



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Hochschule Neubrandenburg

Studiengang Geodäsie und Messtechnik

Digitale Rekonstruktion des historischen Gebäudes St. Georg in Neubrandenburg unter Verwendung des terrestrischen Laserscanners und UAV

Bachelorarbeit

vorgelegt von: **Mohamed Mahfoud**

Zur Erlangung des akademischen Grades

„Bachelor of Engineering“ (B. Eng.)

URN-Nr.: urn:nbn:de:gbv:519-thesis 2021-0136-6

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Sven Brämer

Zweitprüfer: M.Eng. Martin Kiskemper

Datum: 01.07.2021

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Bachelor-Arbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Neubrandenburg, den 01.07.2021

Unterschrift

Kurzfassung

Im Rahmen der Dokumentation historischer Gebäude der Stadt Neubrandenburg soll das Gebäude Sankt Georg erfasst werden. Zur dreidimensionalen Erfassung der Kirche werden photogrammetrische Aufnahmen und terrestrische Laserscans durchgeführt. Vor der Beschreibung der Durchführung der Messung sowie der Auswertung der Daten wird allgemein auf die Messmethoden der Bauaufnahme eingegangen. Ziel der Bachelorarbeit ist, eine vollständige räumliche digitale Rekonstruktion der Kirche St Georg zu erstellen. Das Messergebnis dient, in Form einer Punktwolke, als Grundlage verschiedener Betrachtungen.

Abstract

In the course of documenting historical buildings within Neubrandenburg, the church of St. Georg was selected for this thesis. After giving a general overview on several measurement methods, the author goes into detail in describing the measurement procedure as well as the evaluation of the data. To achieve a full capture of the church, the author decided to use the method of photogrammetry as well as terrestrial laser scanning with the aim of designing a complete digital, three-dimensional model of the church. The results of the measurement procedure, given as a point cloud, form the basis of further considerations.

Danksagung

Zuerst danke ich Gott, der es mir ermöglicht hat, mein Studium zu beenden und meine Abschlussarbeit zu schreiben.

Ein weiterer Dank gebührt meiner Mutter, meinem Vater und meinen Geschwistern, die mich moralisch viel unterstützt haben.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr. Ing. Sven Brämer für die ausgiebige Betreuung und die konstruktiven Hinweise während der Erstellung meiner Bachelorarbeit bedanken.

Desweiteren gilt mein Dank Herrn M. Eng. Martin Kiskemper, der meine Arbeit durch seine fachliche und persönliche Unterstützung begleitet hat.

Ebenfalls bedanke ich mich bei allen Professoren der Hochschule Neubrandenburg, von denen ich viel gelernt habe.

Und nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Kollegen für die schönen Erinnerungen und Zeiten, die wir zusammen verbracht haben.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abstract	i
Danksagung	ii
Inhaltsverzeichnis	iii
Abkürzungsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
2 Denkmalpflege historischer Gebäude	3
3 Erfassung von Bauwerken	8
3.1 Zweck der Bestandsaufnahme	8
3.2 Messmethoden der geometrischen Bauaufnahme	9
3.2.1. Handaufmaß	9
3.2.2 Tachymetrie	9
3.2.3 Photogrammetrie	10
3.2.4 Laserscanning	15
4 3D-Modellierung	19
5 Messobjektbeschreibung: Kapelle St. Georg in Neubrandenburg	21
6 Vorbereitung der Messung	23
7 Erfassung des Messobjekts mittels terrestrischem Laserscanner	24
7.1 Verwendete Instrumente	24
7.1.1 Über die Firma Z+F	24
7.1.2 Laserscanner Z+F IMAGER® 5016	24
7.2 Messablauf	25
7.3 Auswertung des Laserscannings	28
7.3.1. Registrierung	28
7.3.2 Georeferenzierung	30
7.3.3 Filterung	31
7.3.4 Exportieren	32

8	Erfassung des Messobjekts mittels Vermessungsdrohne	33
8.1	Verwendetes Instrument.....	33
8.2	Messablauf.....	34
8.3	Auswertung der Bilder	37
9	Betrachtung der Ergebnisse	41
10	Fazit	50
	Abbildungsverzeichnis.....	52
	Quellenverzeichnis	55

Abkürzungsverzeichnis

UAV	Unmanned Aerial Vehicle
3D	dreidimensional
CAD	Computer-aided design
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst
HDR	High dynamic range
RANSAC	Random sample consensus
RTK	Real-time kinematic
UTM	Universal Transverse Mercator

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit soll einen Einblick in den Prozess der Gebäudeerfassung im Bereich Denkmalschutz geben, auf deren Datengrundlage wiederum ein digitales 3D-Modell der Kirche St. Georg in Neubrandenburg erstellt wurde. Diese Arbeit gewährt einen Einblick in gängige Methoden in diesem Bereich und erörtert die Vor- und Nachteile verschiedener Techniken der Gebäudeerfassung.

Zu Beginn soll ein Überblick des Bereiches der Denkmalpflege historischer Gebäude gegeben werden. In Kapitel 3 geht der Autor umfassender auf die allgemeine Erfassung von Bauwerken ein. Zunächst widmet sich das Kapitel 3.1 den unterschiedlichen Zwecken der Bestandsaufnahme. Darauf aufbauend werden verschiedene Messmethoden der geometrischen Bauaufnahme vorgestellt. Nach einer kurzen Einführung in die Methoden des Handaufmaß sowie der Tachymetrie widmet sich das Kapitel 3.2.3. eingehender der Photogrammetrie, welche auch im Zuge dieser Arbeit zum Einsatz kam. Dabei spielt insbesondere die UAV-Photogrammetrie eine große Rolle, da das zu untersuchende Gebäude mithilfe dieser Methode erfasst wurde. Neben einer Vorstellung der Vor- und Nachteile führt das Kapitel über zum Laserscanning, welches ebenfalls im praktischen Teil der Arbeit Anwendung fand, um die Defizite der Photogrammetrie auszugleichen. Kapitel 4 betrachtet die 3D-Modellierung eingehender und geht auf die zugrunde liegenden Mechanismen ein.

Im Praxisteil wird nun das zu untersuchende Gebäude näher betrachtet. Hierbei handelt es sich um die Kapelle St. Georg am Stadtrand Neubrandenburgs. Nach einer kurzen Beschreibung der architektonischen Eigenheiten des Gebäudes beginnt der eigentliche Vermessungsteil. Hierbei werden zunächst die Vorüberlegungen der Messung vorgestellt und die Begründung der Methodik erläutert. Kapitel 7 fokussiert sich auf die Erfassung des Messobjekts mittels terrestrischem Laserscanning. Hierbei werden einführend Hintergrundinformationen zum Hersteller und gewähltem Laserscanner gegeben. Darauf aufbauend wird der Messablauf beschrieben. Hierbei werden wichtige Informationen zur Standortwahl sowie Ausrichtung und Einstellung der Geräte gegeben. Es ist Ziel des Autors, Einblicke in wichtige Grundüberlegungen zu geben, die bei der Erfassung mittels Laserscan zu beachten sind. Bei der Auswertung der Daten aus dem Laserscanning wird der Prozess der Registrierung näher beschrieben, worauf die Georeferenzierung und Filterung der Punktwolke folgt. Das Kapitel schließt ab mit einer kurzen Information zum Exportieren der georeferenzierten und gefilterten Punktwolke.

Da das Laserscanning gewisse Defizite bei der Erfassung aufweist, wurden die Daten im Vermessungsprozess um die Methode der UAV-Photogrammetrie ergänzt. Auch hier erfolgt nach einer kurzen Vorstellung des verwendeten Instrumentes eine konkrete Beschreibung des

Messablaufes. Die Schritte umfasst auch hier die Georeferenzierung, werden aber ergänzt durch die Bilder Orientierung sowie die Erstellung der Punktwolke in einem dritten Schritt. Zum Schluss werden die Bilder nun bereinigt und im gewünschten Dateiformat exportiert.

In Kapitel 9 werden die Ergebnisse mithilfe der ReCap Software zusammengeführt sowie die Ergebnisse zusammengestellt und betrachtet.

Ziel der Arbeit ist es, grundlegende Informationen zu gängigen Messmethoden zu liefern. Dabei soll insbesondere gezeigt werden, dass sich verschiedene Messmethoden, in diesem Fall das Laserscanning und die Photogrammetrie, ergänzen und auch für zukünftige Anwendungen gemeinsam in Betracht gezogen werden sollten.

2 Denkmalpflege historischer Gebäude

Als Gesellschaft obliegt es unserer Verantwortung, historische Gebäude zu erhalten, da sie als Kulturgut gelten. Dabei ist die Baudenkmalpflege eng verknüpft mit den Bereichen der Architekturwissenschaften und der Kunstgeschichte. Ziel ist immer der Erhalt der baulichen Denkmale, wofür die Erfassung historischer und geometrischer Eigenschaften die Grundlage darstellt.

Bezüglich der Methodik historischer Bestandsdokumentation unterscheidet man im Wesentlichen 3 Kategorien, welche eng miteinander verbunden sind (siehe Abb. 1):

- Die einfache Erfassung zur Katalogisierung bzw. Registrierung
- Die detaillierte Dokumentation und Maßnahmegrundlage
- Sowie die komplexe Analyse und Bewertung

Für die *einfache Erfassung* werden vereinfachte und dennoch aussagekräftige Unterlagen benötigt. Dazu gehören unter anderem die Quellen-Auswertung vorliegender Akten, Verzeichnisse und Archiven sowie die fotografische Dokumentation. Zudem sind weitere Unterlagen wie Baupläne, Grundbuchkarten und Stadtkarten mit Markierungen der jeweiligen Objekte dienlich. Um die Daten zu sammeln und auszuwerten, eignen sich herkömmliche Systeme der Informationsverwaltung wie Datenbanken von Behörden und Bauämtern.

Zudem finden sich zahlreiche digitale Werkzeuge als Unterstützung für die Datenaufbereitung und -verwaltung. Für die textliche Erfassung ganzer Gebäude oder Gebäudeteile eignen sich AVA-Raumbuchmodule. Um die teilweise unpräzisen bzw. nicht einheitlichen Planmaterialien anzupassen und zu korrigieren, dient die Methode des Scans sowie die Kartenkorrektur. Multi-Media Anwendungen erlauben es zudem, einzelne Informationsarten verschiedener Medien logisch zu verknüpfen. Und nicht zuletzt bietet das Internet die Möglichkeit, mit gezielten Suchanfragen vielfältige Quellen und gegebenenfalls Ergänzungen zum jeweiligen Objektmaterial zu erhalten und diese zu strukturieren.

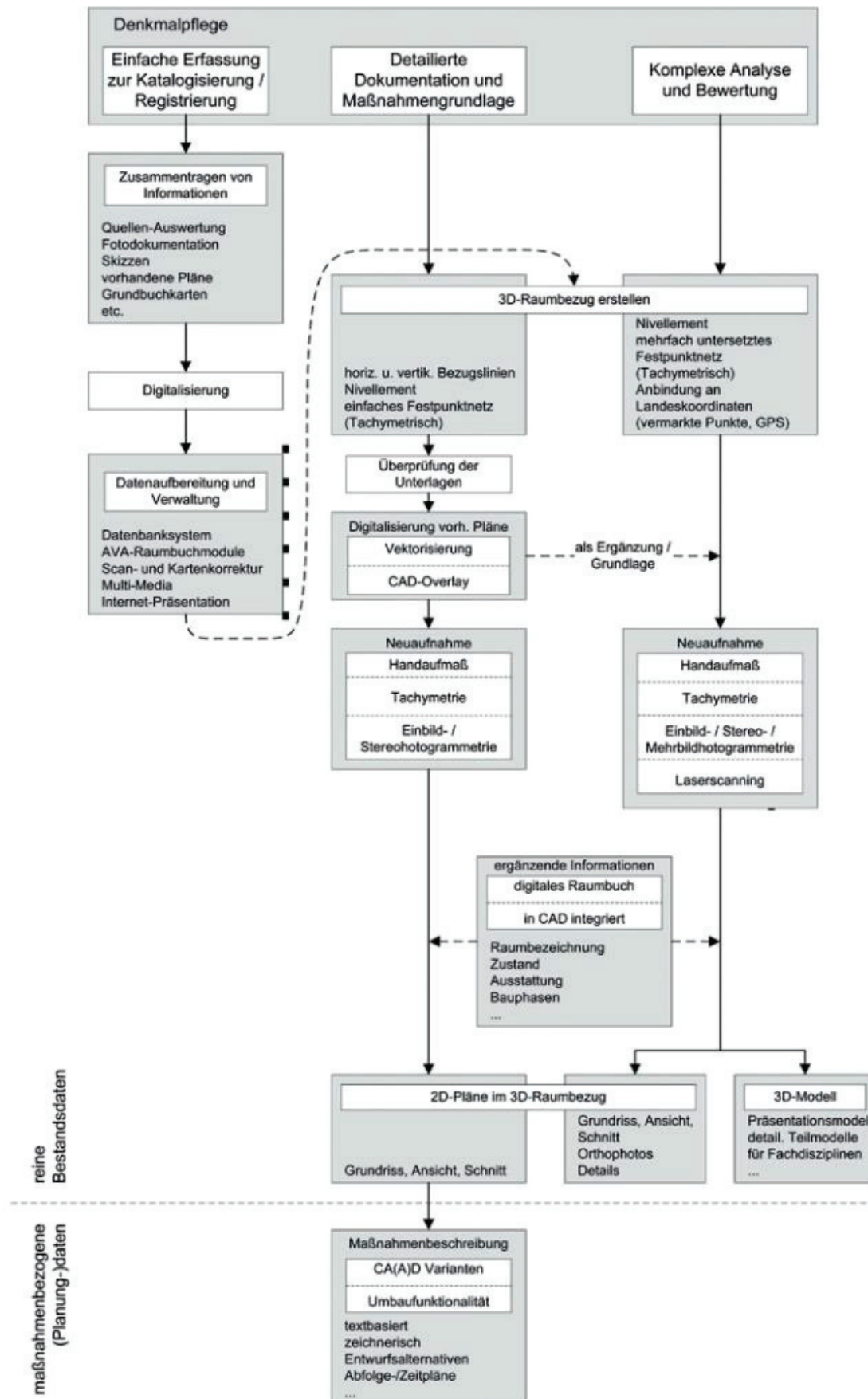


Abbildung 1: Methoden historischer Bestandsdokumentation (Donath 2008)

Die praktische Denkmalpflege verlangt mitunter eine *detaillierte Dokumentation und Maßnahmegrundlage*, auf deren Basis beispielsweise denkmalgerechte Sanierungen bzw. Rekonstruktionsarbeiten vorgenommen werden. Doch diese Methode dient auch dem Zwecke kunsthistorischer Betrachtungen, der Planung von Umbaumaßnahmen oder nicht vermeidbarer Abrissbestrebungen. Dieser Bereich der Denkmalpflege geht über die einfache Erfassung hinaus, um eine angemessene räumlich-geometrische Beschreibung in Verbindung mit einer detaillierten Dokumentation der Materialien, unter Berücksichtigung von Verbindungsgefügen und baugeschichtlichen Querbeziehungen, zu gewährleisten.

Zunächst ist eine maßliche Erfassung nötig, für welche ein örtliches, 3D-Messnetz erstellt wird, in welchem alle Grundrisse und Ansichten in einem räumlichen Verbund ersichtlich sind. Handelt es sich um ein komplexes Bauwerk mit vielen Höhengsprüngen, ist das Einrichten eines tachymetrischen Bezugssystems sinnvoll. Dieser Vorgang sollte um das Handaufmaß ergänzt werden, um die eigentliche maßliche Erfassung zu vervollständigen. In diesem Prozess können auch vorhandene Karte, Pläne und Fotos mit einbezogen werden. Für die Einrichtung eines 3D-Bezugssystems sind computergestützte Handaufmaß-Systeme eher ungeeignet, da hier die Erfassung komplexer Gebäude mit allen Details nur eingeschränkt möglich ist. Stattdessen wird die auch später in dieser Arbeit beschriebene Mehrbildauswertung empfohlen, da diese gut identifizierbare Punkte und Kanten liefert. Durch verschiedene Techniken der CAD-bezogenen Datenstrukturierung, wie beispielsweise Layer, verknüpfte Tabellen etc., kann die denkmalbezogene Erfassung mit der Quellenlage abgeglichen und dokumentiert werden. Wie schon bei der einfachen Dokumentation stellen auch hier Datenbankensysteme oder digitale Raumbücher eine gute Ergänzung dar. Besonders im Bereich der Denkmalpflege ist die Beschreibung folgender Aspekte unumgänglich (vgl. Donath 2008):

Raum, Zustand, Material, Struktur/ Verbindungsgefüge, Schadensdokumentation, kunsthistorische Angaben, Baualtersstufen, Quellenverweise, erhaltenswerte Ausstattung, Wertanalyse

Abschließend werden alle erfassten Daten in geeigneter Form zusammengestellt und aufbereitet.

Im Zuge der *komplexen Analyse und Bewertung* wird für komplexe Gebäude ein detaillierter „Röntgenblick“ vorgenommen, der einiges an Expertise erfordert. Die Grundlage bietet auch hier das räumliche Bezugssystem, bei welchem im Vergleich zu den vorher beschriebenen Methoden ein deutlich dichteres Messnetzwerk nötig ist, das an einigen Stellen weitere untergeordnete Bezugsnetze erfordert, um gerade Detailbereiche möglichst präzise abbilden zu können.

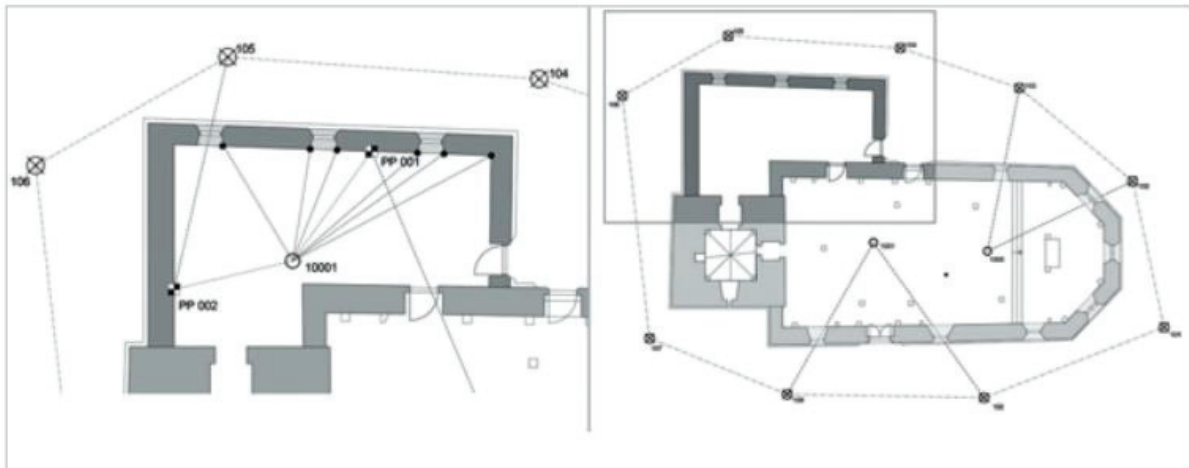


Abbildung 2: Prinzip der Untersetzung eines tachymetrischen Bezugssystems (rechts) in Detailbereichen (links) (Donath 2008)

Weitere wichtige Aspekte sind:

- Umfangreiche Geländeenivellements
- Erfassung historischer Bodenschichtungen
- Darstellung der Nachbarbebauung
- Dokumentation von Setzungen, historischen Umbauten und eventuellen Verformungen

Bei dieser sehr komplexen Art der Erfassung ist es sinnvoll, das dreidimensionale Messnetz in das übergeordnete Messnetz des zuständigen Amtes sowie in ein Höhenbezugssystem zu integrieren. Dafür bietet sich die Kombination aus GPS und Tachymetrie an.

Aufgrund eben jener Komplexität ist neben den zuvor genannten Methoden besonders das Laserscanning geeignet, da es sich als hochpräzise Erfassungstechnik für Detailbereiche, aber auch ganzer Objekte etabliert hat. Wichtig ist hierbei die Integration des Einzelscans in einen 3D-Koordinatenbezug. Abhängig vom jeweiligen Auftrag kann die Weiterverarbeitung der Scans stark variieren. Möglich wäre beispielsweise ein Ableiten eines dreidimensionalen Oberflächenmodells durch Vermaschung, aber auch eine Planableitung durch Schnittbildung durch die Punktwolke sowie die Vervollständigung der erhaltenen Kontur. Wie auch bei der vorher vorgestellten Methode lässt sich der Erfassungsprozess um die Methodik der Mehrbildphotogrammetrie ergänzen. Somit ließen sich die Punktwolken mit den orientierten Fotos kombinieren, wodurch eine sehr präzise Erfassung ermöglicht wird. Zum Beispiel kann dadurch das 3D-Oberflächenmodell texturiert werden, aber es lassen sich auch maßlich und farblich korrekte und verzerrungsfreie Ansichten ableiten.

Die Kombination verschiedener Datengrundlagen (Quellen sowie eigene Messung) müssen in einer gemeinsamen Datenbasis zusammengeführt werden. Aufgrund des 3D-Bezugs können

dreidimensionale Modell bzw. Teilmodelle und zweidimensionale Pläne (wie Grundrisse und Ansichten), entzernte Scans und präzise Fotos innerhalb des CAAD in einem dreidimensionalen Koordinatensystem miteinander in Bezug gesetzt werden. Das Ergebnis ist ein vollständiges 3D-Modell, das als Grundlage verschiedener Betrachtungen dienen kann. Je nach Auftrag können so komplexe Tragstrukturen analytisch-geometrisch dokumentiert werden. Detailreiche Einzelelemente, wie sie besonders in Kirchen zu finden sind, können plastisch wiedergegeben werden. Ebenso könnte das Modell als Grundlage baugeschichtlicher bzw. bauanalytischer Studien dienen. Und nicht zuletzt bedarf es detailreicher Modelle, um Gebäude auch digital öffentlichkeitswirksam zu präsentieren (vgl. Donath 2008).

3 Erfassung von Bauwerken

Eine wichtige Aufgabe des Vermessungswesens ist die Bestandsaufnahme. Unter Bestand versteht man alle natürlichen und industriellen Objekte, die mit der Erdoberfläche verbunden sind. Zu industriellen Objekte, oder auch Bauwerken genannt, zählt man Gebäude, Brücken und andere Ingenieurbauwerke, wie z. B. Tunnel, Verkehrswege, Windräder oder Stützmauern. Die Notwendigkeit ein Bauwerk zu untersuchen, zu vermessen und/oder zu dokumentieren kann aus vielfältigen Bedürfnissen heraus resultieren und hängt vom konkreten Auftrag ab.

3.1 *Zweck der Bestandsaufnahme*

Bauliche Veränderungen

Sind Veränderungen an einem Bauwerk geplant, so ist die genaue Kenntnis des aktuellen Bestandes und des Bauwerkszustandes eine der wichtigsten Entscheidungsgrundlagen.

Sicherung des Bestandes

Zur Beurteilung der Standsicherheit eines Bauwerkes sind Bestandsaufnahmen erforderlich. Hier werden nicht nur Breite, Länge und Höhe gemessen, sondern auch Gesetzmäßigkeiten der Konstruktion ermittelt.

Verkauf, Wertermittlung

Bestandsaufnahmen sind benötigt für die Abschätzung der Maße und zur Berechnung der Wohnfläche und umbauten Räume.

Bauforschung und Denkmalpflege

Die Bauaufnahme zum Zwecke der Bauforschung und Denkmalpflege ist sehr wichtig, da damit die Grundrisse, Ansichten und Schnitte analysiert werden. Die Genauigkeit der Bauaufnahme ist von Objekt zu Objekt verschieden.

Topographische Vermessung

Für die Darstellung einer topographischen Karte sind die Bauwerke zu vermessen. Diese Vermessung beschränkt sich in der Regel auf die Erfassung des Grundrisses bzw. der Außenmaße.

Bauwerksüberwachung

Diese umfasst mehrere Beobachtungen des Zustandes eines Bauwerks zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Aus diesen wiederum lassen sich die Veränderungen der Bauwerksgeometrie infolge des Einwirkens von äußeren und inneren Kräften beschreiben (vgl. Kern 2002).

3.2 *Messmethoden der geometrischen Bauaufnahme*

Früher war bei der Bauaufnahme der direkte Kontakt zum Objekt nötig. Moderne Erfassungstechniken wie Tachymetrie, Laserscanning oder Photogrammetrie erlauben eine schnelle und effiziente Geometrieerfassung, bedingen aber einen Abstand zur Bausubstanz. Die Messung erfolgt nicht am Objekt, sondern von einem festgelegten Gerätestandort mehrere Meter entfernt (vgl. Donath 2008).

3.2.1. Handaufmaß

Beim Handaufmaß kommen einfach zu handhabende und kostengünstige Geräte und Hilfsmittel zum Einsatz. Verwendete Geräte bei dieser Methode sind zum Beispiel der Gliedermetermaßstab, das Messband oder das Laserdistanzmessgerät (Disto) sowie Lotschnüre. Zur Dokumentation vor Ort werden Skizzen des Grundrisses auf Papier gezeichnet und mit den ermittelten Maßen versehen. Dabei werden alle geometrischen Größen des Bauwerkes erfasst. Im Gebäudeinneren werden z.B. neben den Längen und Breiten der Räume auch die Fenster- und Türöffnungen aufgenommen. Allgemein fällt für die Methode des Handaufmaßes ein hoher Zeitaufwand an, während die Genauigkeit des Verfahrens ungenauer als andere Herangehensweisen ist. Dies ist besonders der Fall, wenn das Messergebnis mit anderen Projekten verbunden werden soll, weswegen die ausschließliche Erfassung eines Gebäudes mit dem klassischen Verfahren des Handaufmaßes heute in der Planung und Dokumentationspraxis kaum eine Rolle spielt.

3.2.2 Tachymetrie

Hierbei handelt es sich um ein polares Aufnahmeverfahren mit einem Tachymeter. Die horizontalen und vertikalen Richtungen sowie die Entfernungen zu den Zielpunkten werden von einem einzigen Standpunkt gemessen und gespeichert. Für die Streckenmessung wird dazu entweder ein Reflektor benutzt oder auf die reflektorlose Variante zurückgegriffen. Die Umrechnung der 3D-Polarkoordinaten des Objektes kann bereits im Instrument erfolgen. Durch die Orientierung zu bekannten Messpunkten werden dann die 3D Koordinaten in einem übergeordneten Koordinatensystem bestimmt (vgl. Blankenbach in Schwarz 2017). Die Messwerte werden auf SD-Speicherkarten gespeichert und können weiter in CAD-Softwares bearbeitet werden, um 2D-oder 3D-Modelle zu erstellen.

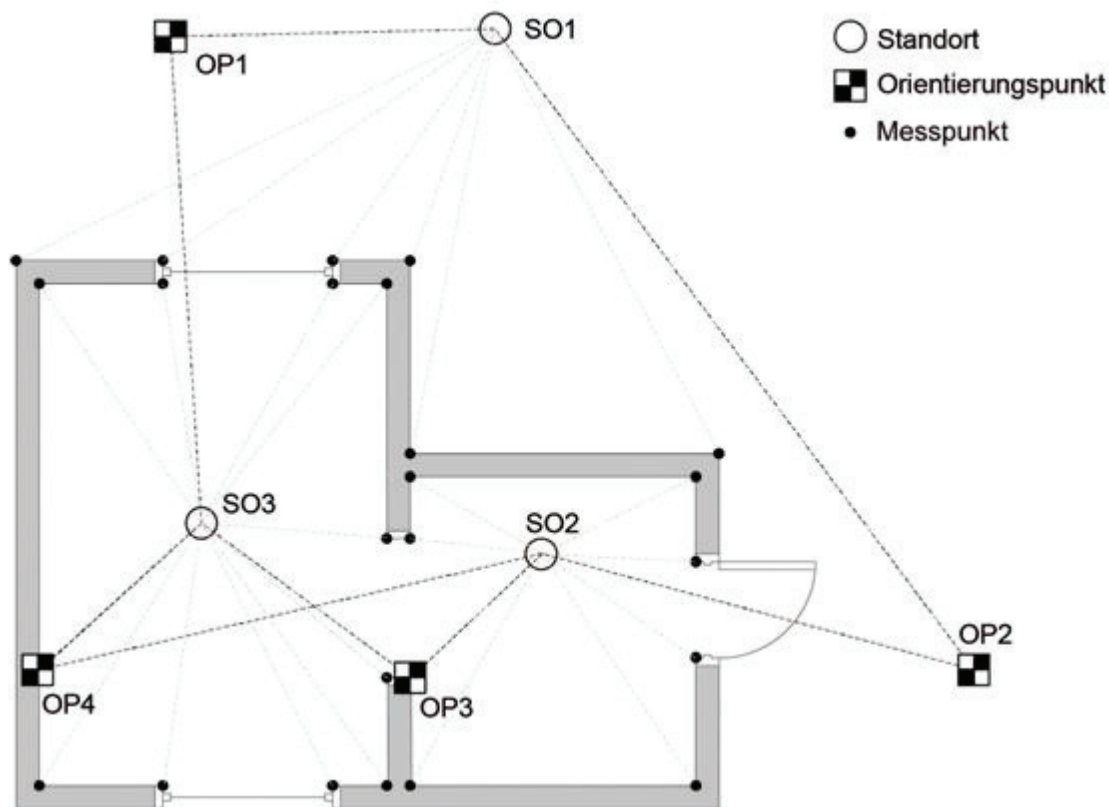


Abbildung 3: Prinzipielle Vorgehensweise der Tachymetrie bei Gebäudemessung (Donath 2008)

3.2.3 Photogrammetrie

Bei der Photogrammetrie handelt es sich um eine Vorgehensweise zur indirekten dreidimensionalen Rekonstruktion von Objekten mittels fotografisch aufgenommener Bilder. Bereits seit ca. 150 Jahren wird die Photogrammetrie in zahlreichen Bereichen genutzt, zum Beispiel in der Archäologie, der topografischen Geländemodellierung oder der Erfassung von Bauwerken. Parallel zur Entwicklung immer präziserer Technik zur Datenerfassung wird auch dieses Verfahren immer genauer und gilt mittlerweile als anerkanntes Standardverfahren, nicht nur im industriellen Umfeld. Der technische Fortschritt erlaubt immer wieder neue Einsatzmöglichkeiten und oft automatisierte Verfahren zur Auswertung der Messbilder. In Kombination mit CAD-Techniken wird so eine genaue Erfassung praktisch aller dreidimensionalen Objekte möglich (vgl. Luhmann 2010).

Die Photogrammetrie im Allgemeinen eignet sich besonders zur Vermessung im Außenbereich, dabei speziell Gebäudehüllen (vgl. Blankenbach in Schwarz 2017). Ausgenommen sind größere Gebäude wie Kirchen, da sie über weitläufige Innenräume

verfügen und daher ebenfalls im Innenbereich groß genug sind, um den Aufwand einer photogrammetrischen Aufnahme zu rechtfertigen. Da durch dieses Verfahren angesichts der hohen Informationsdichte viele Details erfasst werden können, kommt es mitunter auch im Bereich der Denkmalpflege sowie der Rekonstruktion aus vorhandenen Messbildern zum Einsatz. Durch die Messung über Luftaufnahmen können auch Bilder von schwer erreichbaren Gebäuden bzw. Gebäudeteilen aufgenommen werden.

Grundsätzlich ist der Aufwand bei der Erfassung vor Ort deutlich geringer als der Aufwand bei der Auswertung der erfassten Daten. Erfassung und Auswertung können zeitlich und räumlich unabhängig voneinander geschehen, was eine gewisse Flexibilität erlaubt. Durch relative aufwandsarme Methoden lassen sich vergleichsweise viele und umfangreiche Daten sammeln. Die Auswertung der Daten erfolgt dann digital mittels geeigneter Spezial-Software, also nicht am Gebäude selbst wie beispielsweise beim Handaufmaß oder Tachymetrie, sondern an dessen fotografischem Abbild.

Die Voraussetzung für die Erfassung genauer Daten ist allerdings zunächst die Kamerakalibrierung, also die Festlegung der Parameter der inneren Orientierung. Diese bestehen aus den Bildhauptpunktkoordinaten, der Kamerakonstante, der Verzeichnung und der Sensorgeometrie (Affinität, Scherung). Letztere beschreiben die Bildfehler. Bei der Kamerakalibrierung werden vor allem die Testfeld- und die Simultankalibrierung genutzt, wobei Letztere üblicher im Bereich der UAV-Photogrammetrie ist. Wie der Name schon vermuten lässt, werden bei der Simultankalibrierung die Aufnahmen gleichzeitig für die eigentliche Vermessung des Objektes genutzt. Beide Verfahren haben gemein, dass normalerweise ein signalisiertes und möglichst räumliches Punktfeld systematisch aufgenommen und um Maßstäbe bekannter Strecken ergänzt wird. Die Parameter der inneren Orientierung sind ein Indikator der Genauigkeit der Messung. Zeichnen sich Kameras durch konstante Parameter der inneren Orientierung aus, handelt es sich um Messkameras. Sie liefern Ergebnisse mit geringen oder leicht zu korrigierenden Abbildungsfehlern. Es gibt allerdings auch Teil-Messkameras, die zwar nicht explizit zum Zwecke der Photogrammetrie hergestellt worden sind, deren innere Orientierung jedoch eine Kalibrierung zu diesem Zwecke zulässt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Photogrammetrie ist die äußere Orientierung, welche die Kenntnis um den Aufnahmestandort beinhaltet. Ein Parameter der äußeren Orientierung ist das Verhältnis zwischen der Position des Projektionszentrums und dem Aufnahmegegenstand. Ein weiterer Parameter ist die Lage bzw. Verdrehung der Bildebene. Die Bestimmung der Parameter basiert auf den in ihren Koordinaten bekannten Passpunkten am Objekt. Sofern die innere Orientierung der Kamera bekannt ist, bedarf es mindestens drei

Passpunkten. Inwiefern die Parameter der inneren und äußeren Orientierung bekannt sein müssen, bestimmt das gewählte Auswertungsverfahren. Diese sollen im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Bei der Auswertung unterscheidet man zwischen Einbildauswertung, Zwei- bzw. Mehrbildauswertung und der Stereobildauswertung. Bei Ersterer erfolgt die Auswertung durch den Transfer der Bild-Perspektive in eine orthogonale, verzerrungsfreie Ansicht. Dieses entzerrte Bild wiederum kann als Grundlage zum in ein CAD dienen oder reale Maße können direkt im Bild abgegriffen werden. Dieses Verfahren eignet sich für die Erfassung von Fassaden und erfordert keine komplizierte Hard- und Software. Es lässt sich schon mit einfachen Digitalkameras umsetzen und erfordert keine Kenntnis der Parameter der inneren und äußeren Orientierung. Die Zwei- bzw. Mehrbildauswertung (siehe Abb. 4) erfordert eine Digitalkamera mit guter Optik oder im besten Falle eine spezielle Messkamera. Diese Auswertungsmethode ermöglicht die Ermittlung dreidimensionaler Objektkoordinaten basierend auf mehreren Aufnahmen des gleichen Objektes. Während bei der Einbildauswertung ein Spielraum von $\pm 5\text{cm}$ besteht, erlaubt die Zwei- bzw. Mehrbildauswertung Genauigkeiten von unter einem Zentimeter. Allerdings ist die Genauigkeit der Ergebnisse stark abhängig von der verwendeten Kamera sowie der Art der Referenzpunktbestimmung. Ob der hohen Informationsdichte dieser Methode eignet sich das Verfahren zur Erfassung komplexer Gebäudeteile oder detailreicher Fassaden. Die ermittelten Daten können als Grundlage vereinfachter 3D-Modelle zur Visualisierung besagter Gebäudeteile dienen. Bei der Stereobildauswertung, auch Stereophotogrammetrie genannt, wird das räumliche Sehen des Menschen genutzt, um ein Bildpaar dreidimensional auszuwerten. Für die Aufnahme des Bildpaares gilt der Anspruch, dass sozusagen das menschliche Sehen imitiert wird. Das heißt, es werden separate Bilder für das linke und rechte Auge aufgenommen. Für die Modellierung sind dann spezielle Stereoauswertegeräte nötig. Alternativ kann dieser Prozess auch am Monitor erfolgen, entweder mittels Anaglyphenverfahren oder Shutterbrillen. Die Ergebnisse sind genau bis in den Millimeterbereich, allerdings sind die Anforderungen an Hard- und Software auch sehr hoch, wodurch es üblich ist, die Auswertung spezialisierten Dienstleistern zu überlassen. Da die Ergebnisse allerdings sehr zuverlässig sind, findet diese Methode besonders in der Denkmalpflege Anwendung (vgl. Donath 2008).

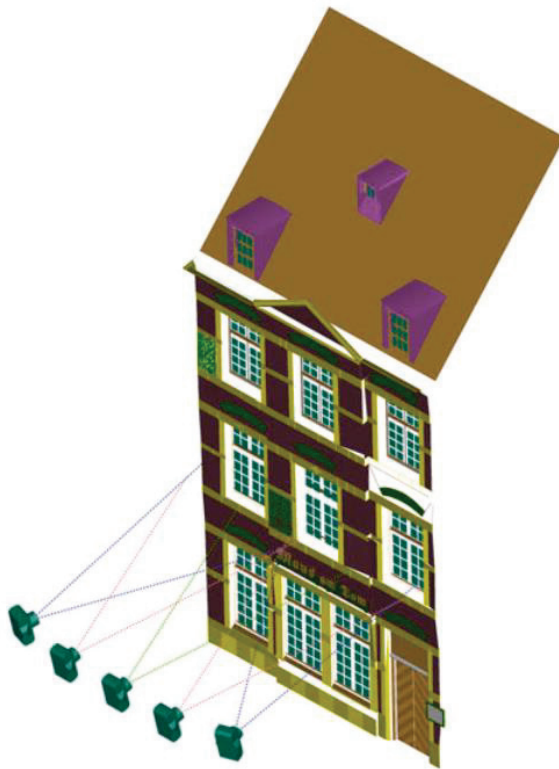


Abbildung 4: Bildverband für die Mehrbildauswertung (Blankenbach in Schwarz 2017)

Es wird unterschieden zwischen terrestrischer Photogrammetrie, wobei die Bildaufnahme vom Boden aus stattfindet, und der Aerophotogrammetrie, also der Luftbildmessung. Erstere findet vor allem Anwendung in der Architektur, wobei allerdings auch in diesem Bereich Aerophotogrammetrie zur Erstellung von Modellen basierend auf Luftbildern möglich ist. Bis zur Jahrtausendwende wurden diese vor allem durch bemannte Luftfahrzeuge erhoben. Aktuelle Luftbilder werden mittlerweile vor allem durch kleine unbemannte Luftfahrzeuge als bewegte Trägerplattformen ermittelt, sogenannte Unmanned Aerial Vehicles (UAV) bzw. Unmanned Aerial Systems. (UAS) Diese können sowohl ferngelenkt als auch autonom fliegend sein und in vielfältiger Form auftreten: Drehflügel- und Starrflügelsysteme, Ballone, Luftschiffe, Gleitschirme sowie Lenkdrachen. Durch die kostengünstige Verfügbarkeit von Drohnen hat die Nutzung dieses Verfahren in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Die Drohnen gehören zu den Rotor- bzw. Drehflügel-UAVs, bei welchen sowohl Schwebeflug als auch Senkrechtstarts und -landungen möglich sind. Der Auftrieb basiert ausschließlich auf Motorkraft. Neben Helikopter-UAVs dominieren seit 2004 diverse Multikopter-UAVs den Markt. Letztere zeichnen sich durch mehrere starre Rotoren aus, die dank PID-Regelung und Inertial-Sensor-Systemen (INS) stabilisiert werden (vgl. Niethammer 2013). UAVs können allerdings auch horizontal startende Flächenflugzeuge sein. Sowohl für Drehflügler als auch horizontal startende UAVs gibt es ein breites Spektrum an Gewichtsklassen, die genau an die Bedarfe

und äußeren Gegebenheiten angepasst werden können. Gleichzeitig macht es eine sich stetig verbessernde Miniaturisierung von Antriebs-, Akku-, Sensor- undameratechnik möglich, immer präzisere Aufnahmen zu machen (vgl. Niethammer 2013).

Durch diese Methode der gekoppelten Mehrbildkorrespondenzanalyse und -orientierung werden Daten für die innere und äußere Orientierung generiert. Gleichzeitig erhält man eine erste Punktwolke basierend auf den Verknüpfungspunkten. Die UAV-Photogrammetrie unterscheidet sich von den bisher vorgestellten Auswertungsvarianten insofern, als dass die ermittelten Daten auf einer großen Anzahl stark überlappender Bildaufnahmen basieren. Diese werden mittels Verfahren der Bildzuordnung (Dense Image Matching) analysiert, um daraus automatisiert Punktwolken abzuleiten. Die Orientierungsdaten fließen dabei als bekannte Größen in den Prozess ein. Der Vorgang der Datenverarbeitung stützt sich auf Algorithmen und Verfahren, die man unter dem Begriff Structure from Motion (SfM) zusammenfasst. Gemeinsam mit merkmals- und flächenbasierten Methoden sind SfM-Prozesse Teil des Dense Image Matchings. Mittels redundantem Vorwärtsschneiden (Triangulationsprinzip) ergeben sich schlussendlich die 3D-Koordinaten der Objektpunkte. Oberflächenmerkmale des Objektes, beispielsweise einer Gebäudefassade, werden durch stark verdichtete Punktwolken repräsentiert, wobei eben jene die Geometrie mit hoher Auflösung beschreiben (vgl. Blankenbach in Schwarz 2017). Durch die hohe Punktedichte lassen sich sehr genaue Daten ableiten, die wiederum als Basis detaillierter Modelle dienen können (siehe Abb. 5).



Abbildung 5: Bildbasierte Punktwolke aus UAV-Aufnahmen durch Dense Image Matching
(Blankenbach in Schwarz 2017)

Die Kombination aus Luftbild- und UAV-Photogrammetrie bietet vielfältige Einsatzmöglichkeiten, Wirtschaftlichkeit und eine hohe Genauigkeit, sofern die technische Ausrüstung passend gewählt wurde. Herausforderungen stellen neben rechtlichen Aspekten sowie die Einbindung in die Luftfahrt vor allem die Einbettung in die bestehenden Verfahren der Datenverarbeitung dar. Doch dank SfM-basierten Verfahren lassen sich Bildorientierung und Punktwolken ebenso genau bestimmen wie bei herkömmlichen Verfahren der Photogrammetrie, und das trotz vergleichsweise einfacher Kamertechnik (vgl. Blankenbach in Schwarz 2017).

3.2.4 Laserscanning

Obschon die benötigte Instrumententechnik beim Laserscanning mit relativ viel Aufwand und hohen Kosten verbunden ist, gewinnt diese Methode der Bauvermessung zunehmend an Bedeutung. Ähnlich wie auch die Photogrammetrie wird das Laserscanning angesichts der hohen Datenmenge für einfachere Strukturen im Inneren von Gebäuden als zu aufwendig erachtet. Handelt es sich jedoch um komplexere Bauwerke wie Kirchen etc. besticht diese Methode durch ihre rasterförmige Abtastung. Durch die automatische Auswertung anfallender Punktwolken durch die bereits mitgelieferten Softwarepakete vieler Hersteller bietet diese Methode eine gute Lösung zur Vermessung komplexerer Bauwerke. Bei der dazugehörigen Software gibt es jedoch erhebliche Unterschiede hinsichtlich des Automatisierungsgrades sowie der Handhabung. (vgl. Blankenbach in Schwarz 2017) Dabei ist das Erfassen von Gebäuden aus der Luft ebenso möglich (Airborne Laserscanning) wie die bodengestützte Vermessung (terrestrisches Laserscanning), welche üblicherweise bei Bauaufnahmen angewandt wird. Gerade in den letzten Jahren hat das terrestrische Laserscanning angesichts der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten enorm an Bedeutung gewonnen.

Im Prinzip stellt das terrestrische Laserscanning (siehe Abb. 6) eine automatisierte Form des tachymetrischen Messvorgangs dar. Während der Erfassung wird ein Messbereich systematisch in vorgegebenen Winkelschritten horizontal und vertikal abgetastet. Dabei entscheidet die Bauform des Scanners über die Anzahl der erfassbaren Raumsegmente. Dadurch werden fortlaufend 3D-Polarkoordinaten aufgezeichnet, die in entsprechende kartesische 3D-Koordinaten umgerechnet werden. Daraus ergibt sich für jeden Scan eine 3D-Punktwolke. Arbeiten die Laserscanner nach dem Phasenvergleichsverfahren, werden so mitunter Messraten von mehr als 1.000.000 Punkten pro Sekunde erreicht. Auch wenn die Reichweite auf einige Deka- bzw. Hektometer limitiert ist, ist das Verfahren für Bauaufnahmen üblicherweise ausreichend. Eine ähnliche Messrate wird auch durch das Impulsmessverfahren

erreicht, dessen Messbereich bis zu mehrere Kilometer betragen kann. Mit einer Standardabweichung der Einzelstreckenmessung von 2 bis 5mm ist weiterhin eine hohe Genauigkeit gegeben. Viele Scanner erfassen neben den geometrischen Messgrößen auch die Intensität des reflektierten Laserstrahls, wodurch unterschiedliche Beschaffenheiten der Oberfläche erkennbar werden. Der Problematik der Mehrfachreflexion, wie sie bei der Tachymetrie auftritt, wird durch Analyse der Punktnachbarschaft vorgebeugt. Dank technologischem Fortschritt finden sich zunehmend Tachymetrieinstrumente, die über eine zusätzliche Scanfunktion und integrierte Kameras für die Aufzeichnung der Bilder verfügen. Aktuell wird an Lösungen gearbeitet, bei denen die Messensoren für Tachymetrie, Photogrammetrie und Laserscanning in einem universellen Instrument verschmelzen.

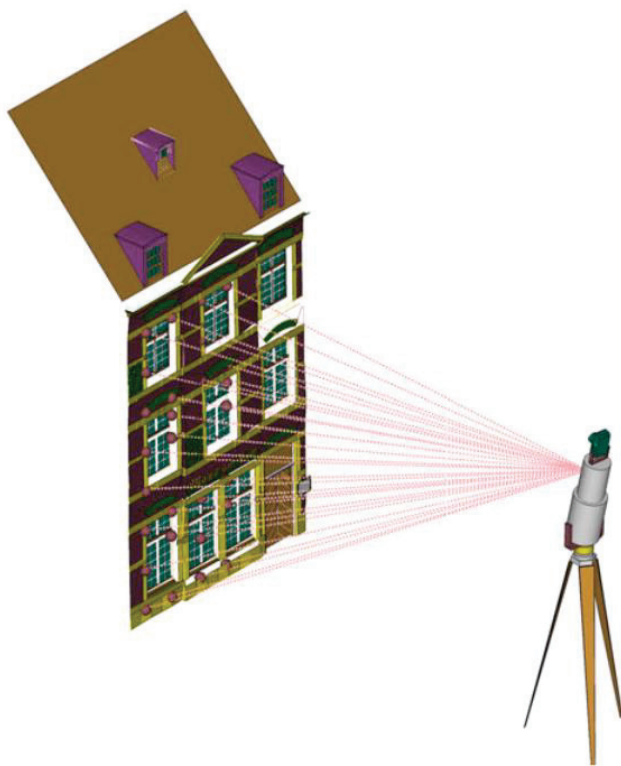


Abbildung 6: Terrestrisches Laserscanning (Blankenbach in Schwarz 2017)

Bei der Wahl des Standortes sind keine Festpunkte erforderlich, wodurch die Durchführung der Messung flexibler wird. Aus jedem Standort ergibt sich eine Punktwolke, welche vorerst im lokalen Sensorkoordinatensystem erzeugt wird. Im nächsten Schritt findet die Überführung der jeweiligen Punktwolken in ein gemeinsames Koordinatensystem statt. Dieser Prozess wird als Registrierung bezeichnet und erfolgt über die Punktwolken selbst, hochreflektierende Zielmarken oder Merkmale, die sich aus den Punktwolken ableiten lassen. Die Registrierung basiert in mathematischer Hinsicht auf räumlichen Ähnlichkeitstransformationen anhand von Passelementen zwischen den Punktwolken.

Alle abzuleitenden Informationen zu Geometrie und Struktur des Bauwerkes sind in den 3D-Punktwolken selbst zu finden. Um diese auszuwerten, unterscheidet man grundsätzlich 3 Verfahren:

1) Konstruktion in definierten Schnittebenen

Hierbei wird die Punktwolke mit vertikalen oder horizontalen Ebenen zum Schnitt gebracht (Schnittkorridore), woraus das entsprechende Profil erkennbar wird. Dann kann der Profilverlauf manuell, teilautomatisch oder automatisch nachgezeichnet werden. Das Verfahren ist vergleichsweise einfach und liefert im Ergebnis 2D-Standardzeichnungen.

2) Erstellen von 3D-Konturen

Bei dieser Methode wird die Struktur des Bauwerkes aus den Punktwolken in Form von Ebenen, Ecken und Kanten erhoben, wobei indirekte Auswertmethoden eingesetzt werden, da die Messpunkte des Scanners nicht zwangsläufig auf den zu erfassenden Ecken und Kanten liegen. Aus der großen Anzahl an Messpunkten, häufig in Kombination mit Filter- und Glättungsverfahren, ergibt sich ein sehr genaues 3D-Drahtmodell.

3) 3D-Modellierung

Diese Methode ermöglicht eine ganzheitliche Objektdarstellung mit Bauteilbildung sowie Attributierung und hat dadurch im Bereich der Gebäudemessung eine besondere Bedeutung. Das Vorgehen soll im nächsten Kapitel ausführlicher beschrieben werden. (vgl. Donath 2019)

Abschließend sei noch zu erwähnen, dass die Kombination von Laserscanning und Photogrammetrie eine gute Ergänzung zueinander bietet. Defizite hinsichtlich der Tiefenmessgenauigkeit bei der Photogrammetrie können durch das Verfahren des Laserscannings ausgeglichen werden. Gleichzeitig bietet das Verfahren der Photogrammetrie aufgrund der hohen Bildauflösung eine präzisere Erfassung von Objektoberfläche und Details. Auswertesysteme wie PHIDIAS (siehe Abb. 7) kombinieren die orientierten Aufnahmen mit den 3D-Punktwolken, welche simultan erfasst werden. Das Ergebnis kann in Form von Draht-, Flächen- oder Volumenmodellen festgehalten werden (vgl. Blankenbach in Schwarz 2017).

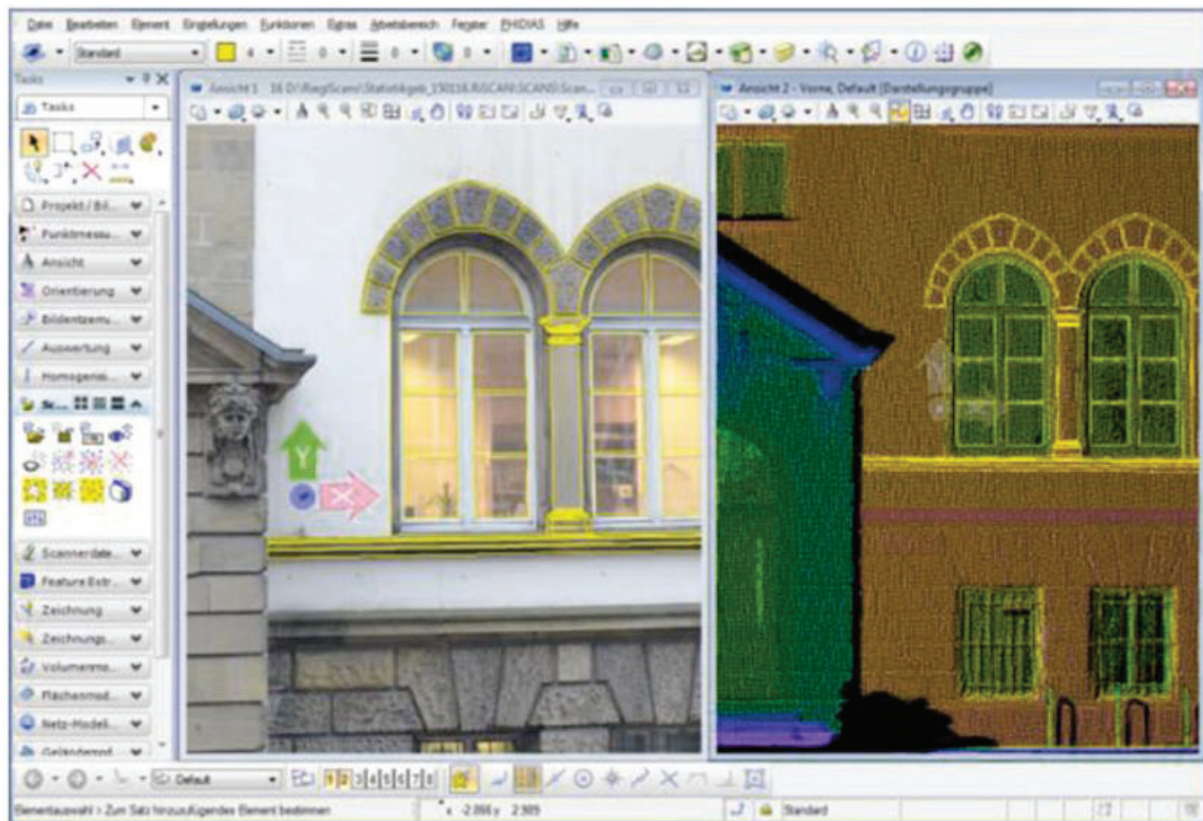


Abbildung 7: PHIDIAS – Kombinierte Auswertung von Bildaufnahmen und Punktwolken
(PHOCAD GmbH in Blankenbach in Schwarz 2017)

4 3D-Modellierung

Bei diesem Verfahren ergibt sich die Geometrie des Bauwerkes aus den Punktwolken in Form von Flächen, Zylindern, Quadern, Kegeln und anderen Primitiven oder aus einer Verbindung einzelner Punkte durch Dreiecksflächen (meshing) (siehe Abb. 8 und 9). Hierbei werden diese Elemente in die Punktwolke mittels spezieller Fitting-Algorithmen in einem halbautomatischen Prozess eingepasst. Da die Bestimmung der Gebäudegeometrie anhand vieler Messpunkte stattfindet, zeichnet sich dieses Verfahren durch eine hohe Genauigkeit aus und eignet sich besonders für komplexe und stark strukturierte Geometrien. Grundvoraussetzung für die Überführung von stark ornamentierten Baudetails in ein 3D-Modell ist eine hohe Auflösung der Kamera bzw. des Scanners. Werden Scannerdaten mit orientierten Bildern kombiniert, ergibt sich so ein umfassendes und detailliertes 3D-Modell (vgl. Blankenbach in Schwarz 2017).

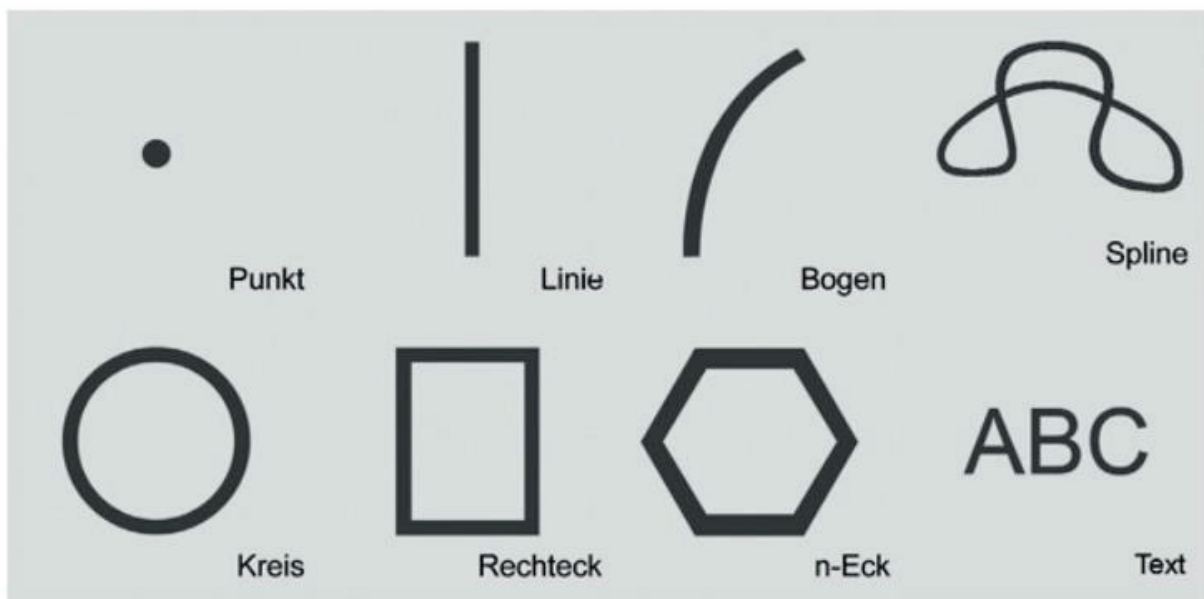


Abbildung 8: Übersicht der elementaren CAD-Objekte, die auf der Ebene (2D-CAD) oder im Raum (3D-CAD) angeordnet sein können (Donath 2008)

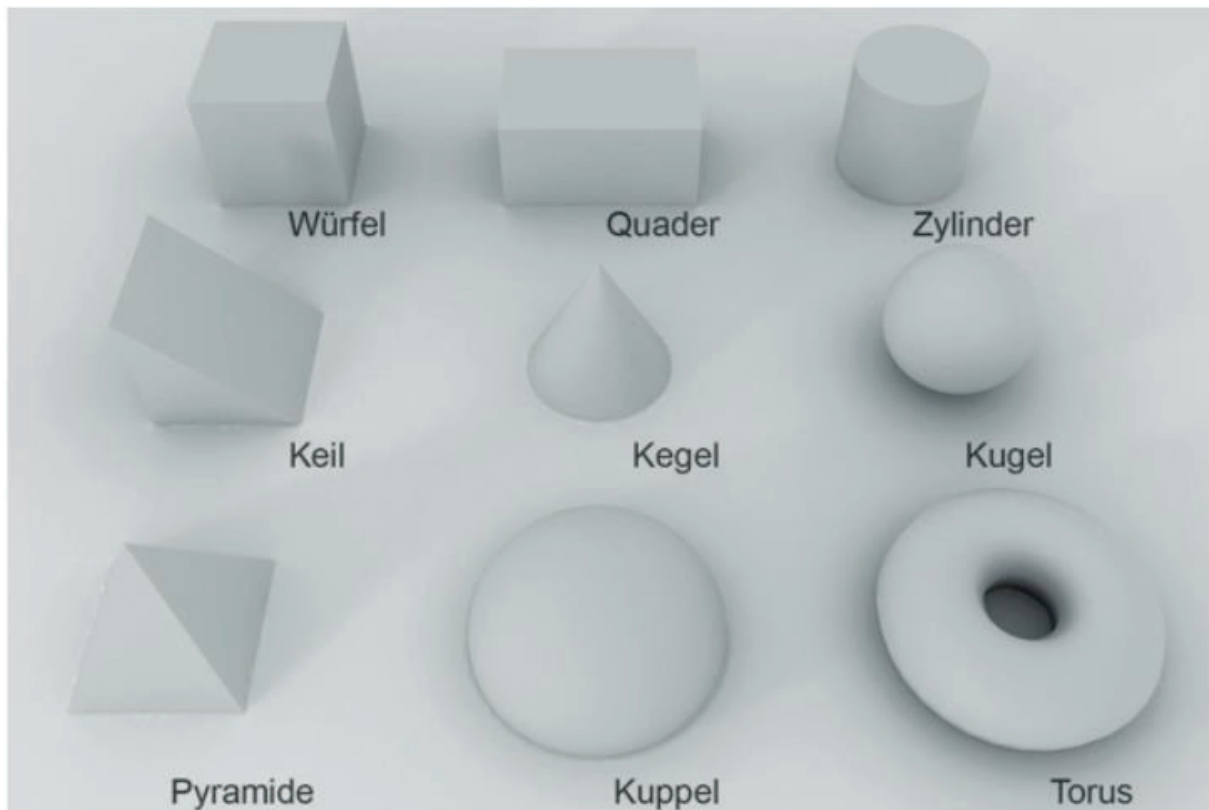


Abbildung 9: 3D-Grundprimitive zur Generierung von Volumenmodellen (Donath 2008)

Doch auch die Punktwolke selbst kann als Grundlage für weitere Arten der 3D-Modellierung dienen. Nötig ist dazu die Erstellung eines dreidimensionalen Liniengerüsts, aus dem Flächen- oder Volumenmodelle abgeleitet werden können. Erstere beinhalten ebene oder räumliche Flächen zur Darstellung eines Objektes, während bei Volumenmodellen die Objektbeschreibung durch ihre dreidimensionale Körperlichkeit erfolgt. Im Gegensatz zum 3D-Linienmodell besteht bei Flächen- und Volumenmodellen die Möglichkeit, verdeckte Linien und Schattierung zu berechnen. Besonders in der Bestandserfassung spielen 3D-Modelle eine große Rolle, insbesondere in Verbindung mit Tachymetrie, Mehrbildphotogrammetrie und Laserscanning. Das dreidimensionale Liniengerüst stellt hierbei oft die Grundlage zur Ableitung von 2D-Zeichnungen oder zur Modellierung eines 3D- Modells (Fläche oder Volumen) dar (vgl. Donath 2008).

Im akademischen Kontext wird derzeit an Algorithmen zur automatischen Ableitung von 3D-Geometrien gearbeitet. So wird aus der Punktwolke vorerst ein Flächenmodell abgeleitet, das wiederum dann in ein Volumenmodell überführt wird. Mittels künstlicher Intelligenz sollen künftig automatisch Bauteile identifiziert werden können, woraus ein CAD-taugliches Modell des Gebäudes entsteht. Auch automatisierte Erkennung von Ecken und Kanten in Punktwolken ist Gegenstand der Forschung.

5 Messobjektbeschreibung: Kapelle St. Georg in Neubrandenburg

Außerhalb der Stadtmauer von Neubrandenburg befindet sich die 1308 erstmals urkundlich erwähnte und zur Kirche St. Johannis gehörende Kapelle St. Georg. Sie ist die einzig erhaltene von ehemals drei Kapellen vor den Toren der Stadt (vgl. Baier 1982).

Die Neubrandenburger Bürger errichteten vor dem Treptower Tor die Kapelle mit angeschlossenem Hospital. Das isoliert gelegene Anwesen war für die Unterbringung kranker Reisender bestimmt, die aus Richtung der Ostseeküste kamen. Durch diese Vorsichtsmaßnahme sollten tödliche Krankheiten, wie die Pest, von der Stadt ferngehalten werden (vgl. Szczesiak).

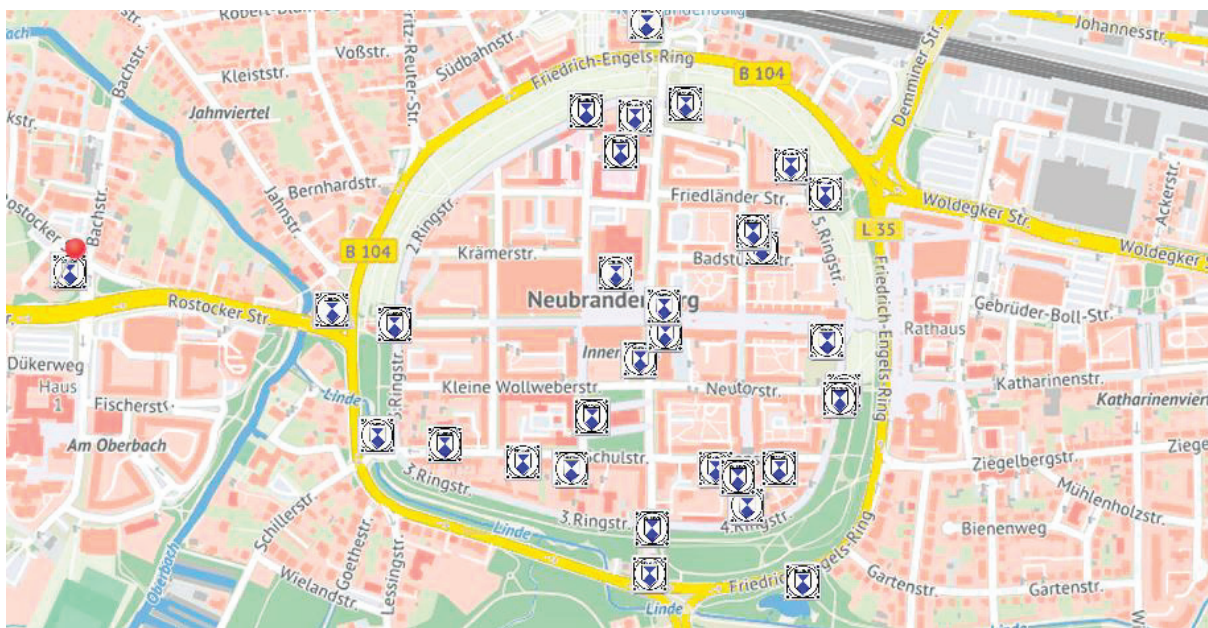


Abbildung 10: Position der St. Georg Kirche und weitere Denkmäler in Neubrandenburg
(<https://mb3.neubrandenburg.de/application/Baudenkmale>)

Der ungewölbte, rechteckige Backsteinbau ruht auf einem Feldsteinsockel. Er ist 12,60 m lang und 7,00 m breit und von einem Walmdach gedeckt. Darauf sitzt mittig ein quadratischer Fachwerk-Dachturm mit oktogonaler Laterne und Haube. Er stammt in seiner jetzigen Form aus der zweiten Hälfte des 18. Jahrhunderts (vgl. Krüger 1929).

Im Jahre 1994, nach Abschluss der letzten Sanierung, wurde die Georg-Kapelle der Öffentlichkeit wieder zugänglich gemacht. Heute finden in dem Bauwerk u. a. Gottesdienste, Hochzeiten, kleinere Musikveranstaltungen und Gesprächsrunden statt.



Abbildung 11: Kapelle St. Georg in Neubrandenburg (Foto: Uwe Barghaan)

6 Vorbereitung der Messung

Jede Vermessung beginnt mit der Vorbereitung und Planung der Messaufgabe. Unter Vorbereitung versteht man, nicht nur das Messverfahren zu wählen, sondern auch die Planung des Messablaufs, mit welchen Instrumenten die Vermessung durchgeführt wird und mit welchen Softwares wird die Datenauswertung erfolgt. Der Vermesser muss sich im Klaren sein, was mit welcher Genauigkeit gemessen werden soll, deswegen muss das Ziel klar vom Auftraggeber definiert sein. Ziel der Messaufgabe war die 3D Erfassung der Kirche St. Georg und das Bauwerk als digitales 3D Modell darstellen bzw. zu speichern und dokumentieren. Um diese Zielstellung erreichen zu können, war es notwendig, auf eine Kombination aus mehreren Verfahren bzw. auf Laserscanning, Photogrammetrie, und ein GNSS-Verfahren zurückzugreifen. Mittels terrestrischem Laserscanning ist es möglich, das Unterteil des Bauwerkes zu erheben. Dach und Turm werden idealweise mit Drohne fotografiert bzw. erfasst. Da die Arbeit in ein lokales System durchgeführt wird, das Ergebnis aber im amtlichen Koordinatensystem erforderlich ist, sollte man einige Festpunkte im Arbeitsgebiet festlegen. Die Festpunkte werden mittels GNSS-Empfänger bestimmt und danach bei der Auswertung werden die Punktwolken, in Beziehung auf diese Festpunkte, georeferenziert. Die Auswertung wird mit Hilfe dreier Programme durchgeführt, um das 3D-Modell zu erstellen: eins für die Bearbeitung der Daten vom Laserscanning, das andere zum Aeroverfahren. Zum Präsentieren des Ergebnisses wird die dritte Software benötigt.

7 Erfassung des Messobjekts mittels terrestrischem Laserscanner

7.1 *Verwendete Instrumente*

Für die Messung des Unterteils des Gebäudes wird der terrestrische Laserscanner IMAGER 5016 der Firma Zoller + Fröhlich eingesetzt.

7.1.1 Über die Firma Z+F

Das Elektrotechnik-Unternehmen Zoller + Fröhlich wurde 1963 von Hans Zoller und Hans Fröhlich in Wangen im Allgäu gegründet. Die erste Erfindung der Firma waren Aderendhülsen mit Kunststoffkragen. Heutzutage werden verschiedene Werkzeuge angeboten sowie auch Produkte im Bereich Schaltschrankbau und Lasertechnik. Anfang der 1990er wurde das erste Lasersystem für Bahn- und Tunnelvermessung entwickelt. 1996 erfanden die Gründer das dreidimensionale visuelle Lasermesssystem für die Anwendung im Bereich Bestandaufnahme. Heute ist Zoller + Fröhlich aufgrund der langjährigen Tätigkeit eine der führenden Firmen im Bereich der berührungslosen Lasermesstechnik.

7.1.2 Laserscanner Z+F IMAGER® 5016

Der Phasenvergleichs-Laserscanner der Firma Zoller + Fröhlich besteht aus einer integrierten HDR-Farbkamera, integrierter Beleuchtung und dynamischem Kompensator sowie einem Navigationssystem (Barometer, Accelerationssensor, Gyroskop, Kompass, GPS) und verbesserter WLAN-Geschwindigkeit und Reichweite.

Das Erfassen von Farbinformationen ist in vielen Anwendungsbereichen sehr wichtig. Mit integrierter HDR-Farbkamera, 80 Megapixel und einer Aufnahmezeit von 3:30 Minuten für ein 360° Panoramafoto, kann der Benutzer geometrische Daten und Farbdaten generieren und alle Details eines Objektes erfassen. Die neue HDR-Kamera des terrestrischen 3D-Laserscanners Z + F IMAGER® 5016 ist jetzt mit integrierten LED-Spots ausgestattet, die zusätzliche Flexibilität beim Scannen bieten, damit die Aufnahme von Bildern in dunklen Umgebungen keine zusätzlichen Lichtquellen mehr erfordert.

Der terrestrische Laserscanner Z + F IMAGER® 5016 ist mit einem integrierten Positionierungssystem ausgestattet, das die Scannerposition referenziert und die automatische Registrierung erleichtert.

Mit WiFi-Modul ist die Kombination mit der Software „Z+F LaserControl“ möglich. Von Vorteil ist, das Schätzen der Punktwolke und die Grob-Orientierung vor Ort vorzunehmen.

Es wurde die maximale Reichweite des neuen terrestrischen 3D-Laserscanners Z + F IMAGER® 5016 auf bis zu 360 m erweitert und damit neue Möglichkeiten und Anwendungen geschaffen. Die maximale Messrate beträgt somit mehr als 1 Mio. Punkte / Sek. (vgl. Z+F Laser Control)



Abbildung 12: Laserscanner Z+F IMAGER® 5016 (vgl. Z+F Laser Control)

7.2 Messablauf

Bevor mit der Messung begonnen wird, ist es notwendig, sich einen Überblick über das zu messende Gebäude zu verschaffen. Der Aufbau des Unterteils der Kirche gestaltet sich einfach und weist keine komplexen Strukturen auf.

Zunächst werden die Stative rund um die Gebäude aufgestellt und mithilfe des Leica Viva GS15 koordinatenmäßig bestimmt, um einen Anschluss an das amtliche Lagebezugssystem zu bekommen. Zwei Aspekte sind beim Aufbauen der Stative zu beachten. Erstens sollten die Stative möglichst fern von Hindernissen aufgebaut werden, damit bei der GNSS-Messung keine Abschattungen erfasst werden. Zudem sollten die Stative im Arbeitsgebiet gut verteilt werden, weil später auf sie die Targets aufgebaut werden, die möglichst sichtbar von jedem Standpunkt des Laserscanners sein sollen. Mit dem SAPOS „Satellitenpositionierungsdienst“

werden die Punkte in ETRS89 Koordinatensystem, dem „Europäischen Terrestrischen Referenzsystem 1989“, bzw. das amtliche Bezugssystem der Lage, bestimmt.

Da in der GNSS-Antenne der Punkt A bestimmt wird (siehe 13), Ziel aber im Target der Punkt M ist (siehe Abbildung 14), sollten mit Hilfe eines Lineals oder Messbands die Größen vor Ort gemessen und später bei der Auswertung berücksichtigt werden (siehe Abbildung 13, 14 und 15).



Abbildung 14: Gemessene Punkt mit Leica Viva GS15 GNSS Antenne

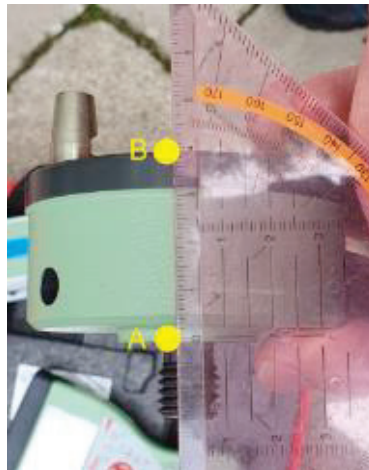


Abbildung 13: Aufmaß des Trägers der GNSS-Antenne

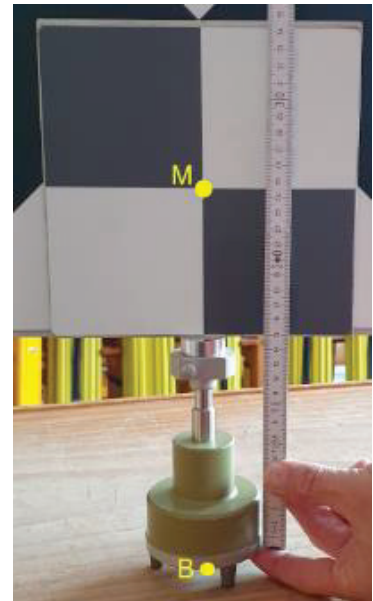


Abbildung 15: Bestimmung des Abstands vom Dreifuß bis zum Mittelpunkt des Targets

Als nächstes werden schwarz-weiß-Targets/ „Profi-Targets“ auf den Stativen platziert (siehe Abbildung 16), die als Festpunkte zur Registrierung und Georeferenzierung der gescannten Punkte von verschiedenen Standpunkten dienen.



Abbildung 16: Aufgebaute Targets rund um das Gebäude

Nachdem alle vorbereitenden Arbeiten abgeschlossen sind, kann mit dem Scan des Objektes begonnen werden. Hierfür werden am Scanner die Projekt- und Scaneinstellungen vorgenommen. Zu den Einstellungen gehört der Projektname, die Auswahl der Winkelauflösung, die Qualität sowie die Einstellung, ob der Scan optisch durch die I-Cam aufgewertet werden soll.

Zuerst wird die Horizontierung überprüft, also die automatische Neigungskompensation, und anschließend der Scan gestartet. Vor Ort können die einzelnen Scans am Rechner zueinander orientiert werden, um später die Auswertung zu beschleunigen. Für das vollständige Erfassen des Gebäudes mit dem Laserscanner werden 8 Standpunkte benötigt. Bei der Standpunktwahl wird darauf geachtet, dass möglichst viele Targets erfasst werden sollen. Typische Problematik beim terrestrischen Laserscanning sind die bewegten Objekte z.B. Menschen oder Autos. Das Problem wird hier bei Laserscanner Z+F IMAGER 5016 gelöst, indem der gleiche Bereich zwei Mal gescannt wird und nur die Punkte übernommen werden, die in beiden Scans identisch sind.

GNSS-Messungen und gescannte Daten werden auf SD-Karte gespeichert, um weiter im Postprocessing bearbeitet zu werden.

7.3 *Auswertung des Laserscannings*

Die Auswertung der Scans erfolgt mit der Software Laser Control von Zoller und Fröhlich in mehreren Arbeitsschritten, die im Folgenden beschrieben werden.

7.3.1. Registrierung

Da von verschiedenen Standpunkten gescannt wird, hat jeder einzelne Scan sein eigenes Lokal-Koordinatensystem. Um alle Scans miteinander zu verknüpfen und in ein übergeordnetes Koordinatensystem zu überführen, müssen diese Scans registriert werden. Es gibt verschiedene Registrierungsverfahren, die man verwenden kann. Die Auswahl des Verfahrens ist von der geforderten Genauigkeit abhängig. Unter Registrierungsverfahren zählt man Cloud-to-Cloud Verfahren, Registrierung mit Targets und andere Verfahren. Mit der Cloud-to-Cloud Methode wird der RANSAC-Algorithmus und das Ausgleichsverfahren „Methode der kleinsten Quadrate“ angewendet. Hier unterstützt der RANSAC- Algorithmus durch Berechnung einer um Ausreißer bereinigten Datenmenge, des sogenannten Consensus Sets, das Ausgleichsverfahren. Mit Hilfe der „Methode der kleinsten Quadrate“ werden die einzelnen Scans miteinander verknüpft und vollautomatisch registriert. Dabei werden die einzelnen Punktkoordinaten zweier Punktwolken direkt miteinander verglichen. Die Software versucht zudem, die Abstände aller Punkte zu minimieren. Es wird in diesem Projekt jedoch auf ein anderes Registrierungsverfahren zurückgegriffen, nämlich „Registrierung mit Targets“. Zuerst wird auf den Button „Target erkennen“ geklickt. Das Zentrum des Targets wird in der Regel automatisch durch Bildverarbeitungsalgorithmen gefunden. Hier wird auf das Zentrum des Targets geklickt, danach öffnet sich ein Fenster (siehe Abbildung 17), wo man besser das Zentrum bestimmen sowie den Namen und Target-Typ eingeben kann. In Form einer Ampel wird die Qualität des ermittelten Zentrums angegeben. Wenn alle Targets erkannt wurden, kann man auf den Button „Registrierung mit Targets“ klicken. Ausgegeben wird dann eine Übersicht der verknüpften Scans (siehe Abbildung 18). Vorteil bei diesem Verfahren ist die eigene Anvisierung der Punkte. Auch wenn nicht-automatische Verfahren augenscheinlich aufwendiger wirken, sind sie doch sehr genau.

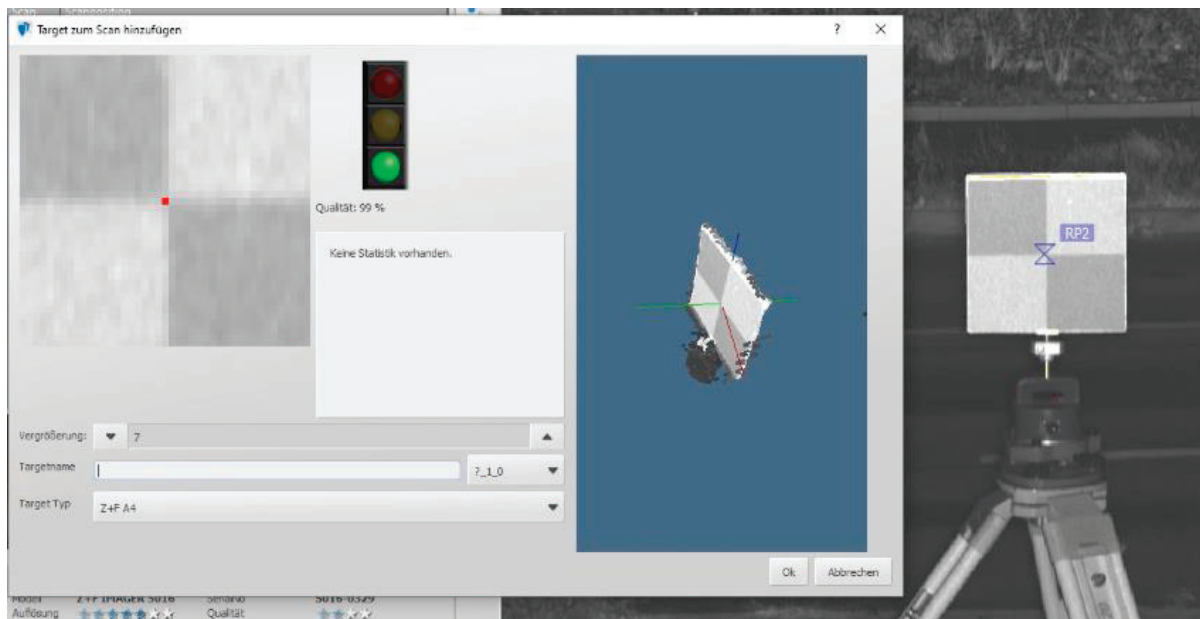


Abbildung 18: Der Prozess „Target Erkennen“

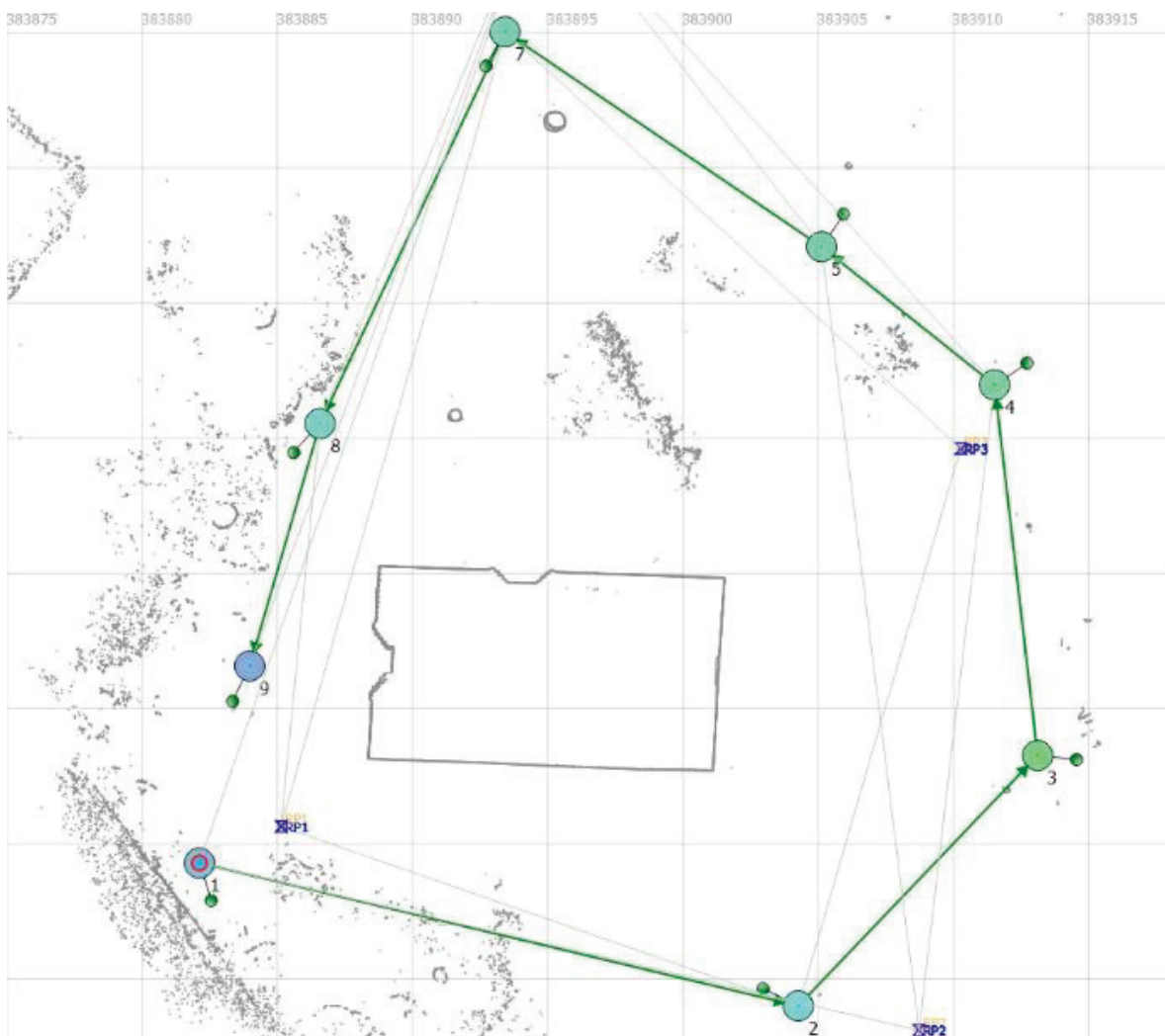


Abbildung 17: Übersicht über der verknüpften Scans nach der Registrierung

7.3.2 Georeferenzierung

Damit die Punktwolke georeferenziert werden kann, muss eine K.Datei angelegt werden, in der sich die GNSS Messungen der Targets mit den richtigen Target-Nummern befinden. Die folgende Anweisungskette ist dafür notwendig: „Target verwalten → Bekannte Target → Hinzufügen“. Hierbei ist zu beachten, dass der Offset 24.6cm für die Höhe bei allen Targets addieren werden soll. Sind alle Targets bestimmt, kann nochmals eine „Registrierung mit Targets“ durchgeführt werden. Die Abbildung 19 zeigt eine Genauigkeitsbetrachtung zur Registrierung und Georeferenzierung. Der Mittelwert der maximalen Abweichung jeder einzelnen Scanposition liegt bei 12.54mm, die Standardabweichung der Targetberechnung liegt bei 3.35mm und die Standardabweichung der Targetberechnung in Bezug zu den bekannten Targets liegt bei 5.14mm. Das Resultat reicht für diese Aufgabenstellung völlig aus.

			Ergebnis	Ergebnis
☒	7	RP4	2.60mm	9.48mm
☒	9	RP4	9.32mm	9.17mm
☒	5	RP3	9.20mm	8.67mm
☒	7	RP1	2.65mm	6.25mm
☒	5	RP2	3.54mm	4.20mm
☒	3	RP2	4.41mm	3.29mm
☒	3	RP3	3.55mm	3.06mm
☒	8	RP4	7.04mm	2.35mm
☒	4	RP2	4.21mm	2.16mm
☒	8	RP1	6.86mm	2.12mm
☒	4	RP3	2.64mm	1.96mm
☒	9	RP1	6.33mm	0.38mm
☒	Bekannte Targets	RP1	6.65mm	
☒	Bekannte Targets	RP2	5.54mm	
☒	Bekannte Targets	RP3	1.14mm	
☒	Bekannte Targets	RP4	8.31mm	
☒	1	2	7.0 mm	
☒	2	3	3.8 mm	
☒	3	4	3.7 mm	
☒	4	5	4.1 mm	
☒	5	7	6.7 mm	
☒	7	8	6.1 mm	
☒	8	9	5.3 mm	

Eintragsliste Scanpositionen

Registrierergebnis

12.54 mm 3.35 mm 5.14 mm

Abbildung 19: Betrachtung der Genauigkeit zur Registrierung und Georeferenzierung

7.3.3 Filterung

Wenn die Punktwolke registriert und georeferenziert ist, sollte sie anschließend gefiltert bzw. bereinigt werden, um Punkte zu entfernen, welche sich beispielsweise zu weit entfernt befinden. Bei der Software „Laser Control“ von Zoller und Fröhlich ist es so, dass bei der Anwendung von Filtern auf gesamte Scans keine Punkte entfernt, sondern Masken erstellt werden. Zunächst werden auf die gesamten Scans drei Standardfilter angewendet, und zwar Mixed Pixel Filter, ein verbessernder Mixed Pixel Filter sowie ein Ausdünnfilter.

Mixed Pixel Filter

Dieser Filter maskiert Pixel aus, welche sich auf Kanten befinden und dadurch ungültig sind. Es wird eine Bitmaske gesetzt.

Verbessernder Mixed Pixel Filter

Es werden jene Pixel ausmaskiert, welche durch den Mixed Pixel Effekt entstanden sind. Z.B. in Szenen mit vielen Details in naher Entfernung zum Laserscanner oder Szenen mit Gebäuden oder Objekten, die große Flächen im Himmel haben oder sehr niedrige Intensität aufweisen.

Ausdünnfilter

Dieser Filter dient dazu, eine einheitliche Punktdichte zu erhalten. Der Filteralgorithmus arbeitet nur in einer einzelnen Linie (vgl. Z+F LaserControl® Handbuch).

Alle Parameter, die eingegeben werden, sind Standard-Parameter, die in der Software bereits berechnet sind. Wenn die oben genannten Filter angewendet, wird zusätzlich ein bounding box erstellt, damit die restlichen Punkte außerhalb der 3D-Auswahl entfernt werden.



Abbildung 21: Punktwolke vor Einsetzen der Filter



Abbildung 20: Punktwolke nach Einsetzen der Filter

7.3.4 Exportieren

Die gefilterte Punktwolke der Z+F LaserControl Software wird später mit den ergänzenden Daten in der Software ReCap weiterbearbeitet. Dazu werden sie zunächst im Format .e57 exportiert.



Abbildung 22: Endergebnis der Auswertung in Z+F LaserControl

8 Erfassung des Messobjekts mittels Vermessungsdrohne

Obwohl der Laserscanner sehr umfassende Oberflächendetails liefert, ist dies keine ausreichende Datengrundlage, um die Umrisse der Oberflächenmerkmale des gescannten Objekts zu konstruieren. Deshalb wird das Laserscanningverfahren durch ein Photogrammetrieverfahren unterstützt, um Lücken in den Laserscannerdaten, insbesondere im Dach und Turm, zu schließen und neue Details hinzuzufügen.

8.1 *Verwendetes Instrument*

Für die Befliegung wird die DJI Phantom 4 RTK eingesetzt (siehe Abbildung 23). Die DJI Phantom 4 RTK ist mit den folgenden Hauptteilen ausgestattet:

- RTK Modul: Der GNSS-Empfänger wurde direkt unter dem RTK-Empfänger angebracht. Das RTK-Modul kann Positionsgenauigkeiten von 1 cm + 1ppm (horizontal) und 1,5 cm + 1ppm (vertikal) liefern mit einer absoluten horizontalen Genauigkeit von 5 cm bei photogrammetrischen Modellen.
- Präzises Kamerasystem: Durch den 1 Zoll CMOS-Sensor mit 20 Megapixeln und einer Brennweite von 8,8mm werden Bilddaten festgehalten. Dank der hohen Kameraauflösung ist die Phantom 4 RTK in der Lage, bei einer Flughöhe von 100m eine „Ground Sample Distance“ (GSD) von 2,74 cm zu erreichen.
- GS RTK App: Diese bietet, zusätzlich zu den traditionellen Flugmodi, zwei neue Planungsmodi: Photogrammetrie und Wegpunkte. Die Planungsmodi ermöglichen automatisierte Arbeitsabläufe, indem Piloten die Flugroute der Drohne festlegen, nach vorheriger Einstellung von Parametern wie Flughöhe, Überlappungsrate, Fluggeschwindigkeit und Kameraeinstellungen. Die App ist in der Lage KML-Dateien direkt zu laden und erlaubt hierdurch die Planung von Flugrouten bereits im Büro.
- Gimbal (Bildstabilisierung): Dies ist eine Aufhängung in 2 Ebenen, mit rechtwinklig zueinander angeordneten Lagern. Sie basiert auf 3-Achsen (Neigen, Rollen, Gieren).

<i>Pitch:</i>	-90°	bis	+	30°
<i>Max. Steuerbare Winkelgeschwindigkeit:</i>	90°	/	s	
<i>Winkelschwingungsbereich:</i> ± 0,02° (Droneparts (o.D.))				



Abbildung 23: DJI Phantom 4 RTK | Drohne für die Vermessung (Droneparts (o.D.))

8.2 Messablauf

Zunächst werden GCPs (Ground Control Points) um das Gebäude festgelegt. Die Vermarkung der Punkte geschieht mittels kreisförmiger Kunststoff-Scheibe in grellen Farben (siehe Abb. 24), somit sind sie in den Bildern deutlich zu sehen. Danach werden die Koordinaten der GCPs mit Hilfe des GNSS-Empfängers von Leica „GS15“ bestimmt. Da mittels SAPOS-Dienst die Koordinaten gemessen werden, sind diese automatisch in dem amtlichen Koordinatensystem ausgegeben (UTM Koordinaten).



Abbildung 24: Übersicht der Passpunkt-Verteilung im Aufnahmegebiet (links) und Art der Vermarkung (rechts)

Im nächsten Schritt kommt die Befliegung mit der Drohne. Insgesamt werden drei Befliegungen durchgeführt. Die erste und die zweite Befliegung sind vollautomatisch, während die dritte Befliegung manuell erfolgt. Zur Stabilisation des Luftbildverbandes und der signifikanten Bestimmung der systematischen Bildfehler (Kamerakonstante, Verzeichnungen und Affinität und Scherung) wird ein Kreuzbefliegung durchgeführt. Jedoch sollten vor der ersten Befliegung einige Einstellungen berücksichtigt bzw. angepasst werden, z.B. Flughöhe, Längs- und Querüberlappung, Fluggeschwindigkeit und Kamera-Einstellungen. Um für die Bodenauflösung die Genauigkeit in 1 bis 1,5cm zu erreichen, darf die maximale Flughöhe 45m sein. Sind die Einstellungen durchgeführt und die Route eingegeben, kann die Befliegung starten. Es handelt sich bei der ersten Befliegung um Schrägbilder-Aufnahmen mit einer Kameraneigung von ca.60°, einer Flughöhe von 30m und einer Überlappung von Quer 60% Längs 80%. Bei der zweiten Befliegung handelt es sich um eine Senkrechtaufnahme in einer Flughöhe von 45m. Die Schrägaufnahme dient vor allem der Erfassung der Fassade. Die Senkrechtaufnahme ist für das Dach notwendig. Die manuelle Befliegung ist nötig für die Teile, die aufgrund von Hindernissen (z.B. Bäume) nicht aufgenommen werden konnten. Tab. 1 stellt die wichtigsten Flugdaten der drei verschiedenen Flüge zusammen.

Zusätzlich wird vom Boden jeweils ein handgehaltener Bildverband mit Drohnen-Kamera aufgenommen. Die Kombination aller verschiedenen Verfahren ergibt das optimale photographische geometrische Modell des Gebäudes. Alle Bildverbände werden im JPEG-Format gespeichert, um später in der Software Agisoft Metashape ausgewertet werden zu können.

Tabelle 1: UAV-Flugdaten der Kirche St-Georg

	Bilder	Flughöhe [m]	Bild-Abmessung [Pixel]	GSD [cm]
Schräg-Aufnahme	149	30	5472 * 3648	1,2
Orthogonal-Aufnahme	25	45	5472 * 3648	0,8
Manuell-Aufnahme	58	unterschiedlich	5472 * 3648	/
Gesamt	232			



Abbildung 25: Beispielbilder der UAV-Flüge

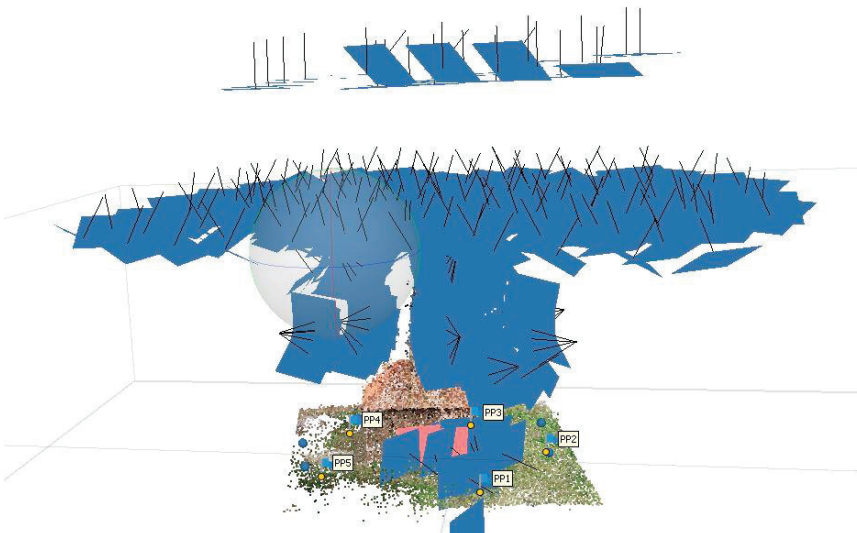


Abbildung 26: Bildabdeckung im Aufnahmegebiet

8.3 Auswertung der Bilder

Die Auswertung der Bildverbände erfolgt mit der Software Agisoft Metashape Professional in mehreren Arbeitsschritten, die im Folgenden beschrieben werden.

Georeferenzierung und Geoidmodell für MV anbringen

Zunächst fügt man alle Bilder zusammen, wobei die Koordinaten der Bilder in WGS84 „World Geodetic System“ (ellipsoidische Koordinaten) sind. Um die Georeferenzierung durchzuführen, bzw. in das amtliche Koordinatensystem zu transformieren (UTM Koordinaten), werden die Referenzen (Ground Control Points) importiert und die Bilder konvertiert. Die Problematik hier ist die Höhe, weil die Höhen, wenn die Bilder bereits nach den Passpunkten transformiert wurden, immer ellipsoidische Höhen bleiben, wodurch eine weitere Auswertung nicht funktioniert. Für den Übergang von ellipsoidischer Höhe zu Gebrauchshöhe wird das Geoidmodell angebracht. Bei Reference Settings ist auf Measurement accuracy zu achten. Die Camera accuracy wird bei 0,1 [m] angesetzt, weil mit DJI Phantom 4 RTK gemessen wird, und Marker accuracy bei 0,02 [m], da mit GNSS-SAPOS Dienst gemessen wird.

Align Photos / „Bilder Orientierung“

Im zweiten Schritt werden die Bildorientierungen und Kamerakalibrierung in einer Bündelblockausgleichung anhand der im Arbeitsgebiet verteilten Passpunkte berechnet. Es wird eine dünne Punktwolke berechnet, welche mit der Genauigkeitseinstellung „Hoch“ durchgeführt wird, um die Verarbeitung der Bilddaten in Originalbildgröße zu gewährleisten. Man spricht von einer dünnen Punktwolke, weil nur Verknüpfungspixel und nicht alle Pixel berechnet werden. Nach diesem Schritt kommt die manuelle Anpassung der Passpunkte in die Bilder (siehe Abb. 27). Die genauen Abweichungen der einzelnen Kontrollpunkte sind in Tabelle 3 dargestellt. Die mittlere Abweichung an den Kamerapositionen ist in Tabelle 2 dargestellt.



Abbildung 27:
manuelle
Anpassung der
Passpunkte



Abbildung 28: Fehlerellipsen an den Passpunkten nach der Bündelausgleichung in Metashape

Tabelle 2: Mittlere Abweichung an den Kamerapositionen

X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
0.845507	0.948212	1.47332	1.27043	1.94542

Tabelle 3: Abweichung an den Kontrollpunkten

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total error (cm)
PP1	-0.225041	0.985438	-1.00214	1.42338	0.656 (13)
PP2	-0.668469	1.60761	-4.39377	4.72615	0.609 (19)
PP3	-0.694409	0.628746	-3.63993	3.75854	0.385 (14)
PP4	-0.665542	1.55616	-0.451924	1.7518	0.286 (6)
PP5	-0.19061	-0.187935	-3.44712	3.4575	0.446 (6)
Total	0.540181	1.13206	3.02144	3.27146	0.532

Build Dense Cloud / „Dichte Punktwolke erstellen“

Für das Aufnahmegebiet wird eine dichte Punktwolke mit 15.536.729 Punkten berechnet. Im Grundprinzip wird für jeden Pixel eine 3D-Koordinate berechnet mittels rückwärtiger Projektion mit bekannter Kameraposition und innerer Orientierung der Kamera.

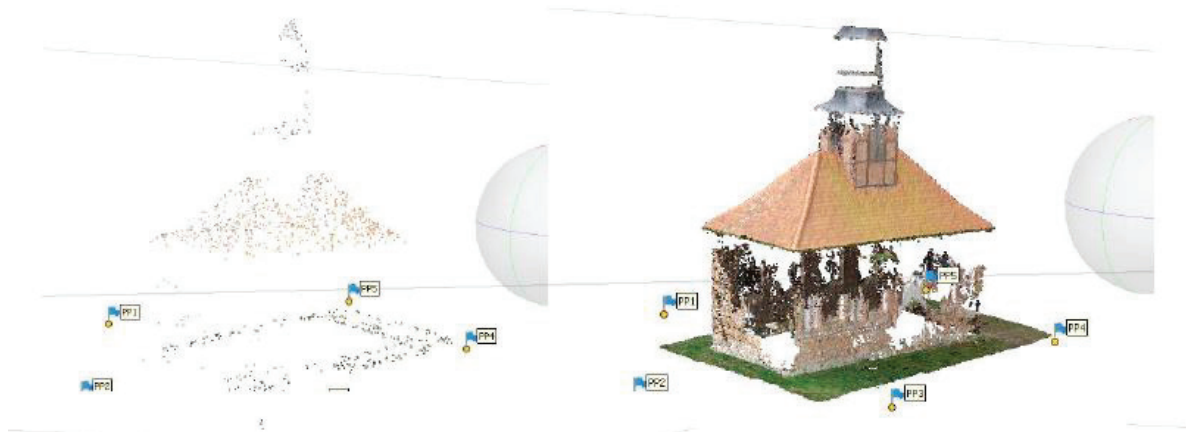


Abbildung 29: Dünne Punktwolke (links), dichte Punktwolke (rechts) bei **senkrechter** Aufnahme

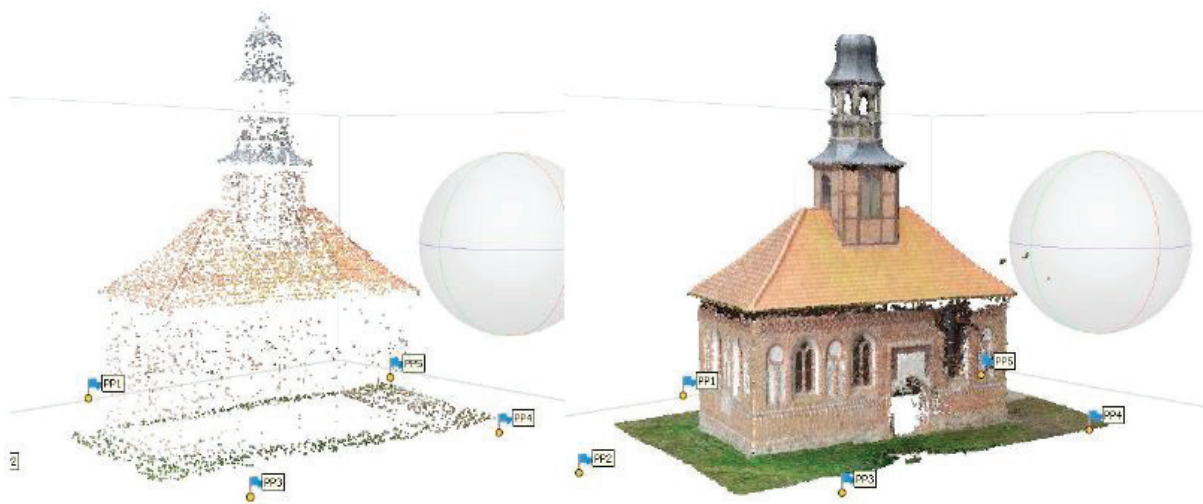


Abbildung 30: Dünne Punktwolke (links), dichte Punktwolke (rechts) bei **seitlicher** Aufnahme

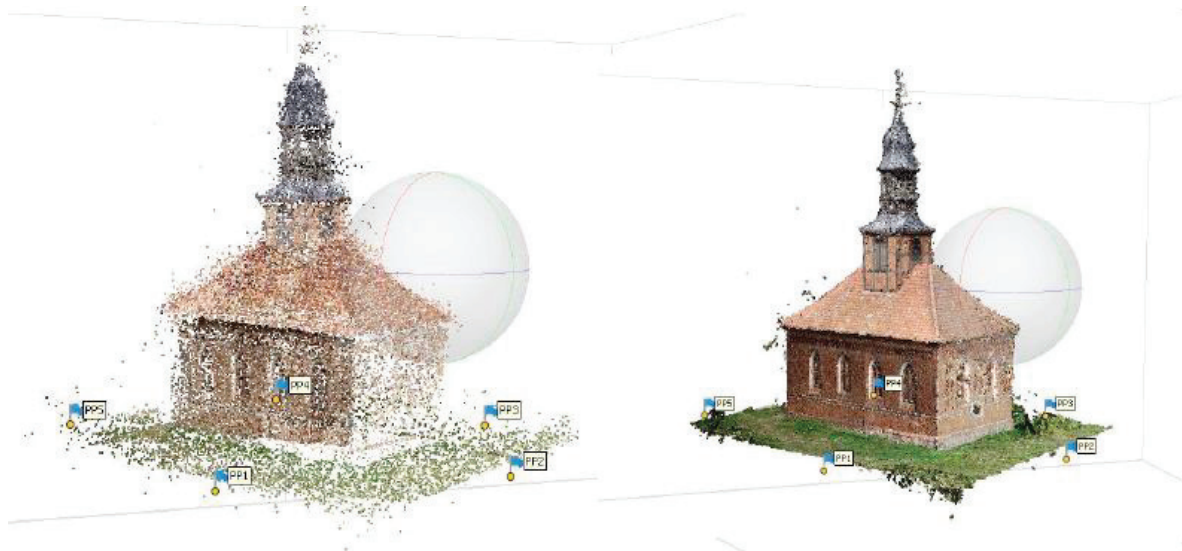


Abbildung 31: Dünne Punktwolke (links), dicke Punktwolke (rechts) bei **manueller Aufnahme**

Bereinigung und Exportieren

Im letzten Schritt werden die unerwünschten Objekte bereinigt und die Punktwolke im Dateiformat .e57 exportiert.

9 Betrachtung der Ergebnisse

Im Ergebnis erhält man zwei Punktwolken: eine Punktwolke als Ergebnis des Laserscannings und die andere gewinnt man aus den hochauflösenden Bildern. An dieser Stelle werden, mit Hilfe der ReCap Software, die beide Punktwolke zusammengeführt, bereinigt und die reduzierte 3D Punktwolke des St-Georg Gebäudes erstellt und präsentiert.

Es wird von der Photogrammetrische Punktwolke nur der obere Teil genommen und mit der Punktwolke aus dem Laserscanning zusammengeführt (siehe folgende Abbildungen).

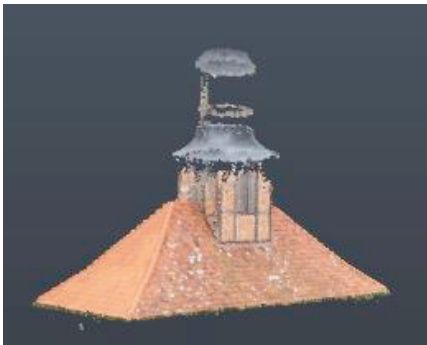


Abbildung 34: Punktwolke aus der photogrammetrischen **Senkrechtaufnahme**



Abbildung 32: Punktwolke aus der photogrammetrischen **Schrägaufnahme**



Abbildung 33: Punktwolke aus der photogrammetrischen **manuellen Aufnahme**



Abbildung 35: Punktwolke aus dem **Laserscanning**



Abbildung 36: Die zusammengeführte Punktwolke aus **beiden Verfahren**



Abbildung 37: 3D Modell der Kirche St-Georg



Abbildung 38: Übersicht der vier Fassaden des Gebäudes

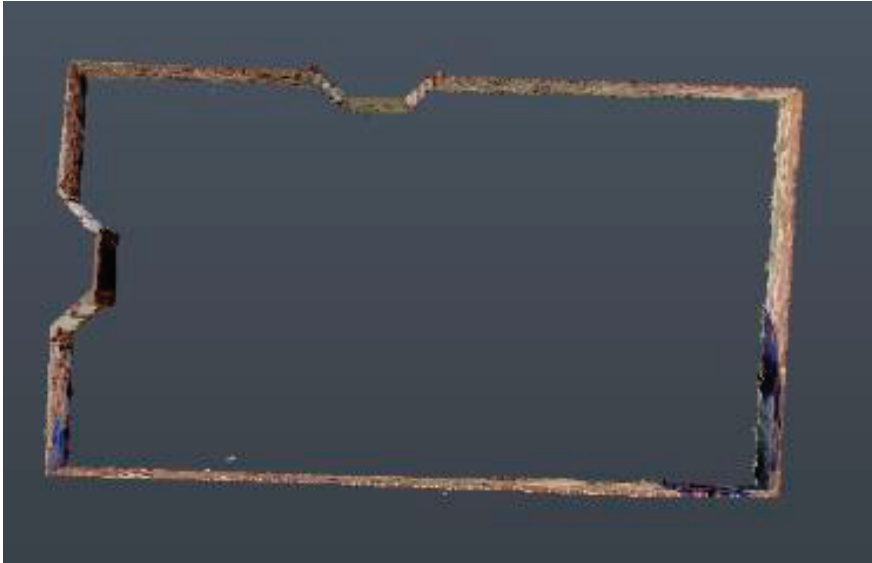


Abbildung 39: Abgeleiteter Grundriss aus der Punktwolke

Die folgenden Bilder zeigen die hohe Auflösung der Punktwolke:

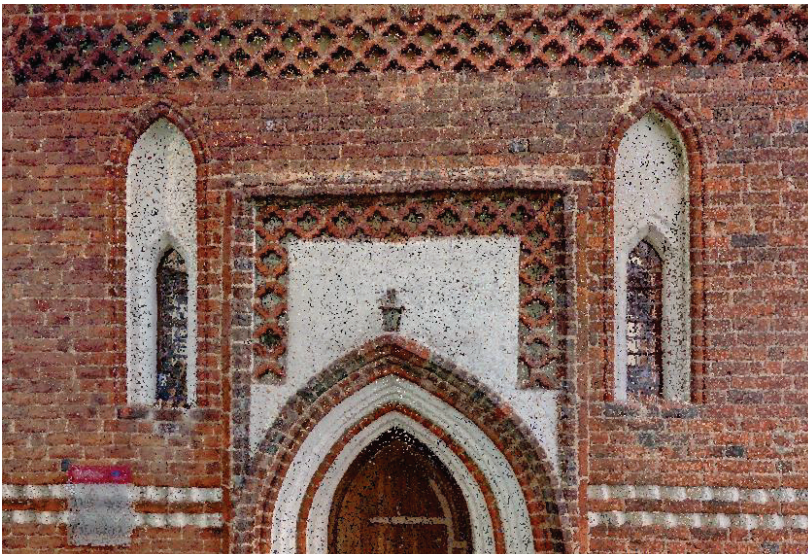


Abbildung 40: Westliche Fassade des Gebäudes aus Punktwolke (oben) und aus einem Bild (unten)

Die folgenden Bilder zeigen die Defizite des Laserscannings in dem oberen Teil des Gebäudes und die Unterstützung durch die Photogrammetrie.

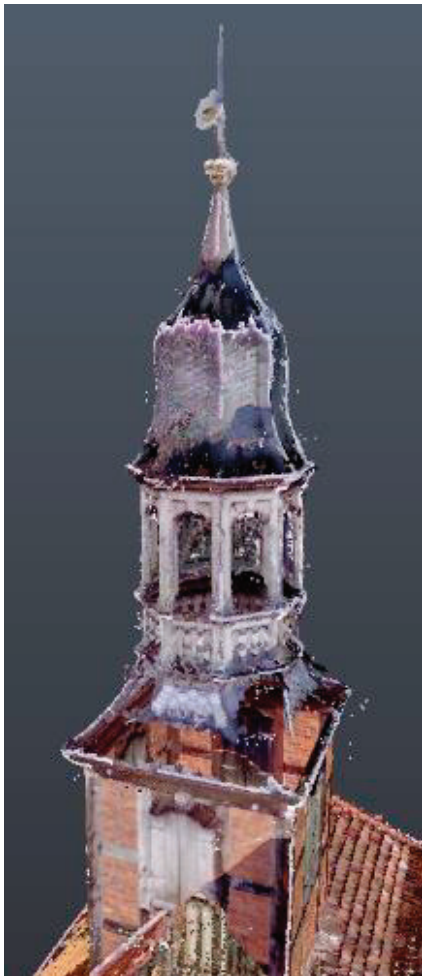


Abbildung 41: Übersicht der Punktwolke aus Laserscanning (links) und kombinierter Punktwolke (rechts)

Wie bereits in den Kapiteln 2 und 4 erwähnt, kann die Punktwolke als Grundlage für weitere Arten der 3D-Modellierung dienen. Im Prinzip kann das Ergebnis eine 3D Darstellung von Objekt eine Punktwolke, Meshmodell oder texturierte Modell sein. Um eine 3D Vermaschung (3D Mesh) einer Punktwolke zu erhalten werden benachbarte Punkte verbunden und es entsteht ein Polygonnetz (Netz aus Dreiecken). Die gewonnen geometrischen Flächen nennt man Polygone oder Faces. Mit Hilfe des Prozesses können für die Punktwolke die Volumenbestimmung und Massenermittlung. Wenn die Punktwolke vermascht sind, werden mittels die Farbinformationen aus hochauflösenden Bildern in beliebiger Auflösung texturiert um ein realistisches, farbiges 3D Meshmodell das gewünschte Objekt zu erstellen.

Das Software ReCap bietet keine Textur deswegen sollte zurück zum Agisoft Metashape. Da das Software Z+F LaserControl nur Punktwolke und keine Bilder exportiert, kann man aus die zwei kombinierte Punktwolke kein texturiertes Modell ableiten und bleibt die Möglichkeit ein texturiertes Modell zu erstellen nur von ein der zwei Punktwolke, und zwar von der Photogrammetrische Punktwolke. Die folgenden Bilder zeigen die vier verschiedene 3D Modelle.



Abbildung 43: 3D Modell der Kirche St-Georg aus einer dünnen Punktwolke



Abbildung 42: 3D-Modell der Kirche St-Georg aus einer dichten Punktwolke

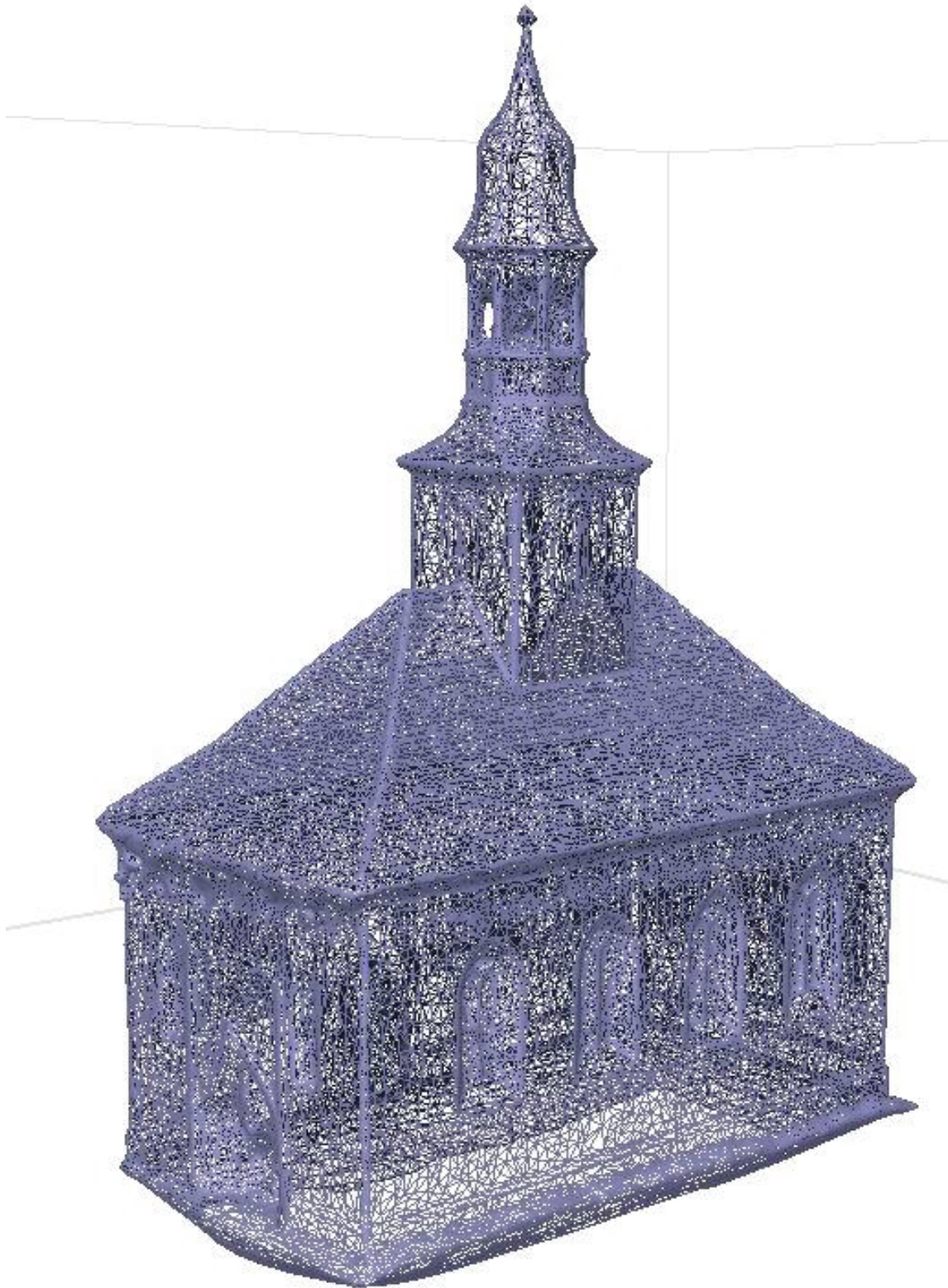


Abbildung 44: Vermaschtes 3D-Modell der Kirche St-Georg



Abbildung 45: 3D-texturiertes Modell der Kirche St-Georg

Die Abbildung 46 zeigt deutlich den Unterschied beim texturierten Modell zwischen den nördlichen und südlichen Fassaden. Grund dafür ist, dass bei der nördlichen Fassade zu wenig Fotos aufgenommen werden, d.h. es werden zu wenig Punkte erfasst. Der Vermaschungsalgorithmus bildet trotzdem Dreiecke. Dabei verbindet er manchmal Punkte, die nicht zusammengehören. Dies führt zu der Auswahl des falschen Bildausschnittes für die Texturierung. Dagegen ist das Dach beim texturierten Modell sehr detailliert erfasst, weil dafür viele Bilder aufgenommen wurden.



Abbildung 46: nördliche Fassade der Kirche (links), südliche Fassade der Kirche (rechts)

10 Fazit

Abschließend lässt sich sagen, dass sich die Kombination aus Laserscanning und Photogrammetrie als effektive Methode zur Aufnahme der Kirche St Georg herausgestellt hat, denn beide Erfassungstechniken gleichen die Defizite der jeweils anderen Technik aus. Photogrammetrie besticht durch den relativ geringen Aufwand am Gebäude sowie eine hohe Genauigkeit. Dies ist mitunter ebenso der Fall beim Laserscanning, weswegen sich beide Verfahren für besonders komplexe Bauwerke wie Kirchen oder detaillierte Fassaden eignen. Dafür ist die Auswertung der Daten sehr aufwendig. Die oftmals vom Hersteller mitgelieferte Software erleichtert hierbei die Analyse der entstehenden Daten, indem Prozesse zunehmend automatisiert werden.

Die Kombination aus beiden Verfahren ermöglicht eine detailgetreue Modellierung des zu untersuchenden Gebäudes, wobei durch die Erfassung mittels Photogrammetrie eine genaue Texturierung des Gebäudes im Modell ermöglicht wird. Ebenso kann dank der hochauflösenden Bilder die genaue Farbgebung des Gebäudes nachmodelliert werden.

Beide Methoden dienen als bedeutende Grundlage für die Denkmalpflege historischer Gebäude. Denn nur auf Basis einer möglichst genauen Bestandsaufnahme lassen sich konkrete Baumaßnahmen für das Gebäude ableiten. Gerade historisch bedeutsame Gebäude erfordern eine komplexe Analyse und Bewertung, da sie ein zu erhaltendes Kulturgut darstellen. Methoden wie Handaufmaß, Tachymetrie und Photogrammetrie sollten hierbei um die Erfassung mittels Laserscanning ergänzt werden. Diese umfassende Datengrundlage, welche sich aus der Kombination verschiedener Erfassungsmethoden ergibt, ist Grundvoraussetzung für ein detailliertes 3D-Modell des zu erfassenden Gebäudes. Dieses wiederum kann vielfältigen Zwecken dienen. Es kann Grundstein bauanalytischer bzw. baugeschichtlicher Studien sein sowie dazu genutzt werden, um historische Gebäude auch im digitalen Raum der Öffentlichkeit zu präsentieren. Die Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig und dienen nicht zuletzt der kulturellen Bildungsarbeit.

Anhänge

Die digitalen Anhänge der Bachelorarbeit sind:

- ✓ Eine bereinigte und homogenisierte Version der Punktwolke im Dateiformat .e57 und .rcp.
- ✓ Das vermaschte und texturierte Modell von Agisoft im Dateiformat .obj und .pdf
- ✓ Zusätzlich wird auch mit Hilfe von Agisoft Metashape ein Video erstellt, um das 3D-Modell aus den kombinierten Punktwolke zu präsentieren

Alle Anhänge befinden sich auf dem beigefügter DVD in dem Ordner [St-Georg Neubrandenburg].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Methoden historischer Bestandsdokumentation (Donath 2008)	4
Abbildung 2: Prinzip der Untersezung eines tachymetrischen Bezugssystems (rechts) in Detailbereichen (links) (Donath 2008).....	6
Abbildung 3: Prinzipielle Vorgehensweise der Tachymetrie die Gebäudemessung (Donath 2008)	10
Abbildung 4: Bildverband für die Mehrbildauswertung (Blankenbach in Schwarz 2017)	13
Abbildung 5: Bildbasierte Punktwolke aus UAV-Aufnahmen durch Dense Image Matching (Blankenbach in Schwarz 2017)	14
Abbildung 6: Terrestrisches Laserscanning (Blankenbach in Schwarz 2017)	16
Abbildung 7: PHIDIAS – Kombinierte Auswertung von Bildaufnahmen und Punktwolken (PHOCAD GmbH in Blankenbach in Schwarz 2017)	18
Abbildung 8: Übersicht der elementaren CAD-Objekte, die auf der Ebene (2D-CAD) oder im Raum (3D-CAD) angeordnet sein können (Donath 2008).....	19
Abbildung 9: 3D-Grundprimitive zur Generierung von Volumenmodellen (Donath 2008).....	20
Abbildung 10: Position der St. Georg Kirche und weitere Denkmäler in Neubrandenburg (https://mb3.neubrandenburg.de/application/Baudenkmale)	21
Abbildung 11: Kapelle St. Georg in Neubrandenburg (Foto: Uwe Barghaan).....	22
Abbildung 12: Laserscanner Z+F IMAGER® 5016 (vgl. Z+F Laser Control).....	25
Abbildung 13: Aufmaß des Trägers der GNSS-Antenne.....	26
Abbildung 14: Gemessene Punkt mit Leica Viva GS15 GNSS Antenne	26
Abbildung 15: Bestimmung des Abstands vom Dreifuß bis zum Mittelpunkt des Targets	26
Abbildung 16: Aufgebaute Targets rund um das Gebäude	27
Abbildung 17: Übersicht über der verknüpften Scans nach der Registrierung	29
Abbildung 18: Der Prozess „Target Erkennen“	29
Abbildung 19: Betrachtung der Genauigkeit zur Registrierung und Georeferenzierung	30
Abbildung 20: Punktwolke nach Einsetzen der Filter	32
Abbildung 21: Punktwolke vor Einsetzen der Filter	32
Abbildung 22: Endergebnis der Auswertung in Z+F LaserControl.....	32

Abbildung 23: DJI Phantom 4 RTK Drohne für die Vermessung (Droneparts (o.D.))	34
Abbildung 24: Übersicht der Passpunkt-Verteilung im Aufnahmegebiet (links) und Art der Vermarkung (rechts)	34
Abbildung 25: Beispielbilder der UAV-Flüge	36
Abbildung 26: Bildabdeckung im Aufnahmegebiet.....	36
Abbildung 27: manuelle Anpassung der Passpunkte	37
Abbildung 28: Fehlerellipsen an den Passpunkten nach der Bündelausgleichung in Metashape	38
Abbildung 29: Dünne Punktwolke (links), dichte Punktwolke (rechts) bei senkrechter Aufnahme	39
Abbildung 30: Dünne Punktwolke (links), dichte Punktwolke (rechts) bei seitlicher Aufnahme	39
Abbildung 31: Dünne Punktwolke (links), dichte Punktwolke (rechts) bei manueller Aufnahme	40
Abbildung 32: Punktwolke aus der photogrammetrischen Schrägaufnahme	41
Abbildung 33: Punktwolke aus der photogrammetrischen manuellen Aufnahme	41
Abbildung 34: Punktwolke aus der photogrammetrischen Senkrechtaufnahme	41
Abbildung 35: Punktwolke aus dem Laserscanning	41
Abbildung 36: Die zusammengeführte Punktwolke aus beiden Verfahren	41
Abbildung 37: 3D Modell der Kirche St-Georg	42
Abbildung 38: Übersicht der vier Fassaden des Gebäudes	43
Abbildung 39: Abgeleiteter Grundriss aus der Punktwolke	44
Abbildung 40: Westliche Fassade des Gebäudes aus Punktwolke (oben) und aus einem Bild (unten).....	44
Abbildung 41: Übersicht der Punktwolke aus Laserscanning (links) und kombinierter Punktwolke (rechts)	45
Abbildung 42: 3D-Modell der Kirche St-Georg aus einer dichten Punktwolke	46
Abbildung 43: 3D Modell der Kirche St-Georg aus einer dünnen Punktwolke	46
Abbildung 44: Vermaschtes 3D-Modell der Kirche St-Georg	47
Abbildung 45: 3D-texturiertes Modell der Kirche St-Georg	48

Abbildung 46: nördliche Fassade der Kirche (links), südliche Fassade der Kirche (rechts)...49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: UAV-Flugdaten der Kirche St-Georg	35
Tabelle 2: Mittlere Abweichung an den Kamerapositionen	38
Tabelle 3: Abweichung an den Kontrollpunkten	38

Quellenverzeichnis

Baier, Gerd (1982): *Bau- und Kunstdenkmale in der DDR. Bezirk Neubrandenburg*. Berlin: Institut für Denkmalpflege.

Blankenbach, Jörg (2017): Bauaufnahme, Gebäudeerfassung und BIM. In: Schwarz, Willfried: *Ingenieurgeodäsie* (2017) S. 23- 54. Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland.

Donath, Dirk (2008): *Bauaufnahme und Planung im Bestand*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH

Droneparts (o.D.): DJI Phantom 4 RTK | Drohne für Vermessung, in: <https://droneparts.de/dji-phantom-4-rtk-drohne-fuer-vermessung> (Zugriff am 24.06.2021).

Kern, Fredie (2002): Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten. Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig Nr. 19.

Krüger, Georg (Hrsg.) (1929): *Die Kunst- und Geschichtsdenkmäler des Freistaates Mecklenburg-Strelitz*. I. Band, III. Abteilung, Neubrandenburg.

Luhmann, Thomas (2010): *Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden, Anwendung*. Berlin: Wichmann Verlag.

MANET Marketing GmbH (2021): Kapelle Sankt Georg in Neubrandenburg, in: <https://www.neubrandenburg.m-vp.de/kapelle-sankt-georg-in-neubrandenburg/#> (Zugriff am 24.06.2021).

Niethammer, Uwe (2013): UAV-basierte Fernerkundungsmethoden der Aerogeophysik für die hochauflösende Beobachtung von alpinen Rutschhängen. Institut für Geophysik der Universität Stuttgart.

Schwarz, Willfried (Hg.) (2017): *Ingenieurgeodäsie*. Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland.

Stadt Neubrandenburg (o.D.): Kapelle Sankt Georg, in: <https://www.neubrandenburg.de/index.php?ModID=7&FID=2751.744.1&object=tx|2751.744.1> (Zugriff am 24.06.2021).

Stadt Neubrandenburg (o.D.): Geodatenportal, in: [https://mb3.neubrandenburg.de/application/Baudenkmale?poi\[point\]=383865,5935706&poi\[scale\]=4000&poi\[label\]](https://mb3.neubrandenburg.de/application/Baudenkmale?poi[point]=383865,5935706&poi[scale]=4000&poi[label]) (Zugriff am 24.06.2021).

Szczesiak, Rainer (o.D.): Altartafel „Sankt Georg“, Neubrandenburg, in: <http://www.kirche-neubrandenburg.de/St-Georg.1191.0.html> (Zugriff am 24.06.2021).

Rainer Szczesiak

Z+F Laser Control (2019): Handbuch. V.9.2. Wangen im Allgäu: Zoller + Fröhlich GmbH.

Z+F Laser Control (o.D.): Z+F IMAGER® 5016, 3D Laser Scanner, in: <https://www.zf-laser.com/Z-F-IMAGER-R-5016.184.0.html?&L=1> (Zugriff am 24.06.2021).