



Thomas Klinghan, BSc

Untersuchung verschiedener Methoden zur Erstellung von 3D-Modellen als Grundlage für UAV-Befliegungen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Geomatics Science

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Lienhart
Institut für Ingenieurgeodäsie und Messsysteme

Graz, Februar 2021

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

Ich möchte Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Lienhart für seine fachkundigen Ratschläge und seine gute Beratung während dieser Masterarbeit danken. Die Fachgespräche mit ihm haben mir immer wieder geholfen, meine Arbeit voranzubringen und mir Anregungen für die Fertigstellung gegeben.

Ein besonderer Dank gilt auch Dipl.-Ing. Gerald Fuxjäger, Geschäftsführender Gesellschafter (CEO) der ADP-Rinner GmbH, der es mir einerseits ermöglichte, die Abschlussarbeit mit modernen Messinstrumenten in die Praxis umzusetzen und andererseits mir die praktische Ingenieurgeodäsie während meiner Studienzeit näher brachte.

Bei Dipl.-Ing. Christoph Pöllabauer und Ing. Armin Pichler bedanke ich mich ebenfalls herzlichst für die gute Unterstützung bei der Durchführung und für die informationsreichen Gespräche während dieser Arbeit. Außerdem gebührt mein Dank Michael Kulmer für die Drohnenbefliegung des Referenzobjektes.

Für den ständigen Zugang zum EDV-Raum bedanke ich mich bei Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Konrad Rautz und Amtsrat Ing. Walter Krämer, und für die lehrreichen Informationen im Bereich der Photogrammetrie bedanke ich mich bei ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Viktor Kaufmann.

Meinen Unikollegen und Freunden möchte ich für die vielen unzähligen Diskussionen und Kooperationen während der Studienzeit und für die vielen gemeinsamen Erlebnisse in Graz danken.

Schließlich möchte ich meiner Mutter und meinen Schwestern danken, die mich während meiner gesamten Ausbildungszeit stets moralisch gestützt und gestärkt haben.

Kurzfassung

Bauwerke sind künstlich erstellte Verkehrswege, die einer kontinuierlichen Inspektion und Wartung unterzogen werden müssen. Eine permanente Kontrolle gewährleistet die Sicherheit eines Bauwerkes, ist aber mit einem ökonomischen und zeitlichen Aufwand verbunden. Eine effiziente, kostengünstige Inspektion in überschaubarer Zeit lässt sich durch eine Drohne bewerkstelligen. In diesem Zusammenhang können relevante Schäden durch eine Automatisierung von Inspektionssystemen detektiert und lokalisiert werden. Langfristiges Ziel ist es, ein vollautomatisches System zu entwickeln, das die Datenaufnahme und Datenauswertung umfasst. Das Fundament einer automatisierten Befliegung bildet dabei eine Trajektorie (Flugbahn), wobei die geometrische Genauigkeit von einem digitalen Zwilling im Bereich von $\pm 20 [cm]$ sein muss, damit die Drohne die Trajektorie befliegen und in zeitlichen Abständen photogrammetrische Informationen von der Objektoberfläche sammeln kann.

Diese Masterarbeit untersucht drei Methoden zur Erstellung von Punktwolken, um daraus die effizienteste Grundlage für ein 3D-Modell abzuleiten, das in weiterer Folge zur Trajektorienberechnung, somit zur späteren Befliegung mit einer Drohne, herangezogen werden kann. Die Datenerfassung von einem Referenzobjekt erfolgt durch (1) eine scannende Totalstation, (2) einen terrestrischen Laserscanner und (3) eine drohnengestützte photogrammetrische Bildaufnahme. Die ermittelten Daten werden in Bezug auf die geometrische Auflösung und den zeitlichen Aufwand der Datenerfassung und Datenauswertung analysiert. Zusätzlich werden von der Objektoberfläche Bilder erfasst und auf Bauwerksschäden (Abplatzungen, Aussinterung, Korrosion und Risse) untersucht sowie entsprechend klassifiziert. Das 3D-Modell wird mit den schadensklassifizierten Bildern texturiert und als digitaler Zwilling mit Bauwerksinformationen präsentiert.

Als Referenzobjekt für die gegenständliche Masterarbeit wurde die Landesbrücke in Takern I ausgewählt. Dafür wurde der südliche Objektbereich bis zum Bachbett der Raab aufgenommen. Die einzelnen Punktwolken wurden in vier Segmente geteilt, untersucht und diese Ergebnisse wurden zum Abschluss numerisch sowie graphisch dargestellt.

Die Ergebnisse von den drei Methoden erreichten eine geometrische Genauigkeit, die den genannten geometrischen und wirtschaftlichen Anforderung entsprachen. Die terrestrische Totalstation und der terrestrische Laserscanner konnten den Anforderungen auf Grund der niedrigen Objekthöhe und der einfachen Bauwerksgeometrie rasch gerecht werden. Die drohnenbasierte Methode erzielte durch die schnelle Befliegung vom Referenzobjekt eine zügige photogrammetrische Datenerfassung. Vertikale Flächen erzielten eine hohe geometrische Auflösung, und die horizontalen Flächen, z. B. die Tragwerksunterseiten, verursachten ein enormes Messrauschen aufgrund der Kameraposition an der Drohnenunterseite. In GNSS abgeschirmten Bereichen konnten keine photogrammetrischen Daten mit einer genauen äußeren Orientierung erfasst werden. Objektbereiche, die durch Bäume und Sträucher blockiert waren, konnten nicht befliegen werden.

Das Ergebnis dieser Arbeit ist, dass eine Kombination aus der terrestrischen und drohnenbasierten Datenaufnahme die optimalste Lösung für die Datengewinnung darstellt. Drohnenbereiche, wo es keine Satellitenverbindung gibt und die stark bewachsen und somit blockiert sind, können von terrestrischen Scannern aufgenommen werden. Flächen in großer Höhe und mit Satellitenverbindung können hingegen durch den Einsatz von Drohnen schnell und effizient ermittelt werden.

Abstract

Structures are man-made traffic routes that must be subject to continuous inspection and maintenance. A permanent inspection ensures the safety of a structure, but is associated with an economic and time expenditure. An efficient, cost-effective inspection in a manageable amount of time can be accomplished using a drone. In this context, relevant damage can be detected and localised by automating inspection systems. The long-term goal is to develop a fully automated system that includes data recording and data evaluation. The foundation of an automated aerial survey is a trajectory, where the geometric accuracy of a digital twin must be in the range of ± 20 [cm] so that the drone can fly the trajectory and collect photogrammetric information from the object surface at time intervals.

This master thesis examines three methods for the creation of point clouds in order to derive the most efficient basis for a 3D-model, which can subsequently be used for trajectory calculation, thus for subsequent aerial flight with a drone. The data acquisition from a reference object is performed by (1) a scanning total station, (2) a terrestrial laser scanner and (3) a drone-based photogrammetric image acquisition. The acquired data are analysed in terms of geometric resolution and the time required for data acquisition and data evaluation. In addition, images of the object surface are captured and examined for structural damage (spalling, sintering, corrosion and cracks) and classified accordingly. The 3D-model is textured with the damage-classified images and presented as a digital twin with building information.

The bridge in Takern I was chosen as a reference object for the master thesis. For this purpose, the southern area of the object up to the bed of the Raab stream was recorded. The individual point clouds were divided into four segments, analysed and the results were presented numerically and graphically.

The results of the three methods achieved a geometric accuracy that met the mentioned geometric and economic requirements. The terrestrial total station and the terrestrial laser scanner were able to meet the requirements quickly due to the low object height and the simple building geometry. The drone-based method achieved rapid photogrammetric data acquisition due to the fast flight from the reference object. Vertical surfaces achieved high geometric resolution, and the horizontal surfaces, e.g. the undersides of the structure, caused enormous measurement noise due to the camera position on the underside of the drone. In GNSS screened areas, photogrammetric data could not be acquired with an accurate external orientation. Object areas blocked by trees and bushes could not be flown.

The result of this work is that a combination of terrestrial and drone-based data acquisition is the most optimal solution for data acquisition. Drone areas where there is no satellite link and which are heavily overgrown and therefore blocked can be recorded by terrestrial scanners. Areas at high altitude and with satellite connectivity, on the other hand, can be identified quickly and efficiently through the use of drones.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	State of the Art	2
1.3	Drohnensteuerung	3
1.3.1	Manuelle Steuerung	4
1.3.2	Automatische Steuerung	5
1.4	Fragestellung und Zielsetzung	6
2	Rechtliche Grundlagen für die Drohnensteuerung in Österreich	9
2.1	Rechtliche Rahmenbedingungen bis 1.7.2020	9
2.2	Rechtliche Rahmenbedingungen ab 1.7.2020	10
3	Theoretische Grundlagen für die Erstellung von 3D-Modellen	12
3.1	Terrestrische Methoden zur Datenerfassung	12
3.1.1	Kommerzielle Datenerfassung	12
3.1.2	Datenerfassung mit einer scannenden Totalstation	17
3.1.3	Datenerfassung mit einem terrestrischen Laserscanner	18
3.2	Drohngestützte Methoden zur Datenerfassung	19
3.2.1	Datenerfassung mit einer photogrammetrischen Bildaufnahme	20
3.2.2	Datenerfassung mit einem LiDAR-System	23
3.3	Georeferenzierte Punktwolke	24
3.3.1	Direkte Georeferenzierung	24
3.3.2	Indirekte Georeferenzierung	26
3.4	Analyse von verschiedenen Punktwolken	27
3.5	Semantische Segmentierung von Schadensklassen	29
4	Praktische Umsetzung zur Datenaufnahme	33
4.1	Referenzobjekt: Landesbrücke in Takern I	33
4.2	Triangulation von Messpunkten mit einer Satzmessung	33
4.3	Datenerfassung und Verarbeitung der terrestrischen Methoden	34
4.3.1	Scannenden Totalstation - Leica Nova MS60	34
4.3.1.1	Terrestrische Datenaufnahme	34
4.3.1.2	Datenauswertung mit Leica Infinity	35
4.3.1.3	Ergebnisdarstellung der Leica Nova MS60 Punktwolke	35
4.3.2	Terrestrischen Laserscanner - Faro Focus 3D X330	37
4.3.2.1	Terrestrische Datenaufnahme	37
4.3.2.2	Datenauswertung mit Faro Scene	38
4.3.2.3	Ergebnisdarstellung der Faro Focus 3D X330 Punktwolke	39
4.4	Datenerfassung und Verarbeitung der photogrammetrischen Methode	41
4.4.1	Photogrammetrische Bildaufnahme-DJI Phantom 4 RTK	41
4.4.1.1	Photogrammetrischen Bildaufnahmen	41
4.4.1.2	Datenauswertung mit Agisoft Metashape Professional	42
4.4.1.3	Ergebnisdarstellung der DJI Phantom 4 RTK Punktwolke	46
4.5	Analyse der Punktwolken	47
4.5.1	Bearbeitung und Filtern der Punktwolken	47

4.5.2	Punktwolkenvergleich	47
4.5.3	Segmentierung der Punktwolke in vier Profile	49
4.5.4	Überprüfung auf Messfehler	50
4.5.5	Graphische und numerische Ergebnisse aus der Datenanalyse	50
4.5.5.1	Datenanalyse von dem Vergleich der Leica Nova MS60 Referenzpunkt- wolke mit der Faro Fokus 3D X330 Vergleichspunktwolke von dem Brückenprofil 2	50
4.5.5.2	Datenanalyse von dem Vergleich der Leica Nova MS60 Referenzpunkt- wolke mit der DJI Phantom 4 RTK 3D Vergleichspunktwolke von dem Brückenprofil 2	54
4.6	Zeitliche Analyse für die angewandten Methoden	58
4.7	Erstellung der georeferenzierten 3D-Modelle	60
4.8	Detektion und Klassifizierung von Bauwerksschäden	62
4.9	Fototextur am Referenzobjekt	65
5	Conclusion	68
5.1	Fazit der praktischen Durchführung	68
5.2	Ziel der ADP-Rinner GmbH und Struc-Inspect GmbH	72
5.3	Ausblicke der ADP-Rinner ZT GmbH für eine automatisierte Drohnensteuerung	73
	Literaturverzeichnis	77
	Abbildungsverzeichnis	85
	Tabellenverzeichnis	86
A	Anhang	87
A.1	Verwendete Software	87
A.2	Technische Daten der Instrumente	87
A.2.1	Leica Noca MS60	87
A.2.2	Faro Focus 3D X330	88
A.2.3	DJI Phantom 4 RTK	88
A.2.4	Sony Alpha 7R III	90
A.3	Ergebnisse der Koordinaten	90
A.3.1	Koordinaten der einzelnen Stationierungen	91
A.3.2	Koordinaten von den Passpunkte	91
A.3.3	Koordinaten der Marker für den Faro Focus 3D Scan	92
A.3.4	Koordinaten der Marker für die photogrammetrische Auswertung mit Agisoft	92
A.4	Ergebnisse aus dem Punktwolkenvergleich der Brückenprofile	93
A.4.1	Faro Focus 3D Vergleichsergebnisse	93
A.4.1.1	Brückenprofil 1	93
A.4.1.2	Brückenprofil 3	96
A.4.1.3	Brückenprofil 4	99
A.4.2	DJI Phnatom 4 RTK Vergleichsergebnisse	102
A.4.2.1	Brückenprofil 1	102
A.4.2.2	Brückenprofil 3	105
A.4.2.3	Brückenprofil 4	108

Abkürzungen

AT Aerotriangulation

BIG Brückeninspektionsgerät

BIM Building Information Modeling

BMN Österreichische Bundesmeldenetz

C2C Cloud-to-Cloud-Vergleich

C2M Cloud-to-Mesh-Vergleich

DGM Digitales Geländemodell

DOM Digitales Oberflächenmodell

DXF Drawing Interchange File Format

EASA Europäische Agentur für Flugsicherheit

EU Europäische Union

FPV First Person View

GIS Geographische Informationssysteme

GNSS Global Navigation Satellite System

GSD Ground Sampling Distance

IMU Inertial Measurement Unit

KI Künstliche Intelligenz

KNN Künstliche Neuronale Netzwerke

LBTH Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitshinweis

LFG Luftfahrtgesetz

LiDAR Light Detection and Ranging

LVR Luftverkehrsregeln

M2M Mesh-to-Mesh-Vergleich

M3C2M Multiscale-Model-to-Model-Cloud-Vergleich

MGI Militärgeographisches Institut

MS Multistation

MST Micro System Technology

ÖAeCVO Österreichischen Aero Club-Zuständigkeitsverordnung

RGB Rot Grün Blau Signal

RMS Root Mean Square
RTK Real Time Kinematic
SfM Structure from Motion
SLAM Simultaneous Localization and Mapping
SOCS Scanner Own Coordinate System
TIFF Tagged Image File Format
TIN Triangulated Irregular Network
TLS Terrestrischer Laserscanner
TS Totalstation
UAS Unmanned Aerial System
UAV Unmanned Aerial Vehicle
VTOL Vertical Take-Off and Landing

1 Einleitung

1.1 Motivation

Moderne Verkehrswege basieren auf einer Vielzahl an Kunstbauten wie z. B. Brücken, Tunnels, Stützwänden und Hangsicherungen. Diese Kunstbauten oder auch als Bauwerke bezeichnet, sind zunehmend stärkeren Umwelteinflüssen und Schädigungsmechanismen ausgesetzt und müssen daher sorgfältiger überwacht werden. Um im Sinne der Nachhaltigkeit der länger werdenden Nutzungsdauer gerecht zu werden, sollten Erhaltungsmaßnahmen in Zukunft noch sinnvoller geplant werden. Eine kontinuierliche Inspektion und Wartung dieser Bauwerke ist somit unerlässlich für die Sicherung der Infrastruktur, um Schäden an Konstruktionen frühzeitig zu erkennen und um sinnvolle Sanierungsmaßnahmen zeitgerecht einzuleiten [Eich, 2019b][Pöllabauer, 2020].

Die Inspektion von Bestandsbauwerken ist bekanntermaßen technisch, logistisch sowie personell sehr aufwendig. Die Prüfung schwer zugänglicher Bauwerke bzw. Bauwerksteilen erfordert den Einsatz von Großgeräten, Gerüsten, Messtechniken und speziell geschultem Personal, wie beispielhaft in der Abbildung 1.1 (a) und 1.1 (b) der Einsatz eines Brückinspektionsgerätes (BIG) an der Europabrücke in Tirol dargestellt ist. Darüber hinaus bestehen aufgrund komplexer Bauwerksgeometrien [Eich, 2019a] und damit verbundenen erschwerten Zugänglichkeiten für das eingesetzte Personal enorme körperliche Einsatzrisiken.



(a) Zwei Brückeninspektionsgeräte im Einsatz an der Europabrücke [Ranalter, 2018].



(b) Schwenkbare Positionierung von einem Brückeninspektionsgerät [Ranalter, 2018].

Abbildung 1.1: Einsatz von einem Brückeninspektionergerät an der Europabrücke der österreichischen Brenner Autobahn A13 in Tirol.

In [Pöllabauer, 2020] wird definiert, dass sich eine vollständige Inspektion von Brücken im Straßen- und Eisenbahnbereich innerhalb kurzer Zeit durch eine Drohne (engl. *Drones*, *Unmanned Aerial System* „UAS“ oder *Unmanned Aerial Vehical* „UAV“) bewerkstelligen lässt.

Durch eine zunehmende Automatisierung in der Datenerfassung und Datenauswertung von Inspektionssystemen, kann ein vollautomatisches System erreicht werden, mit dem Ziel, eine kostengünstige und rasche Inspektion zu erreichen.

Zur Umsetzung einer vollautomatischen Befliegung einer Trajektorie und Datenerfassung mittels Drohne, muss ein georeferenziertes 3D-Modell des Objektes vorhanden sein. Ein georeferenziertes 3D-Modell ist eine Version von einem digitalen Zwilling. Von diesem Hintergrund aus, wird am Beispiel des Referenzobjektes der Landesbrücke in Tackern I (Kapitel 4.1) eine Analyse durchgeführt, um im Bereich Qualität und Zeitaufwand die bestmögliche Methode zu ermitteln, ein

georeferenziertes 3D-Modell von dem Bauwerk zu gewährleisten.

1.2 State of the Art

Der Einsatz von Drohnen hat im 21. Jahrhundert in zahlreichen Bereichen an immenser Bedeutung gewonnen, wobei schwer bzw. nicht zugängliche Orte von Drohnen derzeit verstärkt „erobert“ werden. Aktuell werden Drohnen für Such- und Rettungseinsätze, für zivile Anwendungen (Polizei und Feuerwehr) [Morgenthal u. a., 2015], als „Paketzusteller“ in abgelegenen Gebieten [Strohmayr, 2017] oder zu Evaluierung der Beschaffenheit der Pflanzenwelt (Flora) [Grenzdörffer, 2019] eingesetzt.

Durch die allgemeine Anwendung von Drohnen werden in der Regel Projektkosten gesenkt und ein Gewinn durch einen hohen Kostendeckungsgrad erzielt. In den Bereichen Technik und Logistik werden konkrete Konzepte zur Effizienzsteigerung durch Drohnen entwickelt.

Im Vermessungswesen bieten Drohnen ein enormes Potenzial in der Kartierung von großen Flächen, in der Erstellung von digitalen Geländemodellen (DGM) oder digitalen Oberflächenmodellen (DOM) und in der Bestandsaufnahme von Gletschern und polaren Eisflächen [Strohmayr, 2017].

Im Bauwesen können Objekte auf Basis von Light Detection and Ranging (LiDAR) Daten und detaillierten Bild- und Videodaten (z. B. Schadensermittlungen von Bauwerken) besser analysiert werden. Drohnen werden mit photogrammetrischen oder LiDAR Aufnahmesystemen ausgestattet um georeferenzierte dreidimensionale Bauwerksinformationen zu gewinnen. Die relevanten Bauwerksschäden werden durch bildgebende Sensoren (Rot Grün Blau (RGB) Signal- und Hyperspektralkamera) an Board der Drohne detektiert. Zur Bekundung von Feuchteschäden [Kersten u. a., 2018] und der Feststellung von Leckagen (i. e. undichte Stellen) [Morgenthal u. a. 2015, S. 20] dienen drohnengestützte Aufnahmen von Infrarot- und Thermografiesystemen (z. B. Wärmebildkamere).

Bei einer Consumer-Drohne (z. B. DJI Phantom 4 RTK (Real Time Kinematic)) erfolgt die Auslösung von Bild- und Videodaten über die Steuereinheit von dem Piloten, was für einen einzelnen Bediener bei der Inspektion von komplexen Bauwerksgeometrien (Brücke mit Pfeiler, moderne Tragwerkskonstruktionen, Einbauten, etc.) eine große Herausforderung ist. Die gleichzeitige Steuerung der Drohne in drei Dimensionen und die Auswahl und Auslösung von Bildern mit gleichbleibender Qualität, einheitliche Überlappung und konstante Aufnahmedichte ist nur schwer über einen längeren Zeitraum zu erreichen, wie in [Pöllabauer, 2020] beschrieben ist.

Die Trennung der Drohnen- und der Kamerasteuerung durch Piloten und Operator führt zu einer besseren Qualität in der Datenaufnahme und in der Flugstabilisierung. In der Abbildung 1.2 (??) ist der Drohnenpilot mit dem Operator für die Kamera im Einsatz einer Brückeninspektion abgebildet.



(a) Manuelle Befliegung mit dem Drohnenpilot im Hintergrund und dem Operator im Vordergrund.



(b) Prototyp-Drohne mit obenliegender Kameraposition aus [Pöllabauer, 2020].

Abbildung 1.2: Brückeninspektion durch eine manuelle Befliegung der Feldaisttalbrücke-Mühlviertler Schnellstraße S10 in Oberösterreich.

Die Steuerung und die Navigation einer Drohne kann manuell durch einen Piloten oder automatisch durch ein globales Navigationssatellitensystem (GNSS) erfolgen. Die automatische Flugsteuerung nutzt die unterschiedlichen Satellitensysteme (GNSS) für den Soll-/Ist-Abgleich zwischen der vordefinierten Flugroute und der aktuellen Flugdaten [Dieckert 2018, S. 203]. Die Satellitennavigation ermöglicht automatische Flüge innerhalb und außerhalb der Sichtweite des Piloten. Die automatische Flugsteuerung mit vordefinierten festgelegten Datenaufnahmepositionen hat sich in den letzten Jahren vermehrt in der offenen Landfläche als zuverlässig erwiesen.

Das Fliegen mit Satellitennavigation in GNSS-abgeschirmten und -schwachen Bereichen, wie z. B. Gebäudefassaden oder Brückenunterseiten, hat seine Grenzen und ist mit dem aktuellen verfügbaren technischen Wissensstand noch nicht umsetzbar. Jedoch sollte beim Fliegen auf die Satellitenunterstützung für Befehle wie z. B. Position Hold nicht verzichtet werden.

State of the Art für Flugrouten in der Nähe von Bauwerken ist die manuelle Steuerung und Navigation der Drohne durch einen Piloten.

1.3 Drohnensteuerung

Modellfluggeräte werden durch eine Steuereinheit manövriert, die primär eine manuelle Kontrolle gewährleistet. Neben der manuellen Steuerung kann der Drohnenflug auch in einem semiautomatischen oder automatischen Modus gesteuert werden [Eisenbeiss und Sauerbier, 2011]. In den letzten Jahren geht der Trend bei der Datenerfassung mehr in Richtung von autonomen Flügen, schreibt [Eisenbeiß, 2009] in seiner Dissertation. Spezielle Systeme können jedoch nur manuell gesteuert werden und in einigen Gebieten sind autonome Flüge aus Sicherheitsgründen nicht erlaubt.

Der manuelle Drohnenflug auf Sicht durch einen Freizeitpiloten ist technisch einfacher umzusetzen als der automatische Drohnenflug durch einen Drohnenpiloten, der den Flug vom Start bis zur Landung innerhalb und außerhalb des sichtbaren Bereiches kontrolliert und überwacht [Dieckert 2018, S. 101].

1.3.1 Manuelle Steuerung

Sport- und Freizeitbereich

In [Dieckert 2018, S. 101] wird beschrieben, dass der traditionelle Drohnenpilot den Drohnenflug für Hobby und Freizeit über die Steuerhebel und Schalter der Fernsteuerung steuert. Durch Sichtkontakt wird manuell somit das Start- und Landemanöver ausgeführt, Kurven und Kunstflugfiguren geflogen und Windböen ausgeglichen.

Gewerblicher Bereich

Im gewerblichen Bereich sind manuell gesteuerten Drohnen mit zusätzlichen Sensor ausgestattet um eine stabilisierende Flugsteuerung zu gewährleisten und eine Kollision mit dem Bauwerk zu vermeiden.

Die manuelle Befliegung ist für den Drohnenpiloten eine große Herausforderung, da die gleichzeitige Steuerung der Drohne und die Steuerung der Kamera für die Datenaufnahme über einen längeren Zeitraum mit gleichbleibender hoher Qualität schwer zu erreichen ist. Durch den Einsatz eines Operators wird die Steuerung der Kamera von der Steuerung der Drohne getrennt. In diesem Fall kontrolliert der Pilot das Flugverhalten der Drohne über die Steuereinheit (Abbildung 1.3 (a)), während der Operator mit der Bedienungseinheit (Abbildung 1.3 (b)) die Onboard-Kamera kontrolliert, ausrichtet und die Bildaufnahme manuell auslöst [Pöllabauer, 2020].



(a) Steuerelement für den Piloten



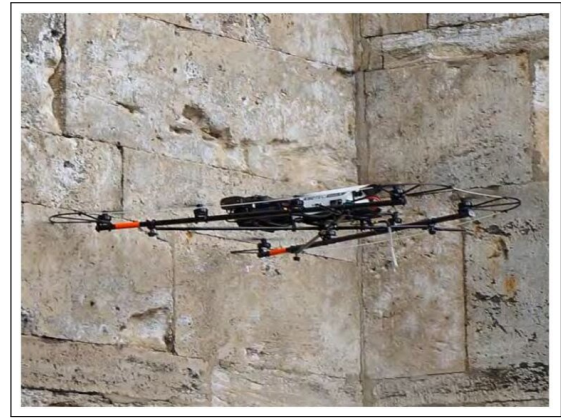
(b) Steuerelement für den Operator

Abbildung 1.3: Fernsteuerung für die Drohne und die Onboard-Kamera.

Um eine Kollision mit dem Bauwerk zu vermeiden, können die Rotoren des Flugkörpers mit einem mechanischem Anprallschutz (Abbildung 1.4 (a), 1.4 (b)) ausgestattet werden. Durch elektronische Abstandssensoren kann ein virtueller Schutzring um das Fluggerät erzeugt werden.



(a) Mechanischer Schutzring



(b) Praktische Umsetzung des Schutzringes

Abbildung 1.4: Mechanischer Anprallschutzmechanismen [Morgenthal u. a., 2015].

1.3.2 Automatische Steuerung

Eine automatische Befliegung einer vordefinierten Flugroute mit Hilfe von Navigationsdaten ist wertvoll, da es für den Piloten schwierig ist, eine Solltrajektorie vom Boden aus kontinuierlich zu befliegen.

Wie in [Witte 2011, S. 388] beschrieben wird, erfolgt der Start und die Landung eines Fluges in der Regel manuell. Der Pilot manövriert die Drohne in die ungefähre Startposition und durch Aufschaltung der Autopilotensoftware werden die Wegpunkte der Solltrajektorie autonom abgeflogen und in regelmäßigen Abständen erfolgt die Datenaufnahme.

Die Sensoren für die automatische Navigation bestehen aus

- einem Barometer für eine indirekte Höhenmessung,
- einem Magnetometer für die Richtungsbestimmung (drei Achsen),
- GNSS-Empfänger für die absolute Positionsbestimmung und
- einer Inertialmesseinheit (IMU) zur Bestimmung der translatorischen und rotatorischen Bewegung in drei Richtungen (Accelerometer und Gyroskop)

und weiteren elektronischen Komponenten. Die Sensoren für die Kursbestimmung und die Steuerungsmodule für die Drohnen werden in der Mikrosystemtechnik (MST, Micro System Technology) entwickelt, um eine Gewichtsreduzierung bezüglich der stark begrenzten Nutzlast (Kapitel 2) von Drohnen zu ermöglichen. Ein Zusammenspiel der einzelnen Sensoren und Module ermöglichen eine kontrollierte Steuerung von Modellfluggeräten, die auch von Amateurpiloten durchführbar ist. Typische Steuerungsmanöver (Position Hold, Coming Home, Follow Me und Way Point Navigation) und der (semi-) autonome Flug von vordefinierten Trajektorien sind in der Praxis dadurch einfacher umsetzbar.

Für das Flugverhalten (v. a. Flugstabilisierung und Verhinderung des Abdriftens durch Wind und Turbulenzen) der Drohne und um die Drohne entlang einer Solltrajektorie navigieren zu können, ist die aktuelle Position der Drohne essentiell, was durch GNSS-Sensoren in freien Flächen ermöglicht wird. In der näheren Umgebung von Bauwerken oder unter Bauwerken ist GNSS nicht verfügbar, sodass die automatische Steuerung der Drohne erschwert wird.

1.4 Fragestellung und Zielsetzung

Eine Bauwerksinspektion durch eine automatische Flugroute in einem GNSS-abgeschirmten Bereich setzt ein georeferenziertes 3D-Modell von dem Bauwerk voraus. Ein georeferenziertes 3D-Modell wird als digitaler Zwilling bezeichnet. Ein digitaler Zwilling dient als Kopplung zwischen der realen und virtuellen Welt und wird in den unterschiedlichen Bauwerksbranchen verwendet. In der Abbildung 1.5 werden die Methoden dargestellt durch die ein digitaler Zwilling von einem Bauobjekt erstellt werden kann.

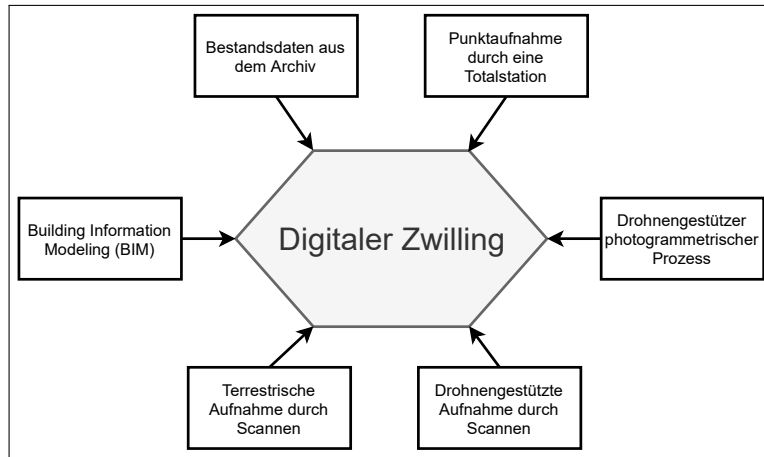


Abbildung 1.5: Methoden zur Erstellung von einem digitalen Zwilling, der in vielen Arbeitsbereichen unterschiedliche genutzt wird.

Durch einen digitalen Zwilling von einem Bauwerk sind die Daten digital und online für diverse Nutzer verfügbar. Diese Daten können von Drohnenpiloten zur Erstellung einer Flugtrajektorie verwendet werden. Die Drohne befliegt die Trajektorie und sammelt in vordefinierten Zeitabständen photogrammetrische Daten von der Bauwerksoberfläche. Durch eine Klassifizierung von Bauwerksschäden können diese Daten dem digitalen Zwilling hinzugefügt werden und von Nutzer aus anderen Prozessen zugänglich gemacht werden. In der Abbildung 1.6 wird der Gesamtprozess graphisch dargestellt.

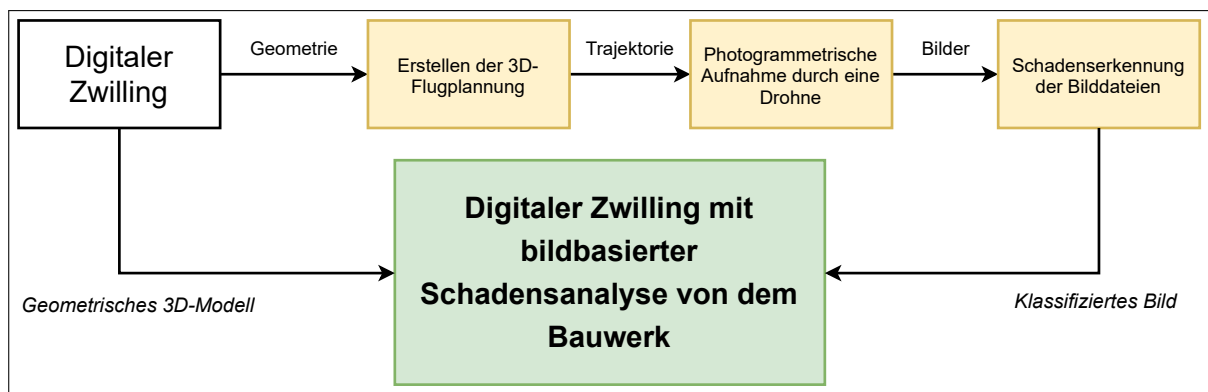


Abbildung 1.6: Flussdiagramm von dem gesamten Prozess zur Erstellung eines digitalen Zwillings mit einer Textur aus Bildern mit klassifizierten Bauwerksschäden.

Das Ziel der Masterarbeit ist es, auf Basis der Scan- und Messverfahren drei georeferenzierte Punktwolken von einem Referenzobjekt zu erstellen und hinsichtlich der Genauigkeit, der Zuverlässigkeit, dem Handling und dem Zeitaufwand zu vergleichen und zu analysieren. Als Referenzobjekt dient

die Landesbrücke in Takern I im Bezirk Weiz (Kapitel 4.1).

In der Abbildung 1.7 ist dargestellt, dass konkret zwei terrestrische Methoden und eine drohnengestützte Methode zur Datenerfassung genutzt werden, um von dem Referenzobjekt drei georeferenzierte Punktwolken zu erhalten.

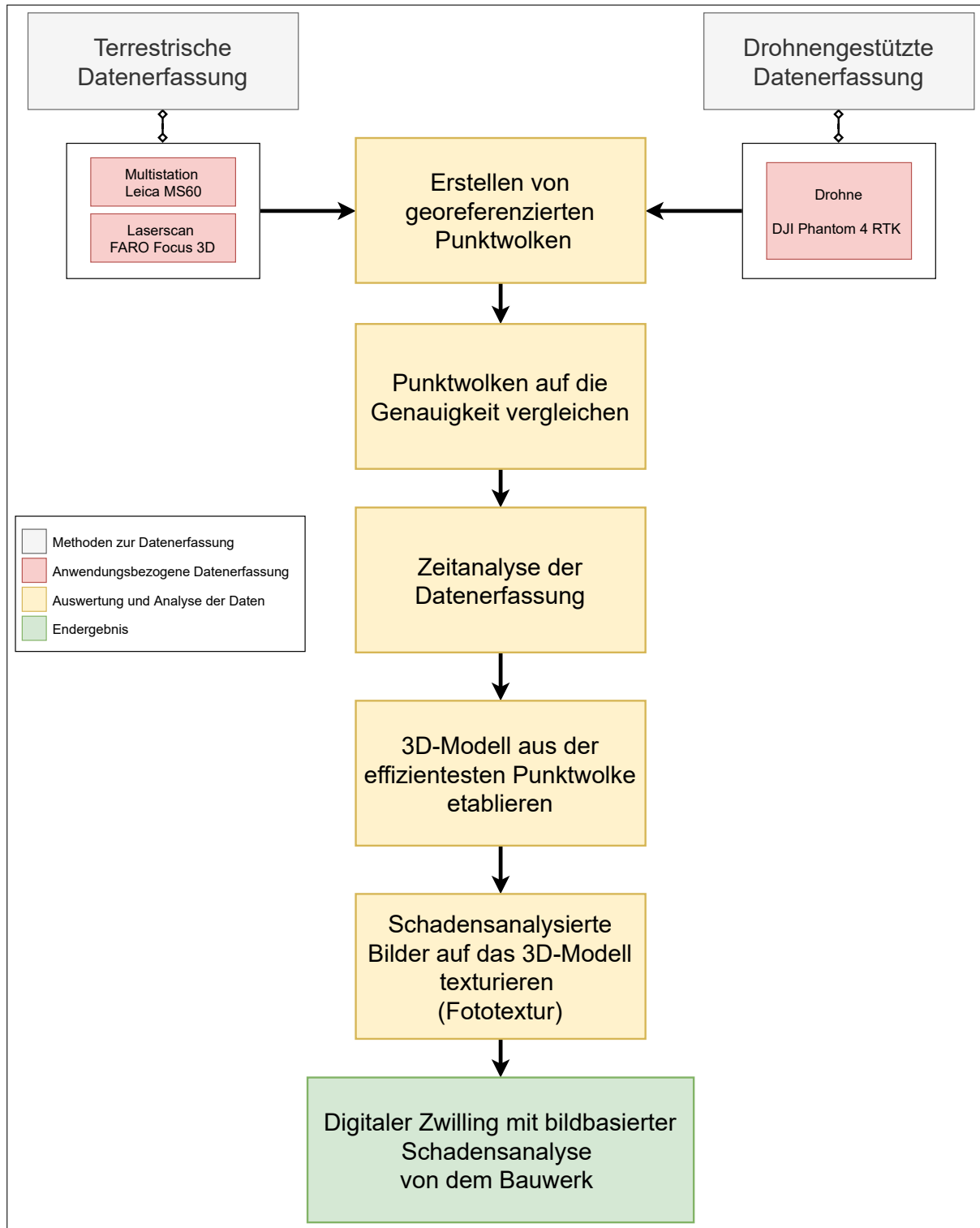


Abbildung 1.7: Flussdiagramm der einzelnen Schritte von der Datenerfassung über die Datenauswertung bis zum Endprodukt der Masterarbeit.

Für die terrestrische Datenerfassung ist einerseits eine Multistation (MS) aus dem Unternehmen Leica Geosystems AG und andererseits ein terrestrischer Laserscanner (TLS) von dem Industrieunternehmen Faro Technologies Inc. im Einsatz. Die bildbasierte Datenaufnahme erfolgt durch den Flug einer Drohne der Marke DJI aus dem Unternehmen Da-Jiang Innovations Science and Technology Co.

Mit der Leica MS60 Multistation wird eine Referenzpunktvolke erstellt, die mit den aufgenommenen Vergleichspunktvolken von dem Faro Focus 3D und der DJI Phantom 4 RTK verglichen wird. Alle drei Punktvolken werden durch unterschiedliche Methoden vor Ort lokalisiert und in weiterer Folge in ein georeferenziertes System transformiert.

Die Vergleichspunktvolken werden mit der Referenzpunktvolke auf Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Vollständigkeit und Handling der Aufnahme verglichen und analysiert. Für den Vergleich der Punktvolken dient die Open Source Software „Cloud Compare“.

Die Aufnahme- und Auswertedauer der einzelnen Aufnahmemethoden werden untersucht und dienen neben der Punktvolkenanalyse als eine zusätzlichen Entscheidungsgrundlage für die sinnvollste Methode eine Punktvolkenaufnahme durchzuführen und in ein 3D-Modell zu verarbeiten.

Von dem Referenzobjekt werden mit einer Spiegelreflexkamera hochauflösende Bilder händisch aufgenommen. Diese Bilddaten werden auf Basis einer künstlichen Intelligenz (KI) analysiert und auf optische Bauwerksschäden untersucht, welche in den einzelnen Bildern markiert und klassifiziert werden. Durch die Fototextur werden die schadensklassifizierten Bilder auf das georeferenzierte 3D-Modell texturiert. Das Ergebnis ist ein digitaler Zwilling mit einer bildbasierten Schadensklassifizierung von dem Bauwerk.

Den Abschluss der gegenwärtigen Arbeit bildet ein kurzer Ausblick über den aktuellsten Forschungsstand und der zukünftigen Entwicklungen von dem Projekt „Hyperbridge“ der ADP-Rinner ZT GmbH (Kapitel 5.3).

2 Rechtliche Grundlagen für die Drohnensteuerung in Österreich

2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen bis 1.7.2020

Die rechtlichen Rahmenbedingungen für den Betrieb bzw. die Steuerung von Drohnen, sog. „Flugmodelle“ oder „unbemannte Luftfahrzeuge“ (engl. UAV oder UAS), finden sich in 24cff §§ Luftfahrtgesetz (Luftfahrtgesetz („LFG“), BGBl. Nr. 253/1957 i.d.F.BGBl. I Nr. 92/117) sowie in den Luftverkehrsregeln 2014 („LVR 2014“- *Verordnung des Bundesministers für Verkehr, Innovation und Technologie sowie des Bundesministers für Landesverteidigung und Sport über die Regelung des Luftverkehrs 2014 (Luftverkehrsregeln 2014, „LVR 2014“), BGBl. II Nr. 297/2014 i.d.F. BGBl. II Nr. 357/2018.*), im Lufttüchtigkeits-Hinweis des Aero Club [Österreichischer Aero ClubFAA, 01 Dezember 2016] und im Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitshinweis Nr. 67 („LBTH 67“) der Austro Control [Austro Control, 2015]. Neben den Bewilligungsvoraussetzungen gemäß LFG sind für den Betrieb bzw. die Steuerung von Drohnen gegebenenfalls auch fernmeldebehördliche Bewilligungen, zivilrechtliche Bestimmungen, wie z. B. die Zustimmung von Grundstückseigentümern zu Start- und/oder Landemanöver, gewerberechtliche Bewilligungen, datenschutzrechtliche Bestimmungen sowie Vorschriften des Natur- und Umweltschutzes zu beachten.

Gemäß den Bestimmungen des LFG werden die folgenden Geräte unterschieden, wobei diese dem Freizeitbereich einerseits und der gewerblichen Nutzung andererseits zugeordnet werden. Drohnen, die der Landesverteidigung dienen, sind von den gegenständlichen Bestimmungen des LFG ausgenommen.

Freizeitbereich:

- Flugmodelle bis 25 [kg]
- Flugmodelle über 25 [kg]
- Unbemannte Geräte bis zu 79 Joule ([J]) maximaler Bewegungsenergie (sog. „Spielzeugdrohnen“)

Gewerbliche Nutzung:

- Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1
- Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 2

§ 24c Abs. 1 LFG. Flugmodelle bzw. Drohnen des Freizeitbereiches sind unbemannte Geräte, die selbständig in direkter Sichtverbindung zum Piloten in einem Umkreis von höchstens 500 [m] und ausschließlich zum Zwecke des Fluges selbst verwendet werden.

§ 24c Abs. 2 LFG. Grundsätzlich gilt für „Freizeitdrohnen“ bis einschließlich 25 [kg], dass diese ohne Bewilligung betrieben werden dürfen, wobei der Pilot stets darauf zu achten hat, dass durch den Betrieb dieser Flugmodelle keine Personen oder Sachen gefährdet werden (unentgeltliche und nicht gewerbliche Nutzung vorausgesetzt).

Alle weiteren Drohnen, dh. alle Flugmodelle mit einem Gewicht zwischen 25 [kg] und 150 [kg] (§ 24c Abs. 3 i.V.m. 4.3.1.1. LBTH 67.), dürfen nur mit Bewilligung der Austro Control GmbH bzw. einer entsprechend zuständigen Behörde (Österreichischer Aero Club) betrieben werden, wobei die

Erteilung der Bewilligung voraussetzt, dass die Drohne bestimmten Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen entspricht und durch den Betrieb der Drohne das öffentliche Interesse der Luftfahrtsicherheit nicht gefährdet wird (Bewilligungen für derartige Drohnen werden i.d.R. vom österreichischen Aero Club erteilt (§ 24c Abs. 3 LFG i.V.m. § 1 Abs. 1 Z 19 Österreichischer Aero Club Zuständigkeitsverordnung, „ÖAeCVO“, BGBl. Nr. 394/1994 i.d.F. BGBl. II 409/2015)).

§ 24g LFG. Nicht erfasst vom Anwendungsbereich des LFG sind sog. „Spielzeugdrohnen“, das sind unbemannte Geräte mit bis zu 79 Joule ([J]) maximaler Bewegungsenergie, die selbständig im Fluge verwendet werden können und nicht höher als 30 [m] über Grund betrieben werden.

§ 24d LFG. „Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1“ im Sinne dieser Bestimmungen sind zivile Drohnen mit einer Betriebsmasse von bis zu max. 150 [kg] und direktem Sichtkontakt zum Piloten (§ 24f LFG i.V.m. 4.3.1.1 LBTH 67), und „Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 2“ sind ebenfalls zivile Drohnen mit einer Betriebsmasse von bis zu max. 150 [kg], wobei diese Drohnen ohne Sichtverbindung zum Piloten gesteuert werden.

4.2.1.2. LBTH 67. Für Drohnen zur Erstellung von privaten Foto-/ Filmaufnahmen gilt, dass diese als „Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1“ zu qualifizieren sind, da Flugmodelle bzw. Drohnen des Freizeitbereiches ausschließlich zum Zwecke des Fluges selbst verwendet werden dürfen (das Erstellen von Foto-/ Filmaufnahmen mit Hilfe von „Freizeitdrohnen“ ist somit nicht erlaubt).

4.3.1.2. LBTH 67. Darüber hinaus ist zu beachten, in welchem Gebiet die ausgewählten Drohnen zum Einsatz kommen sollen. Konkret wird zwischen unbebautem, unbesiedeltem, besiedeltem oder dichtbesiedeltem Gebiet sowie Sicherheitszonen von (Militär-) Flugplätzen unterschieden. Abhängig vom Einsatzgebiet werden daher auch unterschiedliche Bewilligungsmaßstäbe angesetzt. Ebenso bedarf die Steuerung einer Drohne über Menschenansammlungen einer besonderen Bewilligung.

2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen ab 1.7.2020

Auf EU (europäischen Union) Ebene wurden die sog. Europäische Agentur für Flugsicherheit (EASA) Grundverordnungen beschlossen, die eine Harmonisierung ziviler unbemannter Luftfahrzeuge beinhaltet und eine erweiterte EU-Kompetenzausübung vorsieht (VO (EU) 2018/1139 vom 04.07.2018 zur Festlegung gemeinsamer Vorschriften für die Zivilluftfahrt und zur Errichtung einer Agentur der Europäischen Union für Flugsicherheit, ABl. L 212/1 vom 22.8.2018). Im Wesentlichen sollen in der Übergangsperiode 1.7.2020 bis 1.7.2022 die folgenden Maßnahmen in Österreich umgesetzt werden:

- Abhängig vom Gewicht und Einsatzbereich werden Drohnen künftig in die folgenden drei Kategorien unterteilt werden: „offen“, „spezifisch“ und „zertifiziert“.
- Die Kategorie „offen“ wird den aktuellen Flugmodellen bis zu 25 [kg] entsprechen, deren Bewilligungspflicht entfallen wird. Für Flugmodelle bis zu 25 [kg] zum Erstellen von (privaten) Foto-/ Filmaufnahmen wird somit keine Bewilligung mehr erforderlich sein.
- „Spielzeugdrohnen“ mit max. 250 [g] Abfluggewicht sollen bis zu einer Betriebshöhe von 120 [m] (anstelle von 30 [m]) gestattet sein.
- Gleichstellung von autonomen Drohnen mit jenen von Fernpiloten gesteuerten Drohnen.

- Vereinfachte Zugangsberechtigungen für Drohnenpiloten (Online-Registrierung und Online-Tests bei der Austro Control) [futurezone, 2015, Lopatka, 2019].

3 Theoretische Grundlagen für die Erstellung von 3D-Modellen

Ein 3D-Modell ist die räumliche Darstellung von einem Bauwerk oder einem natürlichen Objekt. Die Notwendigkeit, ein Bauwerk oder ein Objekt zu untersuchen, zu vermessen, zu dokumentieren und in seiner geometrischen Form abzubilden, kann aus vielfältigen Forderungen heraus resultieren und unterschiedliche Aspekte haben, wie z. B.

- Bauliche Veränderungen
- Gebäudevermessung und Bauaufnahme
- Bauwerksüberwachung
- Sicherung des Bestandes
- Verkauf und Wertermittlung
- Bauforschung und Denkmalpflege
- Topographische Vermessung

Bei einer Bauwerksvermessung ist das Ziel eine beabsichtigte bauliche Aktivität, eine Begutachtung oder eine wissenschaftlichen Erforschung.

Die Bestandsaufnahme eines dreidimensionalen Objekts und dessen Darstellung in einem zweidimensionalen maßstabgerechten Plan wird nach [Wangerin 2013, S. 11] als Bauaufnahme definiert. In der Folge erfolgt der Bauprozess vom architektonischen Entwurf über die Bauausführung bis zur Fertigstellung. Eine Veränderung im Laufe der Zeit ist ggf. der letzte Schritt eines Bauprozesses.

Digitale 3D-Modelle wurden lange Zeit aus terrestrischen Messungen oder photogrammetrischen Auswertungen abgeleitet. Durch die Entwicklung der digitalen Methoden und einem deutlich höheren Automatisierungsgrad bei der Datenaufnahme, änderte sich die Lage in den letzten Jahren deutlich. Zukunftsorientierte Methoden stützen sich nun auf terrestrische und auf Drohnen-basierte photogrammetrische Bildaufnahme- und LiDAR-Systemen.

3.1 Terrestrische Methoden zur Datenerfassung

Als terrestrische Methode wird in der Vermessung ein Vorgang bezeichnet, bei der die Datengewinnung auf der Erde stattfindet. Der Begriff „terrestrisch“ wird in diesem Zusammenhang als „erdgebunden“ oder „irdisch“ verstanden.

Die Datenerfassung kann auf kommerzielle Art, durch eine scannenden Totalstation (Multistation) oder terrestrische Laserscanner erfolgen, wobei diese Methoden die in den folgenden Abschnitten näher beschreiben werden.

3.1.1 Kommerzielle Datenerfassung

Geometriedaten eines Bauobjekts können direkt (primär) oder indirekt (sekundär) erfasst werden.

Bestandsdaten aus dem Archiv

Die indirekte Erfassung von Daten erfolgt durch bereits erfasste und dokumentierte Informationen. Diese sogenannte sekundäre Methode ermöglicht im Vergleich zur terrestrischen Methode nur einen Informationszuwachs in Bezug auf die Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Aktualität. Veränderungen und Abweichungen am Objekt werden nachträglich vor Ort aufgenommen, verglichen, dokumentiert und eingearbeitet [Kern 2003, S. 7].

Bestandsdaten aus der Sekundärdatenerfassung können durch die Digitalisierung von alten Plänen, aus ersten Bauwerksplänen oder aus bereits vorhandenen digitalen terrestrischen oder drohnengestützten Vermessungen gewonnen werden.

Die Methoden der Sekundärdatenerfassung basieren in der Regel auf Archivmaterialien wie z. B. Karten, Plänen und metrische Bilder von Bauwerken.

Building Information Modeling (BIM)

Bei der Methode der Bauwerksdatenmodellierung (BIM) wird die Planung und die Durchführung von einem Bauwerk vernetzt und digital modelliert. Die Bauwerksdaten können von Nutzern aus unterschiedlichen Bereichen des Bauwesens eingesehen, kombiniert und verwendet werden. Die Bauwerksdaten werden in einer Software als virtuelles Modell geometrisch dargestellt.

Datenerfassung durch Tachymetrie

Die Tachymetrie ist eine direkte primäre Erfassungsmethode von Vermessungsdaten, die direkt von einem Objekt erlangt wird.

In der Geodäsie werden durch die Anwendung der Polaraufnahme mit einem Theodolit die Horizontalrichtung und die Vertikalrichtung zu einem bestimmten Zielpunkt ermittelt. Mit einem (optischen, elektrooptischen oder elektronischen) Tachymeter, häufig sprachlich unzutreffend auch „Totalstation“ (TS) genannt, lässt sich zusätzlich zu den Richtungen auch die Schrägstrecke zu einem Zielpunkt mit mm-Genauigkeit bestimmen.

Die Bestimmung der Lage von diskreten Objektpunkten oder auch diskreten Neupunkten kann entweder durch die polare Aufnahme von einem koordinativ bekannten Festpunkt oder durch die polare Aufnahme bei freier Stationierung und mindestens zwei angemessenen Festpunkten aus erfolgen.

Für die Winkelmessung werden Messinstrumente mit einem scheibenförmigen Teilkreis verwendet, der mit dem Tachymeter verbunden ist. Bei Verdrehung des Instruments über den Scheibenzentrum wird über die scheibenförmige Skala ein Differenzwinkel automatisch bestimmt. Die Kreise bestehen in der Regel aus Glas und sind mit einem Strichraster oder einer Kombination von Strichraster und einem zugeordneten Code graviert. Die Genauigkeit der Ablesung wird durch den Teilkreisdurchmesser, ein Güte Merkmal für einen Theodoliten, bestimmt [Kahmen 2011, S. 71].

Das Abtasten der Teilkreise bei einem elektronischen Theodolit basiert auf einem Code- Inkrementalverfahren oder einem dynamischen Verfahren, wobei die Feinabtastung durch Interpolation erfolgt [Witte 2011, S. 107-109].

Die elektrooptische Distanzmessung hat sich in der Geodäsie-so auch in der Ingenieurvermessung-zu einem wesentlichen Instrument der Rationalisierung geodätischer Arbeiten entwickelt.

Die elektrooptische Methode zur Ermittlung der Distanz erfolgt durch einen elektromagnetischen Strahl (Spektralbereich des nahen Infrarotlichtes ($\lambda_T = 0.8 \mu m$ bis $0.9 \mu m$) oder des sichtbaren Lichtes ($\lambda_T = 0.65 \mu m$)), der von einem Sender ausgesendet, am Ziel von einem Prisma oder der Objektoberfläche reflektiert und am Empfänger detektiert wird. Der Wert der Distanz wird aus dem Impulslaufzeitverfahren, aus dem Phasenvergleichsverfahren oder einer Kombination von beiden Methoden abgeleitet und berechnet [Witte 2011, S. 172].

Als Reflektoren werden Prismen herangezogen, da ein Prisma die Eigenschaft besitzt, einfallende Lichtstrahlen parallel zum Sender zurück zu spiegeln. Das Prisma muss relativ genau ($< 5 [gon]$) auf das Instrument ausgerichtet werden, um die spezifische Genauigkeit der Distanzmessung einzuhalten. Bei einem 360° -Prisma erübrigt sich eine Ausrichtung des Prismas, jedoch entsteht ein zyklisches Fehlermuster im Horizontal- und Vertikalwinkel ($> 60 [mgon]$) [Lackner S, 2016]. Als Alternative zu einem Prisma kann eine Reflexmarke als Reflektor verwendet werden.

Ein Tachymeter kann die Distanzmessung ohne Reflektoren durchzuführen, indem die natürlichen Reflexeigenschaften von Oberflächen genutzt werden. Ein Signal im sichtbaren roten Bereich wird ausgestrahlt, dass das Messen von Distanzen bis zu einigen hundert Metern ermöglicht.

Das reflektorlose Messen hat einen Vorteil bei Gebäudeecken und -kanten, die mit einem Prisma nicht direkt gemessen werden können. Der Nachteil ist, dass die geometrische Fläche von dem Strahlenquerschnitt eine spezielle Größe aufweist, die sich mit zunehmender Distanz vergrößert. Diese geometrische Form ergibt für das reflektorlose Messen einen Nachteil, da beim Anzielen von einer Innenecke ein Teil des Strahlenquerschnitts, auch als Messfleck bezeichnet, vor Erreichen der Ecke reflektiert. Ein Mischsignal der reflektierten Strahlung entsteht und eine verkürzte Distanz wird abgeleitet (Abbildung 3.1). Bei einer Außenkante entsteht auch ein Mischsignal durch den Messfleck, was aber zur längeren Distanz durch umgekehrte Verhältnisse führt [Witte 2011, S. 191].

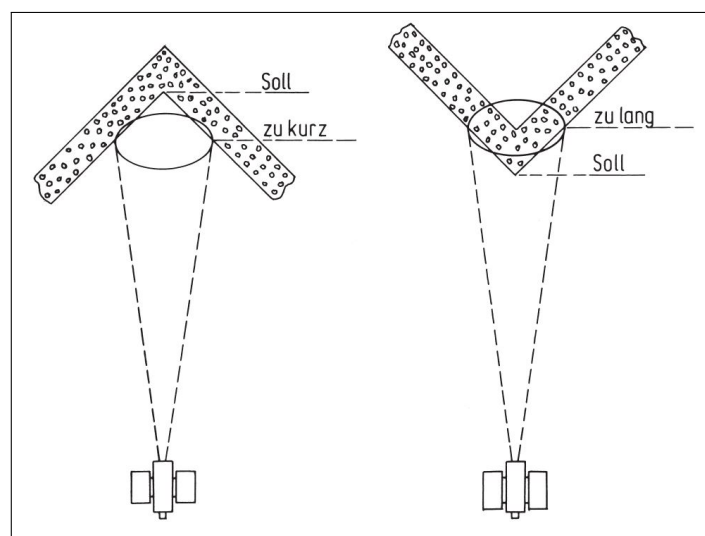


Abbildung 3.1: Distanzfehler bei der reflektorlosen Messung zu Innenecken und Außenkanten [Witte 2011, S. 191].

Beim Impulsverfahren wird durch den Sender ein Impuls mit einer bekannten Fortpflanzungsgeschwindigkeit c ausgesendet, der am Ende der Strecke von einem Reflektor reflektiert wird. Von

dem Empfänger wird dieses Signal aufgenommen (Abbildung 3.2) und die Laufzeit des Signals wird gemessen. Die Strecke lässt sich aus der halben Laufzeit und der Lichtgeschwindigkeit c ermitteln (Formel 3.1).

$$2d = c \cdot t \quad \text{oder} \quad d = \frac{c \cdot t}{2} \quad \text{mit} \quad c = \frac{c_0}{n} \quad (3.1)$$

d = Distanz

t = Laufzeit

c = Geschwindigkeit

c_0 = Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle im Vakuum

n = Brechungsindex

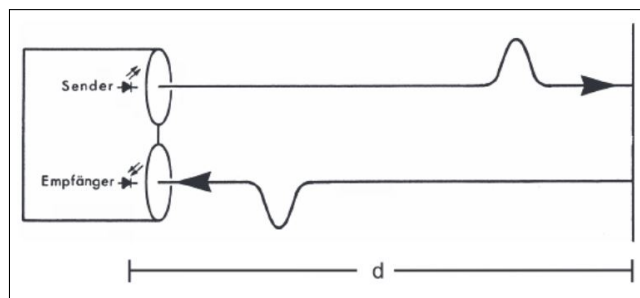


Abbildung 3.2: Impulsverfahren[Witte 2011, S. 173]

Im Phasenvergleichsverfahren wird kein Impuls, sondern eine modulierte Trägerwelle ausgesendet, die von einem Reflektor reflektiert und von dem Empfänger empfangen wird (Abbildung 3.3). Für Distanzen bis zu 15 [km] wird Infrarotlicht als Trägerwelle verwendet.

Bei der praktischen Messung wird zwischen der ausgesandten und der reflektierten Welle kein Nulldurchgang der sinusförmigen Modulationswelle erreicht, wodurch eine Phasenverschiebung Δphi entsteht, die als Phasenreststück gemessen wird.

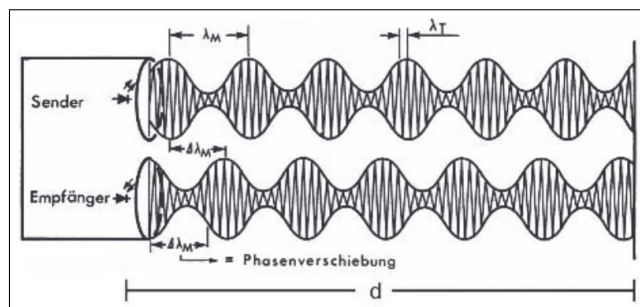


Abbildung 3.3: Phasenvergleichsverfahren[Witte 2011, S. 179]

Mit der digitalen Phasenmessung kann die Phasenverschiebung über die Phasenlage direkt bestimmt werden[Witte 2011, S. 180].

Abbildung von einem Theodolit und dem Tachymeter Tachymetrische Verfahren arbeiten per se dreidimensional und realisieren ein lokales polares Koordinatensystem, dessen Ursprung im

Instrumentenzentrum liegt (Abbildung 3.4). Das Koordinatensystem ist durch den Schnittpunkt der Achsen des Theodolits und den Horizontalkreis vorgegeben. Die z-Achse definiert die Stehachse, die x-Achse eine Parallele zur Richtung des Teilkreis Null und der Ursprung P_0 ist der Schnittpunkt der beiden Achsen.

Die kartesischen Koordinaten der Objektpunkte werden aus den gemessenen Polarkoordinaten berechnet (Formel 3.2).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_P \sin(Z) \cos(Hz) \\ s_P \sin(Z) \sin(Hz) \\ s_P \cos(Z) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

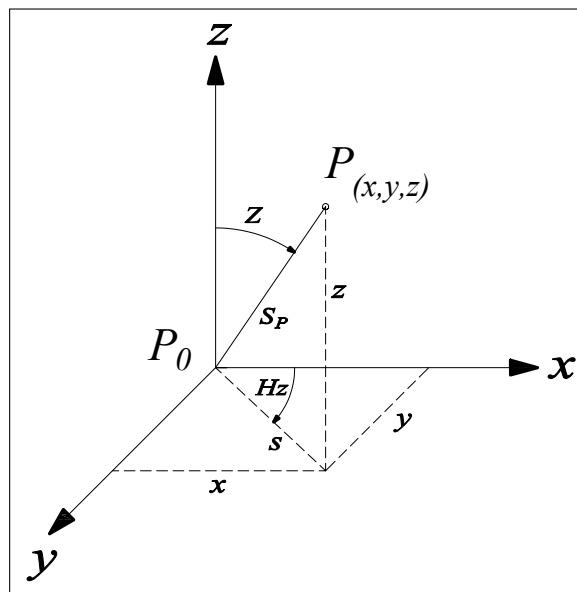


Abbildung 3.4: Kartesisches Koordinatensystem nach Kahmen [2011].

Durch die Polaraufnahme werden markante, sowie diskrete Objektpunkte koordinatenmäßig bestimmt. Aus mehreren Punkten entstehen linienhafte Strukturelemente (Linien und/oder Flächen). Diese Strukturelemente werden mit Attributen und Codierungen versehen und graphisch ausgestaltet. Durch diskrete Punkte, die diese Attribute und Codierungen enthalten, entsteht ein digitaler Zeichenplan eines Objektes.

Polaraufnahmen haben folgende Vorteile:

- Hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit,
- dreidimensionale Messung,
- reflektorlose Messung und
- Beschränkung auf wesentliche Punkte.

Eingeschränkt wird die tachymetrische Methode dadurch, dass auf die Objektpunkte freie Sicht vorhanden sein muss, d.h. jeder Standpunkt muss in ein übergeordnetes Bezugssystem stationiert und orientiert werden. Dies ergibt den Vorteil, dass über große Entfernungen eine homogene Genauigkeit gewährleistet wird [Kern 2003, S. 8].

3.1.2 Datenerfassung mit einer scannenden Totalstation

Geräte und Instrumente werden von Herstellern aus dem Vermessungsbereich kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert. Eine Erneuerung am Vermessungsmarkt ist die Multistation (MS), die eine Kombination aus Totalstation und Scanfunktion anbietet. Es ermöglicht, alle Messaufgaben mit einem Instrument auszuführen.

Eine Multi-Sensor-Datenfusion ist die Zusammenführung und Aufbereitung von einzelnen Sensordaten in ein homogenes Gesamtbild der aktuellen Situation. Eine Multistation kombiniert die Elemente aus Totalstation-Funktionalitäten, 3D-Laserscanning, GNSS-Anbindung und digitaler Bildtechnik.

Die Scanfrequenz der Punktaufnahme mit einer Multistation ist im Vergleich zu einer Aufnahme mit einem Laserscanner geringer, jedoch liegt die Stärke einer Multistation in der Kombination der Messsysteme. Die Kombination ermöglicht eine georeferenzierte hochgenaue Stationierung durch Winkel- und Distanzmessungen zu aktuell gemessenen GNSS-Punkten und angebondenen Laserscanning. Die gesamte Scanzeit kann durch Optimierung von der Scanfrequenz und der Scanfläche erheblich verkürzt werden. Eine Multistation ist somit eine kostengünstigere Alternative zu teureren Laserscannern.

Die Leica Nova MS60 Multistation (Abbildung 3.5 (a)) ermöglicht eine Scanrate von bis zu 1000 [Hz] mit einer maximalen Reichweite von 300 [m]. Die Trimble SX10 Station (Abbildung: 3.5 (b)) bietet dagegen eine Scanning-Geschwindigkeit von bis zu 26.600 [Hz] bei Entfernungen von bis zu 600 [m].



(a) Leica Nova MS60 [Leica-Geosystems, 2015]



(b) Trimble SX10 Station [GmbH, 2016]

Abbildung 3.5: Scannende Totalstationen

3.1.3 Datenerfassung mit einem terrestrischen Laserscanner

Die Bedeutung terrestrischer Laserscanner (TLS) oder terrestrischem LiDAR hat seit Ende der 1990er Jahre zunehmend an Bedeutung in der Geodäsie gewonnen. Ein Übergang von zeitdiskreten punktbezogenen zu kontinuierlichen elementbezogenen Messmethoden entwickelte sich. Laserscanner bieten fallende Anschaffungskosten sowie steigende Zuverlässigkeit und hohe Aufnahmege-
schwindigkeiten.

Anfangs waren Laserscanner nur im Nahbereich einsetzbar, aber mittlerweile kann auch eine Distanz von hundert Metern bis hin zu einem Kilometer erfasst werden. Die Methode lässt sich weitgehend automatisieren und bietet eine ausgezeichnete Ergänzung zur terrestrischen Photogrammetrie.

Beim Laserscanning erfolgt eine flächenhafte Erfassung der sichtbaren Oberfläche eines Objekts. Die Fläche wird in einem rasterförmigen Abtastvorgang (d.h. die Ablenkung des Laserstrahls erfolgt durch vorgegebene Winkelschritte in zwei Richtungen) vom Laser reflektorlos abgescannt (Abbildung 3.6). Durch das Messen einer Distanz, einer Horizontalrichtung und einem Vertikalwinkel werden lokal dreidimensionale Punkte im Laserscanner Koordinatensystem (SOCS-Scanner Own Coordinate System) erstellt.

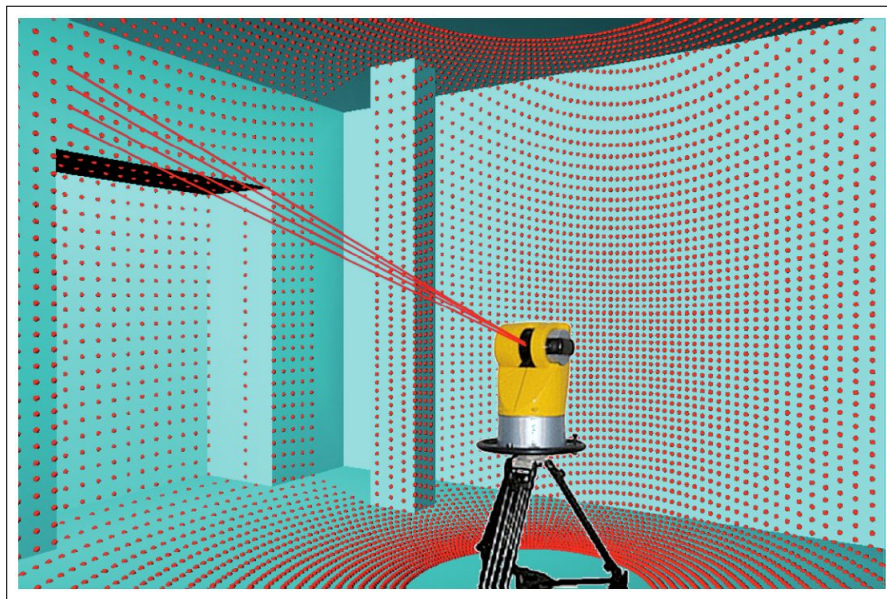


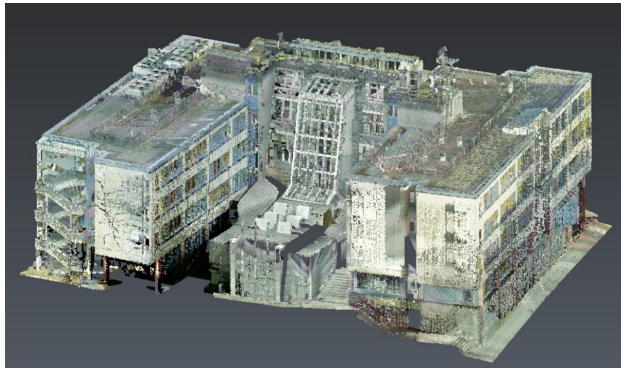
Abbildung 3.6: Flächenhaftes Abscannen [Niemeier u. a., 2002]

Jeder Punkt der Punktwolke wird durch eine geometrische und eine radiometrische Information beschrieben. Geometrisch über unmodulierte X-, Y-, Z-Koordinaten und radiometrisch über die Intensität des reflektierten Signals. Zugleich stehen häufig auch RGB Werte zur Verfügung.

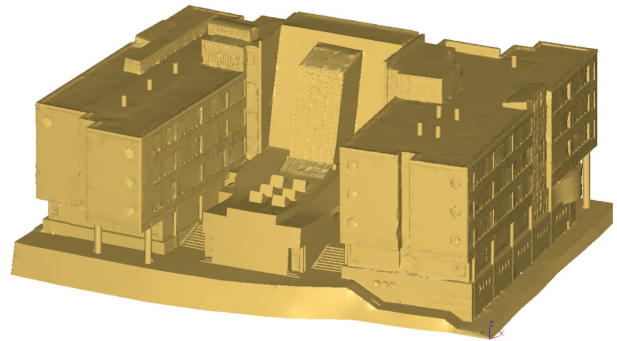
Das Messrauschen ist beim Laserscannen eine variable Größe, und ist abhängig von der Entfernung, dem Auftreffwinkel, der Reflexionseigenschaft der Oberflächenbeschaffenheit und des Materials des Objektes.

Aus den Punktwolken werden geometrische Informationen von Strukturelementen (Kanten, Ecken und Profile von Gebäuden) abgeleitet, die durch Verschneiden von der Punktwolke mit einer Ebene entstehen. Ein 3D-Oberflächenmodell kann durch eine Vermaschung der Punkte aus der Punktwolke erfolgen. Die Vermaschung der Punkte wird auch als TIN (Triangulated Irregular Network) bezeichnet.

net. Durch ein unregelmäßiges Dreiecksnetz entsteht eine Oberfläche aus der Punktwolke. Für die Dreiecksvermaschung wird vorwiegend eine Delaunay-Triangulation angewendet [Holst u. a., 2016]. Mit einer großen Anzahl von Punkten erzielt man schließlich ein Modell mit sehr hoher Genauigkeit (Abbildung 3.7 (b)).



(a) 3D-Scan



(b) 3D-Modell

Abbildung 3.7: Institutgebäude Geodäsie-Technische Universität Graz, Styregasse 30.

Das Laserscanning hat sich in chemischen Prozessanlagen mit komplexen Rohrleitungen und bei Fertigungsstraßen in der Automobilindustrie besonders schnell verbreitet. In den Bereichen Facility Management, Massenermittlung, Qualitätssicherung und 3D-Stadmodelle hat das Laserscanning weitere Anwendung gefunden [Bringmann 2002, S. 215].

Die Texturierung, das sogenannte Mapping von 3D-Gebäudemodellen, ist eine Zusammenführung von Photogrammetrie und Laserscanning.

3.2 Drohnengestützte Methoden zur Datenerfassung

Ursprünglich wurden Drohnen im Militärwesen eingesetzt. Mittlerweile hat sich der Anwendungsbereich erweitert und moderne Drohnen stellen in vielen ingenieur- und geowissenschaftlichen Bereichen eine Alternative zum klassischen terrestrischen Verfahren da. Es besteht ein enormes Einsatzpotential, insbesondere in schwer zugänglichem Gelände, wo der Einsatz von Personal gefährlich, aufwändig und teuer ist, um entsprechende Bild- oder Videodaten mit hoher Qualität zu erfassen.

So können etwa Hochspannungsleitungen, Brücken, Schornsteine, Denkmäler und Windkraftanlagen in kurzer Zeit inspiziert und auf Schäden untersucht werden, ohne dass sich Industriekletterer in gefährliche Höhen begeben müssen oder eine Baustelle geschlossen werden muss [Wackwitz 2018, S. 10].

Klassische Einsatzbereiche von Drohnen sind die Datenerfassung von Steinbrüchen, Deponien, Hangrutschungen oder hohe bzw. schwer zugängliche Objekte, für die eine klassische Befliegung zu aufwändig und wirtschaftlich zu teuer ist. Die Kosten für die Flugtechnik sind viel geringer und Einsätze können flexibler gestaltet werden. Im Gegensatz zum weniger flexiblen terrestrischen Laserscanning, erzielt eine drohnenbasierte Datenaufnahme durch die Mobilität eine konstante Punktwolkendichte mit einer geometrischen Genauigkeiten im Millimeterbereich [Witte 2011, S. 386].

Unbemannte Fluggeräte werden nach der Art des Auftriebs in vier Kategorien eingeteilt [Eisenbeiß, 2009].

Starrflächenflügler sind Flugzeuge in Modellformat mit Tragflächen und einem Vortrieb durch Propeller oder einen Düsenantrieb. Die Flächenflugzeuge sind für die Registrierung von großen Flächen geeignet. Für den Start und die Landung wird eine Landebahn beansprucht [Witte 2011, S. 387].

Rotorflügler besitzen die Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Eigenschaft. Durch das Startverhalten und die Möglichkeit des Schwebeflugs ist der Einsatzbereich sehr flexibel. Ansteigende Rotorblätter ermöglichen eine stabile Flugstabilität, Ausfallsicherheit und Traglastvermögen [Witte 2011, S. 387].

Beide Arten werden durch einen Verbrennungs- oder Elektromotor angetrieben. Drohnen mit Verbrennungsmotoren weisen ein größeres Gesamtgewicht auf, ermöglichen aber eine höhere Aufnahme der Nutzlast. Die Flugdauer ist deutlich länger als bei akkubetriebenen Drohnen. Elektronisch gesteuerte Drohnen haben durch ihr geringes Gewicht die Möglichkeit, mit mehreren Sensoren bestückt zu [Witte 2011, S. 387] sein, wobei die rechtlichen Bestimmungen in diesem Zusammenhang zu beachten sind (siehe Kapitel 2).

Kleinluftschiffe, auch Ballonfahrzeuge oder Zeppeline genannt, erhalten ihren Auftrieb durch warme Luft oder Helium. Die Fluglage ist sehr ruhig und stabil, was eine kontrollierte Bildaufnahme ermöglicht. Diese Art der Fluggeräte sind für kleine Objektbereiche relevant. Die Positionierung erfolgt durch Seile am Boden oder durch eine Fernsteuerung. Kleinluftschiffe reagieren sehr anfällig auf Luftströme [Witte 2011, S. 387].

Gleitsegler werden Fluggeräte wie z. B. Drachen oder Gleitschirme bezeichnet, die in Verbindung mit stetigem Wind angetrieben werden. Gleitsegelfluggeräte haben in der Datenermittlung durch Drohnen keine große Bedeutung [Witte 2011, S. 387].

Drohngestützte Vermessungstätigkeiten können durch photogrammetrische Systeme oder dem LiDAR-System erfolgen. Eine wichtige Rolle bei drohngestützten Aufnahmen beider Anwendungen ist die integrierte hochgenaue inertielle Messeinheit (engl. *inertial measurement unit* (IMU)), die zur Bestimmung der Orientierung und Ausrichtung durch die Eulerwinkel (Roll-Pitch-Yaw) eingesetzt wird. Die gewonnenen Daten können direkt oder indirekt georeferenziert werden (siehe Kapitel 3.3).

Aktuell gibt es wenige Hilfsmittel, die die Entscheidung für Photogrammetrie oder Laserscanning unterstützen. Eine wichtige Rolle spielen daher betriebliche Faktoren, wie z. B. Kosten und Komplexität.

3.2.1 Datenerfassung mit einer photogrammetrischen Bildaufnahme

Der wesentliche Fortschritt in der photogrammetrischen Messtechnik liegt in den verbesserten Sensoren der digitalen Aufnahmetechnik, die Leistungssteigerung in der Hardware und in der Automatisierung der photogrammetrischen Postprozesse sowie in der verbesserten Auswertetechnik.

In Abbildung 3.8 ist der Arbeitsablauf von drohnenbasierten photogrammetrischen Projekten dargestellt, beginnend mit der Bildaufnahme durch den Bildflug, der Bildorientierung und der Erstellung der Punktwolken bis zum photogrammetrischen Endprodukt.

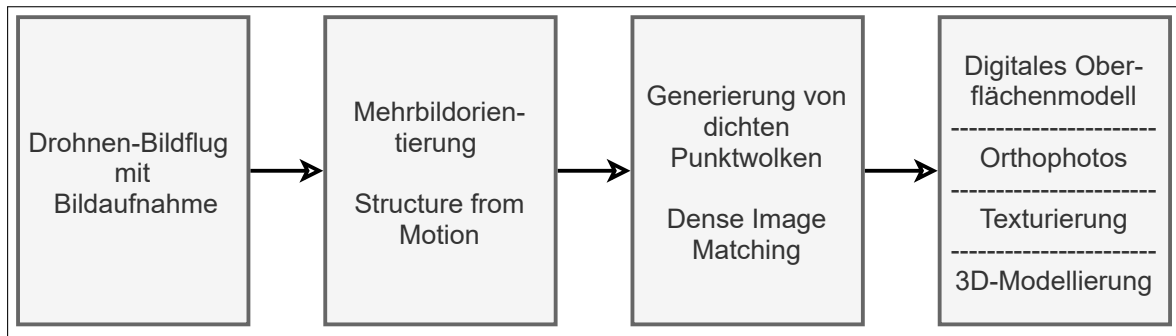


Abbildung 3.8: Arbeitsablauf von photogrammetrischen Vermessungen mit Drohnen nach [Witte 2011, S. 390].

Drohnen-Bildflug mit Bildaufnahme

Die photogrammetrische Luftaufnahme mit einer Drohne unterscheidet sich nicht gravierend von der herkömmlichen Aerophotogrammetrie. Die wesentlichen Unterschiede zur Aerophotogrammetrie sind die Flughöhe, die Spezialkameras und das Bildformat. In Abhängigkeit der verwendeten Kameras müssen die spezifischen Parameter wie z. B. der Bildmaßstab oder Ground Sampling Distance (GSD) eines Bildfluges definiert werden. Für eine dichte Bildfolge muss eine Längs- und Querüberdeckung von mindestens 60 % und 20 % erfüllt sein. Der Bildverband ist durch den hohen Überlappungsbereich mit einer hohen Bildanzahl charakterisiert. Die begrenzte Nutzlast von Drohnen verlangt eine leichte Kompaktkamera mit einem fest eingebauten Objektiv. Drohnen mit einer stärkeren Trägerplattform ermöglichen den Einsatz von Spiegelreflexkameras, wodurch ein größerer Sensor und austauschbare Objektive den Anwendungsbereich flexibler gestalten. Die Blende wird mit der Belichtungszeit und der Bildfolgezeit definiert, sodass die Schärfentiefe die geforderten Ansprüche garantiert und der Überdeckungsgrad erfüllt wird [Witte 2011, S. 390-S. 391].

Die Steuerung der Kamera kann durch den Drohnenpiloten selbst, ferngesteuert durch die Drohnensoftware oder mit einem Kamera-Piloten, dem sog. Operator, erfolgen.

Eine im Vorhinein gut geplante und strukturierte Bildaufnahme beschleunigt das Verfahren und beeinflusst die Qualität des Ergebnisses signifikant.

Mehrbildzuordnung und -orientierung

Bei dieser Variante erfolgt die geometrische Auswertung durch die Orientierung von Bildverbänden und der Kamerakalibrierung.

Ein Punkt muss in mindestens zwei Bildern, aus unterschiedlichen Perspektiven dargestellt und sichtbar sein, um eine stereoskopische 3D-Auswertung bei perspektivischer Zentralprojektion zu ermöglichen (Abbildung 3.9). Der räumliche Objektpunkt X kann mittels zweier Raumstrahlen durch die Projektionszentren von beiden Bildern und dem entsprechenden homologen Bildpunkt im linken und rechten Bild trianguliert werden. Für die Triangulierung muss die relative Orientierung der Kamerapositionen zueinander und die korrespondierenden Punkte x_L und x_R bekannt sein. Die räumliche Genauigkeit der 3D-Position wird erhöht, wenn der Punkt in mehreren Bildern aus unterschiedlichen Positionen und Perspektiven beobachtet wird [Hallermann u. a., 2017].

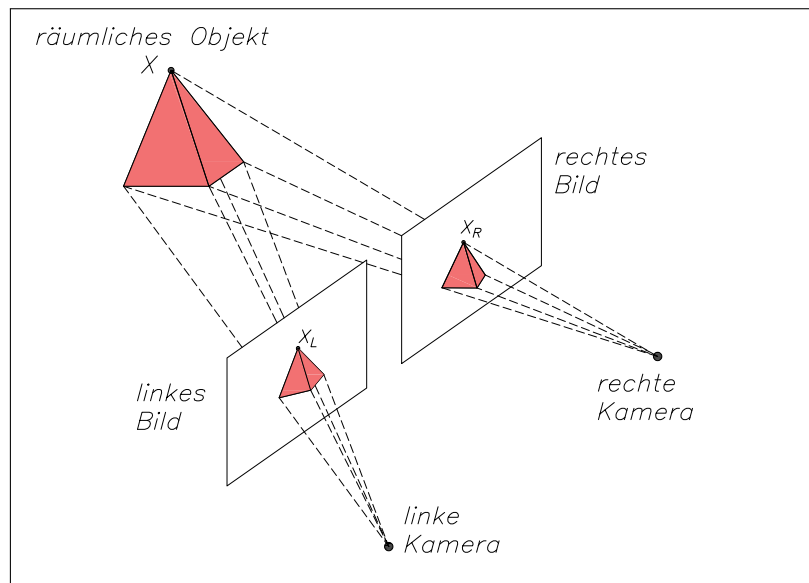


Abbildung 3.9: Stereoskopisches Messprinzip nach Hallermann u. a. [2017].

Durch eine hohe Anzahl von identischen homologen Punkten in vielen Bildern kann die Orientierung des Bildverbandes durch einen Bündelblockausgleich erfolgen. Die Strahlenbündel einer Aufnahme werden durch eine Ausgleichsberechnung so angenähert, dass sich die Strahlen von homologen Punkten bestens schneiden [Witte 2011, S. 373].

Structure-from-Motion (SfM)

Die Rekonstruktion einer Oberfläche von einem Objekt erfolgt auf Basis einer Menge ungeordneter oder geordneter Bilder durch das automatische Structure-from-Motion-Verfahren [Hallermann u. a., 2017].

Ein SfM-Verfahren liefert zuverlässige Ergebnisse, wenn gute Näherungswerte der Orientierungsdaten bekannt sind. Diese Voraussetzungen werden durch Drohnenbefliegungen mit direkter Georeferenzierung erfüllt. In der Computer-Vision-Forschung wurde das SfM-Verfahren für spezielle Bildzuordnungsalgorithmen entwickelt, die das Korrespondenzproblem bei ungeordneten Bildverbänden lösen. Wichtig ist bei diesem Verfahren, dass ein dichter Bildverband mit einem großen Überlappungsbereich besteht [Witte 2011, S. 393].

Eine alternative Methode zur Bestimmung von 3D-Strukturen ist die *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) Technik. Diese Methode wurde ursprünglich zur Realisierung der autonomen Steuerung von Robotern in der Robotik entwickelt. Unterschiedliche Arten von Sensoren ermöglichen verschiedene SLAM-Algorithmen für Innenraum- und Außenraumanwendungen (selbstfahrende Kraftfahrzeuge, Drohnen, autonome Unterwasserfahrzeuge, Planeten Rover und mobile Kartierungen).

Dense Image Matching

Bildbasierte Punktwolken werden durch die dichte Bildanpassung (Dense Image Matching) bestimmt. Die Werte der inneren und äußeren Orientierungen müssen für das Verfahren bekannt sein. Durch die orientierten Bilder werden korrespondierende Punkte gefunden und aus einem Vorwärtsschnitt ein 3D-Objektpunkt berechnet. Durch den hohen Überdeckungsgrad der Aufnahmen werden mit einer Überbestimmung Fehlzuordnungen eliminiert und die Genauigkeit gesteigert [Witte 2011,

S. 395].

Die dichte Bildanpassung erzeugt einen Punktwolkendatensatz, der sich mit dem durch drohnen-gestützte oder terrestrische LiDAR-Verfahren erzeugten Punktwolkensatz vergleichen lässt.

Ergebnis und Endprodukt

Als Ergebnis liegt ein dichte Punktwolke von einem Objekt vor, dessen Oberfläche geometrisch dargestellt wird. Das Endprodukt beinhaltet zu den Höheninformationen auch Textur, Form und Farbe eines jeden Punktes auf dem Objekt und ermöglicht somit eine leichtere Interpretation der 3D-Punktwolke.

Diese Technologie gibt es in verschiedenen Formen bereits seit 1979, wobei die Anwendung bis Anfang der 2000er Jahre unüblich war [Ullman, 1979].

Drohnsysteme, die die Kombination von Photogrammetrie und einer hochauflösenden Kamera verwenden, sind kosteneffektive Vermessungen mit einer hohen Genauigkeit im Millimeterbereich. Desweiteren ermöglichen Drohnsysteme eine herausragende Flexibilität in Bezug auf Ort, Zeit und Art der Erfassung von 2D- und 3D-Daten. Die erzielten 3D-Ergebnisse sind ähnlich wie die im LiDAR-System, aber durch die hochauflösenden visuellen Daten wesentlich vielseitiger.

Photogrammetrie-basierte Arbeitsabläufe sind „fehlerverzeihender“. Die Redundanz, die durch mehrere, sich überlappende Bilder desselben Objektpunktes entsteht, ermöglicht eine Fehlerkorrektur während der Verarbeitung und führt zu hochpräzisen Ausgaben, selbst bei nicht idealen Bedingungen oder Operationen.

Für die photogrammetrische Auswertung wird in dieser Masterarbeit die Software Agisoft Metashape Professional herangezogen. Der Arbeitsablauf wird als SfM-Algorithmus durchgeführt und im Abschnitt 4.4 dokumentiert.

3.2.2 Datenerfassung mit einem LiDAR-System

LiDAR ist eine Technologie, die es seit vielen Jahrzehnten gibt, die aber erst seit kurzem in einer Größe und Leistung verfügbar ist, die für den Betrieb spezieller Drohnen geeignet ist.

Das LiDAR Prinzip unterscheidet sich von der terrestrischen und drohnenbasierten Anwendung in erster Linie nur in der Plattform. Von entscheidender Bedeutung für die Erfassung verwertbarer Daten ist auch ein hochgenauer IMU-Sensor zur Bestimmung der Orientierung des LiDAR-Sensors. Alle hochwertigen Subsysteme müssen in perfekter Synchronisation arbeiten, um die Verarbeitung der Rohdaten in verwertbare Informationen zu ermöglichen.

Kleine Lücken in den Sensormessungen können zu erheblichen Fehlern in den Ergebnissen führen. Bei fehlerhaften LiDAR-Daten ist in den meisten Fällen die einzige Lösung die Wiederholung von Flügen.

LiDAR-Systeme mit einer Präzision, die für die Verwendung im Vermessungsbereich erforderlich ist, sind sehr teuer. Die Kosten betragen bis zu €100.000. Aufgrund des Gewichts und des Strombedarfs sind auch Drohnen, die für den Transport dieser Sensoren benötigt werden, in der Regel erheblich größer und ihre Fähigkeit größere Gebiete abzudecken ist beschränkt. Der Vorteil von

LiDAR-Drohnen liegt in der Erstellung von Geländemodellen unter dichter Vegetation und / oder dem Erstellen von 3D-Modellen einer komplexen Struktur.

In der Abbildung 3.10 werden die Anwendungsgebiete der einzelnen Methoden verglichen und mit der Effizienz der Aufnahmen in Verbindung gesetzt. Welche Methode verwendet wird, hängt stark vom Endprodukt ab. Für Oberflächenmodelle ist ein Laserscan ein nützliches Verfahren, während die Photogrammetrie bei einer Schadensanalyse effizienter ist. Eine Kombination von Laserscan und digitalen Bildern wird eine zukunftsorientierte Lösung ergeben.

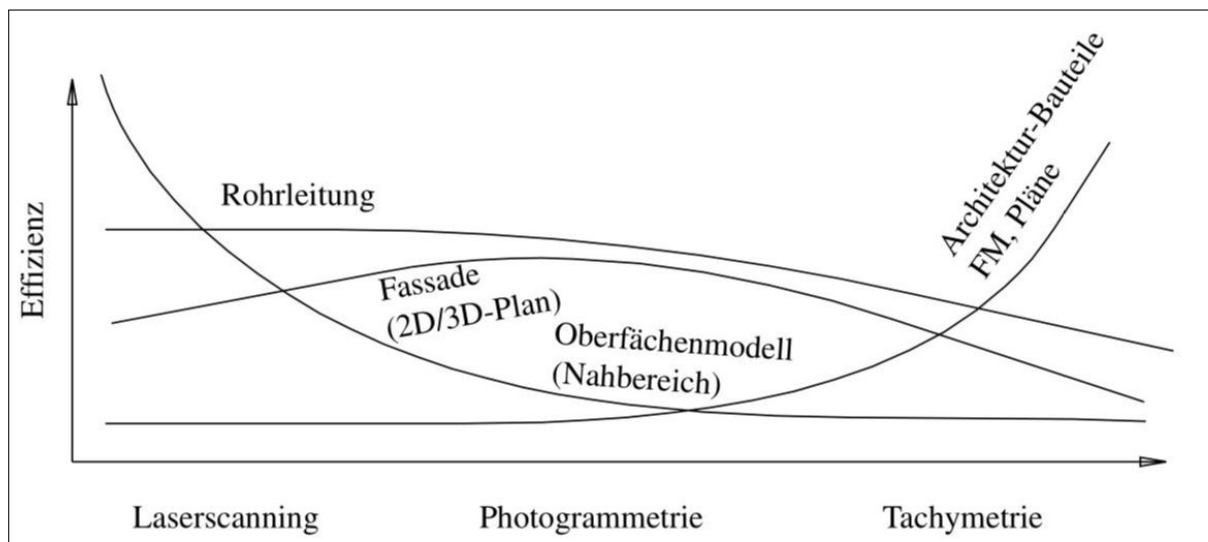


Abbildung 3.10: Anwendungsgebiete und adäquate Technologien [Bringmann, 2002].

3.3 Georeferenzierte Punktwolke

Die Orientierung einer Punktwolke in ein übergeordnetes oder absolutes Koordinatensystem, auch Registrierung genannt, erfolgt über die direkte oder indirekte Methode der Georeferenzierung.

Die Punktwolke liegt in einem lokalen Koordinatensystem und bietet keine metrischen Informationen über Koordinatenpunkte, Länge, Fläche oder Volumen. Für die Transformation von einem gescannten Objekt in ein gewünschtes geodätisches Referenzsystem sind für die lokal gescannten Punkte, die aktuelle Rotation und Translation des Scanners zu bestimmen [Vennegeerts u. a., 2009].

Die Registrierung der Punktwolkendaten, in Abhängigkeit des Messverfahrens, kann in Echtzeit oder im Postprocessing erfolgen.

3.3.1 Direkte Georeferenzierung

Terrestrische Laserscanner und Multistation können eine direkte Georeferenzierung der gescannten Fläche über das Messinstrument ermitteln. Die Positionierung und Orientierung erfolgt über eine freie Stationierung (GNSS-Anbindung oder Einmessen bekannter Messpunkte) oder durch das Stationieren des Messgerätes auf einem bekannten und festen Standpunkt.

Eine direkte Georeferenzierung (Abbildung 3.11) durch drohnenbasierte Datenaufnahmen ermöglicht eine Messung der Position und der Orientierungswinkel eines abbildenden Sensors zum Zeitpunkt der Datenaufnahme durch Zusatzsensoren in Form eines GNSS-Empfängers und einer inertialen Messeinheit Kraus [2012].

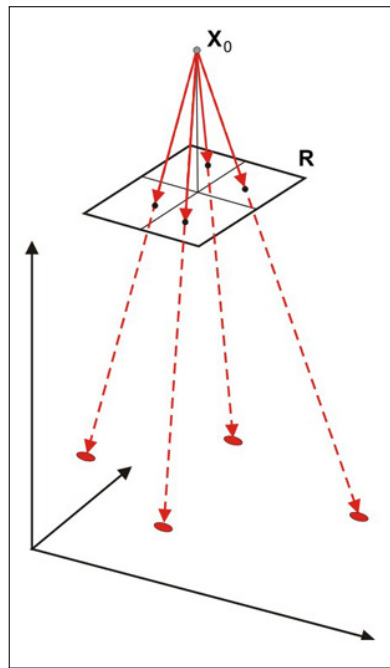


Abbildung 3.11: Direkte Georeferenzierung [Kaufmann, WS 2019/20]

Diese Methode basiert auf einer optimalen Kombination der einzelnen Messkomponenten. Komplementäre Systemeigenschaften aus den einzelnen Komponenten werden zu einem Gesamtsystem integriert (Abbildung 3.12). Dies ermöglicht eine effiziente und kostengünstige Orientierung der Sensoren. Das klassische Verfahren der indirekten Bildorientierung durch Aerotriangulation (AT) wird durch die direkte Georeferenzierung ersetzt [Kaufmann, WS 2019/20].

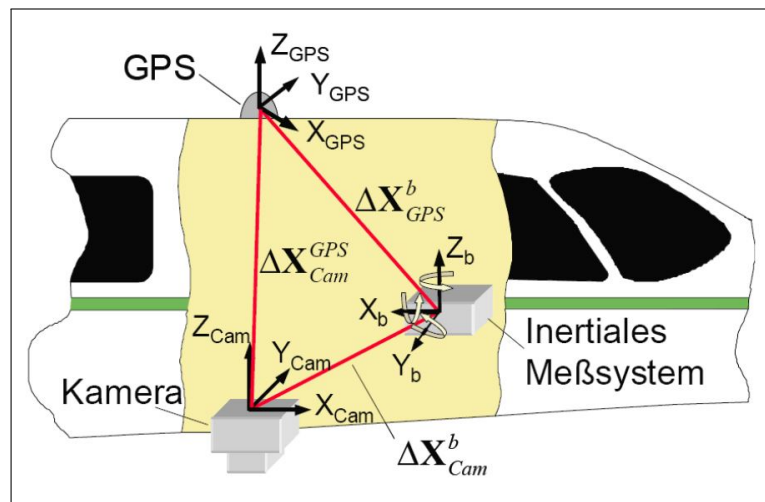


Abbildung 3.12: Koordinatensystem für die direkte Georeferenzierung [Kaufmann, WS 2019/20].

Das GNSS Absolutmessverfahren liefert zu jedem Zeitpunkt die absolute Position und Geschwindigkeit der Drohne. Die Genauigkeit einer GNSS-Messung ist verhältnismäßig konstant, aber abhängig von Satellitenkonstellationen und der aktuellen Umgebung des GNSS-Sensors (Signalabschattungen, Mehrwegempfang).

Eine inertielle Messeinheit (IMU) ist definiert durch drei orthogonal ausgerichtete Koordinatenachsen, die mit Dreh- und Beschleunigungssensoren ausgestattet sind. Durch Ermitteln und Integrieren der rotatorischen und translatorischen Bewegungen kann zu jedem Zeitpunkt die Position und Ori-

entierung über ein Relativmessverfahren bestimmt werden. Eine IMU hat den Vorteil, unabhängig von äußeren Einflüssen zu funktionieren, aber hat auch den Nachteil, dass die Genauigkeit von dem Zeitraum der Integration abhängig ist [Glira, 2012].

Auf Referenzpunkte sollte bei einer direkten Georeferenzierung nicht verzichtet werden, da systematische Fehler korrigiert und die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der direkten Georeferenzierung verbessert werden kann.

3.3.2 Indirekte Georeferenzierung

Für eine indirekte Georeferenzierung wird vor Beginn der Datenaufnahme über das ganze Objekt künstliche Passpunkte angebracht und durch ein geodätisches GNSS oder Tachymeter Verfahren dreidimensional eingemessen [Witte 2011, S. 382].

Es besteht auch die Möglichkeit, künstliche Passpunkte durch natürliche Passpunkte in Form von markanten optischen Punkten zu ersetzen, um unerreichbare Stellen an Objekten mit Passpunkten zu vermarken. Die Transformationsparameter werden aus den realen Raumkoordinaten und den Koordinaten im lokalen System der Rekonstruktion berechnet. Rein mathematisch müssen mindesten drei Passpunkte bekannt sein. Die Genauigkeit wird aber erhöht, wenn mehr als drei Passpunkte am Objekt angebracht werden.

Bei der indirekten Georeferenzierung (Abbildung 3.13) erfolgt die Bestimmung der äußeren Orientierung mit einem Bündelblockausgleich (Aerotriangulation AT). Pass- und Verknüpfungspunkte werden als Zusatzinformation verwendet, wodurch das Maßstabsproblem zwischen Lage und Höhe vernachlässigt werden kann. Die innere Orientierung ergibt sich aus der Kamerakalibrierung [Kaufmann, WS 2019/20].

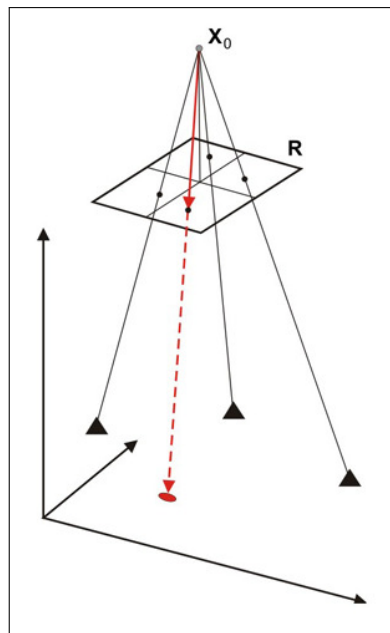


Abbildung 3.13: Indirekte Georeferenzierung [Kaufmann, WS 2019/20]

3.4 Analyse von verschiedenen Punktwolken

Durch eine Analyse können Punktwolken untereinander verglichen und analysiert werden. Das Deformationsmonitoring wird bei Überwachungsmessungen von einem Objekt aus verschiedenen Epochen angewendet. Eine Analyse (Deformationsanalyse) kann auch an mehreren Punktwolken von einem Objekt aus einer Epoche angewendet werden um die Aufnahmemethode auf den zeitlichen Aufwand sowie die Auflösung der erfassten Flächen zu untersuchen.

Die Analyse für den Vergleich von unterschiedlichen Punktwolken lässt sich in fünf Modelle gliedern.

1. Punktbasierte Modelle
2. Oberflächenbasierte Modelle
3. Parameterbasierte Modelle
4. Geometriebasierte Modelle
5. Punktwolkenbasierte Modelle

Punktbasierte Modelle können nur verglichen werden, wenn ein Scan immer vom gleichen Standpunkt mit identischer Winkelauflösung und der gleichen Ausgangsrichtung erfolgt. Die punktbasierten Modelle sind nur limitiert verwendbar. Bei oberflächenbasierten Modellen erfolgt ein Vergleich, indem die Punktwolke über eine Vermaschung zu einem Punktgitter erstellt wird. Im geometriebasierten Modell wird die Punktwolke durch ein geometrisches Modell approximiert und die flächenhafte Differenz wird berechnet. In parameterbasierten Modellen werden geschätzte Parameter zur Analyse verwendet. Eine Vorinformation über das Modell ist für geometriebasierte und parameterbasierte Modelle notwendig [Holst u. a., 2016].

Für eine Analyse, wo keine Vorinformation über die Geometrie des Modells integriert werden kann, wird ein punktwolkenbasiertes oder oberflächenbasiertes Modell angewendet.

Cloud-to-Cloud-Vergleich (C2C)

Im Cloud-to-Cloud-Vergleich (C2C-Vergleich) wird einem Punkt aus der Referenzpunktwolke der korrespondierende Punkt aus der Vergleichspunktwolke zugeordnet und die geometrische Distanz berechnet. Die Suche nach dem nächsten Nachbarn ist die einfachste und schnellste Methode zur Bildung von Korrespondenzen, wodurch aber Zuordnungsprobleme entstehen können. Punkte zwischen der Referenzpunktwolke und der Vergleichspunktwolke mit kurzer Nachbarschaftsdistanz werden anstelle der wahren korrespondierenden Punkte miteinander verglichen. Dieses Problem kann durch die Modellierung einer lokalen Fläche zweiter Ordnung und Berechnung des Normalvektors n um den Referenzpunkt verbessert werden. Die korrespondierenden Punkte werden dann im Bereich der Flächennormalen ermittelt (Abbildung 3.14). Durch die Richtung des Normalvektors wird auch das Vorzeichen der Abweichung ermittelt. Das Ergebnis ist rein quantitativ, da kein Signifikanztest für eine qualitative Abweichung durchgeführt wird.

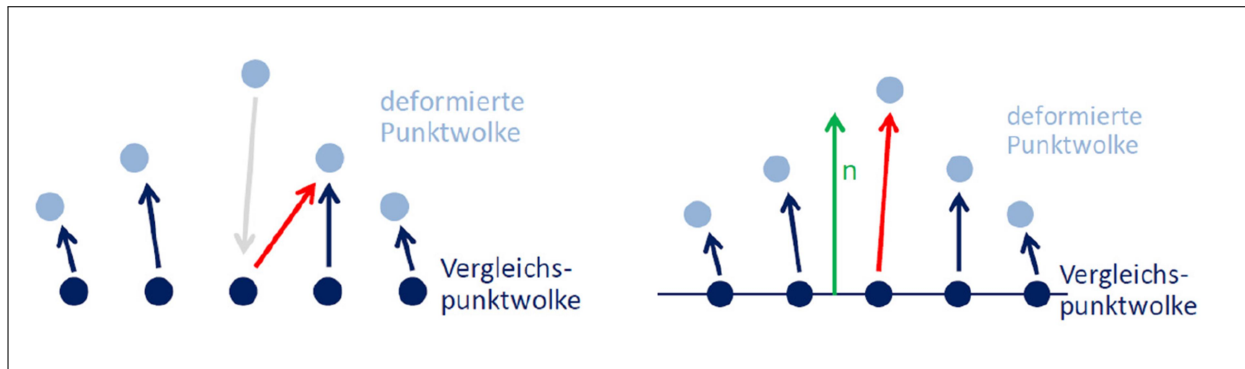


Abbildung 3.14: C2C-Vergleich ohne (links) und mit (rechts) lokaler Modellierung nach [Holst u. a., 2016].

Für die Berechnung des Normalenvektors gibt es drei Möglichkeiten, die lokale geometrische Modellierung durchzuführen.

Erstens wird mit der *Least Square Plane* Option eine Ebene durch eine bestimmte Anzahl von Nachbarn gelegt. Diese Option hat ein robusteres Verhalten gegenüber stark verrauschten Punktwolken. Durch die zweite Option *2D 1/2-Triangulation* wird eine lokale Delaunay-Triangulation berechnet. Bei dieser Variante wird das Netz über die originalen 3D-Punkte vermascht, sodass eine lokale 2.5D-Vermaischung entsteht. Die präziseste Option ist die *Quadratic Height Function*, die bei sauberen aber stark gekrümmten Punktwolken angewendet wird [Holst u. a., 2016].

Cloud-to-Mesh-Vergleich (C2M)

Ein oberflächenbasiertes Modell wird durch eine globale Vermaischung der Punktwolke erstellt. Die Vermaischung erfolgt über ein unregelmäßiges Netz aus Dreiecken. Aus den Dreiecken wird der Normalenvektor n berechnet und der Abstand zur Vergleichspunktswolke ermittelt. Die Vermaischung erfolgt durch eine Glättung der Punktwolke.

Mesh-to-Mesh-Vergleich (M2M)

Als Alternative zum Cloud-to-Mesh-Vergleich (C2M-Vergleich) kann aus beiden Punktwolken ein oberflächenbasiertes Modell erstellt werden. Der kürzeste Abstand zu den Oberflächen wird über die Normalenvektoren der beiden Oberflächen ermittelt.

Multiscale-Model-to-Model-Cloud-Vergleich (M3C2M)

Die Möglichkeit das Messrauschen beim Vergleichen von Punktwolken zu berücksichtigen, erfolgt durch den Multiscale-Model-to-Model-Cloud-Vergleich (M3C2M-Vergleich).

In diesem Vergleich werden mehrere Punkte zu einem Kernpunkt summiert. Die Streuung um diese Kernpunkte wird als Maß der inneren Genauigkeit weiterverwendet. Für die Prüfung von signifikanten Abweichungen beim Punktwolkenvergleich wird zusätzlich zur inneren Genauigkeit auch die Registriergenauigkeit, als äußere Genauigkeit, gefordert [Holst u. a., 2016].

Im ersten Schritt werden Kernpunkte definiert, für die eine Distanz und ein Konfidenzintervall berechnet wird. Die Punktwolke wird durch die Kernpunkte geglättet um das Rauschen zu minimieren. Im nächsten Schritt wird für die geglättete Punktwolke ein geometrisches Modell gebildet. Für jeden Kernpunkt i wird ein Normalenvektor n erstellt.

Dazu wird eine Ebene durch Punkte im Radius $D/2$ definiert, die um den Kernpunkt i liegen. Durch die Entfernungen entlang des Normalenvektors wird eine Standardabweichung $\sigma_{i(D)}$ berechnet. Der Kernpunkt i kann nun entlang des Normalenvektors in die Ebene der Referenzpunktwolke und Vergleichspunkt wolke projiziert werden. In der Abbildung 3.15 ist ein Zylinder mit dem benutzerdefinierten Radius $d/2$ und einer Länge in beiden Richtung dargestellt. Die Zylinderachse geht durch den Kernpunkt i und orientiert sich nach dem Normalenvektor n . Im Zylinderraum befinden sich die Projektionen i_1 und i_2 des Kernpunktes i . Die Punktwolkenpositionen i_1 und i_2 haben eine Standardabweichung für die lokale Punktwolkenstreuung entlang der Normalenrichtung und geben die Distanz zwischen i_1 und i_2 an [Holst u. a., 2016]. Das Ergebnis von dem M3C2M-Vergleich ist eine Grafik, in der die Kernpunkte mit einem Farbwert für den Abstand zwischen der Referenz- und Vergleichspunkt wolke dargestellt werden. Es können auch die Distanzunsicherheiten, signifikante Differenzen, Anzahl der Nachbarn und die Standardabweichung der Kernpunkte beschrieben werden [Holst u. a., 2016].

Eine detaillierte Erklärung solcher Anwendungen des M3C2M-Algorithmus wird in [Lague u. a., 2013] beschrieben.

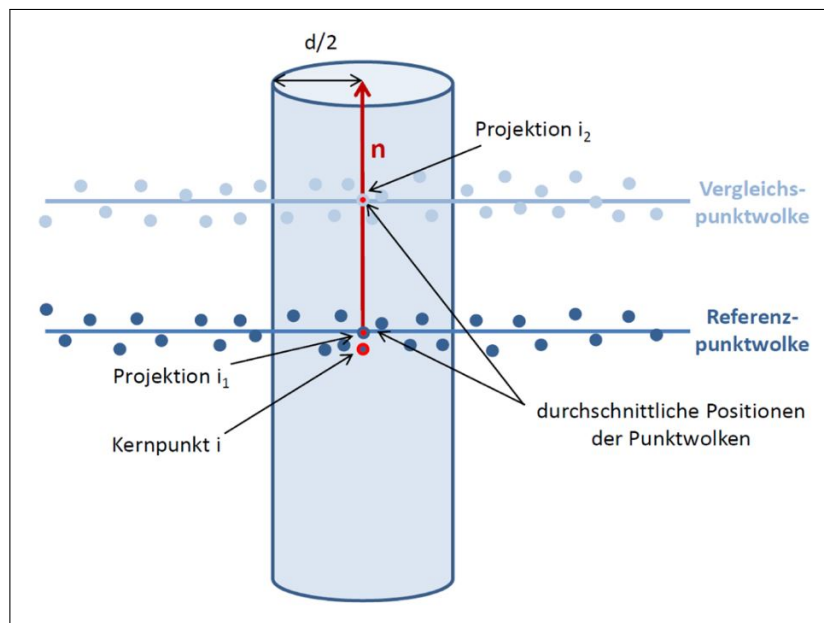


Abbildung 3.15: Punktwolkenabstandes an einem Kernpunkt mit dem M3C2M-Vergleich nach [Holst u. a., 2016].

3.5 Semantische Segmentierung von Schadensklassen

Computer Vision ist ein interdisziplinäres wissenschaftliches Gebiet im Bereich des maschinellen Denkens. Eine Maschine (Computer) soll digitale Bilder oder Videos auf hohem Niveau automatisiert verstehen und analysieren. Deep Learning hat in den letzten Jahren einen großen Fortschritt auf dem Gebiet der Computer Vision erzielt [Lamba, 2019]. Deep Learning ist eine spezielle Klasse von künstlichen neuronalen Netzwerken und werden auch als *Deep Neural Networks* bezeichnet [Thamm, 2018].

Mit künstlichen neuronalen Netzwerken (KNN) wird aus einer Kameraszene eine semantische Segmentierung, eine Objektdetektion und eine semantische Instanzsegmentierung erstellt [Niemeijer, 2017].

Ein künstliches neuronales Netzwerk ist an ein biologisches neuronales Netzwerk angelehnt und besteht aus Neuronengruppen, die in vielen Layern zusammengefasst und miteinander verbunden sind. Ein neuronales Netz hat immer mindestens einen Input-Layer und einen Output-Layer. Dazwischen befinden sich beliebig viele Neuronen, sogenannte *hidden-layer*. Der Grad an Komplexität, die Tiefe des neuronalen Netzwerks und die Rechenleistung steigt mit den versteckten Neuronen [Rocketloop, 2019].

Das Konzept eines künstlichen Neurons wird in der Abbildung 3.16 graphisch dargestellt. Vier Basiselemente erklären ein künstliches Neuron. Ein Neuron mit dem Index j erhält eine Eingabe $x = [x_1, x_2, \dots, x_n, x_{n+1}]$, die mit dem Gewichtsvektor $w_j = [w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{nj}, w_{(n+1)j}]$ summiert wird. Die (1) Gewichtung $w_{(n+1)j}$ wirkt in Abhängigkeit von deren Vorzeichen inhibitorisch oder exzitatorisch. Ein Gewichtswert von 0 bezeichnet keine Verbindung zwischen zwei Knoten. Die (2) Übertragungsfunktion Σ ermittelt über die Gewichtung der Eingabe die Netzeingabe net_j des künstlichen Neurons j . Die (3) Aktivierungsfunktion φ wird durch die Netzeingabe und dem (4) Schwellenwert Φ beeinflusst und bestimmt die Ausgabe des Neurons. Durch Addition des Schwellenwertes zur Netzeingabe wird die gewichtete Eingabe verändert [Niemeijer, 2017] [Haykin, 2007] [Zell, 1994].

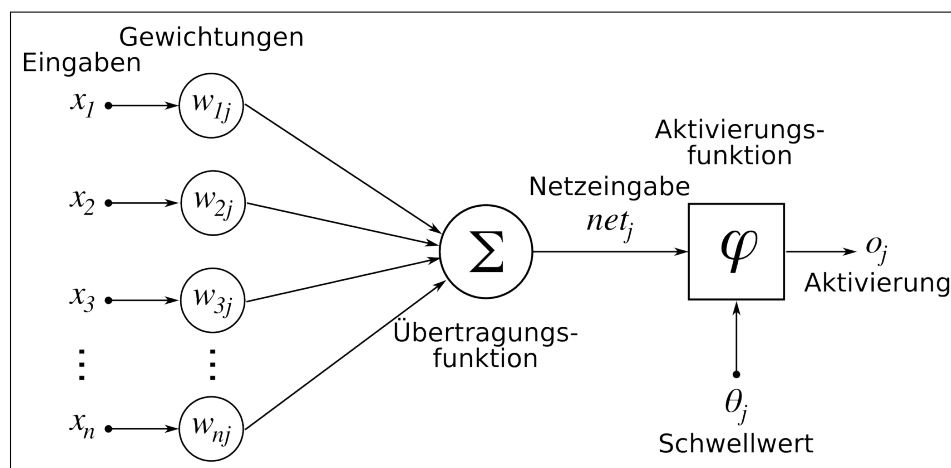


Abbildung 3.16: Graphische Darstellung eines künstlichen Neurons und den vier Basiselementen [Crislb, 2010].

Neuronale Netzwerke werden für die semantische Segmentierung verwendet. Die semantische Segmentierung bezieht sich auf den Prozess der Verknüpfung jedes Pixels in einem Bild mit einer Klassenbezeichnung. Diese Labels könnten eine Person, ein Auto, ein Objekt oder einen Schaden an einem Objekt darstellen. Die semantische Segmentierung kann als Bildklassifizierung auf Pixelebene eingeordnet werden (Abbildung 3.17).

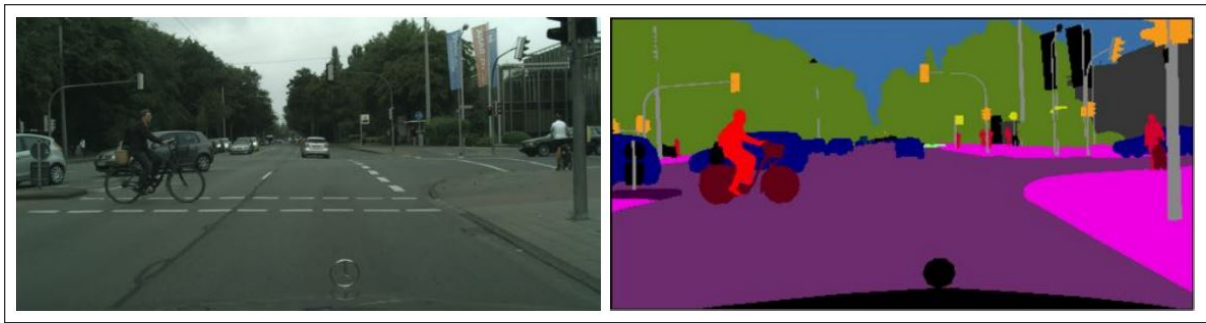


Abbildung 3.17: Semantische Segmentierung auf Pixelebene [Cordts u. a., 2016].

In einem Bild, das viele Autos enthält, werden durch die Segmentierung alle Autos als Autoobjekte gekennzeichnet. Eine separate Klasse von Modellen, die als Instanzsegmentierung bezeichnet wird, ist jedoch in der Lage, die einzelnen Objektinstanzen die in einem Bild erscheinen zu kennzeichnen [Mwiti, 2019].

Durch die semantischen Instanzsegmentierung (Abbildung 3.18) wird jedem Pixel eine Klasse zugewiesen und in weiterer Folge zwischen den Instanzen eine Klasse unterschieden.



Abbildung 3.18: Basis der Instanzsegmentierung [Cordts u. a., 2016].

Durch die Detektion von Instanzen erhält man eine zusätzliche semantische Information über die aufgenommene Szene. Durch die Objektdetektion wird zwischen den Objektinstanzen eine Klasse unterschieden. Eine Bounding-Box wird um das Objekt bestimmt, welche einer semantische Klasse zugeordnet wird (Abbildung 3.19). Die Bestimmung der Bounding-Box ist eine Regression. Vier Koordinaten des Rechtecks werden ermittelt, die den minimalen und maximalen Wert der X- und Y-Koordinaten des Objektes enthalten. Die Objektdetektion basiert, wie die semantische Segmentierung, auf künstlichen neuronalen Netzwerken [Niemeijer 2017, S. 12-19].



Abbildung 3.19: Jede Instanz einer Klasse im Bild wird Bounding-Box definiert [Cordts u. a., 2016].

Bei Bauwerksinspektionen werden die Größe, Tiefe und Länge der einzelnen Schäden über ein künstliches neuronales Netzwerk ermittelt. Die Bauwerksschäden werden durch semantische Segmentierung analysiert. Die Bilder werden pixelweise klassifiziert und in eine definierte Menge an Klassen zugewiesen. Die Bounding-Box umschließt mit einem Rechteck die maximale Größe der Bauwerksschäden.

Ein digitaler Zwilling verschafft einen klaren Gesamteindruck des Objektes und eine übersichtliche Präsentation von den Informationen der Objektdaten. Die Analyse der Inspektionsdaten erfolgt durch das neuronale Netzwerk. Der dokumentierte Bauwerkszustand kann für weitere Planungen und Maßnahmen genutzt werden.

4 Praktische Umsetzung zur Datenaufnahme

In Abschnitt 3 wurde beschrieben, welche Methoden für die Datenerfassung von dreidimensionalen Objekten möglich sind. An dem Referenzobjekt wurde zur Datengewinnung die Methode der scan- nenden Totalstation, des terrestrischen Laserscanners und der photogrammetrischen Bildaufnahme (Abschnitt 3.1.2, 3.1.3 und 3.2.1) ausgeführt. Die gewonnenen Daten, die Punktwolken, wurden hin- sichtlich ihrer Genauigkeit verglichen. Zusätzlich wurde die benötigte Zeit für die Datenerfassung und Datenauswertung wirtschaftlich analysiert.

4.1 Referenzobjekt: Landesbrücke in Takern I

Als Referenzobjekt (Abbildung 4.1) wurde der südliche Bereich der Landesbrücke in Takern I in der Gemeinde St. Margarethen an der Raab in der Steiermark ausgewählt. Dieses Objekt erwies sich als optimale Lösung, da die ländliche Umgebung den gesetzlichen Bestimmungen eines Drohnenflugs (Abschnitt 2) erfüllte und die terrestrischen Datenaufnahmen den alltäglichen Verkehr nicht negativ beeinflusste.



(a) Südwestliche Brückenansicht



(b) Südöstliche Brückenansicht

Abbildung 4.1: Referenzobjekt - Landesbrücke in Takern I der Gemeinde St. Margarethen an der Raab in der Steiermark.

4.2 Triangulation von Messpunkten mit einer Satzmessung

Die Satzmessung ist eine klassische Messmethode der Triangulation. Von einem Standpunkt werden Zielpunkte mehrfach und in beiden Kreislagen angezielt und gemessen. Dies ergab für die Richtung und Distanz das beste Ergebnis und es lässt sich eine höhere Genauigkeit der berechneten instrumen- tellen Koerrekturen erreichen.

Durch die Satzmessung wurden 4 Passpunkte (SP01-SP04) am Objekt und 6 Passpunkt (PP01- PP06) auf der Straßenoberfläche in der näheren Umgebung vom Objekt eingemessen. Diese Pass- punkte wurden in weitere Folge für die Stationierung der Messinstrumente verwendet.

Die Koordinaten der eingemessenen Passpunkte (österreichischen Bundesmeldenetz (BMN) mili- tärgeographisches Institut (MGI)-Referenzsystem Zone M34) sind im Anhang A.3.2 in der Tabelle A.7 aufgelistet.

4.3 Datenerfassung und Verarbeitung der terrestrischen Methoden

4.3.1 Scannenden Totalstation - Leica Nova MS60

Als scannende Totalstation wurde die Multistation von Leica Nova MS60 verwendet. Das Datenblatt der Leica Nova MS60 wird im Anhang A.2.1 in der Tabelle A.2 aufgelistet.

4.3.1.1 Terrestrische Datenaufnahme

Durch den Einsatz der Multistation „Leica Nova MS60“ ergaben sich viele Vorteile bei der Datenaufnahme. Die Multistation wurde durch die Passpunkte stationiert und orientiert. Markante Punkte der Brücke, Ecken und Kanten von dem Tragwerk, wurden polar eingemessen und als Kontrollpunkte für die Auswertung verwendet. Mit der Multistation wurde auch eine Bestandsaufnahme der näheren Umgebung durchgeführt.

Für die terrestrische 3D-Datenerfassung wurde die Scan-Funktion der Multistation verwendet. Durch mehrere Standpunkte ergab sich eine gute Lösung für den gesamten Scan in Bezug auf die Genauigkeit und der Aufnahmefrequenz, da das 3D-Punktwolkenergebnis aus dem Multistation Scan als Referenzpunktwolke für die Punktwolkenvergleiche verwendet wurde. Durch sieben Standpunkte war es möglich, das Referenzobjekt mit einer hohen Aufnahmefrequenz (Scan-Variante: Geschwindigkeit mit $1000 [Pte / s]$) auf der vorliegenden Distanz (max. Reichweite von $49.0 [m]$) mit einer optimalen Auflösung zu scannen. Es wurde drauf geachtet, dass sich die zu scannenden Polygon Flächen von jedem Standpunkt aus überlappen. Die Polygon Flächen wurden punktweise im Uhrzeigersinn definiert. Unter dem Tragwerk wurde die Datenaufnahme mit der Scan-Methode „Halbkugel“ durchgeführt, weil keine Polygon Fläche im Uhrzeigersinn bestimmt werden konnte.

Vor dem Scannen wurden folgende Einstellungen an der Multistation definiert.

1. Erstellen des Scan-Namens
2. Auswahl der Scan-Methode
 - (a) Polygon Fläche
 - (b) Halbkugel
3. Definieren der Scan-Variante
 - (a) Geschwindigkeit ($1000 [Pte / s]$, bis $300 [m]$)
 - (b) Leistung ($250 [Pte / s]$, bis $400 [m]$)
4. Festlegen der Raster für die Scan-Auflösung
 - (a) Winkel
 - (b) Distanz / Abstand
5. Definieren des minimalen und maximalen Abstands

Die einzelnen Scans wurden mit leicht variierenden Einstellungen durchgeführt (Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Einstellungen für die einzelnen Leica Nova MS60 Scans

Scan #	Auflösung		Dauer [min]	Abstand	
	Schrägdistanz [m]	Vertikal- Horizontalabstand [mm]		Min [m]	Max [m]
1	40.0	40.0 × 40.0	44	7.0	43.0
2	40.0	40.0 × 40.0	52	7.0	43.0
3	10.0	20.0 × 20.0	81	2.5	40.0
4	15.0	10.0 × 10.0	77	7.5	48.0
5	15.0	10.0 × 10.0	57	7.5	48.0
6	10.0	10.0 × 10.0	66	4.0	49.0
7	10.0	10.0 × 10.0	73	5.0	44.0

Der Vorteil vom Messinstrument ergab sich aus den vielen Möglichkeiten und Kombinationen eine Messmethoden zu erstellen.

4.3.1.2 Datenauswertung mit Leica Infinity

Die mit der Leica Nova MS60 aufgenommenen Messdaten wurden mit der kommerziellen Vermessungssoftware „Leica Infinity“ ausgewertet.

In Leica Infinity wurden zuerst die Grundeinstellungen festgelegt und anschließend die Koordinaten der Passpunkte und die einzelnen Messjobdaten importiert. Jede Stationierung wurde mit den gleichen Schritten ausgeführt.

1. Auswahl der Stationierung
2. Öffnen des Stationierungsassistent
3. Auswahl der Stationierungsmethode
 - (a) Freie Stationierung
4. Definieren der Beobachtungen
5. Berechnen der Stationierung

Von jedem Standpunkt wurde zusätzlich zu den einzelnen Beobachtungen eine Punktwolke gescannt. Die Koordinaten der einzelnen Punkte aus der Punktwolke wurden automatisch durch die Standpunktberechnung ermittelt. Die einzelnen ermittelten Punktwolken wurden in eine Punktwolken-gruppe geladen. Somit konnte eine gesamte Punktwolke aus den einzelnen Punktwolken (LAS-Format) exportiert werden.

4.3.1.3 Ergebnisdarstellung der Leica Nova MS60 Punktwolke

Die Punktwolken vom Leica Nova MS60 Gesamtskan wurde durch die kommerzielle Software „Leica Infintiy“ ausgewertet. Die Punktwolke aus dem terrestrischen Leica-Laserscan enthält 13.330.717 Punkte. Mit der Multistation von Leica ist es möglich, eine Polygonfläche zu definieren die im Anschluss gescannt werden soll. Durch diese Methode konnte das Objekt mit einigen Scans ohne die Umgebung gescannt werden. Die untere Seite von dem Tragwerk wurde mit der Methode „Halbkugel“ gescannt. Mit dieser Methode ist es nicht möglich eine Polygonfläche zu definieren. Dadurch

wurde ein Teil von der Umgebung, Sträucher und Bäume, mit aufgenommen. In der Abbildung 4.2 und 4.3 ist die Scanmethode in der Farbe Cyan dargestellt..

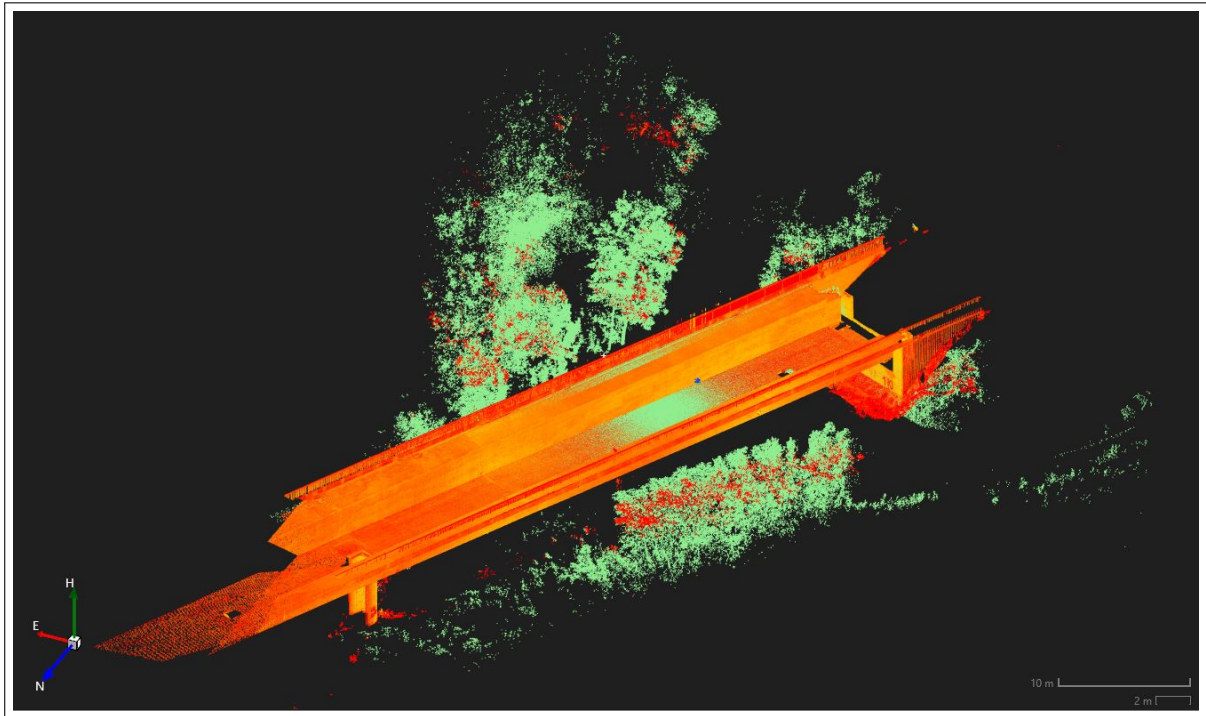


Abbildung 4.2: Ansicht aus der östlichen Perspektive von der Punktwolke in Leica Infintiy. Die Sträucher und Bäume neben dem Referenzobjekt wurden bei der Methode Halbkugel mit aufgenommen. Der Scan mit der Methode Halbkugel wird in der Farbe Cyan dargestellt.

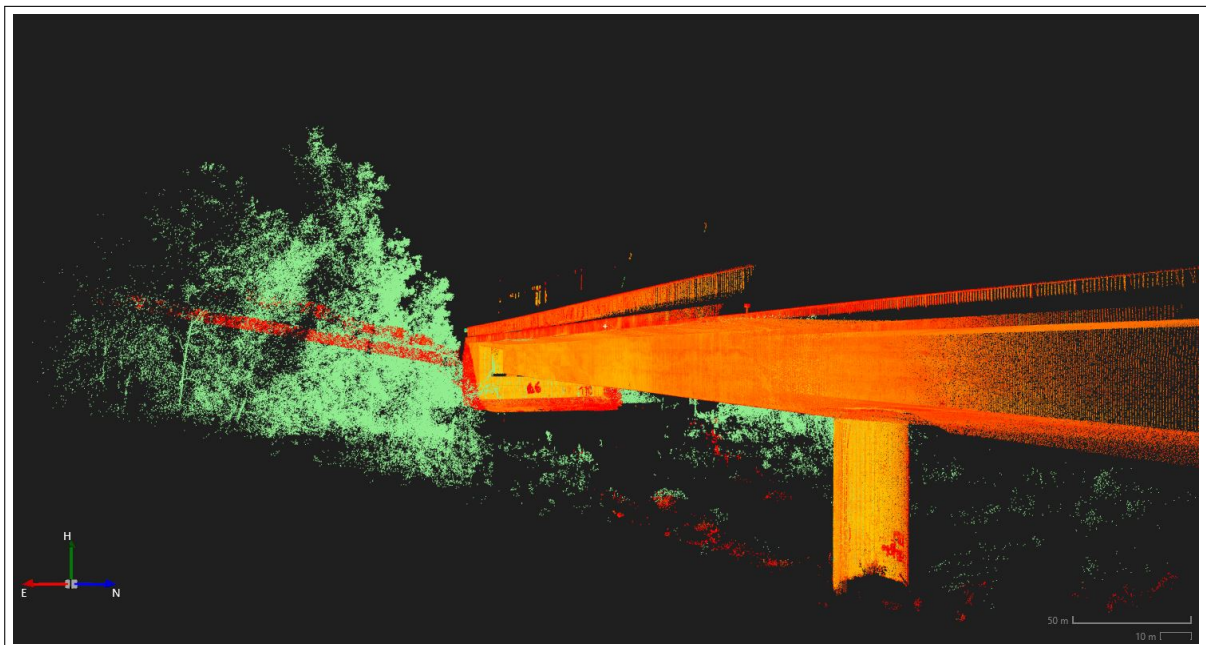


Abbildung 4.3: Ansicht aus der nördlichen Perspektive von der Punktwolke in Leica Infintiy. Die Umgebung wird in der Farbe Cyan dargestellt.

4.3.2 Terrestrischen Laserscanner - Faro Focus 3D X330

Die zweite terrestrische 3D-Datenerfassung erfolgte durch einen Laserscanner von der Firma Faro. Mit dem Typ „Focus 3D X330“ wurde das Referenzobjekt von zwei Standpunkten aus terrestrisch gescannt. Das Datenblatt von dem Faro Focus 3D X330 wird im Anhang A.2.2 in der Tabelle A.3 aufgelistet.

4.3.2.1 Terrestrische Datenaufnahme

Durch die hohe Aufnahmefrequenz auf große Distanzen wurde vom terrestrischen Laserscanner daher nur zwei Standpunkte für den Faro verwendet. Der Laserscanner wurde auf der östlichen und westlichen Brückenseite in der Mitte des aufzunehmenden Bereichs positioniert. Die orthogonale Entfernung zum Objekt war auf der östlichen Seite größer als auf der westlichen Seite. Auf der westlichen Objektseite waren Hindernisse, bestehend aus Sträuchern, kleinen Bäumen und einem Verkehrsspiegel, was eine optimale Positionierung einschränkte.

Für eine Georeferenzierung in das übergeordnete System der aufgenommenen Punktwolken wurden Zielmarken an verschiedenen Positionen am Objekt und an den Straßenpfosten mit einem Klebeband fixiert (Abbildung 4.4). Die Zielmarken wurden während des Scan-Vorgangs mit einer Totalstation polar eingemessen. Die Stationierung der Totalstation erfolgte wie im Abschnitt 4.3.1.1 über die Passpunkte. In Abbildung 4.4 sind die Referenzkugeln am Boden ersichtlich. Die Referenzkugeln ($\varnothing 139 [mm]$) wurden bei der Auswertung benötigt, um die zwei aufgenommenen Punktwolken miteinander zu verknüpfen. Die Referenzkugeln ermöglichen eine präzise Geometrie durch ein hohes Reflexionsverhalten der speziellen Oberflächenbeschichtung.



Abbildung 4.4: Ansicht auf den südöstlichen Scanbereich. Die Zielmarken (Orange markiert) wurden am Objekt und an den Straßenpfosten befestigt. Die Referenzkugeln (Gelb markiert), für eine Verknüpfung der beiden Punktwolken, wurden gut verteilt am Boden zwischen den Aufnahmen Standpunkten positioniert.

Vor dem Scannen wurden die Parameter und die Einstellungen für ein optimales Ergebnis über den Touchscreen definiert.

1. Erstellen des Scan-Namens
2. Auswahl des Profils
 - (a) Außen ... 20m (modifiziert)
3. Auflösung und Qualität
4. Definieren der Scan-Fläche
5. Sensoren wählen

Es gibt mehrere Varianten und Kombinationen für die Einstellungen um ein Objekt zu scannen. Die Punktzahl und die Scan-Dauer kann durch eine Änderung der Auflösung und/oder der Qualität verändert werden. Für die beiden Scans wurde eine Auflösung (1 / 1) und eine Qualität (3 ×) definiert. Die Genauigkeit der Daten werden durch die Änderung der Auflösung oder der Qualität nicht beeinflusst. Die definierten Einstellungen und daraus resultierenden Ergebnisse für die beiden Scans sind in der Tabelle 4.2 aufgelistet.

Tabelle 4.2: Einstellungen für die beiden Faro Focus 3D X330 Scans

Scan	Fläche	Horizontal	Vertikal	Abstand	Anzahl	Dauer
#	[Pkt]	[°]	[°]	[mm / 10 m]	[MPkte]	[min]
1	19483 × 10948	172.0	91.0	1.513	225.4	56
2	19229 × 11720	169.0	103	1.534	224.6	55

4.3.2.2 Datenauswertung mit Faro Scene

Mit der kommerziellen Software „Faro Scene“ erfolgte die Auswertung der Faro-Laser Daten. Die Software erwies sich als sehr strukturiert und benutzerfreundlich hinsichtlich der Symbolleistenanwendung [FARO-SCENE, 2020]. Die Durchführung fand wie folgt statt:

1. Projekt - Status der Verarbeitung, Registrierung und Projektpunktwolken
2. Importieren von Scans, Objekten und Bildern
3. Verarbeitung
4. Registrierung
 - (a) Scans auswählen
 - (b) Ziele markieren
 - (c) Registrieren und überprüfen
5. Erkunden
 - (a) Projekt begutachten
 - (b) Übersichtskarten erstellen
 - (c) Projektpunktwolken

6. Exportieren der Projektpunktwolke

(1) Am Anfang wurde ein Projekt erstellt und die allgemeinen Einstellungen für die Projekteigenschaften definiert. Im (2) Schritt erfolgt der Import der beiden Scans in ein Cluster (Ordner in denen sich Scans befinden). (3) Anschließend erfolgte die Verarbeitung. Bei der Datenverarbeitung wurden die beiden Scans auf Fehler untersucht und konfiguriert. In den Einstellungen bei der Verarbeitung wurde der Wert der aktiven Kugelradien ($\varnothing 139 [mm]$) eingegeben. (4) Anschließend konnte die manuelle Registrierung gestartet werden. Jeder Scan wurde in einem Anzeigebereich dargestellt (Abbildung 4.5). Im Anzeigebereich konnte navigiert und Objekte ausgewählt werden. Es wurden die Zielmarken als Schachbrett und die Referenzkugeln als Kugeln markiert. Der Name der Zielmarken musste mit der ID aus dem Koordinaten CSV-File, indem die globalen Koordinaten gespeichert waren, übereinstimmen. (5) Über Import wurden die MGI 34 Koordinaten der Zielmarken (ID, X, Y, Z) als Objekt eingelesen. Durch diesen Schritt erfolgte die Berechnung vom lokalen relativen System in das globale absolute System. (6) Beim Exportieren der Punktwolken wurde das Format, der Dateiname und das Koordinatensystem festgelegt.

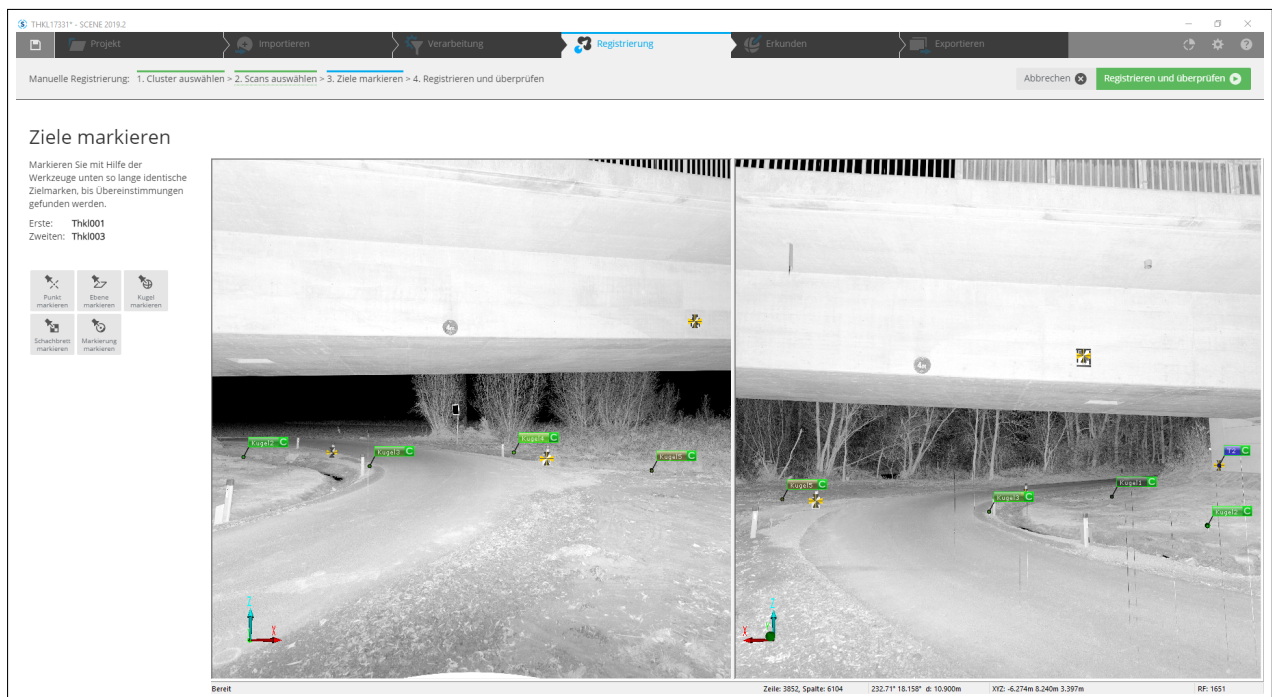


Abbildung 4.5: Markierung der Zielmarken (Gelb) und der Referenzkugeln (Grün) in jedem Anzeigefenster für die beiden Scans. Es war drauf zu achten, in beiden Scans das gleiche Objekt zu definieren.

4.3.2.3 Ergebnisdarstellung der Faro Focus 3D X330 Punktwolke

In der Software Faro Scene war es möglich, Screenshots aus unterschiedlichen Perspektiven zu erstellen und in ein gewünschtes Format zu exportieren (Abbildung 4.6 und 4.7).



Abbildung 4.6: Ansicht aus der östlichen Perspektive auf die Punktwolke in Faro Scene. Durch Eingabe eines Hz- und V-Winkelwert konnte ein Kegelbereich definiert und gescannt werden. Durch die Aufnahme der näheren Umgebung wurde die Datenmenge sehr groß.

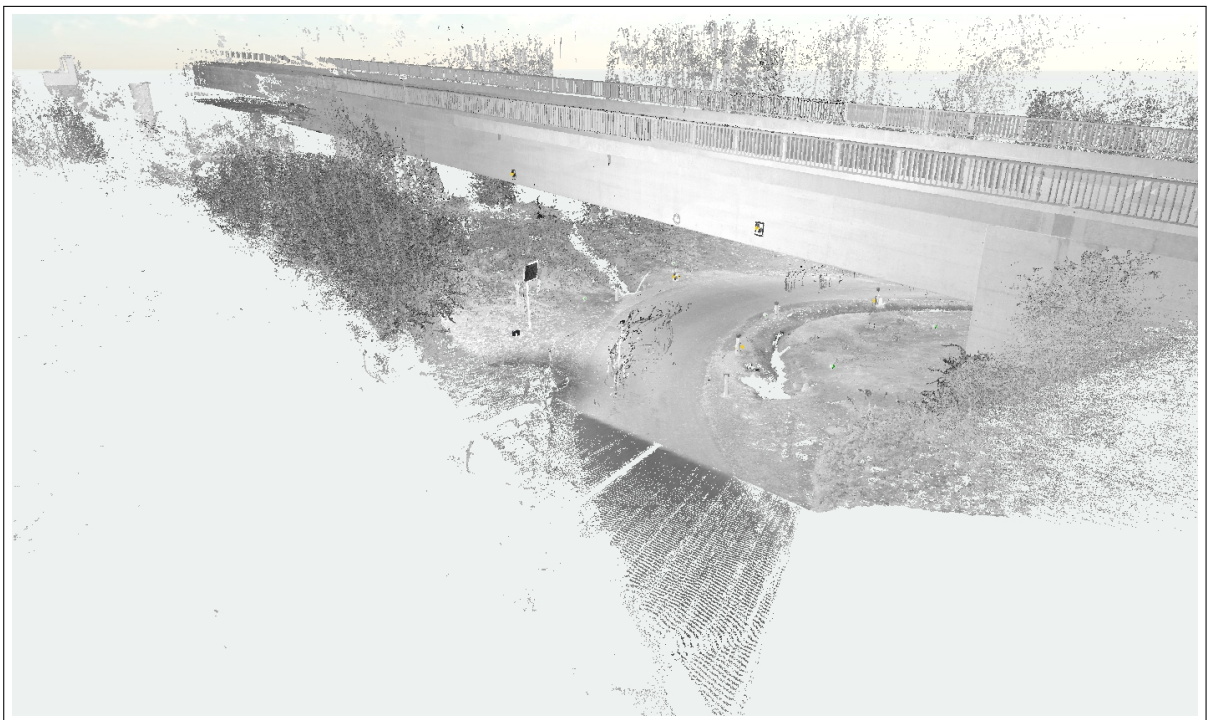


Abbildung 4.7: Ansicht aus der westlichen Perspektive von der Punktwolke in Faro Scene. Sträucher, Verkehrszeichen und die Oberfläche der näheren Umgebung wurden auch gescannt.

Die gesamte Punktwolke aus dem terrestrischen Faro-Laserscan enthält 248.613.340 Punkte. Dieses große Ergebnis ergab sich einerseits aus der hohen Aufnahmefrequenz und andererseits durch den Aufnahmebereich der näheren Umgebung.

Mit der Software Faro Scene war es möglich, eine Übersichtskarte über das gesamte Scanprojekt zu erstellen und als Tagged Image File Format (TIFF) oder als Drawing Interchange File Format (DXF) zu exportieren (Abbildung 4.8).



Abbildung 4.8: Die Übersichtskarte ist eine Draufsicht des Projektgebietes. Die Karte wurde als Bild in Graustufen dargestellt. Die blauen kreisförmigen Markierungen repräsentieren die beiden Faro Focus 3D X330 Standpunkte.

4.4 Datenerfassung und Verarbeitung der photogrammetrischen Methode

4.4.1 Photogrammetrische Bildaufnahme-DJI Phantom 4 RTK

Die photogrammetrische Datenerfassung erfolgte durch eine Befliegung des Referenzobjektes mit einer Drohne der Firma DJI vom Typ „Phantom 4 RTK“. Das Datenblatt der DJI Phantom 4 RTK wird im Anhang A.2.3 in der Tabelle A.4 aufgelistet.

4.4.1.1 Photogrammetrischen Bildaufnahmen

Die Befliegung wurde am 24. Jänner 2020 bei optimalen Wetterverhältnissen durchgeführt. Kodierte Zielformen (sog. Targets) wurden auf Papier (DIN Format A4) gedruckt und am Referenzobjekt angebracht. Die Targets dienten als zusätzliche Information und Kontrolle bei der Auswertung. Die Targets konnten an der glatten Betonoberfläche bei niedriger Tagestemperatur nur schwer ange-

bracht werden. Insgesamt wurden 16 Targets am Objekt angebracht und reflektorlos durch drei Stationierungen eingemessen. Die drei Stationierungen waren notwendig um einen spitzen Horizontalwinkel zu vermeiden.

Die Ergebnisse der Koordinaten der Zielmarken sind im Anhang A.3.4 in der Tabelle A.9 aufgelistet.

4.4.1.2 Datenauswertung mit Agisoft Metashape Professional

Die Auswertung der photogrammetrischen Aufnahmen zur Bestimmung der geometrischen Kenngrößen und zur Erstellung der georeferenzierten Punktwolke erfolgte mit der kommerziellen Software „Agisoft Metashape Professional“. Mithilfe des Abbildungsverfahrens Structure-from-Motion (SfM) von Agisoft Metashape Professional ([Agisoft, 2019]) konnte eine maßstabsgetreue georeferenzierte 3D-Punktwolke generiert werden.

Der Arbeitsablauf des SfM-Verfahrens erfolgte durch:

1. Laden der Bilddaten aus dem DJI Phantom 4 RTK Flug in eine Gruppe (Chunk)
 - (a) Konvertieren der Referenz
 - (b) Definieren der Referenzeinstellungen
 - (c) Beurteilen der Bildqualität
2. Ausrichten der Bilder
3. Erkennen der Markierungen
 - (a) Hinzufügen der Zielmarkenkoordinaten
4. Optimieren der Kameraausrichtung
5. Erneutes Ausrichten der Bilder
6. Dichte Punktwolke erzeugen
7. Exportieren der Punktwolke

(1) Die aufgenommenen Bilddaten aus dem DJI Phantom 4 RTK Flug wurden in eine Gruppe importiert. (1 a) Über den Befehl „Referenz » Referenz konvertieren“ wurden die WGS 84 Bildkoordinaten in das MGI (Ferro) / Austria GK East Zone (EPSG::31253) Koordinatensystem transformiert. (1 b) Über die Referenzeinstellungen wurde das Koordinatensystem für die Bilddaten, die Kamerareferenz und die Markierungsreferenz festgelegt. Die Drehwinkel wurden mit „Omega, Phi, Kappe“ definiert. (1 c) Agisoft Metashape ermittelt die Bildqualität für jedes einzelne Bild. Der Wert des Parameters wurde auf Grundlage des Schärfegrads von dem am stärksten fokussierten Teil des Bildes berechnet. [Agisoft, 2019] empfiehlt, Bilder mit einem Qualitätswert unter 0.6 zu entfernen.

Anschließend wurden im Schritt (2) die Bilder zueinander ausgerichtet. In der Abbildung 4.9 sind die optimalen Einstellungen für den Befehl „Bilder ausrichten“ dargestellt.

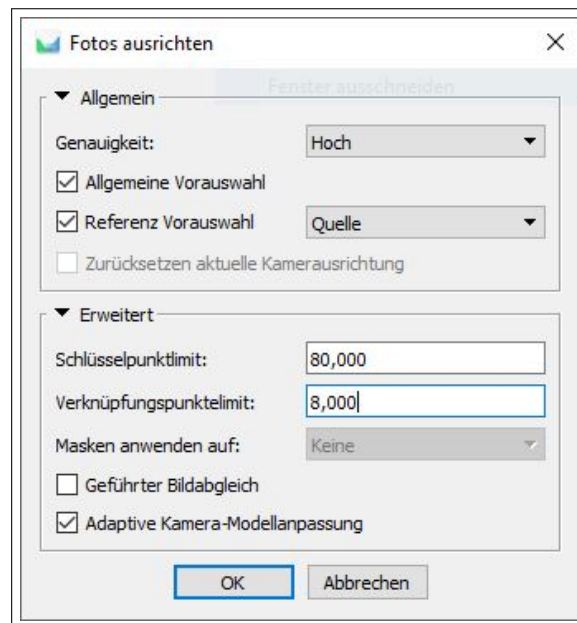


Abbildung 4.9: Die optimalen Einstellungen zum Ausrichten der Bilder zueinander ergab sich aus mehreren Versuchen.

Wie in der Abbildung 4.9 zu sehen ist, wurde ein Quellfoto hoch skaliert, um einen Verknüpfungspunkt genau zu lokalisieren. Die Einstellungen von der Genauigkeit auf das höchste Level zu stellen hat den Vorteil sehr scharfe Bilddaten zu erhalten, aber auch den Nachteil, dass sich die Verarbeitungszeit erhöht. Diese Einstellungen werden für Forschungszwecke verwendet. Der Befehl „Geführter Bildabgleich“ wurden nicht aktiviert, da es nur für Bilddaten ab einer Größe von 50 bis $100 + [M Pix]$ empfohlen wird. Es erzeugt überschüssige Verknüpfungspunkte, die vom Merkmalspunkt-Detektor übersehen worden sind. Durch Aktivierung der Option „Adaptive Kamera-Modellanpassung“ wurde eine automatische Auswahl von Kameraparametern durch Agisoft Metashape berechnet. Diese ermittelten Werte dienen als Hilfe für die Optimierung der Kameraparameter. Die Verknüpfungspunkte der ausgerichteten Bildern zeigen die ersten Umrisse vom Referenzobjekt.

(3) Anschließend wurden die Targets über den Befehl „Werkzeug » Markierungen » Markierungen erkennen“ automatisch ermittelt. Durch Importieren der Koordinaten-Files wurden die 16 Targets mit den eingemessenen Koordinaten versehen.

(4) Ein wichtiger Schritt erfolgt über die Optimierung der Kameraausrichtung. Agisoft Metashape berechnete die geschätzten Kameraparameter in der Bildausrichtung (innere Orientierung). Die Ergebnisse der Kameraparameter können über die Kameraeinstellungen begutachtet werden. Die Werte in der oberen Dreiecksmatrix beschreiben die Korrelation zwischen den einzelnen Parametern. Wie in der Tabelle 4.3 zu sehen ist, ergaben die Fehler von der berechneten Brennweite f , die Hauptpunktkoordinaten $c_x c_y$ und die radialen Verzerrungen $K1$ und $K2$ einen kleinen Wert und korrelierten sehr gering. Die Affinitäts- und Schräg-Transformationskoeffizienten ($b1 b2$), die Koeffizienten der radialen Verzerrung ($K3 K4$) und die Koeffizienten der tangentialen Verzerrung ($P1 P2 P3 P4$) korrelierten miteinander stark und wurden für eine neue Berechnung nicht aktiviert. Wenn der Korrelationswert zwischen 0.6 und 1.0 lag und der Fehler groß war, wurde der Parameter bei der Berechnung deaktiviert.

Tabelle 4.3: Korrelation der Verzerrung von der DJI Phantom 4 RTK Kamera

	Ergebnis	Fehler	F	C_x	C_y	$K1$	$K2$
F	3644.110	0.0563822	1.00	-0.02	0.26	0.24	0.10
C_x	0.356679	0.0385825		1.00	-0.01	-0.01	0.01
C_y	13.84990	0.0369454			1.00	0.04	0.01
$K1$	-0.00368	$1.95416 \cdot e^{-05}$				1.00	-0.87
$K2$	-0.00036	$2.49373 \cdot e^{-05}$					1.00

Die berechneten Kameraparameter wurden im Menüpunkt „Kamera-Kalibrierung“ aus den angepassten Parametern als Textdatei exportiert. Diese Werte wurden als neue Anfangswerte importiert und als fixe Parameter definiert. Diese Werte wurden für die weiteren Schritte verwendet.

In (5) wurden alle Bilder mit den fixierten Kameraparametern und den detektierten Targets erneut ausgerichtet. Die ausgeglichenen Werte der Bilder (Rechts-, Hochwert, Höhe, Omega, Phi, Kappa und die dazugehörigen Genauigkeiten) wurden als Textfile exportiert und als Ausgangsdaten importiert. Die Genauigkeiten der ausgeglichenen Bildpositionen sind in der Tabelle 4.4 aufgelistet.

Tabelle 4.4: Durchschnittliche Genauigkeiten der ausgeglichenen Bildparameter

	Mittelwert \bar{x}	Standardabweichung s	Einheit
Rechtswert (X)	0.86	0.33	[mm]
Hochwert (Y)	0.98	0.59	[mm]
Höhe (Z)	0.89	0.26	[mm]
Omega (ω)	31.36	28.50	[sec]
Phi (ϕ)	17.77	7.31	[sec]
Kappa (κ)	33.20	28.04	[sec]

Die markierten Targets dienten als zusätzliche Kontrolle für die ausgeglichenen Bilddaten. Die terrestrisch eingemessenen Koordinaten der Targets hatten in den ausgeglichenen Bildern eine durchschnittliche Genauigkeit von 0.86 [mm] im Rechtswert, 0.98 [mm] im Hochwert und 0.89 [mm] in der Höhe. Der durchschnittliche Fehler lag für den Rechtswert bei 4.9 [mm], den Hochwert bei 3.4 [mm], die Höhe bei 5.9 [mm]. Der durchschnittliche Pixelfehler lag bei 0.44 [pix].

In Abbildung 4.10 (a) wird der Verzerrungsplot für die Residuen dargestellt. Es sind in den Bildecken und im Zentrum größere Residuen zu erkennen. In den Bildecken sind Residuen immer größer. Die Residuen im Zentrum sind gering und sind für die DJI-Kamera kein großer Nachteil. Der gesamte Verzerrungsplot (Abbildung 4.10 (b)) ist zentral verteilt.

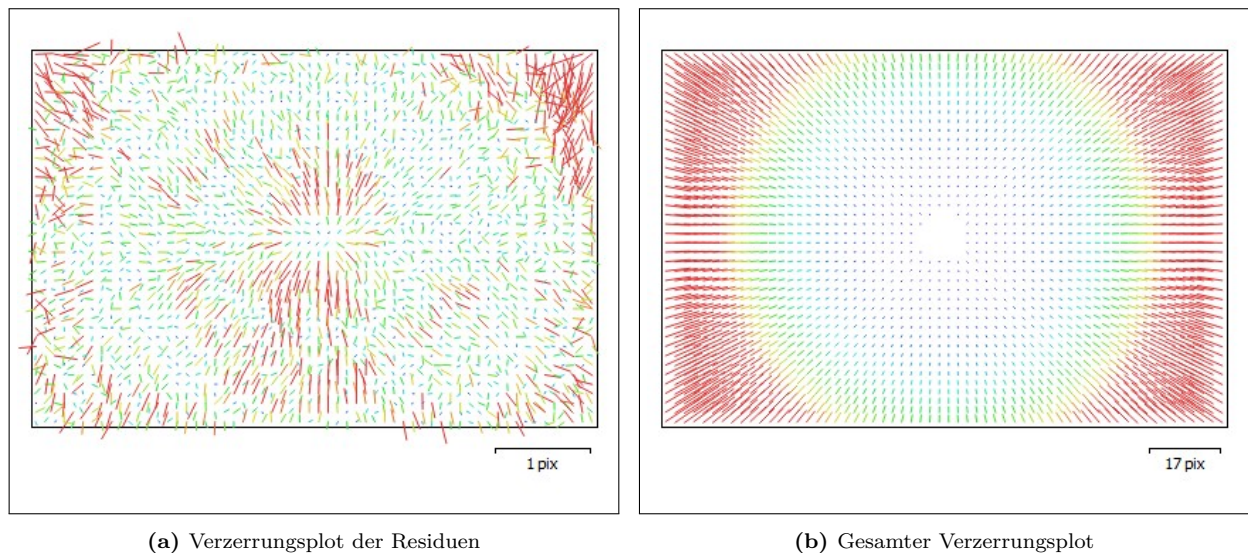


Abbildung 4.10: Verzerrungsplot von der DJI Phantom 4 RTK Kamera nach der Kamera-Kalibrierung

Die Punktwolke wurde im Schritt (5) erzeugt. In der Abbildung 4.11 sind die optimalen Einstellungen für den Befehl „Dichte Punktwolke erzeugen“ dargestellt. Bei den allgemeinen Einstellungen wurde die Qualität der Punktwolke auf „Hoch“ gesetzt.

Im Rahmen der Rekonstruktion dichter Punktwolken berechnet Agisoft Metashape Tiefenkarten für jedes einzelne Bild. Aufgrund einiger Faktoren, wie z. B. verrauschte oder schlecht fokussierte Bilder, kann es zu Ausreißern zwischen den Punkten kommen. Um die Ausreißer auszusortieren, verfügt Metashape über mehrere eingebaute Filteralgorithmen. In den erweiterten Einstellungen wurde die Tiefenfilterung auf den Modus „Moderat“ eingestellt. Der Modus der moderaten Tiefenfilterung bringt Ergebnisse, die zwischen dem milden und dem aggressiven Ansatz liegen.

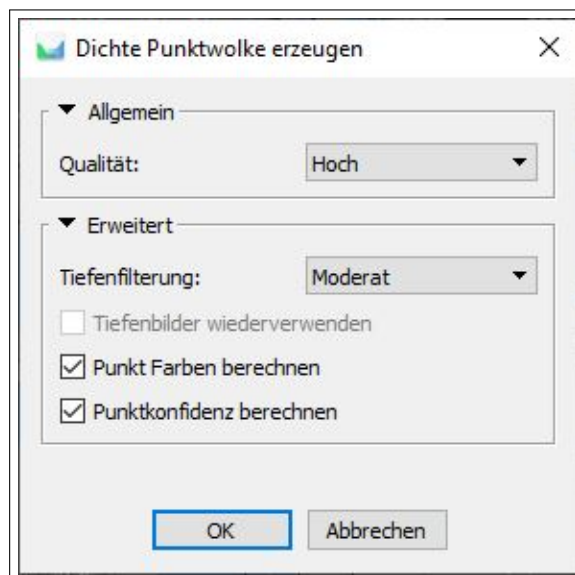


Abbildung 4.11: Die optimalen Einstellungen zum Erstellen einer dichten Punktwolke. Mit den Einstellungen für die Tiefenfilterung kann experimentiert werden, wenn Zweifel an dem Ergebnis liegen.

(6) Die erstellte Punktwolke wurde über „Exportieren » Punkte exportieren“ als File (LAS-Format) abgespeichert.

4.4.1.3 Ergebnisdarstellung der DJI Phantom 4 RTK Punktwolke

Die gesamte Punktwolke aus dem photogrammetrischen SfM-Verfahren enthält 130.340.229 Punkte. Dieses große Ergebnis wurde durch die genaue und hohe Einstellungen bei der Auswertung erzielt. Auf der Tragwerksunterseite konnte keine glatte Oberfläche erstellt werden. Diese fehlerhafte Oberfläche wurde einerseits durch schlecht aufgenommene Bilddateien und andererseits durch fehlende Bildinformationen erreicht.

In Abbildung 4.12 und 4.13 wurde die Punktwolke dargestellt. Die Sträucher und Bäume aus der Umgebung sind in der gesamten Punktwolke gut dargestellt. Dies liegt an der photogrammetrischen Auswertung der Bilddateien.

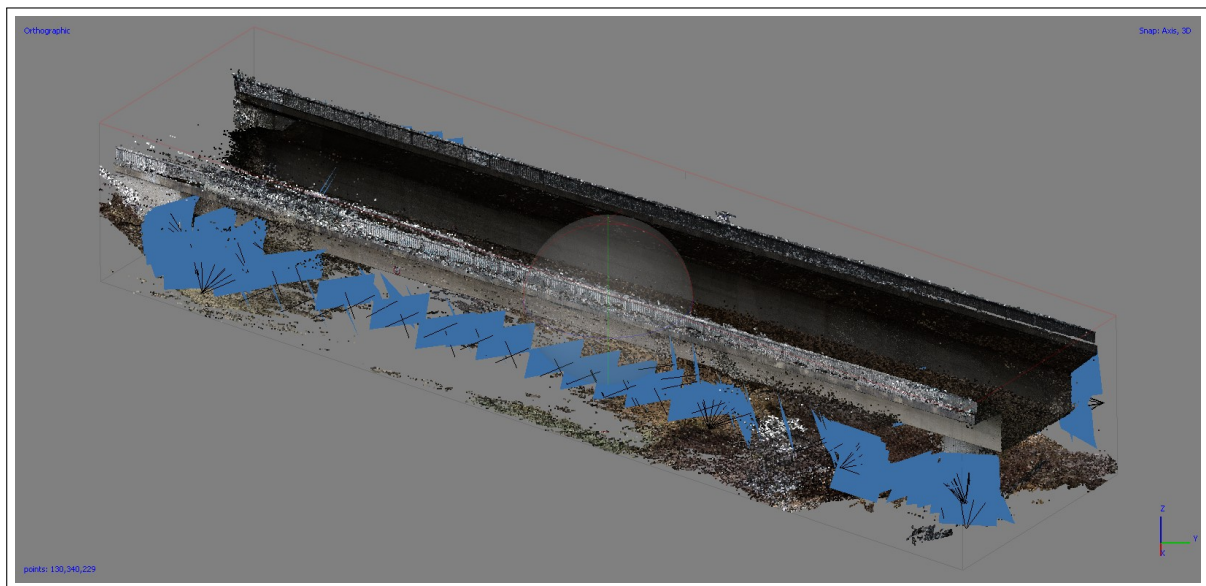


Abbildung 4.12: Punktwolkenansicht aus westlicher Perspektive mit Aigsoft Metashape. Ein Teil der Oberfläche in der näheren Umgebung wurde mit ausgewertet. Es sind auch die Aufnahmepositionen der DJI Phantom 4 RTK Kamera in blauer Farbe dargestellt.

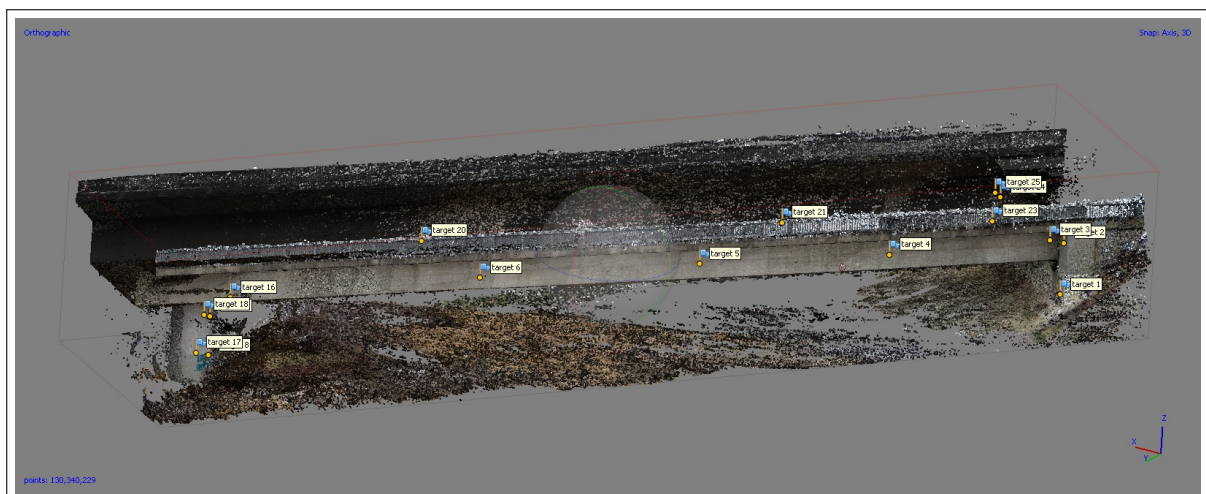


Abbildung 4.13: Punktwolkenansicht aus östlichen Perspektive mit Aigsoft Metashape. Ein Teil der Oberfläche in der näheren Umgebung wurde mit ausgewertet. Die Positionen der 16 Targets werden auch auf der Punktwolke abgebildet.

4.5 Analyse der Punktwolken

Nach der Erstellung der drei Punktwolken von dem Referenzobjekt wurden die Ergebnisse für eine Analyse vorbereitet.

4.5.1 Bearbeitung und Filtern der Punktwolken

Bei allen drei Auswertergebnissen war die nähere Umgebung in der Punktwolke enthalten. Mit der freien Software „Cloud Compare“ wurden die Punktwolken weiter bearbeitet. Die überflüssigen Punktbereiche wurden mit Polygonflächen aus der Punktwolke geschnitten. Die Polygonflächen wurden in AutoCAD erstellt und als DXF-Format exportiert. Dieses Format kann in Cloud Compare importiert werden. Zuerst wurde aus der Vogelperspektive eine rechteckige Polygonfläche um das Referenzobjekt geladen und alles entfernt was sich außerhalb der Fläche befand. Danach erfolgten aus westlicher Ansicht eine Entfernung der überflüssigen Punkte oberhalb und unterhalb der Brücke. Diese importierten Polygonflächen wurden für die Bereinigung der größeren Flächen verwendet. Kleinere Stellen wurden händisch bearbeitet, um keine Informationen zu verlieren, die für die Auswertung wichtig waren.

Die Punktwolken, besonders das Ergebnis aus der Faro Fokus 3D X330 und DJI Phantom 4 RTK Auswertung, hatten auch nach der Bereinigung der Umgebung noch eine sehr hohe Anzahl von Punkten. Die Anzahl der Punkte wurde in Cloud Compare mit dem Subsample-Befehl verringert. Mit der räumlichen Methode wurden Punkte, die einen Abstand von 1 [cm] unterschritten, aus der Punktwolke entfernt. Die unterabgetastete Wolke ist eine Teilmenge aus der Eingabewolke. Die Punkte werden nicht verschoben und behalten ihrer ursprünglichen Eigenschaften.

In der Tabelle 4.5 sind die Werte der Punktwolken aufgelistet.

Tabelle 4.5: Anzahl der Punkte in den einzelnen Punktwolken von der Aufnahme bis zum Vergleich

Punktanzahl der Wolken			
Auswertung	Original	Bereinigt	Gefiltert
Leica Nova MS60	13, 330, 717	12, 775, 223	4, 402, 599
Faro Focus 3D X330	248, 613, 340	104, 340, 901	4, 761, 424
DJI Phantom 4 RTK	130, 340, 229	105, 010, 107	7, 260, 599

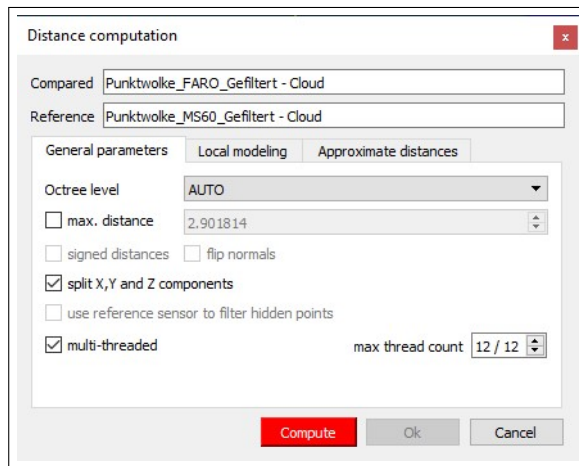
4.5.2 Punktwolkenvergleich

Nach dem Bereinigen und Filtern der einzelnen Punktwolken, wurde in Cloud Compare über das Menü „Werkzeug » Entfernungen » Wolken / Wolken Abstand“ der Punktwolkenvergleich durchgeführt. Es konnten immer nur zwei Punktwolken miteinander verglichen werden. Die Referenzwolke und die Vergleichswolke mussten definiert werden. Die Entfernungen von jedem Punkt aus der Vergleichspunktvolke werden zur Referenzpunktvolke relativ berechnet.

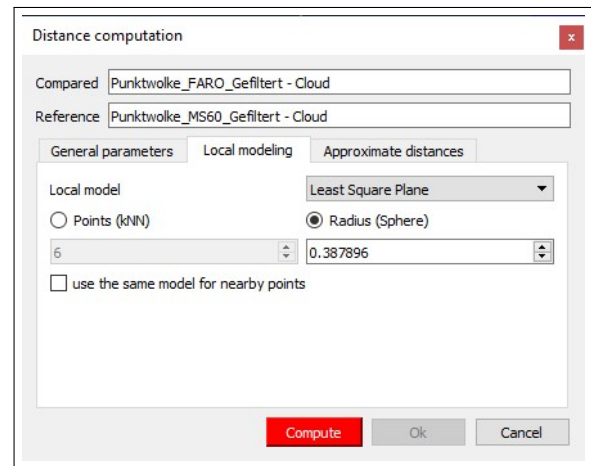
Als Referenzpunktvolke wurde bei beiden Vergleichen die Punktwolke aus dem Leica Nova MS60 Scan verwendet. Es wurde eine lokale Modellierungsstrategie angewendet, da die Referenzpunktvolke nicht die größte Ausdehnung und die höchste Dichte hatte (Abschnitt 3.4). Die Aufteilung der Oktaven wurde auf automatische gesetzt, somit ermittelte Cloud Compare den optimalen Wert für die Zerteilung von dem Objekt. Durch Aufspalten der drei Komponenten des Abweichungsvektors konnte die absolute Distanz in X-, Y- und Z-Richtung berechnet werden. Für die lokale Modellie-

rung wurde die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Der Radius für die lokale Modellierung wurde von Cloud Compare vorgeschlagen. Bei einer Verkleinerung des Radius veränderte sich das Ergebnis nicht.

Die Einstellungen für den Vergleich der Leica Nova MS60 Referenzpunktvolke und der Faro Focus 3D X330 Vergleichspunktvolke sind in den Abbildung 4.14 (a) (b) und die Einstellungen für den Vergleich der Leica Nova MS60 Referenzpunktvolke und der DJI Phantom 4 RTK Vergleichspunktvolke sind in der Abbildung 4.15 (a) (b) abgebildet.

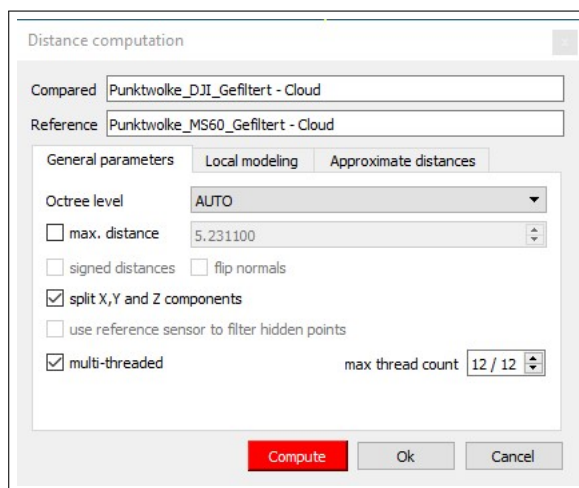


(a) Allgemeine Parameter

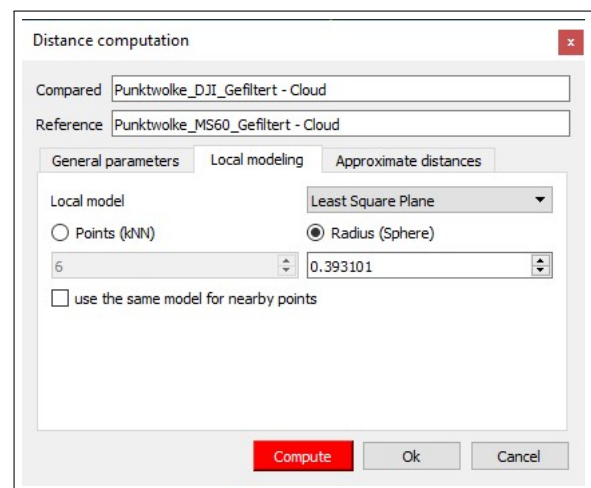


(b) Lokale Modellierung

Abbildung 4.14: Grundeinstellungen für den Punktwolkenvergleich der Leica Nova MS60 Referenzpunktvolke und der Faro Focus 3D X330 Vergleichspunktvolke



(a) Allgemeine Parameter



(b) Lokale Modellierung

Abbildung 4.15: Grundeinstellungen für den Punktwolkenvergleich der Leica Nova MS60 Referenzpunktvolke und DJI Phantom 4 RTK Vergleichspunktvolk.

Bei beiden Punktwolkenvergleiche wurde die gesamte Punktwolke von dem Referenzobjekt. Nach dem Punktwolkenvergleich wurden die einzelnen Brückenprofile aus der Ergebniswolke entfernt und auf Ausreißer untersucht.

4.5.3 Segmentierung der Punktwolke in vier Profile

Für eine Analyse von den Punktwolkenvergleichen wurden vier Profile aus dem gesamte Punktwolkenvergleich extrahiert. Dieser Vorgang wurde, gleich wie bei der Bearbeitung der Punktwolke, mit Polygonflächen durchgeführt. Die Daten der vier Profile wurden als Textdatei abgespeichert. In der Abbildung 4.16 sind die vier Polygonprofile in Cloud Compare importiert worden.

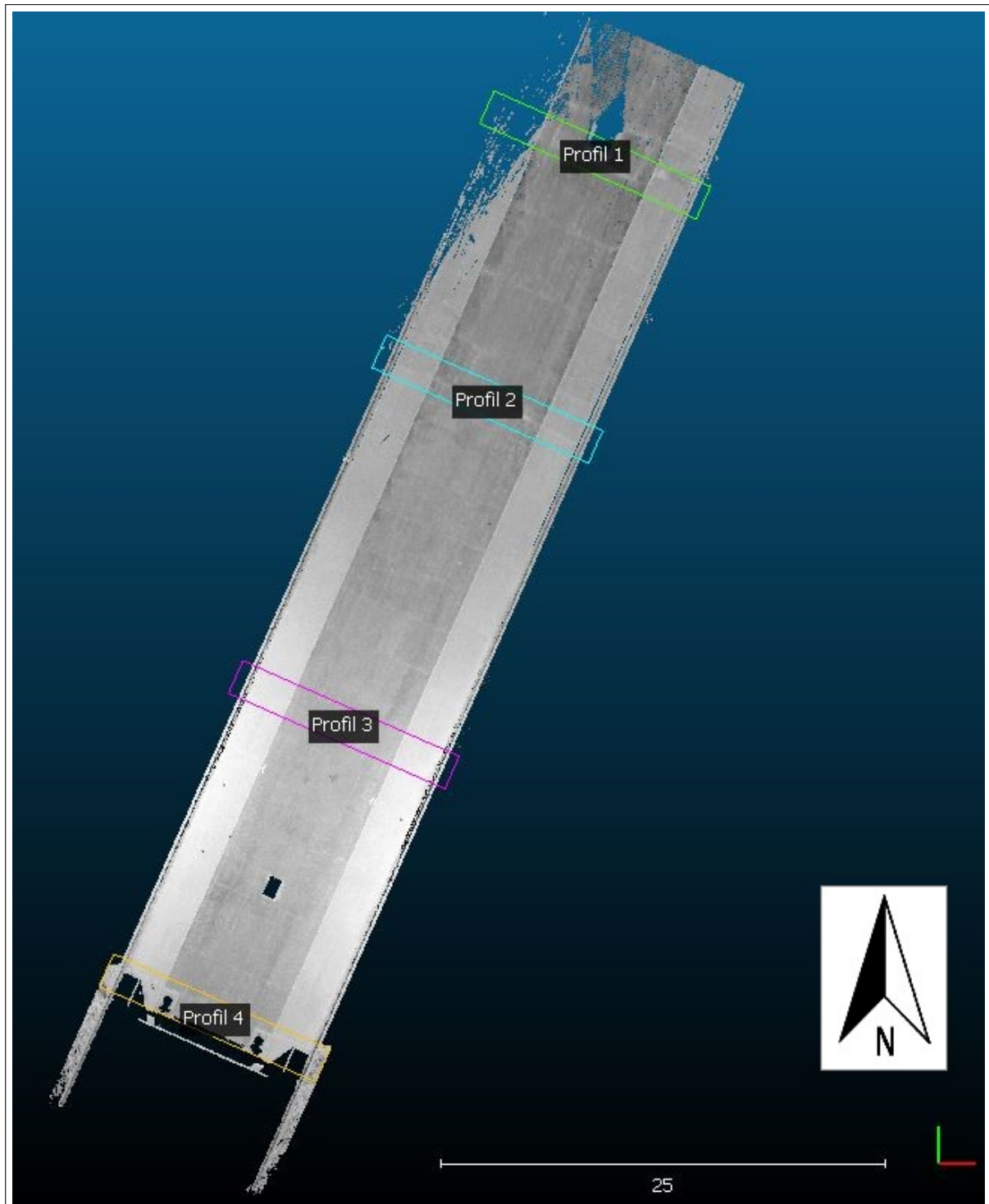


Abbildung 4.16: Ansicht der vier Profile aus der Vogelperspektive an der Faro Punktwolke

4.5.4 Überprüfung auf Messfehler

Die Ergebnisse aus den Punktwolkenvergleichen (vier Profilen pro Vergleich) wurden als Textdatei exportiert und mit der Open-Source Software „Spyder“ in der Programmiersprache „Python“ auf Ausreißer untersucht. Zur Erkennung und Eliminierung von Ausreißer wurde der Ausreißertest nach Grubb angewandt. Der statische Test untersucht die Werte der X-, Y-, Z-Komponente und den Wert der absoluten Differenz. Das Signifikanzniveau α wurde mit 0.001 festgelegt, was eine Abweichung von 3σ vom Erwartungswert erlaubte. Es wurde von allen Werten x_i der Differenzbetrag zum Mittelwert \bar{x} ermittelt und durch die Standardabweichung s dividiert. War dieser Wert größer als die 3σ Schranke, wurde der Wert als Ausreißer erkannt und entfernt. Bei den absoluten Differenzbeträgen (nur positive Werte) wurde ein einseitiger Test durchgeführt. Die drei Komponenten von dem Absolutvektor wurden mit einem zweiseitigen Test geprüft. Der Unterschied von einem einseitigen und einem zweiseitigen Test liegt in der Berechnung der Varianz s^2 und der Standardabweichung s in der Anzahl der Freiheitsgrade n .

4.5.5 Graphische und numerische Ergebnisse aus der Datenanalyse

Die numerischen und graphischen Ergebnisse aus der Datenanalyse von dem Punktwolkenvergleich des Brückenprofils 2 sind in dem Abschnitt 4.5.5.1 und 4.5.5.2 aufgelistet und dargestellt. Für jede Differenz und die dazugehörigen Achskomponenten wurde der Mittelwert \bar{x} und die Standardabweichung s berechnet. Daraus konnte mit der 3σ -Faustregel eine linke und rechte Schranke ermittelt werden. Somit ergab sich eine 99.7% Wahrscheinlichkeit, dass die ermittelten Werte signifikant sind. Auch die maximalen und minimalen Werte wurden aufgelistet, um zu zeigen in welchen Bereichen sich die Differenzwerte bewegen.

Die graphische Darstellung erfolgt für jeden Vergleich von jedem Profil gleich. Zuerst werden die drei Achskomponenten untereinander dargestellt. Durch diese Abbildung wird sofort ersichtlich, entlang welcher Achse die absolute Häufigkeit am höchsten ist und in welchen Bereichen sich die Abweichungen von den einzelnen Achskomponenten bewegen. Danach werden die Abweichungen und die absolute Häufigkeit von jeder einzelnen Achse und von der absoluten Differenz einzeln dargestellt um die Dichtefunktion deutlicher zu erkennen. Die letzte Abbildung beinhaltet eine dreidimensionale Darstellung von dem Brückenprofil. Es werden die Werte der Differenzen farblich dargestellt, um zu erkennen in welchen Bereichen sich welche Differenzen befinden. Durch die Maßstabsleiste kann die absolute Größe dem Brückenprofil zugeordnet werden.

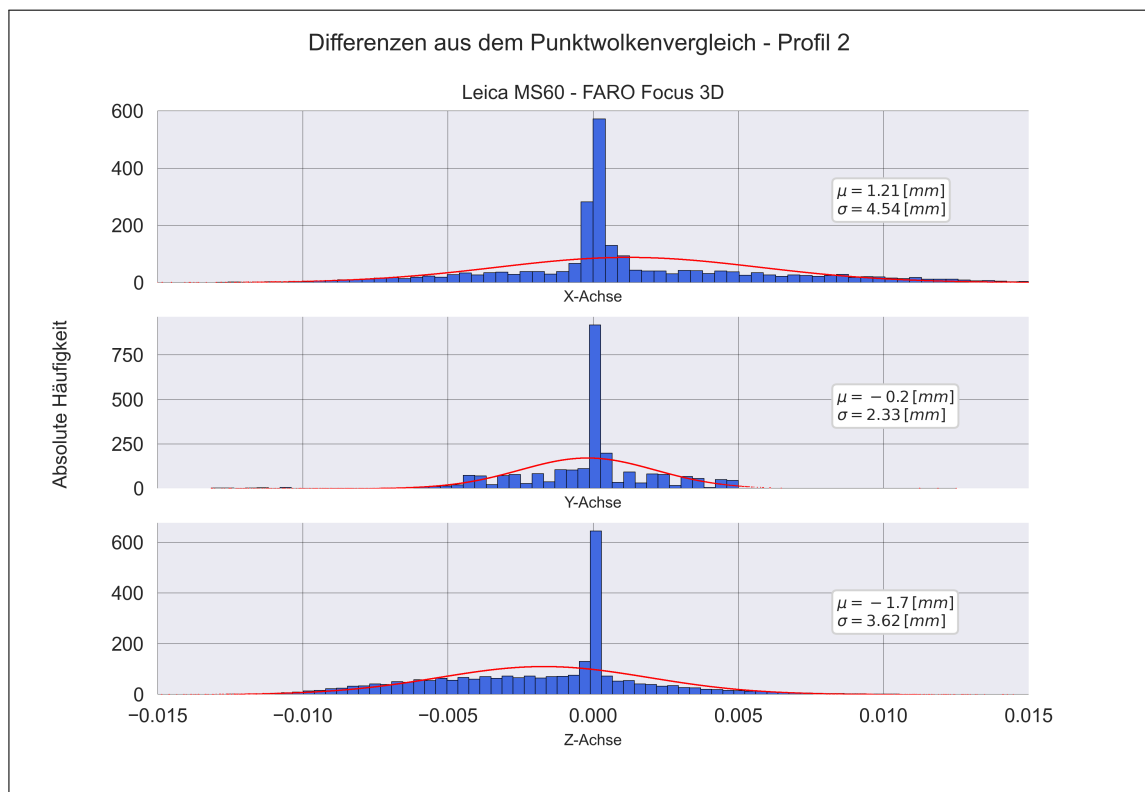
4.5.5.1 Datenanalyse von dem Vergleich der Leica Nova MS60 Referenzpunktwolke mit der Faro Fokus 3D X330 Vergleichspunktwolke von dem Brückenprofil 2

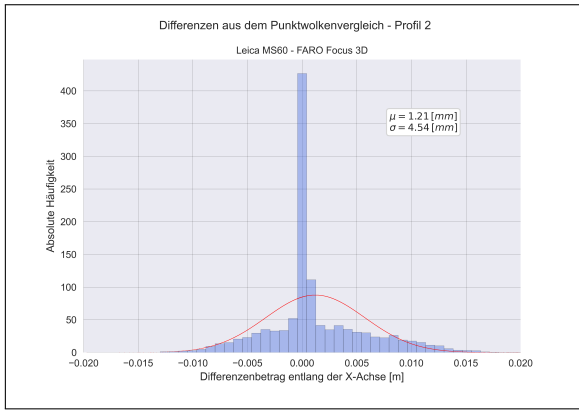
Im Brückenprofil 2 sind die maximalen Schrankenwerte entlang der positiven X- und der negativen Z-Achse (Tabelle 4.6). Die größte Standardabweichung wurde mit $s = 4.54$ in X-Richtung ermittelt.

Tabelle 4.6: Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D) für das Brückenprofil 2

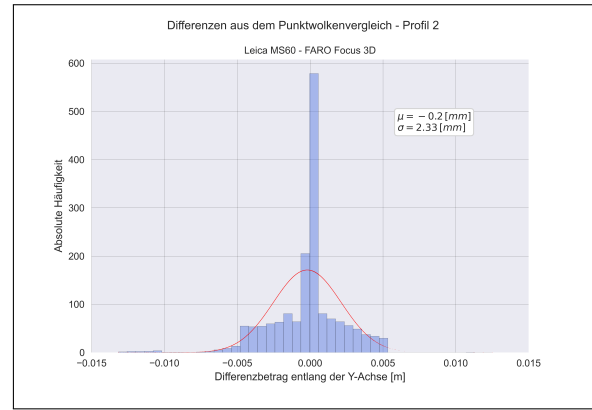
Differenz in Richtung	Absolut	X	Y	Z	Einheit
Mittelwert	0.00	1.21	-0.20	-1.70	[mm]
Standardabweichung	3.61	4.54	2.33	3.62	[mm]
linke 3σ Schranke	-10.83	-12.40	-7.19	-15.56	[mm]
rechte 3σ Schranke	10.83	14.81	6.79	9.17	[mm]
maximaler Wert	20.07	26.40	12.50	15.11	[mm]
minimaler Wert	0.00	-19.69	-13.15	-21.00	[mm]

Eine übersichtliche Darstellung der Abweichung in Bezug auf die absoluten Häufigkeit entlang der drei Achskomponenten wird in der Abbildung 4.17 graphisch abgebildet. Es ist sofort ersichtlich, dass die absolute Häufigkeit der Y-Komponenten am stärksten ist und dass sich die Differenzen in unterschiedlichen Bereichen bewegen. Der Verlauf der Dichtefunktion der Differenzwerte jeder Achskomponente, wird in der Abbildung 4.18 deutlich dargestellt. Die Darstellung erfolgt immer in Bezug auf die absolute Häufigkeit der Differenzwerte. In der Abbildung 4.18 (a) ist zu erkennen, dass sich die Abweichung entlang der X-Achse im Bereich des Mittelwertes μ bewegen. Die absolute Häufigkeit hat ihr Maximum in der Y-Achse (Abbildung 4.18 (b)). Der Differenzbetrag entlang der Z-Achse liegt überwiegend im negativen Bereich (Abbildung 4.18 (c)). Der Absolutbetrag aus den Differenzen wird in der Abbildung 4.18 (d) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die absolute Differenz das Maximum im Bereich von 5 [mm] hat und dann kontinuierlich sinkt.

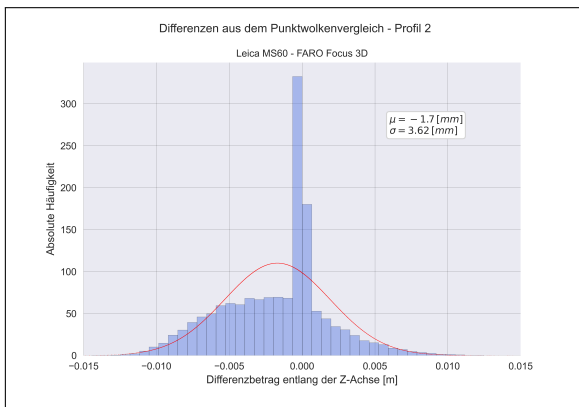
**Abbildung 4.17:** Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 2 in den X-, Y- und Z-Achsen (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)



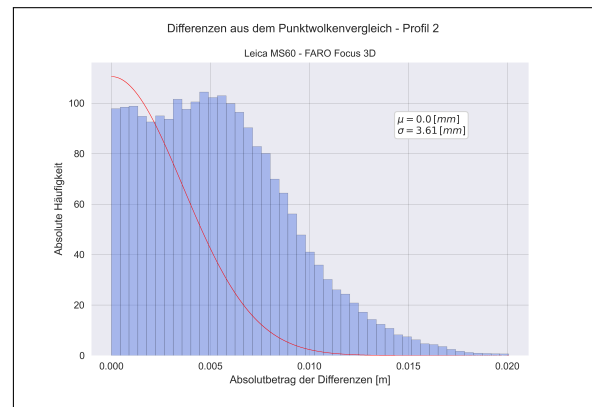
(a) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der X-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)



(b) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Y-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)



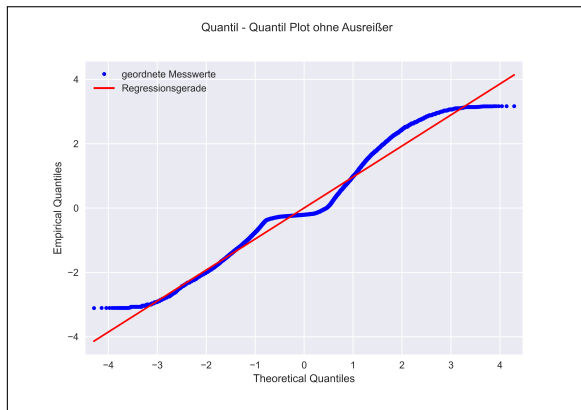
(c) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Z-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)



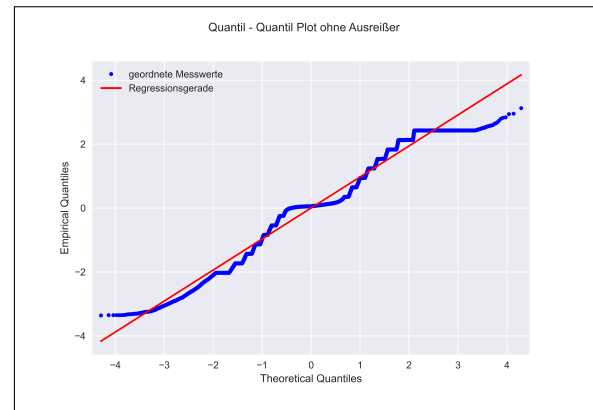
(d) Absolute Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)

Abbildung 4.18: Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 2 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit.

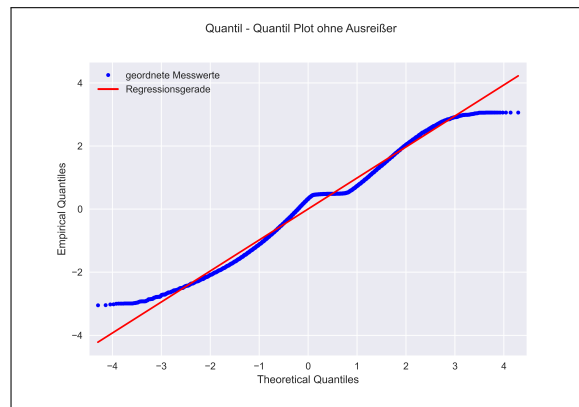
In den Abbildungen 4.19 sind die drei Achskomponenten (X, Y und Z) in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm oder QQ-Plot) dargestellt. Das Quantil-Quantil-Diagramm dient der übersichtlichen Darstellungen von den Differenzen um die Verteilung zu sehen. Im QQ-Plot ist bereits vorab ersichtlich, dass keine Ausreißer in den Messdaten vorhanden sind.



(a) QQ-Diagramm von der X-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)



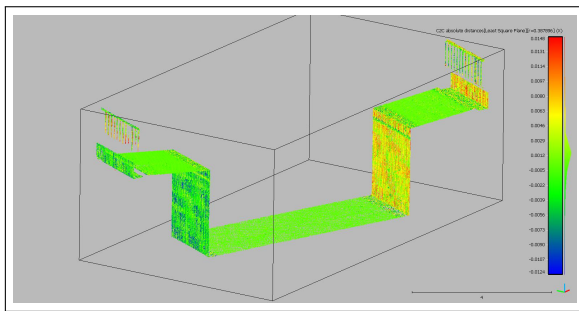
(b) QQ-Diagramm von der Y-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)



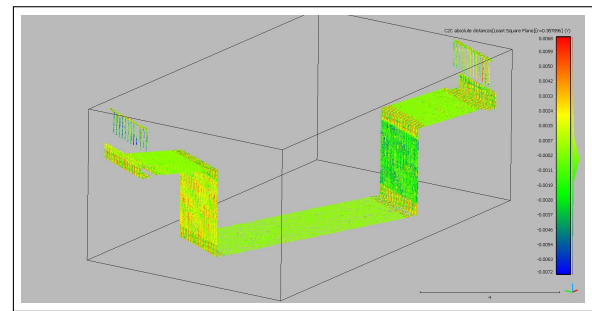
(c) QQ-Diagramm von der Z-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)

Abbildung 4.19: Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 2 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.

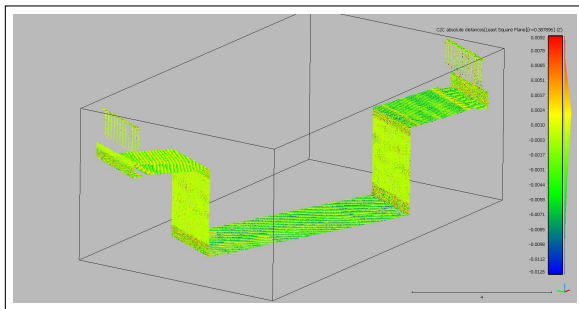
In den Abbildungen 4.20 (a) bis 4.20 (d) sind die Differenzwerte aus dem Punktwolkenvergleich für das Brückenprofil 2 dreidimensional und farblich dargestellt. Die Werte werden in dem Maßstabsbalken farblich skaliert, um zu erkennen, in welchen Bereichen sich die Differenzwerte befinden. In den Kantenbereichen und auf der rauen Oberfläche der Brückenkante sind die Differenzbeträge am größten. Diese Werte sind für die raue Oberflächenbeschaffenheit akzeptabel. Auf den horizontalen Flächen ist ein systematischer Verlauf von der Differenz im Bereich von $0 - 8 [mm]$ zu erkennen (Abbildung 4.20 (d)). Die absolute Genauigkeit bewegt sich im Bereich von $\max. \pm 5 [mm]$, was die genaue Punktwolkenaufnahme der beiden terrestrischen Systeme befürwortet.



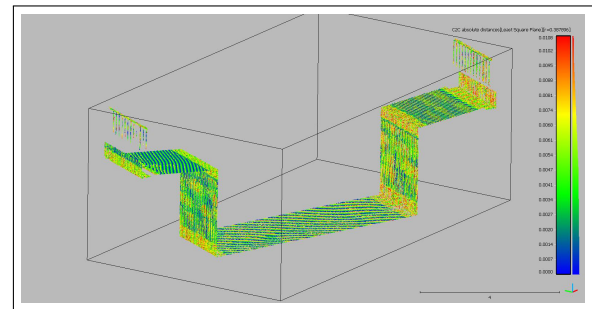
(a) Differenzbetrag in X-Richtung (-12.40 bis 14.81 [mm])



(b) Differenzbetrag in Y-Richtung (-7.19 bis 6.79 [mm])



(c) Differenzbetrag in Z-Richtung (-15.56 bis 9.17 [mm])



(d) Absolute Differenz (0 bis 10.83 [mm])

Abbildung 4.20: Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 2 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von dem Ausreißertest (Abschnitt 4.5.4).

Im Anhang A.4.1 werden die numerischen Differenzen und die graphischen Abbildungen für die drei weiteren Brückenprofile (Profil 1 Abbildung A.4, Profil 3 Abbildung A.8, Profil 4 Abbildung A.12) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich bei dem Punktwolkenvergleich der beiden terrestrischen Methoden die Standardabweichung entlang der X-Achse im 5 [mm] Bereich, der Y-Achse im Bereich von 4 [mm] und der Z-Achse im Bereich von 2 [mm] bewegt.

4.5.5.2 Datenanalyse von dem Vergleich der Leica Nova MS60 Referenzpunktwolke mit der DJI Phantom 4 RTK 3D Vergleichspunktwolke von dem Brückenprofil 2

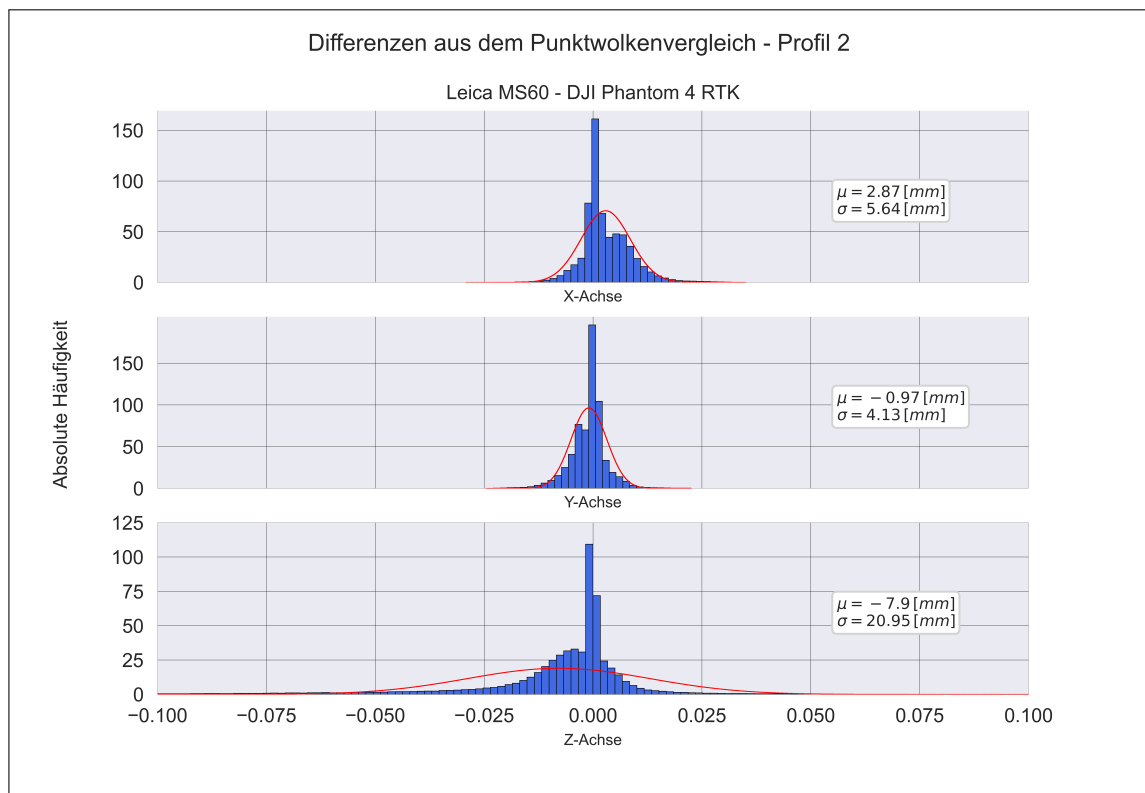
Die Abweichungen aus dem Punktwolkenvergleich mit den photogrammetrisch ausgewerteten Daten ist deutlich höher als bei den terrestrischen Vergleichen. In den unteren horizontalen Bereichen des Tragwerkes wurde durch die geringe Bildaufnahme keine gutes Ergebnis erzielt. Die geringe Bildaufnahme der Tragwerksunterseite ist auf die Kameraposition bei der Phantom 4 RTK zurückzuführen. Durch die schlechte Aufnahmegeometrie entstand ein starkes Rauschen der Messwerte. Im Brückenprofil 2 ist die maximale Abweichung entlang der Z-Achse um das 7-fach größer als bei dem Punktwolkenvergleich aus dem Abschnitt 4.5.5.1.

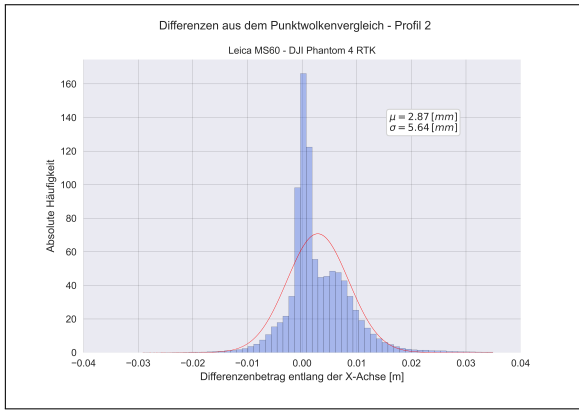
Die Werte für die Schranken liegen in einem maximalen Bereich von $-7.1 [cm]$ und $+5.5 [cm]$ in der Z-Achse. In der X-Achse sind die Werte bei $-1.4 [cm]$ und $+1.9 [cm]$. Die Werte für die Standardabweichung bewegt sich in einem Bereich von $4.13 - 20.9 [mm]$, wobei die größte Standardabweichung in der Z-Achse liegt.

Tabelle 4.7: Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK) auf die Distanz für das Brückenprofil 2

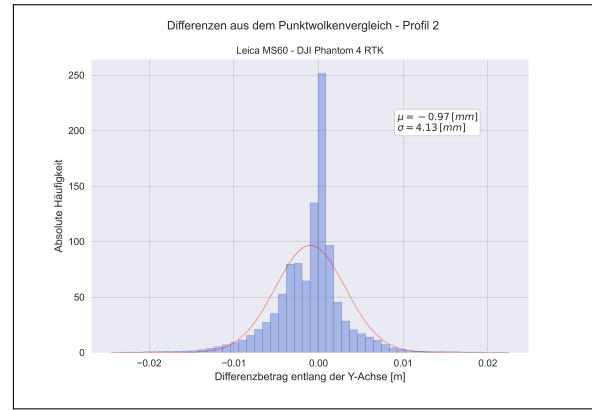
Distanz in Richtung	Absolut	X	Y	Z	Einheit
Mittelwert	0.00	2.87	-0.97	-7.90	[mm]
Standardabweichung	13.74	5.64	4.13	20.95	[mm]
linke 3σ Schranke	-41.21	-14.04	-13.37	-70.75	[mm]
rechte 3σ Schranke	41.21	19.79	11.43	54.94	[mm]
maximaler Wert	78.12	34.93	22.47	110.99	[mm]
minimaler Wert	0.00	-29.12	-24.47	-121.12	[mm]

Die Auswirkung der Abweichung entlang der drei Achskomponenten in Bezug auf die relative Häufigkeit sind graphisch in der Abbildung 4.21 ersichtlich. Die größte Abweichung befindet sich entlang der Z-Achse in einem Bereich von ± 2.5 [cm]. Entlang der X- und Y-Achse bewegen sich die Abweichungen im Bereich von ± 1 [cm]. Die absolute Häufigkeit ist in der X- und Y-Achse angezeigt. Der Verlauf der Dichtefunktion von den Differenzwerten jeder Achskomponente wird in der Abbildung 4.22 deutlicher dargestellt. In der Abbildung 4.22 (a) ist zu erkennen, dass die absolute Häufigkeit im Bereich des Mittelwertes μ am größten ausschlägt und in die negative Richtung schnell und in die positive Richtung langsam abnimmt. Die absolute Häufigkeit ist in der Y-Achse (Abbildung 4.22 (b)) sehr groß und nimmt spiegelverkehrt zur Abbildung 4.22 (a) ab. In Richtung der Z-Achse nimmt die absolute Häufigkeit in die negative Richtung langsamer ab (Abbildung 4.22 (c)). Bei den absoluten Differenzen hat die Häufigkeit ein Maximum im Bereich von 1 [cm] und nimmt stetig ab (Abbildung 4.22 (d)).

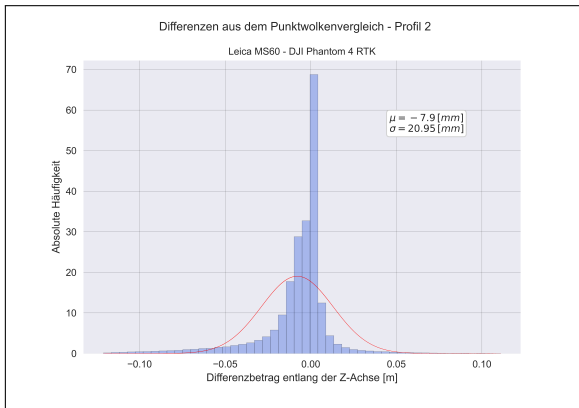
**Abbildung 4.21:** Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 2 in den X-, Y- und Z-Achsen (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK).



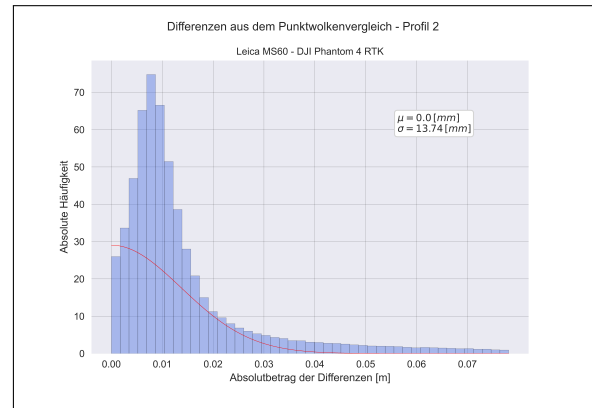
(a) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der X-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)



(b) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Y-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)



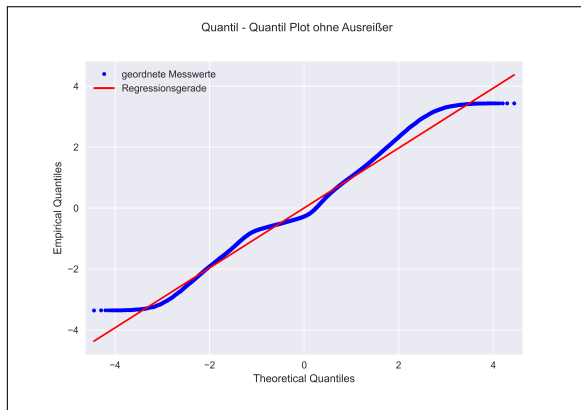
(c) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Z-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)



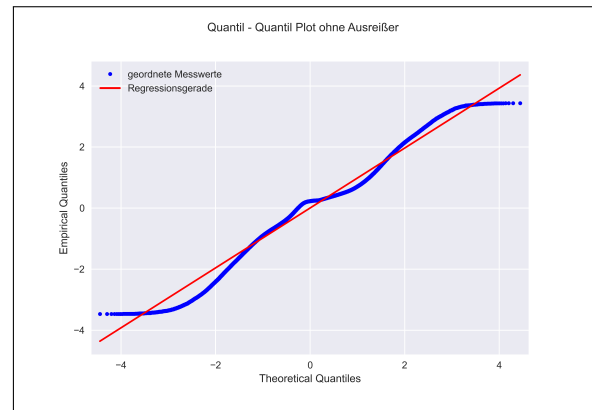
(d) Absolute Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)

Abbildung 4.22: Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 2 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit.

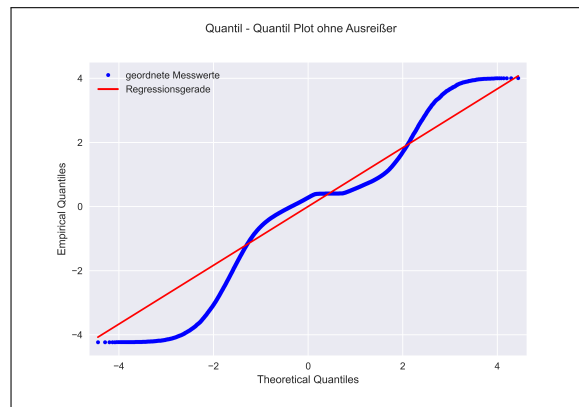
In den Abbildungen 4.23 sind die drei Achskomponenten (X, Y und Z) in einem Quantil-Quantil-Diagramm dargestellt. Das Quantil-Quantil-Diagramm dient für eine übersichtliche Darstellungen von den Differenzen um die Verteilung zu sehen. Im QQ-Plot ist bereits vorab ersichtlich dass keine Ausreißer in den Messdaten vorhanden sind.



(a) QQ-Diagramm von der X-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)



(b) QQ-Diagramm von der Y-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)

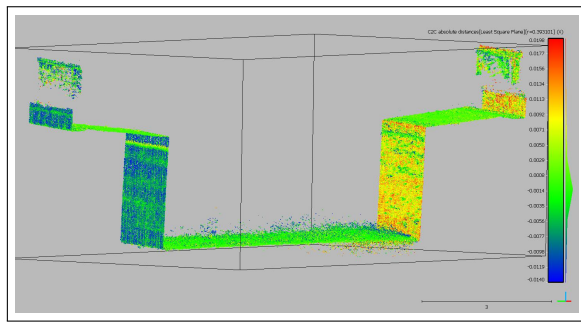


(c) QQ-Diagramm von der Z-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)

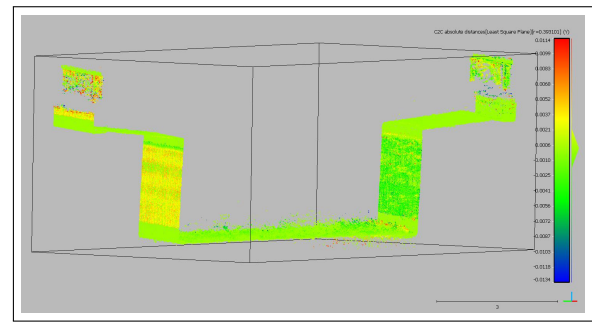
Abbildung 4.23: Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 2 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.

Die graphischen Darstellungen mit den farblichen Differenzwerten sind in den Abbildungen 4.24 (a) bis 4.24 (d) dargestellt.

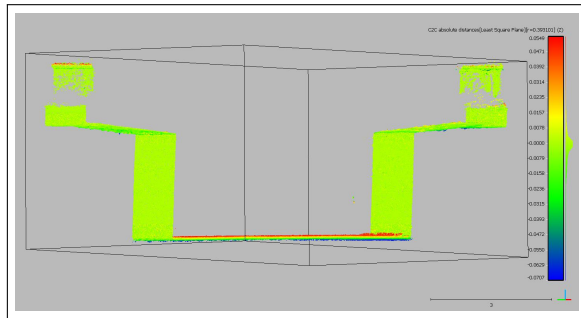
In diesen Abbildungen ist gut zu erkennen, dass auf der unteren Tragwerksseite ein starkes Rauschen durch die Aufnahme der Kameraposition entstanden ist. Die größten Abweichungen sind im unteren Bereich in Abbildung 4.24 (c) gut zu erkennen.



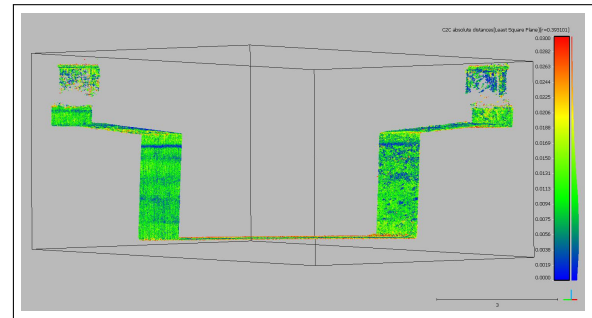
(a) Differenz in X-Richtung (-14.04 bis 19.79 [mm])



(b) Differenz in Y-Richtung (-13.37 bis 11.43 [mm])



(c) Differenz in Z-Richtung (-70.75 bis 54.94 [mm])



(d) Absolute Differenz (0 bis 41.21 [mm])

Abbildung 4.24: Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 2 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von den Ausreißern (Abschnitt 4.5.4).

Im Anhang A.4.2 werden die numerischen Differenzen und die graphischen Abbildungen für die drei weiteren Brückenprofile (Profil 1 Abbildung A.16, Profil 3 Abbildung A.20, Profil 4 Abbildung A.24) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich bei dem Punktwolkenvergleich von der terrestrischen Methode mit der photogrammetrischen Auswertung die Standardabweichungen entlang der X- und Y-Achse im Bereich von 1 [cm] und entlang der Z-Achse sich Bereich von 0.5 [cm] befindet. Die höchsten Werte bewegen sich im Bereich von 6 [cm]

4.6 Zeitliche Analyse für die angewandten Methoden

Die Aufnahme- und Auswertedauer der einzelnen Aufnahmemethoden werden untersucht und dienen als zusätzliche Entscheidungsgrundlage für die sinnvollste Methode eine georeferenzierten Punktwolkenaufnahme umzusetzen und in Zukunft an Objekten anzuwenden.

Die zeitliche Untersuchung für die Erstellung einer georeferenzierten Punktwolke wurde in zwei Hauptbereiche, Außendienst und Innendienst, aufgeteilt. Für den Innendienst wurde nur der zeitliche Aufwand für die Datenauswertung bis zur georeferenzierten Punktwolke aufgezeichnet. Die Schritte nach der Erstellung der Punktwolke sind für alle drei Methoden identisch. Der Bereich für den Außendienst wurde in zwei Unterbereiche geteilt.

1. Außendienst

- (a) Vorbereitungszeit vor Ort
 - i. Zielmarken am Referenzobjekt und in der näheren Umgebung fixieren
 - ii. Einmessen der Zielmarken durch eine Totalstation
- (b) Dauer für die Datenaufnahme
 - i. Terrestrische Aufnahmen durch das Scannen

- ii. Photogrammetrische Aufnahme durch die Drohnenbefliegung
2. Innendienst
- (a) Dauer für die Datenauswertung
 - i. Geosie Verm
 - ii. Leica Infinity
 - iii. Faro Scene
 - iv. Agisoft Metashape
 - v. Cloud Compare

In der Abbildung 4.25 werden die zeitlichen Aktivitäten für jede Methode in drei Balken dargestellt.

Der Balken in blauer Farbe repräsentiert die zeitlicher Dauer für die Vorbereitung vor Ort im Außendienst. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Vorbereitungszeit beim terrestrischen Laserscan mit der Leica Nova MS60 Multistation am geringsten ist. Jeder der sieben Stationierungen hat durchschnittliche 10 Minuten gedauert. Grund dafür ist die schnelle Stationierung der Multistation über mindestens drei Passpunkten. Für einen vollständigen terrestrischen Scan mit der Multistation hätten zwei Standpunkte gereicht. Da als Referenzpunkt wolke die Punkt wolke aus dem terrestrischen Leica Multistation Scan verwendet wurde, mussten Scans aus mehreren Stationierungen durchgeführt werden um eine dichte Punkt wolke zu erzeugen.

Bei der Methode mit dem terrestrischen Laserscanner dauerte die Vorbereitungszeit länger, da für die Zusammenführung von zwei Scanstandpunkten sog. Referenzkugeln am Boden positioniert werden mussten. Um die Punkt wolken in das übergeordnete Koordinatensystem zu transformieren wurden am Objekt und in der näheren Umgebung Zielmarken platziert und mit einer Totalstation eingemessen. Die längste Vorbereitungszeit benötigte das Anbringen der Zielmarken am Referenzobjekt.

Der Balken in oranger Farbe repräsentiert die zeitliche Dauer für die hauptsächliche Datenaufnahme in Form eines Scans oder einer Befliegung mit photogrammetrischer Bildaufnahme im Außendienst. Die scannende Multistation benötigte durch die geringe Aufnahmegeschwindigkeit und den vielen Standpunkten insgesamt 7.5 Stunden. Das Objekt hätte auch mit nur zwei Standpunkten vollständig gescannt werden können, was den zeitlichen Aufwand reduziert hätte. Jedoch wäre die Punkt wolkendichte keine Referenz für einen Punkt wolkenvergleich.

Mit einer Dauer von unter 2 Stunden, hatte die Faro Focus 3D X330 ein gutes Ergebnis mit einer schnellen Aufnahmefrequenz und einer hohen Aufnahmedichte. Um einige Minuten schneller war die photogrammetrische Datenaufnahme mit der DJI Phantom 4 RTK Drohne. Die Befliegung erfolgte rasch und einheitlich. Für eine Bildaufnahme musste jedoch die Drohne in eine ruhige Position gebracht werden, um eine optimale Auflösung zu erzielen.

Der Balken in grauer Farbe repräsentiert die zeitliche Dauer für die Datenauswertung im Innendienst. Die Punkt wolke der Leica Nova MS60 wurden in der kommerziellen Software „Leica Infintiy“ ausgewertet. Diese Software ist sehr benutzerfreundlich und überschaubar. Die Datenauswertung erfolgte sehr rasch und einfach, was auch die Dauer im Innendienst zeigt.

Mit der kommerziellen Software „Faro Scene“ wurden die Faro Laserscan Daten ausgewertet. Die einzelnen Zielmarken musste in jedem Scan definiert und mit Koordinatendaten versehen werden. Dies erforderte etwas mehr Zeit im Innendienst als die Leica Nova MS60 Methode.

Die Auswertung mit Leica Infinity und Faro Scene erfolgte an einem Rechner mit durchschnittlichen Leistungen.

Die photogrammetrische Bildverarbeitung mit der kommerziellen Software „Agisoft Metashape Professional“ benötigte eine sehr hohe Auswertedauer. Die einzelnen Schritte von dem SfM-Verfahren benötigten viele Stunden in der Berechnung. Für eine schnelle Auswertung in Agisoft wäre ein Rechner mit hoher Leistung und starker Grafikkarte notwendig.

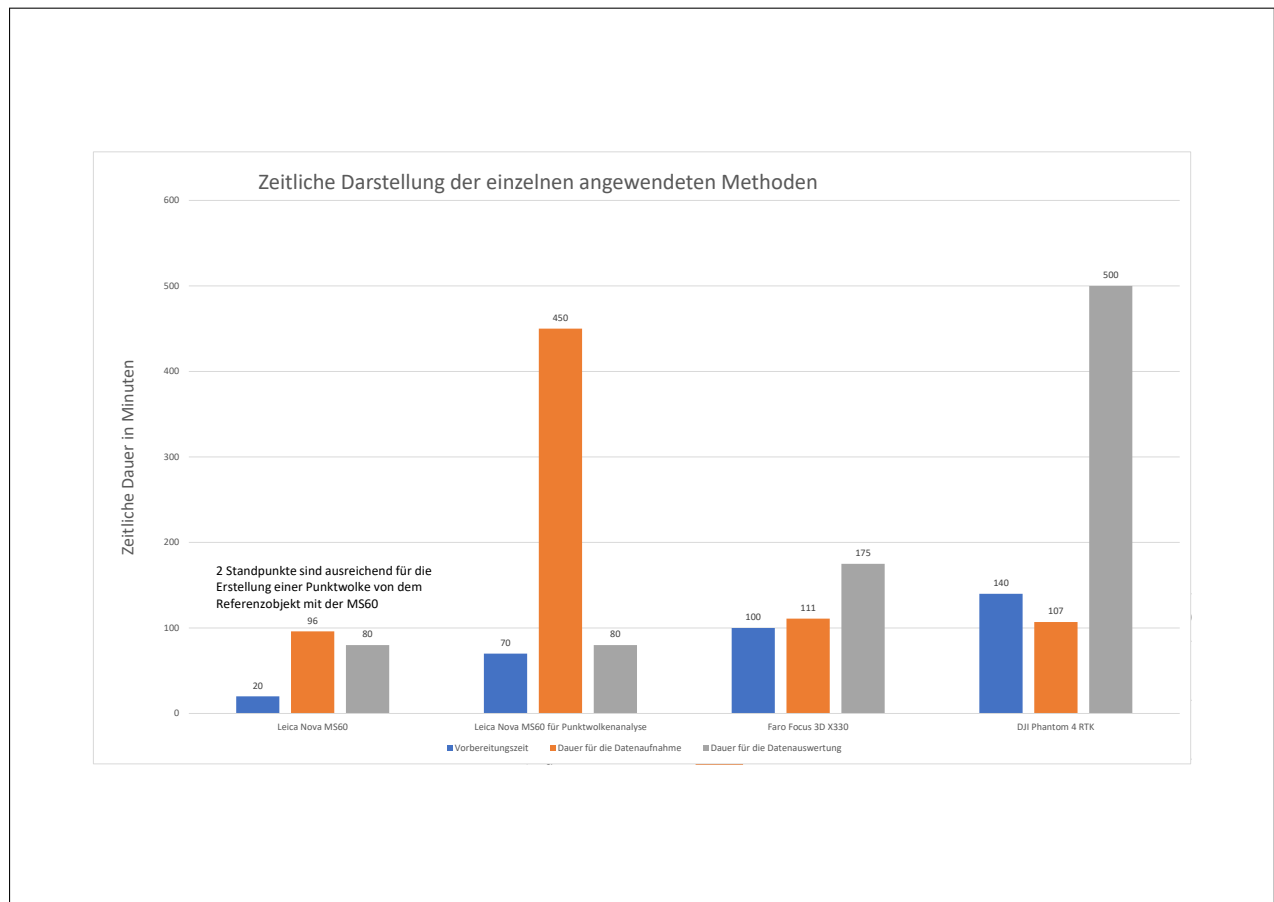


Abbildung 4.25: Darstellung der zeitlichen Analyse der drei Methoden in einem Balkendiagramm.

4.7 Erstellung der georeferenzierten 3D-Modelle

Die Erstellung der drei georeferenzierten 3D-Modelle wurde in Agisoft Metashape durchgeführt. Diese Software wurde ausgewählt, da die Erstellung von einem dreidimensionalen Objekt leicht durchzuführen ist und eine Software Lizenz vorhanden war.

Der Ablauf und die Einstellungen wurde bei allen drei Punktwolken (Leica Nova MS60, Faro Focus 3D X330 und DJI Phantom 4 RTK) gleich durchgeführt. Über den Agisoft Metashape Befehl „Ablauf » Mesh erzeugen“ wurden die Einstellungen, wie in der Abbildung 4.26 dargestellt, definiert. Die Rechendauer zur Erstellung der Modelle stand in direktem Zusammenhang der Punkte in der Punktwolke. Die durchschnittliche Berechnungszeit lag bei 4 Stunden.

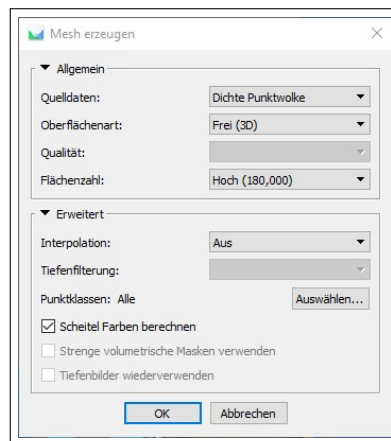


Abbildung 4.26: Einstellungen für die Erstellung der 3D-Modelle durch Agisoft Metashape.

In Abbildung 4.27 ist das georeferenzierten 3D-Modell aus dem Leica Nova MS60 Scan dargestellt.

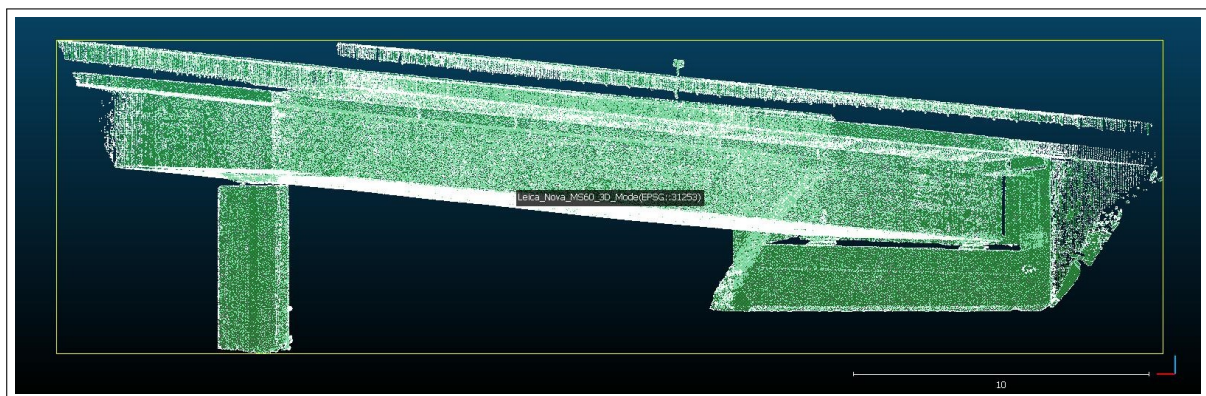


Abbildung 4.27: Graphische Darstellung des 3D-Modelle von dem terrestrischen Scan mit der Leica Nova MS60 von dem Referenzmodell aus östlicher Ansicht.

In Abbildung 4.28 ist das georeferenzierten 3D-Modell aus dem Faro Focus 3DX330 Scan dargestellt.

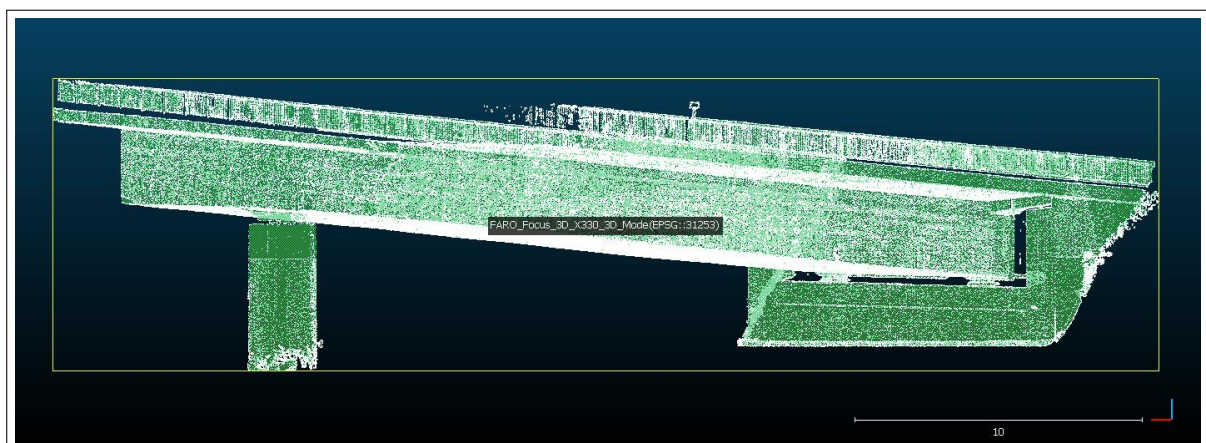


Abbildung 4.28: Graphische Darstellung des 3D-Modelle von dem terrestrischen Scan mit dem Faro Focus 3D X330 von dem Referenzmodell aus östlicher Ansicht.

In Abbildung 4.29 ist das georeferenzierte 3D-Modell dargestellt, welches mit der DJI Phantom 4 RTK Drohne befliegen und aufgenommen und photogrammetrisch ausgewertet wurde.

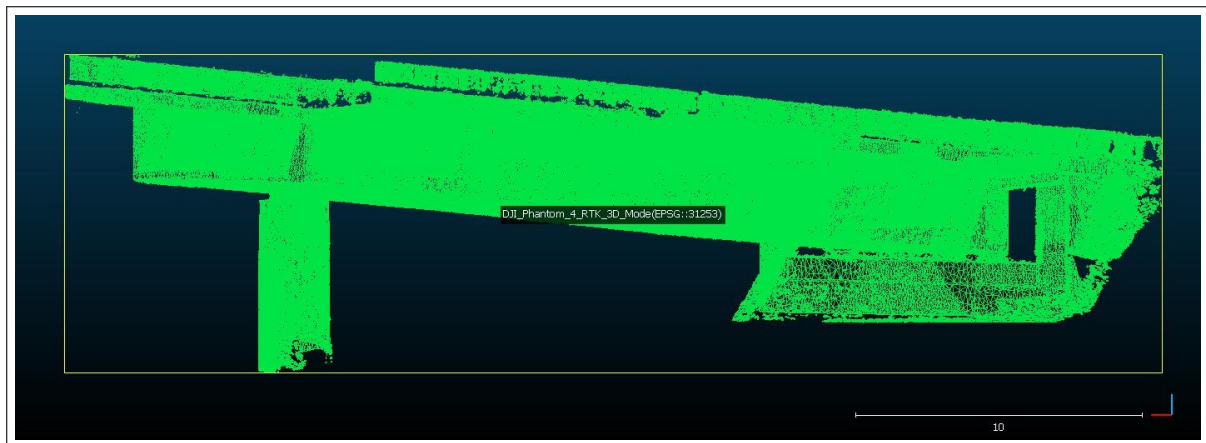


Abbildung 4.29: Graphische Darstellung des 3D-Modells aus der photogrammetrischen Aufnahme mit der DJI Phantom 4 RTK Drohne aus östlicher Ansicht.

4.8 Detektion und Klassifizierung von Bauwerksschäden

Das Referenzobjekt wurde an einem Tag bei optimalen Lichtverhältnissen mit einer Sony Alpha 7R III (Datenblatt: Anhang A.2.4, Tabelle A.5), bestückt mit einem 50 [mm] Objektiv, händisch fotografiert. Mit der Datenerfassung „Set 2-KI“ wurde die Schadensfeststellung der einzelnen Bilder durchgeführt. Für die Schadensfeststellung reichte ein Überlappungsbereich der Bilder von 20%. Auf den Bildern sollte so wenig wie möglich von der Umgebung zu sehen sein. Die Schärfe ist auf optimierte Lichtverhältnisse angewiesen und darf nicht mehrfach verändert werden.

Das neuronale Netzwerk identifiziert in jedem einzelnen Bild die aktiven Bauwerksschäden und ordnet sie automatisch einer Klasse zu (Tabelle 4.8). Das neuronale Netzwerk lernt durch Übungsaufgaben ob die Gewichtung von einem erkannten Schaden groß genug ist, um als solcher erkannt zu werden.

Tabelle 4.8: Klassifizierung von den Schäden durch das neuronale Netzwerk

Klasse	ID-Klasse	Fehlerkategorie	Farbe	Farbcode [RGB]
r	0	Riss	Orange	[255, 99, 0]
p	1	Abplatzung	Magenta	[232, 0, 255]
b	2	Freiliegende Bewehrung	Gelb	[255, 255, 0]
k	3	Korrosion der Bewehrung	Blau	[0, 78, 255]
s	4	Aussinterung	Grün	[0, 188, 0]

Jede erkannte Klasse, jeder erkannte Schaden, wurde in dem entsprechenden Bild mit der dazugehörigen Farbe markiert. Die Informationen über die einzelnen Klassen des Bildes wurde in einer XML-Datei dokumentiert. In dem Bild „DSC06307“ hat das neuronale Netzwerk fünf Klassen erkannt und aufgelistet (Auflistung 1).

Auflistung 1: Schadenserkenkung aus der Bilddatei DSC06307

```
<?xml version="1.0" ?>
<Images>
<image>
```

```
<filename>
/media/data/PSI/proj-data/thomas_klinghan/05_11.03.2020
_Canon_Alpha_7R_50mm/02_Bearbeitet_/1/DSC06307.png</filename>
<image_id>40</image_id>
  <defect category=" Riss ">
    <class>0</class>
    <defect_id>2</defect_id>
    <coordinates -1>
      812 222 815 224 814 225 815 226 .... 810 233 806 230
      809 226 809 225
    </coordinates -1>
  </defect>
  <defect category=" Korrosion ">
    <class>3</class>
    <defect_id>2</defect_id>
    <coordinates -1>
      892 310 894 310 897 313 899 313 .... 888 321 887 319
      890 315 891 311
    </coordinates -1>
  </defect>
  <defect category=" Abplatzung ">
    <class>1</class>
    <defect_id>2</defect_id>
    <coordinates -1>
      3680 1247 3684 1249 3686 1254 3688 1256 .... 3656 1253
      3661 1250 3667 1249 3671 1247
    </coordinates -1>
  </defect>
  <defect category=" Abplatzung ">
    <class>1</class>
    <defect_id>3</defect_id>
    <coordinates -1>
      974 323 979 319 983 319 987 317 .... 980 330 978 327
      976 327 974 325
    </coordinates -1>
  </defect>
  <defect category=" Abplatzung ">
    <class> 1</class>
    <defect_id>4</defect_id>
    <coordinates -1>
      637 4991 640 4994 644 4994 647 4998 .... 622 4991 625
      4991 631 4994 635 4991
    </coordinates -1>
  </defect>
</image>
```

Die Auflistung startet mit dem Dateipfad (*<filename>*) und einer fortlaufende Bild-ID (*<image_id>*) für die Bilder in denen Klassen (Schäden) segmentiert wurden. Anschließend wurden die einzelnen

segmentierten Klassen (`<defect category='Riss'>`) mit zusätzlichen Schadensinformationen, z. B. die ID der Klasse (`<class>`), die Schadensnummer (`<defect_id>`) und die Koordinaten von dem Polygon der Klasse (`<coordinates-1>`), aufgelistet.

In dem Bild aus der Auflistung 1 wurde ein Riss, eine Korrosion und drei Abplatzungen segmentiert. Die Schadensnummer ist eine fortlaufende Nummer, die ihren Startwert in der Nummer 2 hat. Die fortlaufenden Nummer dienen für die Zuordnung der Klasse, falls diese öfters in einem Bild vorgekommen ist. Am Beispiel DSC06307 wurde die Klasse „Abplatzung“ drei mal segmentiert, wobei die Schadensnummer automatisch ansteigt.

Die segmentierten Klassen aus der originalen Bilddatei werden in der Abbildung 4.30 dargestellt. Diese Klassen aus der Bilddatei stimmen mit der Auflistung 1 der XML-Datei nicht überein. Es wurden mehr Klassen segmentiert als in der Auflistung beschrieben wurde. Dies hat den Grund, dass die Klassen erkannt wurden, aber für die Segmentierung eine zu geringe Gewichtung und eine zu kleine Fläche vorweisen. Diese Klassen wurden nach der Segmentierung händisch entfernt.

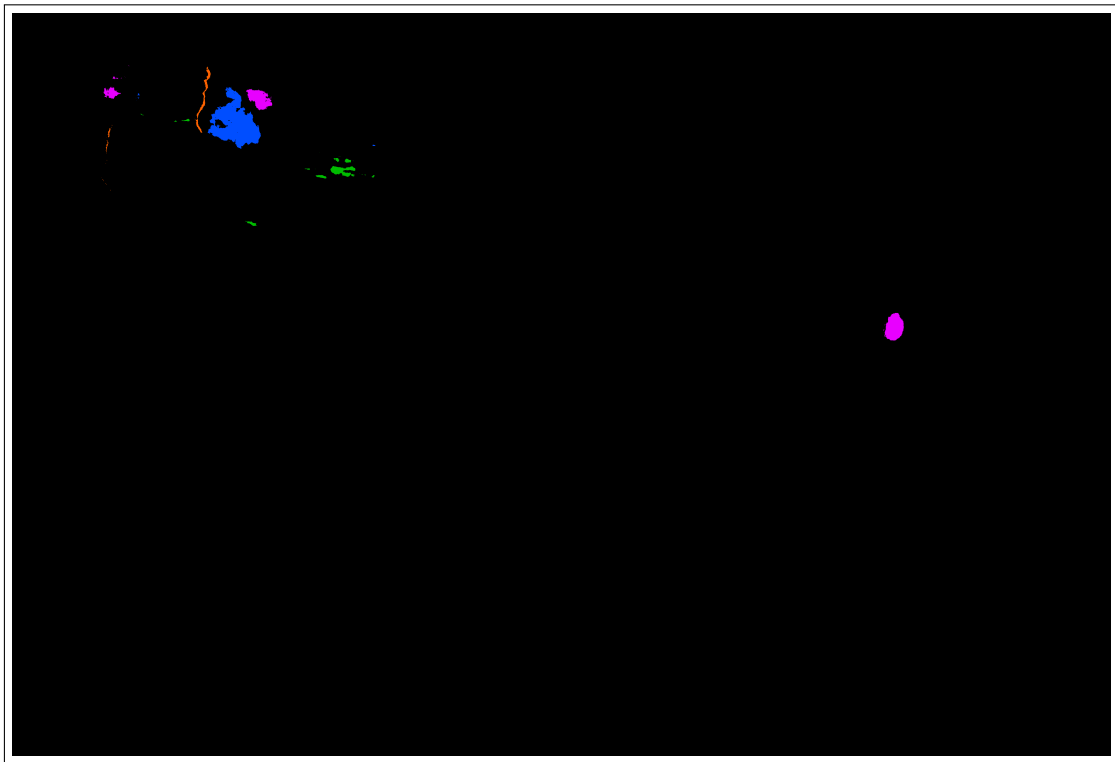


Abbildung 4.30: Ermittelte Klassen der Kategorie Riss (Orange), Korrosion (Blau), Abplatzung (Magenta) und Aussinterung (Grün) aus der originalen Bilddatei.

Am Ende wurde ein „Overlay-Image“ aus den detektierten Klassen (Abbildung 4.30) und der originalen Bilddatei erstellt (Abbildung 4.31). Die Überlagerungsbilder wurden am Ende auf das erstellte 3D-Modell texturiert.



Abbildung 4.31: Die drei Abplatzungen (Magenta), die Korrosion (Blau) und der Riss (Orange) werden in der XML-Datei als Klassen segmentiert. Die Aussinterung (Grün) und ein Riss (Orange) wurden aufgrund der Gewichtung und kleinen Fläche nicht segmentiert.

4.9 Fototextur am Referenzobjekt

Die Texturierung des 3D-Modells mit den schadensklassifizierten Bilder erfolgte mit der Software Agisoft Metashape. Wie im Abschnitt 4.4.1.2 erfolgte der Arbeitsablauf nach dem SfM-Verfahren.

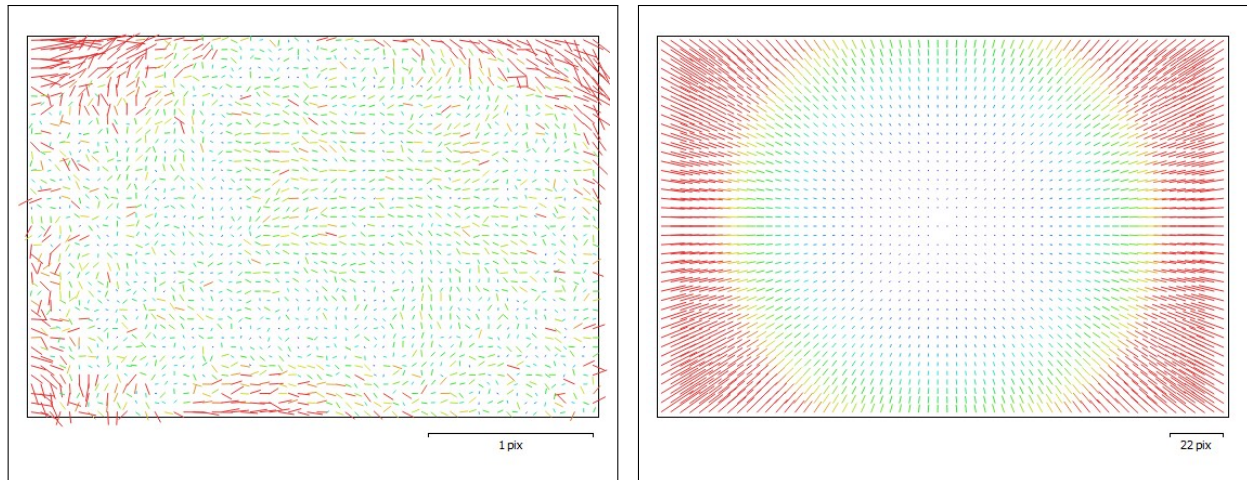
Die schadensklassifizierten Bilder (Set 2-KI aus dem Abschnitt 4.8) wurden händisch aufgenommen und hatten keine lokalen Koordinaten. Durch den Befehl „Ausrichten der Bilder“ konnten die Bilder zueinander ausgerichtet werden. Mit einem räumlichen Rückwärtsschnitt über Bildpasspunkte in ein lokales Koordinatensystem transformiert werden.

Mit Agisoft Metashape war es möglich den Set 2-KI-Datensatz über die DJI Phantom 4 RTK Bildinformationen mittels Bündelblockausgleich auszurichten. Das Ergebnis waren globale Koordinaten für die händisch aufgenommenen Bildern.

Der Set 2-KI-Datensatz wurde in die Gruppe (Chunk) der DJI Phantom 4 RTK Bildgruppe geladen. Danach wurde die Bildqualität von den Set 2-KI Bildern beurteilt. Bilder mit einem Qualitätswert unter 0.6 wurden entfernt. Als nächstes wurde die innere Orientierung der Kameraausrichtung optimiert. Bei der Berechnung der Kameraparameter wurde die Korrelation der einzelnen Parameter zueinander beobachtet. In der Tabelle 4.9 sind die Ergebnisse der berechneten Parameter aufgelistet. In Abbildung 4.32 (a) wird der Verzerrungsplot für die Residuen der Sony Alpha 7R III dargestellt. Der gesamte Verzerrungsplot ist zentral gut verteilt und in Abbildung 4.32 (b) dargestellt.

Tabelle 4.9: Korrelation der Verzerrung von der Sony Alpha 7 R III-Kamera

	Ergebnis	Fehler	F	C_x	C_y	$K1$	$K2$
F	11421.4	0.0846851	1.00	-0.24	0.05	0.08	0.05
C_x	-8.89033	0.0425004		1.00	-0.03	-0.02	0.00
C_y	-10.36200	0.0528891			1.00	0.01	-0.01
$K1$	-0.0221463	$1.95895 \cdot e^{-05}$				1.00	-0.95
$K2$	-0.0134443	$1.19355 \cdot e^{-04}$					1.00



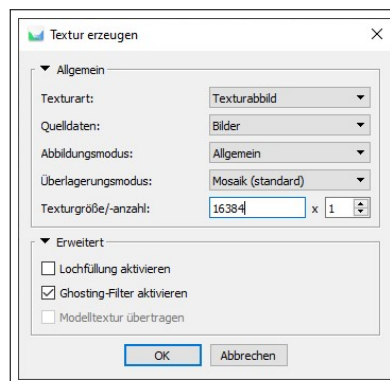
(a) Verzerrungsplot der Residuen

(b) Gesamter Verzerrungsplot

Abbildung 4.32: Verzerrungsplot von der Sony Alpha 7R III Kamera nach der Kamera-Kalibrierung.

Um die Positionen und die Orientierungen der DJI Phantom 4 RTK Bilder nicht zu verändern, wurde die Gewichtung von der Genauigkeit auf 10^{-6} festgelegt. Anschließend konnten alle Bilder markiert werden und über den Befehl „Ausgewählte Kameras ausrichten“ erneut ausgerichtet werden. Anschließend wurden die berechneten Werte von den Set 2-KI-Bildern exportiert und als neue Ausgangsdaten importiert.

Für den letzten Schritt wurden die DJI Phantom 4 RTK Bilder deaktiviert, um eine Textur des 3D-Modells nur mit den Set 2-KI Bildern zu ermöglichen. Die Texturierung wurde mit den Einstellungen in der Abbildung 4.33 durchgeführt.

**Abbildung 4.33:** Einstellungen für die Texturierung der schadensklassifizierten Bilder auf das georeferenzierte 3D-Modell.

Die Texturierung für das gesamte dreidimensionale Objekt dauerte 82 Stunden und 14 Minuten. In Abbildung 4.34 ist ein kleiner Bereich als Orthofoto des Tragwerkes auf dem westlichen Brückenbereich dargestellt. In den Abbildungen 4.35 (a), (b) und (c) werden die Detailbereich mit den schadensklassifizierten Rissbereichen vergrößert dargestellt.

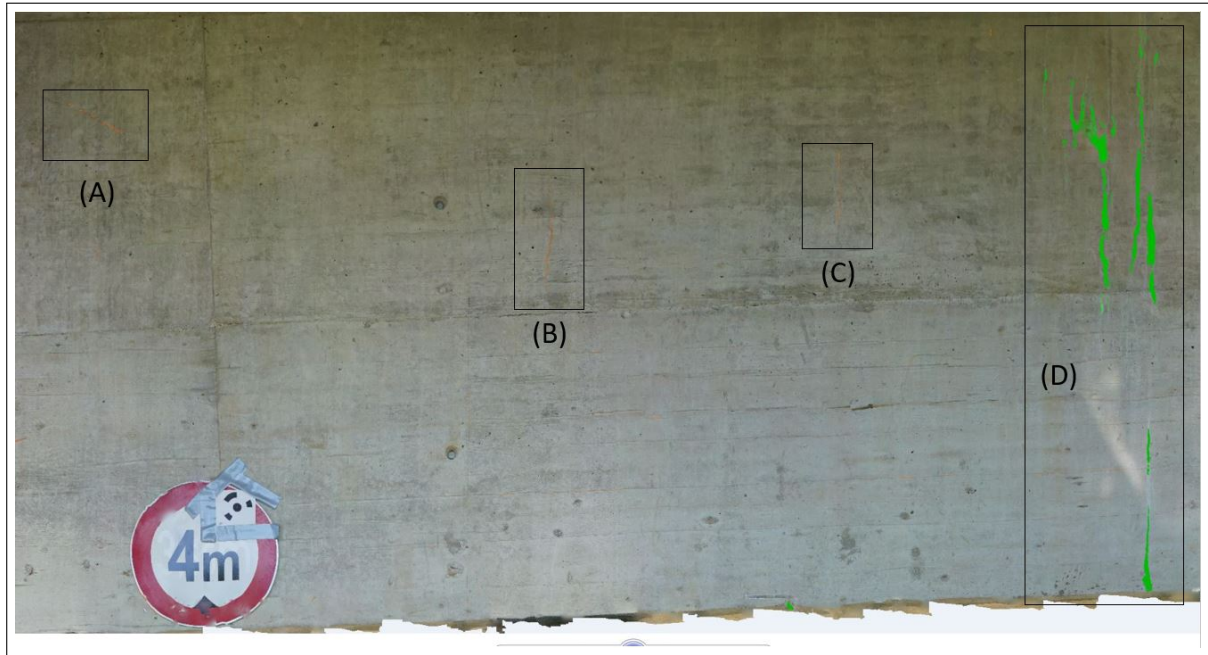
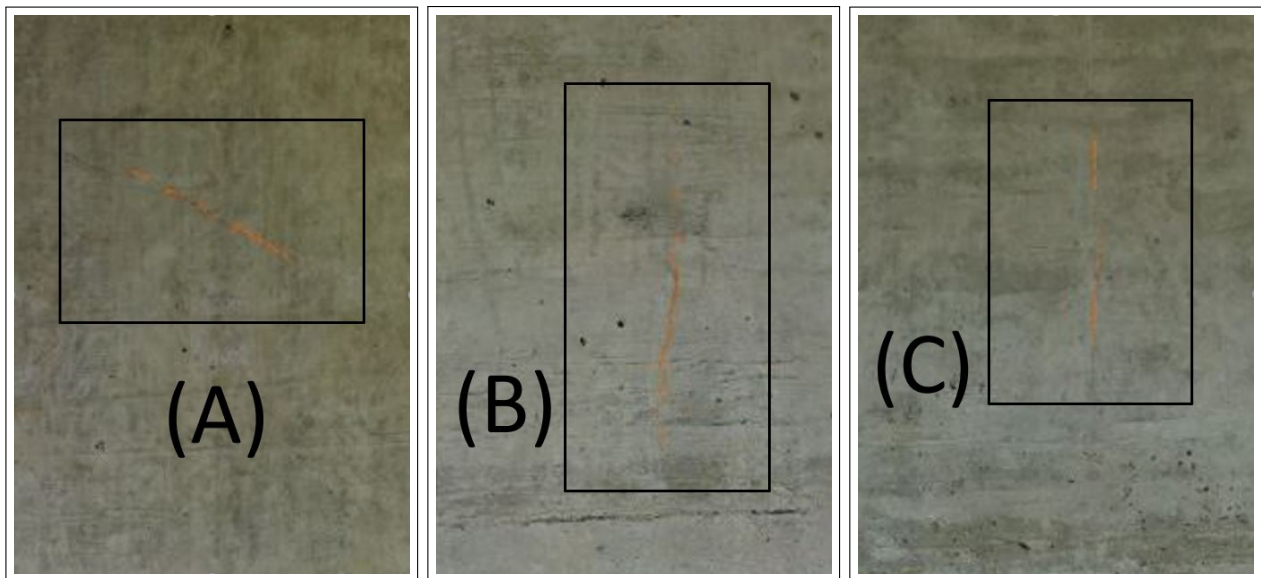


Abbildung 4.34: Ausschnitt aus dem Orthofoto aus westlicher Ansicht auf das Referenzobjekt. In den Detailbereichen (A), (B) und (C) sind Risse (Orange) und in (D) ein Bereich mit einer Aussinterung (Grün) zu erkennen.



(a) Schadensbereich (A)

(b) Schadensbereich (B)

(c) Schadensbereich (C)

Abbildung 4.35: Größere Darstellung der schadensklassifizierten Risse aus den Bereichen (A), (B) und (C)

5 Conclusion

5.1 Fazit der praktischen Durchführung

Moderne Bauwerke sind Umwelteinflüssen und Schädigungsmechanismen ausgesetzt und müssen daher sorgfältig überwacht und kontrolliert werden, um Bauwerksschäden frühzeitig zu erkennen. Die Bauwerksinspektionen und Bauwerkswartungen sind technisch und logistisch sehr aufwendig und für das eingesetzte Personal eine enorme körperliche Belastung.

Durch eine Drohne könnte im Sinne der Nachhaltigkeit eine zunehmend automatisierte photogrammetrische Datenerfassung für Bauwerksinspektionen erfolgen. Das Grundkonzept dieser Masterarbeit für eine automatisierte Befliegung einer Trajektorie (Flugbahn) ist ein 3D-Modell eines Referenzobjektes. Für die Befliegung einer Trajektorie und optimaler photogrammetrischer Datenerfassung von der Bauwerksoberfläche ist die absolute Genauigkeit des 3D-Modells im Bereich von $\pm 20 [cm]$ eine wesentliche Voraussetzung.

Der Fokus in dieser Masterarbeit liegt in der Erstellung eines georeferenzierten 3D-Modells aus einer Punktwolke. Dafür wurden die Daten durch zwei terrestrische und eine photogrammetrische Variante erfasst und im Hinblick auf Präzision sowie den zeitlichen Aufwand für die Datenaufnahme und Auswertung untersucht. Anschließend wurde die photogrammetrisch und terrestrisch erfasste Punktwolke (Vergleichspunktwolke) mit einer terrestrisch erfassten Punktwolke (Referenzpunktwolke) verglichen, um die Qualität der Aufnahme zu beurteilen. Die wirtschaftlich beste Methode wurde in weiterer Folge zu einem 3D-Modell verarbeitet und zur Erstellung einer Trajektorie herangezogen. Zum Abschluss der Masterarbeit wurde das georeferenzierte 3D-Modell mit schadensklassifizierten Bildern texturiert, um einen digitalen Zwilling vom Referenzobjekt zu erhalten.

Am Referenzobjekt der Landesbrücke in Takern I wurden für die Datenermittlung drei Methoden angewandt. Die Datenerfassung erfolgte durch eine scannende Multistation von Leica (Nova MS60), einem terrestrischen LiDAR-Scanner von Faro (Focus 3D X330) und eine photogrammetrische Drohnenaufnahme durch eine Drohne von DJI (Phantom 4 RTK).

Vor der Untersuchung wurde am Objekt und in der näheren Objektumgebung 10 Passpunkte angebracht, durch eine Satzmessung eingemessen und in der Folge in das Landeskoordinatensystem transformiert. Die Stationierungen und Orientierungen für die Totalstationen sowie die Georeferenzierung der Punktwolken erfolgte für diese Masterarbeit durch die Passpunkte.

Der erste terrestrische Ansatz zur Datenerfassung erfolgte mit der Leica Nova MS60. Das Objekt konnte durch zwei Standpunkte (Ost- und Westseite des Referenzobjektes) mit dem Scan-Modus „Geschwindigkeit“ mit einer Auflösung von $10.0 \times 10.0 [mm]$ (Vertikal- Horizontalabstand) auf $10 [m]$ Schrägdistanz in 96 Minuten gescannt werden. Der maximalste Abstand lag bei beiden Standpunkten bei $43 [m]$, was eine hohe aber inhomogenen Auflösung für das 3D-Modell ergab. Der Vorteil dieser Multistation lag in der schnellen Stationierung und in der anschließenden flächendefinierenden Scanaufnahme. Die Datenauswertung wurde mit der kommerziellen Software Infinity von Leica durchgeführt. Die Auswertung und Erstellung einer georeferenzierten Punktwolke mit Leica Infinity war ein einfacher Algorithmus, der effizient und zeitlich schnell durchgeführt werden konnte.

Für den Punktwolkenvergleich wurde eine Referenzpunktwolke durch die Vorteile der Multistation erstellt. Um eine dichte und homogene Punktwolke mit hoher Auflösung zu erfassen, wurden sieben Scan-Standpunkte ausgewählt, deren Objektbereiche sich überlagerten. Der gesamte Scanvorgang dauerte 7.5 Stunden. Dieser hohe Zeitaufwand war notwendig, um eine qualitative homogene Referenzpunktwolke mit einer hohen Auflösung von 10.0×10.0 [mm] (Vertikal- Horizontalabstand) auf 10 [m] Schrägdistanz zu erhalten.

Der zweite terrestrische Ansatz wurde durch den terrestrischen Laserscanner von Faro durchgeführt. Mit dem Faro Focus 3D X330 konnte eine dichte Punktwolke in kurzer Zeit erstellt werden. Durch die hohe Aufnahmefrequenz auf große Distanzen waren nur zwei Standpunkte (Ost- und Westseite des Referenzobjektes) für den Scanner erforderlich, um das Referenzobjekt zu scannen und eine hohe Dichte der inhomogenen Punktwolke mit hoher Auflösung (1.5 [mm] auf 10 [m]) zu erstellen. Die maximale Entfernung lag bei 56 [m] im östlichen Standpunkt. Die beiden aufgenommenen Punktwolkenbereiche wurden durch Referenzkugeln von Faro zu einer gesamten Punktwolke zusammengesetzt. Die Faro Focus 3D X330 Punktwolke erreichte einen mittleren Punktfehler von 2.1 [mm] in den Überlappungsbereichen der Aufnahmen. Eine Transformation in das übergeordnete Koordinatensystem erfolgte durch Zielmarken, die am Objekt und an den Leitpfosten (Objektumgebung) angebracht wurden. Durch eine Totalstation, die über die bekannten Passpunkte stationiert und orientiert wurde, konnten die Zielmarken eingemessen werden und in das Landeskoordinatensystem transformiert werden. Die Datenauswertung erfolgte mit der kommerziellen Software Scene von Faro. Scene ermöglichte, wie Leica Infinity, eine einfache Auswertung und Erstellung einer Punktwolke in wenigen strukturierten Schritten.

Der bildbasierte Ansatz erfolgte durch eine photogrammetrische Aufnahme (20 Megapixel Kamera) des Referenzobjektes durch eine Befliegung einer DJI Phantom 4 RTK Drohne. Durch die RTK und IMU Unterstützung von dem DJI Drohnen Modell wurden die aufgenommen Bilddaten mit Information der äußeren Orientierung ($X Y Z \omega \varphi \kappa$) bestückt, was den Vorteil einer direkten Georeferenzierung ergab. Für eine Kontrolle der absoluten Position von der Datenaufnahme und zur Verbesserung der Daten bei der Bündelblockausgleichung wurden am Referenzobjekt spezielle Zielmarken von Agisoft angebracht, eingemessen und bei der Datenauswertung auf deren Genauigkeit untersucht und hinzugefügt. Der Vorteil durch die Drohnenbefliegung der östlichen und westlichen Bauwerkseite in drei Höhenschichtlagen ergab sich in der schnellen photogrammetrischen Datenaufnahme der Bauwerksoberfläche. Die Oberfläche wurde mit 60% Bildüberlappung detektiert. Der Nachteil der Datenaufnahme durch die Drohne ergab sich einerseits daraus, dass das Referenzobjekt in GNSS abgeschirmten Bereichen (z. B. untere Tragwerksseite) keine photogrammetrischen Aufnahmen mit einer RTK unterstützten Positionsgenauigkeit erfassen konnte und andererseits durch die Lage der Kamera bei diesem DJI Drohnen Modell. Die Kamera ist bei diesem Modell auf der Drohnenunterseite positioniert und hat einen maximalen horizontalen Blickwinkel von $+15^\circ$. Dadurch entstanden photogrammetrische Aufnahmen der unteren Tragwerkseite mit schlechter Qualität, die bei der Auswertung nicht verwendet werden konnten. Die Datenauswertung erfolgte mit der kommerziellen Software Agisoft Metashape Professional. Durch das SfM-Verfahren konnte mit Agisoft schrittweise eine maßstabsgetreue georeferenzierte Punktwolke generiert werden. Die Dauer der Auswertung in Agisoft beanspruchte sehr viel Zeit, auch wenn die Berechnungen an einem Universitätsrechner durchgeführt worden sind. Dies war auf die großen Bilddaten und photogrammetrischen Rechenschritte zurückzuführen. Die durch Agisoft erstellte Punktwolke hat eine Root Mean Square (RMS) Reprojektionsfehler von 17.09 [cm].

Die drei ermittelten Punktwolken wurden mit der Open Source Software „Cloud Compare“ miteinander verglichen. Die Punktwolke aus dem Leica Nova MS60 Scan wurde als Referenzpunktwolke herangezogen und in Beziehung zur Punktwolke aus dem terrestrischen Faro Laserscan und der photogrammetrischen Drohnenaufnahme gesetzt. Um eine genauere Analyse zu erstellen, wurden die absoluten Punktabstände sowie die Abstände in den X, Y und Z Achskomponenten getrennt untersucht. Es sollte gezeigt werden, in welcher konkreten Größenordnung sich die Abstände bewegen. Aus den Vergleichsergebnissen wurden in der Folge vier Querprofile geschnitten und numerisch sowie graphisch dargestellt.

Die terrestrische Methode durch die Leica Nova Multistation erzielte eine Standardabweichung unter 1 [cm]. Der Vorteil der Leica Nova Multistation war die schnelle Stationierung und die anschließende flächendefinierende Scanaufnahme, wobei der Nachteil in der Aufnahmegeschwindigkeit lag. Um ein Objekt vollständig zu scannen und eine hohe homogene Auflösung zu erzielen, sind viele einzelne Standpunkte notwendig, was eine lange Scandauer ergibt.

Der Punktwolkenvergleich von der Leica Nova MS60 Referenzpunktwolke und der Faro Focus 3D X330 Vergleichspunktwolke ergab eine durchschnittliche Standardabweichung von 3.6 [mm]. Entlang der X-Achse ergab sich eine maximale Standardabweichung von 4.5 [mm]. Die Aufnahme dauerte durchschnittlich 55 Minuten pro Standpunkt, was einer akzeptablen Dauer einer solchen Datenaufnahme entspricht. Die hohe Präzision und die schnelle Datengewinnung ergab einen Vorteil durch den terrestrischen Faro Laserscanner. Der Nachteil dieser Methode ergab sich durch die inhomogene Punktwolke. Die Auflösung nahm mit zunehmender Distanz ab. Für eine Transformation in ein gewünschtes Koordinatensystem (z. B. Landeskoordinatensystem) mussten zusätzlich Zielmarken am Objekt und in der Objektumgebung angebracht und terrestrisch eingemessen werden, was einen weiteren Arbeitsaufwand bedeutete.

Die Auflösung der beiden terrestrischen Methoden nahm mit zunehmender Entfernung durch die fixen Standpunkte ab, was eine inhomogene Punktwolke erzeugte. Dies führte zu einem Vorteil für die bildgestützte Aufnahme durch die DJI Drohne. Die seitlichen Bereiche konnte photogrammetrisch mit gleichbleibendem Abstand (GSD) zum Referenzobjekt erfasst werden. Die Befliegung und photogrammetrische Datenaufnahme konnte durch den Piloten in 45 Minuten absolviert werden. Das Anbringen der Zielmarken war jedoch durch die Höhe des Tragwerkes sehr umständlich und zeitintensiv. Der Punktwolkenvergleich der Leica Nova MS60 Referenzpunktwolke und der DJI Phantom 4 RTK Vergleichspunktwolke ergab eine durchschnittliche Standardabweichung von 1.4 [cm]. Die größte Standardabweichung ergab sich jedoch bei diesem Punktwolkenvergleich entlang der Z-Achse mit einem Wert von 2.1 [cm]. Dieser Wert ist auf die ungünstige Kameraposition der Drohne und die damit schlechte Aufnahmegeometrie und das Messrauschen zurückzuführen.

Die Schadensanalyse des Bauwerks wurde mit einer Sony Alpha 7R III (50 [mm] Festbrennweite) an der Oberfläche händisch aufgenommen. Die Detektion und die Klassifizierung der Bauwerksschäden erfolgte durch ein neuronales Netzwerk der Firma Kestrel Eye GmbH. Die schadensklassifizierten Bilder wurden auf das georeferenzierte 3D-Modell texturiert, wodurch ein digitaler Zwilling für eine Bauwerksinspektion erzeugt werden konnte. Durch den digitalen Zwilling konnten geometrische Bauwerksinformationen und georeferenzierte Schäden erhoben werden. Die Texturierung von dem Bauwerksmodell mit den klassifizierten Bildern bildet den zweiten Teil dieser Masterarbeit.

Die Untersuchung ergab letztlich eine maximale Standardabweichung unter 2.5 [cm] für alle drei Methoden. Dies ist für eine (semi-) automatische Flugsteuerung entlang einer Trajektorie mit konstantem Abstand zum Objekt ausreichend. Mit dem Faro Focus 3D X330 konnte eine dichte inhomogene Punktwolke mit hoher Auflösung und einer Standardabweichung unter 5 [mm] erzielt

werden, jedoch war der zeitliche Aufwand gegenüber den anderen Methoden sehr groß.

Die optimale Lösung für das Referenzobjekt wäre eine Kombination aus der terrestrischen und drohnenbasierten Methode. Die Bereiche von der Tragwerksunterseite und der Brückenlagerung (GNSS abgeschirmte Bereiche) sowie der naheliegende Pflanzenwelt (Flora) auf der westlichen Brückenseite könnte schnell und flächendefiniert durch die scannende Multistation (Leica Nova MS60) aufgenommen werden (Abbildung 5.1), und durch die DJI Phantom 4 RTK Drohne könnte effizient der Bereich über dem Flussbett der Raab und die vertikalen höherliegenden Flächen (Abbildung 5.2) erfasst werden. Für eine zusätzliche Verbesserung der photogrammetrischen Auswertungen könnten natürliche Passpunkte am Objekt durch das reflektorlose Messverfahren erfasst werden.



Abbildung 5.1: Optimale Aufnahmebereiche für die terrestrische Multistation (Leica Nova MS60) bei dem Referenzobjekt.



Abbildung 5.2: Optimale Aufnahmebereiche durch die Drohne (DJI Phantom 4 RTK) bei dem Referenzobjekt.

5.2 Ziel der ADP-Rinner GmbH und Struc-Inspect GmbH

Das Ziel der ADP-Rinner GmbH und Struc-Inspect GmbH ist die automatische und digitale Bauwerksinspektion durch eine Drohne zu bewerkstelligen. Um eine effiziente und automatische Befliegung zu gewährleisten, muss ein 3D-Modell für die Flugplanung erstellt werden. Für die Befliegung der Trajektorie und die hochauflösende photogrammetrische Datenaufnahme sollte die Genauigkeit des 3D-Modells im Bereich von $\pm 20 [cm]$ sein.

Die Detektion von Bauwerksschäden in der Größenordnung unter einem Millimeter ist von dem Kameratyp (Spiegelreflex), dem Objektiv (20 [mm] bis 85 [mm]) und der Ground Sample Distanz (GSD) zum Objekt abhängig. Die Auswertung und Markierung optischer Schäden erfolgt durch künstliche Intelligenz KI. Die präzisen schadensklassifizierten Bilder können auf ein georeferenziertes 3D-Modell mit unterschiedlicher Genauigkeit texturiert werden. Das Ergebnis ist ein digitaler Zwilling mit einer geometrischen Genauigkeit und hochauflösenden klassifizierten Bildern. Sollte jedoch ein Bauwerksschaden, z. B. Riss, in der Größenordnung von 0.5 [mm] präzise und genau auf das dreidimensionale Objekt texturiert werden, muss das 3D-Modell eine Genauigkeit unter 5 [mm] besitzen.

Die zukunftsorientierte Version der ADP-Rinner GmbH und Struc-Inspect GmbH ist die Weiterentwicklung der Autron-Drohne (Abschnitt 5.3). Die Drohne wird mit einer Stereo-Kamera (ZED Kamera) ausgestattet und befliegt das Bauobjekt in GNSS starken Bereichen und erstellt viele einzelne georeferenzierte 3D-Modelle (Tiefenbild) in Raster-Format (TIFF). Diese einzelnen 3D-Modelle werden zu einem georeferenzierten gesamt 3D-Modell (geringe Auflösung) fusioniert. In einem weiteren Flug wird das Objekt in den GNSS abgeschirmten Bereichen genauer befliegen und ein 3D-Modell mit hoher Präzision wird erstellt. Dies ermöglicht gleichzeitig die photogrammetrische Datenaufnahme für die anschließende KI-Bauwerksinspektion.

Das Ergebnis für den Endkunden (ASFINAG, Bundesland, Infrastrukturbetreiber) ist der Zustandsbericht von dem digitalen Zwilling der georeferenzierten Schäden, die in einer geographischen Informationssystem Datenbank (GIS-Datenbank) abgespeichert werden.

5.3 Ausblicke der ADP-Rinner ZT GmbH für eine automatisierte Drohnensteuerung

Wie in Kapitel 1 beschrieben, ist eine kontinuierliche Inspektion und Wartung von Bauwerken für die Infrastruktur eines Landes unerlässlich. Die Kosten und der zeitliche Aufwand zur Datenaufnahme von Schäden an Konstruktionen kann durch einen autonomen Drohnenflug gesenkt werden.

In diesem Zusammenhang wurde im Rahmen der steirischen Wirtschaftsförderungsgesellschaft [Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft m.b.H., 2020] „Ideen! Reich!-Ideen finden“ durch die ADP-Rinner ZT GmbH das Projekt „Hyperbridge“ mit dem Prototypen „Autron“ gestartet. Ziel ist es, eine optimale dreidimensionale Solltrajektorie in GNSS-abgeschirmten und -schwachen Bereichen durch eine automatische Drohnensteuerung abzufliegen und kontinuierlich photogrammetrische Daten zu detektieren.

Die Basis und die Anforderungen für das Projekt bilden die Erkenntnisse aus Entwicklungen vorheriger Prototypen. Die Konstruktion des Fluggerätes basiert nach [Pöllabauer, 2020] auf folgende Anforderungen.

- **Bauform und Flugeigenschaft**

Als effizienteste Bauform wurde der Hexakopter identifiziert. Die sechs Motoren liefern ausreichend Leistung um die Nutzlast zu tragen.

- **Flugdauer**

Eine durchschnittliche Flugdauer von 25 Minuten wird durch Lithium-Ionen-Akkus (Li-Ion-Technologie) erfüllt.

- **Sensorik zur Datenaufnahme**

- Bildanalyse der Oberfläche auf Schäden durch das neuronale Auswertesystem durch die photogrammetrische Datenaufnahme einer Sony Alpha 7R III (ILCE7RM3B). Durch diese Kamera wird eine GSD $< 0.5 [mm]$ auch bei größeren Abständen zwischen Fluggerät und Objekt erreicht.
- Generierung eines 3D-Modells mittels photogrammetrischer Methode durch Überblicksbilder einer Sony RX0II

- **Positionierung der Kamera**

Das System Kamerahalterung – Akkuhalterung wird modular und austauschbar ausgeführt. Somit wird ermöglicht, dass eine Bildaufnahme zwischen -10° und 90° (Abbildung 5.3) möglich ist. Dies ist die Grundlage für Inspektionen der Unterseite von Bauwerken. Durch den Tausch von Kamera und Akkuhalterung wird eine klassische Aufnahme in Richtung Nadir für Orthofotos ermöglicht.

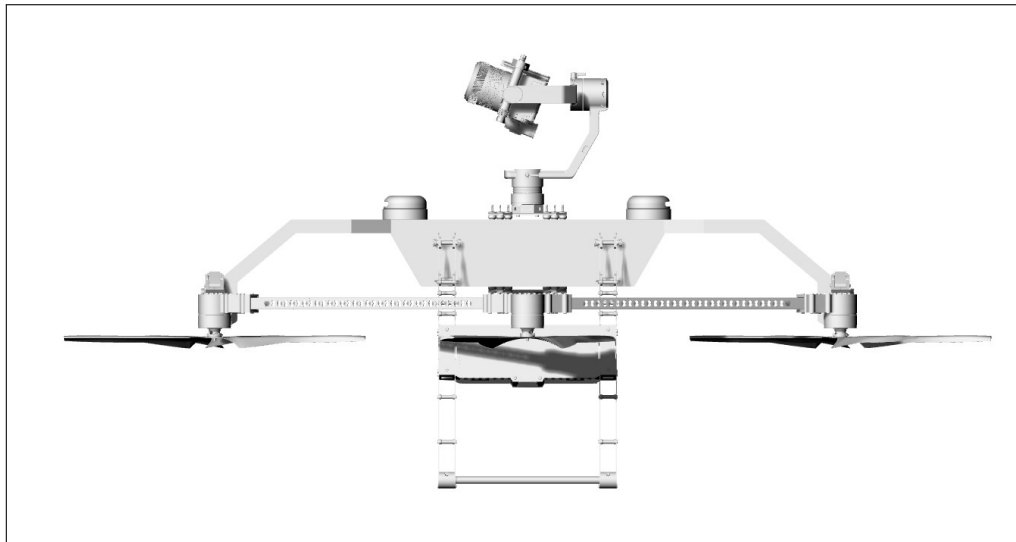


Abbildung 5.3: Positionierung der Kamera [Pöllabauer, 2020]

Das gesamte Cockpit ist über den Motoren positioniert um die Kameraposition anzuheben und den Aufnahmewinkel optimal zu nutzen.

- **Steuerung**

Die Steuerung des Prototypen erfolgt durch den Piloten und einem Operator. Der Pilot verfügt neben der Fernbedienung (Abbildung 5.4 (a)) über eine optionale First Person View-Brille (FPV), die eine permanente Videoverbindung des Kamerabildes aus Sicht der Drohne überträgt. Der Operator bedient die Fernbedienung für die Steuerung der Kamera (Abbildung 5.4 (b)).



(a) Steuerelement der Autron-Drohne für den Piloten



(b) Steuerelement der Autron-Drohne für den Operator

Abbildung 5.4: Fernsteuerung für die Autron-Drohne und die Onboard-Kamera [Pöllabauer, 2020]

- **Aktive Abstandssensorik zur Kollisionsvermeidung mit einem Bauobjekt**

Bei der Sensorik wird zwischen aktiven und passiven Komponenten unterschieden. Der Sensor vom Typ Tera Ranger EVO60m befindet sich auf der oberen Seite des Cockpits und verhindert eine Kollision an der Objektunterseite. Für eine Hinderniswarnung bzw. eine Unterstützung bei der Annäherung an den Boden (z. B. bei der Landung) wird ein Sensor vom Typ SF11C mit einer Reichweite von bis zu 120 [m] an der Unterseite des Cockpits angebracht. An der

Oberseite der Drohne befinden sich zwei 360°-LiDAR-Systeme, die ein dynamisches zweidimensionales Umgebungsbild erstellen, welches die Basis für eine Kollisionswarnung bildet.

- **Passive Abstandssensorik und Sensorik für eine optimalen Trajektorien Steuerung in GNSS-schwachen Bereichen**

Das Position Hold-System vom Typ Pix4flow basiert auf einer nach unten gerichteten Kamera. Eine stabile Flugposition wird durch eine dynamische Bildverarbeitung ermöglicht. Durch die Mustererkennung wird ein Abdriften in der Lage verhindert. Eine in Flugrichtung ausgerichtete Stereokamera vom Typ ZED-Cam, erstellt über einen Onboard-Rechner (NVIDIA-CPU Typ Xavier) ein 3D-Modell der Umgebung. Die Stereokamera wird für die aktive Hinderniswarnung und für die präzise Bestimmung der räumlichen Lage der Drohne auf der optimalen Trajektorie verwendet. Die Sensoren können auch für eine Post-Processing-Auswertung verwendet werden. Die Einbindung der Sensoren erfolgt über die zentrale Kontrolleinheit der Flugsteuerung (Typ CUAUV5PLUS GNSS). Die Kontrolleinheit integriert zur Lageregelung zwei GNSS-Antennen, drei IMU's, einen Barometer und zwei elektronische Kompassse.

In der Abbildung 5.5 ist das Konzept des Prototypen vom Frühjahr 2019 und in der Abbildung 5.6 und 5.7 die Fertigstellung des Prototypen im Sommer 2020 dargestellt. Die Evaluierung der ersten Testflüge zeigten hervorragende Eigenschaften. Im manuellen als auch im automatischen Flug wurde die Stabilität der Flugeigenschaften positiv getestet. Die Flugeigenschaft wurde durch die Kameraposition oberhalb oder unterhalb des Cockpits nicht gestört. Bei den Testflügen konnte eine Flugzeit von ≈ 25 [min] erreichen. Durch die Kamera vom Typ Sony Alpha 7RIII konnten hochauflösende Bilder erzeugt werden. Bei mehreren Flügen mit großem Abstand konnte eine sichere Flugführung durch die Onboard-Sensoren absolviert werden. Die LiDAR-Sensoren ergaben in der Nähe und unter Objekten ein positives Ergebnis von hoher Zuverlässigkeit in allen drei Dimensionen.

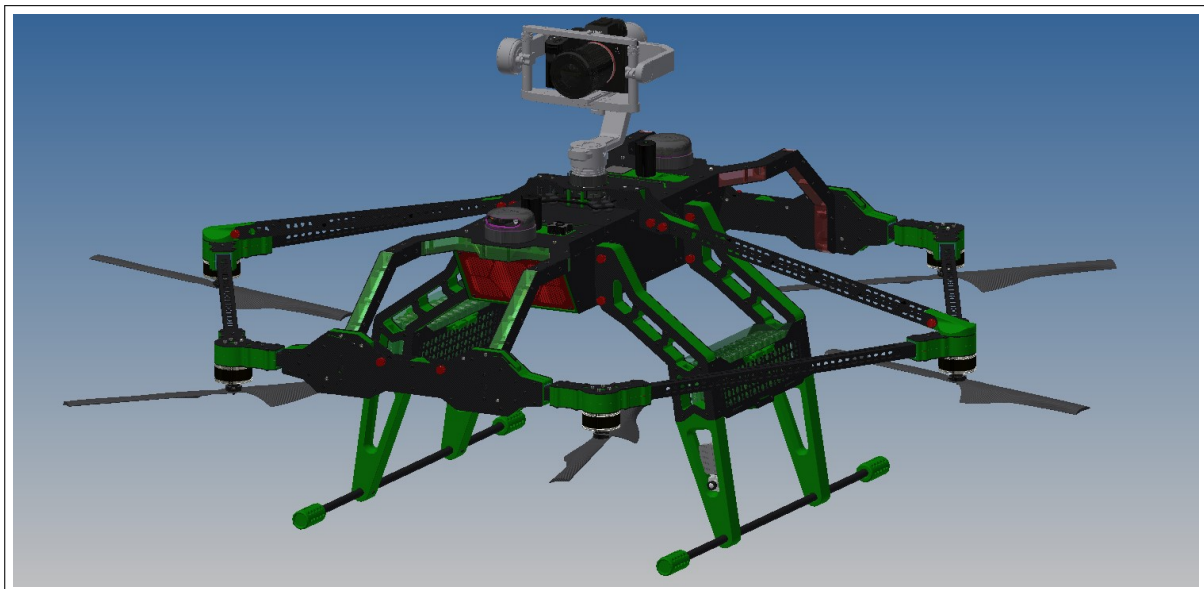


Abbildung 5.5: Konzept des Prototyps im Projekt Hyperbridge Take Off [Pöllabauer, 2020]



Abbildung 5.6: Fertigstellung des Prototyps-Seitenansicht [Pöllabauer, 2020]



Abbildung 5.7: Fertigstellung des Prototyps-Aufsicht [Pöllabauer, 2020]

Literatur

- [Agisoft 2019] AGISOFT: *Agisoft Metashape User Manual - Professional Edition, Version 1.5*. 2019. – URL https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf. – Zugriffsdatum: 2020-11-05
- [Austro Control 2015] AUSTRO CONTROL: *Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen für unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1*. 2015. – URL https://www.austrocontrol.at/jart/prj3/austro_control/data/uploads/LFA/LTH_LFA_ACE_067.pdf. – Zugriffsdatum: 2019-12-19
- [Bringmann 2002] BRINGMANN, Oliver: Die Punktwolke aus Sicht der Mustererkennung. In: *Photogrammetrie und Laser scanner; Wichmann-Verlag* (2002), S. 99–104
- [Cordts u. a. 2016] CORDTS, Marius ; OMRAN, Mohamed ; RAMOS, Sebastian ; REHFELD, Timo ; ENZWEILER, Markus ; BENENSON, Rodrigo ; FRANKE, Uwe ; ROTH, Stefan ; SCHIELE, Bernt: *The cityscapes dataset for semantic urban scene understanding*. 2016
- [Crislb 2010] CRISLB: *Neuron Model*. 2010. – URL <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Chrislb>. – Zugriffsdatum: 2020-08-05
- [Dieckert 2018] DIECKERT, Stephan: *Drohnen - Technik und Recht : bei gewerblicher und behördlicher Nutzung*. 2018. – ISBN 9783846205730
- [DJI-Phantom 2020] DJI-PHANTOM: *DJI Phantom 4 RTK Datenblatt*. 2020. – URL <https://www.sony.de/electronics/wechselobjektivkameras/ilce-7rm3/specifications>. – Zugriffsdatum: 2020-11-12
- [Eich 2019a] EICH, Stephan: Denkmalschutz. In: *DROHNENMAGAZIN* 4 (2019), S. 20–23. – URL <http://www.drohnenmagazin.com/>
- [Eich 2019b] EICH, Stephan: UAV in der Inspektion - Schäden an Bauwerken. In: *DROHNENMAGAZIN* 1 (2019), S. 14–17. – URL <http://www.drohnenmagazin.com/>
- [Eisenbeiß 2009] EISENBEISS, Henri: *UAV photogrammetry*. 2009
- [Eisenbeiss und Sauerbier 2011] EISENBEISS, Henri ; SAUERBIER, Martin: Investigation of uav systems and flight modes for photogrammetric applications. In: *Photogrammetric Record* 26 (2011), Nr. 136, S. 400–421. – ISSN 0031-868X
- [FARO 2016] FARO: *FARO Laser Scanner Focus 3D X 330 - Datenblatt*. 2016. – URL <https://faro.app.box.com/s/tyjaq03bwi7jz0hd73kffgz6pxe82lqw/file/441657430831>. – Zugriffsdatum: 2020-11-04
- [FARO-SCENE 2020] FARO-SCENE: *FARO Scene - Benutzerhandbuch*. 2020. – URL <https://faro.app.box.com/s/wf7qqcma04yb7vpxj4x438nh816stgtp/file/730718391061>. – Zugriffsdatum: 2020-11-23
- [futurezone 2015] FUTUREZONE: *Neue Regeln für Drohnen-Piloten in Österreich ab Juli 2020*. 2015. – URL <https://futurezone.at/netzpolitik/neue-regeln-fuer-drohnen-piloten-in-oesterreich-ab-juli-2020/400680023>. – Zugriffsdatum: 2019-12-11

- [Glira 2012] GLIRA, Philipp: *Direkte Georeferenzierung von Bildern eines unbemannten Luftfahrzeuges mit LowCost-Sensoren*, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der technischen Universität Wien, Diplomarbeit, 2012
- [GmbH 2016] GMBH, Trimble: *Trimble SX10 Scanning-Totalstation Datenblatt*. 2016.
– URL <https://de.geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2019-10/Datasheet%20-%20Trimble%20SX10%20-%20German.pdf>. – Zugriffsdatum: 2020-07-30
- [Grenzdörffer 2019] GRENZDÖRFFER, Görres: Multispektrale Fernerkundung mit Drohnen. In: *UAV 2019 – Geodäten erobern den Luftraum* Bd. 94. DVW -Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V., Berlin, 2019, S. 143–158
- [Hallermann u. a. 2017] HALLERMANN, Norman ; MORGENTHAL, Guido ; KERSTEN, Dr.-Ing ; RODEHORST, Prof: *Von der Bauwerksbefliegung mit UAS zu hochauflösenden Geometriemodellen*. 11 2017
- [Haykin 2007] HAYKIN, Simon: *Neural networks: a comprehensive foundation*. Prentice-Hall, Inc., 2007
- [Holst u. a. 2016] HOLST, Christoph ; SCHMITZ, Berit ; KUHLMANN, Heiner: TLS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von Standardsoftware. In: *Terrestrisches Laserscanning 2016 (TLS 2016)* Bd. 85. DVW -Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V., Fulda, 2016, S. 29–58
- [Kahmen 2011] KAHMEN, Heribert: *Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde*. Walter de Gruyter, 2011
- [Kaufmann WS 2019/20] KAUFMANN, Viktor: *Bildmessung*. WS 2019/20
- [Kern 2003] KERN, Fredie: *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2003
- [Kersten u. a. 2018] KERSTEN, Jens ; RODEHORST, Volker ; HALLERMANN, Norman ; DEBUS, Paul ; MORGENTHAL, Guido: *Potentials of Autonomous UAS and Automated Image Analysis for Structural Health Monitoring*. 9 2018
- [Kraus 2012] KRAUS, Karl: *Photogrammetrie : 1 : Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. 8. Aufl.. 2012. – ISBN 9783110209617
- [Lackner S 2016] LACKNER S, Lienhart W.: Impact of Prism Type and Prism Orientation on the Accuracy of Automated Total Station Measurements. Vienna Austria, 2016. – Forschungsbericht. – 8 S. Proc. Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)
- [Lague u. a. 2013] LAGUE, Dimitri ; BRODU, Nicolas ; LEROUX, Jérôme: Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). In: *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 82 (2013), S. 10–26
- [Lamba 2019] LAMBA, Harshall: Understanding Semantic Segmentation with UN-ET. In: *towards data science* (2019). – URL <https://towardsdatascience.com/understanding-semantic-segmentation-with-unet-6be4f42d4b47>
- [Leica-Geosystems 2015] LEICA-GEOSYSTEMS: *Leica Nova MS60 Datenblatt*. 2015.
– URL <https://www.grad-gon.shop/WebRoot/Store7/Shops/399343885/MediaGallery/>

- Instrumente/Tachymeter/MS60/Leica_Nova_MS60_Datenblatt.pdf. – Zugriffsdatum: 2020-06-14
- [Lopatka 2019] LOPATKA, Andreas: Zivile Drohnen - ist Österreich auf die EU-Vollharmonisierung vorbereitet? In: *ecolex* (2019), Nr. 9, S. 816. – URL <https://futurezone.at/netzpolitik/neue-regeln-fuer-drohnen-piloten-in-oesterreich-ab-juli-2020/400680023>. – Zugriffsdatum: 2019-12-11
- [Morgenthal u. a. 2015] MORGENTHAL, Guido ; HALLERMANN, Norman ; ACHELNIK, Michael: Unbemannte Fluggeräte zur Zustandsermittlung von Bauwerken / Forschungsinitiative Zukunft BAU. Fraunhofer IRB, 2015. – Forschungsbericht F 2971
- [Mwiti 2019] MWITI, Derrick: A 2019 Guide to Semantic Segmentation. In: *Heartbeat* (2019). – URL <https://heartbeat.fritz.ai/a-2019-guide-to-semantic-segmentation-ca8242f5a7fc>
- [Niemeier u. a. 2002] NIEMEIER, W ; THOMSEN, S ; SCHÄFER, M: 3-D Geometrieerfassung mit Terrestrischen Laser-scannern. In: *Photogrammetrie und Laserscanning Anwendung für As-Built-Dokumentation und Facility-Management* (2002), S. 15–26
- [Niemeijer 2017] NIEMEIJER, Joshua: *Semantische Instanzsegmentierung basierend auf Deep Learning im Kontext des automatisierten Fahrens*, Universität zu Lübeck, Dissertation, 2017
- [Pöllabauer 2020] PÖLLABAUER, Christoph: Ideen!Reich - Ideen zünden - Hyperbridge Take off / ADP-Rinner ZT GmbH. 2020 (1). – Firmeninterner Projektbericht
- [Ranalter 2018] RANALTER, Katharina: Strenge Kontrollen sorgen für Sicherheit. In: *meinbezirk.at* (2018). – URL https://www.meinbezirk.at/stubai-wipptal/c-lokales/strenge-kontrollen-sorgen-fuer-sicherheit_a2837306#gallery=null. – Zugriffsdatum: 2019-12-28
- [Rocketloop 2019] ROCKETLOOP: Was sind künstliche neuronale Netze? In: *DROHNENMAGAZIN* (2019). – URL <https://rocketloop.de/kuenstliche-neuronale-netze/>
- [Sony 2017] SONY: *Sony Alpha 7R III*. 2017. – URL https://shop.solectric.de/media/pdf/10/34/78/spezifikation_phantom4rtk.pdf. – Zugriffsdatum: 2020-11-04
- [Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft m.b.H. 2020] STEIRISCHE WIRTSCHAFTSFÖRDERUNGSGESELLSCHAFT M.B.H.: *Förderungsaktion - Ideen!Reich*. 2020. – URL <https://www.sfg.at/cms/wp-content/uploads/2019/07/detailinformation-ideen-reich.pdf>. – Zugriffsdatum: 2020-10-02
- [Österreichischer Aero ClubFAA 01 Dezember 2016] ÖSTERREICHISCHER AERO CLUBFAA: *Lufttüchtigkeits-Hinweis LTH-OeAeC-MFT-01*. 01 Dezember 2016. – URL https://aeroclub.at/uploads/download/OeAeC_FAA_LTH_MFT-01_i00_anforderungen-fm25.pdf. – Zugriffsdatum: 2019-12-19
- [Strohmayr 2017] STROHMAYER, Andreas: Unmanned Aerial Systems - Auslegung, Einsatzbereiche und operative Rahmenbedingungen. In: *UAV 2018 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen* Bd. 86. DVW -Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V., Stuttgart, 2017, S. 27–44

- [Thamm 2018] THAMM, Alexander: *KI, künstliche neuronale Netze, Machine Learning, Deep Learning: Wir bringen Licht in die Begriffe rund um das Thema „Künstliche Intelligenz“*. 2018. – URL <https://www.alexanderthamm.com/de/blog/>. – Zugriffsdatum: 2020-08-07
- [Ullman 1979] ULLMAN, Shimon: The interpretation of structure from motion. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences* 203 (1979), Nr. 1153, S. 405–426
- [Vennegeerts u. a. 2009] VENNEGEERTS, Harald ; PAFFENHOLZ, Jens-André ; MARTIN, Jens ; KUTTERER, Hansjörg: Zwei Varianten zur direkten Georeferenzierung terrestrischer Laserscans. In: *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)* 1 (2009), Nr. 2009, S. 33–42
- [Wackwitz 2018] WACKWITZ, Kay: Aktuelle Entwicklungen der europäischen Drohnenbranche. In: *Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017)* Bd. 89. DVW -Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V., Hamburg, 2018, S. 9–12
- [Wangerin 2013] WANGERIN, Gerda: *Bauaufnahme: Grundlagen Methoden Darstellung*. Springer-Verlag, 2013
- [Witte 2011] WITTE, Bertold: *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. 8., überarb. u. erw. Aufl.. 2011. – ISBN 9783879074976
- [Zell 1994] ZELL, Andreas: *Simulation neuronaler Netze*. Addison-Wesley Bonn, 1994

Abbildungsverzeichnis

1.1	Einsatz von einem Brückeninspektiongerät an der Europabrücke der österreichischen Brenner Autobahn A13 in Tirol.	1
1.2	Brückeninspektion durch eine manuelle Befliegung der Feldaisttalbrücke-Mühlviertler Schnellstraße S10 in Oberösterreich.	3
1.3	Fernsteuerung für die Drohne und die Onboard-Kamera.	4
1.4	Mechanischer Anprallschutzmechanismen [Morgenthal u. a., 2015].	5
1.5	Methoden zur Erstellung von einem digitalen Zwilling, der in vielen Arbeitsbereichen unterschiedliche genutzt wird.	6
1.6	Flussdiagramm von dem gesamten Prozess zur Erstellung eines digitalen Zwillings mit einer Textur aus Bildern mit klassifizierten Bauwerksschäden.	6
1.7	Flussdiagramm der einzelnen Schritte von der Datenerfassung über die Datenauswertung bis zum Endprodukt der Masterarbeit.	7
3.1	Distanzfehler bei der reflektorlosen Messung zu Innenecken und Außenkanten [Witte 2011, S. 191].	14
3.2	Impulsverfahren[Witte 2011, S. 173]	15
3.3	Phasenvergleichsverfahren[Witte 2011, S. 179]	15
3.4	Kartesisches Koordinatensystem nach Kahmen [2011].	16
3.5	Scannende Totalstationen	17
3.6	Flächenhaftes Abscannen [Niemeier u. a., 2002]	18
3.7	Institutgebäude Geodäsie-Technische Universität Graz, Styregasse 30.	19
3.8	Arbeitsablauf von photogrammetrischen Vermessungen mit Drohnen nach [Witte 2011, S. 390].	21
3.9	Stereoskopisches Messprinzip nach Hallermann u. a. [2017].	22
3.10	Anwendungsgebiete und adäquate Technologien [Bringmann, 2002].	24
3.11	Direkte Georeferenzierung [Kaufmann, WS 2019/20]	25
3.12	Koordinatensystem für die direkte Georeferenzierung [Kaufmann, WS 2019/20].	25
3.13	Indirekte Georeferenzierung [Kaufmann, WS 2019/20]	26
3.14	C2C-Vergleich ohne (links) und mit (rechts) lokaler Modellierung nach [Holst u. a., 2016].	28
3.15	Punktwolkenabstandes an einem Kernpunkt mit dem M3C2M-Vergleich nach [Holst u. a., 2016].	29
3.16	Graphische Darstellung eines künstlichen Neurons und den vier Basiselementen [Crislb, 2010].	30
3.17	Semantische Segmentierung auf Pixelebene [Cordts u. a., 2016].	31
3.18	Basis der Instanzsegmentierung [Cordts u. a., 2016].	31
3.19	Jede Instanz einer Klasse im Bild wird Bounding-Box definiert [Cordts u. a., 2016].	32
4.1	Referenzobjekt - Landesbrücke in Takern I der Gemeinde St. Margarethen an der Raab in der Steiermark.	33
4.2	Ansicht aus der östlicher Perspektive von der Punktwolke in Leica Infintiy. Die Sträucher und Bäume neben dem Referenzobjekt wurden bei der Methode Halbkugel mit aufgenommen. Der Scan mit der Methode Halbkugel wird in de Farbe Cyan dargestellt.	36
4.3	Ansicht aus der nördlichen Perspektive von der Punktwolke in Leica Infintiy. Die Umgebung wird in der Farbe Cyan dargestellt.	36

4.4	Ansicht auf den südöstlichen Scanbereich. Die Zielmarken (Orange markiert) wurden am Objekt und an den Straßenpfosten befestigt. Die Referenzkugeln (Gelb markiert), für eine Verknüpfung der beiden Punktwolken, wurden gut verteilt am Boden zwischen den Aufnahmen Standpunkten positioniert.	37
4.5	Markierung der Zielmarken (Gelb) und der Referenzkugeln (Grün) in jedem Anzeigefenster für die beiden Scans. Es war drauf zu achten, in beiden Scans das gleiche Objekt zu definieren.	39
4.6	Ansicht aus der östlichen Perspektive auf die Punktwolke in Faro Scene. Durch Eingabe eines Hz- und V-Winkelwert konnte ein Kegelbereich definiert und gescannt werden. Durch die Aufnahme der näheren Umgebung wurde die Datenmenge sehr groß.	40
4.7	Ansicht aus der westlichen Perspektive von der Punktwolke in Faro Scene. Sträucher, Verkehrszeichen und die Oberfläche der näheren Umgebung wurden auch gescannt.	40
4.8	Die Übersichtskarte ist eine Draufsicht des Projektgebietes. Die Karte wurde als Bild in Graustufen dargestellt. Die blauen kreisförmigen Markierungen repräsentieren die beiden Faro Focus 3D X330 Standpunkte.	41
4.9	Die optimalen Einstellungen zum Ausrichten der Bilder zueinander ergab sich aus mehreren Versuchen.	43
4.10	Verzerrungsplot von der DJI Phantom 4 RTK Kamera nach der Kamera-Kalibrierung	45
4.11	Die optimalen Einstellungen zum Erstellen einer dichten Punktwolke. Mit den Einstellungen für die Tiefenfilterung kann experimentiert werden, wenn Zweifel an dem Ergebnis liegen.	45
4.12	Punktwolkenansicht aus westlicher Perspektive mit Aigsoft Metashape. Ein Teil der Oberfläche in der näheren Umgebung wurde mit ausgewertet. Es sind auch die Aufnahmepositionen der DJI Phantom 4 RTK Kamera in blauer Farbe dargestellt.	46
4.13	Punktwolkenansicht aus östlichen Perspektive mit Aigsoft Metashape. Ein Teil der Oberfläche in der näheren Umgebung wurde mit ausgewertet. Die Positionen der 16 Targets werden auch auf der Punktwolke abgebildet.	46
4.14	Grundeinstellungen für den Punktwolkenvergleich der Leica Nova MS60 Referenzpunktvolke und der Faro Focus 3D X330 Vergleichspunktvolke	48
4.15	Grundeinstellungen für den Punktwolkenvergleich der Leica Nova MS60 Referenzpunktvolke und DJI Phantom 4 RTK Vergleichspunktvolk.	48
4.16	Ansicht der vier Profile aus der Vogelperspektive an der Faro Punktwolke	49
4.17	Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 2 in den X-, Y- und Z-Achsen (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)	51
4.18	Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 2 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit.	52
4.19	Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 2 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.	53
4.20	Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 2 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von dem Ausreißertest (Abschnitt 4.5.4).	54
4.21	Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 2 in den X-, Y- und Z-Achsen (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK).	55
4.22	Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 2 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit.	56

4.23	Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 2 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.	57
4.24	Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 2 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von den Ausreißern (Abschnitt 4.5.4).	58
4.25	Darstellung der zeitlichen Analyse der drei Methoden in einem Balkendiagramm. . .	60
4.26	Einstellungen für die Erstellung der 3D-Modelle durch Agisoft Metashape.	61
4.27	Graphische Darstellung des 3D-Modelle von dem terrestrischen Scan mit der Leica Nova MS60 von dem Referenzmodell aus östlicher Ansicht.	61
4.28	Graphische Darstellung des 3D-Modelle von dem terrestrischen Scan mit dem Faro Focus 3D X330 von dem Referenzmodell aus östlicher Ansicht.	61
4.29	Graphische Darstellung des 3D-Modelle aus der photogrammetrischen Aufnahme mit der DJI Phantom 4 RTK Drohne aus östlicher Ansicht.	62
4.30	Ermittelte Klassen der Kategorie Riss (Orange), Korrosion (Blau), Abplatzung (Magenta) und Aussinterung (Grün) aus der originalen Bilddatei.	64
4.31	Die drei Abplatzungen (Magenta), die Korrosion (Blau) und der Riss (Orange) werden in der XML-Datei als Klassen segmentiert. Die Aussinterung (Grün) und ein Riss (Orange) wurden aufgrund der Gewichtung und kleinen Fläche nicht segmentiert.	65
4.32	Verzerrungsplot von der Sony Alpha 7R III Kamera nach der Kamera-Kalibrierung.	66
4.33	Einstellungen für die Texturierung der schadensklassifizierten Bilder auf das georeferenzierte 3D-Modell.	66
4.34	Ausschnitt aus dem Orthofoto aus westlicher Ansicht auf das Referenzobjekt. In den Detailbereichen (A), (B) und (C) sind Risse (Orange) und in (D) ein Bereich mit einer Aussinterung (Grün) zu erkennen.	67
4.35	Größere Darstellung der schadensklassifizierten Risse aus den Bereichen (A), (B) und (C)	67
5.1	Optimale Aufnahmebereiche für die terrestrische Multistation (Leica Nova MS60) bei dem Referenzobjekt.	71
5.2	Optimale Aufnahmebereiche durch die Drohne (DJI Phantom 4 RTK) bei dem Referenzobjekt.	72
5.3	Positionierung der Kamera [Pöllabauer, 2020]	74
5.4	Fernsteuerung für die Autron-Drohne und die Onboard-Kamera[Pöllabauer, 2020]	74
5.5	Konzept des Prototyps im Projekt Hyperbridge Take Off [Pöllabauer, 2020]	75
5.6	Fertigstellung des Prototyps-Seitenansicht[Pöllabauer, 2020]	76
5.7	Fertigstellung des Prototyps-Aufsicht[Pöllabauer, 2020]	76
A.1	Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 1 in den X-, - und Z- Achsen (Leica Nova MS60- Faro Focus 3D)	93
A.2	Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 1 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit	94
A.3	Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 1 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.	95
A.4	Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 3 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von den Ausreißern (Abschnitt 4.5.4)	95

A.5	Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 3 in den X-, Y- und Z- Achsen (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)	96
A.6	Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 3 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit	97
A.7	Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 3 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.	98
A.8	Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 3 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von den Ausreißern (Abschnitt 4.5.4)	98
A.9	Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 4 in den X-, Y- und Z- Achsen (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)	99
A.10	Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 4 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit	100
A.11	Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 4 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.	101
A.12	Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 4 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von den Ausreißern (Abschnitt 4.5.4)	101
A.13	Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 1 in den X-, Y- und Z- Achsen (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)	102
A.14	Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 1 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit	103
A.15	Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 1 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.	104
A.16	Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 1 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von den Ausreißern (Abschnitt 4.5.4)	104
A.17	Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 3 in den X-, Y- und Z- Achsen (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)	105
A.18	Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 3 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit	106
A.19	Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 3 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.	107
A.20	Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 3 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von den Ausreißern (Abschnitt 4.5.4)	107
A.21	Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 4 in den X-, Y- und Z- Achsen (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)	108
A.22	Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 4 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit	109
A.23	Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 4 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.	110

A.24 Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 4 in Cloud
Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von den Ausreißern
(Abschnitt 4.5.4) 110

Tabellenverzeichnis

4.1	Einstellungen für die einzelnen Leica Nova MS60 Scans	35
4.2	Einstellungen für die beiden Faro Focus 3D X330 Scans	38
4.3	Korrelation der Verzerrung von der DJI Phantom 4 RTK Kamera	44
4.4	Durchschnittliche Genauigkeiten der ausgeglichenen Bildparameter	44
4.5	Anzahl der Punkte in den einzelnen Punktwolken von der Aufnahme bis zum Vergleich	47
4.6	Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D) für das Brückenprofil 2	51
4.7	Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK) auf die Distanz für das Brückenprofil 2	55
4.8	Klassifizierung von den Schäden durch das neuronale Netzwerk	62
4.9	Korrelation der Verzerrung von der Sony Alpha 7 R III-Kamera	66
A.1	Verwendete Software im Rahmen der Masterarbeit	87
A.2	Leica Nova MS60 - Technische Daten [Leica-Geosystems, 2015]	87
A.3	Faro Focus 3D X330 - Technische Daten [FARO, 2016]	88
A.4	DJI Phantom 4 RTK - Technische Daten [DJI-Phantom, 2020]	88
A.5	Sony Alpha 7R III - Technische Daten [Sony, 2017]	90
A.6	Koordinaten und Residuen der Standpunkte	91
A.7	Koordinaten und Residuen der Passpunkte am Referenzobjekt	91
A.8	Koordinaten der Marker für die Registrierung der Punktwolke	92
A.9	Koordinaten der Marker für die photogrammetrische Bildauswertung	92
A.10	Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D) auf die Distanz für das Brückenprofil 1	93
A.11	Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D) auf die Distanz für das Brückenprofil 3	96
A.12	Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D) auf die Distanz für das Brückenprofil 4	99
A.13	Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK) auf die Distanz für das Brückenprofil 1	102
A.14	Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK) auf die Distanz für das Brückenprofil 3	105
A.15	Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK) auf die Distanz für das Brückenprofil 4	108

A Anhang

A.1 Verwendete Software

Tabelle A.1: Verwendete Software im Rahmen der Masterarbeit

Produkt	Hersteller	Verwendungszweck	Version
Auto Cad	Autodesk	Erstellen von Profilen in DXF - Format	2018
Cloud Compare	Cloud Compare	Point Cloud Display	02.11.2000
Excel	Microsoft	Diagramm für die Zeitanalyse	2016
Infinity	Leica	Multi- View 3D - Rekonstruktion	3.2.0
Metashape	Agisoft	Multi- View 3D - Rekonstruktion	1.6.2
Scene	Faro	Multi- View 3D - Rekonstruktion	2020.0.4
Spyder	Spyder	num. Auswertung & graph. Darstellung	04.01.2004
TEXnicCenter	L ^A T _E X	Dokumentation	2.02
VERM	Geosi	Berechnung von Pass- und Standpunkten	V17

A.2 Technische Daten der Instrumente

A.2.1 Leica Noca MS60

Tabelle A.2: Leica Nova MS60 - Technische Daten [Leica-Geosystems, 2015]

Winkelmessung		
Genauigkeit (HZ und V)	Absolut, kontinuierlich	1["](0.3 [mgon])
Distanzmessung		
Reichweite	Prisma (GPR1, GPH1P)	1.5 [m] bis > 10000 [m]
	Ohne Prisma	1.5 [m] bis 2000 [m]
Genauigkeit / Messzeit	Prisma	1 [mm] + 1.5 [ppm] / 1.5 [s]
	Ohne Prisma	2 [mm] + 2 [ppm] / 1.5 [s]
Messpunktgröße	bei 50 [m]	8 [mm] x 20 [mm]
Messverfahren	Wave Form Digitsing	Koaxial, sichtbarer Laser (rot)
Scanning		
Max. Reichweite Messrauschen	1000 [Hz] Modus	bis zu 300 [m] / 1.0 [mm] bei 50 [m]
	250 [Hz] Modus	bis zu 400 [m] / 0.8 [mm] bei 50 [m]
	62 [Hz] Modus	bis zu 500 [m] / 0.6 [mm] bei 50 [m]
	1 [Hz] Modus	bis zu 1000 [m] / 0.6 [mm] bei 50 [m]
Scanning	Onboard 3D - Punktwolken Ansicht Echtfarben, Intensität und Signal / Rausch Information	
Motorisierung		
Piezo Antrieb	Rotationsgeschwindigkeit	Max. 200 [gon] / [s]

A.2.2 Faro Focus 3D X330

Tabelle A.3: Faro Focus 3D X330 - Technische Daten [FARO, 2016]

Entfernungsmesseinheit		
Eindeutigkeitsintervall	122 bis 488 <i>Kpts / Sek</i>	614 [m]
	976 <i>Kpts / Sek</i>	307 [m]
Reichweite Focus 3D X330	0.6 [m] – 330 [m] in Innenräumen oder im Freien mit senkrechtem Einfallswinkel auf 90% reflektierender Oberfläche	
Messrate (Pkt/s)	122.000 / 244.000	488.000 / 976.000
Systematischer Distanzfehler	± 2 [mm]	
Farbgerät		
Auflösung	Bis zu 70 Megapixel in Farbe	
Dynamische Farbfunktion	Automatische Helligkeitsanpassung	
Parallaxe	Koaxiales Design	
Ablenkeinheit		
vertikales Sichtfeld	300°	
horizontales Sichtfeld	360°	
vertikale Auflösung	0.009° (40.960 3D – Pixel bei 360°)	
horizontale Auflösung	0.009° (40.960 3D – Pixel bei 360°)	
max. vert. Scangeschwindigkeit	5.820 [rpm] oder 97 [Hz]	
Laser - Optischer Sender		
Laserklasse	Laserklasse I	
Wellenlänge	1550 [nm]	
Strahldivergenz	Standard 0.19 [mrad] (0.011°) (1/e, Halbwinkel)	
Strahldurchmesser bei Austritt	Standard 2.25 [mm] (1/e)	
Allgemein		
Akkulaufzeit	4.5 Stunden	
Gewicht	5.2 [kg]	
Abmessung	240 x 200 x 100 [mm]	

A.2.3 DJI Phantom 4 RTK

Tabelle A.4: DJI Phantom 4 RTK - Technische Daten [DJI-Phantom, 2020]

Fluggerät	
Startgewicht	1391 [g]
Diagonaler Abstand	350 [mm]
Max. Flughöhe	6000 [m]

Max. Steiggeschwindigkeit	6 [m/s]
Max. Sinkgeschwindigkeit	3 [m/s]
Max. Fluggeschwindigkeit	50 [km/h]
Max. Flugzeit	30 [min]
Arbeitsfrequenz	2.400 [GHz] bis 2.483 [GHz]
Kamera	
Sensor	1" CMOS; Tatsächliche Pixel: 20MP
Objektiv	Sichtfeld 84° 8.8 [mm] / 24 [mm]
	F2.8 – F11 Autofokus ab 1 [m] bis ∞ 35 [mm] Format Äquivalent
ISO - Bereich Foto	100 – 3200 (Auto)
	100 – 12800 (Manuell)
ISO - Bereich Video	4864 x 3648 (4 : 3)
	5472 x 3648 (3 : 2)
Max. Bildauflösung	100 – 3200 (Auto)
	100 – 6400 (Manuell)
Video - Aufnahme Modi	H.264
	4K : 3840 x 2160 30p
Foto - Format	JPEG
Video - Format	MOV
Kameramontage	Unterseite
GNSS	
Frequenzen	GPS L1 / L2
	GLONASS L1 / L2
	BeiDou B1 / B2
	Galileo E1 / E5a
Dauer bis zum Erstempfang	< 50 [s]
Horizontale Positionsgenauigkeit	1.0 [cm] + 1 ppm (RMS)
Vertikal Positionsgenauigkeit	1.5 [cm] + 1 ppm (RMS)
Gimbal	
Stabilisierung	3 - Achsen (Kipp-, Roll-, Schwenkachse)
Neigung	– 90 [°] bis + 30 [°]
max. steuerbare Winkelgeschwindigkeit	90 [° / s]
Winkelschwingungsbereich	± 0.02 [°]

A.2.4 Sony Alpha 7R III

Tabelle A.5: Sony Alpha 7R III - Technische Daten [Sony, 2017]

Aufnahmeeigenschaften und Standards	
Megapixel (effektiv)	42.2 Megapixel
Maximale Bildauflösung	7.952×5.304 Bildpunkte
Sensortyp	CMOS
Sensorgroße (effektiv)	35.9×24.0 [mm]
Cropfaktor	1.0
Bildformat	JPEG und RAW
Optik	
Wechselobjektivfassung	Ja
Objektiv - Bajonett	Sony E - Bajonett
Funktionen	
Optischer Bildstabilisator	Ja, im Objekt integriert
ISO Empfindlichkeit	50 <i>bis</i> 102400
Selbstausröser	2.1 Sekunde
Belichtungssteuerung	Programm -, Zeit -, Blendenautomatik, Manuell
Scharfstellung	Autofokus und manueller Fokus
Physikalische Eigenschaften	
Verschluss - Art	elektronisch, mechanisch
Belichtungszeiten	30 [s] <i>bis</i> 1 / 8000 [s]
Größe	$127 \times 96 \times 74$ [mm]
Gewicht	657 [g]

A.3 Ergebnisse der Koordinaten

Die Koordinaten werden im österreichischen Bundesmeldenetz (BMN) im MGI-Referenzsystem Zone M34 tabellarisch aufgelistet.

A.3.1 Koordinaten der einzelnen Stationierungen

Tabelle A.6: Koordinaten und Residuen der Standpunkte

	Hochwert x [m]	Rechtswert y [m]	Höhe [m]	s_x [mm]	s_y [mm]	s_H [mm]	Orientierung [°]
Stationierungen für den Leica Nova MS60 Scan							
FS-01	-44169.8781	213885.7449	331.7418	1.3	0.9	0.4	276.9468
FS-02	-44162.6729	213874.2666	331.7498	1.9	2.7	0.3	276.9556
FS-03	-44155.4840	213897.6266	331.3957	1.8	2.4	0.4	276.9504
FS-04	-44170.6214	213910.0164	331.6872	0.8	0.8	0.1	60.7899
FS-05	-44180.6406	213885.5591	331.7175	0.6	0.5	0.3	37.1717
FS-06	-44160.2594	213880.3879	331.9478	0.4	0.8	0.2	276.9486
FS-07	-44182.9418	213887.6332	331.8222	0.3	0.7	0.2	42.2035
Stationierungen für den Faro Focus 3D X330 Scan							
FS-01	-44161.325	213879.610	331.849	0.3	0.4	0.2	250.5594
FS-02	-44187.701	213883.891	331.985	0.2	0.3	0.3	156.6770
Stationierungen für den DJI Phantom 4 RTK Flug							
FS-01	-44160.513	213879.267	331.980	0.5	0.6	0.3	173.8725
FS-02	-44177.192	213919.779	331.472	3.7	1.1	0.2	105.6421
FS-03	-44160.513	213879.267	331.980	0.5	0.6	0.3	253.3971

A.3.2 Koordinaten von den Passpunkte

Tabelle A.7: Koordinaten und Residuen der Passpunkte am Referenzobjekt

Punkt ID	Hochwert x [m]	Rechtswert y [m]	Höhe [m]	s_x [mm]	s_y [mm]	s_H [mm]
PP01	-44359.781	213778.915	330.222	3.3	4.5	6.4
PP02	-44191.626	213874.517	330.214	2.4	2.4	6.4
PP03	-44184.954	213882.769	330.164	2.5	2.4	6.4
PP04	-44165.580	213876.016	330.037	2.4	2.6	6.4
PP05	-44164.852	213864.085	330.030	2.4	2.6	6.4
PP06	-44144.726	213803.200	330.615	2.7	3.3	6.4
SP01	-44183.926	213871.423	332.502	2.4	2.4	6.4
SP02	-44174.085	213867.071	332.416	2.4	2.5	6.4
SP03	-44159.097	213918.171	331.233	3.0	2.8	6.4
SP04	-44156.728	213917.264	330.818	3.0	2.9	6.4

A.3.3 Koordinaten der Marker für den Faro Focus 3D Scan

Tabelle A.8: Koordinaten der Marker für die Registrierung der Punktwolke

Punkt ID	Hochwert x [m]	Rechtswert y [m]	Höhe [m]
T02	-44174.550	213867.156	331.581
T03	-44183.769	213871.242	331.590
T3.1	-44184.321	213871.476	331.625
T04	-44179.130	213879.345	330.178
T05	-44170.648	213885.227	330.312
T06	-44167.037	213888.668	335.182
T10	-44170.705	213885.286	330.497
T14	-44176.187	213877.007	332.647
T15	-44166.530	213901.761	331.167
T17	-44163.693	213896.378	330.460
T19	-44178.757	213878.978	334.587
T20	-44166.732	213897.777	335.281

A.3.4 Koordinaten der Marker für die photogrammetrische Auswertung mit Agisoft

Tabelle A.9: Koordinaten der Marker für die photogrammetrische Bildauswertung

Punkt ID	Hochwert x [m]	Rechtswert y [m]	Höhe [m]
Target 1	-44184.074	213871.371	332.028
Target 2	-44184.155	213871.398	335.269
Target 3	-44182.412	213870.734	334.772
Target 4	-44178.266	213880.067	334.772
Target 5	-44173.341	213891.227	335.293
Target 6	-44167.671	213904.055	335.675
Target 7	-44158.971	213917.840	333.809
Target 8	-44158.951	213917.717	331.312
Target 16	-44161.230	213918.652	335.844
Target 17	-44157.275	213916.950	330.793
Target 18	-44157.604	213916.853	333.253
Target 20	-44161.095	213902.116	335.556
Target 21	-44170.422	213880.985	334.643
Target 23	-44174.591	213867.175	332.793
Target 24	-44176.066	213868.231	334.969
Target 25	-44174.750	213867.251	334.668

A.4 Ergebnisse aus dem Punktwolkenvergleich der Brückenprofile

A.4.1 Faro Focus 3D Vergleichsergebnisse

A.4.1.1 Brückenprofil 1

Tabelle A.10: Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D) auf die Distanz für das Brückenprofil 1

Differenz in Richtung	Absolut	X	Y	Z	Einheit
Mittelwert	0.00	1.65	-1.42	-0.850	[mm]
Standardabweichung	4.46	6.28	5.43	5.32	[mm]
linke 3 σ Schranke	-13.37	-17.20	-17.70	-16.81	[mm]
rechte 3 σ Schranke	13.37	20.50	14.87	15.11	[mm]
maximaler Wert	24.90	36.41	28.86	28.80	[mm]
minimaler Wert	0.00	-33.28	-31.25	-29.92	[mm]

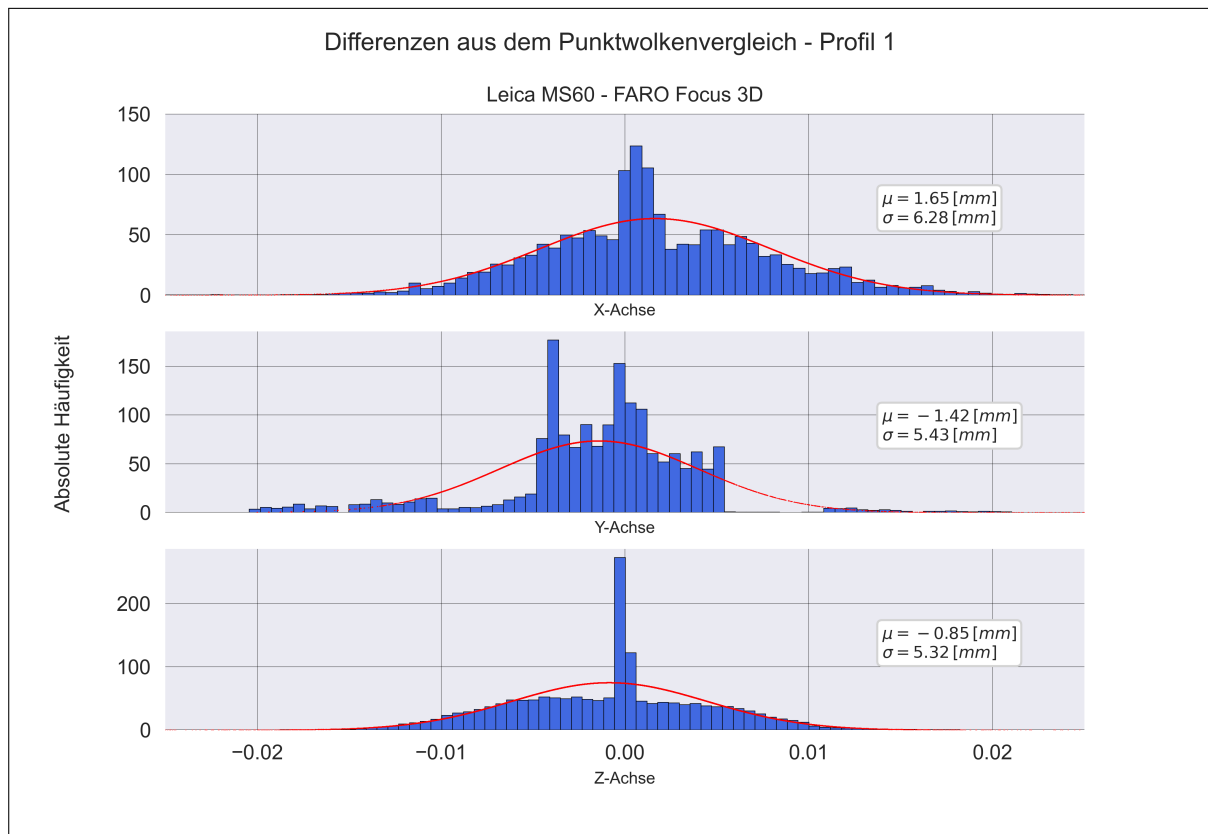
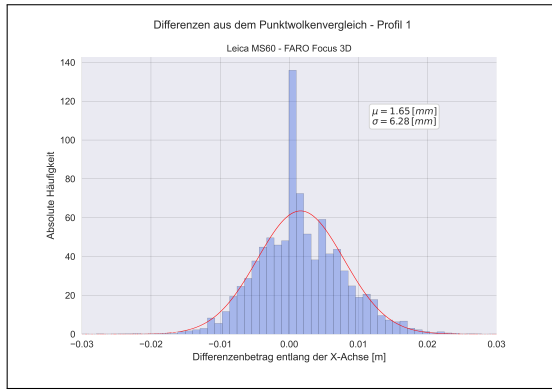
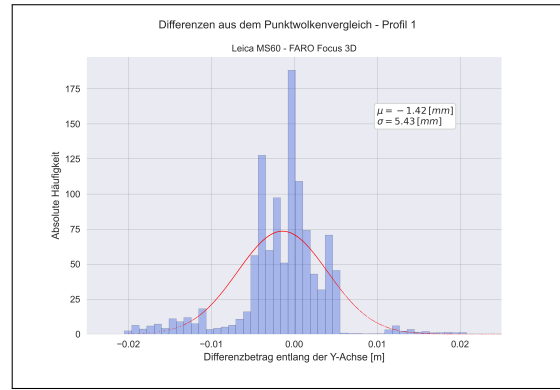


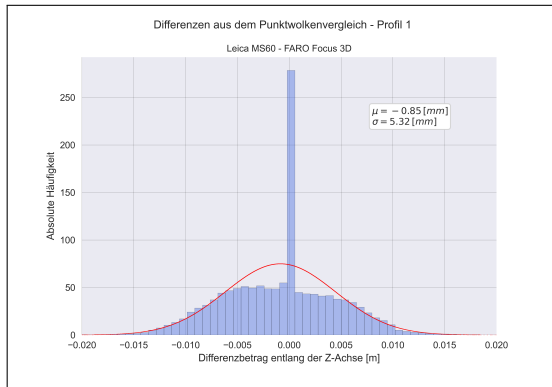
Abbildung A.1: Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 1 in den X-, - und Z-Achsen (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D)



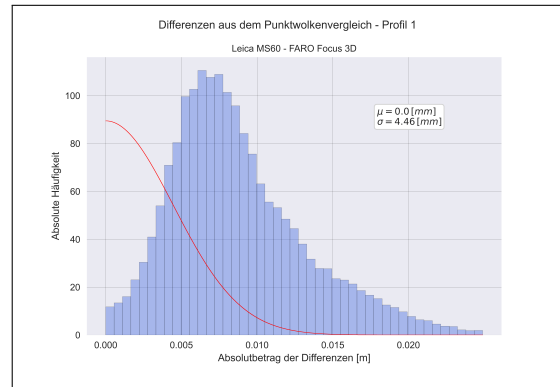
(a) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der X-Achse (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D)



(b) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Y-Achse (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D)

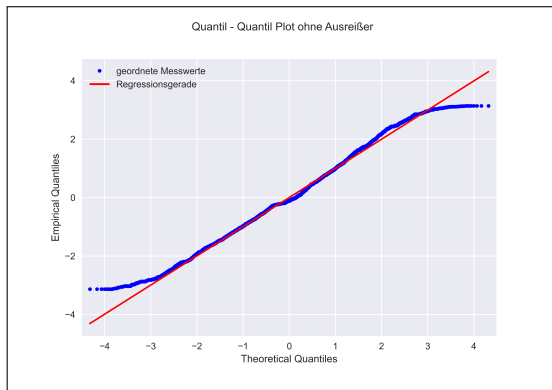


(c) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Z-Achse (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D)

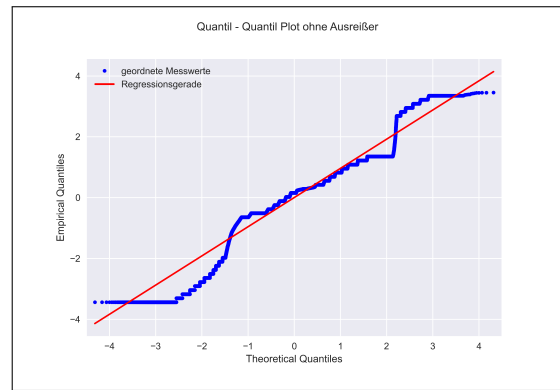


(d) Absolute Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D)

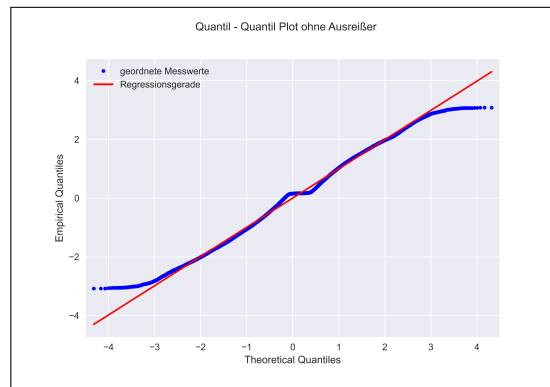
Abbildung A.2: Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 1 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit



(a) QQ-Diagramm von der X-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)

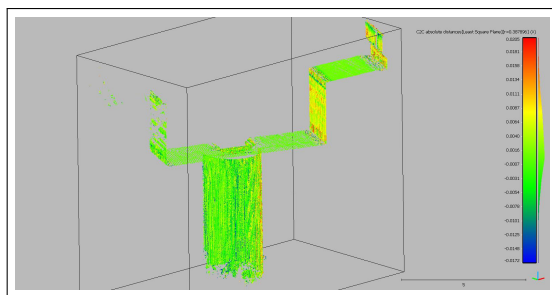


(b) QQ-Diagramm von der Y-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)

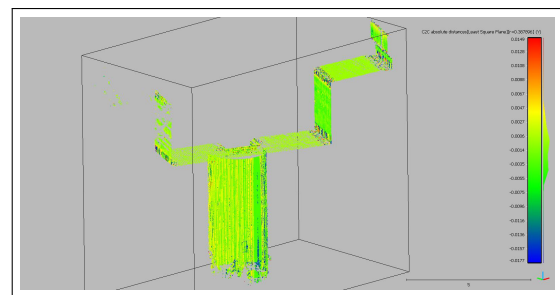


(c) QQ-Diagramm von der Z-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)

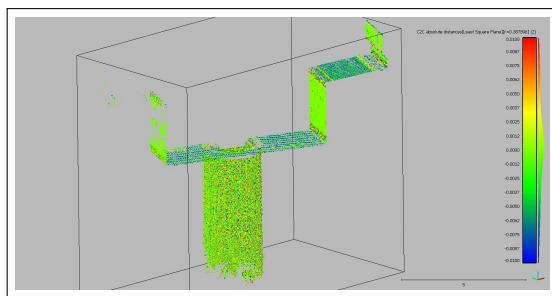
Abbildung A.3: Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 1 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.



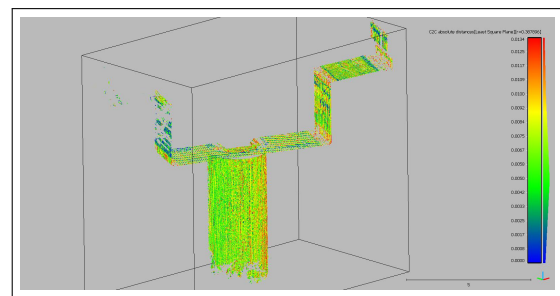
(a) Differenzbetrag in X-Richtung. (-17.20 bis 20.50 [mm])



(b) Differenzbetrag in Y-Richtung. (-17.20 bis 14.87 [mm])



(c) Differenzbetrag in Z-Richtung. (-16.81 bis 15.11 [mm])



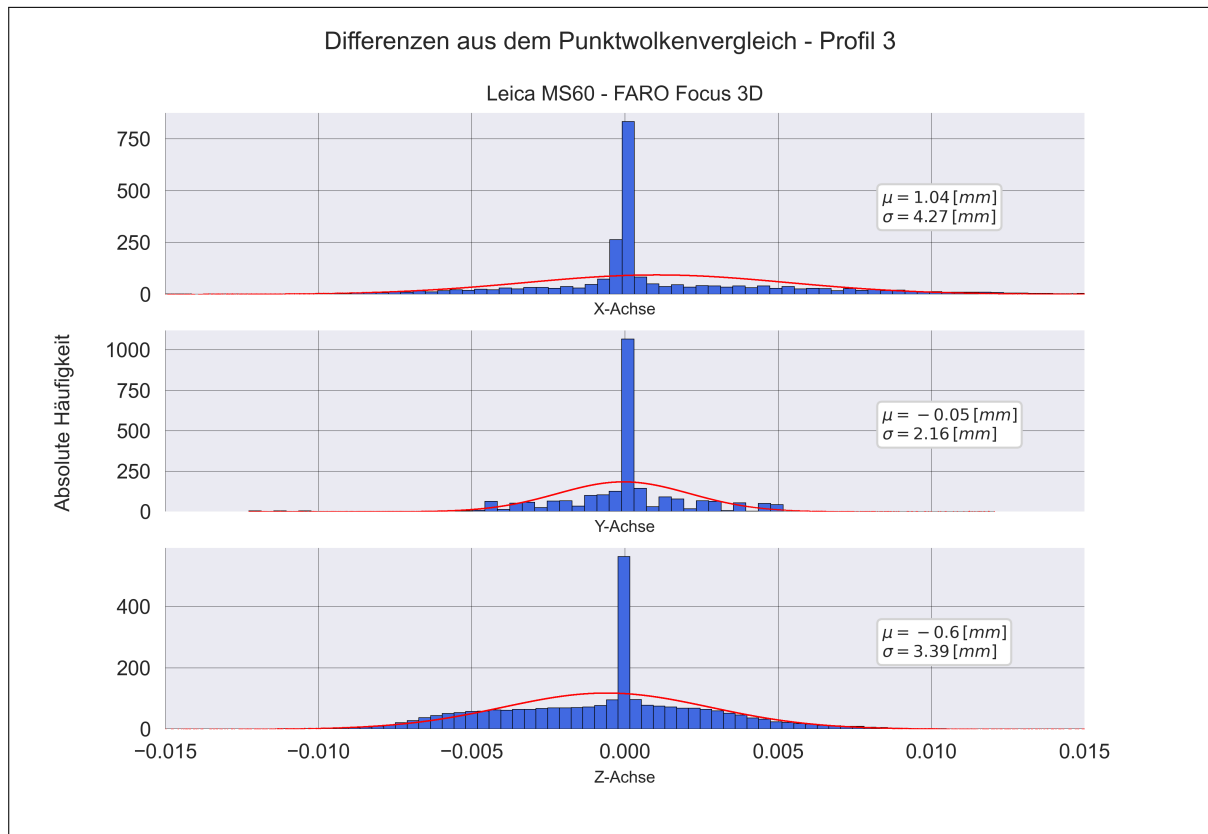
(d) Absolute Differenz. (0 bis 13.37 [mm])

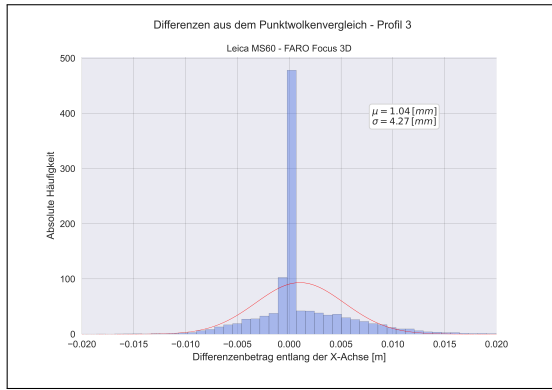
Abbildung A.4: Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 3 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von den Ausreißern (Abschnitt 4.5.4)

A.4.1.2 Brückenprofil 3

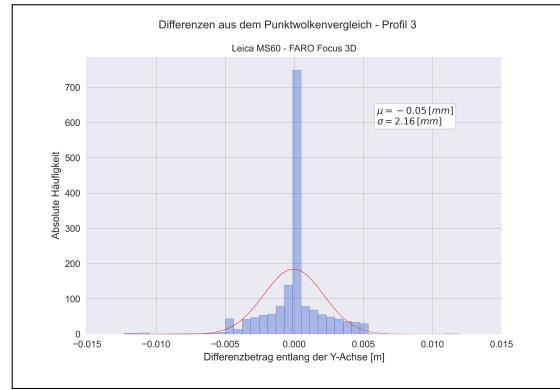
Tabelle A.11: Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D) auf die Distanz für das Brückenprofil 3

Differenz in Richtung	Absolut	X	Y	Z	Einheit
Mittelwert	0.00	1.04	-0.05	-0.60	[mm]
Standardabweichung	3.48	4.27	2.16	3.39	[mm]
linke 3σ Schranke	-10.44	-11.78	-6.53	-10.76	[mm]
rechte 3σ Schranke	10.44	13.85	6.44	9.56	[mm]
maximaler Wert	19.69	25.20	12.06	18.52	[mm]
minimaler Wert	0.00	-22.97	-12.27	-19.73	[mm]

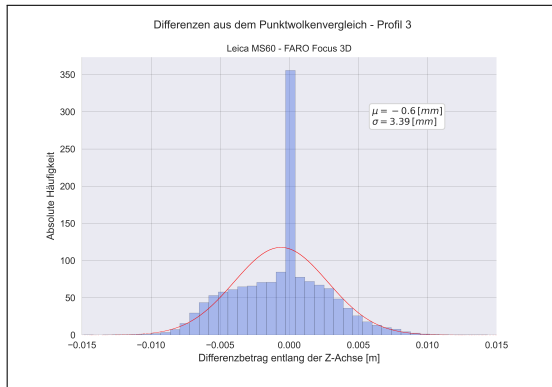
**Abbildung A.5:** Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 3 in den X-, Y- und Z- Achsen (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D)



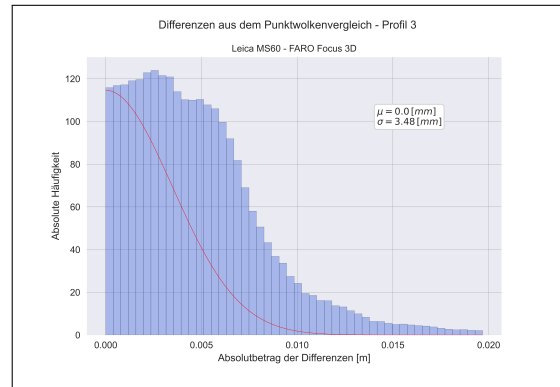
(a) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der X-Achse (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D)



(b) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Y-Achse (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D)

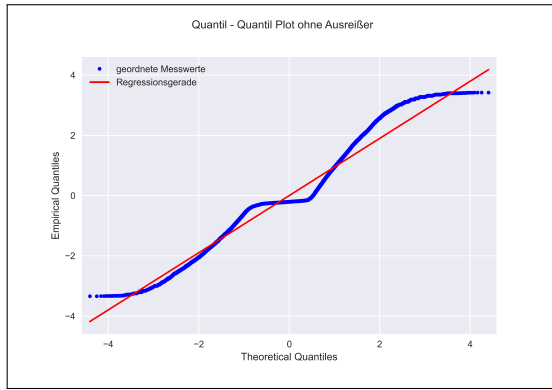


(c) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Z-Achse (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D)

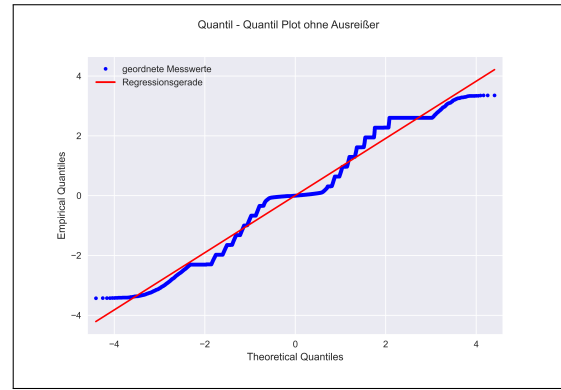


(d) Absolute Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D)

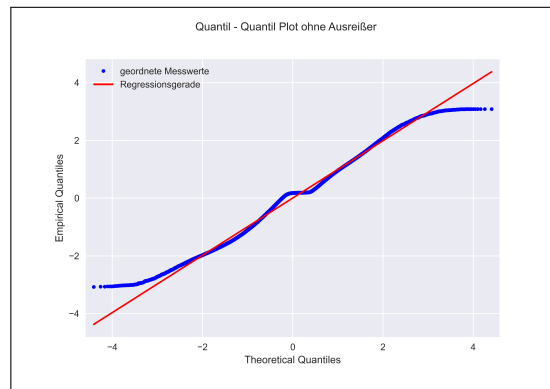
Abbildung A.6: Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 3 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit



(a) QQ-Diagramm von der X-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)

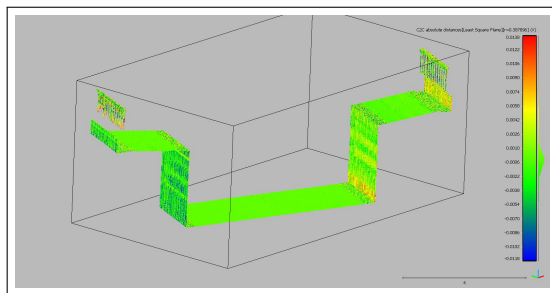


(b) QQ-Diagramm von der Y-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)

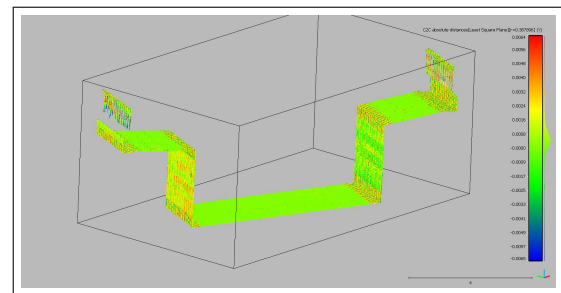


(c) QQ-Diagramm von der Z-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)

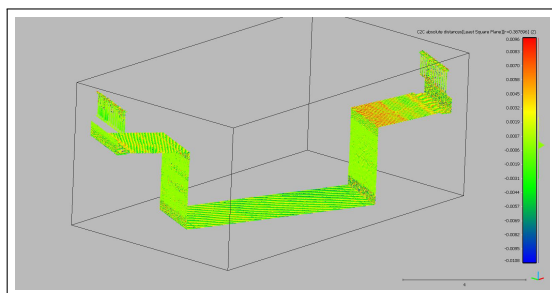
Abbildung A.7: Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 3 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.



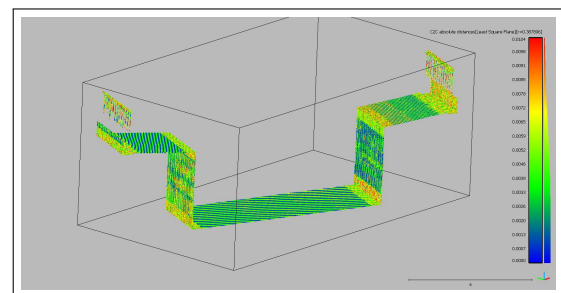
(a) Differenzbetrag in X-Richtung. (-11.78 bis 13.85 [mm])



(b) Differenzbetrag in Y-Richtung. (-6.53 bis 6.44 [mm])



(c) Differenzbetrag in Z-Richtung. (-10.76 bis 9.56 [mm])



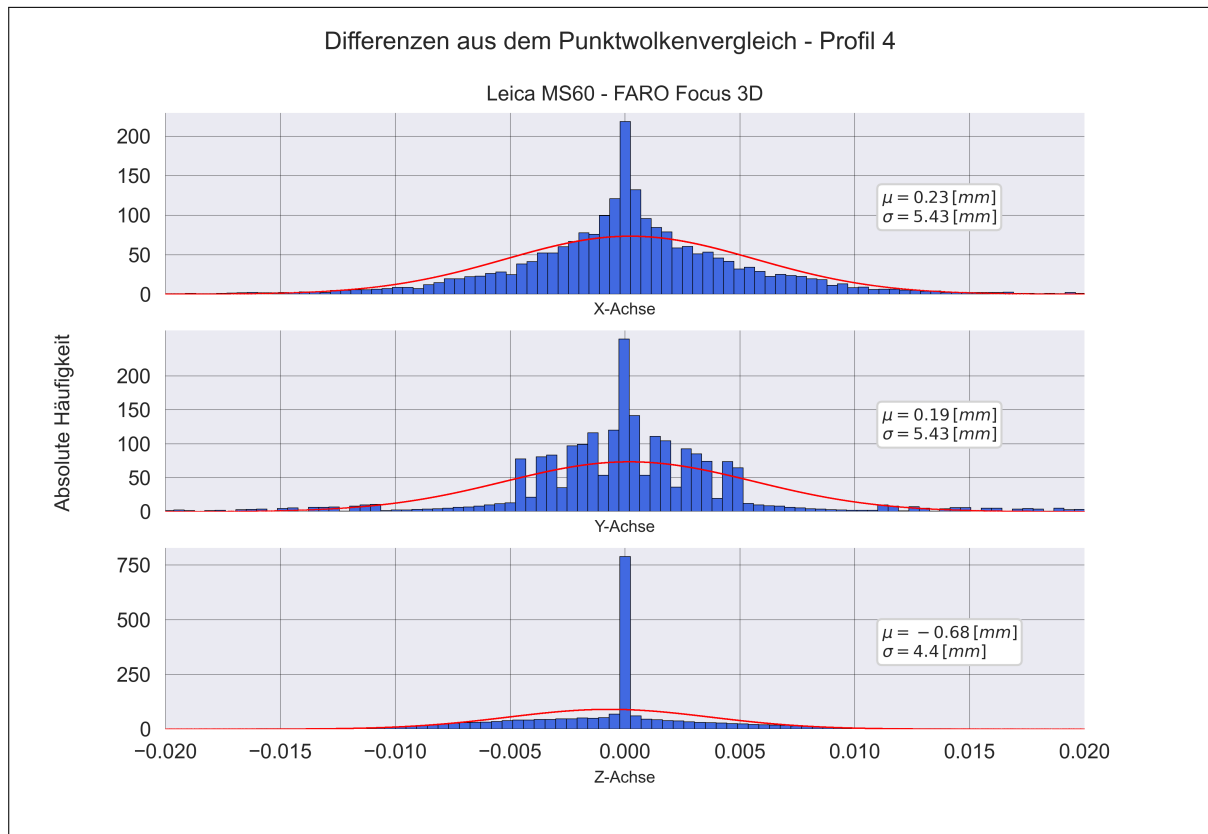
(d) Absolute Differenz. (0 bis 10.44 [mm])

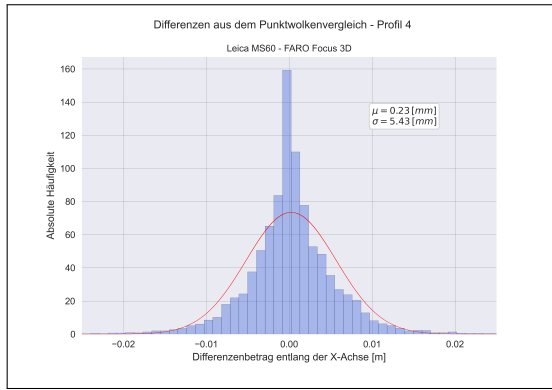
Abbildung A.8: Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 3 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von den Ausreißern (Abschnitt 4.5.4)

A.4.1.3 Brückenprofil 4

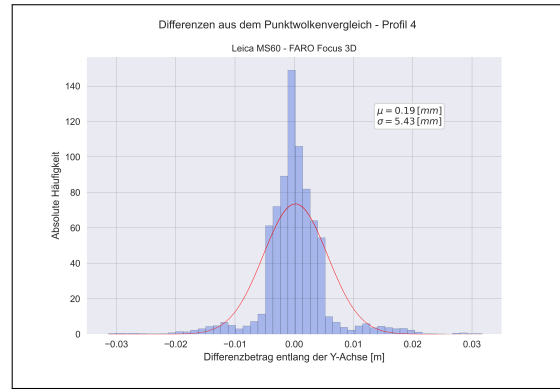
Tabelle A.12: Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D) auf die Distanz für das Brückenprofil 4

Differenzen in Richtung	Absolut	X	Y	Z	Einheit
Mittelwert	0.00	0.23	0.19	-0.68	[mm]
Standardabweichung	4.87	5.43	5.43	-0.68	[mm]
linke 3σ Schranke	-14.62	-16.06	-16.09	-13.90	[mm]
rechte 3σ Schranke	14.62	16.52	16.48	12.53	[mm]
maximaler Wert	28.33	31.78	31.73	24.91	[mm]
minimaler Wert	0.00	-31.29	-31.34	-26.28	[mm]

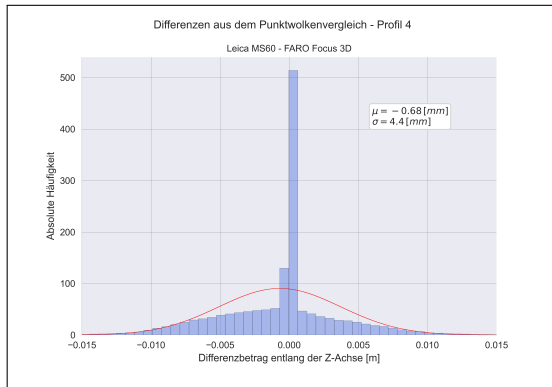
**Abbildung A.9:** Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 4 in den X-, Y- und Z-Achsen (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)



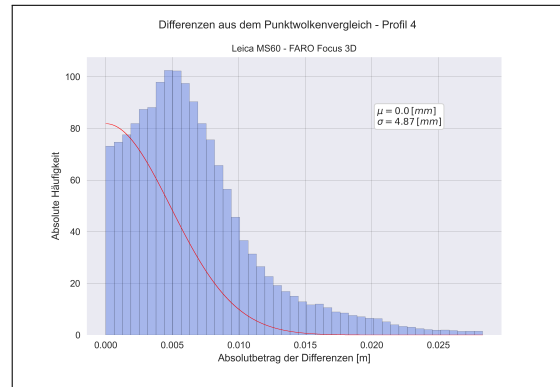
(a) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der X-Achse (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D)



(b) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Y-Achse (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D)

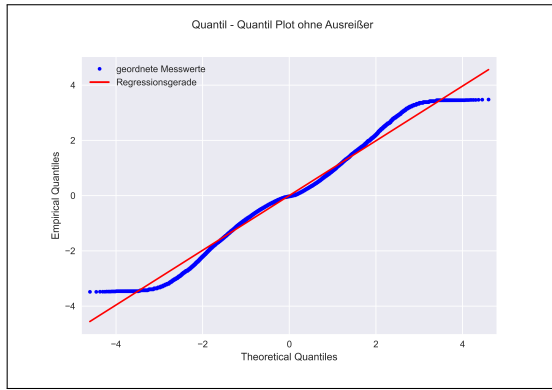


(c) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Z-Achse (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D)

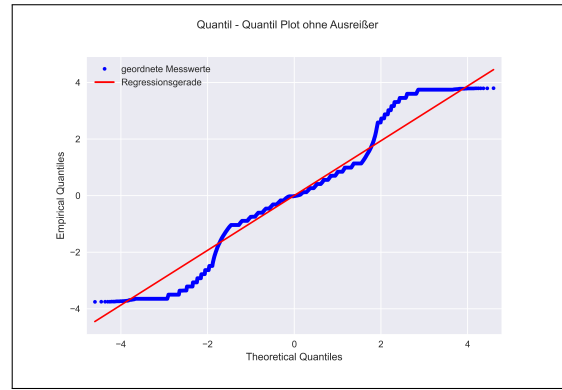


(d) Absolute Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - Faro Focus 3D)

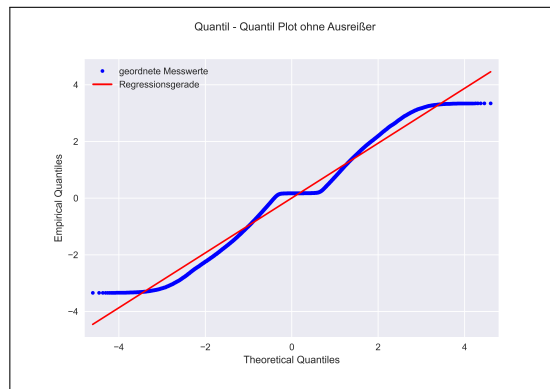
Abbildung A.10: Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 4 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit



(a) QQ-Diagramm von der X-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)

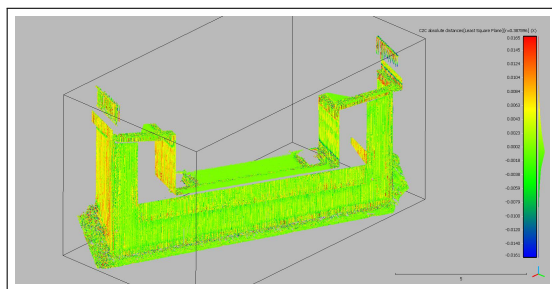


(b) QQ-Diagramm von der Y-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)

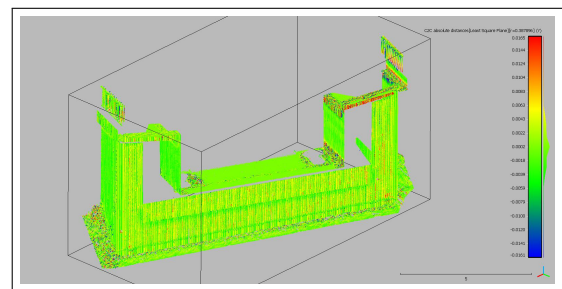


(c) QQ-Diagramm von der Z-Achse (Leica Nova MS60-Faro Focus 3D)

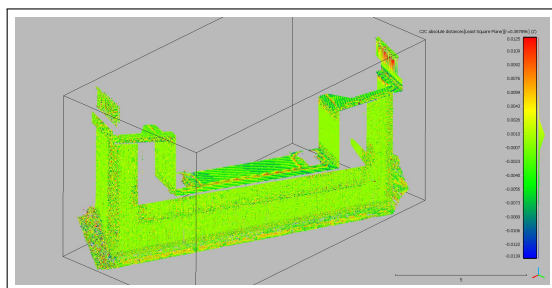
Abbildung A.11: Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 4 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.



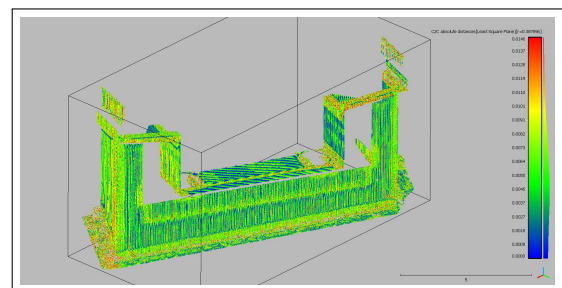
(a) Differenzbetrag in X-Richtung. (-16.06 bis 16.52 [mm])



(b) Differenzbetrag in Y-Richtung. (-16.09 bis 16.48 [mm])



(c) Differenzbetrag in Z-Richtung. (-13.90 bis 12.53 [mm])



(d) Absolute Differenz. (0 bis 14.62 [mm])

Abbildung A.12: Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 4 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von den Ausreißern (Abschnitt 4.5.4)

A.4.2 DJI Phnatom 4 RTK Vergleichsergebnisse

A.4.2.1 Brückenprofil 1

Tabelle A.13: Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK) auf die Distanz für das Brückenprofil 1

Differenzen in Richtung	Absolut	X	Y	Z	Einheit
Mittelwert	0.00	3.79	-1.64	1.53	[mm]
Standardabweichung	10.01	10.61	10.93	8.10	[mm]
linke 3σ Schranke	-30.03	-28.04	-34.43	-22.78	[mm]
rechte 3σ Schranke	30.03	35.62	31.16	25.83	[mm]
maximaler Wert	57.56	64.90	61.33	48.19	[mm]
minimaler Wert	0.00	-57.32	-64.60	-45.14	[mm]

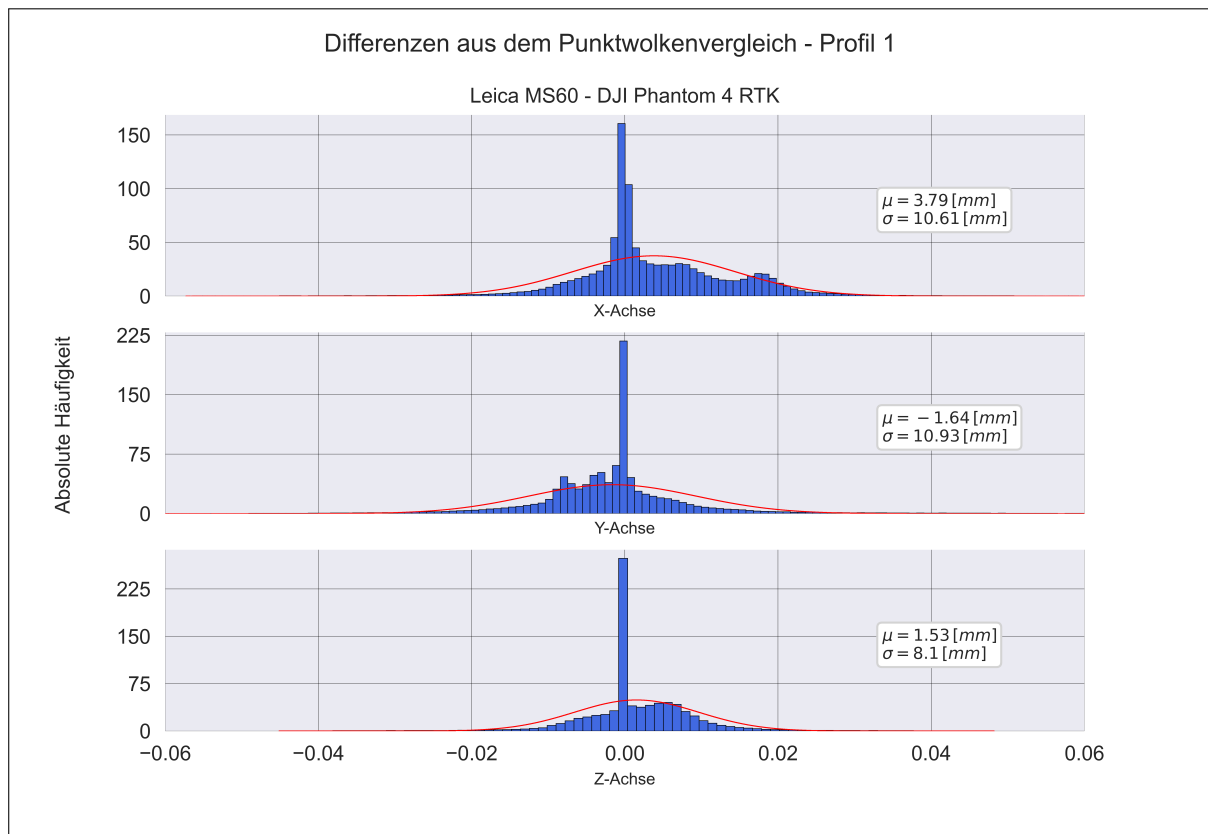
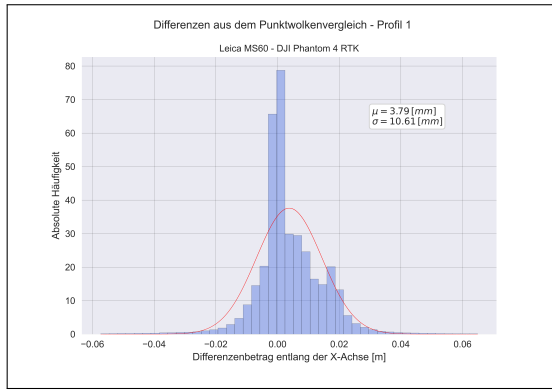
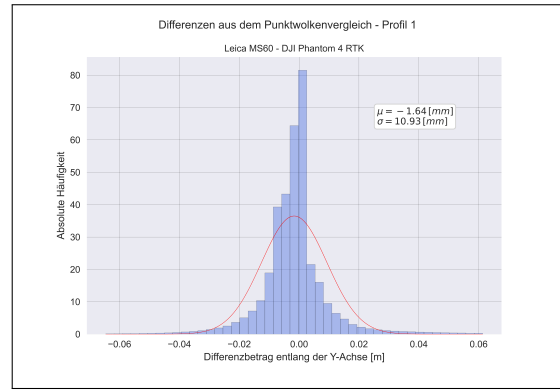


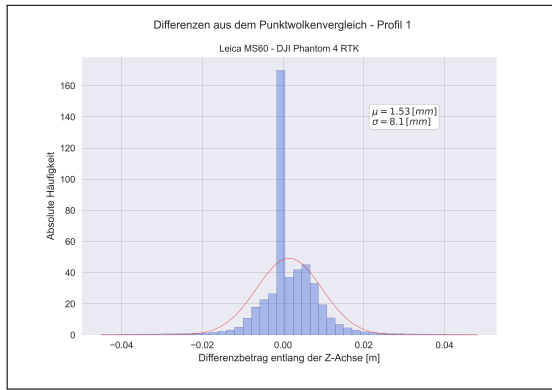
Abbildung A.13: Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 1 in den X-, Y- und Z- Achsen (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)



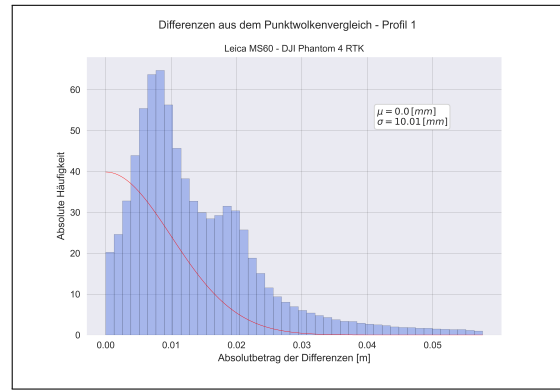
(a) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der X-Achse (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)



(b) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Y-Achse (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)

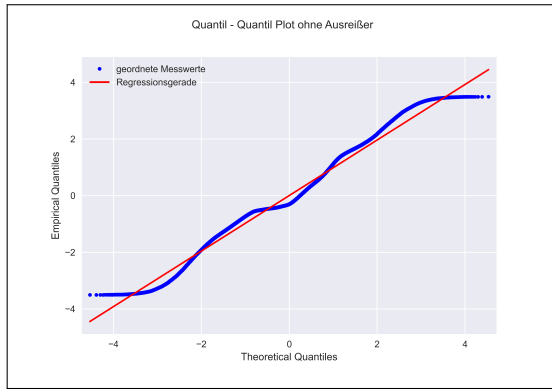


(c) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Z-Achse (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)

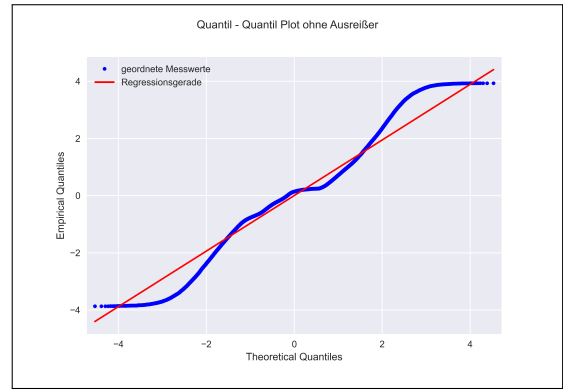


(d) Absolute Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)

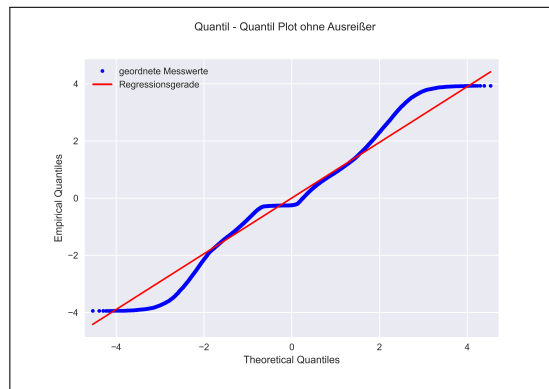
Abbildung A.14: Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 1 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit



(a) QQ-Diagramm von der X-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)

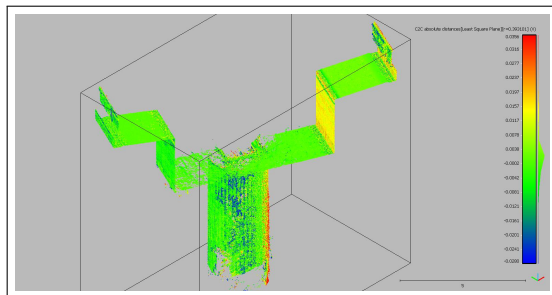


(b) QQ-Diagramm von der Y-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)

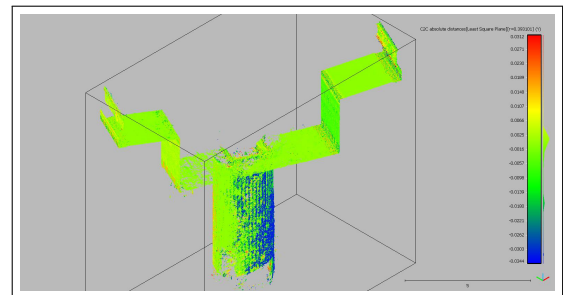


(c) QQ-Diagramm von der Z-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)

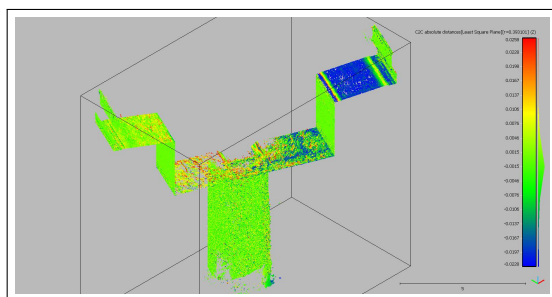
Abbildung A.15: Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 1 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.



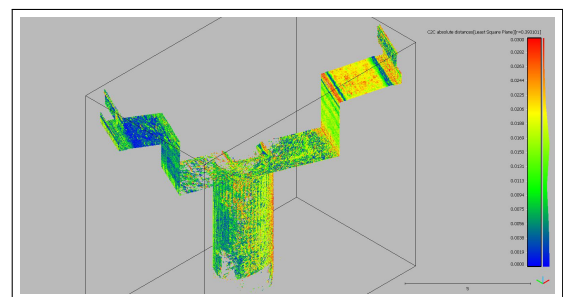
(a) Distanz in X-Richtung. (-28.04 bis 35.62 [mm])



(b) Distanz in Y-Richtung. (-34.43 bis 31.16 [mm])



(c) Distanz in Z-Richtung. (-22.78 bis 25.83 [mm])



(d) Absolute Differenz. (0 bis 30.03 [mm])

Abbildung A.16: Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 1 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von den Ausreißern (Abschnitt 4.5.4)

A.4.2.2 Brückenprofil 3

Tabelle A.14: Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK) auf die Distanz für das Brückenprofil 3

Differenzen in Richtung	Absolut	X	Y	Z	Einheit
Mittelwert	0.00	1.17	-0.37	-5.19	[mm]
Standardabweichung	7.30	8.48	5.17	8.32	[mm]
linke 3 σ Schranke	-21.89	-24.28	-15.89	-30.15	[mm]
rechte 3 σ Schranke	21.89	26.61	15.15	19.77	[mm]
maximaler Wert	41.11	48.49	28.75	41.56	[mm]
minimaler Wert	0.00	-46.57	-29.52	-51.94	[mm]

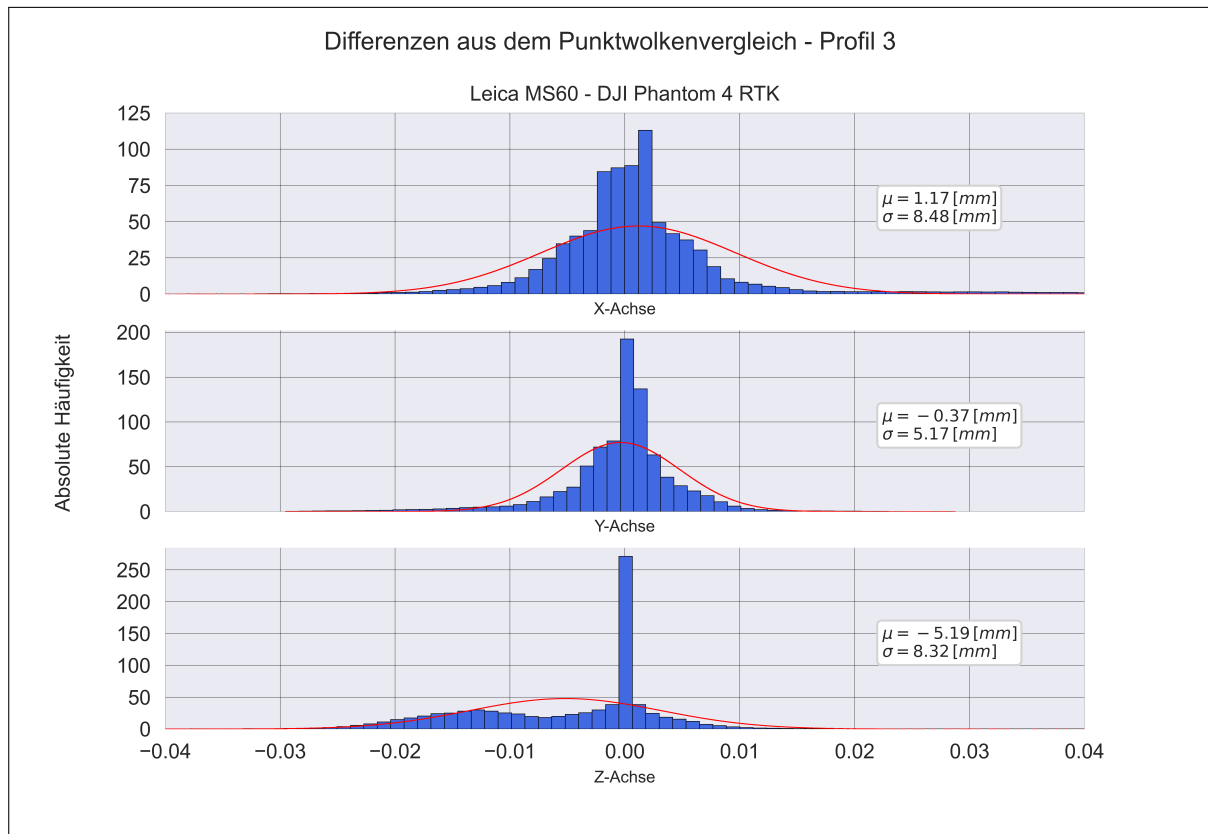
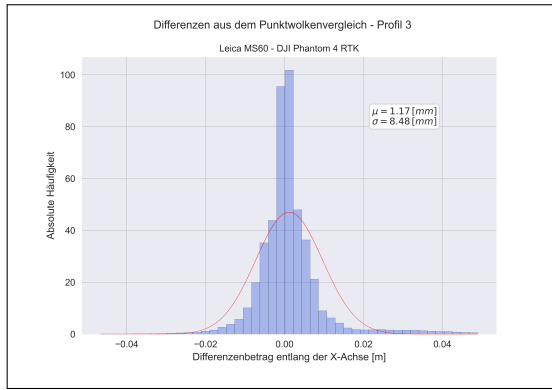
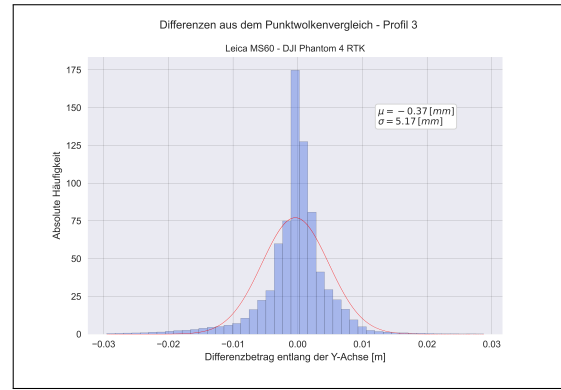


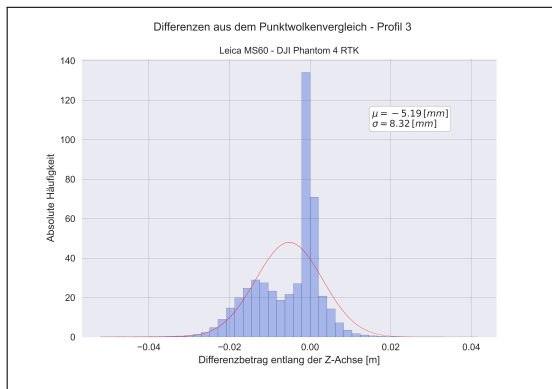
Abbildung A.17: Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 3 in den X-, Y- und Z- Achsen (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)



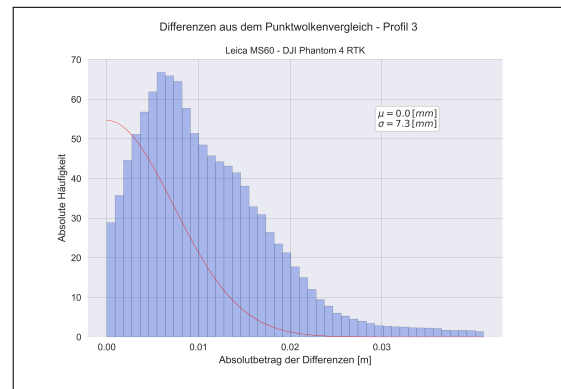
(a) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der X-Achse (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)



(b) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Y-Achse (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)

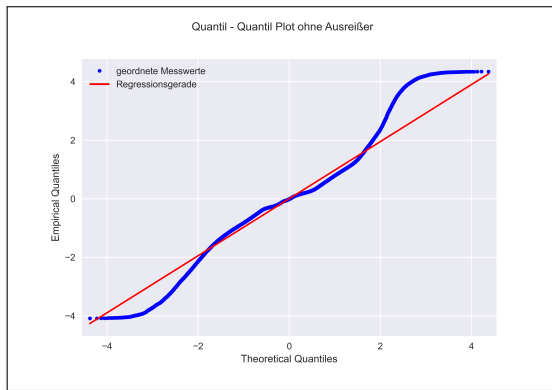


(c) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Z-Achse (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)

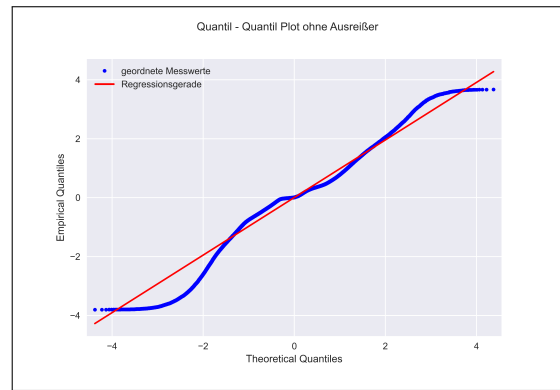


(d) Absolute Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)

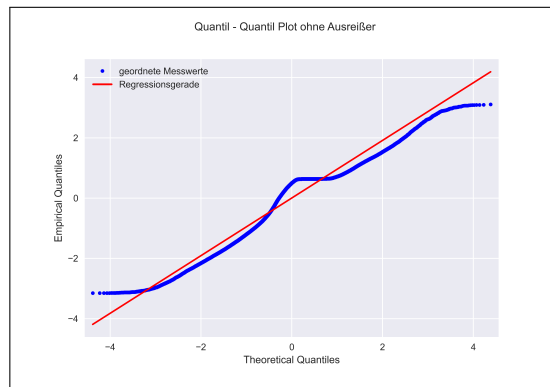
Abbildung A.18: Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 3 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit



(a) QQ-Diagramm von der X-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)

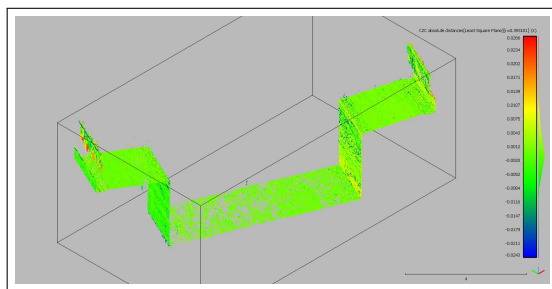


(b) QQ-Diagramm von der Y-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)

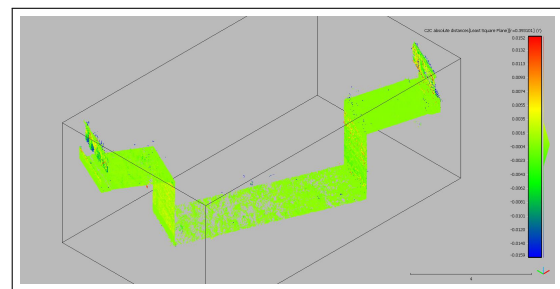


(c) QQ-Diagramm von der Z-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)

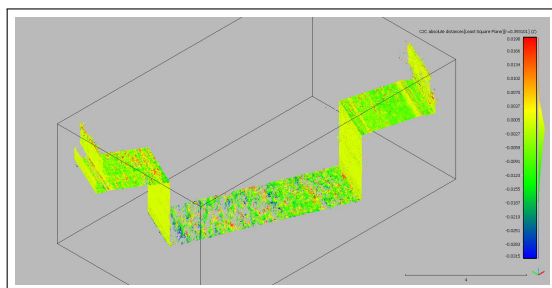
Abbildung A.19: Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 3 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.



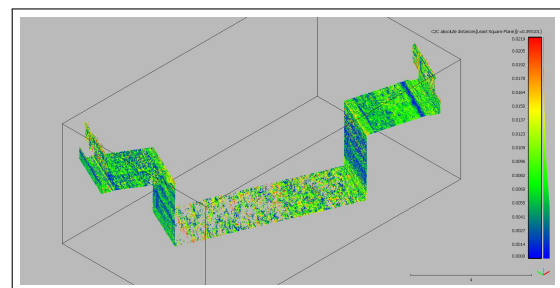
(a) Distanz in X-Richtung. (-24.28 bis 26.61 [mm])



(b) Distanz in Y-Richtung. (-15.89 bis 15.15 [mm])



(c) Distanz in Z-Richtung. (-30.15 bis 19.77 [mm])



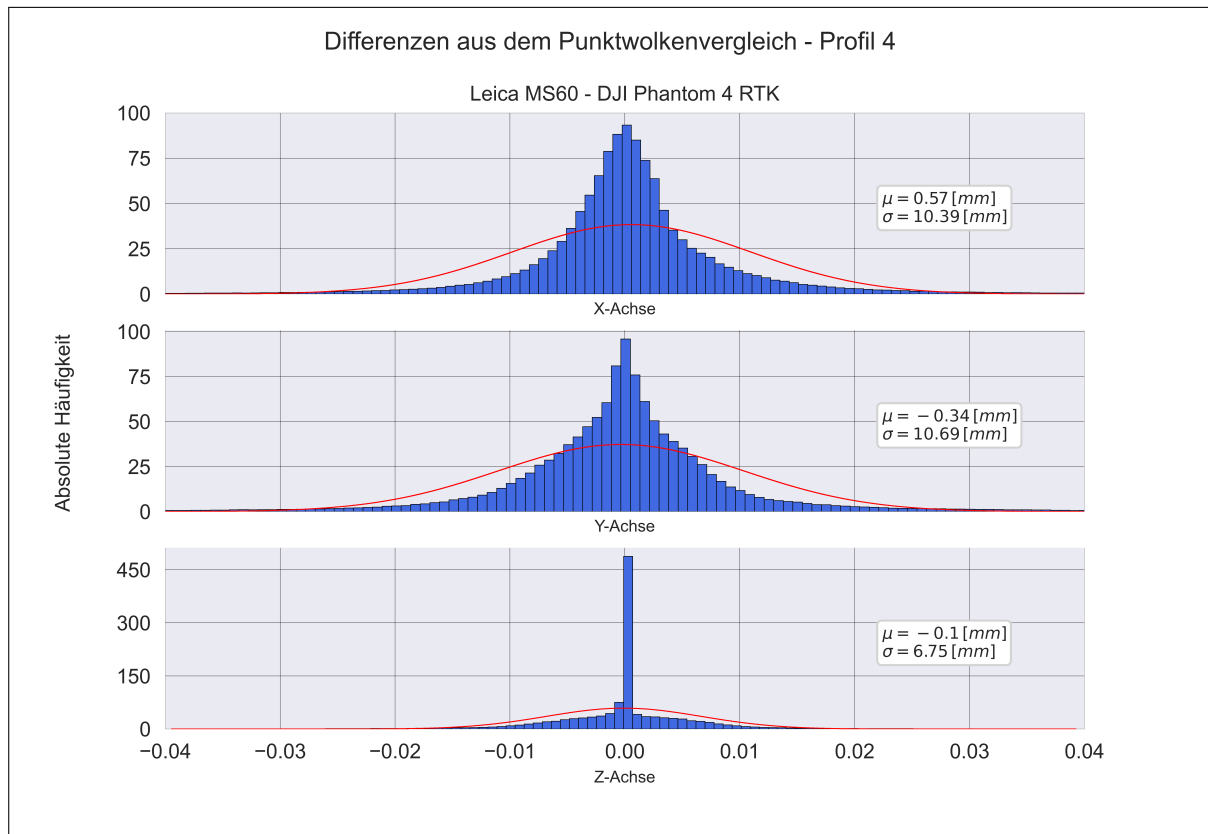
(d) Absolute Differenz. (0 bis 21.89 [mm])

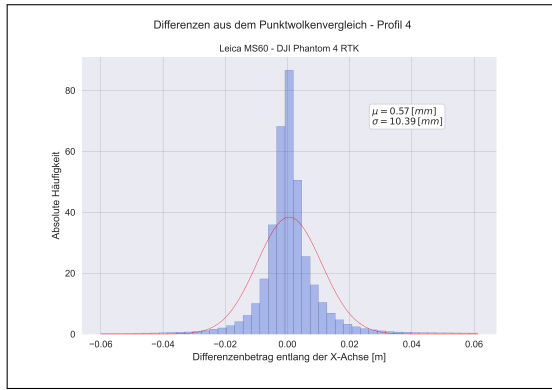
Abbildung A.20: Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 3 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von den Ausreißern (Abschnitt 4.5.4)

A.4.2.3 Brückenprofil 4

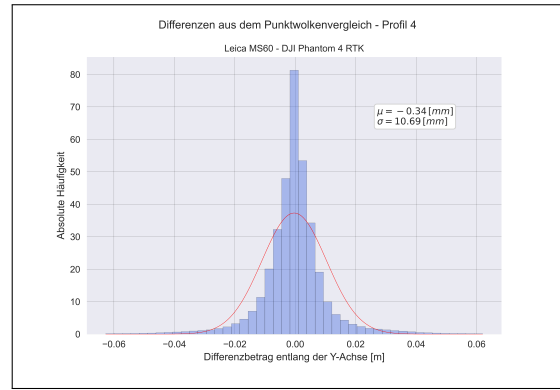
Tabelle A.15: Numerische Ergebnisse von dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK) auf die Distanz für das Brückenprofil 4

Differenz in Richtung	Absolut	X	Y	Z	Einheit
Mittelwert	0.00	0.57	-0.34	-0.10	[mm]
Standardabweichung	10.44	10.39	10.69	6.75	[mm]
linke 3σ Schranke	-31.33	-30.59	-32.41	-20.34	[mm]
rechte 3σ Schranke	31.33	31.73	31.73	20.14	[mm]
maximaler Wert	60.92	61.16	62.02	39.25	[mm]
minimaler Wert	0.00	-60.02	-62.70	-39.46	[mm]

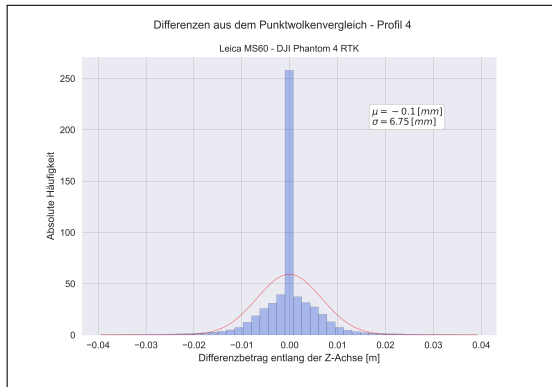
**Abbildung A.21:** Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich von dem Brückenprofil 4 in den X-, Y- und Z- Achsen (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)



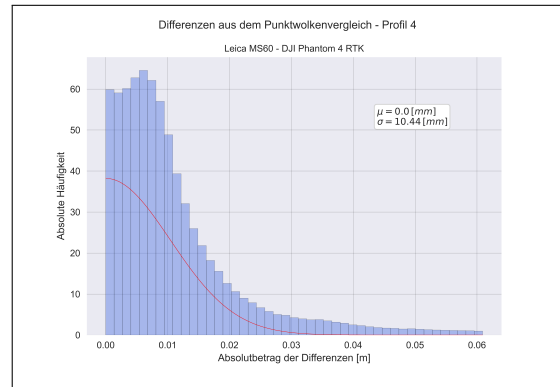
(a) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der X-Achse (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)



(b) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Y-Achse (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)

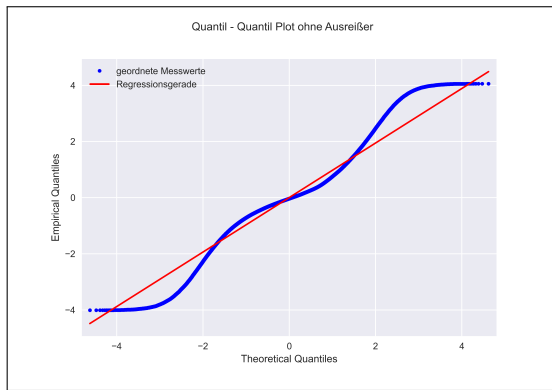


(c) Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich in der Z-Achse (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)

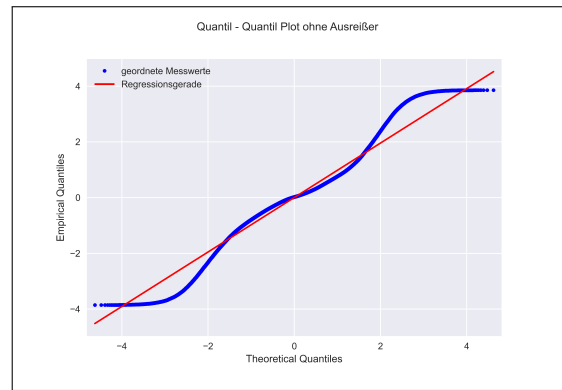


(d) Absolute Differenzen aus dem Punktwolkenvergleich (Leica Nova MS60 - DJI Phantom 4 RTK)

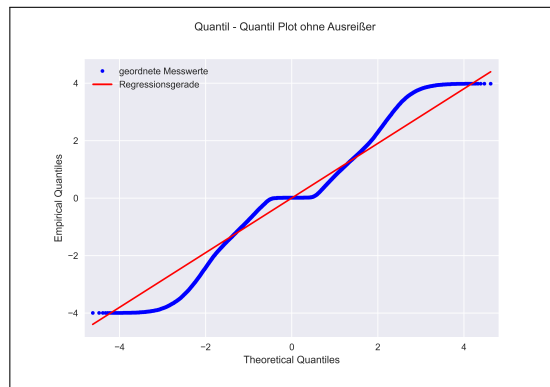
Abbildung A.22: Graphische Darstellung von dem Brückenprofil 4 der drei Komponenten des Vektors und des Absolutvektors in Vergleich mit der absoluten Häufigkeit



(a) QQ-Diagramm von der X-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)

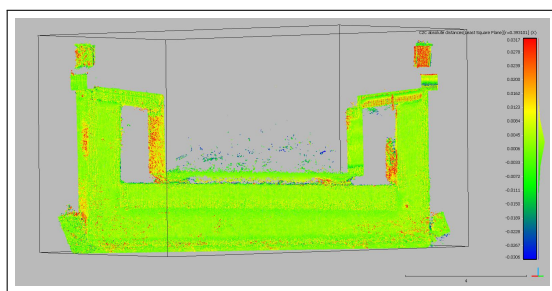


(b) QQ-Diagramm von der Y-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)

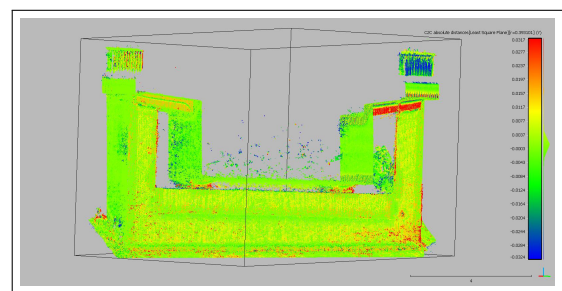


(c) QQ-Diagramm von der Z-Achse (Leica Nova MS60-DJI Phantom 4 RTK)

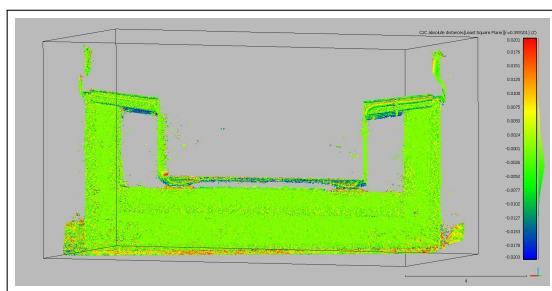
Abbildung A.23: Darstellung der Differenzbeträge der drei Komponenten des Vektors von dem Brückenprofil 4 in einem Quantil-Quantil-Diagramm (QQ-Diagramm). Durch die Quantile der Differenzen kann die Verteilung beobachtet werden.



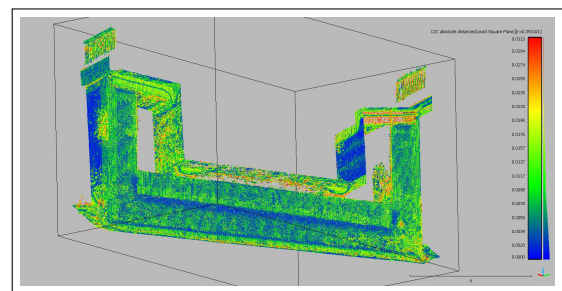
(a) Distanz in X-Richtung. (-30.59 bis 31.73 [mm])



(b) Distanz in Y-Richtung. (-32.41 bis 31.73 [mm])



(c) Distanz in Z-Richtung. (-20.34 bis 20.14 [mm])



(d) Absolute Differenz. (0 bis 31.33 [mm])

Abbildung A.24: Dreidimensionale Darstellung der Vergleichswerte von dem Brückenprofil 4 in Cloud Compare unter Berücksichtigung der berechneten Schranken von den Ausreißern (Abschnitt 4.5.4)