

Bachelorarbeit

QUALITÄTSANALYSE EINER PASSPUNKTFREIEN
PHOTOGRAMMETRISCHEN 3D-REKONSTRUKTION VON
SCHLOSS WOLFSTEIN IN FREYUNG

angefertigt von

Anna Kellhammer

vorgelegt bei

Prof. Dr.-Ing. Andreas Schmitt

München, den 01.04.2022

Kurzfassung

Die Möglichkeiten ein 3D-Modell eines Gebäudes zu erstellen, sind vielfältig. Je nach Sensorart und Auswertesoftware erfreuen sich die neusten Technologien nicht nur im kommerziellen, sondern auch im privaten Bereich immer größerer Beliebtheit. Neben der Objektaufnahme mittels Laserscanning, findet die digitale Bildaufnahme mit photogrammetrischer Auswertung vermehrt Anwendung. Die Photogrammetrie wird gerne an schwer zugänglichen Orten herangezogen, da die Bildaufnahme mittels Drohnen aus der Luft erfolgen kann. Viele Faktoren wie die unterschiedlichen Kombinationen von Aufnahmeparameter, Sensoreigenschaften, Software und Vorgehensweise beeinflussen das Ergebnis hinsichtlich der Genauigkeit und der Detaillierung. Während bei der Genauigkeit die geometrische Präzision betrachtet wird, gibt die Detaillierung Auskunft über die inhaltliche Dichte und geometrische Auflösung.

In dieser Arbeit wird ein 3D-Modell von Schloss Wolfstein in Freyung erstellt und bezüglich der inneren und der äußeren Genauigkeit analysiert. Die Bildaufnahme erfolgt mit zwei verschiedenen Drohnen, die über einen integrierten Global Navigation Satellite System (GNSS)-Positionierungssensor verfügen, mit dem für jedes Bild die Position der Aufnahme bestimmt wird. Diese Information wird verwendet, um das 3D-Modell zu georeferenzieren.

Die photogrammetrische 3D-Rekonstruktion erfolgt mit dem Programm 3DF Zephyr und wird in vier Phasen unterteilt. Angefangen mit der Berechnung der dünnen Punktwolke, gefolgt von der dichten Punktwolke über die Oberflächenrekonstruktion bis zur finalen Texturierung entsteht das fertige 3D-Modell.

Für die Validierung werden Referenzdaten aus dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) und einer tachymetrischen Fassadenaufnahme verwendet. Aufgrund von dichter Vegetation um das Schloss fehlen stellenweise Bilddaten des Gebäudes, weswegen das erzeugte 3D-Modell an den entsprechenden Stellen Löcher und verschwommene Kanten aufweist. Im Gegensatz dazu konnten gut sichtbare Bereiche fehlerfrei rekonstruiert werden. Zur Bewertung der inneren Genauigkeit des Modells wird mit der dichten rekonstruierten Punktwolke eine Fehleranalyse auf Grundlage der Ausgleichsrechnung durchgeführt. Die Standardabweichung der Punktwolke wird nur für die sichtbaren Bereiche des Modells berechnet und liegt zwischen 0,71 cm und 3,10 cm.

Die äußere Genauigkeit bewertet die Qualität der geographischen Lage, welche mit der GNSS-Positionierung (mit GPS, Galileo und GLONASS) berechnet wird und sich in Rotation, Translation und Skalierung unterteilen lässt. Unter Verwendung der Ausgleichsrechnung werden die genannten Parameter von der dichten Punktwolke in Bezug auf die Referenzdaten ermittelt. Die Punktwolke ist in Bezug auf die Referenzdaten im Durchschnitt um 0,092 gon nach links verdreht. Außerdem ist die Punktwolke um 20,6 cm nach Osten und um 103,8 cm nach Norden verschoben. Die Berechnung der Skalierung ergibt eine durchschnittliche Längendifferenz der beiden Datensätze von 0,057 m bei einer Gesamtlänge von 22,65 m, was einer Abweichung von 0,25 % entspricht. Die Gebäudeseiten sind in der Punktwolke kürzer als in den tachymetrischen Referenzdaten.

Die innere Genauigkeit der Rekonstruktion liegt mit bis zu 3 cm Standardabweichung in dem gleichen Genauigkeitsbereich bzw. in einem besseren Genauigkeitsbereich als die amtlichen Referenzdaten, wenn es sich bei den Gebäudekoordinaten um < 30 cm Koordinaten handelt. Die

Ergebnisse zeigen, dass ein 3D-Modell mit im Vergleich zur Tachymetrie oder zum Laserscanning billigen Mitteln im Zentimeterbereich mit Ausnahme der Translation rekonstruiert werden kann. Dank der automatisierten Verfahren wird diese Genauigkeit auch von Amateuren erreicht. Damit schließlich auch die Translationsabweichung minimiert werden kann, bietet sich eine Transformation des 3D-Modells mit zwei Gebäudeecken an, mit denen das 3D-Modell lagerichtig in der UTM Zone 32 abgebildet wird. Da sich die Abweichungen der Rotation und der Skalierung im Bezug auf die Gebäudegröße im Genauigkeitsbereich <3 cm befinden, können diese in die Transformation mit einfließen. Somit sind für die Berechnung Redundanzen vorhanden, die das Ergebnis zusätzlich bekräftigen.

Eine passpunktfreie photogrammetrische 3D-Rekonstruktion ist jedoch für die digitale Visualisierung eines Objektes völlig ausreichend, da es sich meistens um ein einzelnes Objekt handelt, das ohne räumlichen Bezug dargestellt wird.

Abstract

There are many possibilities for creating a 3D-model. Dependent on the type of the sensor and the evaluation software new technologies are used for commercially purposes as well as for privat purposes. In addition to laserscanning the photogrammetry is getting more and more popular. The technology of photogrammetry is especially used at inaccessible areas, because the picture taking can be done with Unmanned Aerial System (UAS). Many factors like the various combinations of parameters, the quality of the sensor, the software and the procedure influence the accuracy and the specification of the result. Whereas the accuracy is applied to the geometric precision, the specification describes the density and geometric resolution.

In this thesis a 3D-model of Wolfstein Castle in Freyung is created and the interior and exterior accuracy are analysed. The pictures were taken with two different drones which have onboard positioning sensors. For each of the 624 taken pictures the position of the drone could be calculated. This information is used for the 3D-reconstruction to georeference the 3D-model.

For the photogrammetry reconstruction the software „3DF Zephyr“ was used and is subdivided into four phases:

- Sparse point cloud
- Dense point cloud
- Mesh generation
- Textured Mesh

For the validation reference data of ALKIS and a tachymetric measurement of the castle were used. Because of the dense vegetation around Wolfstein Castle some data of the pictures are missing. So the final 3D-model has corresponding holes and blurred edges. Contrary to this good visible areas can be reconstructed without defects. For this reason only parts of the whole point cloud are used for the analysis. For assessing the interior accuracy of the model an error analysis is carried out with the dense point cloud on the basis of curve fitting. The standard deviation of the point cloud is calculated only for the visible areas of the model. The value is between 0,71 cm and 3,10 cm.

The exterior accuracy assesses the quality of the geografic location, which is calculated based on GNSS-positioning (with GPS, Galileo and GLONASS) and can be subdivided into deviation in respect to rotation, translation and scaling. On the basis of curve fitting the mentioned parameters of the dense point cloud with regard to the reference data are determined. The point cloud is on average twisted 0,092 gon to the left. Furthermore it is shifted about 20,6 cm to the east and 103,8 cm to the north. The scaling of a 22,65 m long wall is 0,057 m. The length of the walls of the point cloud are shorter than the tachymetric reference data.

With a standard deviation of 3 cm the interior accuracy has the same accuracy range or sometimes a better accuracy like the official data if the coordinate accuracy of the building are <30 cm. The results show that a 3D-model can be reconstructed except the translation with tools which are cheaper than tachymetric or laserscanning methods. Thanks to the automatic process this accuracy can also be reached by amateurs. To minimize the deviation of the translation it is

possible to integrate Ground Control Points (GCP) with that the 3D-model can be transformed into the UTM projection. For the transformation it is sufficient to integrate two edges of the object. Because the deviations of rotation and scaling are in respect to the building size in the accuracy range of <3 cm they can be used for the transformation. So there is a redundancy which affirm the calculation.

A photogrammetric 3D-reconstruction without GCP is sufficient for a digital visualisation of an object, because it is mostly about a single object which is shown without a spatial relation.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	V
Tabellenverzeichnis	IX
Abbildungsverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Vorarbeiten	2
1.3 Zielsetzung	4
2 Arbeiten mit einem UAS	5
2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen	5
2.2 Radiometrische Bedingungen	6
2.3 Technische Bedingungen	7
3 Daten	9
3.1 Bilddaten	9
3.2 Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS)	9
3.3 Geodatendienste	10
3.4 OpenStreetMap	11
3.5 Untersuchungsobjekt	11
4 Werkzeuge	15
4.1 Drohnen	15
4.2 Tachymeter	15
4.3 Software	17
5 Experimente	19
5.1 Bildaufnahme	19
5.2 Rekonstruktion	19
6 Methode	23
6.1 Auswertung in 3DF Zephyr	23
6.1.1 Kalibrierung	23
6.1.2 Georeferenzierung	24
6.1.3 Dünne Punktwolke	25
6.1.4 Dichte Punktwolke	27
6.1.5 Oberflächenrekonstruktion	27

6.1.6	Texturierung	28
6.2	Validierung	29
6.2.1	Innere Genauigkeit	32
6.2.2	Äußere Genauigkeit	33
7	Ergebnisse	41
7.1	Auswertung in 3DF Zephyr	41
7.1.1	Dünne Punktwolke	41
7.1.2	Dichte Punktwolke	42
7.1.3	Oberflächenrekonstruktion	42
7.1.4	Texturierte Vermaschung	43
7.2	Validierung	44
7.2.1	Innere Genauigkeit	44
7.2.2	Äußere Genauigkeit	44
7.2.3	Ergebnis nach der zweiten Befliegung	50
8	Diskussion	53
8.1	Bildaufnahme	53
8.2	Auswertung in 3DF Zephyr	54
8.2.1	Dünne Punktwolke	54
8.2.2	Dichte Punktwolke	54
8.2.3	Oberflächenrekonstruktion	55
8.3	Validierung	55
8.3.1	Innere Genauigkeit	55
8.3.2	Äußere Genauigkeit	56
9	Zusammenfassung	59
	Literaturverzeichnis	61
A	3D-Modell	65
A.1	Details	65
A.2	3D-Modell nach der Rekonstruktion mit zwei verschiedenen Datensätzen (Sommer und Winter)	67
	Danksagung	71

Tabellenverzeichnis

3.1	Berechnung der Bodenauflösung in den Bildern.	10
4.1	Technische Daten der DJI Mini 2 und Phantom 4 Pro	16
6.1	Parametereinstellung bei der Rekonstruktion der dünnen Punktwolke in 3DF Zephyr.	25
6.2	Parametereinstellung bei der Rekonstruktion der dichten Punktwolke in 3DF Zephyr.	28
6.3	Parametereinstellung der Oberflächenrekonstruktion in 3DF Zephyr.	29
6.4	Parametereinstellung bei der Texturierung in 3DF Zephyr.	30
7.1	Fehleranalyse zur Bestimmung der inneren Genauigkeit der Punktwolke mithilfe eines Ausschnittes von drei verschiedenen Gebäudeseiten.	44
7.2	Koordinaten der Eckpunkte zur Berechnung der Rotation, Translation und Ska- lierung zwischen der Punktwolke und der Referenz.	47
7.3	Rotation der Punktwolke in Bezug auf die amtlichen Referenzdaten.	49
7.4	Translation der Punktwolke für die Gebäudeecken E1 bis E5.	49
7.5	Euklidischer Abstand zwischen den Gebäudeecken zur Bestimmung der Skalierung.	50
7.6	Fensterhöhe und -breite gemäß der Punktwolke und der Referenz zur Bestimmung der Skalierung.	50

Abbildungsverzeichnis

2.1	Umfrageergebnisse der Marktstudie aus 2019 zur industriellen Nutzung von Drohnen.	5
2.2	Der photogrammetrische Prozess: vom Objekt zum Modell	8
3.1	Geographische Lage von dem Schloss Wolfstein in Freyung.	12
3.2	Das Schloss Wolfstein aus den Jahren 1652, 1863 und 2021.	13
5.1	Experimente für eine 3D-Rekonstruktion mit 3DF Zephyr Free.	20
5.2	Bauwagen als Testmodell einer 3D-Rekonstruktion mit 3DF Zephyr Free.	21
6.1	Parameter der inneren Orientierung	24
6.2	Innenkameraparameter der P4P (links) und der DJI Mini2 (rechts).	24
6.3	Schrittweise Validierung mit verschiedenen Softwarepaketen.	31
6.4	Streuung der Punktwolke bei dem Gebäudeeck E2	32
6.5	Transformationsparameter zur Bestimmung der Lage der dichten Punktwolke im Bezug auf die amtlichen Referenzdaten. (a) Rotation. (b) Translation. (c) Skalierung.	34
6.6	Bestimmung der Rotation einer Punktwolke in Bezug auf die Referenzlinie.	35
6.7	Messen der Fensterhöhe (links) und der Fensterbreite (rechts) in dem texturierten Modell in 3DF Zephyr.	38
6.8	Tachymetermessung der vorderen Schlosswand S2 zur Bestimmung der Skalierung.	39
7.1	Dünne Punktwolke in 3DF Zephyr.	41
7.2	Dichte Punktwolke in 3DF Zephyr.	42
7.3	Oberflächenrekonstruktion in 3DF Zephyr.	42
7.4	Texturiertes Modell in 3DF Zephyr.	43
7.5	Unterschied zwischen der Oberflächenrekonstruktion (links) und der texturierten Vermaschung (rechts).	43
7.6	Manuell gedrehte Punktwolken (blau) der Gebäudeseiten S1, S2 und S5.	45
7.7	Visualisierung der ausgeglichenen Linien (S1, S2, S3, S4, S5, S6 und S7) und deren Schnittpunkte (E1, E2, E3, E4 und E5).	46
7.8	Beschriftung der Eckpunkte und Wände des Schlosses Wolfstein.	48
7.9	Lage des Eckpunktes E1 von den verschiedenen Datensätzen (Punktwolke, Tachymeterdaten, amtlicher Gebäudegrundriss) in QGIS.	48
7.10	Lage des Eckpunktes E2 von den verschiedenen Datensätzen (Punktwolke, Tachymeterdaten, amtlicher Gebäudegrundriss) in QGIS.	48
7.11	Zweite Befliegung: Ansicht von Westen.	51
7.12	Vergleich der beiden 3D-Modelle.	51
A.1	Löcher in dem 3D-Modell wegen fehlender Bilddaten.	65
A.2	Falsch rekonstruierte Bilder führen zu einer verzerrten Textur.	66
A.3	Verschwommene Kanten in dem 3D-Modell wegen fehlender Bilddaten.	66
A.4	Durchlöchernde und verschwommene Nordostwand vom 3D-Modell.	67

A.5	Darstellung des amtlichen Gebäudegrundriss, überlagert mit einem Querschnitt aus der Punktwolke.	67
A.6	Zweite Befliegung: Ansicht von Nordosten.	68
A.7	Zweite Befliegung: Ansicht von Osten.	68
A.8	Zweite Befliegung: Ansicht von oben in den Innenhof des hinteren Gebäudeteils. .	69

Abkürzungsverzeichnis

ADBV	Amt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung
ALB	Automatisiertes LiegenschaftsBuch
ALK	Automatisierte LiegenschaftsKarte
ALKIS	Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem
BVV	Bayerische VermessungsVerwaltung
CIR	ColorInfraRed, dt.: Farbinfrarot
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor, dt.: sich ergänzender Metall-Oxid-Halbleiter
DJI	Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co., Ltd
DoG	Difference of Gaussians, dt.: Differenz der Gaußschen
DOP20	Digitales OrthoPhoto mit 20 cm Bodenauflösung
EDF	Électricité de France
EPSG	European Petroleum Survey Group Geodesy
ETRS89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989
GCP	Ground Control Points
GDI	Geodateninfrastruktur
GIS	Geoinformationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
GSD	Ground sample distance, dt.: Bodenauflösung
LBA	Luftfahrt-Bundesamt
LDBV	Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung
LuftVG	LuftVerkehrsGesetz
LuftVO	LuftVerkehrs-Ordnung
LuftVZO	LuftVerkehrs-Zulassungs-Ordnung
MAE	Mean Absolute Error, dt.: mittlerer absoluter Fehler
MvS	Multi-view Stereo
OSM	OpenStreetMap
P4P	Phantom 4 Pro

PPK	Post Processed Kinematic, dt.: Nachbearbeitete Bewegung
RMSE	Root Mean Square Error, dt.: mittlerer quadratischer Fehler
RTK	Real Time Kinematic, dt.: Echtzeitbewegung
SfM	Structure from Motion
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform, dt.: skaleninvariante Merkmalstransformation
TN	Tatsächliche Nutzung
TrueDOP	True Digital OrthoPhoto
UAS	Unmanned Aerial System
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UTM	Universal Transverse Mercator
WFS	Web Feature Services
WGS84	World Geodetic System 1984
WMS	Web Map Services
WMTS	Web Map Tile Service

1 Einleitung

Dieses Kapitel soll in die Thematik einführen, dessen Aktualität und Bedeutsamkeit aufzeigen sowie das Ziel der Arbeit vorstellen.

1.1 Motivation

Das Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) betreibt seit 2019 die Internetseite „Virtuelles Bayern“, auf der Sehenswürdigkeiten von ganz Bayern als 3D-Modell dargestellt werden. Dabei werden vor allem Schlösser mittels modernen Technologien rekonstruiert. Während mithilfe von Laserscannern üblicherweise die Innenräume gescannt werden, ermöglichen Drohnen (fachspezifisch als UAS bezeichnet) mit eingebauter Kamera einen Rundflug um das Gebäude, das somit von oben und von allen Seiten fotografiert werden kann. Anschließend wird aus den Laser- und Bilddaten ein realitätsgetreues 3D-Modell rekonstruiert und virtuell dargestellt. Der Einsatz von Drohnen erfreut sich, nicht nur im kommerziellen sondern mittlerweile auch im privaten Gebrauch, immer größerer Beliebtheit. Bereits preisgünstige Drohnen, die für eine Privatperson erschwinglich sind, verfügen über eine integrierte Kamera und einen GNSS-Positionierungssensor, mit dem jedes fotografierte Bild über Satellitensignale von GPS, GLONASS und Galileo im entsprechenden Koordinatensystem positioniert wird. Bei der Auswertung der aufgenommenen Bilddaten spielt die Photogrammetrie eine besonders wichtige Rolle. Der verwendete Rechenalgorithmus ist gefragt und wird stetig optimiert, sodass es bereits Amateuren möglich sein soll, mit einer kostenfreien Software schnell und unkompliziert ein 3D-Modell zu rekonstruieren. Die automatisierte Berechnung und die empfohlenen Parametervoreinstellungen erleichtern die Rekonstruktion erheblich.

Die Photogrammetrie beschäftigt sich seit ihren Anfängen mit der Kartierung der Erdoberfläche. Mit der Entwicklung neuer Technologien ist die Modellierung von Objekten möglich, was als *Nahbereichsphotogrammetrie* bezeichnet wird. Mit der zunehmend computergestützten Verarbeitung wird die Photogrammetrie auch als *computer vision* bezeichnet. Ziel der Photogrammetrie ist die automatische Extraktion von Informationen aus Bildern mithilfe von Computern (Heipke (2017)). Neben großflächigen Anwendungsbereichen wie Erdbeobachtung, Land- und Forstwirtschaft sowie Katastrophenmanagement sammelt Luhmann (2002) in seinem Buch praktische Beispiele im Bereich Architektur, Archäologie und Denkmalpflege, über Ingenieurvermessung und Industriemesstechnik bis hin zu Medizin, Naturwissenschaften und Sonderanwendungen. Die ersten drei genannten Bereiche haben bis dato am meisten von der Photogrammetrie profitiert. Die Photogrammetrie hat nicht nur zur Rekonstruktion des zerstörten Altars der Frauenkirche in Dresden (S.27) beigetragen, sondern auch zur Bereitstellung genauer Pläne von Schloss Neuschwanstein (S.43). Zudem ermöglichte sie die Detektion von Deformationen an der Staumauer Nalps (S.109) oder Verformungsmessungen von Kraftfahrzeugen nach Crashversuchen (S.147) zu beschleunigen. Eine besonders außergewöhnliche Anwendung erfährt die Photogrammetrie durch die Modellierung einer Orchideenblüte (S.271) und das Nachstellen eines Verkehrsunfalls (S.277).

Die Einsatzmöglichkeit von Photogrammetrie ist breit gefächert und soll oftmals der Problemlösung in verschiedenen Lebensbereichen dienen. Ein weiteres aktuelles Anwendungsbeispiel ist der digitale Zwilling der Stadt München. Der digitale Zwilling ist ein digitales 3D-Modell der gesamten Stadt. Die für die Rekonstruktion benötigten photogrammetrischen und Laser-Daten werden aus Luftbildern, GPS-Messungen, kamerabestückten Spezialfahrzeugen und Drohnen-Aufnahmen erhoben. Mit dem 3D-Modell verfolgt die Stadt München das Ziel, Planungsvorhaben zunächst digital zu visualisieren und zu simulieren, um eine datengestützte Entscheidung treffen zu können und somit die Stadtentwicklung in München voranzutreiben. Mithilfe der einheitlichen Datenbestände soll nicht nur die verwaltungsübergreifende Zusammenarbeit sondern auch die Lebensqualität des Bürgers erhöht werden, indem Fahrradwege und öffentliche Verkehrsmittel ausgebaut sowie das Verkehrsaufkommen reguliert werden (Landeshauptstadt München (2022)). Der wirtschaftliche Vorteil ist hier klar zu erkennen.

Zusammengefasst lassen sich mithilfe der neusten Technologien zum einen sowohl Räume als auch schwer zugängliche oder für die Öffentlichkeit gesperrte Orte, wie z.B. Schlösser, rekonstruieren und virtuell besichtigen. Zum anderen leisten 3D-Modelle einen wesentlichen Beitrag zur Beantwortung aktueller sowie zukünftiger Fragestellungen, indem auftretende Probleme mithilfe von Simulationen virtuell leichter gelöst werden können. Deswegen ist es umso bedeutender, dass derartige Modelle mit vergleichsweise billigen Mitteln auch von Amateuren erstellt werden können.

1.2 Vorarbeiten

Für die Messung und Darstellung eines Objektes in einem Geoinformationssystem (GIS) stehen vier verschiedene Methoden zur Auswahl. Die wohl einfachste Methode ist die manuelle Messung mit Werkzeugen, die in jedem Haushalt zu finden sind, beispielsweise mit einem Maßband. Mit dieser Methode kann die Größe und Form des Objektes dreidimensional ermittelt werden. Etwas komplexer gestaltet sich als zweite Methode die tachymetrische Vermessung. Mit ihr werden gezielt einzelne markante Punkte gemessen, um die Form und Lage eines Objektes meist in 2D zu erfassen. Hier werden der Richtungswinkel und die Entfernung zu jedem Punkt für die Berechnung verwendet. Das Laserscanning stellt die dritte Methode dar. Diese findet bei der Erstellung von 3D-Modellen Verwendung. Der Unterschied zu den beiden erstgenannten Methoden liegt darin, dass nicht die Form, sondern die Oberfläche mit Laserpunkten gemessen wird. Die Oberfläche des Objektes wird somit durch eine farbige Punktwolke beschrieben. Einzelne markante Punkte, wie z.B. Ecken und Kanten, werden erst mit der Konstruktion der Schnittpunkte von aneinandерliegenden Oberflächen sichtbar. Neben dem Laserscanning gibt es die photogrammetrische Rekonstruktion. Diese vierte Methode basiert auf mehreren Bildaufnahmen, auf denen das Objekt aus verschiedenen Perspektiven zu sehen ist. Aus den Bildern wird anschließend mittels computergestützter Verfahren eine Punktwolke berechnet. Aus der Punktwolke kann wiederum die Form und Größe des Objektes im dreidimensionalen Raum abgeleitet werden.

Alle Methoden haben eines gemeinsam: Wird mindestens ein Passpunkt eines übergeordneten Koordinatensystems in die Messung integriert, kann das Objekt über diesen Passpunkt indirekt georeferenziert werden. Beziehen sich die vier verschiedenen Datensätze des Objektes in einem einheitlichen Koordinatensystem, können die Datensätze miteinander verglichen werden und die Qualität der Messmethoden kann somit ermittelt werden. Mit dieser Grundlage ist es möglich, die Qualität einer photogrammetrischen 3D-Rekonstruktion zu analysieren.

Livieratos (2017) vergleicht in seinem Conference Paper eine photogrammetrisch rekonstruierte

Punktwolke von einem Geländemodell mit Laserscandaten. Die dichte Punktwolke wird mit der Methode SfM aus den Bildern berechnet, da zum Vergleich sowohl die Form als auch die Textur von Bedeutung sind. In dem Paper wird die Differenz der beiden Punktwolken in der Software CloudCompare berechnet. Das Ergebnis (mittlerer Abstand: 1,1 mm und Standardabweichung: 3 mm) zeigt, dass die photogrammetrische Rekonstruktion nicht schlechter als die Rekonstruktion aus Laserscandaten ist, vorausgesetzt die Oberfläche hat ein Muster und ist nicht glatt.

Ein weiteres Beispiel liefert Randles u. a. (2010) mit dem Vergleich von manuellen Messungen mit der photogrammetrischen Messung. In diesem Versuch werden Messpunkte auf drei beschädigten Autos angebracht und mit den zwei genannten Methoden gemessen. Die Werte jeder Methode werden einer Basislinie einer Basisstation gegenübergestellt. Die photogrammetrische Auswertung erfolgt mit der Software PhotoModeler und bringt eine maximale Differenz zur Basislinie von 0,9 cm hervor. Die maximale Distanz der manuellen Messung zur Basislinie beträgt 3,2 cm. Ebenso war die Standardabweichung der photogrammetrischen Messung mit 0,2 cm geringer als die der manuellen Messung (1,1 cm).

Neben der Genauigkeit der Messmethode wird zudem die Verwendung von Passpunkten diskutiert. Während bei der indirekten Positionierung das Objekt mit den Koordinaten der Passpunkte in das Koordinatensystem eingepasst wird, wird bei der direkten Positionierung dem Messinstrument anhand von Real Time Kinematic, dt.: Echtzeitbewegung (RTK) oder Post Processed Kinematic, dt.: Nachbearbeitete Bewegung (PPK) eine Position im Koordinatensystem zugewiesen. Dieses Verfahren ermöglicht eine Georeferenzierung von Objekten, wenn keine Passpunkte zur Verfügung stehen.

Kalacska u. a. (2020) haben in diesem Zusammenhang 14 verschiedenste Drohnen mit integriertem RTK-oder PPK-Modul getestet, um eine Aussage über die erreichbare Genauigkeit treffen zu können. Dabei stellt sich heraus, dass die Genauigkeit weniger vom Preis und der Qualität der verwendeten Drohne sondern von der Verwendung von RTK oder PPK im Gegensatz zu Passpunkten abhängt. Drohnen mit einem RTK-Modul erreichen eine Positionsgenauigkeit unter 5 cm. Mit Ausnahme von wenigen kommerziellen Drohnen (Genauigkeit zwischen 5 cm und 15 cm) ist die Genauigkeit der privat verwendeten Drohnen > 100 cm.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen Turner u. a. (2012) bei dem Vergleich von indirekten (mit Passpunkten) und direkten (mit GPS) Georeferenzierungstechniken. Während die Lagegenauigkeit der Georeferenzierung mit Passpunkten 10 cm - 15 cm erreicht, liegt die Genauigkeit bei der Georeferenzierung mit GPS zwischen 65 cm und 120 cm. Dieser hohe Wert von ca. 100 cm wird damit begründet, dass den Bildern die Position von einer auf der Drohne befestigten Einzelfrequenz-GPS-Einheit zugeordnet wird. Diese Positionen sind wegen ungenauer Zeitsynchronisation zwischen Kamera und GPS sowie nicht angebrachter Differenzkorrekturen fehlerbehaftet. Für die Bildaufnahme wurde ein Octokopter mit fixierter DSLR Kamera (Canon 550D) verwendet.

Diese Aussagen werden auch von Zhang u. a. (2019) bestätigt. Für die Analyse der Genauigkeit werden zwei verschiedene Kameras (DSLR Kamera (EOS) und Action Kamera (GoPro)) verwendet. Die Auswertung der Daten wird in vier Methoden aufgeteilt:

- Genauigkeit mit GPS-Werten
- Genauigkeit mit GPS-Werten und einem zusätzlichen Passpunkt
- Genauigkeit mit PPK
- Genauigkeit mit PPK und einem zusätzlichen Passpunkt

Die Untersuchungen ergeben, dass die Genauigkeit der Modelle, die mit einzelnen GPS-Werten rekonstruiert worden sind, sowohl bei dem Mean Absolute Error, dt.: mittlerer absoluter Fehler (MAE) als auch bei dem Root Mean Square Error, dt.: mittlerer quadratischer Fehler (RMSE) in der Lage > 100 cm beträgt. Mit der Integration eines Passpunktes verbessern sich die Werte jeweils auf < 3 cm. Die Verwendung von PPK ermöglicht ohne Passpunkt sowie mit Passpunkt einen MAE- und RMSE-Wert < 4 cm. Diese Ergebnisse bestätigen, dass unter Verwendung von GPS mit einem Passpunkt oder des PPK-Verfahrens das Überwachen von morphologischen Prozessen mit einer hohen räumlichen als auch zeitlichen Auflösung möglich ist.

1.3 Zielsetzung

Da die photogrammetrische 3D-Modellierung nicht nur im kommerziellen Bereich Anwendung findet, sondern auch Privatpersonen mithilfe von Drohnen und einer automatisierten Software ermöglicht wird, stellt sich die Frage, welche innere und äußere Genauigkeit bei der 3D-Rekonstruktion erzielt werden kann und ob das Ergebnis mit anderen Technologien der Vermessung mithalten kann?

Um diese Frage näherungsweise zu beantworten, wird das Schloss Wolfstein in Freyung als Untersuchungsobjekt ausgewählt. Die Bildaufnahme soll mit zwei verschiedenen Drohnen und die photogrammetrische Auswertung mit der Software 3DF Zephyr durchgeführt werden. Zur Validierung der Daten sollen Ausschnitte der rekonstruierten Punktwolke in Bezug auf die innere und äußere Genauigkeit untersucht werden. Während für die Bewertung der inneren Genauigkeit eine Fehleranalyse dienen soll, soll bei der äußeren Genauigkeit die Punktwolke hinsichtlich Rotation, Translation und Skalierung mit den Referenzdaten verglichen werden. Mithilfe der äußeren Genauigkeit soll anschließend eine Aussage über die räumliche Lage der Punktwolke getroffen werden. Für die Validierung werden die Programme QGIS, CloudCompare und MATLAB verwendet.

2 Arbeiten mit einem UAS

430 700 Drohnen waren 2019 in Deutschland im Umlauf. Davon waren 89,5% in privatem Gebrauch. Von 2015 bis 2019 hat sich die Anzahl der Drohnen mehr als verdoppelt. Laut Prognose soll sich die Zahl bis 2025 um sechs Prozent auf insgesamt 456 000 Stück erhöhen. Während die Anzahl der privat genutzten Drohnen voraussichtlich sinkt, steigt die Zahl der kommerziell genutzten Drohnen voraussichtlich um 200%. Die Abbildung 2.1 zeigt die Umfrageergebnisse der industriellen Nutzung von Drohnen (VUL (2021)).

Umfrage zur industriellen Nutzung von Drohnen

Wofür nutzen Anwender Drohnen? (Mehrfachnennung möglich)

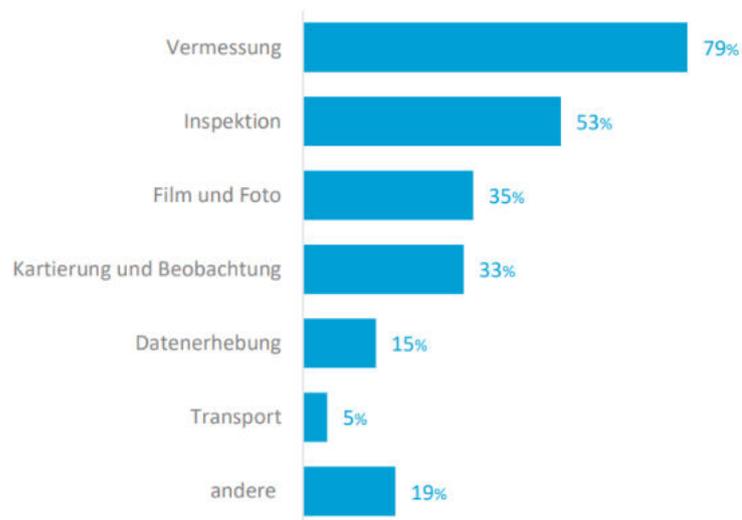


Abb. 2.1: Umfrageergebnisse der Marktstudie aus 2019 zur industriellen Nutzung von Drohnen (VUL (2021)).

Am meisten wird die Drohne bei der Vermessung verwendet. Mit 79% liegt diese Kategorie an der Spitze der Anwendungen. Für Filme und Fotos wird die Drohne im industriellen Bereich mit 35% eher wenig genutzt. Im Gegensatz dazu konzentriert sich der private Gebrauch von Drohnen auf die zuletzt genannte Kategorie.

2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die zahlreich steigenden Drohnenflüge bringen, wie in Kapitel 1 beschrieben, nicht nur Vorteile mit sich. 2020 sind in Deutschland 92 Behinderungen des Luftverkehrs durch zivile Drohnen gemeldet worden. Unter Behinderung wird die gefährliche Annäherung von Drohnen an den bemannten Luftverkehr verstanden. Um eine sichere Nutzung der neuen Technologien zu gewährleisten,

braucht es klare Regeln für den Betrieb von Drohnen. Neben den Europäischen Verordnungen (die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 und die Delegierte Verordnung (EU) 2019/945) von 2019 gelten in Deutschland die nationalen Regelwerke, wie die LuftVerkehrsgesetz (LuftVG), die LuftVerkehrs-Ordnung (LuftVO) und die LuftVerkehrs-Zulassungs-Ordnung (LuftVZO). Auf den Internetseiten LBA (2022) und VUL (2022) sind weitere Informationen zu den aktuellen Regeln tabellarisch dargestellt. Grundsätzlich lassen sich die Drohnen nach ihrem Gewicht in fünf Klassen (C0 bis C4) einteilen. Der Betrieb von Drohnen wird in drei Risikokategorien mit unterschiedlichen Anforderungen und Auflagen kategorisiert:

- Offen (genehmigungsfrei)
- Spezifisch (Betriebsgenehmigung)
- Zertifiziert (zulassungspflichtig)

Unabhängig von der Kategorie muss der Fernpilot in der nationalen Datenbank registriert sein und einen Drohnenführerschein vorzeigen können. Die Art des Führerscheins (EU-Kompetenznachweis oder EU-Fernpiloten-Zeugnis) richtet sich nach der Unterkategorie, in welche die Kategorie „Offen“ unterteilt ist.

- A1: Flug über Menschen (EU-Kompetenznachweis)
- A2: Flug in der Nähe von Menschen (EU-Fernpiloten-Zeugnis)
- A3: Flug in großer Entfernung zu Menschen (EU-Kompetenznachweis)

Leitgrundsätze der Richtlinien sind die Erhöhung der Sicherheit, die Gefahrabwehr, der Schutz der Privatsphäre und personenbezogener Daten, die Minimierung der Bürokratie und schließlich die Förderung von Innovationen.

Zur erfolgreichen Umsetzung der Leitgrundsätze gibt es bei einem Drohnenflug Verhaltensregeln. Generell soll ein Flug in der Nähe von Personen vermieden werden. Ist jedoch ein Flug im Wohnbereich aus unterschiedlichen Gründen erforderlich, empfiehlt es sich, die zuständige Polizeidienststelle im Voraus zu informieren, um unangenehme Situationen vorzubeugen. Die Drohne soll immer in Sichtweite fliegen und eine Höhe von 120 m über dem Boden nicht überschreiten. Des Weiteren werden seit 1.1.2021 in der LuftVO §21h die Flugverbotszonen geregelt. Für Ausnahmeregelungen muss ein Antrag beim Luftfahrt-Bundesamt (LBA) gestellt werden. Damit die Bildaufnahmen im Nachhinein sinnvoll weiterverarbeitet werden können, gibt es neben den rechtlichen Rahmenbedingungen radiometrische und technische Bedingungen zu beachten.

2.2 Radiometrische Bedingungen

Ziel der 3D-Modellierung ist ein Ergebnis mit möglichst großer Genauigkeit. Abgesehen von dem Auswerteverfahren, wird diese bereits bei der Aufnahme unter Beachtung folgender Faktoren gesteigert:

Allem voran hat die Oberfläche des Objekts einen großen Einfluss auf die Genauigkeit des Modells. Je nach Oberflächenbeschaffenheit ändern sich die Reflexionseigenschaften. Ein Bild entsteht, wenn das vom Objekt einfallende Licht punktwise im Sensor gemessen wird. Jedem Bildpunkt wird dabei der Farbwert, die Intensität sowie die Helligkeit zugeordnet. Das vom Objekt reflektierte Licht bestimmt die Pixelwerte. Die Gesamtheit dieser sogenannten Pixel ergibt

das Bild. Je rauer die Oberfläche, desto diffuser wird das Licht gestreut und desto differenzierteres Licht gelangt durch die Linse der Kamera in den Sensor. Je glatter die Oberfläche, desto regulärer ist die Reflexion und desto weniger differenziertes Licht gelangt in die Kamera. Deshalb sind Bilder von einem Objekt mit einer rauen Oberfläche kontrastreicher und bringen bei der Rekonstruktion bessere Ergebnisse hervor.

Zudem spielt das Wetter eine bedeutende Rolle. Bei der Datenaufnahme sollen die Lichtverhältnisse stabil sein, damit es durch unterschiedliche Pixelwerte nicht zu Fehlzuordnungen bei der Rekonstruktion kommt (Luhmann und Schumacher (2019), S.108 ff.). Das Wetter soll nicht nur stabil sein, sondern am besten leicht bewölkt, damit der Schattenwurf verringert wird. Außer dem Wetter spielt auch die Zeit der Aufnahme eine Rolle. In der Mittagszeit erreicht die Sonne ihren höchsten Punkt. In dieser Zeit ist der Schattenwurf am geringsten und die Lichtverhältnisse sind am besten.

Außerdem führt eine sequentielle oder rasterähnliche Flugroute zu einem schnelleren und besseren Ergebnis, da der Algorithmus dieses Vorwissen nutzt, um die Nachbarbildsuche einzuschränken. Dadurch muss nicht jedes Bild mit allen anderen Bildern verglichen werden.

Des Weiteren ist bei der Befliegung darauf zu achten, dass sich die einzelnen Bilder idealerweise 70-80% überlappen (3Dflow (2022b)). Dies begünstigt die Rekonstruktion, welche im Kapitel 6 genauer erläutert wird. Außerdem soll die Bildaufnahme in einem Verband erfolgen. Das Objekt wird mit gleichbleibender Höhe und gleichem Abstand einmal umflogen. Dabei ist es essenziell, dass ein Großteil des Objektes auf jedem Bild sichtbar ist. Anschließend wird der Abstandswert oder die Höhe geändert. Die kreisförmige Befliegung des Objektes wird so oft wiederholt, bis das gesamte Objekt mit sich überlappenden Bildern aufgenommen worden ist (Pomaska (2016), S. 154 ff.). Während der Fotografie muss sowohl die Kamera als auch das Objekt stillstehen, um ein scharfes, nicht verschwommenes Bild zu gewährleisten.

Prinzipiell ist es möglich die Kamera vor dem Gebrauch zu kalibrieren, um für die Rekonstruktion exakte Parameter angeben zu können. Da allerdings eine Kalibrierung je nach Art und Weise sehr aufwändig ist, können die Kameraparameter nach der Aufnahme anhand der Bilder automatisch mit einer Software bestimmt werden. Diese Werte werden als Korrektur zu den Herstellerinformationen verwendet. Somit kann die innere Orientierung der Kamera berechnet und die Rekonstruktion erfolgreich durchgeführt werden.

2.3 Technische Bedingungen

Neben dem radiometrischen Einfluss hat das Wetter einen nennenswerten Einfluss auf die Technik. Die Temperatur soll nicht unter 0 °C liegen, da Akkus im Minusbereich nicht funktionsfähig sind. Ebenso soll die Drohne bei Regen und Wind aus technischen Gründen nicht betrieben werden.

In Bezug auf das Wetter und die Software ist eine photogrammetrische Rekonstruktion von schneebedeckten Objekten nicht möglich, da der Algorithmus die gleichfarbigen Pixel nicht unterscheiden kann.

Kann die Drohne Satellitensignale von GPS, Galileo und/oder GLONASS empfangen, ist es hilfreich, diese Funktion für die Verarbeitung der Bilddaten in Anspruch zu nehmen. Die Genauigkeit der Positionierung über GNSS hängt von der Sicht, der Qualität des Empfängers und von den Korrekturdaten ab und liegt in der Lage und in der Höhe im Dezimeterbereich.

Diese Genauigkeit genügt zwar nicht den Anforderungen, dennoch wird es vom Algorithmus sowohl als grobes Vorwissen für die Nachbarbildsuche als auch für die Bestimmung der äußeren Orientierung genutzt und beschleunigt somit die Berechnung der Rekonstruktion.

Des Weiteren ist das Objekt annähernd realitätsgetreu skaliert und beim Überlagern mit einer digitalen Karte bereits geokodiert. Welche Genauigkeit die Positionsbestimmung mit GNSS hervorbringt, wird in Kapitel 7 analysiert.

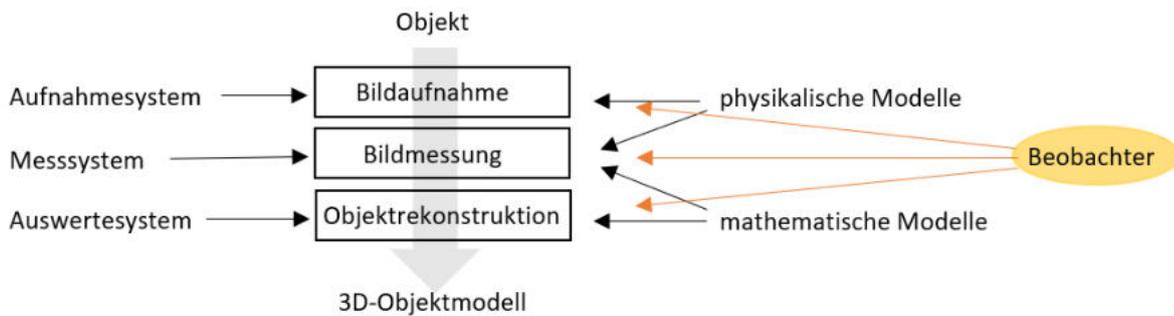


Abb. 2.2: Der photogrammetrische Prozess: vom Objekt zum Modell verändert nach (Luhmann (2002) S. 26)

Die Genauigkeit der Ergebnisse wird, wie beschrieben, von vielen Faktoren beeinflusst. Deshalb ist es nötig, das Gesamtsystem bestehend aus Kamera, Objekt, Umgebung und Anwender zu betrachten. Hinzu kommen bei der Bearbeitung der Daten die Einflüsse der verwendeten Software sowie des Auswerteverfahrens (Abbildung 2.2).

3 Daten

Im Folgenden werden die Daten, die für die Auswertung und Darstellung verwendet worden sind, beschrieben.

3.1 Bilddaten

Insgesamt sind 624 Bilder im jpg-Format aufgenommen worden, von denen 266 mit der DJI Mini 2 vom Innenhof und 358 Bilder von der Außenfassade mit der P4P aufgenommen worden sind. Am 17. Juli 2021 hat die Aufnahme des kompletten Schlosses stattgefunden. An diesem sonnigen, wolkenlosen und windstillen Tag hatte es 24°C. Am 27. November 2021 ist mit der DJI Mini 2 ein zweiter Flug im Innenhof durchgeführt worden. Von den insgesamt 266 Bildern sind an diesem Tag 137 Fotos aufgenommen worden, um die Qualität des 3D-Modells zu verbessern. Das Wetter war bewölkt und die Temperatur lag bei 1,5°C.

Die Auflösung der Bildaufnahmen unterscheidet sich wegen der variablen Flughöhe nicht nur zwischen den verschiedenen Drohnenmodellen, sondern auch zwischen den Bildern einer Drohne.

$$GSD = px \cdot m \quad \text{mit} \quad m = \frac{h}{f} \quad (3.1)$$

mit f: Brennweite, h: Flughöhe, px: Pixelgröße und m: Maßstab

Ground sample distance, dt.: Bodenauflösung (GSD) ist ein Maß für die räumliche Auflösung und gibt den Abstand auf der Erde an, der in einem Pixel dargestellt wird. Mit der Formel 3.1 lässt sich für die mit der P4P aufgenommenen Bilder je nach Flughöhe ein GSD zwischen 0,3 cm und 1,80 cm berechnen, siehe Tabelle 3.1. Das heißt jedes Pixel deckt bei einer Flughöhe von beispielsweise 60 m eine Fläche von 1,8 cm x 1,8 cm ab.

3.2 Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS)

Seit Dezember 2015 werden die Nachweise des Liegenschaftskatasters in allen Bundesländern in ALKIS geführt. Das Automatisiertes Liegenschaftsbuch (ALB) und die Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK) sind im Februar 2013 in ALKIS vereinigt worden. Somit ist eine redundanzfreie und landeseinheitliche Datenführung gewährleistet. ALKIS enthält zu den Liegenschaften sowohl geometrische Informationen (Flurstück, Gebäude) als auch sachliche und rechtliche Informationen. Zudem werden die Tatsächliche Nutzung (TN), die Bodenschätzung und die 3D-Gebäudedaten in ALKIS gepflegt. Die Koordinaten beziehen sich seit dem Jahreswechsel 2018/2019 auf den Referenzrahmen Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989 (ETRS89) und werden mit Universal Transverse Mercator (UTM) in der Zone 32 abgebildet. Die Daten werden flächendeckend für ganz Bayern laufend aktualisiert. Auszüge aus ALKIS können beim

Tab. 3.1: Berechnung der Bodenaufösung in den Bildern.

Pixelgröße px [μm]	Brennweite f [mm]	Höhe h [m]	Maßstab m	GSD [cm]
Phantom 4 Pro				
2,63	8,8	10	1136	0,30
2,63	8,8	60	5682	1,80
DJI Mini 2				
1,52	4,5	5	2222	0,17
1,52	4,5	15	1111	0,51

entsprechenden Amt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (ADB) analog sowie digital erworben werden. Alternativ sind die ALKIS-Daten und -Dienste über die Onlineanwendung GEODATENONLINE rund um die Uhr erhältlich (LDBV (2021)).

Folgende Abgabeformate stehen dem Kunden zur Verfügung:

- Druckauszug
- Vektordaten (NAS, Shape, DXF, csv-Punktkoordinaten)
- Rasterdaten (tif, png)
- Textdaten (csv, ASCII- txt)

Aufgabe des ADBV ist unter anderem die Fortführung des Katasterinformationssystems zur Eigentumssicherung von Grund und Gebäuden. Dabei ist die Lage auf der Erdoberfläche ausschlaggebend. Die Normalhöhe spielt keine Rolle. Lediglich bei Gebäuden wird die Höhe von dem tiefsten bis zum höchsten Punkt des Gebäudes mit 30 cm Genauigkeit als Attribut vermerkt, um eine dreidimensionale Gebäudedarstellung für zusätzliche Anwendungsfälle zu ermöglichen. Gebäude haben oft eine Koordinatengenauigkeit < 30 cm, wenn sie nicht direkt angemessen werden können, sondern aus benachbarten Hausecken mit einem Rechtwinkelzug berechnet werden. Die Koordinatengenauigkeit hängt auch von der Genauigkeit der verwendeten Passpunkte für die Einpassung ab. In Bayern wird für Gebäude keine Koordinatengenauigkeit ≤ 3 cm gefordert. Flurstücksgrenzen müssen hingegen mit einer Genauigkeit von ≤ 3 cm gemessen werden.

Für die Validierung der 3D-Rekonstruktion wird der Gebäudegrundriss benötigt. Dieser ist vom ADBV Freyung über GEODATENONLINE als shp-Datei angefordert worden. Die Datei ist in dem Koordinatensystem ETRS89 in der UTM-Zone 32 (EPSG:25832) georeferenziert.

3.3 Geodatendienste

Die Bayerische Staatsregierung bietet allen Ämtern und Bürgern mit der Geodateninfrastruktur (GDI) eine gemeinsame Nutzung von einheitlichen und aktuellen Geodaten. Aufbereitet und gepflegt wird die GDI von der Bayerische Vermessungsverwaltung (BVV). Die GDI besteht aus Geodaten, Metadaten, Geodatendiensten, Netzdiensten und Netztechnologien. Geodaten

beschreiben Objekte, die durch ihren direkten (Koordinaten) oder indirekten (Attribute wie Adresse) Raumbezug miteinander verknüpft sind. Metadaten beschreiben Geodaten und dienen einer semantischen Strukturierung von Geodaten. Mithilfe von Geodatendiensten kann nun auf die Geo- und Metadaten über ein Netzwerk zugegriffen werden. Die Geodatendienste lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- **Darstellungsdienste (WMS, WMTS)** sind Daten aus dem Liegenschaftskataster, Topographische Karten, Höhendaten, Luftbildprodukte und Hintergrundkarten des BayernAtlas
- **Downloaddienste (WFS)** sind Daten aus dem Liegenschaftskataster und aus der Geotopographie
- **Geokodierungsdienst** ist eine räumliche Lagebeschreibung von Adressen und Geonamen

Neben geldleistungspflichtigen Diensten, die nur mit Authentifizierung zugänglich sind, gibt es zahlreiche kostenfreie Dienste, die allen Bürgern frei zur Verfügung stehen (GDI (2022)).

In QGIS wird für den Hintergrund der Darstellungsdienst verwendet. Hierzu wird das Digitale OrthoPhoto mit 20 cm Bodenauflösung (DOP20) mit 20 cm Bodenauflösung als WMS-Layer hinzugefügt. Die Daten beziehen sich auf des Koordinatensystem ETRS89 in der UTM-Zone 32 (EPSG:25832). Bei einem DOP bzw. einem True Digital OrthoPhoto (TrueDOP) handelt es sich im Gegensatz zu einem Luftbild um eine maßstabsgetreue, lagerichtige und verzerrungsfreie Abbildung der Erdoberfläche. Die bei der Luftbildaufnahme entstandenen Verzerrungen durch die Zentralprojektion, die Höhenunterschiede sowie durch die Erdkrümmung werden mit photogrammetrischen Verfahren in eine parallele Projektion umgerechnet. Orthophotos werden durch regelmäßige Bayernbefliegungen mit Flugzeugen im Abstand von zwei Jahren von der BVV neu erstellt. Die daraus resultierenden Orthophotos können flächendeckend in Echtfarben sowie Farbinfrarot (ColorInfraRed, dt.: Farbinfrarot (CIR)) und mit verschiedenen Bodenaufösungen bezogen werden (Geoportal Bayern (2022)).

3.4 OpenStreetMap

ist eine Karte, die weltweit Geodaten in einer Datenbank sammelt und offen zugänglich ist. Die Daten stehen unter der freien Open Database License und können für Kartendarstellungen, Routenberechnungen, Navigation und humanitäre Hilfe genutzt werden. Die Daten werden von Freiwilligen aus aller Welt gesammelt und in die Datenbank eingepflegt. Als Koordinatensystem wird das WGS84 (EPSG:4326) verwendet. Gegründet wurde dieses Projekt im Juli 2004 von Steve Coast. Im April 2006 wurde die Non-Profit-Organisation OpenStreetMap Foundation gegründet. Diese hat sich zum Ziel gesetzt, geographische Geodaten zu erzeugen, zu verteilen und zu vergrößern sowie für den allgemeinen Gebrauch kostenfrei bereitzustellen (Wikipedia (2022)). Die OpenStreetMap (OSM) ist bei der Visualisierung der Lage des Untersuchungsobjektes auf der Karte verwendet worden, da die Kartendarstellung der OSM übersichtlicher als das DOP20 ist.

3.5 Untersuchungsobjekt

Das Schloss Wolfstein befindet sich im Osten von Niederbayern in der Stadt Freyung. Nordwestlich der Innenstadt ist das Schloss um 1200 von dem Passauer Bischof Wolfgger von Erla

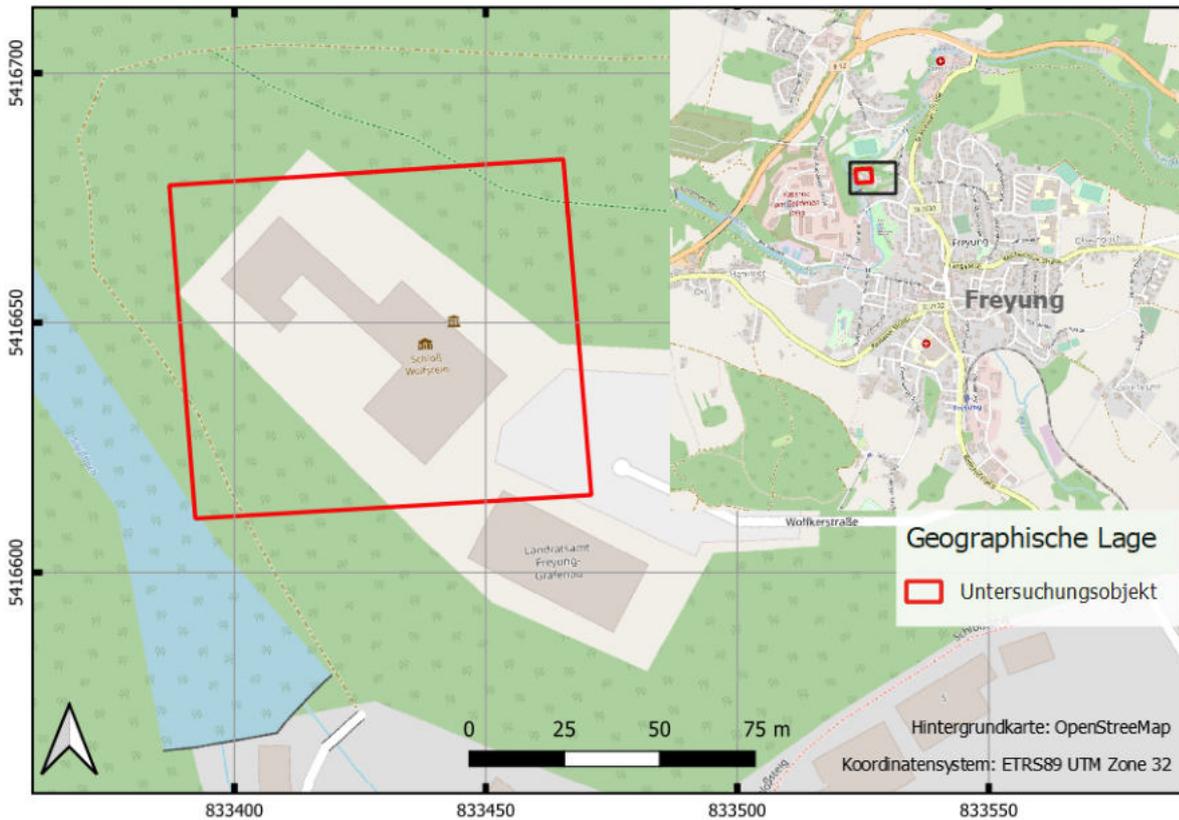


Abb. 3.1: Geographische Lage von dem Schloss Wolfstein in Freyung.

auf einem Felsvorsprung errichtet worden, der an drei Seiten vom Saubach umgeben ist. Das Gelände um das Schloss steht unter Naturschutz und ist steil, unwegsam sowie dicht bewachsen. Die einstige Burg diente zunächst als Wehranlage bis es Ende des 16. Jahrhunderts zu einem Schloss im Renaissancestil wurde. Seit 1982 wird in der Galerie Wolfstein die landkreiseigene und zeitgenössische Kunstsammlung aus dem ostbayerischen Raum, dem Donaauraum, Oberösterreich und Böhmen ausgestellt. Seit dem Jahr 1989 befindet sich im Schloss das Jagd- und Fischereimuseum, das 2014 unter dem Namen „Jagd Land Fluss“ neu eröffnet worden ist.

Das Schloss Wolfstein diente außer als Wehranlage auch als königliches Jagdschloss und als Verwaltungssitz. In der Zeit von April 1913 bis 1962 waren die Diensträume des königlichen Vermessungsamtes (heute ADBV) in den Schlossräumen untergebracht. Diese Zeit wurde zudem von den Amerikanern, die 1945 das Schloss besetzt hatten und sämtliche Akten aus den Fenstern geworfen haben, geprägt. Durch das Engagement eines Bediensteten konnte der Großteil der Unterlagen gerettet und in einem guten Zustand archiviert werden.

Wegen des geschichtlichen und geographischen Bezugs des ADBV zum Schloss ist als Studentin mit dualtem Studium am ADBV Freyung die Idee für diese Arbeit entstanden. Zudem gilt das Schloss als denkmalgeschütztes Baudenkmal und ist eine Sehenswürdigkeit in Freyung (Landkreis FRG (2022)).



Abb. 3.2: Das Schloss Wolfstein aus den Jahren 1652 (links), 1863 (Mitte) und 2021 (rechts).
Das linke und mittlere Bild wurden aus der Broschüre Regierung von Niederbayern (1993) entnommen, das rechte Bild stammt von der Befliegung am 17.07.2021.

4 Werkzeuge

In diesem Kapitel werden die Werkzeuge, die für die Datenaufnahme Verwendung gefunden haben, und die Softwares für die Auswertung der Daten näher erläutert.

4.1 Drohnen

Die Bildaufnahme erfolgte mit zwei Quadrokoptern: die DJI Mini 2 und die Phantom 4 Pro (P4P). Ein UAS besteht aus Flugsystem, Steuerelement und Bodenstation. Das Wort „UAV“ und das Wort „Drohne“ bezeichnet lediglich das Fluggerät. In der deutschen Sprache ist mit der Drohne das gesamte Flugsystem (UAS) gemeint. Drohnen lassen sich in die Kategorien Multikopter, Starrflügler und Hybrid unterteilen. Starrflügler können aufgrund der starren Tragfläche und einem Heckrotor eine höhere Geschwindigkeit und größere Reichweiten als Multikopter erreichen. Bei dem Multikopter sind die Propeller, unabhängig von der Anzahl, waagrecht positioniert. Demzufolge ist ein vertikales Starten und Landen sowie ein punktuell Schweben möglich. Die Kategorie „Hybrid“ ist eine Mischform aus Starrflügler und Multikopter. Die gemischte Bauweise von Tragfläche und Propeller vereint die positiven Eigenschaften beider Drohnenmodelle (UROB (2015)).

Die zwei für diese Arbeit verwendeten Drohnen sind Produkte des chinesischen Technologieunternehmens Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co., Ltd (DJI) und verfügen über eine eingebaute 4K-Kamera (4.096×2.160 Pixeln). Die Drohnen lassen sich mithilfe einer Funk-Fernbedienung steuern. Zur vollständigen Bedienung der Drohne wird ein Smartphone mit entsprechend für das verwendete Modell installierter App-Anwendung an die Fernbedienung angeschlossen. Das Smartphone-Display dient als Bildschirm, auf dem das Livebild der Kamera übertragen wird. Die beiden Kopter unterscheiden sich v.a im Gewicht. Während die Mini 2 249 g wiegt, bringt die P4P ein Gewicht von 1388 g auf die Waage. Hinsichtlich der Kamera ist der Complementary Metal-Oxide Semiconductor, dt.: sich ergänzender Metall-Oxid-Halbleiter (CMOS)-Sensor der P4P mit 1" gegenüber der Mini 2 mit 1/2,3" mehr als doppelt so groß. In der Tabelle 4.1 sind die technischen Daten der P4P und der Mini 2 aufgelistet.

4.2 Tachymeter

Bei der Validierung der äußeren Genauigkeit sind für die Berechnung der Skalierung Fenstermaße in Form von Höhe und Breite sowie die Fassadenbreite der vorderen Gebäudeseite S2 (siehe Abbildung 7.8) verwendet worden. Da die Referenzdaten lediglich Informationen zum Gebäudegrundriss enthalten, werden fehlende Daten mit einer Tachymeteraufnahme erhoben. Bei dem verwendeten Tachymeter handelt es sich um ein Leica TS15. Für die Darstellung der Messwerte ist der Feldrechner von Panasonic (Toughbook CF-31) verwendet worden. Damit die Daten der angezielten Punkte mit der Punktwolke und dem Gebäudegrundriss überlagert werden können, müssen die Koordinaten übereinstimmen. Deshalb ist die tachymetrische Messung mit bestehenden Passpunkten in der Software ALKIS durchgeführt worden. Somit konnten die neuen

Tab. 4.1: Technische Daten der DJI Mini 2 und Phantom 4 Pro (DJI (2021b), DJI (2021a)).

Daten	Phantom 4 Pro	DJI Mini 2	
Aufbau/ Gehäuse			
Preis	1699 €	459 €	
Gewicht	1388 g	249 g	
diagonale Größe	350 mm	230 mm	
Flugzeit pro Akku	ca. 30 min	ca. 30 min	
Betriebstemperatur	0–40°C	0–40°C	
Positionsbestimmung	GPS + GLONASS	GPS + GLONASS + Galileo	
Schwebefluggenauigkeit	mit Sichtpos. mit GPS-Pos.	mit Sichtpos. mit GPS-Pos.	
vertikal:	$\pm 0,1 m$	$\pm 0,5 m$	
horizontal:	$\pm 0,3 m$	$\pm 1,0 m$	
Kamera			
Objektiv {	Sensor	1"-CMOS (12,8 mm x 9,6 mm)	1/2,3"-CMOS (6,17 mm x 4,55 mm)
	Sichtfeld:	84°	83°
	Format:	35 mm Äquivalent: 24 mm	35 mm Äquivalent: 24 mm
	Blende:	f/2.8	f/2.8
	Aufnahmebereich:	1 m bis ∞	1 m bis ∞
	Brennweite	8,8 mm	4,5 mm
	Auto. ISO-Bereich	100–3200	100–3200
	Max. Auflösung	4:3: 4864 × 3648	4:3: 4000 × 3000
Pixelgröße	2,63 μm	1,52 μm	
Akku			
Akkukapazität	5870 mAh	2250 mAh	
Akkuspannung	15,2 V	7,7 V	
Akkugewicht	468 g	86,2 g	
Sonstiges			
App	DJI GO	DJI Fly	

Punkte in dem ETRS89-System mit UTM-Abbildung in der Zone 32 koordiniert werden. Die Höhe und Breite der Fenster wurde mit dem Abstand der steinernen Fensterrahmen bestimmt, siehe Abbildung 6.7. Zusätzlich werden die rechte und linke Kante der vorderen Gebäudeseite S2 in verschiedenen Höhen gemessen, weil die Hausmauer ab der halben Höhe nach oben schmaler wird. Zunächst werden die Kanten bei den entsprechenden Höhen gemessen, an denen Ausschnitte der rekonstruierten Punktwolke validiert werden. Die Höhen befinden sich bei der ersten Steinfuge unterhalb der 3. und 4. Fensterreihe, wie in Abbildung 6.8 zu sehen ist. Um die Schräge der Mauer zu bestimmen, wurden der Knickpunkt und der oberste Punkt der rechten und linken Gebäudekante gemessen. Der Knickpunkt dient zudem als Kontrolle bei der Übereinstimmung des Grundrisses mit den neu aufgemessenen Punkten. Stimmen Knickpunkte der tachymetrischen Aufnahme mit den Eckpunkten des amtlichen Grundrisses überein, können die neuen Daten bedenkenlos für die Validierung verwendet werden. Da beide Datensätze auf Grundlage derselben Passpunkte in ALKIS gemessen worden sind, unterscheiden sie sich nicht in mehr als der geforderten 3 cm Koordinatengenauigkeit.

4.3 Software

Für die Verarbeitung und Validierung der Daten werden die Softwarepakete 3DF Zephyr und QGIS, CloudCompare und MATLAB verwendet.

3DF Zephyr

ist eine kommerzielle Photogrammetrie-Softwarelösung zur automatischen Rekonstruktion von 3D-Modellen aus Bildern. Die Anwendung funktioniert unabhängig von Kamerasensor, Drohne oder Laserscanner. 3DF Zephyr ist von dem privat geführten Beratungsunternehmen und Softwarehaus 3Dflow entwickelt worden. Dieses ist 2011 als Spin-off der Universität Verona gegründet worden. Das Unternehmen ist im Bereich Computer Vision und Bildverarbeitung tätig und beschäftigt sich mit modernsten Lösungen und Softwarekomponenten rund um das Thema 3D-Modellierung. 3DF Zephyr ist ein einfaches benutzerfreundliches Werkzeug, mit dem sowohl Anfänger als auch Experten ein gutes Ergebnis bei der Modellierung und Nachbearbeitung erzielen können. Trotz der automatischen Arbeitsweise der Software, können jegliche Parametereinstellungen vom Anwender manuell vorgenommen werden. Für die Berechnung der einzelnen Arbeitsschritte hat 3Dflow eigene Algorithmen programmiert. Während der Algorithmus „Samantha“ mithilfe der SfM-Technologie die Positionierung und Orientierung der Bilder berechnet, führt ein weiterer Algorithmus „Stasia“ die Berechnung für die dichte Punktwolke durch. Neben „Sasha“ (Dreiecksvermaschung) und „Texturing“ (Farbgebung) gibt es noch drei weitere automatisierte Algorithmen, die die Arbeitsabläufe vereinfachen. Die Software wird kontinuierlich aktualisiert und verbessert. Für eine fachgerechte Anwendung stellt 3Dflow nicht nur ein kostenloses Handbuch zum Download zur Verfügung, sondern bietet ein Forum für Fragen, die von den Entwicklern beantwortet werden, sowie eine Reihe von Video-Tutorials (3Dflow (2022a)).

Neben der kostenlosen Version 3DF Zephyr Free, mit der 50 Bilder rekonstruiert werden können, und der 3DF Zephyr Lite (500 Bilder, 149€/Jahr), gibt es 3DF Zephyr, mit der eine unbegrenzte Anzahl an Bildern bearbeitet und zusätzlich die GPS-Positionen für die Georeferenzierung importiert werden können. Diese Version kostet monatlich 250€ oder jährlich 3900€.

Für die 3D-Rekonstruktion von Schloss Wolfstein in Freyung ist die Studentenversion von Zephyr verwendet worden (3DF Zephyr Education). Diese verfügt über die gleichen Funktionen wie 3DF Zephyr.

CloudCompare

Diese Software ist für die Verarbeitung von 3D-Punktwolken geeignet. Zum Bearbeiten und Rendern stehen einige grundlegende Tools zur Verfügung. Zudem sind verschiedene fortschrittliche Verarbeitungsalgorithmen enthalten. Mit CloudCompare können nicht nur Punktwolken, sondern auch Dreiecksnetze und kalibrierte Bilder verarbeitet werden. Ursprünglich entstand CloudCompare während einer Zusammenarbeit zwischen Telecom ParisTech und der F&E-Abteilung von Électricité de France (EDF). Danach wurde es zu einer allgemeineren und fortschrittlicheren 3D-Datenverarbeitungssoftware entwickelt und ist derzeit ein unabhängiges Open-Source-Projekt sowie eine freie Software (Wikipedia (2021)). In CloudCompare können bis zu 20 Milliarden Punkte verarbeitet werden.

Die Software wurde in dieser Arbeit verwendet, um die Ausschnitte der Punktwolken, die für die Validierung benötigt werden, zu erzeugen.

QGIS

(ehemals Quantum-GIS) ist eine professionelle Geoinformationssystemsoftware. Diese steht unter

der GNU General-Public-License und ist somit eine freie und Open-Source-Software. Aufgrund der großen Bandbreite an Datenformaten (Vektordaten, Rasterdaten, räumliche Datenbanken) und ausgereifter Digitalisierungs-Werkzeuge bietet QGIS eine anwenderfreundliche Möglichkeit zum Betrachten, Bearbeiten, Erfassen und Analysieren räumlicher Daten. Mit dieser Software können komplexe räumliche Informationen visualisiert werden und in einer Karte anschaulich dargestellt und exportiert werden. In QGIS stehen dem Anwender neben unzähligen Tools auch eine Vielzahl an Plugins zur Bearbeitung und zum Erstellen von Daten zur Verfügung (QGIS (2022)). Für die Validierung der Punktwolke, die in 3DF Zephyr erstellt worden ist, ist die Version 3. verwendet worden. Mithilfe von dem DOP20 und dem Gebäudeumriss ist die grafische Veranschaulichung der Validierungsergebnisse möglich.

MATLAB

ist ein Softwareprodukt vom Unternehmen MathWorks. Dieses ist 1984 von Jack Little und Cleve Moler gegründet worden, um Wissenschaftlern und Ingenieuren die Programmierung numerischer Berechnungen zu ermöglichen. MATrix LABorities ist besonders für Matrizenbasierte Mathematik geeignet. Bei der Ausgabe der Ergebnisse ist sowohl eine numerische als auch grafische Darstellung möglich. Die Funktionen von MATLAB sind sehr vielfältig. Neben Datenanalyse, Grafikdarstellungen, Algorithmen-Entwicklungen und App-Erstellungen, kann MATLAB mit verschiedenen Programmier-Sprachen genutzt, mit der Hardware verbunden und in einer Cloudumgebung ausgeführt werden sowie umfangreiche Berechnungen durchführen. Außerdem wird die Software sowohl im Web als auch für den Desktop bereitgestellt. Demzufolge bietet sie ein breites Anwendungsspektrum. MATLAB ist eine kommerzielle und kostenpflichtige Software. Mit der Campus-Wide-License ist der Zugriff für Studenten jedoch kostenlos (MATLAB (2022)).

In dieser Arbeit wird die Software zur Ausgleichsrechnung und allen weiteren mathematischen Anwendungen verwendet, um die Ergebnisse der inneren und äußeren Genauigkeit zu erhalten.

5 Experimente

Damit bestmögliche Ergebnisse erzielt werden können, wurden zum einen für die Bildaufnahme mehrere Drohen verwendet und zum anderen die Rekonstruktion in der Software 3DF Zephyr mit kleineren Objekten durchgeführt. Diese Experimente dienen zum Vergleich der Ergebnissen bei unterschiedlichen Bedingungen und somit zum besseren Verständnis der Technologien.

5.1 Bildaufnahme

Bei der Bildaufnahme kamen nicht nur die DJI Mini 2 und die P4P, sondern auch der BOS Kopter von Cadmic zum Einsatz. Der BOS Kopter ist ein robustes Flugsystem, das speziell für Einsatzkräfte entwickelt worden ist. Dieser ist mit einem Scheinwerfer, einer HD-Kamera und einer Infrarotkamera ausgestattet, damit auch bei Dunkelheit Such- und Rettungseinsätze möglich sind (Cadmig (2022)).

Da diese Drohne mit 90 cm x 90 cm sehr groß ist, wird die Wendigkeit der Drohne sehr beeinträchtigt. Die Befliegung von Schloss Wolfstein wurde dadurch erheblich erschwert, da es sehr zeitaufwändig ist, die Drohne zwischen Schloss und Vegetation unfallfrei zu steuern.

Außerdem konnte die Drohne keine Bild- sondern nur Videoaufnahmen machen. 3DF Zephyr bietet zwar die Funktion an, aus einem Video in einem gewählten Zeitintervall Bilder zu extrahieren, die Ergebnisse waren jedoch nicht zufriedenstellend. Die extrahierten Bilder waren verschwommen und hätten das Rekonstruktionsergebnis negativ beeinflusst. Deswegen wurden diese Daten für die Berechnung des 3D-Modells nicht verwendet.

5.2 Rekonstruktion

Um mich mit der Technik der Photogrammetrie und der Software 3DF Zephyr vertraut zu machen, habe ich zunächst Experimente mit kleineren Objekten durchgeführt. Angefangen bei einer Hasen-Tonfigur, über eine Gummi-Ente und einen Deckel bis hin zur Blume wurden 50 Bilder mit einer Smartphone-Kamera (Samsung Galaxy S7) aufgenommen und mit der kostenlosen Version 3DF Zephyr Free rekonstruiert. Wie in Abbildung 5.1 zu sehen ist, ist die Rekonstruktion der Gummi-Ente und der Blume fehlgeschlagen. Bei der Gummi-Ente liegt das Problem an der glatten Oberfläche. Denn trotz eines farbigen Hintergrundes und der Abbildung des kompletten Objektes auf jedem Foto hat die Rekonstruktion nicht funktioniert. Bei der Blume liegt hingegen das Problem bei der Komplexität. Die einzelnen Bestandteile der Blume können nur teilweise rekonstruiert werden, weil sie sich bei der Aufnahme aus einer anderen Perspektive gegenseitig verdecken. Die photogrammetrische Rekonstruktion der Tonfigur ist bis auf die Hasenohren gut gelungen. Grund dafür ist wohl der Fokus, der bei der Bildaufnahme nicht auf die Ohren gelegt worden ist, da die Anzahl der importierbaren Bilder bereits ausgeschöpft war. Das 3D-Modell des Deckels sieht von allen Versuchen am besten aus. Trotz der vielen Details und des einfarbigen Hintergrundes war die Rekonstruktion erfolgreich, da der Großteil des Objektes auf jedem Bild zu sehen ist. Dem Algorithmus standen somit für das gesamte Objekt genügend Bilddaten zur

Verfügung.

Als Probedurchlauf für das Schloss wurde mittels einer Drohne (DJI Mini 2) ein Bauwagen fotografiert und in 3DF Zephyr Free rekonstruiert. Dieses in Abbildung 5.2 gezeigte Objekt wurde wegen der Ähnlichkeit zum Schloss Wolfstein als Testmodell gewählt, um somit die Vorgehensweise weiter zu optimieren. Wegen der im Vergleich zu dem Schloss geringen Datenmenge wurde mit diesen Bildern bei den Rekonstruktions-Einstellungen experimentiert. Dadurch konnte viel Rechenzeit eingespart werden. Bei dem Bauwagen-Modell ist allerdings aufgefallen, dass von den Reifen und der Treppe zu wenig Bilder vorhanden waren, da diese im Modell löchrig sowie unförmig sind und keine klaren Kanten aufweisen. Die Vermaschung von Gras und Bauwagen deutet ebenfalls auf fehlende Bilddaten hin.

Mithilfe der Experimente habe ich einen ersten Eindruck von der gesamten Arbeitsweise bekommen und die gesammelten Erfahrungen konnten bei der Befliegung des Schloss Wolfstein angewandt werden. Für die Rekonstruktion sind nochmals verschiedene Parametereinstellungen mit den finalen Bilddaten getestet worden, um das beste Ergebnis zu erhalten. Als Fazit der Tests hat sich herausgestellt, dass sich mit den empfohlenen Voreinstellungen die besten Ergebnisse erzielen lassen. Es sind lediglich bei der Fotografie des Objektes die im Kapitel 2 genannten Bedingungen zu beachten. Die Erstellung eines 3D-Modells ist unkompliziert und für Amateure genauso möglich wie für Fachprofis.

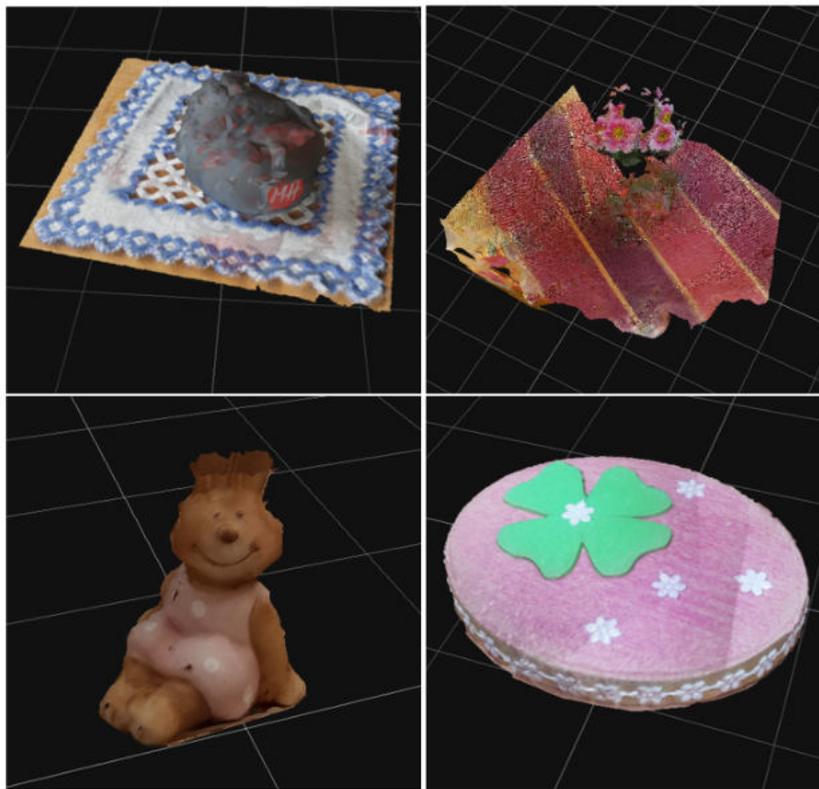


Abb. 5.1: Experimente für eine 3D-Rekonstruktion mit 3DF Zephyr Free. Als Testobjekte dienen eine Gummi-Ente (links oben), eine Blume (rechts oben), eine Hasen-Tonfigur (links unten) und ein Deckel (rechts unten).



Abb. 5.2: Bauwagen als Testmodell einer 3D-Rekonstruktion mit 3DF Zephyr Free.

6 Methode

In diesem Kapitel wird auf die photogrammetrische Datenverarbeitung und auf die zugrundeliegende Methodik näher eingegangen. Chen u. a. (2015) schreiben: "Photogrammetry is the science and technology of extracting reliable three-dimensional geometric and thematic information, often over time, of objects and scenes from image and range data".

Im Folgenden werden die Berechnungsschritte der Software 3DF Zephyr beschrieben, die zum Erhalt eines dreidimensionalen Modells führen. Des Weiteren wird die Vorgehensweise der Validierung erläutert, mit der die innere und die äußere Genauigkeit des rekonstruierten 3D-Modells bewertet werden.

6.1 Auswertung in 3DF Zephyr

Damit aus der Menge von Bildaufnahmen ein 3D-Modell rekonstruiert werden kann, ist von 3Dflow das Softwarepaket 3DF Zephyr entwickelt worden. Der Arbeitsablauf setzt sich aus vier automatisierten Berechnungsphasen mit jeweils dafür entwickelten Algorithmen zusammen. Im Folgenden wird die Funktion der verschiedenen Algorithmen der Reihe nach erklärt. Die Berechnung der dünnen Punktwolke ist die Grundlage der weiteren Verarbeitungsschritte und kann wiederum in vier Schritte unterteilt werden: Keypoint-Extraktion, Nachbarbildsuche und paarweise Bildübereinstimmung sowie geometrische Rekonstruktion. Im zweiten Schritt wird die dichte Punktwolke berechnet. Anschließend erfolgt die Oberflächenrekonstruktion, aus der schließlich das texturierte 3D-Modell erstellt wird.

6.1.1 Kalibrierung

Bei der Aufnahme eines Fotos spielt die Geometrie der Kamera eine wesentliche Rolle. Die sogenannte innere Orientierung der Kamera besteht aus folgenden drei Parametern, wie in Abbildung 6.1 zu sehen ist: die Kamerakonstante $-c$, die x' - und y' -Koordinate des Bildhauptpunktes H' sowie die Verzeichnung.

Das Projektionszentrum ist der Ausgangspunkt der Zentralprojektion. Der Bildhauptpunkt ist der Lotfußpunkt des Projektionszentrums O' . Die Kamerakonstante $-c$ bzw. die Brennweite f ist der Abstand der Bildebene zu dem Projektionszentrum. Ist die Bildebene nicht senkrecht zum Zentralstrahl oder wird die Richtung des Hauptstrahls durch eine Blende abgelenkt, entsteht ein geometrischer Abbildungsfehler. Je nach Form des Abbildungsfehlers spricht man von einer radialen oder tangentialen Verzeichnung. Um eine 3D-Rekonstruktion erfolgreich durchführen zu können, müssen die Parameter der inneren Orientierung bekannt sein.

Das Unternehmen 3Dflow hat zur Bestimmung dieser Kameraparameter einen robusten und vielseitigen Algorithmus entwickelt, mit dem eine automatische Kalibrierung der Bilder möglich ist (Gherardi und Fusiello (2010)).

Nachdem ein neues Projekt in 3DF Zephyr angelegt worden ist und die Bilder importiert worden sind, berechnet die Software für die entsprechende Kamera eine Ausgleichung und schätzt die

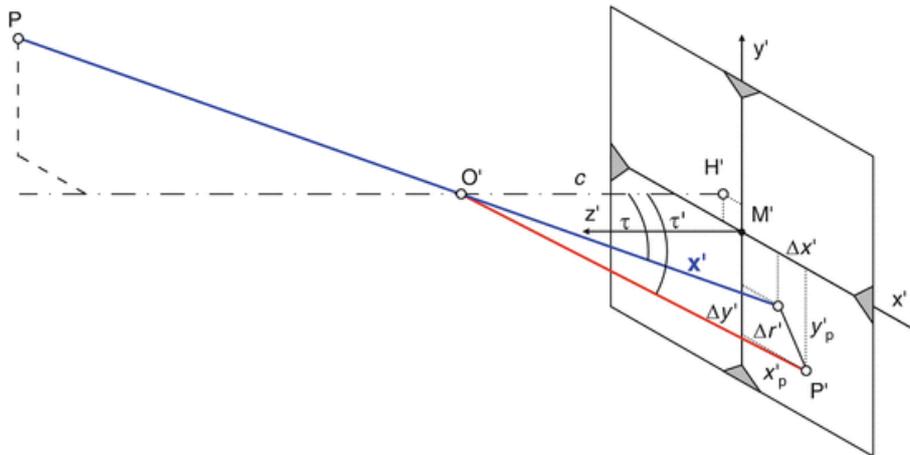


Abb. 6.1: Parameter der inneren Orientierung (Heipke (2017) S.119).

radiale Verzeichnung. Die tangentielle Verzeichnung wird bei der Rekonstruktion der dichten Punktwolke nicht beachtet. Bei den Bildern der DJI Mini 2 beträgt die Brennweite 4,5 mm, bei der P4P ist die Brennweite 8,8 mm. Die Daten jedes Bildpunktes werden um die radiale Verzeichnung ergänzt. Die radiale Verzeichnung kann nach der Rekonstruktion von dem Eigenschafts-Fenster der einzelnen Bilder entnommen werden. Die Innenkameraparameter der P4P sind in Abbildung 6.2 zu sehen.

Innenkameraparameter			
Modell	DJI FC6310		
Verzerrung	0		
Brennweiten	Fx 3642,48	Fy 3642,48	
Optisches Zentrum	Cx 2741,08	Cy 1536,2	
Radial Verzerrung	K1 0,00214665	K2 -0,0223297	K3 0,0203366
Tangentiale Verzerrung	P1 0	P2 0	

Innenkameraparameter			
Modell	DJI FC7203		
Verzerrung	0		
Brennweiten	Fx 2511,57	Fy 2511,57	
Optisches Zentrum	Cx 2002,75	Cy 1226,36	
Radial Verzerrung	K1 0,00172122	K2 -0,0119926	K3 0,00443732
Tangentiale Verzerrung	P1 0	P2 0	

Abb. 6.2: Innenkameraparameter der P4P (links) und der DJI Mini2 (rechts).

6.1.2 Georeferenzierung

Damit das Endergebnis so realitätsgetreu wie möglich ist, nutzt die Software jegliches Vorwissen. Mithilfe einer in der Drohne verbauten GPS-Einheit, wird für jedes Bild die Position der Aufnahme bestimmt. Die Position wird durch geographische Koordinaten, die sich auf das World Geodetic System 1984 (WGS84) beziehen, angegeben. Die Software transformiert diese Koordinaten in das gewünschte Koordinatensystem und verwendet die Bildpositionen, um das Modell zu georeferenzieren. Des Weiteren erhält das Modell anhand der zu Grunde liegenden Koordinaten eine realitätsgetreue Skalierung.

Damit die Koordinaten für die Berechnung verwendet werden, muss dies beim Erstellen eines neuen Projektes in 3DF Zephyr spezifiziert werden. Da sich die Referenzdaten von Schloss Wolfstein auf das ETRS89 beziehen und in der UTM-Zone 32 abgebildet werden, wird dieses Koordinatensystem auch in den Einstellungen der Software gewählt. Zusätzlich bekommt die

Software die Info, dass es sich um GPS-Koordinaten handelt und somit eine Positionsgenauigkeit < 10 m vorliegt.

In den Folgenden Unterkapiteln wird die Rekonstruktion beschrieben. Dem Anwender obliegt die Entscheidung, ob die Schritte mit den voreingestellten Parametern berechnet werden soll oder ob er die Parameter anpassen will. Da 3DF Zephyr eine anwenderfreundliche Software ist, handelt es sich bei den Voreinstellungen um eine bewährte Einstellung, die in der Regel zu guten Ergebnissen führt. Bei der 3D-Modellierung des Schloss Wolfstein werden deshalb die empfohlenen Parameter übernommen und in den Tabellen 6.1, 6.2, 6.3 und 6.4 aufgelistet. In den Unterkapiteln werden die Parameter genauer erläutert.

Tab. 6.1: Parametereinstellung bei der Rekonstruktion der dünnen Punktwolke in 3DF Zephyr. Ausführliche Erklärungen sind in 3Dflow (2022b) zu finden.

Dünne Punktwolke		
Parameter	Einstellung	Begründung
Keypoint-Empfindlichkeit	Medium	Anzahl der Merkmalspunkte für jedes Bild (ca. 7500)
Anpassung des Typs	Genau	Definiert den Grad der Anpassung zwischen den Arten der Merkmalspunkte
Anpassung der Stuftiefe	Hoch	Bestimmt die Anzahl der Nachbarkameras
Foto-Anordnung	ungenau	Definiert die Reihenfolge der Bildaufnahme
Bezugspunktmenge	Medium	Anzahl der verwendeten Verknüpfungspunkte bei der Bündelausgleichung
Rekonstruktions-Engine	Global	Art der Rekonstruktion
Bounding-Box-Methode	Ausreißer verwerfen	nicht konstante Punkte werden aussortiert

6.1.3 Dünne Punktwolke

Ziel des ersten Berechnungsschrittes ist die Wiederherstellung der Aufnahmesituation, indem für jedes Bild die äußere Orientierung der Kamera bestimmt wird. Die äußere Orientierung wird durch die Position des Projektionszentrums X , Y , Z und die drei Drehwinkel roll ϕ , pitch θ und yaw ψ angegeben. Da das Objekt (Struktur) mit einem sich bewegenden UAS (Motion) aus verschiedenen Perspektiven fotografiert wird, wird die Methode für die Berechnung der äußeren Orientierung Structure from Motion (SfM) genannt. Der Algorithmus, der von 3Dflow entwickelt worden ist, um diese Berechnung durchzuführen und aus den Bildern eine dreidimensionale

Punktwolke zu erzeugen, heißt Samantha. Diese Punktwolke wird mithilfe von Merkmalspunkten, die in den Bildern identifiziert werden, und den dazugehörigen Kameramatrizen, mit denen die Position und die Richtung der einzelnen Bildaufnahmen beschrieben werden, erzeugt. Während die Punktwolke bislang durch inkrementelles Hinzufügen einzelner Bilder berechnet worden ist, wird der Prozess in Samantha als binärer Baum beschrieben, der durch agglomeratives Clustern (Zusammenballung von Objekte mit ähnlichen Eigenschaften) des Datensatzes entsteht. Die Methode SfM verspricht eine niedrigere Komplexität in der Berechnung, die eine richtige Skalierung und eine bessere Fehlerbegrenzung mit sich bringt. Somit treten weniger Abweichungen auf und die Berechnung wird stabil. (Toldo (2013) S.19 f.). Für die Berechnung wird die Kategorie „Allgemein“ eingestellt, da die anderen Kategorien für Spezialanwendungen nicht zutreffend sind. Außerdem wird die Voreinstellung „Tief“ gewählt, da somit die Anzahl der Eckpunkte und Kameraübereinstimmungen durch vermehrte Bündelausgleich-Iterationen erhöht wird und demzufolge so viele Bilder wie möglich für die Rekonstruktion verwendet werden. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der SfM detaillierter erläutert.

Keypoint-Extraktion

Ziel der SfM-Methode ist es, die vorliegenden ungeordneten Bildaufnahmen in Zusammenhang zu bringen. Die gegenseitige Zuordnung der Bilder gelingt mithilfe von Merkmalspunkten (Keypoints). Diese Punkte zeichnen sich, wie der Name bereits sagt, durch lokale Merkmale aus und können anhand des Scale-Invariant Feature Transform, dt.: skaleninvariante Merkmalstransformation (SIFT)-Operators detektiert und beschrieben werden. Der SIFT-Operator ist nicht nur - wie sein Name sagt - gegenüber Koordinatentransformationen (Translation, Rotation und Skalierung) unanfällig, sondern ist auch gegen Bildrauschen, Beleuchtungsvariation und geometrischer Deformation robust (Lowe (1999)). Merkmalspunkte zeichnen sich durch kontrastreiche Pixel aus und werden durch Deskriptoren beschrieben (Pomaska (2016)). Für die Detektion der Merkmale wird in Samantha ein neuer, SIFT-ähnlicher Operator verwendet, der auf dem Difference of Gaussians, dt.: Differenz der Gaußschen (DoG) (Merkmalsverbesserungsalgorithmus zur erhöhten Sichtbarkeit von Kanten und Details) basiert (Toldo (2013) S.23). Je besser und zuverlässiger die Bildzuordnungen sind, desto erfolgreicher verläuft die geometrische Rekonstruktion (Toldo (2013) S.23).

In 3DF Zephyr kann die Anzahl der Merkmalspunkte pro Bild festgelegt werden. Da der Überlappungsbereich und die Entfernung der Kamera zu dem Objekt leicht variieren, wird eine mittlere Anzahl an Merkmalspunkten gewählt. Für jedes Bild sollten bis zu 10000 Merkmalspunkte von maximal 20000 Merkmalspunkte bestimmt werden.

Nachbarbildsuche und paarweise Bildübereinstimmung

Im weiteren Vorgehen wird ein Bildverband erstellt. Dazu sucht der Algorithmus für jedes Bild die entsprechenden Nachbarbilder. Diese Bilder überlappen sich in einem bestimmten Bereich mit dem jeweiligen Ausgangsbild. Mit einer bestimmten Anzahl von Merkmalspunkten werden die Bilder auf homologe Punkte (Verknüpfungspunkte) durchsucht, d.h. die Deskriptoren aller Bilder werden miteinander verglichen und die nächsten Nachbarn werden mit dem Deskriptor verknüpft. Anschließend werden alle Merkmalspunkte der zwei korrespondierenden Bilder miteinander verglichen und die Übereinstimmung wird in einem Histogramm dargestellt. Diejenigen Bilder, die am Ende die meisten Verknüpfungspunkte aufweisen, werden als Nachbarbilder gespeichert (Toldo (2013) S.23).

Für das Schloss Wolfstein wird trotz steigender Berechnungsdauer eine „genaue“ Verknüpfungsmethode ausgewählt. Mit der Anpassung der Stufentiefe wird die Anzahl der Bildvergleiche eingestellt. Je mehr Bilder miteinander verglichen werden, desto besser ist das Ergebnis. Deshalb

wird die Kategorie „hoch“ ausgewählt, bei der mindestens zehnmal so viele Bilder miteinander verglichen werden, als es Bilder gibt. Auch dies wirkt sich auf die Rechengeschwindigkeit negativ aus.

Geometrische Rekonstruktion

Aus den übereinstimmenden Bildern wird schließlich die 3D-Punktvolke berechnet. Dazu werden je nach Anzahl und räumliche Verteilung der Verknüpfungspunkte aus dem Bildverband agglomerative Cluster gebildet. Die Cluster und einzelne Bilder werden mit dem nächsten Nachbar verknüpft, sodass ein hierarchischer binärer Clusterbaum (Dendrogramm) entsteht. Zur Rekonstruktion wird der Baum von den Blättern bis zum Stamm durchgerechnet. Basis der Rekonstruktion ist die Bündelblockausgleichung. Zudem kommen je nach Kombination zweier Äste andere Verfahren zur Anwendung (Toldo (2013) S.26 f.). Für die Rekonstruktion gibt es in 3DF Zephyr drei Parametereinstellungen. Zunächst wird die Menge der Verknüpfungspunkte gewählt. Je mehr Punkte in die Rekonstruktion einfließen, desto größer sind die Koordinatenspannungen zwischen den Verknüpfungspunkten. Zu wenig Punkte machen die Rekonstruktion instabil.

Aus diesem Grund wurde eine mittlere Menge eingestellt. Die Bildrekonstruktions-Engine bestimmt das Vorgehen der Rekonstruktion. Da mit der globalen Methode alle Bilder in einem Schritt rekonstruiert werden, ist eine bessere Skalierung gewährleistet. Mit der sequentiellen Methode würden die Bilder nacheinander rekonstruiert werden und es würde dazu führen, dass qualitativ minderwertige Bilder wegen eingeschränkter Anzahl von Nachbarschaftsbildern für die Rekonstruktion verwendet werden. Aus diesen Gründen wird für die Bildrekonstruktions-Engine die globale Methode gewählt. Die Bounding-Box-Methode stellt eine robuste Methode zum Verwerfen von Ausreißern dar, die sich außerhalb eines Berechnungsbegrenzungsrahmen befinden. Der Algorithmus eliminiert somit falsch rekonstruierte Punkte automatisch.

6.1.4 Dichte Punktvolke

In dieser Phase sind die Position und die Orientierung der Bildaufnahmen bereits bekannt. Folglich soll für möglichst viele Pixel eine 3D-Koordinate berechnet werden. Da sich die Bilder überlappen, ist ein Objektpunkt in mehreren Bildern als Pixel zu finden, kann allerdings von Objekten im Vordergrund verdeckt sein. Deswegen ist es wichtig, das Objekt ausreichend oft mit großer Überlappung der Bilder fotografiert worden ist. Gleiche Pixel werden zur Minimierung des Suchraumes mithilfe der Epipolargeometrie in den überlappenden Bildern ausfindig gemacht (Heipke (2017) S.231). Anhand der Position und Orientierung der Bilder kann mittels Vorwärtsschnitt aus dem Strahlenbündel die Koordinate des Pixels ermittelt werden. Dieses Verfahren wird Multi-view Stereo (MvS) genannt (Toldo (2013) S.39 ff.). Im Gegensatz zur Bündelblockausgleichung wurden bei der 3D-Rekonstruktion nicht alle Bilder, sondern nur eine bestimmte Anzahl verwendet. Für die Modellierung des Schloss Wolfstein wurden fünf Nachbarbilder (siehe Tabelle 6.2) verwendet.

Für die Berechnung werden wieder die Voreinstellungen „Allgemein“ und „Hohe Detailgenauigkeit“ verwendet.

6.1.5 Oberflächenrekonstruktion

Damit aus den einzelnen Punkten eine Oberfläche erzeugt werden kann, werden jeweils die drei nächstgelegenen Punkte zu einer Dreiecksfläche verknüpft. Dieses Verfahren basiert auf der

Tab. 6.2: Parametereinstellung bei der Rekonstruktion der dichten Punktwolke in 3DF Zephyr. Ausführliche Erklärungen sind in 3Dflow (2022b) zu finden.

Dichte Punktwolke		
Parameter	Einstellung	Begründung
Bildauflösung	50%	Steuert den Prozentsatz, den die Eingabebilder haben sollen
Anzahl der Kameras in der Nähe	5	Berechnung der Tiefenkarte mit Bilder derselben Szene
Beschleunigungsstufe	Medium	Entfernung redundanter Pixel beschleunigt die Berechnung
Rauschfilterung	10%	Prozentsatz der Punktqualität, die eliminiert werden
Farben aktualisieren	an	aktualisiert Farben nach der Verarbeitung

Methode der Delaunay-Triangulierung (Delaunay (1934)). Abhängig von der gewählten Menge der zu rekonstruierenden Dreiecksflächen steigt mit zunehmender Anzahl der Detaillierungsgrad und es kann zudem ein erhöhtes Rauschen entstehen. Deshalb werden für die Vermaschung nicht alle Punkte der dichten Punktwolke verwendet. Der Diskretisierungsfaktor 1,5 stellt einen guten Mittelweg zwischen Detaillierung und Rauschen dar. Mit dem Algorithmus „Photoconsistency“ kann das Dreiecksnetz in Bezug auf die Details optimiert werden. Dieser Schritt benötigt allerdings verhältnismäßig viel Zeit (3Dflow (2022b)).

6.1.6 Texturierung

In der letzten Phase der 3D-Rekonstruktion wird das Modell texturiert. Dazu werden die Farbinformationen der verwendeten Pixel gesammelt und für jede Dreiecksfläche ein Farbausgleich berechnet. Für die Texturierung werden die Voreinstellungen „Allgemein“ und „Standard-Einzeltextur“ gewählt.

Tab. 6.3: Parametereinstellung der Oberflächenrekonstruktion in 3DF Zephyr. Ausführliche Erklärungen sind in 3Dflow (2022b) zu finden.

Oberflächenrekonstruktion		
Parameter	Einstellung	Begründung
Wasserfestigkeit	10%	Prozentsatz der Lochgröße, die geschlossen werden.
Farben aktualisieren	an	aktualisiert Farben nach der Verarbeitung
Minimale Anzahl Eckpunkte	10 000 000	Minimale Anzahl, um den Rekonstruktionsalgorithmus „out of core“ auszulösen
Diskretisierungsfaktor	1,5 pro Zeile	definiert den Genauigkeitsgrad der dichten Punktwolke
Fotokonsistenz	an	Oberflächenverbesserung in Bezug auf Details
Bildauffösung	50%	Prozentsatz steuert die Verwendung der Bilder
Hierarchische Unterteilung	1	Unterteilung der Rekonstruktion nach der Bildauflösung
Projektionsfläche	20,00	Zielbereich in Pixel zur Anpassung der Projektion eines Dreiecks an das nächste Nachbarbild
Kantenfilter	0	Verbesserung der Modellkanten
Mesh- Ausbesserungsfilter	0	Verbesserung der hochfrequenten Details und Minimierung der Auflösung

6.2 Validierung

Damit eine Aussage zu der Qualität der photogrammetrischen Auswertung von Bilddaten getroffen werden kann, wurde eine Fehleranalyse der dichten Punktwolke durchgeführt. Diese Berechnungen geben an, wie gut die rekonstruierte Punktwolke des Schloss Wolfstein in sich passt. Des Weiteren wurde mittels Ausgleichung von Ausschnitten aus der Punktwolke und Konstruktion der Eckpunkte die Lage (äußere Genauigkeit) des 3D-Modells im UTM-System ermittelt und mit den amtlichen Gebäude- und zusätzlichen Tachymeterdaten verglichen. Dazu wurde die Punktwolke hinsichtlich Rotation, Translation und Skalierung geprüft.

Für die Analyse wurden mehrere Ausschnitte der dichten Punktwolke verwendet. Damit eine eindeutige Bewertung möglich war, wurde ein 20 cm breiter Querschnitt der Gebäudewand extrahiert. Um Störeffekte wie Fenster und Türe zu eliminieren, wurde der Bereich zwischen den

Tab. 6.4: Parametereinstellung bei der Texturierung in 3DF Zephyr. Ausführliche Erklärungen sind in 3Dflow (2022b) zu finden.

Texturierung		
Parameter	Einstellung	Begründung
Maximale Texturgröße	8192 × 8192	Maximale Texturgröße des Modells
Maximale Anzahl an Texturen	1	Anzahl an Texturen
Erzeuge 32-Bit Texturen	kein Haken	bei tiff- oder exr-Formaten
Maximale Eckpunkte	2000000	Anzahl im endgültigen Modell
Bildauflösung	100%	Steuert den Prozentsatz der Auflösung der Eingabebilder
Farbbalance-Stärke	Standard	abhängig von der Belichtung in den Bildern
Benutzte Unschärfeerkennung	kein Haken	ideal bei unscharfen Fotos
Schärfefilter	10%	Verbesserung von scharfen Details

Stockwerken gewählt. Im Folgenden ist mit dem Begriff Punktwolke nicht die Punktwolke des gesamten Modells gemeint, sondern einer der oben genannten Ausschnitte.

Für die Durchführung der Validierung wurden mehrere Schritte in verschiedenen Softwareprodukten notwendig, siehe Abbildung 6.3.

Für die Validierung der texturierten Vermaschung musste die Radiometrie untersucht werden. Da jedoch die Genauigkeit einer passpunktfreien Georeferenzierung im Fokus stand, beschränkte sich die Bewertung des rekonstruierten 3D-Modells auf die Genauigkeit der dichten Punktwolke.

Zur Durchführung der inneren und äußeren Genauigkeitsberechnungen wurde eine Ausgleichung der Punktwolke durchgeführt. Ziel der Ausgleichsrechnung ist es, den wahrscheinlichsten Wert einer Unbekannten zu finden, sodass sich die mathematische Funktion den beobachteten Daten bestmöglich anpasst. Die Parameterschätzung wird meistens mit der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Dabei wird die Summe der quadrierten Differenzen zwischen Mess- und Schätzwerten minimiert. Diese Differenzen sind ein Maß für die Streuung der Messwerte um den wahren Wert und werden als Residuen bezeichnet. Residuen sind Folgen von Messfehlern.

Messungen sind wegen technischer, mechanischer als auch menschlicher Einflüsse grundsätzlich mit Fehlern behaftet. Diese können als

- grobe Fehler
- systematische Fehler und
- zufällige Fehler



Abb. 6.3: Schrittweise Validierung mit verschiedenen Softwarepaketen. Logos von 3Dflow (2022a), Wikipedia (2021), QGIS (2022) und MATLAB (2022).

unterschieden werden. Während grobe und systematische Fehler manuell behoben werden können, können zufällige Fehler mit einer Ausgleichsrechnung minimiert werden. Dabei wird durch häufiges Wiederholen der Messung der wahre Wert anhand der Streuung ermittelt. Damit eine Ausgleichung berechnet werden kann, muss ein Modell aufgestellt werden, das für die entsprechende Ausgleichung angenommen werden soll. Dabei wird zwischen einem stochastisches und einem funktionales Modell unterschieden. Während das stochastische Modell die Varianzen und Kovarianzen der beobachteten Parameter festlegt, mit denen die Gewichtsmatrix aufgestellt wird, wird in dem funktionalen Modell eine Funktion aufgestellt, welche die mathematischen Bedingungen zwischen Beobachtungen und Unbekannten beschreibt. Nach der Berechnung der Modelle kann die Normalengleichung 6.1 aufgestellt und die ausgeglichenen Parameter berechnet werden. Mit der Designmatrix und den ausgeglichenen Parametern kann schließlich die gesuchte wahrscheinlichste Linie von der Punktwolke berechnet werden (Neitzel (2010)).

$$A'PA = A'Pl \quad (6.1)$$

mit A: Designmatrix, P: Gewichtsmatrix und l: verkürzter Beobachtungsvektor

Für die Berechnung der inneren Genauigkeit wird mit der Ausgleichung die Linie gesucht, von der die Quadrate der Abstände zwischen Linie und den einzelnen Punkten der Punktwolke

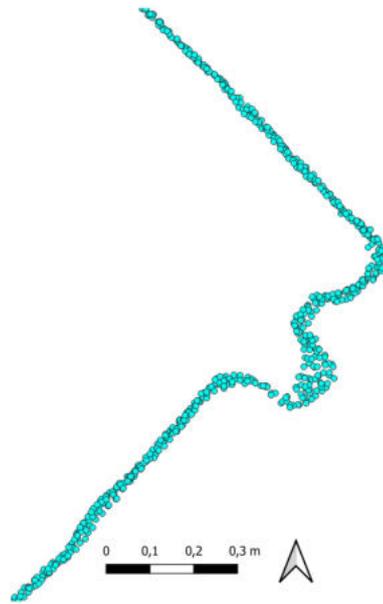


Abb. 6.4: Streuung der Punktwolke bei dem Gebäudeeck E2. Die Ausbuchtung visualisiert die senkrechte Regenrinne.

minimal sind. Als funktionales Modell wird also eine Geradenfunktion gewählt. Dadurch dass der Ausschnitt der Punktwolke parallel zur y -Achse gedreht wird, werden die y -Werte (Easting) als Beobachtungsstellen verwendet. Die x -Werte müssen somit ausgeglichen werden und stellen die Beobachtungen b dar. Diese müssen wegen dem Einfluss zufälliger Fehler mit dem funktionalen Modell zu verkürzten Beobachtungen l modifiziert werden. Das stochastische Modell wird mit einer Standardabweichung $\sigma = 1$ berechnet, sodass jede Beobachtung mit der gleichen Gewichtung in die Berechnung einfließt. Mit den Residuen wird anschließend eine Fehleranalyse durchgeführt, die im Folgenden Unterkapitel 6.2.1 detaillierter erläutert wird.

Die Ausgleichung für die Berechnung der äußeren Genauigkeit wird bis auf die parallele Drehung der Punktwolke zur y -Achse wie gerade beschrieben durchgeführt. mit der ausgeglichenen Linie werden, wie in dem Unterkapitel 6.2.2 aufgezeigt wird, durch Schnittpunktbildung die Eckpunkte der Punktwolke ermittelt. Die Punktwolke muss nicht gedreht werden, weil nach der Ausgleichung keine Fehleranalyse durchgeführt wird.

6.2.1 Innere Genauigkeit

Die innere Genauigkeit lässt sich mithilfe einer linearen Ausgleichung und verschiedenen Fehlerberechnungen bewerten. Bei der Darstellung der Punktwolken in QGIS, ist in Abbildung 6.4 auf den ersten Blick zu erkennen, dass die Punkte keine Linie bilden, sondern in einem gewissen Bereich streuen. Dabei handelt es sich um zufällige Fehler, die bei der Rekonstruktion entstehen. In diesem Kapitel wird erklärt, welches Ausmaß die Streuung annimmt und welche Formeln herangezogen werden können, um schließlich die Qualität der Rekonstruktion zu bewerten.

Nachdem mittels der linearen Ausgleichung ein mittlerer Wert der Punkte in Form einer Linie berechnet worden ist, wird die Fehleranalyse der Streuung durchgeführt, indem die Abstände der Punkte zu der ausgeglichenen Linie betrachtet werden. Somit wird das 2D-Problem (Abstand

zwischen Linie und Punkt) auf eine eindimensionale Ebene (Abstand zwischen zwei Punkten) beschränkt und die Berechnung erleichtert. Bei dem wahrscheinlichsten Fehler handelt es sich um den Wert der Abweichung v , der mit der größten Wahrscheinlichkeit auftritt, wenn man einen Punkt betrachtet. Bei diesem Fehler handelt es sich um den Median der absoluten Abweichung. Dieser wird mit der Formel 6.2 berechnet.

$$\text{wahrscheinlichster Fehler} = \text{Median}(|\Delta v_j|) \quad (6.2)$$

mit v : Abweichung des Punktes von der Linie und j : einzelner Messwert

Des Weiteren kann mithilfe der Formel 6.3 der durchschnittliche Fehler berechnet werden. Dieser berechnet das arithmetische Mittel der absoluten Abweichung v .

$$\text{durchschnittlicher Fehler} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |\Delta v_j| \quad (6.3)$$

mit N : Anzahl der Messwerte, v : Abweichung und j : einzelner Messwert

Die dritte Formel 6.4, die Standardabweichung, ist ein Maß für die Breite der Streuung und besagt, dass 68% der Messungen innerhalb der berechneten Standardabweichung liegen. Da für die Berechnung der Mittelwert von den Messwerten j abgezogen wird und es sich um negative und positive Abweichungen handelt, würden sich die positiven und negative Werte gegenseitig aufheben. Deshalb werden die Werte zunächst quadriert, um positive Zahlen zu erhalten. Erst am Ende wird die Wurzel gezogen.

$$\text{Standardabweichung} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\Delta v_j)^2} \quad (6.4)$$

mit N : Anzahl der Messwerte, v : Abweichung und j : einzelner Messwert

6.2.2 Äußere Genauigkeit

In diesem Unterkapitel wird die Punktwolke hinsichtlich der Größe und der Lage im Bezug auf die amtlichen Koordinaten geprüft. Bei der zweidimensionalen Transformation von einem Koordinatensystem in ein anderes, sind vier Parameter nötig. Die Transformation lässt sich, wie in Abbildung 6.5 dargestellt wird, durch die Rotation, die Translation und die Skalierung beschreiben. Die Rotation beschreibt die Verdrehung und wird durch im zweidimensionalen Raum mit dem Rotationswinkel ψ angegeben. Die Translation gibt die Strecke der Verschiebung s_y und s_x des Objektes entlang der zwei Koordinatenachsen X und Y an. Und mithilfe der Skalierung m wird die Größe des Objektes eindeutig. Die Transformation der Punktwolke auf die Referenzdaten stellt einen Lösungsansatz für die Minimierung der verbleibenden Translations-Abweichung dar und wird in dieser Arbeit nicht durchgeführt.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi \\ \sin\psi & \cos\psi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

mit ψ : Rotation, m : Skalierung und s : Translation

Die Auswertung erfolgt in QGIS. Dazu werden die amtlichen Gebäudedaten und der Punktwolkenausschnitt als Layer in ein Projekt importiert (siehe Abbildung A.5). Bei der Validierung der Punktwolke wird nur die zweidimensionale Lage betrachtet. Die Höhe kann wegen fehlenden Referenzdaten nicht bewertet werden, weil für die amtlichen Zwecke (Liegenschaftskataster) keine dreidimensionalen Koordinaten nötig sind.

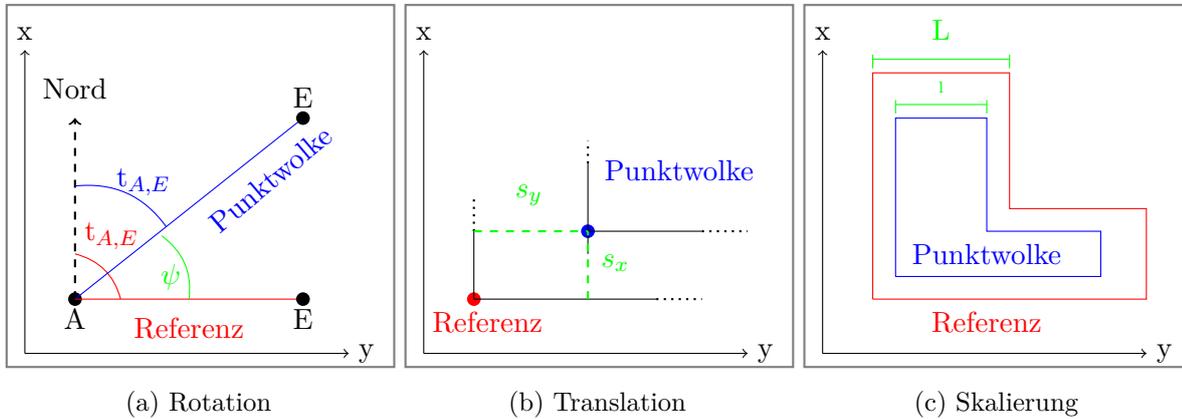


Abb. 6.5: Transformationsparameter zur Bestimmung der Lage der dichten Punktwolke im Bezug auf die amtlichen Referenzdaten. (a) Rotation. (b) Translation. (c) Skalierung.

Rotation

Damit die Rotation bestimmt werden kann, muss die Verdrehung der Punktwolke in Bezug auf den amtlichen Gebäudeumriss in der x,y -Ebene ermittelt werden. Da die Referenzdaten zweidimensional sind, wird nur der Rotationswinkel ψ bestimmt.

Für die Bestimmung der Verdrehung wird durch die Punktwolke eine ausgeglichene Linie berechnet. Anschließend werden die Koordinaten der erzeugten Schnittpunkte der angrenzenden Linien sowie die entsprechenden Eckpunktkoordinaten des amtlichen Gebäudeumrisses abgegriffen. Mittels der Formel 6.7 kann aus den Koordinaten des Anfangs- und Endpunktes ein Richtungswinkel berechnet werden. Der Richtungswinkel gibt den Winkel an einem Gebäudepunkt an, der zwischen der Nordrichtung und der Gebäudelinie eingeschlossen wird. Die Differenz der beiden Richtungswinkel beschreibt also die Verdrehung in der x,y -Ebene. Das Ergebnis wird als Rotation bezeichnet.

$$\psi = t_{A,E} - T_{A,E}$$

mit

(6.6)

ψ : Rotation, $t_{A,E}$: Richtungswinkel der Punktwolke, $T_{A,E}$: Richtungswinkel der Referenz

Die Richtungswinkel ergeben sich durch die Formel 6.7, wenn mit Gon gerechnet wird.

$$t_{A,E} = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right)$$

$$T_{A,E} = \arctan\left(\frac{\Delta Y}{\Delta X}\right) \quad (6.7)$$

mit X, Y : Koordinaten der Referenz, x, y : Koordinaten der Punktwolke

Bei der Berechnung der Rotation muss darauf geachtet werden, dass der Winkel zwischen der Referenzlinie und der Punktwolke nicht größer als 100 gon ist. Da der Winkel aus der Differenz der beiden Richtungswinkel von den jeweiligen Datensätzen berechnet wird, muss bei der Subtraktion der Referenz von der Punktwolke darauf geachtet werden, dass sich die Richtungswinkel nicht mehr als 200 gon unterscheiden. Der Wert des Richtungswinkels ist von der Lage des Anfangs- und Endpunktes abhängig. Wenn eine Linie um 200 gon gedreht wird, hat sie dieselbe Lage in der Ebene wie davor, außer dass der Anfangs- und Endpunkt die Position gewechselt haben. Diese Eigenschaft wird genutzt, um den Richtungswinkel der Referenzdaten anzupassen, wenn sich die Richtungswinkel der beiden Datensätze um mehr als 100 gon unterscheiden. Zu dem Richtungswinkel der Differenz werden also entweder 200 gon addiert oder subtrahiert, sodass die Differenz zum Richtungswinkel der Punktwolke nicht > 100 gon beträgt.

Zur Veranschaulichung der Thematik eignet sich die Abbildung 6.6. Die senkrechte Linie stellt die Referenzlinie dar. Die blauen gepunktete Linien sind Punktwolken, mit denen die Berechnung der Rotation anhand von drei verschiedenen Situationen erklärt wird. Für jede Punktwolke kann der kleinste Winkel zur Referenzlinie berechnet werden. Der Richtungswinkel der Referenzlinie entspricht, je nachdem wie der Anfangs- und Endpunkt definiert sind, 0 gon bzw. 200 gon. Ebenso kann der Richtungswinkel der Punktwolke zwei Werte annehmen. Die obere Punktwolke hat einen Richtungswinkel von 50 gon oder 250 gon. Für die Berechnung der Rotation werden also die zwei Werte der Richtungswinkel verwendet, die sich nicht mehr als 100 gon unterscheiden. Hier kann der kleinste Richtungswinkel der Referenz (0 gon) von dem kleinsten Richtungswinkelwert der Punktwolke abgezogen werden (50 gon).

Ebenso wird bei der mittleren Punktwolke 92 gon minus 0 gon gerechnet. Überschreitet der Richtungswinkelwert der Punktwolke die 100 gon, so wie es bei der unteren Punktwolke der Fall ist, wird entweder der größere Richtungswinkelwert der Referenz (200 gon) von dem kleineren Richtungswinkelwert der Punktwolke (160 gon) abgezogen oder es werden 400 gon von dem größeren Richtungswinkelwert der Punktwolke (360 gon) abgezogen. Der Richtungswinkel von 400 gon entspricht derselben Linie mit dem Richtungswinkel von 0 gon.

Der Wert der Rotation liegt also zwischen -100 gon und 100 gon. Das Vorzeichen gibt die Verdrehung zur Punktwolke an. Ist das Vorzeichen positiv, handelt es sich um eine nach rechts verdrehte Punktwolke. Ist das Vorzeichen hingegen negativ, dann ist die Punktwolke im Bezug zur Referenzlinie nach links verdreht.

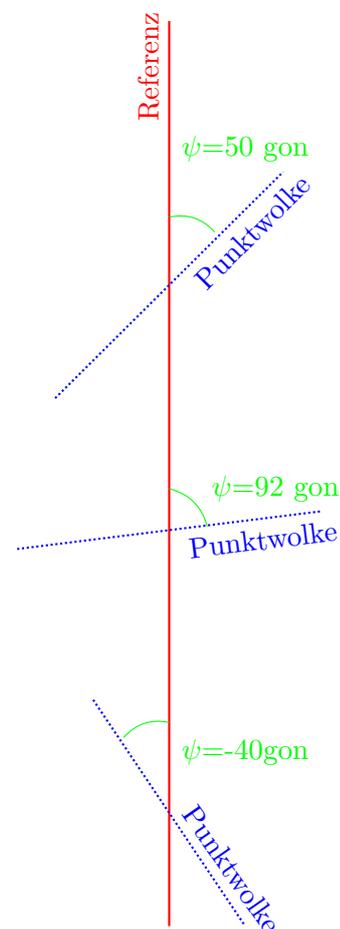


Abb. 6.6: Bestimmung der Rotation einer Punktwolke in Bezug auf die Referenzlinie. Die maximale Verdrehung zwischen zwei Linien beträgt 100 gon.

Translation

Die Translation wird durch die Lage der Eckpunkte bestimmt, da die eindimensionalen Koordinaten der Eckpunkte die Berechnung der Translation erleichtern. Dazu werden die X- und Y-Koordinaten der Eckpunkte miteinander verglichen. Als Referenz dient wiederum der amtliche Gebäudegrundriss. Während die Koordinaten des Gebäudeeckpunktes problemlos aus QGIS abgegriffen werden können, muss der Eckpunkt der Punktwolke konstruiert werden. Dazu wird eine ausgeglichene Linie zwischen den Punkten zweier angrenzenden Gebäudeseiten in MATLAB berechnet und in QGIS eingezeichnet. Der Schnittpunkt der zwei Linien ist das entsprechende Gebäudeeck. Die Koordinaten des konstruierten Schnittpunktes werden anschließend von den amtlichen Gebäudeeckkoordinaten subtrahiert. Die Differenzen der Subtraktion, die mit der Formel 6.8 berechnet werden, geben die Verschiebung der Punktwolke in Ost- und Nord-Richtung an.

$$\begin{aligned}s_y &= Y - y \\ s_x &= X - x\end{aligned}\tag{6.8}$$

mit L : Länge und s_y, s_x : Translation

Neben der Verschiebung nach Osten und Norden wird der Richtungswinkel und die Strecke der Verschiebung berechnet. Dazu werden die Formeln 6.7 und 6.9 verwendet.

Skalierung

Die Skalierung ist ein Maß für die Größe der dargestellten Objekte und wirkt sich auf die Länge der Objektseiten aus. Da es sich in dieser Arbeit um ein Gebäude handelt, wird die Länge der rekonstruierten Gebäudeseite ermittelt und mit den Referenzdaten verglichen. Die Seitenlänge kann durch den Abstand zweier benachbarten Hausecken bestimmt werden. Dies lässt sich mithilfe der linienbasierten Schnittpunktbildung, wie in dem vorherigen Abschnitt „Translation“ erläutert worden ist, realisieren. Indem aus der Punktwolke von drei aneinanderliegenden Hauswänden eine ausgeglichene Linie berechnet und anschließend konstruiert wird, können aus den Schnittpunkten die Koordinaten der zwischen den Hauswänden liegenden Hausecken ermittelt werden. Der Punktabstand wird mit der Formel 6.9 berechnet. Die Skalierung wird üblicherweise in Form eines Maßstabs angegeben (6.10). Da diese Form nicht für Strecken < 100 m geeignet ist, wird die Abweichung der Längen mit der Formel 6.11 berechnet. Dieser Wert der Differenz ist greifbarer als der Maßstab.

$$\begin{aligned}l &= \sqrt{(\Delta y)^2 + (\Delta x)^2} \\ L &= \sqrt{(\Delta Y)^2 + (\Delta X)^2}\end{aligned}\tag{6.9}$$

mit l : Gebäudelänge der Punktwolke und L : Gebäudelänge der Referenz

$$m = \frac{L}{l}\tag{6.10}$$

$$\Delta L = L - l\tag{6.11}$$

Wegen der dicht bewachsenen Vegetation konnten nur die Eckpunkte der vorderen Schlossseite E1 und E2 (siehe 7.8) für eine qualitative Auswertung verwendet werden. Für ein aussagekräftiges Ergebnis sind mindestens zwei Kontrollwerte nötig. Deshalb wird die Länge der vorderen Schlossseite in drei verschiedenen Höhen gemessen. Da die Gebäudewand nicht gerade ist, sondern ca. ab der Mitte nach oben hin schmaler wird, werden die Hauskanten in den entsprechenden Höhen (unterhalb der Fenster) tachymetrisch gemessen, sodass mithilfe der ermittelten Koordinaten die höhenabhängige Länge der Hauswand berechnet werden kann. Zusätzlich werden von drei Fenstern die Breite und die Höhe gemessen und als Maß für die Skalierung verwendet. Die Breiten und Höhen der Fenster werden in 3DF Zephyr ermittelt. Dazu wird das texturierte 3D-Modell verwendet, weil die Kanten der Fensterrahmen im Gegensatz zur Punktwolke deutlich zu erkennen sind. Die Messung erfolgte mit dem Bearbeitungstool „Schnelle Messungen“ unter dem Reiter „Werkzeuge“ (siehe Abbildung 6.7). Da die Hausecken in den drei verschiedenen Höhen in der Punktwolke nur 30 cm genau abgegriffen werden können, ergibt sich innerhalb dieser 30 cm Höhenunterschied aufgrund der Hausschräge eine Abweichung bei den Längen. Mithilfe der tachymetrisch gemessenen Koordinaten der Knickpunkte und der obersten Eckpunkte sowie der Länge der schrägen Wand (Abbildung 6.8) kann der Lageunterschied in Bezug auf die Kantenlänge der beiden Gebäudekanten von S1 und S2 ermittelt werden. Unter Verwendung des Dreisatzes wird der Lageunterschied anschließend mit einer Kantenlänge von 30 cm in das Verhältnis gestellt. Dieser berechnete Wert beschreibt eine Unsicherheit bei dem Vergleich der Referenzdaten mit der Punktwolke. Die Skalierung kann somit nicht genauer berechnet werden als der Lageunterschied bei 30 cm Höhe beträgt.



Abb. 6.7: Messen der Fensterhöhe (links) und der Fensterbreite (rechts) in dem texturierten Modell in 3DF Zephyr.

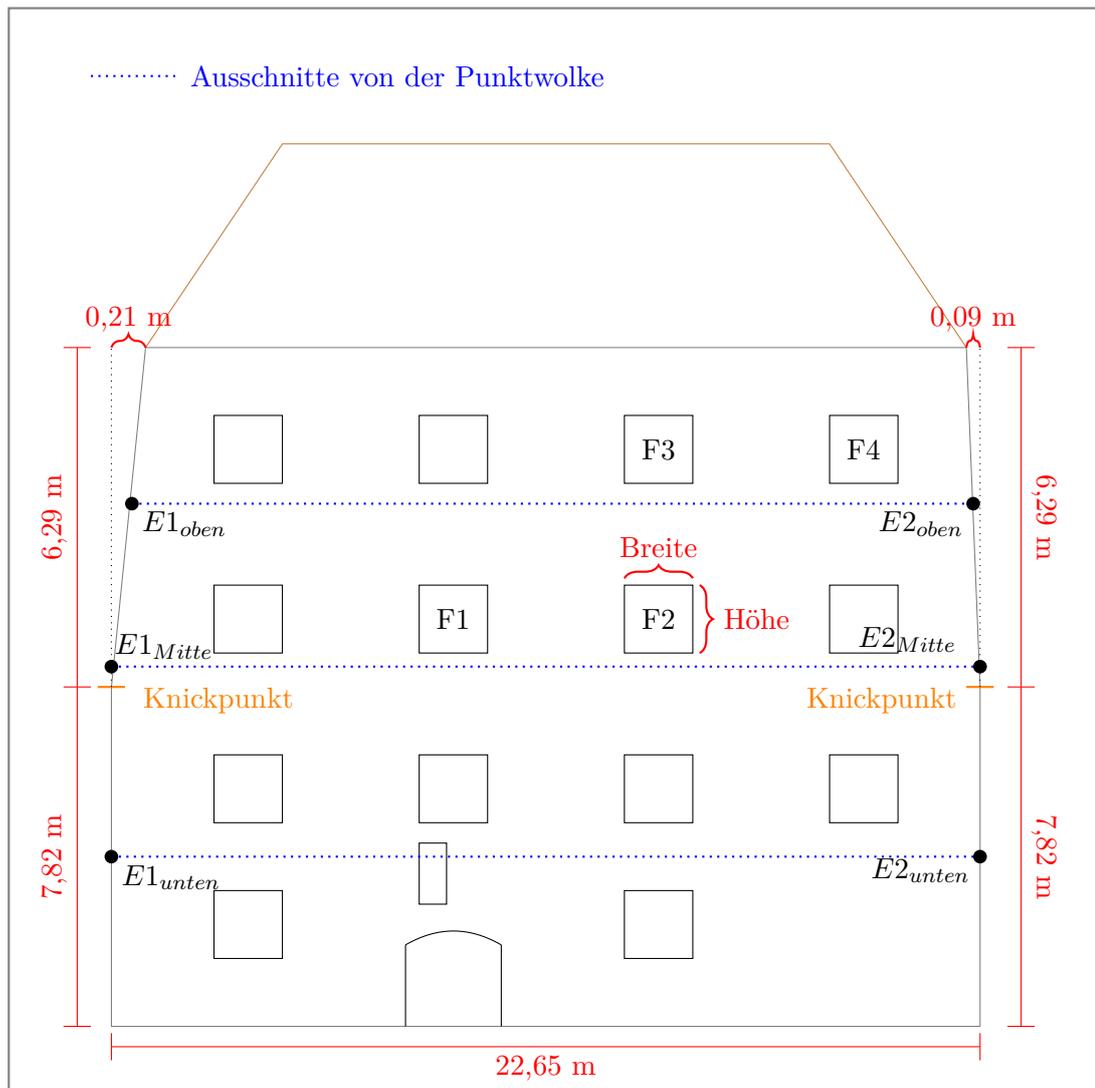


Abb. 6.8: Tachymetermessung der vorderen Schlosswand S2 zur Bestimmung der Skalierung.

7 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in dem Kapitel 6 beschriebene Vorgehensweise dargestellt. Während im Abschnitt 7.1 die graphischen Ergebnisse der Rekonstruktion in 3DF Zephyr abgebildet und erläutert werden, werden im Abschnitt 7.2 die Ergebnisse hinsichtlich der erreichten inneren und äußeren Genauigkeit validiert.

7.1 Auswertung in 3DF Zephyr

Da die Rekonstruktion in 3DF Zephyr aus mehreren Schritten besteht, werden im Folgenden die einzelnen Zwischenschritte dargestellt. Dies ermöglicht es, die Vorgehensweise nachvollziehen zu können. Die photogrammetrische Rekonstruktion in 3DF Zephyr dauert vom Import der Bilder bis zum fertig texturierten 3D-Modell mehr als 16 Stunden. Die Berechnung wurde mit einem x64-basiertem PC (RAM: 64,0 GB; Prozessor: Intel(R) Xeon(R) 2133 CPU @ 3.60 GHz, 3600 MHz, 6 Kerne, 12 logische Prozessoren) durchgeführt.

7.1.1 Dünne Punktwolke



Abb. 7.1: Dünne Punktwolke in 3DF Zephyr.

Während der Berechnung der dünnen Punktwolke, bei der die äußere Orientierung der Kamera bei jedem Bild berechnet wird, konnten 548 von insgesamt 624 Bildern orientiert werden. Die Berechnung dauerte 36 Minuten und 32 Sekunden. Dabei werden 345880 Punkte rekonstruiert. Abbildung 7.1 zeigt die dünne Punktwolke.

7.1.2 Dichte Punktwolke



Abb. 7.2: Dichte Punktwolke in 3DF Zephyr.

Die Berechnung der dichten Punktwolke benötigt für die Rekonstruktion der 548 Bilder eine Laufzeit von 3 Stunden 17 Minuten und 1 Sekunde. Dabei wurden insgesamt 9674386 Punkte rekonstruiert.

Das umliegende Gelände wurde mithilfe eines Bearbeitungstools weggeschnitten, um unnötige Daten zu entfernen und die Rechenzeit des folgenden Schrittes zu verkürzen. Abbildung 7.2 zeigt die dichte Punktwolke

7.1.3 Oberflächenrekonstruktion

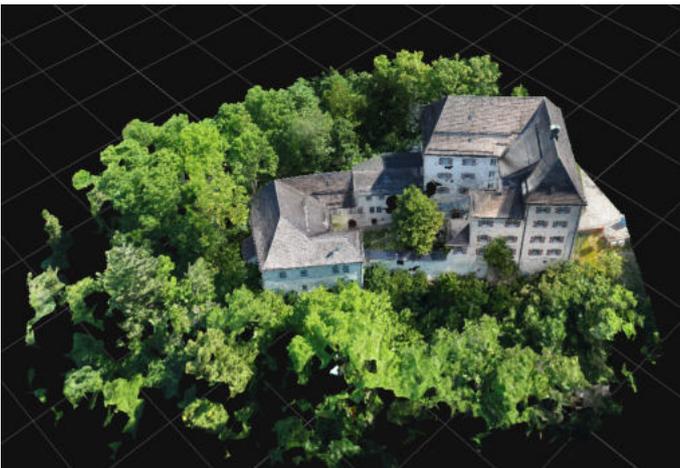


Abb. 7.3: Oberflächenrekonstruktion in 3DF Zephyr.

Die Dreiecksvermaschung nimmt wegen der Photoconsistency besonders viel Zeit in Anspruch. Die Berechnung dauert 11 Stunden 39 Minuten und 34 Sekunden. Dabei sind 19324761 Dreiecksflächen erstellt worden.

In der Abbildung 7.3 ist der gesamte Gebäudekomplex gut zu erkennen. Wird das Modell allerdings genauer betrachtet, sind mehrere Löcher (Abb. A.1), verschwommene Kanten (Abb. A.3) und falsch orientierte Bilder (Abb. A.2) zu erkennen.

7.1.4 Texturierte Vermaschung

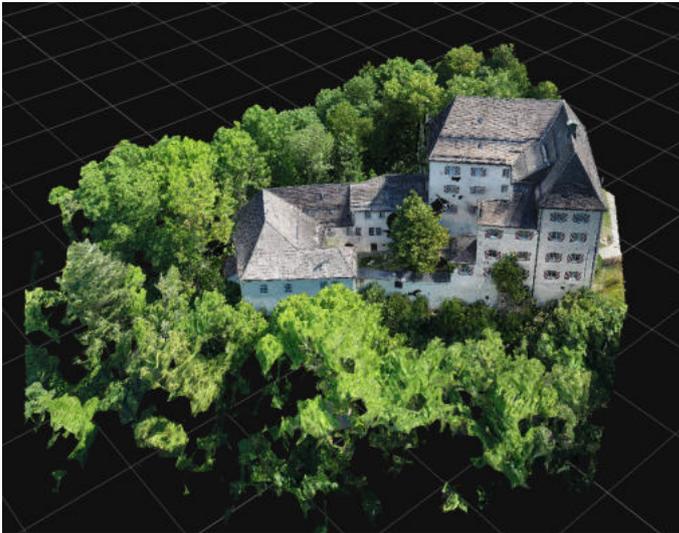


Abb. 7.4: Texturiertes Modell in 3DF Zephyr.

Die Texturierung glättet, wie die Abbildung 7.4 zeigt, die Oberfläche des 3D-Modells, sodass die Fugen der Steinplatten an der Schlosswand zu erkennen sind. Die Oberfläche wurde auf 3975989 Dreiecksflächen reduziert. Dabei werden die Dreiecksflächen vergrößert und das Rauschen minimiert. Für die Glättung wurde eine Rechenzeit von 18 Minuten und 21 Sekunden benötigt.

In der Abbildung 7.5 ist der Unterschied zwischen der Oberflächenrekonstruktion und der texturierten Vermaschung deutlich zu erkennen. Während die Oberfläche im linken Bild sehr rau erscheint, sind im rechten Bild die Steinfugen der Fassade klar zu erkennen.

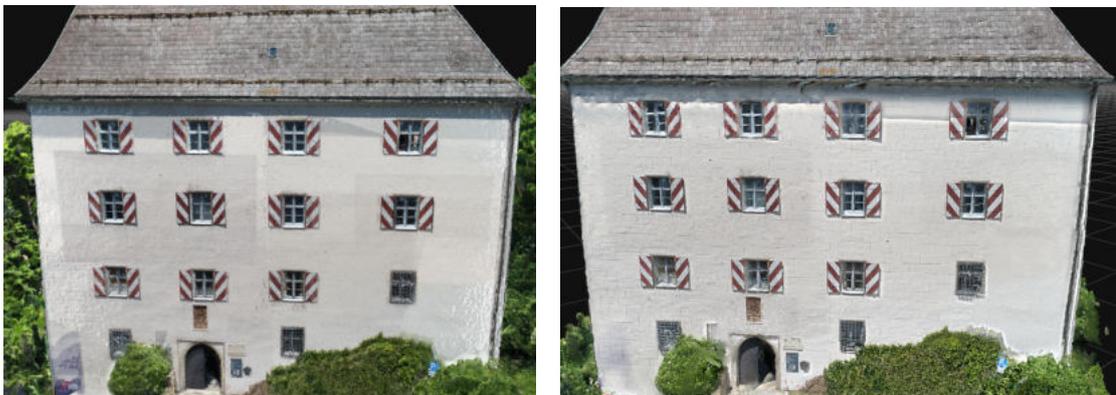


Abb. 7.5: Unterschied zwischen der Oberflächenrekonstruktion (links) und der texturierten Vermaschung (rechts).

7.2 Validierung

Die Validierung besteht aus der Analyse der inneren und der äußeren Genauigkeit. Während die innere Genauigkeit Aufschluss über die Qualität der Punktwolke in sich gibt, beschäftigt sich die äußere Genauigkeit mit der Lage im Koordinatensystem ETRS89 UTM Zone 32.

7.2.1 Innere Genauigkeit

Zur Bewertung der inneren Genauigkeit werden der wahrscheinlichste Fehler, der durchschnittliche Fehler, die Standardabweichung und der größte Abstand mehrerer Punktwolken berechnet, siehe Tabelle 7.1. Dazu bietet die Ausgleichsrechnung die Grundlage der Fehleranalyse. Da bei der Fehlerberechnung die senkrechten Abstände einzelner Punkte zu der Linie ausschlaggebend sind, muss die Punktwolke der Gebäudeseiten in QGIS parallel zur Y-Achse gedreht werden, damit mit den X-Koordinaten der Punkte der Abstand zu der ausgeglichenen Gebäudeseite berechnet werden kann. Die Drehung erfolgte manuell. Abbildung 7.6 stellt die gedrehten Punktwolken der Gebäudeseiten S1, S2 und S5 dar. Die Differenz der X-Koordinaten von dem Anfangs- und Endpunkt der Punktwolke entspricht bei einer Länge von 20 m knapp 1 Meter. Dies bedeutet bei einem Zentimeter Distanz (Punkt von Punktwolke zur ausgeglichenen Linie) eine Abweichung von einem Millimeter.

Tab. 7.1: Fehleranalyse zur Bestimmung der inneren Genauigkeit der Punktwolke mithilfe eines Ausschnittes von drei verschiedenen Gebäudeseiten.

Gebäudeseite	wahrscheinl. Fehler [cm]	durchschnittl. Fehler [cm]	Standardabw. [cm]	größter Abstand [cm]
S1	0,47	0,56	0,71	2,44
S2	1,29	1,41	1,70	4,84
S5	1,32	2,06	3,10	13,30

Die größte Abweichung von der ausgeglichenen Linie beträgt 13,30 cm bei Gebäudeseite S5 bei Seite S2 4,84cm und bei Seite S1 um 2,44cm. Die zwei Fehler und die Standardabweichung platzieren sich in der selben Reihenfolge. Mit 3,10 cm hat die Gebäudeseite S5 die größte Standardabweichung. Gefolgt von S2 mit 1,7 cm erreicht S1 mit 0,71 cm die kleinste Standardabweichung.

7.2.2 Äußere Genauigkeit

Um eine Aussage über die äußere Genauigkeit treffen zu können, wurde ein Ausschnitt der Punktwolke mit dem Referenzdatensatz des amtlichen Gebäudegrundrisses verglichen. In Abbildung 7.8 werden die Schlossseiten und die Eckpunkte zur Veranschaulichung benannt. Die mittels Ausgleichsrechnung berechneten Linien und die daraus resultierenden Schnittpunkte, welche die Ecken der Punktwolke definieren, werden in Abbildung 7.7 dargestellt. Diese ermittelten Eckpunkte sind die Grundlage zur Berechnung von Rotation und Translation. Für die Skalierung dienen die gesondert gemessenen Tachymeterdaten, die in Abbildung 6.8 dargestellt werden.

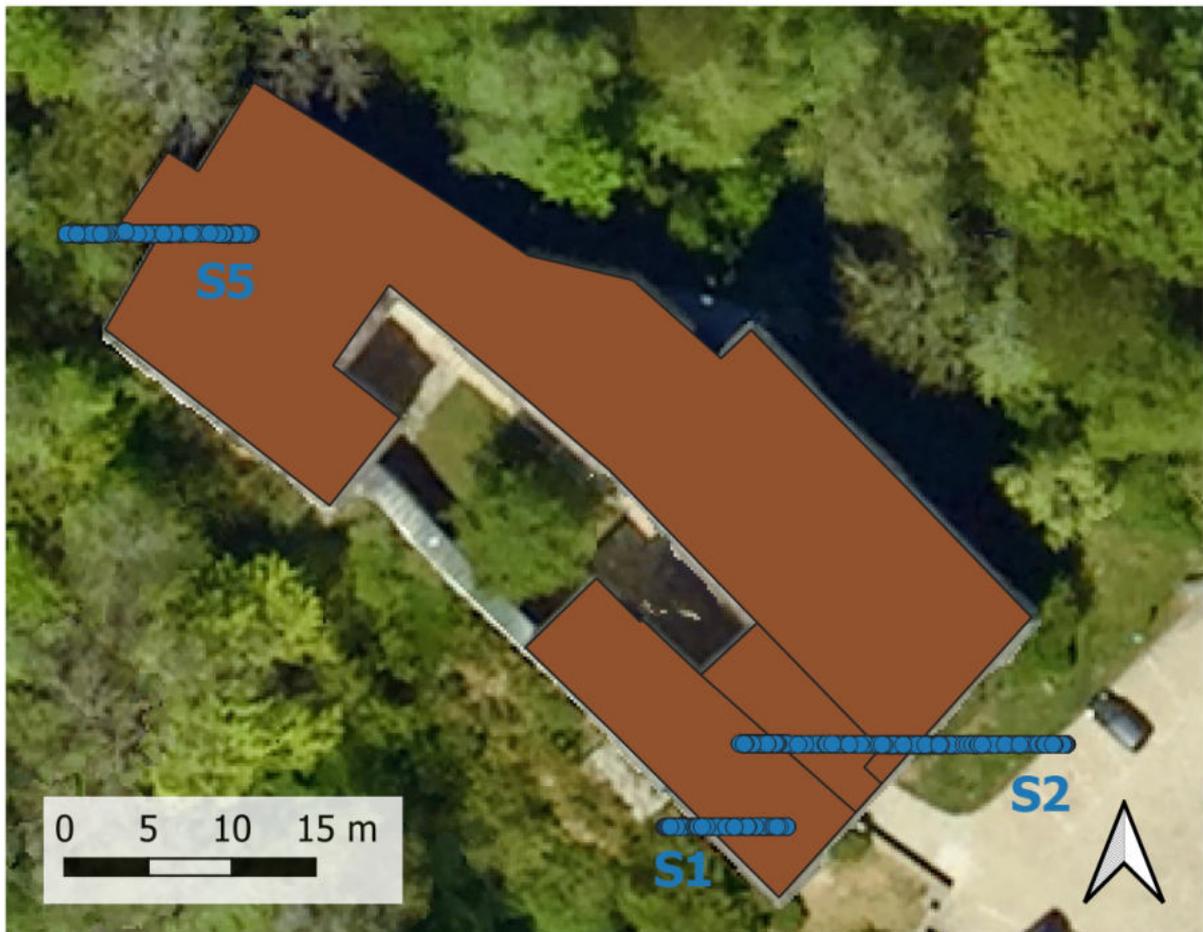


Abb. 7.6: Manuell gedrehte Punktwolken (blau) der Gebäudeseiten S1, S2 und S5.

Zudem sind in der Tabelle 7.2 alle Koordinaten der berechneten und der tachymetrisch gemessenen Eckpunkte aufgelistet. Diese werden für die Berechnungen der Rotation, Translation und Skalierung benötigt. Damit die Tabelle übersichtlich bleibt, werden die Koordinaten bei den Zehnerstellen abgeschnitten.

Rotation

In der Abbildung 7.7 wird die Lage der vorderen Gebäudemauer S2 von der Punktwolke und dem amtlichen Gebäudegrundriss dargestellt. Die Tabelle 7.3 zeigt jeweils den Richtungswinkel der Gebäudeseiten S2, S5 und S6 von den Referenzdaten und der Punktwolke, die mithilfe der ermittelten Koordinaten in Tabelle 7.2 berechnet wurden. Eine positive Rotation bedeutet, dass die Punktwolke im Bezug auf die Referenzdaten im Uhrzeigersinn nach rechts verdreht ist. Ein negatives Vorzeichen weist auf eine entgegengesetzte Verdrehung der Punktwolke hin.

Der Richtungswinkel der vorderen Gebäudeseite S2 beträgt sowohl für die Referenzdaten als auch für die Punktwolke ca. 50 gon, da die Wand, wie in der Abbildung 7.8 zu sehen ist, in Richtung Südosten zeigt. Entscheidend für die Rotation ist die Differenz der beiden Datensätze.



Abb. 7.7: Visualisierung der ausgeglichenen Linien (S1, S2, S3, S4, S5, S6 und S7) und deren Schnittpunkte (E1, E2, E3, E4 und E5). Die konstruierten Eckpunkte dienen als Grundlage für die Bestimmung der Rotation und Translation.

Bei der Seite S2 beträgt die Rotation $-0,368$ gon und bei der Seite S5 $-0,333$ gon und bei der Gebäudeseite S6 ist die Verdrehung $0,425$ gon. Im Durchschnitt ist die Punktwolke in Bezug auf die amtlichen Gebäudedaten um $0,092$ gon nach links verdreht. Gemäß der Bogenformel 7.1 bewirkt eine Richtungsabweichung von $0,001$ gon in 100 m eine Lageänderung von $1,6$ mm. $0,1$ gon entsprechen also $3,1$ cm bei einer Seitenlänge von 20 m.

$$\frac{b}{r} = \frac{\alpha}{\rho} \quad (7.1)$$

mit $\rho = 63,66$ mgon, α : Winkel, b: Bogenlänge und r: Radius

Translation

Die Translation wird durch die Verschiebung in X- und Y-Richtung definiert. In Abbildung 7.7 ist deutlich zu erkennen, dass die Punktwolke in Bezug auf den amtlichen Gebäudeumriss nach Nordosten verschoben ist.

Wie in der Abbildung 7.7 visualisiert ist, wurden die Eckpunktkoordinaten der Punktwolke mithilfe von Linienschnittpunkten ermittelt. Diese wie auch die Eckpunktkoordinaten der Referenzdaten sind in der Tabelle 7.2 aufgelistet. Die Translation berechnet sich durch die Differenz der Koordinatenwerte aus Punktwolke und Referenzdaten.

Tab. 7.2: Koordinaten der Eckpunkte zur Berechnung der Rotation, Translation und Skalierung zwischen der Punktwolke und der Referenz. Fett geschriebene Punktnummern sind Referenzdaten von dem amtlichen Gebäudegrundriss, kursiv geschriebene Punktnummern sind Referenzdaten von der Tachymeteraufnahme. Zu dem Easting-Wert (E) müssen 833400 m und zu dem Northing-Wert (N) müssen 5416600 m addiert werden, um die Koordinaten im ETRS89 zu erhalten.

Punktnummer	Referenz		Punktwolke	
	E	N	E	N
E1	45,51	22,09	45,52	23,12
E2	60,63	38,98	60,69	39,87
E3	14,07	71,24	14,48	72,22
E4	05,17	56,35	05,48	57,34
E5	18,61	45,71	18,85	46,90
<i>E1_{Dach}</i>	45,48	22,22		
<i>E1_{oben}</i>	45,49	22,16	45,50	23,20
<i>E1_{Mitte}</i>	45,52	22,07	45,52	23,12
<i>E1_{Knickpunkt}</i>	45,54	22,02		
<i>E1_{unten}</i>	45,54	22,02	45,52	23,12
<i>E2_{Dach}</i>	60,53	38,94		
<i>E2_{oben}</i>	60,58	38,94	60,65	39,85
<i>E2_{Mitte}</i>	60,62	38,95	60,69	39,87
<i>E2_{Knickpunkt}</i>	60,62	38,95		
<i>E2_{unten}</i>	60,62	38,95	60,69	39,87

Mit der Formel 6.8 wird die Ost- und Nordverschiebung der Punktwolke in Bezug auf die Referenzdaten berechnet. Wegen der schlechten Rekonstruktionsqualität im hinteren Gebäudeteil, werden die Eckpunkte des vorderen Gebäudeteils gesondert ausgewertet. Die Verschiebung nach Osten beträgt für die Eckpunkte E1 bis E2 durchschnittlich 3,5 cm, nach Norden sind es hingegen 96 cm. Dabei handelt es sich um einen mittleren Richtungswinkel von 1,8 gon bei einer Strecke von 101 cm. Die Eckpunkte E3, E4 und E5 im hinteren Gebäudeteil haben sowohl nach Osten (32,0 cm) als auch nach Norden (105,7 cm) eine größere Verschiebung als die Eckpunkte im vorderen Gebäudeteil. Im Gegensatz zur Strecke (110 cm) unterscheidet sich der Richtungswinkel (19,1 gon) um 17,3 gon.

Skalierung

Für die Skalierung werden wiederum die Koordinaten der ermittelten Eckpunkte benötigt, siehe Tabelle 7.2. Als Kontrolle werden in drei unterschiedlichen Höhen die Abstände zwischen den Ecken E1 und E2 berechnet. Abbildungen 7.9 und 7.10 zeigen die Lage der Eckpunkte der verschiedenen Datensätze in QGIS. Die Eckpunkte *E1_{unten}*, *E1_{Mitte}* und *E2_{unten}*, *E2_{Mitte}* haben in der Punktwolke die selben Koordinaten und liegen somit übereinander. Bei den Tachymeterdaten liegen nur *E2_{unten}*, *E2_{Mitte}* übereinander, die Koordinaten von *E1_{Mitte}* und *E1_{unten}* unterscheiden sich.

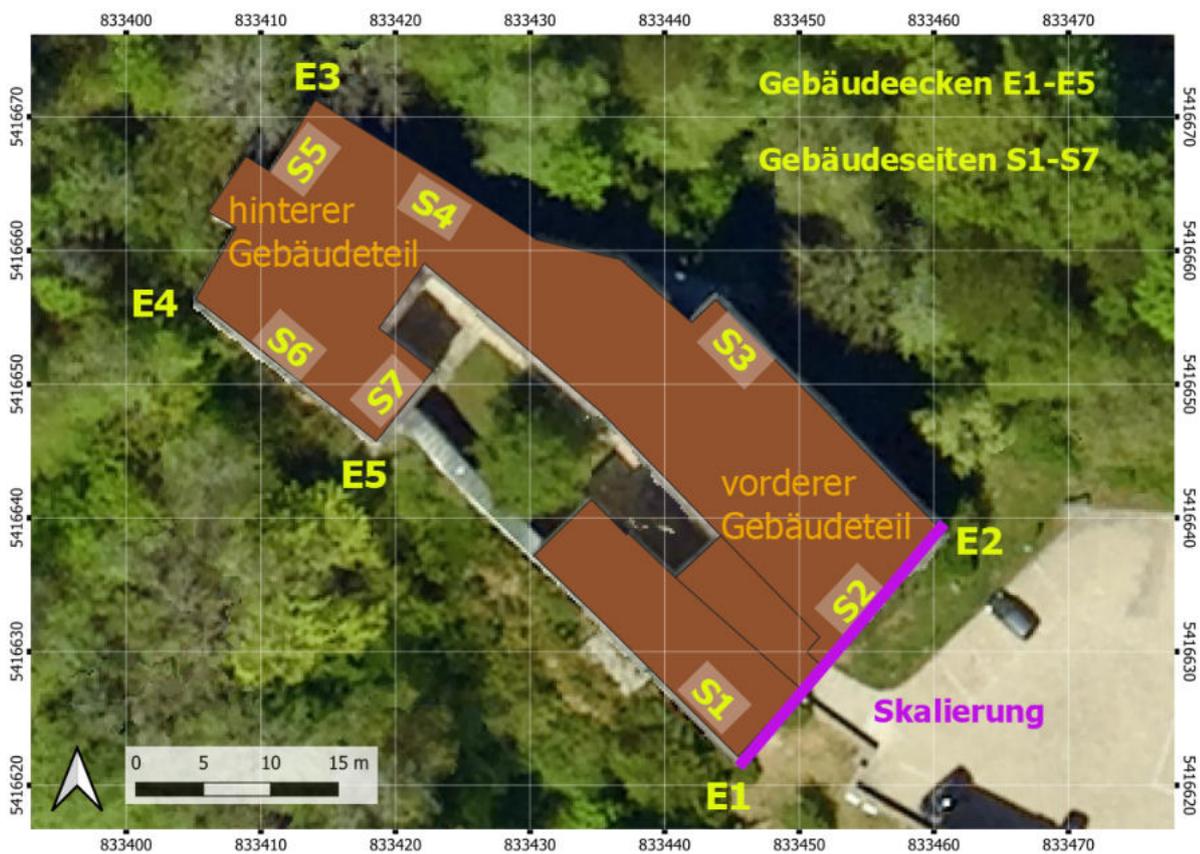


Abb. 7.8: Gebäudeseiten und Eckpunkte von Schloss Wolfstein. Vorderer und hinterer Gebäudeteil (orange), Fassade für die Skalierung (lila), Schlosseseiten S1 - S7 und die Schlosseckpunkte E1 - E5 (gelb). Die Gebäudeseite S1 ist ca. 7,5 m lang und macht danach einen leichten Knick.

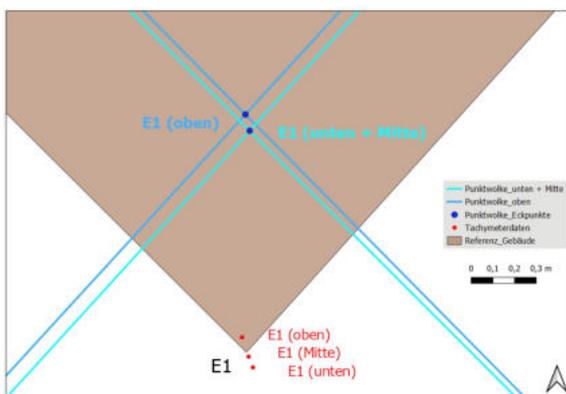


Abb. 7.9: Lage des Eckpunktes E1 von den verschiedenen Datensätzen (Punktwolke, Tachymeterdaten, amtlicher Gebäudegrundriss) in QGIS.

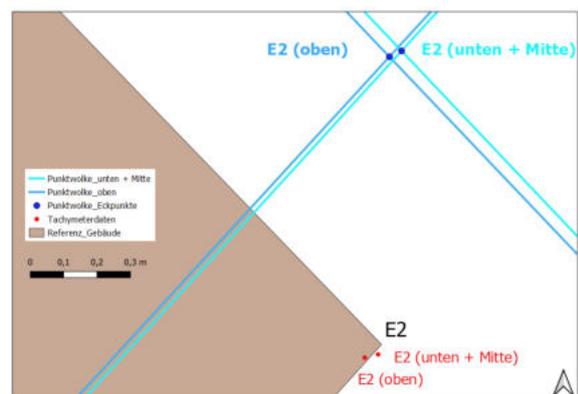


Abb. 7.10: Lage des Eckpunktes E2 von den verschiedenen Datensätzen (Punktwolke, Tachymeterdaten, amtlicher Gebäudegrundriss) in QGIS.

Tab. 7.3: Richtungswinkel der Punktwolke und der Referenz zur Berechnung der Rotation.

Schlossseite	Richtungswinkel der Referenz [gon]	Richtungswinkel der Punktwolke [gon]	Rotation (Differenz) [gon]
S2	46,483	46,851	-0,368
S5	34,297	34,630	-0,333
S6	142,630	142,205	0,425

Tab. 7.4: Translation der Punktwolke für die Gebäudeecken E1 bis E5.

Verschiebung der Punktwolke	$E1_{unten}$	$E2_{unten}$	\emptyset	E3	E4	E5	\emptyset
nach Osten [cm]	1	6	3,5	41	31	24	32,0
nach Norden [cm]	103	89	96	98	99	120	105,7
Richtungswinkel [gon]	-1,157	4,834	1,8	25,22	19,31	12,66	19,1
Strecke [cm]	110	92	101	106	104	121	110

Die Skalierung wurde mit dem euklidischen Abstand zweier entsprechender Eckpunkte, der mit der Formel 6.9 berechnet wird, bewertet.

Eine negative Differenz deutet im Gegensatz zu einer positiven Differenz auf eine längere Punktwolke im Vergleich zu den Referenzdaten hin. In der Tabelle 7.5 sind die berechneten Werte aufgelistet. Im Durchschnitt ist die aus der Punktwolke errechnete Länge E1 - E2 um 5,67 cm kürzer als die entsprechenden amtlichen Daten.

Da der Ausschnitt der Punktwolke nur mit einer Genauigkeit von 30 cm aus der gesamten Punktwolke segmentiert werden kann, wird die Auswirkung des Lageunterschiedes innerhalb von 30 cm berechnet. Bei dem Gebäudeeck E1 liegt der Unterschied bei einer Länge von 6,90 m bei 0,21 m, d.h. pro 30 cm Höhenunterschied ergibt sich ein Lageunterschied von 1 cm. Bei dem Eckpunkt E2 ist die Wandschräge bei gleicher Länge (6,90 m) mit 9 cm nur halb so groß, weswegen der Lageunterschied bei 30 cm Länge geringe 0,4 cm beträgt. Der Längenunterschied, der zwischen den Referenzdaten und der Punktwolke berechnet wird, kann wegen der Unsicherheit der beiden Eckpunktkoordinaten E1 und E2 nicht genauer als die ermittelten 1,40 cm angegeben werden.

Die Fensterbreite von den vier mit dem Tachymeter gemessenen Fenstern beträgt 1,27 m und die Fensterhöhe misst 1,71 m. In dem texturierten 3D-Modell liegt der Wert der Fensterbreite zwischen 1,26 m und 1,29 m und die Fensterhöhe zwischen 1,69 m und 1,72 m. Wird die Differenz der beiden Datensätze berechnet, deutet ein negativer Wert wie bei der Berechnung der Fassadenlänge auf breitere bzw. höhere Fenster im 3D-Modell hin. Der Durchschnitt der Differenzen aller Fensterbreiten und -höhen beträgt 0 cm.

Tab. 7.5: Euklidischer Abstand zwischen den Gebäudeecken zur Bestimmung der Skalierung.

	Abstand zwischen den Eckpunkten		
	$E1_{unten}$ und $E2_{unten}$	$E1_{Mitte}$ und $E2_{Mitte}$	$E1_{oben}$ und $E2_{oben}$
Referenz [m]	22,67	22,65	22,57
Punktwolke [m]	22,60	22,60	22,51
Differenz [m]	0,07	0,05	0,06

Tab. 7.6: Fensterhöhe und -breite gemäß der Punktwolke und der Referenz zur Bestimmung der Skalierung. Fenster befinden sich auf der Gebäudeseite S2.

	Fensterbreite				Fensterhöhe			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
Referenz [m]	1,27	1,27	1,27	1,26	1,71	1,71	1,71	1,71
3D-Modell [m]	1,26	1,29	1,26	1,27	1,72	1,70	1,69	1,71
Differenz [m]	0,01	-0,02	0,01	-0,01	-0,01	0,01	0,02	0,00

7.2.3 Ergebnis nach der zweiten Befliegung

Nach Fertigstellung der Arbeit waren die Bedingungen für eine zweite Befliegung von Schloss Wolfstein günstig. Aus Eigeninteresse wurde diese Mitte März 2022 mit der P4P durchgeführt, als der Schnee von den Dächern geschmolzen war und die Bäume noch keine Blätter trugen. Für die 3D-Rekonstruktion wurden alle Bilder von der ersten und zweiten Befliegung verwendet, die mit der P4P fotografiert worden sind (638 Bilder). Das Modell wurden mit den empfohlenen Voreinstellungen von der Software 3DF Zephyr berechnet (7.11). Wie in der Abbildung 7.12 zu sehen ist, ist das neue 3D-Modell im Gegensatz zu dem Modell, das aus einem Datensatz rekonstruiert worden ist, ohne Löcher und Verzerrungen. Im Anhang sind noch weitere Abbildungen (A.7 und A.8) von dem 3D-Modells, das aus beiden Datensätzen erstellt worden ist, angehängt.



Abb. 7.11: 3D-Modell von Schloss Wolfstein nach der Berechnung mit dem Datensatz aus der zweiten Befliegung im März 2022. Ansicht von Westen.



Abb. 7.12: Vergleich der beiden 3D-Modelle. Links das Modell von den Sommer- und Winterbildern und rechts das Modell von den Sommerbildern.

8 Diskussion

Abschließend werden die Ergebnisse analysiert und diskutiert. Dabei wird das Kapitel in drei Unterkapitel eingeteilt. In Unterkapitel 8.1 werden die Einflüsse der Bilder auf das Rechenverfahren und die Verbesserung der Bildaufnahme besprochen. Unterkapitel 8.2 geht auf die Ergebnisse der Rekonstruktions-Schritte ein. Im dritten Unterkapitel 8.3 werden die berechneten Genauigkeiten der Validierung bewertet.

8.1 Bildaufnahme

Die Bilder sind die Grundlage der 3D-Rekonstruktion. Deshalb ist es essentiell, die Bildaufnahme gründlich durchzuführen. Je besser die Bedingungen der Bildaufnahme sind, desto besser wird das endgültige 3D-Modell. Bei der Aufnahme ist darauf zu achten, dass sich die Bilder mit ca. 80% überlappen, damit die Suche nach Verknüpfungspunkten, mit denen die Bilder im Raum orientiert werden, möglichst erfolgreich ist.

Außerdem soll auf jedem Bild möglichst viel von dem Objekt zu sehen sein, um wiederum eine große Überlappung zu gewährleisten. Drittens ermöglicht der Einsatz von GNSS eine auf ein Koordinatensystem bezogene Positionierung der einzelnen Kameras. Das 3D-Modell hat dadurch einen globalen Bezug und kann erstens mit georeferenzierten Karten in Übereinstimmung gebracht werden und ist zweitens realitätsgetreu skaliert. Im Gegensatz zur manuellen Steuerung der Drohne kann für die Befliegung eine Flugplanungssoftware als Hilfsmittel genutzt werden. Mit dieser können die Flugparameter, wie Flughöhe, seitlicher Abstand zum Objekt sowie Längs- und Querüberlappung der Bilder, eingestellt werden. Die Software berechnet anschließend mithilfe dieser Daten die Flugroute. Die Drohne wird demnach über das Programm gesteuert und die systematische Bildaufnahme erfolgt automatisch. Wegen der dichten Vegetation war dieses Hilfsmittel jedoch nicht geeignet. Diese Software besser für großflächige Landschaftsgebiete als für detaillierte Stadtgebiete geeignet.

Da mit der DJI Mini 2 der Abstand zum Objekt gering war, haben die Bilder mit 0,17 cm (vgl. Tabelle 3.1) im Vergleich zu den Bildern der P4P eine deutlich höhere Bodenauflösung. Bei der Berechnung der dünnen Punktwolke konnten deshalb nur knapp die Hälfte der Bilder vom Innenhof orientiert werden. Dies zeigt, dass Bilder von unterschiedlichen Drohnen und unterschiedlichen Distanzen nicht einwandfrei kombiniert werden können.

Der Innenhof wurde an zwei unterschiedlichen Tagen mit der DJI Mini 2 aufgenommen. Wegen der unterschiedlichen Jahreszeit und Witterung an den beiden Tagen unterscheiden sich die Datensätze in den Belichtungsverhältnissen. Dies wirkt sich auf die Farbe der Bildpixel aus. Während die Bilder im Sommer größtenteils satte Farben besitzen, sind die Bilder vom Herbst eher grau. Die unterschiedlichen Farben zeigen sich bei der Rekonstruktion der dichten Punktwolke. Um ein farbenfrohes Endergebnis zu erhalten, ist es nötig, bei der Texturierung nur die Bilder, die im Sommer fotografiert worden sind, zu verwenden.

Um ein besseres Rekonstruktionsergebnis von dem kompletten Schloss zu erhalten, wäre eine erneute Befliegung mit angepassten Flugbedingungen notwendig gewesen. Wegen des dauerhaften Schneefalls war das Schloss Wolfstein während der Bearbeitungszeit mit Schnee bedeckt und eine

erneute Bildaufnahme war deshalb nicht möglich.

Nach Abschluss der Bachelorarbeit waren die Bedingungen günstig und es wurden weitere Daten von dem Schloss aufgenommen und zusammen mit dem ersten Datensatz vom Sommer rekonstruiert. Aufgrund der verschiedenen Licht- und Vegetationsverhältnissen in den beiden Datensätzen werden, wie bei dem Innenhof, für die Texturierung lediglich die Bilder von der Sommerbefliegung verwendet. Wie die Ergebnisse zeigen, konnten mit dem zweiten Datensatz vom März die Daten der ersten Befliegung im Juli erfolgreich ergänzt werden. Vor allem die Nordostwand des Schlosses konnte deutlich verbessert, da im Winter keine grünen Bäume die Sicht auf das Objekt einschränken (A.4 und A.6). Während die Daten vom Winter für ein vollständiges Rekonstruktionsergebnis sorgen, dienen die Sommerbilder für eine anschauliche und farbenfrohe Visualisierung des 3D-Modells.

8.2 Auswertung in 3DF Zephyr

In diesem Abschnitt werden die Zwischenergebnisse der Rekonstruktion hinsichtlich der Visualisierung diskutiert.

8.2.1 Dünne Punktwolke

Je mehr Bilder in der ersten Phase mit SfM orientiert werden, desto detaillierter werden die Folgeergebnisse.

Die Anzahl der orientierten Bilder hängt von den Parametereinstellungen ab. Nach mehreren Versuchen haben sich die von 3DF Zephyr empfohlenen Voreinstellungen als beste Parameter herausgestellt. Mit diesen Einstellungen konnten 548 von insgesamt 624 Bildern orientiert werden. Beim Erhöhen der Parameter *Merkmalspunkt-Empfindlichkeit* oder *Bezugspunktmenge* werden nur rund 500 Bilder orientiert. Die Parameter *Eigenschaften der Merkmalspunkte* und *Menge der Verknüpfungspunkte pro Bild* haben einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis. Ein Mittelmaß der Einstellungsmöglichkeiten ist bei beiden Parametern die beste Lösung. Zu wenig Merkmals- und Verknüpfungspunkte minimieren den Detailreichtum des Modells. Zu viele Merkmalspunkte führen ebenfalls nicht zwingend zu einem besseren Ergebnis, da mit einer erhöhten Menge die Mehrdeutigkeit zwischen den Merkmalspunkten während der Korrespondenzanalyse steigt. Eine große Anzahl an Verknüpfungspunkten kann das Ergebnis zwar verbessern, führt aber zugleich zu einer längeren Berechnungszeit (3Dflow (2022b)).

Nicht orientierte Bilder können nachträglich mit ausgewählten Nachbarbildern gezielt rekonstruiert werden. Dabei hat sich allerdings herausgestellt, dass die Wahrscheinlichkeit, ein Bild im Nachgang erfolgreich zu orientieren, bei geringen ca. 5% liegt.

8.2.2 Dichte Punktwolke

Die Qualität der dichten Punktwolke ist nach dem Berechnungsschritt schwer zu erkennen. Erst nach der darauf folgenden Oberflächenrekonstruktion ist eine Bewertung aufgrund von verschwommenen Kanten oder Löchern im Modell möglich. Aus diesem Grund wurde die dritte Phase (Vermaschung) in einem zusammenhängenden Berechnungsschritt mit der dichten Punktwolke ausgeführt. Die Parametereinstellungen der dichten Punktwolke sowie der 3D-Rekonstruktion werden vor der Berechnung der dichten Punktwolke eingestellt. Nach dieser Berechnung wird

sofort die Oberfläche rekonstruiert. Erst nach der Oberflächenrekonstruktion können die Ergebnisse der beiden Berechnungsschritte in der Software 3DF Zephyr analysiert werden.

Auch bei dieser Phase bringen die empfohlenen Voreinstellungen das beste Ergebnis. Für die *Bildauflösung* wurde wiederum das Mittelmaß (50%) gewählt. Je größer der Prozentsatz eingestellt wird, desto verschwommener wird die Textur des Objektes. Der *Rauschfilter* war mit 10% am besten eingestellt, da damit das grobe Rauschen eliminiert wird. Wurde der Prozentsatz erhöht, bleiben zu wenig Punkte für die dichte Punktwolke übrig und die Vermaschung verliert viele Details.

8.2.3 Oberflächenrekonstruktion

Nach der Dreiecksvermaschung der dichten Punktwolke kann eine qualitative Aussage über die Rekonstruktion getroffen werden. Wie bereits erwähnt, ist die Qualität am besten an den Objektkanten sichtbar. Löcher in dem 3D-Modell deuten ebenso wie verschwommene bzw. abgerundete Kanten auf Fehleinstellungen oder schlechte Bildaufnahmen hin.

Der ausschlaggebende Parameter für die Vermaschung ist der Grad der *Wasserfestigkeit*. Je höher der Prozentsatz, desto größere Löcher werden in dem Modell geschlossen, indem die Farbe interpoliert wird. Demzufolge ist das Modell zwar frei von Löchern, wird allerdings an diesen Stellen keine passende Textur und Details aufweisen. Um derartige Löcher zu vermeiden, können zunächst die Parameter *Anzahl der Merkmalspunkte* und *Anzahl der Verknüpfungspunkte* bei der Rekonstruktion der dichten Punktwolke erhöht werden. Sind danach dennoch Löcher in dem Modell, liegt es an fehlenden Bilddaten. Aufgrund von Objekten im Bildvordergrund wird das Untersuchungsobjekt verdeckt und es sind keine Daten für die Rekonstruktion vorhanden. Demnach ist es empfehlenswert, die betroffenen Stellen erneut zu fotografieren, um genügend Bilddaten für die Berechnung zur Verfügung zu stellen.

8.3 Validierung

8.3.1 Innere Genauigkeit

Die innere Genauigkeit des 3D-Modells wird weniger von den Bildaufnahmen als von den software-spezifischen Algorithmen und den Einstellungen der Rekonstruktionsparameter beeinflusst. Je nach Parametereinstellungen (siehe Tabellen 6.1, 6.2, 6.3 und 6.4) werden qualitativ schlechte Bilder, die überbelichtet, verschwommen oder gering aufgelöst sind, für die Rekonstruktion verwendet oder nicht.

Um die Genauigkeit zu erhöhen, wäre ein zweiter Datensatz nötig gewesen. Da aber wetterbedingt eine weitere Befliegung nicht stattfinden konnte, kann diesbezüglich kein Vergleich gezogen werden.

Für die Validierung wurden im Bezug auf das gesamte Modell gut rekonstruierte Wände (S1, S2 und S5) verwendet. Die Ergebnisse des wahrscheinlichen Fehlers, des durchschnittlichen Fehlers und der Standardabweichung in der Tabelle 7.1 zeigen, dass die Punkte in der Lage größtenteils innerhalb von 3 cm streuen. Die innere Genauigkeit der photogrammetrischen Rekonstruktion entspricht der Koordinatengenauigkeit der amtlichen Referenzdaten. Da dieses Ergebnis von einem Amateur in diesem Fachgebiet der Vermessung erreicht werden kann, der mit im Vergleich zu Tachymetrie oder Laserscanning günstigen Mitteln gearbeitet hat, ist es auf jeden Fall gut zu bewerten.

Die Ergebnisse der größten Abstände in der Tabelle 7.1 sind mit 2,44 cm und 4,84 cm bei den Gebäudewänden S1 und S2 erstaunlich gut. Dieser Abstand kann an der Rekonstruktionsgenauigkeit liegen, wenn von einer ebenen Oberfläche ausgegangen wird. Da die Schlosswände jedoch stellenweise mit Wintergrün bewachsen sind, kann es auch um einen tatsächlichen Abstand handeln. Damit diesbezüglich eine klare Aussage getroffen werden kann, müssten Versuche mit einer ausnahmslos glatten Oberfläche durchgeführt werden. Da diese Bedingungen beim Schloss Wolfstein nicht gegeben sind, ist es nicht sicher, ob die Streuung der Punktwolke von dem Rekonstruktionsalgorithmus verursacht wird.

Bei der Gebäudeseite S5 beträgt der größte Abstand 13,10 cm. Da diese Seite stark von Vegetation umzingelt war, war die Befliegung nicht so gut möglich wie bei den vorderen Gebäudeseiten S1 und S2. Die Abweichung könnte somit durchaus wegen geringe Bilddaten zustande gekommen sein. Oder es liegt an den bewachsenen Wänden, wie soeben in dem obigen Absatz erläutert worden ist.

8.3.2 Äußere Genauigkeit

Nach der Bestimmung der Rotation, Translation und Skalierung der Punktwolke in Bezug auf die Referenzdaten, kann die äußere Genauigkeit bzw. die zweidimensionale Lage des 3D-Modells bestimmt werden. Im Folgenden wird diskutiert, wie gut die GNSS-Positionierung bei der Bildaufnahme mit der Drohne funktioniert hat.

Rotation

Die Rotation der Punktwolken in Bezug auf die Referenzdaten bewegt sich in dem Bereich $-0,268$ gon und $0,425$ gon, siehe Tabelle 7.3. Dies entspricht bei einer Wandlänge von 20 m im Schnitt eine Lageänderung von maximal 3 cm. Je kürzer die betroffene Strecke ist, desto geringer ist die Auswirkung der Lageänderung und desto schwieriger lässt sich die Rotation mit bloßem Auge erkennen. Da es sich bei den Schlossseiten um maximal 20 m Seitenlänge handelt, liegt die Auswirkung der Rotation auf diese Länge umgerechnet mit 3 cm im Rahmen der Messgenauigkeit der Referenzdaten, die teilweise eine Genauigkeit von bis zu 30 cm haben.

Translation

Die Translation hingegen ist in der Abbildung A.5 deutlich zu sehen. Die Verschiebung nach Osten ist dabei nicht so deutlich zu erkennen wie die Verschiebung nach Norden. Während die Eckpunkte $E1_{unten}$ und $E2_{unten}$ von dem Hauptgebäude des Schlosses nach Osten kaum nennenswerte 1 cm und 6 cm von den Referenzdaten abweichen (Tabelle 7.4), weichen die Eckpunkte E3, E4 und E5 im hinteren Schlosskomplex im Dezimeter-Bereich ab. Dies kann an der Streuung der Punktwolke erkannt werden, die, wie in der Tabelle 7.1 aufgelistet ist, bis zu 13,30 cm betragen kann. Für die Verschiebung nach Norden kann zwischen dem vorderen und dem hinteren Schlossteil kein Unterschied festgestellt werden. Die Werte aller Eckpunkte streuen zwischen 89 cm und 120 cm, siehe Tabelle 7.4. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass die Koordinatengenauigkeit der Gebäudeecken teilweise < 30 cm beträgt. Um die Werte der Translation zu minimieren, können Passpunkte in die Befliegung integriert werden Turner u. a. (2012). Diese ermöglichen eine Transformation des 3D-Modells in das gewünschte Koordinatensystem ETRS89 UTM Zone 32. Die Genauigkeit der Translation hängt von der Anzahl und der Aktualität der GCPs ab. Oniga u. a. (2018) untersucht in ihrem Artikel die Anzahl der Passpunkte, die für eine indirekte Georeferenzierung nötig sind, sodass die Genauigkeit des Ergebnisses im Verhältnis zu dem Messaufwand der Passpunkte steht. Das Fazit dieser Analyse besagt, dass 1 GCP pro 200 m^2 notwendig ist, um eine Translation im Zentimeterbereich zu erreichen. Des Weiteren beschäftigt

sich Dürr (2022) in ihrer Bachelorarbeit mit dem Einfluss der Passpunkte auf die Lagegenauigkeit. Dabei wurde unter anderem untersucht, ob die Lagegenauigkeit besser ist, wenn ein einziger Passpunkt oder wenn kein Passpunkt bei der Berechnung integriert wird. Bei der Verwendung eines Passpunktes wird außerdem unterschieden, ob es sich um einen bestehenden Passpunkt handelt, oder ob er neu eingemessen wurde. Der RMSEr-Wert bei einem bestehenden Passpunkt beträgt in der Lage ca. 55 cm während er bei einem neuen Passpunkt ca. 25 cm beträgt. Wird die Berechnung ohne einen Passpunkt durchgeführt, liegt auch hier der RMSEr-Wert bei ca. 25 cm in der Lage. Dennoch wäre am besten, wenn mehrere im Gebiet verstreute Passpunkte für die Rekonstruktion verwendet werden. Der RMSEr-Wert liegt bei neu eingemessenen Passpunkten bei ca. 5 cm.

Da es um Schloss Wolfstein wegen der dichten Vegetation nicht möglich gewesen wäre, genügend Passpunkte für die Befliegung einzumessen, ist es die beste Vorgehensweise, für diese Objektrekonstruktion keine Passpunkte zu verwenden. Die Verwendung eines neu gemessenen Passpunktes würde das Gesamtergebnis nur geringfügig verbessern, sodass der Aufwand, einen neuen Punkt zu messen und ihn in die Berechnung zu integrieren, nicht wirtschaftlich ist.

Skalierung

Die Skalierung konnte aufgrund fehlender Daten nicht mit verschiedenen Gebäudeseiten analysiert werden, sondern musste mit drei höhenvarianten Ausschnitten von der vorderen Schlosswand S2 berechnet werden. Da die Schlosswand nach oben schmaler wird, unterscheiden sich die Längen der Gebäudeseite in den verschiedenen Höhen und können somit problemlos verglichen werden. Für den Vergleich mit Referenzdaten konnte allerdings der Gebäudegrundriss von ALKIS nicht verwendet werden, da er, wie der Name schon sagt, nur die Form des Grundrisses bei ca. einem Meter Höhe darstellt. Für die Beschaffung der Koordinaten von der schrägen oberen Gebäudehälfte wurde deshalb eine tachymetrische Messung durchgeführt, mit der die Koordinaten der Eckpunkte E1 und E2 in verschiedenen Höhen ermittelt wurden. Die Differenz der Referenz- und Punktwolkenlängen variieren im 5 cm-7 cm-Bereich (siehe Tabelle 7.5). Die Abweichung beträgt 0,25 % von der Gesamtlänge. Dabei haben die Referenzdaten eine Koordinatengenauigkeit von 3 cm. Zudem muss die 1,4 cm große Unsicherheit wegen der schrägen Hauswand berücksichtigt werden. Nachdem die Eckpunktkoordinaten der Punktwolke durch zwei Zwischenschritte - Ausgleichen der Punktwolke und Konstruktion mit Geradenschnitt - ermittelt worden sind, ist diese Differenz durchaus akzeptabel.

Neben den höhenabhängigen Eckpunkten wurden die Höhe und die Breite von vier Fenstern tachymetrisch gemessen, damit diese ebenfalls als Vergleichsdaten für die Skalierung verwendet werden konnten. Sowohl die Referenzdaten als auch die Daten des 3D-Modells weisen Messwerte im 3 cm-Bereich auf. Die Messgenauigkeit der Tachymeterdaten liegt wiederum im 3 cm-Bereich und die Genauigkeit der Fenstermaße, die in 3DF Zephyr mithilfe eines Bearbeitungstools ermittelt wurden, hängt von der Sichtweise des Anwenders und der Auflösung des 3D-Modells ab. Da der Mittelwert der Differenzen, wie in Tabelle 7.6 zu sehen ist, bei 0 cm liegt, kann angenommen werden, dass sich die Abweichungen in der Messung aufheben und sich die Skalierung nahe 0 cm bewegt.

Mithilfe der drei Parameter Rotation, Translation und Skalierung ist belegt, dass die GNSS-Positionierung in der Lage mit einer Drohne im Meterbereich möglich ist.

Für eine zentimetergenaue Lagerichtigkeit müssten zusätzliche Methoden herangezogen werden. Zum einen besteht die Möglichkeit, um das Untersuchungsobjekt Passpunkte einzumessen, mit Zielmarken zu markieren und diese bei der Befliegung des Objektes zu fotografieren. Dabei muss darauf geachtet werden, dass auf dem Bild nicht nur der Passpunkt zu sehen ist, sondern auch das entsprechende Objekt, damit die Lage des Passpunktes zum Objekt erkenntlich ist.

Anhand der Passpunkte kann das Objekt im Postprocessing im Zentimeter-Bereich georeferenziert werden. Liegt das Untersuchungsobjekt allerdings inmitten einer dichten Vegetation oder in einem steilen und unzugänglichen Gelände, kann die Transformation mit Passpunkten nicht angewendet werden.

Als Alternative dazu kann die Transformation mit mindestens zwei Gebäudeecken durchgeführt werden. Bei der Berechnung der Transformation muss dann nur noch die Translation geschätzt werden, da die Rotation und die Skalierung, wie in dem Kapitel 7 berechnet worden ist, bekannt sind.

Padró u. a. (2019) hat in seinem Artikel zwei weitere Verfahren für eine Georeferenzierung analysiert. Neben der Verwendung der rohen GNSS-Daten können die Daten mit der ein- oder auch zwei-frequenzbandigen PPK-Methode für die Positionierung verwendet werden. Das Fazit des Artikels ist jedoch, dass die Verwendung von Passpunkten die besten Ergebnisse erzielt. Dabei sind sieben GCPs pro km² verwendet worden.

Wie genau die Transformation letztendlich sein muss ist vom Anwendungsfall abhängig. Wird das Modell im Zusammenhang mit Satellitendaten genutzt, ist die erzielte Transformationsgenauigkeit ausreichend, da Satellitendaten, wie z.B Daten von Sentinel-2 eine Bodenauflösung zwischen 10 m und 20 m aufweisen. Des Weiteren werden 3D-Modelle oft ohne räumlichen Bezug in einem lokalen Koordinatensystem dargestellt. Bei dieser Anwendung ist die Lage in der UTM-Abbildung belanglos. Wichtig ist dabei nur, dass die Maße innerhalb des Modells verwendbar sind. Diese Bedingung wird mit einer inneren Genauigkeit < 3 cm und einer Skalierung der Punktwolke um $-0,25\%$ der Referenzseitenlänge erfüllt.

Trotz verhältnismäßig kostengünstigen Mitteln kann die Photogrammetrie mit der Tachymetrie und dem Laserscanning mithalten. Zudem ist die Auswertung der Daten anhand einer automatisierten Software für Amateure im Bereich Vermessung möglich. Diese Tatsache bringt einen großen Vorteil der Photogrammetrie mit sich.

9 Zusammenfassung

Für die 3D-Modellierung von Schloss Wolfstein wurde wegen der dichten Vegetation und dem steilen Gelände die Technologie der Photogrammetrie herangezogen. Im Gegensatz zur Tachymetrie und Laserscanning kann mit einer Drohne das Objekt von der Luft gemessen werden, wenn der Zugang am Boden nicht möglich ist. Die Bildaufnahmen wurden mithilfe von zwei Drohnen erstellt und die Rekonstruktion wurde mit der Software 3DF Zephyr durchgeführt. Diese bietet nicht nur eine benutzerfreundliche Oberfläche, sondern ist wegen der zum Großteil automatisierten Bearbeitungsschritte auch für Amateure geeignet. Es müssen lediglich die für die Berechnung notwendigen Parameter angegeben werden, wobei die empfohlenen Voreinstellungen von dem Benutzer guten Gewissens übernommen werden können, um ein gutes Ergebnis zu erhalten. Nach mehreren Versuchen hat sich herausgestellt, dass die voreingestellten Parameter bei Standardmodellen die bestmöglichen Ergebnisse hervorbringen. Die Ergebnisse des Modells sind allerdings nur so gut wie die verwendeten Bilder. Die Bilder, die mit der DJI Mini 2 von dem Innenhof aufgenommen worden sind, konnten wegen zu geringer Bildüberlappung nur zum Teil und ungenau orientiert werden. Dadurch treten im 3D-Modell für den Innenhof vermehrt Effekte wie Löcher, verschwommene Kanten und falsche Texturen auf (vgl. A.2, A.1 und A.3). Des Weiteren entstehen für die Wände zum Teil 2 m^2 große Löcher, da diese Bereiche in den Bildern von im Vordergrund stehenden Objekten, wie Bäume, verdeckt sind und somit keine vollständigen Bilddaten von den Wänden für die Rekonstruktion zur Verfügung stehen. Wie die Ergebnisse der Integration eines weiteren Datensatzes vom Winter zeigen, ist es sinnvoll und empfehlenswert, eine zweite Befliegung trotz wirtschaftlichen Aufwands durchzuführen.

Um die innere Genauigkeit der von 3DF Zephyr bereitgestellten photogrammetrischen Algorithmen mit den gewählten Einstellungen bewerten zu können, wurde mithilfe der Ausgleichsrechnung eine Fehleranalyse durchgeführt. Dazu werden wegen mangelnder Datenqualität nur die Ausschnitte der Punktwolke verwendet, für die genügend Bildmaterial für die Rekonstruktion vorhanden war. Mit einer Standardabweichung von maximal 3 cm liegt diese im Genauigkeitsbereich der amtlichen Gebäudedaten, die teilweise eine Koordinatengenauigkeit von 30 cm haben. Damit auch die mit den GNSS-Daten erreichte äußere Lagegenauigkeit beurteilt werden kann, wurde die Rotation, die Translation und die Skalierung der Punktwolke in Bezug auf die amtlichen Referenzdaten herangezogen. Auch hier wurden Ausschnitte der Punktwolke verwendet, die eine ausreichend gute Qualität haben. Im Gegensatz zur Rotation, deren durchschnittlicher Wert $0,092\text{ gon}$ beträgt, weist die Translation auf eine $20,6\text{ cm}$ große Verschiebung nach Osten und eine $103,8\text{ cm}$ große Verschiebung nach Norden hin. Für die Berechnung der Skalierung wurden wegen mangelnder Alternativen drei höhenverschobene Ausschnitte der vorderen Schlossseite S2 verwendet. Im Durchschnitt ergibt sich, dass die aus der Punktwolke ermittelte Länge um $6,33\text{ cm}$ kürzer als die Länge der amtliche Gebäudeseite ist. Dies entspricht einer Abweichung von $0,25\%$.

Damit nicht nur bei der inneren Genauigkeit sondern auch bei der äußeren Genauigkeit der Punktwolke 3 cm hinsichtlich der Translation erreicht werden kann, müssten bei der Befliegung als Ergänzung zu GNSS um das Objekt verstreute Passpunkte verwendet werden, mit denen die Punktwolke im Postprocessing lagerichtig transformiert werden könnte. Ist die Verwendung von Passpunkten wegen der Vegetation oder wegen des steilen Geländes nicht möglich, würden zwei

Gebäudeeckpunkte für die Transformation und ein dezimetergenaues Ergebnis genügen. Da der Fokus dieser Arbeit auf der erreichbaren Genauigkeit einer passpunktfreien photogrammetrischen 3D-Rekonstruktion liegt, wurde die entsprechende Transformation nicht durchgeführt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es für einen Amateur in dem Bereich Vermessung möglich ist, mit einer Drohne und der Software 3DF Zephyr ein 3D-Modell zu erstellen. Vorausgesetzt es werden geeignete Bedingungen bei der Befliegung (Wetter, Überlappung, Oberflächenbeschaffenheit) berücksichtigt. Die erreichbare Genauigkeit ist mit einer Tachymeteraufnahme oder einem Laserscan vergleichbar. Für die Georeferenzierung ist allerdings eine Transformation mit mindestens zwei Gebäudeecken nötig, damit die Punktwolke mit den Koordinaten der amtlichen Referenzdaten übereinstimmt. Die Kosten für eine derartige Rekonstruktion sind im Vergleich zur Tachymetrie oder zum Laserscanning gering.

Literaturverzeichnis

- [3Dflow 2022a] 3DFLOW: *3DF Zephyr*. 3Dflow. 2022. – URL <https://www.3dflow.net/>
- [3Dflow 2022b] 3DFLOW: *3DF Zephyr 6.0 User Manual*. 3Dflow. 2022. – URL <https://www.3dflow.net/technology/documents/3df-zephyr-tutorials/>
- [Cadmics 2022] CADMIC: *BOS UAV*. 2022. – URL <http://www.cadmics.de/BOS.html>
- [Chen u. a. 2015] CHEN, Jun ; DOWMAN, Ian ; LI, Songnian ; LI, Zhilin ; MADDEN, Marguerite ; MILLS, Jon ; PAPANODIS, Nicolas ; ROTTENSTEINER, Franz ; SESTER, Monika ; TOTH, Charles ; TRINDER, John ; HEIPKE, Christian: Information from imagery: ISPRS scientific vision and research agenda. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (2015), September. – URL https://www.researchgate.net/profile/Jun-Chen-119/publication/284000904_Information_from_imagery_ISPRS_scientific_vision_and_research_agenda/links/56c4896b08ae7fd4625a292e/Information-from-imagery-ISPRS-scientific-vision-and-research-agenda.pdf
- [Delaunay 1934] DELAUNAY, Boris N.: Sur la Sphère Vide. In: *Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk* 7 (1934), 01, S. 793–800. – URL https://www.researchgate.net/publication/235267448_Sur_la_Sphere_Vide
- [DJI 2021a] DJI: *Technische Daten Mini 2*. DJI. 2021. – URL <https://www.dji.com/de/mini-2/specs>
- [DJI 2021b] DJI: *Technische Daten P4P*. 2021. – URL <https://www.dji.com/de/phantom-4-pro/info#specs>
- [Dürr 2022] DÜRR, Laura: *Einfluss verschiedener Passpunktkombinationen auf die äußere Genauigkeit der Aerotriangulation.*, Hochschule München für angewandte Wissenschaften, Diplomarbeit, April 2022
- [GDI 2022] GDI: *Geodateninfrastruktur*. Bayerische Staatsregierung. 2022. – URL <https://www.gdi.bayern.de/>
- [Geoportal Bayern 2022] GEOPORTAL BAYERN: *Geoportal Bayern*. Bayerische Staatsregierung. 2022. – URL <https://www.geoportal.bayern.de/geoportalbayern/suche/suche?0&q=DOP&f=true>
- [Gherardi und Fusiello 2010] GHERARDI, Riccardo ; FUSIELLO, Andrea: Practical Autocalibration. In: DANILIDIS, Kostas (Hrsg.) ; MARAGOS, Petros (Hrsg.) ; PARAGIOS, Nikos (Hrsg.): *Computer Vision – ECCV 2010*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2010, S. 790–801. – URL https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-15549-9_57. – ISBN 978-3-642-15549-9
- [Heipke 2017] HEIPKE, Christian (Hrsg.): *Photogrammetrie und Fernerkundung*. Springer Spektrum, 2017. – ISBN 978-3-662-47093-0

- [Kalacska u. a. 2020] KALACSKA, Margaret ; LUCANUS, Oliver ; ARROYO-MORA, J. P. ; LALIBERTÉ Étienne ; ELMER, Kathryn ; LEBLANC, George ; GROVES, Andrew: Accuracy of 3D Landscape Reconstruction without Ground Control Points Using Different UAS Platforms. In: *Drones* 4 (2020), März, S. 13. – URL <https://www.mdpi.com/2504-446X/4/2/13/htm>
- [Landeshauptstadt München 2022] LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN: *Digitaler Zwilling München*. München.Digital.Erleben. 2022. – URL <https://muenchen.digital/twin/>
- [Landkreis FRG 2022] LANDKREIS FRG: *Jagd Land Fluss - Museum im Schloss Wolfstein*. Jagd Land Fluss. 2022. – URL <https://www.jagd-land-fluss.de/>
- [LBA 2022] LBA: *Drohnen*. Luftfahrt-Bundesamt. 2022. – URL https://www.lba.de/DE/Drohnen/Allgemeine_Informationen/Allgemeine_Informationen_node.html
- [LDBV 2021] LDBV: *ALKIS*. Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung. 2021. – URL <https://www.ldbv.bayern.de/produkte/kataster/alkis.html>
- [Livieratos 2017] LIVIERATOS, Evangelos (Hrsg.): *Assessing the accuracy of photogrammetric reconstruction by comparison to laser scanned data*. Mátyás Gede, April 2017. – URL https://www.researchgate.net/publication/319670068_Assessing_the_accuracy_of_photogrammetric_reconstruction_by_comparison_to_laser_scanned_data. – ISBN 2459-3893
- [Lowe 1999] LOWE, David: Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision 2* (1999), September. – URL <https://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/iccv99.pdf>
- [Luhmann 2002] LUHMANN, Thomas (Hrsg.): *Nahbereichsphotogrammetrie in der Praxis (Beispiele und Problemlösungen)*. Wichmann, Oktober 2002. – ISBN 3-87907-385-6
- [Luhmann und Schumacher 2019] LUHMANN, Thomas (Hrsg.) ; SCHUMACHER, Christina (Hrsg.): *Photogrammetrie, Laserscanning, 3D Messtechnik*. Wichmann, April 2019. – ISBN 978-3-87907-660-4
- [MATLAB 2022] MATLAB: *MATLAB*. MathWorks. 2022. – URL <https://de.mathworks.com/products/matlab.html>
- [Neitzel 2010] NEITZEL, Frank: Ausgleichsrechnung–Modellbildung, Auswertung, Qualitätsbeurteilung. In: *Qualitätsmanagement geodätischer Mess- und Auswerteverfahren: Beiträge zum 93. DVW-Seminar am 10. und 11. Juni 2010 in Hannover*, URL https://www.researchgate.net/publication/228854878_Ausgleichsrechnung-Modellbildung_Auswertung_Qualitätsbeurteilung, 06 2010
- [Oniga u. a. 2018] ONIGA, Ersilia ; BREABAN, Ana ; FLORIAN, Stasescu: Determining the Optimum Number of Ground Control Points for Obtaining High Precision Results Based on UAS Images, URL https://www.researchgate.net/publication/323965828_Determining_the_Optimum_Number_of_Ground_Control_Points_for_Obtaining_High_Precision_Results_Based_on_UAS_Images, 03 2018, S. 5165
- [Padró u. a. 2019] PADRÓ, Joan-Cristian ; MUÑOZ, Francisco-Javier ; PLANAS, Jordi ; PONS, Xavier: Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms. In: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 75 (2019), 03, S. 130–140.

- URL https://www.researchgate.net/publication/328760652_Comparison_of_four_UAV_georeferencing_methods_for_environmental_monitoring_purposes_focusing_on_the_combined_use_with_airborne_and_satellite_remote_sensing_platforms
- [Pomaska 2016] POMASKA, Günter: *Bildbasierte 3D-Modellierung*. Wichmann, September 2016. – ISBN 978-3-87907-613-0
- [QGIS 2022] QGIS: *QGIS*. QGIS. 2022. – URL <https://www.qgis.org/de/site/>
- [Randles u. a. 2010] RANDLES, Bryan ; JONES, Brian ; WELCHER, Judson ; SZABO, Thomas ; ELLIOTT, David ; MACADAMS, Cameron: The Accuracy of Photogrammetry vs. Hands-on Measurement Techniques used in Accident Reconstruction SEA International (Veranst.), URL https://www.academia.edu/658995/The_Accuracy_of_Photogrammetry_vs_Hands_on_Measurement_Techniques_used_in_Accident_Reconstruction?from_sitemaps=true, Dezember 2010. – ISBN 0148-7191
- [Regierung von Niederbayern 1993] REGIERUNG VON NIEDERBAYERN: *Städtebauförderung in Niederbayern (Dokumentation 9) - Schloss Wolfstein in Freyung*. Broschüre. November 1993
- [Toldo 2013] TOLDO, Roberto: Towards automatic acquisition of high-level 3D models from images. In: *Verona: Universit 'a degli Studi di Verona* (2013). – URL https://www.3dflow.net/resources/PhDThesis_RToldo.pdf
- [Turner u. a. 2012] TURNER, Darren ; LUCIEER, Arko ; WATSON, Christopher: An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. In: *Remote Sensing* 4 (2012), 12, S. 1392–1410. – URL https://www.researchgate.net/publication/230563291_An_Automated_Technique_for_Generating_Georectified_Mosaics_from_Ultra-High_Resolution_Unmanned_Aerial_Vehicle_UAV_Imagery_Based_on_Structure_from_Motion_SfM_Point_Clouds
- [UROB 2015] UROB: *Unterschiede zwischen Multikoptern und Starrflüglern*. unmanned systems and robotics center. Mai 2015. – URL <https://u-rob.com/wissensartikel/technik/unterschiede-zwischen-multikoptern-und-starrflueglern/>
- [VUL 2021] VUL: *Analyse des deutschen Drohnenmarktes*. Verband unbemannte Luftfahrt. März 2021. – URL <https://www.verband-unbemannte-luftfahrt.de/analyse-des-deutschen-drohnenmarktes/>
- [VUL 2022] VUL: *Verband Unbemannte Luftfahrt*. Verband Unbemannte Luftfahrt. 2022. – URL <https://www.verband-unbemannte-luftfahrt.de/>
- [Wikipedia 2021] WIKIPEDIA: *CloudCompare*. Wikipedia. Juni 2021. – URL <https://en.wikipedia.org/wiki/CloudCompare>
- [Wikipedia 2022] WIKIPEDIA: *OpenStreetMap*. Wikipedia. 2022. – URL <https://de.wikipedia.org/wiki/OpenStreetMap>
- [Zhang u. a. 2019] ZHANG, He ; ALDANA JAGUE, Emilien ; CLAPUYT, François ; WILKEN, Florian ; VANACKER, Veerle ; OOST, Kristof: Evaluating the potential of post-processing kinematic (PPK) georeferencing for UAV-based structure-from-motion (SfM) photogrammetry and surface change detection. In: *Earth Surface Dynamics* 7 (2019), 09. – URL https://www.researchgate.net/publication/335543156_Evaluating_the_potential_

of_post-processing_kinematic_PPK_georeferencing_for_UAV-based_structure-
from-motion_SfM_photogrammetry_and_surface_change_detection

A 3D-Modell

A.1 Details



Abb. A.1: Löcher in dem 3D-Modell wegen fehlender Bilddaten.

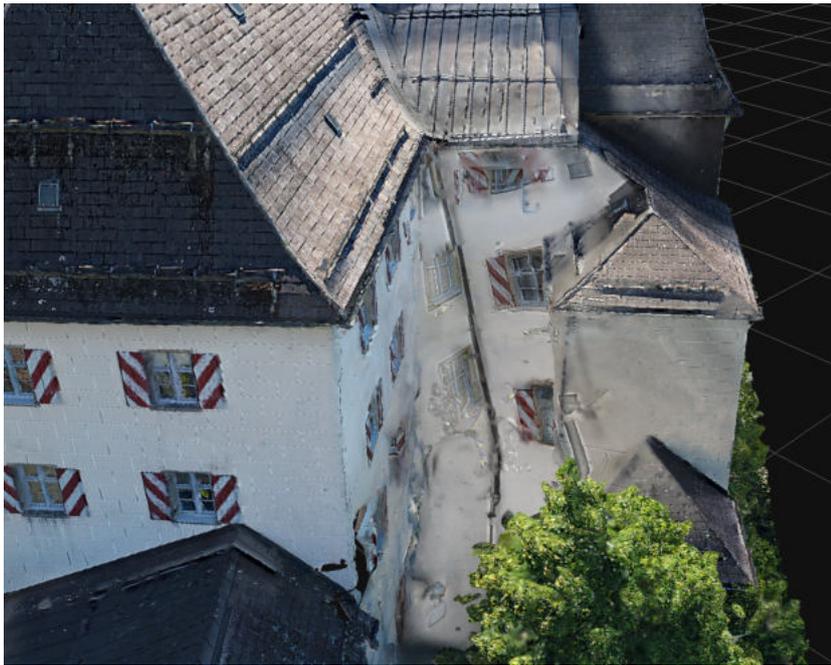


Abb. A.2: Falsch rekonstruierte Bilder führen zu einer verzerrten Textur.



Abb. A.3: Verschwommene Kanten in dem 3D-Modell wegen fehlender Bilddaten.

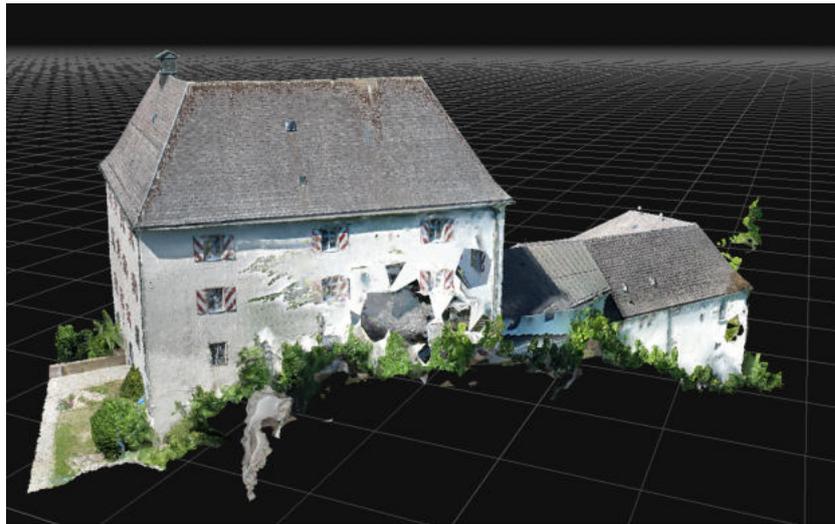


Abb. A.4: Durchlöcherter und verschwommener Nordostwand vom 3D-Modell.

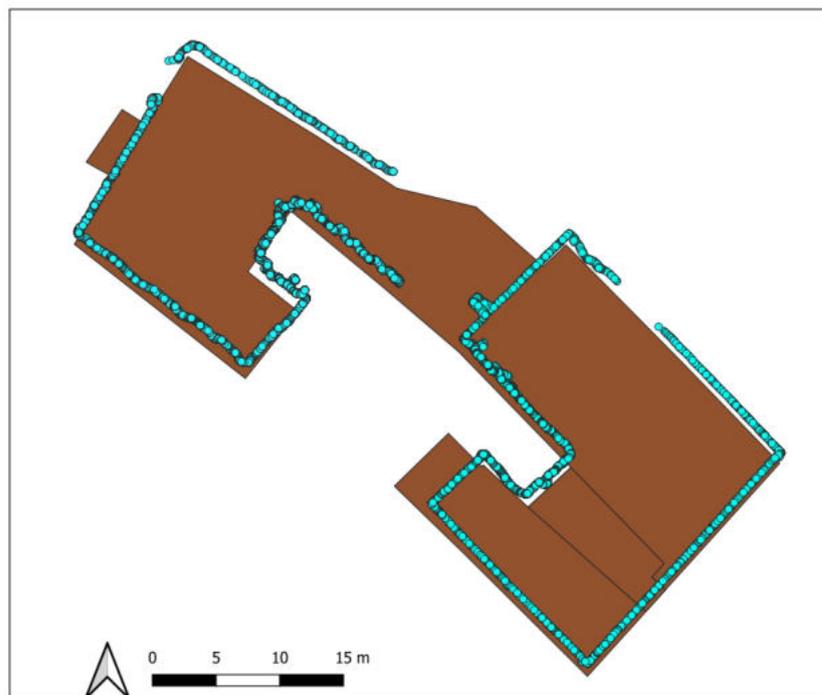


Abb. A.5: Darstellung des amtlichen Gebäudegrundriss, überlagert mit einem Querschnitt aus der Punktwolke.

A.2 3D-Modell nach der Rekonstruktion mit zwei verschiedenen Datensätzen (Sommer und Winter)



Abb. A.6: 3D-Modell von Schloss Wolfstein nach der Berechnung mit dem Datensatz aus der zweiten Befliegung im März 2022. Ansicht von Nordosten.



Abb. A.7: 3D-Modell von Schloss Wolfstein nach der Berechnung mit dem Datensatz aus der zweiten Befliegung im März 2022. Ansicht von Osten.



Abb. A.8: 3D-Modell von Schloss Wolfstein nach der Berechnung mit dem Datensatz aus der zweiten Befliegung im März 2022. Ansicht von oben in den Innenhof des hinteren Gebäudeteils.

Danksagung

Zuletzt möchte ich all denen DANKE sagen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders bedanke ich mich bei den beiden Drohnenpiloten für ihre zeitliche Flexibilität und ihre Ausdauer bei der Bildaufnahme. Zum einen danke ich meinem Bekannten, Patrick Lecocq für die Befliegung des Innenhofes und die unzähligen Versuche, die du für mich durchgeführt hast. Zum anderen bedanke ich mich bei dem BayernLab Vilshofen. Mein Ansprechpartner, Michael Endl, hat sich nicht nur um die Befliegung von Schloss Wolfstein, sondern auch um die Auswertesoftware 3DF Zephyr gekümmert. Ohne Euch beide, eure Drohnen und euer Vorwissen wäre das Projekt nicht möglich gewesen.

Ein großer Dank gilt dem ADBV Freyung. Als Vertragspartner für das duale Studium haben Kollegen wesentlich zur Themenfindung beigetragen. Neben der finanziellen Unterstützung hat die Bereitstellung von Fahrzeug, Werkzeug und Wissen meine Arbeit erheblich erleichtert.

Ein großer Dank gilt außerdem dem privaten Beratungsunternehmen und Softwarehaus 3Dflow, das mir während der gesamten Bearbeitungszeit die Lizenz für die kostenlose Version von 3DF Zephyr Education zur Verfügung gestellt hat. Diese Version beinhaltet alle entwickelten Funktionen der professionellen Version.

Außerdem ist meinem Betreuer an der Hochschule München, Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Schmitt, zu danken, ohne dessen aufmerksames Ohr, konstruktive Kritik und Verbesserungsvorschläge diese Arbeit nicht in dieser Form entstanden wäre. Zu guter Letzt danke ich meiner Familie und meinen Freunden, auf deren Hilfe und Verständnis ich jederzeit zählen kann. Danke für jegliche Unterstützung, die ich zum Anfertigen dieser Arbeit bekommen habe.