Verwendung der zwei genutzten DJI-Drohnen ohne weitere Systeme ist daher bei Anwendungsfällen, bei denen cm-Genauigkeiten benötigt werden, ausreichend.

Unabhängig von der Befliegungsform hätten bei beiden Gebieten Kontroll- und Passpunkte in Richtung X, Y und Z homogen verteilt vorliegen sollen, um die Genauigkeit zu verbessern und zu validieren (Oniga/Breaban/Statescu 2018). Die Lage, Anzahl und Aufnahmequalität von den GCPs bei U2 war nicht optimal und führe teils zu schlechteren Ergebnissen (Siehe Kapitel 3.2.7). Durch das Setzen eines zentral gelegenen GCPs innerhalb der vier gesetzten Punkte, sowie eines in dem östlichen Teil gelegene GCPs hätten die Genauigkeit der Lage im gesamten Gebiet optimiert werden können. Wie bereits durch Strecha (2012) belegt, ist eine Verteilung von 5 bis 10 GCPs für Gebiete eine geeignete Anzahl (Strecha 2012).

Die Erfassung einiger weiterer Punkte würde die Genauigkeit verbessern. Das Setzen von GCPs ist natürlich nicht immer machbar, zum Beispiel bei nicht begehbarem Gelände, wie Wasser oder unsicherem Gelände, wie einem Berghang. Zu beachten ist zudem, dass bei Gebäudekanten, Bäumen oder anderen schwer erfassbaren Objekten die Genauigkeit weiterhin schlechter sein kann, wenn diese von der gewählten Kameraposition nicht optimal aufgenommen wurden. Bedingt durch den hohen Aufwand an Ausstattungskosten, Zeit und Arbeit für die Planung und Messung der GCP-Standorte bei jeder Befliegung, wurde auf eine erneute Aufnahme von Punkten verzichtet. Diese Vorgehensweise entspricht also jener, die auch von einem Laien in ähnlicher Form durchführbar wäre.

Die Werte, die über Pix4Dmapper für das zweite Untersuchungsgebiet ermittelt wurden, lassen erkennen, dass die GCPs die relative und absolute Genauigkeit des Modells nicht verbessern, sondern verschlechtern. Außer bei der optimierten Prozessierung von U2, ergab die Berechnung der Varianz der absoluten Kamerawerte bei Pix4D sowohl bei U1, als auch bei U2 negative Werte. Dies lässt sich durch die Korrektur des Modells anhand der GCPs in Z-Richtung erklären (Siehe Kapitel 3.2.7).

Die Genauigkeit der GCPs kann nicht auf alle Flächen übertragen werden, daher sollten neben den GCPs auch unabhängige Checkpoints für die Messung der Genauigkeit genutzt werden (Sanz-Ablanedo et al. 2018). Mit zunehmendem Abstand zu den GCPs könnten stärkere Genauigkeitsfehler und fehlerhafte Bildzuordnung, sowie die entstandenen Verzerrungen evaluiert werden. Wesentliche Fehlerfaktoren waren die höheren Elemente (z.B. Bäume und Fahrzeuge) in der Nähe der GCPs, die auf manchen Bildern den Punkt verdeckten. Da das

Zentrum des GCPs nicht millimetergenau ermittelt werden konnte ist eine exakte Punktverortung nicht gewährleistet (Siehe Kapitel 3.2.7). Weiterer Faktor für die steigenden Verschiebungen zur Mitte des Modells von U2 ist das Fehlen eines mittig auf dem Untersuchungsgebiet platzierten Punktes (Siehe Kapitel 3.2.7). Bei einem verbesserten Durchlauf hätte die Messung zusätzlich durch Markierungen auf dem Boden, wie einem Kreuz mit Sprühfarbe oder Bodenplatte mit Muster und mindestens einem weiteren Punkt für die gleichmäßige Punktverteilung erfolgen müssen. Entscheidend ist hier der Anwendungsfall und in welchem Bereich die Genauigkeiten relevant sind – zum Beispiel ist für die Volumenberechnung einer Kiesgrube die Genauigkeit und Qualität des angrenzenden Waldstücks irrelevant (Oniga/Breaban/Statescu 2018, S. 2).

Die dritte Frage war, bis zu welchem Grad die Rohdatenqualität die Prozessierungsergebnisse beeinflusst. Diese war dabei, dass unabhängig von der gewählten Plattform die Qualität der Ursprungsdaten nicht den erfolgreichen Abschluss der Prozessschritte oder die Qualität der Ergebnisse tangiert (Siehe Kapitel 1.3.2). Diese Hypothese wurde falsifiziert.

Die Akzeptanz der Modelle durch Vermessungsbehörden ist fraglich. Inwieweit die Geeignetheit, der durch Micro-UAV hergestellten Daten für die behördliche Nutzung vorliegt, hängt stark von den Eingangsdaten und der Verarbeitungsqualität ab. Unbestreitbar bei dieser Art der Datenaufnahme ist die Zeitersparnis bei der Erzeugung neuer Bilddaten. Die Ausgabe von Ergebnissen als weiterer Schritt kann je nach gewünschter Qualität und Anwendungsfall, durch die Nachbereitung, Aufnahme weiterer Bilder mit diversen Kameras und Testreihen zu einem erheblichen Mehraufwand führen. Dieser kann schlecht kalkuliert werden (Siehe Kapitel 3.2.8).

## 5. Ausblick

### 5.1. Datenerhebung

Für eine optimale Datenbasis wäre vermutlich eine Drohne mit RTK-GNSS und besseren Kameraparametern optimal gewesen, zum Beispiel die DJI Phantom 4 RTK – dies sprengte jedoch den Rahmen dieser Arbeit durch den erhöhten Kostenaufwand und Sprung aus der Micro-UAV Klasse. Neben dem RTK-GPS wäre, wie anfangs beschrieben, zudem das DGPS hilfreich für eine höhere Genauigkeit der Messungen (European GSA 2016; Pix4D 2017).

Die Erweiterung des GNSS um Satelliten von China für Compass und Europa für Galileo könnte in den nächsten Jahren die genauere Verortung bereits ohne weitere technische Ausstattung für UAVs ermöglichen. Inwieweit und wie schnell diese Satelliten jedoch für normale Nutzer verfügbar sind, kann derzeit nur abgeschätzt werden. Durchaus spannend für weitere Analysen im europäischen Raum ist die Verortungsqualität der Drohne über öffentliche Galileo-Satelliten.

Die gleichzeitige Kalibrierung der Kamera während der eigentlichen Messung ist über die sogenannte Simultankalibrierung möglich. Eine Unterstützung dieser würde bedingt durch die identischen Aufnahmen somit weniger Aufwand und eine Garantie für die kalibrierten Kameras bieten. Zudem könnte man bei der manuellen Anpassung der Kameraparameter bessere Ergebnisse erzeugen. Mit einem Shutter von mindestens 200, höherer Belichtung bei starker Wolkendecke und später Stunde und ISO-Werten von 100-200 wurden bei weiteren Flugreihen gute Erfahrungen gemacht.

Für die Flugplanung wurde die Software Pix4D Capture genutzt. Ab Version 4.5 kann ein größeres Gebiet befliegen werden, als die Akkukapazität der Drohne überhaupt ermöglicht. Allerdings bietet die Software eine nahtlose Wiederaufnahme der Mission. Diese neue Version wurde nach dem Befliegungszeitraum veröffentlicht und konnte daher nicht genutzt werden. Q Ground Control, DJI GS PRO Litchi, DronesMadeEasy oder DroneDeploy wären Alternativen für die Flugplanung und -durchführung. Mit der Anwendung DronesMadeEasy kann bei der Befliegung die Orientierung der Drohne am Boden für eine konstante Höhe erfolgen und die Geschwindigkeit automatisch an Sensor und Shutter angepasst werden. Des Weiteren könnte man über das Begehen des Gebietes mit einer Kamera auch hochqualitative Aufnahmen von einzelnen Problembereichen machen, beispielsweise für die Visualisierung einer Fassade in hohem Detailgrad.

Zudem wäre der Test eines reinen Open Source Arbeitsprozesses interessant. Der Bau und Nutzen eines Open Source Mikrokopters als UAV würde die Anschaffungskosten und laufenden Aufwendungen des UAS deutlich senken, da die Fortführung sowohl Erweiterungen, als auch Anpassungen flexibel zulässt. Open Source ist zudem auch in anderen Bereichen des UAS möglich, zum Beispiel im Autopiloten mit Alu Pilot und Raspberry Pi. Die Untersuchung aller weiteren Komponenten sprengt wie bereits in den Zielen vermerkt, jedoch den Rahmen der Arbeit.

Die genutzten Drohnen erlaubten die Aufnahmen von RGB-Bildern - für die Analyse weiterer Funktionen wären NIR-Aufnahmen durchaus interessant. Durch die genutzte Ausrüstung, einem geschlossenem und proprietären Flugsystem, konnte ohne Manipulation der Grundausrüstung kein NIR-Filter für die Befliegung und spätere Verarbeitungen des Vegetationsfilters aktiviert werden. Für die weitere Auswertung konnte jedoch in einem GIS-System, wie zum Beispiel GRASS GIS ein solcher Filter durch die Entfernung des roten Bandes eingebunden werden (Moutinho, 2015 S.29).

Für die einheitliche Regelung von Drohnen und Flugmodellen in dem Luftraum der europäischen Union soll 2020 das EU-Drohngesetz in Kraft treten und die Erhebung von Daten in Zukunft reglementieren. Inwieweit durch dieses EU-Drohngesetz die Möglichkeiten von Micro-UAVs zur eigenen Datenaufnahme in Zukunft eingeschränkt werden, kann nicht vollumfänglich geklärt werden und muss nach in Kraft treten der Gesetzeslage eruiert werden.

Das im Diskurs von BigData und OpenData stetig aufkommende Thema Demokratisierung der Geodaten müsste in weiteren Arbeiten evaluiert werden, da die aufgezeigten Möglichkeiten zur eigenen Datenerhebung mit UAVs fast unbegrenzt sind.

## 5.2. Datenverarbeitung

Jede der vier Anwendungen bietet eine Vielzahl weiterer Konfigurationsmöglichkeiten. Neben der Durchführung der Prozessierung mit den optimalen Projekteinstellungen in der jeweiligen Anwendung kann eine händische Optimierung erfolgen. In der Punktwolke können beispielsweise eindeutige Ausreißer und Artefakte entfernt, Kanten und Flächen händisch definiert, Löcher somit geschlossen und bewegte Objekte entfernt werden. Somit würde man zum Beispiel weniger Artefakte durch Autos, Menschen, Baumkronen oder unscharfe Gebäudekanten erhalten – ein Prozess der momentan nicht automatisiert durchgeführt werden kann.

Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung (Verarbeitungsalgorithmus, Benutzerfreundlichkeit, etc.) können die Prozesse stetig optimiert werden, wodurch die Berechnung weniger fehlerbehaftet erfolgt. Optimierte Ergebnisse können durch die Deaktivierung der Interpolation und Füllen der Lücken über Postprocessing erzeugt werden. Für die Generierung eines DSM hätte bei der Punktwolkengenerierung eine Klassifizierung in Bodenpunkte und weitere Punkte erfolgen müssen. Maschinenbasierte intelligente Klassifizierungsmechanismen ermöglichen die automatisierte Weiterverarbeitung der generierten Punktwolken (Agisoft LLC 2019a; Pix4D 2019c). Darauf aufbauend hätte bei der Dreiecksvermaschung die Auswahl der Bodenpunkte für die Modellgenerierung erfolgen und somit das Oberflächenmodell erzeugt werden können.

Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich Pix4Dmapper wären zum Beispiel die Deaktivierung von „Multiscale“ im zweiten Schritt oder die DSM-Generierung mit Hilfe der „Inverse Distance Weighting“ Methode (Pix4D 2019k).

Eine manuelle Verknüpfung der Bilder, beispielsweise für den Abgleich geographisch naher Punkte, ist über die Nutzung einer externen Datei hinsichtlich VisualSFM möglich (Funktion „Compute Specified Match“). Mehr Graphikprozessoren würden in Teilen der Berechnung zu besseren Ergebnissen führen, da andere Einstellungen genutzt werden können (Bach 2015). Der Zeitaufwand reduziert sich dadurch, bedingt aber den Einsatz eines geeigneten Hardwaresystems, z.B. einer Workstation. Bei VisualSFM können mehrere Graphikprozessoren über die SiftGPU-Berechnung unterstützt werden (Wu 2013b). Der erste Ansatz für die automatische GCP-Integration bei OpenDroneMap wurde bereits über ein externes experimentelles Projekt gestartet (Wolkstein 2016).

Die in Kapitel 2.2.1 aufgeführten Gründe machen die, in dieser Arbeit vorgestellten Anwendungen, repräsentativ. Neben den vier vorgestellten Anwendungen gibt es eine Vielzahl anderer Programme, die teilweise explizit auf geographische Anwendungsfälle ausgerichtet sind und nicht analysiert wurden. Beliebte Alternativen sind zum Beispiel MicMac, CADDy von 3Dsurvey und Acute3D Viewer von Bentley. Alternativen sind in der folgenden Tabelle aufgelistet (Siehe Tabelle 8).

Freeware	Payware
Regard3D <a href="http://www.regard3d.org/">http://www.regard3d.org/</a>	ArcTron RealityCapture <a href="https://www.arctron.de/produkte/realitycapture/">https://www.arctron.de/produkte/realitycapture/</a>
Colmap <a href="https://colmap.github.io/">https://colmap.github.io/</a>	3DF Zephyr <a href="https://www.3dflow.net/3df-zephyr-pro-3d-models-from-photos/">https://www.3dflow.net/3df-zephyr-pro-3d-models-from-photos/</a>
AliceVision <a href="https://alicevision.github.io/">https://alicevision.github.io/</a>	

Freeware	Payware
Bundler Photogrammetrie Package <a href="http://tacticalspace.org/archives/bundler-photogrammetry-package/">http://tacticalspace.org/archives/bundler-photogrammetry-package/</a> SFMToolkit <a href="https://github.com/dddExperiments/SFMToolkit">https://github.com/dddExperiments/SFMToolkit</a> PhotoSynth Toolkit <a href="https://github.com/dddExperiments/PhotoSynthToolkit">https://github.com/dddExperiments/PhotoSynthToolkit</a>	3DF Samantha <a href="https://www.3dflow.net/samantha-structure-from-motion/">https://www.3dflow.net/samantha-structure-from-motion/</a> Acute3D <a href="https://www.acute3d.com/">https://www.acute3d.com/</a> PhotoModeler <a href="https://www.photomodeler.com/">https://www.photomodeler.com/</a>

**Tabelle 8: Alternative Photogrammetriesoftware**

Zudem könnte man für unterschiedlichen Anwendungsfällen die einzelnen Vor- und Nachteile der Anwendungen bei den Berechnungsschritten analysieren. Spannend wären die Limitationen in Hinblick auf die Geländegröße, da durch die Größe und Akkulaufzeit des UAV die Parameter, wie zum Beispiel die Flugzeit, Entfernung zum Piloten und Höhe begrenzt sind. In weiteren Testreihen könnte evaluiert werden, wie sich die Algorithmen zum Beispiel bei der Verarbeitung von Glasflächen oder Wasser verhalten.

Ein weiterer spannender Aspekt ist die Verwendung der generierten Modell im Forschungsfeld der Virtual Realities (VR) und Argumented Realities (AR). Durch die Implementierung des Modells kann eine interaktive Anwendung erstellt werden, die eine Planung und interaktive Abfragen ermöglicht (Unity Technologies 2019). Mögliche Anwendungsfälle sind z.B. Visualisierung von Planungsmaßnahmen, Analyse und Bearbeitung von Prozessen im Gelände und die Visualisierung von schwer begeharen Gebieten oder verdeckten Bereichen.

Mit der Open Source JavaScript Bibliothek Cesium.js wäre beispielsweise eine dynamische Ansicht des texturierten 3D-Modells und die Kombination mit weiteren Geodaten möglich. Ebenso könnte eine Abfrage von klassifizierten Punktwolken ohne zusätzliche Software unter alleiniger Nutzung eines aktuellen Browsers ermöglicht werden.

Aufgrund der technologischen Entwicklung im 3D-Drucker Bereich ist die Präsentation des erzeugten Modells kostengünstig möglich. Je nach Auflösung und Detailgrad des Modells können hochqualitative Modelle produziert werden (Abbildung 44). Das dargestellte 3D-Modell wurde im Rahmen der Arbeit mit weißem Filament gedruckt und danach händisch mit Acrylfarben texturiert (Abbildung 45).



Abbildung 44: 3D-Modelldruck mit weißem Filament (eigene Darstellung)



Abbildung 45: Texturiertes Modell (Eigene Darstellung)

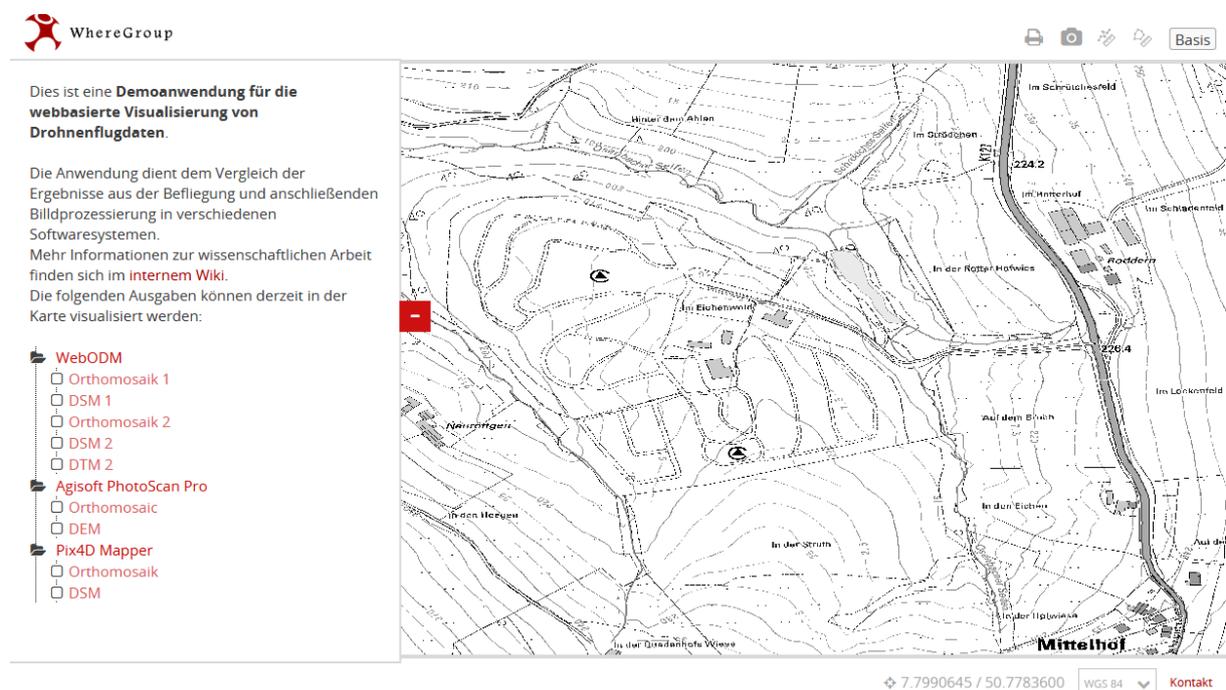
Für die Anwendung im Katastrophenschutz wäre eine Analyse von Wärmebildern interessant. Durch die Messung der Temperaturdifferenzen eignen sich die Modelle für eine Vielzahl an Anwendungsszenarien, wie zum Beispiel die Rettung bei Lawinenunglücken oder die Vulkananalyse.

Die Metadatendokumentation der Missionen und entstandenen Produkte des UAS wurde bisher eher vernachlässigt. Die durchgehende und digitale Aufnahme aller Logbucheinträge, erhobenen Datenmengen, Verarbeitungsschritte und weiterer Datenmengen, wie zum Beispiel der Exportprodukte in einer durchdachten Metadatenstruktur sind wichtige Voraussetzung für die Qualitätssicherung und rechtssichere Arbeit (Paulus et al. 2014). Eine mögliche Erweiterung des Workflows wäre die Erstellung von zeitlichen Ansichten über multitemporale Befliegungen. Damit verbunden ist der Aufbau von OGC-Diensten, wie zum Beispiel einem Web Map Service-Time für die Erfassung der zeitlichen Auflösung oder einem Web Catalog Service für die Suche nach räumlichen Kriterien oder Metadaten.

Die Untersuchung eines vollständig automatisierten Workflows von den Rohdaten zum Webdienst und Echtzeit-Übertragung der Einzelbilder aus der Befliegung in einen Webdienst für die höchste Datenaktualität wäre eine spannende Weiterentwicklung. Die nötigen manuellen

Arbeitsschritte für die Übertragung der Daten, Anpassungen und Gegenprüfungen der Prozessergebnisse machen dies jedoch derzeit nicht in dem gewünschten Qualitätsgrad möglich.

Für die Präsentation und interne Weitergabe der Ergebnisse wäre beispielsweise eine Open Source Geodateninfrastruktur mit dem WebGIS-Client Mapbender und dem Kartenserver QGIS Server möglich. Dies würde die effiziente Verwaltung von erfassten Geo- und Sachdaten erlauben. Die folgende Abbildung zeigt die webbasiert veröffentlichten Orthomosaik, DSM und DTM von diversen Untersuchungsreihen in einer prototypischen Anwendungsoberfläche des oben genannten WebGIS-Clients (Abbildung 46).



**Abbildung 46: WebGIS Demoaufbau mit Open Source Software**

Nicht nur die Visualisierung, sondern auch die Bearbeitung und Analyse der Ergebnisse könnte durch eine solche Anwendung ermöglicht werden und Arbeitsprozesse optimieren. Mögliche Anwendungsfälle wären die Digitalisierung von Straßenschäden anhand der Orthomosaik, sowie die Abfrage von Informationen aus dem digitalen Datenbestand. Mit Hilfe der vorhandenen Informationen könnten tiefgreifende Analysen, wie zum Beispiel die Kategorisierung von Wanderwegen nach Schwierigkeitsgrad zusammen mit diversen Visualisierungsformen, wie zum Beispiel einem Höhenprofil und der Dauer der Tour, nach der automatisierten Berechnung auf Basis des Geländemodells ausgegeben werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass MicroUAVs für die Erfassung und Analyse von Geodaten weiterhin ein großes Potential bieten. In Zukunft werden die MicroUAVs

gegebenenfalls günstiger sein. Zudem ermöglichen die Prozessierungswerkzeuge durch optimierte Oberflächen und Verarbeitungsschritte die effiziente Weiterverarbeitung der erfassten Daten zu hochauflösenden Bildern.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte die Hypothese, dass Open Source Software der proprietären Software bei der UAV-Bildprozessierung überlegen ist, nicht bestätigt werden. Allerdings zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass die Software ODM hinsichtlich der untersuchten funktionalen und nicht funktionalen Anforderungen eine vielversprechende Alternative darstellt. Auch gilt weiterhin, dass die reduzierten Kosten von Open Source Software einen niedrigeinstufigen Einstieg in die eigene Datenprozessierung für Laien ermöglichen. Diese Arbeit bietet somit einen erheblichen Mehrwert für den Einstieg in die behandelte Thematik, da diese einen fundierten Vergleich der verschiedenen Systeme herstellt.

## 6. Literaturverzeichnis

Agisoft LLC (2017): Split in chunks.py. In: Split in chunks.py. Online unter: [http://wiki.agisoft.com/wiki/Split\\_in\\_chunks.py](http://wiki.agisoft.com/wiki/Split_in_chunks.py).

Agisoft LLC (2019a): Agisoft Metashape User Manual - Professional Edition, Version 1.5. Online unter: [https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_1\\_5\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf).

Agisoft LLC (2019b): Agisoft PhotoScan Memory Requirements. In: Agisoft PhotoScan Memory Requirements. Online unter: [https://www.agisoft.com/pdf/tips\\_and\\_tricks/PhotoScan\\_Memory\\_Requirements.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/tips_and_tricks/PhotoScan_Memory_Requirements.pdf).

Agisoft LLC (2019c): Agisoft Metashape Change Log. S. 39.

Agisoft LLC: Sample Data Agisoft. In: Download Sample Data. Online unter: <https://www.agisoft.com/downloads/sample-data/>.

Akenine-Möller, Tomas/Haines, Eric/Hoffman, Naty (2008): Real-time Rendering. 3. Wellesley, Mass: Taylor & Francis Ltd.

Amhar, Fahmi/Jansa, Josef/Ries, Christine (1998): The Generation of True Orthophotos using a 3D Building Model in conjunction with a conventional DTM. In: ISPRS Commission IV Symposium on GIS 32, S. 7.

Bach, Matt (2015): Agisoft PhotoScan GPU Acceleration. In: Puget Systems. Online unter: <https://www.pugetsystems.com/labs/articles/Agisoft-PhotoScan-GPU-Acceleration-710/>.

Bäumker, Manfred/Heimes, J. F. (2002): New Calibration and Computing Method for Direct Georeferencing of Image and Scanner Data Using the Position and Angular Data of an Hybrid Inertial

Navigation System. Bochum: Fachhochschule Bochum. Online unter: [https://www.researchgate.net/publication/254001148\\_New\\_Calibration\\_and\\_Computing\\_Method\\_for\\_Direct\\_Georeferencing\\_of\\_Image\\_and\\_Scanner\\_Data\\_Using\\_the\\_Position\\_and\\_Angular\\_Data\\_of\\_an\\_Hybrid\\_Inertial\\_Navigation\\_System](https://www.researchgate.net/publication/254001148_New_Calibration_and_Computing_Method_for_Direct_Georeferencing_of_Image_and_Scanner_Data_Using_the_Position_and_Angular_Data_of_an_Hybrid_Inertial_Navigation_System).

Bay, Herbert et al. (2008): Speeded-Up Robust Features (SURF). In: Comput. Vis. Image Underst.

Beardsley, P.A./Zisserman, A./Murray, D.W. (1997): Sequential Updating of Projective and Affine Structure from Motion. In: International Journal of Computer Vision 23, S. 235–259.

Blinn, James F./Newell, Martin E. (1976): Texture and Reflection in Computer Generated Images. In: Communications of the ACM 19, S. 542–547.

BMVI (2017a): Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten. Bundesgesetzblatt. Online unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/LF/151108-drohnen.html>.

BMVI (2017b): Verordnung zur Regelung des Betriebs von unbemannten Fluggeräten. Bundesgesetzblatt. Online unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/LF/151108-drohnen.html>.

Brown, D (1976): The Bundle Method – Progress and Prospect. In: International Archives of Photogrammetry. Helsinki. S. 1–33. (= 21). Online unter: <http://lear.inrialpes.fr/people/triggs/pubs/Brown-IAP76.pdf>.

Brown, Matthew/Szeliski, Richard/Winder, Simon (2015): Multi-Image Matching using Multi-Scale Oriented Patches. Online unter:

<http://matthewalunbrown.com/papers/cvpr05.pdf>.

Bundesamt für Justiz (2015): § 21a LuftVO - Einzelnorm. Online unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/luftvo\\_2015/\\_\\_\\_21a.html](https://www.gesetze-im-internet.de/luftvo_2015/___21a.html).

Bundesamt für Justiz (2019): § 1 LuftVG - Einzelnorm. Online unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/luftvg/\\_\\_\\_1.html](https://www.gesetze-im-internet.de/luftvg/___1.html).

Calonder, Michael et al. (2010): BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features. In: Daniilidis, Kostas/Maragos, Petros/Paragios, Nikos (Hg.): Computer Vision. Heidelberg: Springer Berlin. S. 778–792. (= Lecture Notes in Computer Science). Online unter: [https://www.cs.ubc.ca/~lowe/525/papers/calonder\\_eccv10.pdf](https://www.cs.ubc.ca/~lowe/525/papers/calonder_eccv10.pdf).

Carrivick, Jonathan/Smith, Mark/J. Quincey, Duncan (2016): Structure from Motion in the Geosciences. 1. Aufl. Wiley-Blackwell.

Chao, HaiYang/Cao, YongCan/Chen, YangQuan (2010): Autopilots for small unmanned aerial vehicles: A survey. In: International Journal of Control, Automation and Systems 8, S. 36–44.

Chu, Tianxing et al. (2016): Cotton growth modeling and assessment using unmanned aircraft system visual-band imagery. In: Journal of Applied Remote Sensing 10, S. 1.

CloudCompare (2019): CloudCompare. In: CloudCompare. Online unter: <https://www.danielgm.net/cc/>.

Dakota, Benjamin (2016): License OpenDroneMap. GitHub: OpenDroneMap.

Dakota, Benjamin (2018): OpenDroneMap - CameraCalibration Script. GitHub: OpenDroneMap.

Dakota, Benjamin et al. (2019): OpenDroneMap/ODMdata. OpenDroneMap.

Dalamagkidis, Konstantinos (2015): Handbook of Unmanned Aerial Vehicles. Dordrecht: Springer Netherlands.

Daniel, Malcolm (2004): Daguerre and the Invention of Photography. In: Heilbrunn Timeline of Art History. Online unter: [https://www.metmuseum.org/toah/hd/dagu/hd\\_dagu.htm](https://www.metmuseum.org/toah/hd/dagu/hd_dagu.htm).

Debian (2004): Debian-Gesellschaftsvertrag. In: Debian-Gesellschaftsvertrag. Online unter: [https://www.debian.org/social\\_contract#guidelines](https://www.debian.org/social_contract#guidelines).

Deutsches Institut für Normung e. V. (2018a): DIN EN ISO 9241-110. Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110:2006). In: DIN EN ISO 9241-110. Norm. Online unter: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/naerg/normen/wdc-beuth:din21:110514174>.

Deutsches Institut für Normung e. V. (2018b): DIN EN ISO 9241-11 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte (ISO 9241-11:2018). In: DIN EN ISO 9241-11. Norm. Online unter: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/naerg/normen/wdc-beuth:din21:279590417>.

DJI (2019a): DJI Phantom 3 Advanced - Spezifikationen. In: DJI Phantom 3 Advanced - Spezifikationen. Online unter: <https://www.dji.com/de/phantom-3-adv/info>.

DJI (2019b): DJI Phantom 3 Advanced - Spezifikationen. In: DJI Phantom 3 Advanced - Spezifikationen. Online unter: <https://www.dji.com/de/phantom-3-adv/info>.

- DJI (2019c): DJI Phantom 4 Pro - Spezifikationen. In: DJI Phantom 4 Pro - Spezifikationen. Online unter: <https://www.dji.com/de/phantom-4-pro/info>.
- Draeyer, Bernhard/Strecha, Christoph (2014): White paper: How accurate are UAV surveying methods? Online unter: [https://s3.amazonaws.com/mics.pix4d.com/KB/documents/Pix4D+White+paper\\_How+accurate+are+UAV+surveying+methods.pdf](https://s3.amazonaws.com/mics.pix4d.com/KB/documents/Pix4D+White+paper_How+accurate+are+UAV+surveying+methods.pdf).
- Eisenbeiss, Henri/Stempfhuber, Werner/Kolb, Michael (2009a): Genauigkeitsanalyse der 3D-Trajektorie von Mini-UAVs. In: DGPF Tagungsband. S. 407–417. Online unter: <https://www.dgpf.de/src/pub/DGPF2009.pdf>.
- Eisenbeiss, Henri/Stempfhuber, Werner/Kolb, Michael (2009b): Genauigkeitsanalyse der 3D-Trajektorie von Mini-UAVs. In: DGPF Tagungsband. S. 407–417. Online unter: <https://www.dgpf.de/src/pub/DGPF2009.pdf>.
- European Aviation Safety Agency (2018): Opinion No 01/2018. Introduction of a regulatory framework for the operation of unmanned aircraft systems in the ‘open’ and ‘specific’ categories. Online unter: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Opinion%20No%2001-2018.pdf>.
- European GSA (2016): What is SBAS? In: What is SBAS? Online unter: <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss/what-sbas>.
- Feldmann, Marco (2015): Sicherheitsrisiko Drohne. Neue Bedrohungsszenarien erfordern Gegenmaßnahmen. In: Behörden Spiegel Heft 09/2015, S. 2.
- Fitzgibbon, Andrew W./Cross, Geoff/Zisserman, Andrew (1998): Automatic 3D Model Construction for Turn-Table Sequences. In: Structure and Motion from Multiple Images in Large-Scale Environments Lecture Notes in Computer Science, S. 1–2.
- Floros, Georgios/Gargallo, Pau (2018): mapillary/OpenSfM GitHub. mapillary.
- FlyNex GmbH (2019): Map2Fly. In: Map2Fly. Online unter: <https://map2fly.flynex.de/>.
- Fonstad, Mark A. et al. (2013): Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. In: Earth Surface Processes and Landforms 38, S. 421–430.
- Förstner, Wolfgang/Wrobel, Bernhard P. (2016): Photogrammetric Computer Vision. Statistics, Geometry, and Reconstruction. Springer.
- Free Software Foundation Inc (2019): What is free software? The Free Software Definition. In: gnu.org. Online unter: <https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.html.en>.
- Furukawa, Yasutaka/Ponce, J (2007a): Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. In: Proceedings / CVPR. S. 9.
- Furukawa, Yasutaka/Ponce, J (2007b): Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. In: Proceedings / CVPR. S. 9.
- Furukawa, Yasutaka/Ponce, Jean (2019): pmoulon/CMVS-PMVS GitHub. GitHub.
- Gargallo, Pau/Floros, Georgios (2019): Ground Control Points GitHub. In: Ground Control Points GitHub. Online unter: <https://github.com/mapillary/OpenSfM>.
- GitHub Statistics (2019): OpenDroneMap/ODM Contributors GitHub. OpenDroneMap.
- GPS.gov (2017): GPS.gov: GPS Overview. In: GPS Overview. Online unter: <https://www.gps.gov/systems/gps/>.

- Graham, David (2016): New publication: The potential of small unmanned aircraft systems and structure-from-motion for topographic surveys: A test of emerging integrated approaches at Cwm Idwal, North Wales. In: davidgraham.org.uk. Online unter: <http://davidgraham.org.uk/2016/02/16/new-publication-the-potential-of-small-unmanned-aircraft-systems-and-structure-from-motion-for-topographic-surveys-a-test-of-emerging-integrated-approaches-at-cwm-idwal-north-wales/>.
- Grassmuck, Volker (2004a): Freie Software: zwischen Privat- und Gemeineigentum. 2. korrigierte Aufl. Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung. (= Schriftenreihe Bd. 458).
- Grassmuck, Volker (2004b): Freie Software: zwischen Privat- und Gemeineigentum. 2. korrigierte Aufl. Bonn: Bundeszentrale für politische Bildung. (= Schriftenreihe Bd. 458).
- Green, Susie/Bevan, Andrew/Shapland, Michael (2014): A Comparative Assessment of Structure from Motion Methods for Archaeological Research. In: *Journal of Archaeological Science* 46.
- Grenzdörffer, Görres (2013): Ziviler Einsatz unbemannter Luftfahrtsysteme (UAS) - Informationen zu rechtlichen Aspekten und Einsatzmöglichkeiten in Deutschland. S. 104–113.
- Grenzdörffer, Görres/Engel, A (2008): Eine vergleichende Untersuchung von zwei Micro-UAV's – Perspektiven für die aktuelle und kostengünstige Geoinformationsgewinnung. In: GIS. Online unter: [https://webapp.auf.uni-rostock.de/f\\_publication\\_einzel\\_cd.asp?ID=301798523](https://webapp.auf.uni-rostock.de/f_publication_einzel_cd.asp?ID=301798523).
- Grenzdörffer, Görres/Schröder, Uwe (2017): UAS unterstützte Vegetationserfassung tidebeeinflusster Makrophytenbestände in der Unterelbe. In: 37. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF in Würzburg 27, S. 5–7.
- Grimes, John G. (2008): Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard. 4th Edition. GPS.gov. Online unter: <https://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>.
- Gruen, Armin (1987): Towards Real-Time Photogrammetry. In: *Photogrammetrische Woche* 1987 12, S. 26–27.
- Habib, Ayman F./Kim, Eui-Myoung/Kim, Chang-Jae (2007): New Methodologies for True Orthophoto Generation. 12. Aufl. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (= Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 1).
- Harwin, Steve/Lucieer, Arko (2012a): Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. In: *Remote Sensing* 4, S. 1573–1599.
- Harwin, Steve/Lucieer, Arko (2012b): Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. In: *Remote Sensing* 4, S. 1573–1599.
- Honkavaara, E. et al. (2012): Hyperspectral reflectance signatures and point clouds for precision agriculture by light weight uav imagin system. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Melbourne. S. 353–358. Online unter: <https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/I-7/353/2012/isprsannals-I-7-353-2012.pdf>.
- International Organization for Standardization (2011): ISO/IEC 15408-2:2008. Information technology -- Security techniques -- Evaluation criteria for IT security -- Part 2: Security functional components. Online unter:

<https://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/index.html>.

Jäger, Reiner R./Müller, Tilman/Saler, Heinz (2003): Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren. Ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern. Heidelberg: Wichmann.

Kazhdan, Michael/Hoppe, Hugues (2013): Screened poisson surface reconstruction. In: ACM Transactions on Graphics 32, S. 1–13.

Kinberger, Michaela et al. (2019): Open Source GIS als Alternative im Desktop-Bereich - Evaluation freier Software im Bereich Geoinformation. S. 466–472.

Kraus, Karl (2004a): Photogrammetrie: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7. Aufl. Berlin: De Gruyter.

Kraus, Karl (2004b): Photogrammetrie: Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7. Aufl. Berlin: De Gruyter.

Kühnen, Andreas (2014): Aus der Luft ins GIS. In: gis.Business 2, S. 38–39.

Kumar, Vineet/Gordon, Brett R./Srinivasan, Kannan (2011): Competitive Strategy for Open Source Software. In: Marketing Science 30, S. 1066–1078.

Lange, Robert (2006): 3D time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology. Siegen. Online unter: <https://dokumentix.ub.uni-siegen.de/opus/volltexte/2006/178/>.

Laun, Martina (2017): Inventur im Flug - Prototyp einer Inventurdrohne vorgestellt. In: Der Betriebsleiter. Online unter: <http://digital.derbetriebsleiter.de/derbetriebsleiter-6-2017/58764738/10>.

Lehmann, Jan R. K. et al. (2017): Open-Source Processing and Analysis of Aerial Imagery Acquired with a Low-Cost Unmanned Aerial System to Support Invasive Plant Management. In: Frontiers in Environmental Science 5, S. 16.

Lehmann, Gerhard (2019): Photogrammetrie. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

Liu, Min et al. (2010): Transformation of EXIF images. Online unter: <https://patentimages.storage.googleapis.com/9e/7a/c7/ad1947fc228954/US7676118.pdf>.

Lowe, David G. (2004): Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. In: International Journal of Computer Vision 60.

Lowe, David (2005): Keypoint detector. In: Demo Software: SIFT Keypoint Detector. Online unter: <https://www.cs.ubc.ca/~lowe/keypoints/>.

Mancini, Francesco et al. (2013): Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High-Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments. In: Remote Sensing 5, S. 6880–6898.

Mather, Stephen/Dakota, Benjamin (2017): OpenDroneMap/ODM Roadmap GitHub. GitHub: OpenDroneMap. Online unter: <https://github.com/OpenDroneMap/ODM>.

Morad, M./Chalmers, A. I./O'Regan, P. R. (1996): The role of root-mean-square error in the geo-transformation of images in GIS. In: International Journal of Geographical Information Systems 10, S. 347–348.

Morgan, Jakob A./Brogan, Daniel J. (2016): How to VisualSFM. Online unter: [https://d32ogoqmya1dw8.cloudfront.net/files/gets/teaching\\_materials/high-rez-topo/visual\\_sfm\\_tutorial.pdf](https://d32ogoqmya1dw8.cloudfront.net/files/gets/teaching_materials/high-rez-topo/visual_sfm_tutorial.pdf).

Moulon, Pierre (2019): pmoulon/CMVS-PMVS GitHub. GitHub.

Moutinho, Oscar Filipe Gomes (2015): Evaluation of Photogrammetric Solutions for RPAS: Commercial vs Open Source. S. 28–32.

Nusser, Bernd (2017): Visionen mit Drohnen. In: allgemeine fleischer zeitung, S. 18.

Oniga, Valeria-Ersilia/Breaban, Ana-Ioana/Statescu, Florian (2018): Determining the Optimum Number of Ground Control Points for Obtaining High Precision Results Based on UAS Images. In: Proceedings ECRS 2. MDPI. S. 11. Online unter: <https://www.mdpi.com/2504-3900/2/7/352>.

OpenDroneMap (2018a): Video Reconstruction (Experimental). In: Video Reconstruction (Developers Only). Online unter: <https://docs.opendronemap.org/using.html#video-reconstruction-developers-only>.

OpenDroneMap (2018b): Add smvs as the default dense point cloud reconstruction algorithm (#836). In: GitHub ODM #836. Online unter: <https://github.com/OpenDroneMap/ODM/issues/836>.

OpenDroneMap (2019a): OpenDroneMap 0.4 Documentation. In: OpenDroneMap 0.4 Documentation. Online unter: <https://docs.opendronemap.org/building.html#hardware-recommendations>.

OpenDroneMap (2019b): Running OpenDrohneMap. Running ODM with Ground Control. In: Running ODM with Ground Control. Online unter: <https://github.com/OpenDroneMap/ODM/wiki/Running-OpenDroneMap#running-odm-with-ground-control>.

OpenDroneMap (2019c): Dataset Structure. In: Dataset Structure. Online unter:

<https://docs.opendronemap.org/dataset.html#>.

OpenDroneMap (2019d): OpenDroneMap: The Missing Guide. In: OpenDroneMap: The Missing Guide. Online unter: <https://odmbook.com/>.

Pasumansky, Alexey (2019): Cloud processing. In: Cloud processing. Online unter: <https://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=10209.0>.

Paulus, Gernot et al. (2014): RPAS Mission Portal – ein Webportal zur Metadatendokumentation von Remotely Piloted Aircraft Systems Missionen. Herbert Wichmann Verlag, VDE VERLAG GMBH. Online unter: [http://gispoint.de/fileadmin/user\\_upload/paper\\_gis\\_open/537543059.pdf](http://gispoint.de/fileadmin/user_upload/paper_gis_open/537543059.pdf).

Piracés, Pau Gargallo/Dakota, Benjamin/Toffanin, Piero (2019): Split-merge nearing completion. In: OpenDroneMap. Online unter: <https://www.opendronemap.org/2019/05/split-merge-nearing-completion/>.

Pix4D (2011a): Reprojection error. In: Reprojection error. Online unter: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559369-Reprojection-error>.

Pix4D (2011b): Reprojection error. In: Reprojection error. Online unter: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559369-Reprojection-error>.

Pix4D (2011c): How the onboard GPS affects the project accuracy? In: Pix4D Support. Online unter: <http://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558909-How-the-onboard-GPS-affects-the-project-accuracy->.

Pix4D (2017): Do RTK/PPK drones give you better results than GCPs? In: Do RTK/PPK drones give you better results than GCPs? Online unter:

<https://www.pix4d.com/blog/rtk-ppk-drones-gcp-comparison>.

Pix4D (2019a): Pix4Dmapper Getting Started. In: Pix4Dmapper Getting Started. Online unter:

<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002496466-Getting-Started-PDF-version-EN-ES-FR-PT-LV-UA-RU>.

Pix4D (2019b): Ground sampling distance (GSD). In: Ground sampling distance (GSD). Online unter:

<http://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809-Ground-sampling-distance-GSD->.

Pix4D (2019c): Pix4D Webseite. In: Pix4D Website. Online unter:

<https://www.pix4d.com/>.

Pix4D (2019d): DSM and Orthomosaic. In: DSM and Orthomosaic. Online unter:

<http://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557769-Menu-Process-Processing-Options-3-DSM-Orthomosaic-and-Index-DSM-and-Orthomosaic>.

Pix4D (2019e): Input files Pix4D. In: Input files Pix4D. Online unter:

<http://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558539-Input-files>.

Pix4D (2019f): Computer requirements. In: Computer requirements Pix4D. Online unter: <http://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115002495966-Computer-requirements>.

Pix4D (2019g): Image Acquisition Plan Type. In: Image Acquisition Plan Type. Online unter:

<http://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459-Step-1-Before-Starting-a-Project-1-Designing-the-Image-Acquisition-Plan-a-Selecting-the-Image-Acquisition-Plan-Type>.

Pix4D (2019h): Which factors affect the accuracy of the automatic aerial triangulation (AAT)? In: Which factors affect the accuracy of the automatic aerial

triangulation (AAT)? Online unter: <http://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559049-Which-factors-affect-the-accuracy-of-the-automatic-aerial-triangulation-AAT->.

Pix4D (2019i): Pix4D Desktop preview and technical release notes. In: Support. Online unter:

<http://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/115005738363-Pix4D-Desktop-preview-and-technical-release-notes>.

Pix4D (2019j): Image Acquisition Plan Type. In: Image Acquisition Plan Type. Online unter:

<http://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459-Step-1-Before-Starting-a-Project-1-Designing-the-Image-Acquisition-Plan-a-Selecting-the-Image-Acquisition-Plan-Type>.

Pix4D (2019k): How to correct Building Artifacts in the DSM and Orthomosaic. In: Support. Online unter:

<http://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560459-How-to-correct-Building-Artifacts-in-the-DSM-and-Orthomosaic>.

Pix4Ds: Example projects Pix4D. In: Support. Online unter: <http://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360000235126-Example-projects>.

Rabchevsky, George A. (1984): Multilingual Dictionary of Remote Sensing and Photogrammetry. Falls Church, Va: Asprs Pubns.

Remondino, Fabio/Kersten, Thomas P (2012): Low-cost und open-source Lösungen für die automatisierte Generierung von 3D-Punkt-wolken – ein kritischer Überblick. In: Schriftenreihe des DVW. Fulda: Wißner-Verlag. S. 63–80. (= Schriftenreihe des DVW).

Sanz-Ablanedo, Enoc et al. (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, S. 1606.

Schwind, Michael (2016): Comparing and characterizing three-dimensional point clouds derived by structure from motion photogrammetry. S. 5–23.

Semyonov, Dimitry (2011a): Algorithms used in Photoscan. In: Re: Algorithms used in Photoscan. Online unter: <https://www.agisoft.com/forum/index.php?PHPSESSID=aa0a7f1e2cb9ae6958cc50891c85002d&topic=89.msg323#msg323>.

Semyonov, Dimitry (2011b): Algorithms used in Photoscan. In: Re: Algorithms used in Photoscan. Online unter: <https://www.agisoft.com/forum/index.php?PHPSESSID=aa0a7f1e2cb9ae6958cc50891c85002d&topic=89.msg323#msg323>.

Sprague, Peter/Toffanin, Piero (2018): Does the GPU card will affect WebODM processing? In: OpenDroneMap Community. Online unter: <https://community.opendronemap.org/t/does-the-gpu-card-will-affect-webodm-processing/332>.

Stallman, Richard (2019): Why Open Source misses the point of Free Software. In: gnu.org. Online unter: <https://www.gnu.org/philosophy/open-source-misses-the-point.html.en>.

Strecha, C. (2012): The Accuracy of Automatic Photogrammetric Techniques on Ultra-Light UAV Imagery. In: ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-1/C22, S. 125–130.

Strecha, Christoph/Van Gool, Luc/Fua, Pascal (2008): A Generative Model for True Orthorectification. Online unter: <http://www.isprs.org/congresses/beijing2008/proceedings/tc3a.html>.

Toffanin, Piero (2018): OpenDroneMap/LiveODM GitHub. GitHub: OpenDroneMap.

Toffanin, Piero (2019a): WebODM GitHub. GitHub: OpenDroneMap.

Toffanin, Piero (2019b): Announcing CloudODM and PyODM. In: Announcing CloudODM and PyODM. Online unter: <https://www.opendronemap.org/2019/01/announcing-cloudodm-and-pyodm/>.

Toffanin, Piero (2019c): OpenDroneMap/CloudODM GitHub. OpenDroneMap.

Toffanin, Piero (2019d): PyODM documentation. In: PyODM documentation. Online unter: <https://pyodm.readthedocs.io/en/latest/>.

Toffanin, Piero (2019e): Contours Plugin. OpenDroneMap/WebODM GitHub. GitHub: OpenDroneMap.

Toffanin, Piero (2019f): WebODM 0.8.1 is out! Improvements and Task Imports. In: OpenDroneMap. Online unter: <https://www.opendronemap.org/2019/02/webodm-0-8-1-is-out-improvements-and-task-imports/>.

Toffanin, Piero/Dakota, Benjamin (2019): OpenDroneMap/ODM Releases GitHub. OpenDroneMap.

Toffanin, Piero/Mather, Stephen/Dakota, Benjamin (2019): About OpenDroneMap Community. Site Statistics. In: About OpenDroneMap Community. Site Statistics. Online unter: <https://community.opendronemap.org/about>.

Tonkin, Toby et al. (2014): The potential of small unmanned aircraft systems and structure-from-motion for topographic surveys: A test of emerging integrated approaches at Cwm Idwal, North Wales. In: Geomorphology 226, S. 35–43.

Topcon Deutschland Positioning GmbH (2015): HiPer SR technische Daten. Online unter:  
[https://www.topconpositioning.com/sites/default/files/product\\_files/topcon\\_hiper\\_sr\\_technische\\_daten\\_de.pdf](https://www.topconpositioning.com/sites/default/files/product_files/topcon_hiper_sr_technische_daten_de.pdf).

Turner, Darren/Lucieer, Arko/Watson, Christopher (2012a): An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds.

Turner, Darren/Lucieer, Arko/Watson, Christopher (2012b): An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds.

Umeyama, S. (1991): Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 13, S. 376–380.

Unger, Lukas/Knopf, Philipp/Monetti, David (2017): Praxis der Datenerfassung mit Drohnen für GIS und Vermessung. In: REAL CORP (Hg.): REAL CORP 2017 Proceedings/Tagungsband. Wien: CORP. S. 717–722. Online unter:  
[https://programm.corp.at/cdrom2017/papers2017/CORP2017\\_36.pdf](https://programm.corp.at/cdrom2017/papers2017/CORP2017_36.pdf).

Unity Technologies (2019): Unity3D. In: Unity3D. Online unter:  
<https://unity3d.com/de/unity>.

Van Rossum, Anne (2015): License VisualSfM GitHub. In: License VisualSfM GitHub. Online unter:  
<https://github.com/mrquincle/visualsfm/tree/master/vsfm>.

VLFeat (2017): SIFT detector and descriptor. In: SIFT detector and descriptor. Online unter:  
<http://www.vlfeat.org/overview/sift.html>.

Waechter, Michael/Moehrle, Nils/Goesele, Michael (2014): Let There Be Color! Large-Scale Texturing of 3D Reconstructions. In: ECCV. Zürich: Springer. S. 836–850. Online unter:  
<https://www.gcc.tu-darmstadt.de/media/gcc/papers/Waechter-2014-LTB.pdf>.

Wolkstein (2016): wolkstein/OpenDroneMap-GCP\_LIST.TXT-generator. GitHub.

Woodget, Amy S. (2015): Quantifying Physical River Habitat Parametres Using Hyperspatial Resolution UAS Imagery and SfM-photogrammetry. University of Worcester. Online unter:  
<http://eprints.worc.ac.uk/3830/>.

Wu, Changchang (2011a): Multicore Bundle Adjustment Manual. In: Multicore Bundle Adjustment Manual. Online unter:  
<http://grail.cs.washington.edu/projects/mcba/manual.pdf>.

Wu, Changchang (2011b): VisualSfM: A Visual Structure from Motion System. In: VisualSfM: A Visual Structure from Motion System. Online unter:  
<http://ccwu.me/vsfm/>.

Wu, Changchang (2011c): Multicore Bundle Adjustment Manual. In: Multicore Bundle Adjustment Manual. Online unter:  
<http://grail.cs.washington.edu/projects/mcba/manual.pdf>.

Wu, Changchang (2011d): VisualSfM: A Visual Structure from Motion System. In: VisualSfM: A Visual Structure from Motion System. Online unter:  
<http://ccwu.me/vsfm/>.

Wu, Changchang (2011e): Show animations easily with VisualSfM. In: Show animations easily with VisualSfM. Online unter:  
<http://ccwu.me/vsfm/doc.html#cool>.

Wu, Changchang (2012): Thoughts on georeferencing in VisualSfM. In:

VisualSfM. Google Groups. Online unter: [https://groups.google.com/forum/#!msg/vs\\_fm/zaVCW6AHlms/K8Nep50VjaIJ](https://groups.google.com/forum/#!msg/vs_fm/zaVCW6AHlms/K8Nep50VjaIJ).

Wu, Changchang (2013a): Towards Linear-Time Incremental Structure from Motion. Seattle. S. 127–134.

Wu, Changchang (2013b): SiftGPU: A GPU Implementation of Scale Invariant Feature Transform SIFT. Online unter: <https://github.com/pitzer/SiftGPU>.

Wu, Changchang (2013c): GCP/GPS point transform. In: VisualSfM. Google Groups. Online unter: [https://groups.google.com/forum/#!msg/vs\\_fm/xRA-UfjOXVg/1L-dBh8ADSgJ](https://groups.google.com/forum/#!msg/vs_fm/xRA-UfjOXVg/1L-dBh8ADSgJ).

Wu, Changchang (2013d): GCP/GPS point transform. In: VisualSfM. Google Groups. Online unter: [https://groups.google.com/forum/#!msg/vs\\_fm/xRA-UfjOXVg/1L-dBh8ADSgJ](https://groups.google.com/forum/#!msg/vs_fm/xRA-UfjOXVg/1L-dBh8ADSgJ).

Wu, Changchang (2015a): VisualSfM : A Visual Structure from Motion System - Documentation. In: VisualSfM Documentation. Online unter: [http://ccwu.me/vs\\_fm/doc.html](http://ccwu.me/vs_fm/doc.html).

Wu, Changchang (2015b): VisualSfM : A Visual Structure from Motion System - Documentation. In: VisualSfM Documentation. Online unter: [http://ccwu.me/vs\\_fm/doc.html](http://ccwu.me/vs_fm/doc.html).

Wu, Changchang (2015c): VisualSfM Change List. In: VisualSfM Change List. Online unter: [http://ccwu.me/vs\\_fm/changelist.html](http://ccwu.me/vs_fm/changelist.html).

Wu, Changchang (2015d): GCP\_based transformation. In: GCP\_based transformation - Google Groups. Online unter: [https://groups.google.com/forum/#!msg/vs\\_fm/3CVvKKnNbKY/kfW2zYs0CAAJ](https://groups.google.com/forum/#!msg/vs_fm/3CVvKKnNbKY/kfW2zYs0CAAJ).

## 7. Anhang

Tabelle 9: Ausstattung der UAV - DJI Phantom 3 Advanced

<b>DJI Phantom 3 Advanced</b>	
<b>Fluggerät</b>	
Anschaffungskosten (Basis Stand 2018)	690 €
Gewicht	1280 g
Diagonale Größe (Ohne Propeller)	350 mm
Max. Steiggeschwindigkeit (in P-Modus)	5 m/s
Max. Sinkgeschwindigkeit (in P-Modus)	3 m/s
Max. Fluggeschwindigkeit (in A-Modus)	16 m/s
Max. Höhe Über NN	6000 m
Max. Widerstand Windgeschwindigkeit	10 m/s
Max. Flugdauer pro Akku	ca. 23 Minuten
Betriebstemperatur	0° bis 40°C
Positionsbestimmung	GPS/GLONASS
Schwebefluggenauigkeit	Vertikal: ±0.1 m (mit Sichtpositionierung) ±0.5 m (mit GPS-Positionierung) Horizontal: ±1.5 m (mit GPS-Positionierung)
Betriebstemperatur	0° bis 40°C
Navigation	autonom (Flugpfad-Planung/ Way Points)
<b>Kamera</b>	
Sensor	1/2.3" CMOS Effektive Pixel: 12,4 M (Total: 12.76 M)
Kameramodell	FC300S (3.61mm) RGB
Sensorplattform	Kamera am Rumpf
GPS	Modul im Rumpf
Objektiv	Sichtfeld (FOV) 94° 20 mm (entspricht 35-mm-Format) f/2.8 Fokus bis ∞
ISO-Bereich/ -Sensitivität	100-3200 (Video) 100-1600 (Foto)
Elektronischer Verschluss	8 - 1/8000 s
Auflösung / Bildgröße, Fotoformat	4000 x 3000, JPEG / DNG
<b>Gimbal</b>	
Kontrollierter Bereich	Nickwinkel -90° bis +30°
Stabilisierung	3-Achsen (Nicken, Rollen, Gieren)

Tabelle 10: Ausstattung der UAV - DJI Phantom 4 Pro

<b>DJI Phantom 4 Pro</b>	
<b>Fluggerät</b>	
Anschaffungskosten (Basis Stand 2018)	1.448 €
Gewicht	1388 g
Diagonale Größe (Ohne Propeller)	350 mm
Max. Steiggeschwindigkeit (in P-Modus)	5 m/s
Max. Sinkgeschwindigkeit (in P-Modus)	3 m/s

<b>DJI Phantom 4 Pro</b>	
Max. Fluggeschwindigkeit (in P-Modus)	50 m/s
Max. Höhe Über NN	6000 m
Max. Widerstand Windgeschwindigkeit	10 m/s
Max. Flugdauer pro Akku	ca. 30 Minuten
Positionsbestimmung	GPS/GLONASS
Schwebefluggenauigkeit	Vertikal: ±0.1 m (mit Sichtpositionierung) ±0.5 m (mit GPS-Positionierung) Horizontal: ±0.3 m (mit Sichtpositionierung) ±1.5 m (mit GPS-Positionierung)
Betriebstemperatur	0° bis 40°C
Navigation	autonom (Flugppfad-Planung/ Way Points)
<b>Kamera</b>	
Sensor	1" CMOS Effektive Pixel: 20 MP
Kameramodell	FC6310_8.8 5472x3648 (RGB)
Sensorplattform	Kamera am Rumpf
GPS	Modul im Rumpf
Objektiv	Sichtfeld (FOV) 84°, 8.8 mm / 24 mm (entspricht 35-mm-Format) f/2.8 - f/11. Autofokus auf 1 m bis ∞
ISO-Bereich/ -Sensitivität	Video: 100 - 3200 (Auto) 100 - 6400 (Manuell) Foto: 100 - 3200 (Auto) 100- 12800 (Manuell)
Elektronischer Verschluss	8 - 1/8000 s (mechanisch 8 – 1/2000 s)
Auflösung / Bildgröße, Fotoformat	5472×3648, JPEG / DNG
<b>Gimbal</b>	
Kontrollierter Bereich	Nickwinkel -90° bis +30°
Stabilisierung	3-Achsen (Nicken, Rollen, Gieren)
Winkelgenauigkeit	±0.02°

Tabelle 11: Unterstützte In- und Exportformate Agisoft Metashape

<b>Prozesse</b>	<b>Formate</b>
<b>Fotos hinzufügen</b>	JPG, TIFF, PNG, BMP, OpenEXR, JPEG 2000, TARGA, Digital Negative (DNG), Portable Bit Map (PGM, PPM), Multi-Picture Object (MPO), Norpix Sequence (SEQ), AscTec thermal Images (ARA)
<b>Punktwolke importieren</b>	Wavefront OBJ (*.obj), Stanford PLY (*.ply), ASCII PTS (*.pts), ASPRS LAS (*.las), LAZ (*.laz), ASTM E57 (*.e57)
<b>Punktwolke exportieren</b>	OBJ, Stanford PLY, ASCII PTS, ASPRS LAS (*.las), LAZ (*.laz), ASTM E57 (*.e57), XYZ Point Cloud (*.txt), Cesium 3D Tiles (*.zip), Universal 3D (*.u3d), Autodesk DXF (*.dxf), potree (*.zip), Agisoft OC3 (*.oc3), Topcon CL3 (*.cl3), Adobe 3D PDF (*.pdf)

Prozesse	Formate
<b>Mesh importieren</b>	OBJ, 3DS models (*.3ds), COLLADA (*.dae), Stanford PLY (*.ply), Alembic (*.abc), STL models (*.stl), Autodesk DXF, Autodesk FBX (*.fbx), Universal 3D models (*.u3d), OpenCTM models (*.ctm)
<b>Mesh exportieren</b>	OBJ, 3DS models, COLLADA (*.dae), Stanford PLY, Alembic, STL models, Autodesk DXF, Autodesk FBX, Universal 3D models, VRML models (*.wrl), Google Earth KMZ (*.kmz), OpenSceneGraph (*.osgb), Adobe 3D PDF (*.pdf)
<b>Textur erzeugen</b>	JPG, TIFF, PNG, BMP, OpenEXR, JPEG 2000, TARGA
<b>DSM und DEM exportieren</b>	GEOTIFF (auch als Import möglich), Arc/Info ASCII Grid (*.asc), Band interleaved file format (*.bil), XYZ (*.xyz), Sputnik KMZ (*.kmz)
<b>Orthomosaik exportieren</b>	GEOTIFF, JPG, TIFF, PNG, BMP, JPEG 2000, Google Earth KML/KMZ, Google Map Tiles, MBTiles, World Wind Tiles, Tiled Map Service Tiles
<b>Sonstiges</b>	Shapes und Konturlinien: ESRI Shapefile, DXF, KMZ und KML Fassaden Orthomosaik: GEOTIFF Thermalkarte: GEOTIFF Reflektanzkarte: GEOTIFF Konturlinien: ESRI Shapefile, Autodesk DXF, KMZ und KML Fluganimation: FBX-Import, Video-Export

Tabelle 12: Unterstützte In- und Exportformate Pix4D Mapper

Prozesse	Formate
<b>Fotos hinzufügen</b>	JPG, JPEG, TIF, TIFF, Videos (.avi, .mp4, .wmv, .mov)
<b>Punktwolke importieren</b>	ASPRS LAS, LAZ, XYZ Point Cloud
<b>Punktwolke exportieren</b>	ASPRS LAS, LAZ, Stanford PLY, XYZ Point Cloud
<b>Mesh importieren</b>	- nicht unterstützt -
<b>Mesh exportieren</b>	PLY, OBJ, Autodesk DXF, Autodesk FBX, Adobe 3D PDF
<b>Textur erzeugen</b>	- nicht unterstützt -
<b>DSM und DEM</b>	GEOTIFF, XYZ Point Cloud, ASPRS LAS, LAZ
<b>Orthomosaik exportieren</b>	GEOTIFF, Google Earth KML/KMZ
<b>Sonstiges</b>	Fassaden Orthomosaik und Oberflächenmodell: GEOTIFF Thermalkarte: GEOTIFF Indexkarte: GEOTIFF, ESRI Shapefile Reflektanzkarte: GEOTIFF, ESRI Shapefile Konturlinien: ESRI Shapefile, Autodesk DXF, Adobe PDF Benutzerobjekte: ESRI Shapefile, Autodesk DXF, DGN, KML Fluganimation: MP4, AVI (Wegpunkte als CSV)

Tabelle 13: Unterstützte In- und Exportprodukte WebODM

Prozesse	Formate
Fotos hinzufügen	JPG
Punktwolke importieren	- nicht unterstützt -
Punktwolke exportieren	OBJ, PLY, CSV, LAZ
Mesh importieren	- nicht unterstützt -
Mesh exportieren	PLY, OBJ
Textur erzeugen	- nicht unterstützt -
DSM und DEM exportieren	GEOTIFF
Orthomosaik exportieren	GEOTIFF, PNG
Sonstiges	- keine Sonderformate -

Tabelle 14: Unterstützte In- und Exportformate VisualSFM

Prozesse	Formate
Fotos hinzufügen	JPEG
Punktwolke importieren	- nicht unterstützt -
Punktwolke exportieren	PLY
Mesh importieren	- nicht unterstützt -
Mesh exportieren	- nicht unterstützt -
Textur erzeugen	- nicht unterstützt -
DSM und DEM exportieren	- nicht unterstützt -
Orthomosaik exportieren	- nicht unterstützt -
Sonstiges	Weiterarbeit mit externer Software, zum Beispiel CloudCompare oder MeshLab

Tabelle 15: Konfiguration in Agisoft Metashape - U1

<b>Konfiguration von Agisoft Metashape für Untersuchungsgebiet Nr. 1 (Campingplatz)</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Standardkonfiguration</b>	<b>Optimierte Konfiguration (ohne Skript)</b>
<b>1. Projekt &amp; Fotos</b>		
Bilddateien	im JPG-Format 1 Kamera für alle Bilder	im JPG-Format 1 Kamera für alle Bilder
Koordinatenreferenzsystem	WGS 84 (EPSG: 4326)	WGS 84 (EPSG: 4326)
<b>2. Punktwolke</b>		
Keypoints	No	No
Accuracy	High	High
Generic Preselection	Yes	Yes
Reference Preselection	Yes	Yes
Key Point Limit	40.000	40.000
Tie Point Limit	4.000	4.000
Adaptive camera model fitting	No	No
Kameraoptimierungsparameter	f, cx, cy, k1, k2, k3, p1, p2	f, cx, cy, k1, k2, k3, p1, p2
Adaptive camera model fitting	No	No
Punktfarben	3 Bänder, uint8	3 Bänder, uint8
<b>3. Depth Maps</b>		
Quality	Medium	Ultra High
Filtering mode	Mild	Mild
<b>4. Dichte Punktwolke</b>		
Quality	Medium	High
Depth filtering	Mild	Mild
<b>5. Model</b>		
5.1. Modellierung		
Surface type	Arbitrary	Arbitrary
Source data	Dense	Depth maps
Interpolation	Enabled	Enabled
Quality	Medium	Medium
Depth filtering	Mild	(Smoothness) 5
5.2. Texturierung		
Mapping Mode	Generic	Generic
Blending Mode	Mosaic	Mosaic
Texture Size	4.096 x 4.096, 4 Bänder, uint8	4.096 x 4.096, 4 Bänder, uint8
Enable hole filling	Yes	Yes
Enable ghosting filter	Yes	Yes
<b>6. Tiled Model</b>		
Textur	3 Bänder, uint8	3 Bänder, uint8
Source data	Dense cloud	Depth maps
Tile size	256 x 256	256 x 256
Face count	Low	Low
Enable ghosting filter	No	No
<b>7. DEM</b>		

<b>Konfiguration von Agisoft Metashape für Untersuchungsgebiet Nr. 1 (Campingplatz)</b>		
Größe	4.931 x 6.021	14.353 x 15.470
Koordinatenreferenzsystem	WGS 84	WGS 84
Source data	Dense cloud	Dense cloud
Interpolation	Enabled	Enabled
<b>8. Orthomosaik</b>		
Koordinatenreferenzsystem	WGS 84	WGS 84
Farben	3 Bänder, uint8	3 Bänder, uint8
Blending mode	Mosaic	Mosaic
Surface	Mesh	DEM
Enable hole filling	Yes	Yes

Tabelle 16: Konfiguration mit Skript in Agisoft Metashape – U1

<b>Konfiguration von Agisoft Metashape für Untersuchungsgebiet Nr. 1 (Campingplatz) mit Skript „Split in Chunks“</b>	
<b>Parameter</b>	<b>Optimierte Konfiguration (mit Skript)</b>
<b>1. Projekt &amp; Fotos</b>	
Bilddateien	im JPG-Format 1 Kamera für alle Bilder
Koordinatenreferenzsystem	WGS 84 (EPSG: 4326)
<b>2. Punktwolke</b>	
Keypoints	No
<b>5. Model</b>	
5.1. Modellierung	
Surface type	Arbitrary
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	High
Depth filtering	Aggressive

Tabelle 17: Konfiguration in Agisoft Metashape – U2

<b>Konfiguration von Agisoft Metashape für Untersuchungsgebiet Nr. 2 (SWSEE Gebäude)</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Standardkonfiguration</b>	<b>Optimierte Konfiguration (mit GCPs, ohne Skript)</b>
<b>1. Projekt &amp; Fotos</b>		
Bilddateien	im JPG-Format 1 Kamera für alle Bilder	im JPG-Format 1 Kamera für alle Bilder
Koordinatenreferenzsystem	WGS 84 (EPSG: 4326)	WGS 84 (EPSG: 4326)
<b>2. Punktwolke</b>		
Keypoints	No	No
Accuracy	High	High
Generic Preselection	Yes	Yes
Reference Preselection	Yes	Yes
Key Point Limit	40.000	40.000
Tie Point Limit	4.000	4.000

<b>Konfiguration von Agisoft Metashape für Untersuchungsgebiet Nr. 2 (SWSEE Gebäude)</b>		
Kameraoptimierungsparameter	F, cx, cy, k1-k3, p1, p2	F, b1, b2,cx, cy, k1-k4, p1-p4
Adaptive camera model fitting	No	No
Punktfarben	3 Bänder, uint8	3 Bänder, uint8
<b>3. Depth Maps</b>		
Quality	Medium	Medium
Filtering mode	Mild	Mild
<b>4. Dichte Punktwolke</b>		
Punktfarben	3 Bänder, uint8	3 Bänder, uint8
Quality	Medium	Medium
Depth filtering	Mild	Mild
<b>5. Model</b>		
Stützpunktfarben	3 Bänder, uint8	-
Textur	4.096 x 4.096, 4 Bänder, uint8	-
<b>5.1. Modellierung</b>		
Surface type	Arbitrary	Arbitrary
Source data	Dense	Sparse
Interpolation	Enabled	Enabled
Quality	Medium	-
Depth filtering	Mild	-
<b>5.2. Texturierung</b>		
Mapping Mode	Generic	-nicht durchgeführt-
Blending Mode	Mosaic	-nicht durchgeführt-
Texture Size	4.096 x 4.096, 4 Bänder, uint8	-nicht durchgeführt-
Enable hole filling	Yes	-nicht durchgeführt-
Enable ghosting filter	Yes	-nicht durchgeführt-
<b>6. Tiled Model</b>		
Textur	3 Bänder, uint8	3 Bänder, uint8
Source data	Dense cloud	Dense cloud
Tile size	256 x 256	256 x 256
Face count	Low	Low
Enable ghosting filter	No	No
<b>7. DEM</b>		
Größe	8.378 x 6.882	8.378 x 6.882
Koordinatenreferenzsystem	WGS 84	WGS 84
Source data	Dense cloud	Dense cloud
Interpolation	Enabled	Enabled
<b>8. Orthomosaik</b>		
Koordinatenreferenzsystem	WGS 84	WGS 84
Farben	3 Bänder, uint8	3 Bänder, uint8
Blending mode	Mosaic	Mosaic
Surface	Mesh	Mesh
Enable hole filling	Yes	Yes

Tabelle 18: Konfiguration mit Skript in Agisoft Metashape - U2

<b>Optimierte Konfiguration von Agisoft Metashape für Untersuchungsgebiet Nr. 2 (SWSEE Gebäude) mit Skript „Split in Chunks“</b>	
<b>Parameter</b>	<b>Optimierte Konfiguration (mit Skript)</b>
<b>1. Projekt &amp; Fotos</b>	
Bilddateien	im JPG-Format 1 Kamera für alle Bilder
Koordinatenreferenzsystem	WGS 84 (EPSG: 4326)
<b>2. Punktwolke</b>	
Keypoints	No
<b>5. Model</b>	
5.1. Modellierung	
Surface type	Dense Field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	High
Depth filtering	Aggressive

Tabelle 19: Konfiguration in Pix4Dmapper - U1

<b>Konfiguration von Pix4Dmapper für Untersuchungsgebiet Nr.1 (Campingplatz)</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Standardkonfiguration</b>	<b>Optimierte Konfiguration</b>
<b>1. Projekt &amp; Fotos</b>		
Bilddateien	im JPG-Format 1 Kamera für alle Bilder	im JPG-Format 1 Kamera für alle Bilder
Koordinatenreferenzsystem	WGS 84 (EPSG: 4326)	WGS 84 (EPSG: 4326)
Vorlage (Template)	3D Maps	Angepasste Form von 3D Maps
Keypoint Image Scale	Vollständig, Bildmaßstab 1:1	Vollständig, Bildmaßstab 1:1
Matching der Bildpaare	Aerial Grid or Corridor	Aerial Grid or Corridor
Verknüpfung über geometrisch verifiziertes Matching (Matching Strategy)	Nein	Nein
Keypoint Extraktion (Targeted Number of Keypoints)	Automatisch	Automatisch
Kalibrierungsmethode	Standard	Standard
Interne Kameraparameteroptimierung	Alle Parameter	Alle Parameter
Externe Kameraparameteroptimierung	Alle Parameter	Alle Parameter
Rematch	Auto, Nein	Auto, Nein
<b>2. Punktwolke</b>		
Bildmaßstab	Multiscale, ½ (halbe Bildgröße, Standard)	Multiscale, 1 (Originale Bildgröße, Langsam)
Punktdichte	Optimal	Optimal

<b>Konfiguration von Pix4Dmapper für Untersuchungsgebiet Nr.1 (Campingplatz)</b>		
Minimum Number of Matches	3	3
3D Textured Mesh Generierung	Ja	Ja
3D Textured Mesh Auflösung	Medium (Standard)	Hoch
3D Textured Farbbalancing	Nein	Nein
LOD Generierung	Nein	Nein
3D Textured Mesh Einstellung	Sample Density Divider: 1	Sample Density Divider: 1
Nutzung des Untersuchungsgebiets	Ja	Ja
Nutzung von Annotations	Ja	Ja
<b>3. DSM, Orthomosaik und Weiteres</b>		
3.1. DSM		
Geräuschfilter	Ja	Ja
Oberflächenglättung (Smoothing)	Ja (Type: Sharp)	Ja (Type: Sharp)
Raster Generierung	Ja	Ja
Raster Methode	Inverse Distance Weighting	Inverse Distance Weighting
Raster Kachelverbindung (Merge Tiles)	Ja	Ja
3.2. Orthomosaik		
Generierung	Ja	Ja
Raster Kachelverbindung (Merge Tiles)	Ja	Ja
GeoTIFF ohne Transparenz	Nein	Nein
Google Maps Kacheln und KML	Nein	Nein

Tabelle 20: Konfiguration in Pix4Dmapper - U2

<b>Konfiguration von Pix4Dmapper für Untersuchungsgebiet Nr.2 (SWSEE Gebäude)</b>		
<b>Parameter</b>	<b>Standardkonfiguration</b>	<b>Optimierte Konfiguration</b>
<b>1. Projekt &amp; Fotos</b>		
Bilddateien	im JPG-Format 1 Kamera für alle Bilder	im JPG-Format 1 Kamera für alle Bilder
Koordinatenreferenzsystem	WGS 84 (EPSG: 4326)	WGS 84 (EPSG: 4326)
Vorlage (Template)	3D Maps	Angepasste Form von 3D Maps
Keypoint Image Scale	Vollständig, Bildmaßstab 1:1	Vollständig, Bildmaßstab 1:1
Matching der Bildpaare	Aerial Grid or Corridor	Aerial Grid or Corridor
Verknüpfung über geometrisch verifiziertes Matching (Matching Strategy)	Nein	Nein
Keypoint Extraktion (Targeted Number of Keypoints)	Automatisch	Automatisch
Kalibrierungsmethode	Standard	Standard
Interne Kameraparameteroptimierung	Alle Parameter	Alle Parameter

<b>Konfiguration von Pix4Dmapper für Untersuchungsgebiet Nr.2 (SWSEE Gebäude)</b>		
Externe Kameraparameteroptimierung	Alle Parameter	Alle Parameter
Rematch	Auto, Nein	Auto, Nein
<b>2. Punktwolke</b>		
Bildmaßstab	Multiscale, ½ (halbe Bildgröße, Standard)	Multiscale, 1 (originale Bildgröße, Langsam)
Punktdichte	Optimal	Optimal
Minimum Number of Matches	3	3
3D Textured Mesh Generierung	Ja	Ja
3D Textured Mesh Auflösung	Medium (Standard)	Hoch
3D Textured Farbbalancing	Nein	Nein
LOD Generierung	Nein	Nein
3D Textured Mesh Einstellung	Sample Density Divider: 1	Sample Density Divider: 1
Nutzung des Untersuchungsgebiets	Ja	Ja
Nutzung von Annotations	Ja	Ja
<b>3. DSM, Orthomosaik und Weiteres</b>		
<b>3.1. DSM</b>		
Geräuschfilter	Ja	Ja
Oberflächenglättung (Smoothing)	Ja (Type: Sharp)	Ja (Type: Sharp)
Raster Generierung	Ja	Ja
Raster Methode	Inverse Distance Weighting	Inverse Distance Weighting
Raster Kachelverbindung (Merge Tiles)	Ja	Ja
<b>3.2. Orthomosaik</b>		
Generierung	Ja	Ja
Raster Kachelverbindung (Merge Tiles)	Ja	Ja
GeoTIFF ohne Transparenz	Nein	Nein
Google Maps Kacheln und KML	Nein	Nein

Tabelle 21: Konfiguration in WebODM - U1 und U2

<b>Konfiguration von WebODM für Untersuchungsgebiet Nr.1 und Nr.2</b>			
<b>Parameter</b>	<b>Standard-konfiguration (U1, U2)</b>	<b>Optimierte Konfiguration (U1)</b>	<b>Optimierte Konfiguration (U2)</b>
build_overviews	False	False	False
crop	3	0	3
Debug	True	True	True
dem_decimation	1	1	1
dem_euclidean_map	False	False	False
dem_gapfill_steps	3	3	3
dem_resolution	5	5	5
depthmap_resolution	640	700	640
dsm	True	True	True
dtm	False	False	False

<b>Konfiguration von WebODM für Untersuchungsgebiet Nr.1 und Nr.2</b>			
end_with	odm_orthophoto	odm_orthophoto	odm_orthophoto
fast_orthophoto	False	False	False
gcp	None	None	Webodm_gcps.txt
ignore_gsd	False	False	False
images	None	None	None
matcher_distance	0	0	0
matcher_neighbors	8	8	8
max_concurrency	6	6	6
merge	All	All	All
mesh_octree_depth	9	12	10
mesh_point_weight	4	4	4
mesh_samples	1	1	1
mesh_size	100.000	1.000.000	100.000
min_num_features	8.000	10.000	8.000
mve_confidence	0,6	1	0,6
opensfm_depthmap_method	PATCH_MATCH	BRUTE_FORCE	PATCH_MATCH
opensfm_depthmap_min_consistent_views	3	3	3
opensfm_depthmap_min_patch_sd	1	1	1
orthophoto_bigtiff	IF_SAFER	IF_SAFER	IF_SAFER
orthophoto_compression	DEFLATE	DEFLATE	DEFLATE
orthophoto_cutline	False	False	False
orthophoto_no_tiled	False	False	False
orthophoto_resolution	5	5	5
pc_classify	False	False	False
pc_csv	False	False	False
pc_ept	False	False	False
pc_filter	2,5	2,5	2,5
pc_las	False	False	False
rerun	None	None	None
rerun_all	False	False	False
rerun_from	None	None	None
resize_to	2048	-1	-1
skip_3dmodel	False	False	False
sm_cluster	None	None	None
smrf_scalar	1,25	1,25	1,25
smrf_slope	0,15	0,15	0,15
smrf_threshold	0,5	0,5	0,5
smrf_window	18	18	18
split	999999	999999	999999
split_overlap	150	150	150
texturing_data_term	gmi	gmi	gmi
texturing_keep_unseen_faces	False	False	False
texturing_nadir_weight	16	16	16
texturing_outlier_removal_type	gauss_clamping	gauss_clamping	gauss_clamping

<b>Konfiguration von WebODM für Untersuchungsgebiet Nr.1 und Nr.2</b>			
texturing_skip_global_seam_leveling	False	False	False
texturing_skip_hole_filling	False	False	False
texturing_skip_local_seam_leveling	False	False	False
texturing_skip_visibility_test	False	False	False
texturing_tone_mapping	None	None	None
time	False	False	False
use_3dmesh	False	False	False
use_exif	False	False	False
use_fixed_camera_params	False	False	False
use_hybrid_bundle_adjustment	False	False	False
use_opensfm_dense	False	False	False
verbose	False	True	True

Tabelle 22: Konfiguration in VisualSFM - U1 und U2

<b>Konfiguration von VisualSFM für Untersuchungsgebiet Nr.1 und Nr.2 (nv.ini)</b>	
<b>Parameter</b>	<b>Standardkonfiguration (U1 und U2)</b>
<b>1. Projekt &amp; Fotos</b>	
param_default_focal_ratio	1.2
param_use_exif_focal_length	1
param_radial_distortion	1
param_preemptive_switch	1000
param_preemptive_size	100
param_preemptive_min	4
param_less_visualization_data	0
param_visual_data_budget	500
param_enable_huge_texture	0
param_new_cam_projection_min	20
param_pose_estimate_threshold	64
param_pose_estimate_adaptive	1
param_pose_estimate_ratio_max	10
param_p3p_inlier_ratio_min	0.4
param_pose_inlier_ratio_min	0.2
param_pair_inlier_num_min	15
param_pair_gps_threshold	0
param_asynchronous_write	1
param_maximum_cpu_usage	0
param_stdout_line_flush	0
param_deterministic_behaviour	0
<b>2. Punkwolke</b>	
param_bundle_full_step	5
param_bundle_full_iteration	100
param_bundle_part_size	20
param_bundle_part_iteration	5
param_bundle_stop_mse	0.25
param_pba_prefer_gpu	1
param_pba_use_schur	0
param_undistortion_thread_num	0

<b>Konfiguration von VisualSFM für Untersuchungsgebiet Nr.1 und Nr.2 (nv.ini)</b>	
param_cmvs_max_images	50
param_pmvs_min_image	3
param_pmvs_level	1
param_pmvs_csize	2
param_pmvs_threshold	0.7
param_pmvs_wsize	7
param_pmvs_max_angle	10
param_pmvs_max_cpus	0
param_use_siftgpu	0
param_use_siftgpu_customize	-fo -1 -v 0 -tc2 7680 -nomc
param_use_vlfeat_or_lowe	1
param_vlfeat_options --peak-thresh	3.4
param_use_siftmatchgpu	02
param_cpu_siftmatch_num_thread	2
param_gpu_match_fmax	8192
param_sift_max_dist	0.7
param_sift_max_dist_ratio	0.8
param_siftmatch_mbm	1
param_no_stationary_points	0
param_ransac_f_threshold	2
param_ransac_h_threshold	4
param_ransac_max_sample	1000
<b>3. Triangulation / 3D-Modell</b>	
param_triangle_angle_min_new	4
param_triangle_angle_min	2
param_forward_motion_threshold	2
param_projection_threshold	320
param_new_track_threshold	320
param_merge_track_threshold	32
param_retriangulate_threshold	3200
param_retriangulate_step	0.25
param_track_threshold	8
param_remove_unstable_tracks	1
param_aggressive_triangulation	0
param_init_h_ratio_max	0.4
param_init_inlier_min	30
param_init_angle_min	2
param_search_multiple_models	1
param_image_reuse_max	10
param_model_auto_saving	0
param_write_ascii_ply	0
param_write_cameras_in_ply	0
param_poisson_arguments --depth	10
<b>4. DSM, Orthomosaik und Weiteres</b>	
param_gps_variance	10
param_gps_ignore_exif_altitude	1
param_write_transformation_to_aln	0

Tabelle 23: Konfiguration in MeshLab - U1 und U2

<b>Konfiguration von externer Software MeshLab für 3D-Erstellung von Untersuchungsgebiet Nr. 1 und Nr. 2 für VisualSFM</b>	
<b>1. Poission Surface Reconstruction</b>	
Octree-depth	8
Interpolate cloud points	Active
Samples per node	1.5
Full depth	5
Point weight	4
Boundary	dirichlet

Tabelle 24: Zeitaufwand je Prozessschritt und Software (in Sekunden)

<b>Gebiet / Prozess</b>	<b>Bildabgleich/ Ausrichtung</b>	<b>Punktwolken-generierung</b>	<b>Mesh- und Mosaik</b>	<b>DSM</b>	<b>Ortho-mosaik</b>
<b>U1S</b>					
A Metashape	2.420	5.718	5.930	38	2.181
Pix4Dmapper	8.759	10.975	1.644	2.412	8.175
VisualSFM	83.340	55.537	0	0	0
WebODM	18.805	10.340	1.030	1.720	3.475
<b>U1O</b>					
A Metashape	3.420	36.240	19.860	204	3.129
Pix4Dmapper	3.490	40.199	11.683	7.511	6.681
VisualSFM	83.340	55.537	0	0	0
WebODM	15.599	0	0	0	0
<b>U2S</b>					
A Metashape	1.474	24.720	16.933	59	5.760
Pix4Dmapper	9.339	22.205	3.517	3.915	11.966
VisualSFM	36.640	42.240	0	0	0
WebODM	14.210	8.601	691	1.896	5.102
<b>U2O</b>					
A Metashape	0	34.860	12.790	0	2.392
Pix4Dmapper	6.567	1.635	9.391	119	3.734
VisualSFM	159.320	45.630	0	0	0
WebODM	14.810	12.893	1.050	10.340	7.371