

Henrik Thelen – Standnummer B0314

Malte Matthias Retterath – Standnummer B0315

**3D- Aufnahme und Modellierung des
Mauersanierungsprojekts „Winzerweg“
innerhalb der historischen Weinberglagen in
Walporzheim an der Ahr**

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science im
Studiengang Geoinformatik und Vermessung

Hochschule Mainz

Fachbereich Technik

Lehrereinheit Geoinformatik und Vermessung

Betreuer: Ministerialrat a.D. Prof. Axel Lorig

Bearbeitungszeitraum: 20. Mai 2019 bis 29. Juli 2019

Mainz

Juli 2019

Vermerk über die fristgerechte und vollständige Abgabe der Abschlussarbeit

Abgegeben bei:

.....

(Name)

Schriftlicher Teil	<input type="checkbox"/> analog	<input type="checkbox"/> digital
Poster	<input type="checkbox"/> analog	<input type="checkbox"/> digital
Internet-Präsentation		<input type="checkbox"/> digital
Erfassungsbogen	<input type="checkbox"/> analog	<input type="checkbox"/> digital
Datenträger (CD/DVD)		<input type="checkbox"/>

Dateiname:	Bachelorarbeit_Retterath_Thelen
Anzahl Zeichen:	125.190
Anzahl Wörter:	18.511
Anzahl Seiten:	107

Arbeit angenommen:

Mainz, den

.....

(Datum)

.....

(Unterschrift)

© 2019 Malte Matthias Retterath und Henrik Thelen

Dieses Werk einschließlich seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

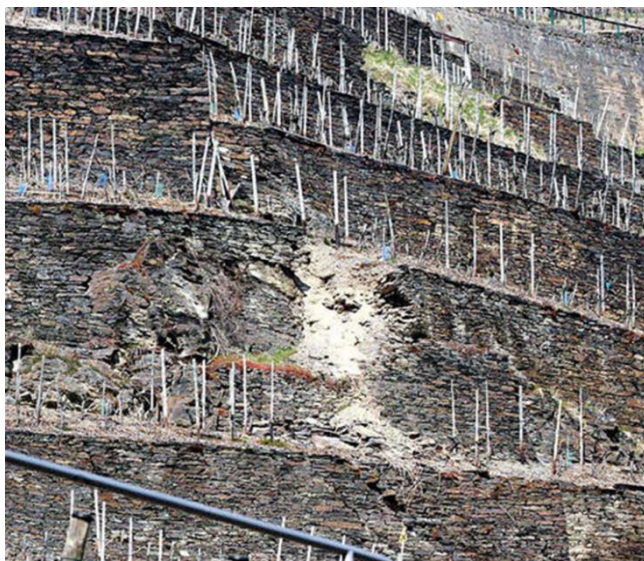
Gemeinsame Bachelorarbeit für Herrn Henrik Thelen und Herrn Malte Retterath

Thema: 3-D-Aufnahme und Modellierung des Mauersanierungsprojektes „Winzerweg“ innerhalb der historischen Weinbergslagen in Walporzheim an der Ahr

Sachverhalt:

In Walporzheim wird Weinbau nachweislich seit dem Jahr 893 betrieben. Die seit dem Mittelalter, vor allem aber in den letzten 400 Jahren errichteten Terrassen in den Steil(st)lagen werden vor allem durch etwa 27 km Weinbergsmauern in Trockenbauweise geprägt. Etwa 20% dieser Mauern liegen an dem das Flurbereinigungsverfahren prägenden sogenannten „Winzerweg“.

Für das gesamte Gebiet wird eine Weinbergsfurbbereinigung durchgeführt. Im Bereich des Furbbereinigungsgebiets liegen 73 Hektar Weinberge und Wald; das sind rund 13 Prozent der Rebfläche an der Ahr. 30 Hektar davon bestehen aus ursprünglich angelegten Terrassen und Steillagen.



Immer wieder rutschen in den Walporzheimer Steillagen Trockenmauern ab (Foto: Hans-Jürgen Vollrath)

Neben der Neuordnung aller Grundstücke im Verfahrensgebiet kommt der Sanierung der an den Wegen liegenden Mauern für die Belange der Winzer, für die Erhaltung der Kulturlandschaft, für vielfältige Aufgaben des Naturschutzes und für die Denkmalpflege eine herausragende Bedeutung zu.

Im Rahmen einer Fachtagung der Furbbereinigungsverwaltung zusammen mit der Denkmalpflegebehörde vertrat der damalige Landeskonservator Dr. Custodis die Auffassung, dass die denkmalpflegerische Bedeutung dieser einmaligen Weinbergsmauernlandschaft in Trockenbauweise der des Kölner Doms entspreche.

Es besteht daher aus Sicht des DLR, der Kreisverwaltung (als Denkmalpflege- und Naturschutzbehörde) und für den Tourismus ein großes Interesse, die bautechnischen Sanierungsarbeiten und das Gesamtergebnis durch eine 3-D-Aufnahme und Modellierung des Mauersanierungsprojektes „Winzerweg“ innerhalb der historischen Weinbergslagen in Walporzheim an der Ahr aufzubereiten. Das Ergebnis des 3-D-Modells soll in einigen Jahren als ein sogenanntes „peripheres Partner-Projekt“ bei der Bundesgartenschau Mittelrhein präsentiert werden. Die erforderlichen Messungen und Modellierungen sind zentraler Gegenstand dieser Bachelorarbeit.

Aufgabe:

1. Die Erhaltung von Weinbergskulturlandschaften mit Hilfe der ländlichen Bodenordnung ist knapp darzustellen. Daraus sind konkrete Forschungsfragen für diese Arbeit abzuleiten.
2. Die Bedeutung der seit dem Mittelalter, vor allem aber in den letzten 400 Jahren errichteten Terrassen in den Steil(st)lagen (etwa 27 km Weinbergsmauern in Trockenbauweise) für die Kulturlandschaft, die Denkmalpflege, den Naturschutz und den Tourismus ist herauszuarbeiten.
3. Die Vorgehensweise der Weinbergsflurbereinigung Walporzheim für die Erhaltung dieser Kulturlandschaft – insbesondere Erhaltungs- und Ersatzmaßnahmen an den Weinbergsmauern – ist anhand geeigneter Beispiele systematisch aufzuzeigen.
4. Die historische Mauerlandschaft Walporzheim ist mit Hilfe flächendeckender Erfassungsmethoden – konkret dem terrestrischen Laserscanning (TLS) – messtechnisch von geeigneten Standorten aus zu erfassen. Aufgrund der Größe der Gesamtanlage kann die Aufnahme bei Bedarf auf einen repräsentativen Teilbereich begrenzt werden – diese Entscheidung ist eigenständig zu treffen und zu begründen.
5. Die Überführung der Aufnahme der historischen Mauerlandschaft Walporzheim in den einheitlichen integrierten geodätischen Raumbezug ist durch eigenständige GNSS-Messung vorzunehmen. Soweit möglich sind Passpunkte aus der Bearbeitung des Flurbereinigungsverfahrens zu integrieren oder unmittelbar mit zu verwenden.
6. Aufgrund der vielen vom Erdboden mit einem Laserscanner unzugänglichen Stellen, insbesondere der Maueroberkanten und der daran anschließenden Hangterrassen, sind zudem photogrammetrische Verfahren aus der Luft (möglichst mit Hilfe eines low-cost Kopters mit integrierter Kamera) einzusetzen. Die erforderlichen organisatorischen Vorarbeiten (zum Beispiel Fluggenehmigung, Flugplanung) sind rechtzeitig vorzunehmen.
7. Die aus den beiden Messverfahren abgeleiteten Punktwolken sind zu registrieren, über eine Dreiecksvermaschung zu einem Modell mit fotorealistischer Textur zu verarbeiten und für eine web-basierte Visualisierung aufzubereiten.
8. Aus dem Ergebnis sind Antworten auf die nach 1. gestellten Forschungsfragen zu formulieren.



Prof. Axel Lorig

Zeitpunkt der Ausgabe der Arbeit: 20. Mai 2019

Zeitpunkt der Abgabe der Arbeit: 29. Juli 2019

Kurzzusammenfassung

Gegenstand der hier vorliegenden Arbeit ist die georeferenzierte 3D-Aufnahme und anschließender Modellierung des Mauersanierungsprojektes „Winzerweg“ innerhalb der historischen Weinberglagen in Walporzheim an der Ahr.

Die Aufnahme wird durch eine Kombination aus terrestrischem Laserscanning und photogrammetrischer Datenerfassung realisiert.

Die Befliegung wird aufgrund der örtlichen Gegebenheiten frei durchgeführt. Dafür wird die Drohne RKM 8X der Firma RotorKonzept und die Systemkamera Sony Alpha 7R eingesetzt. Die Befliegung selbst wird von einem Piloten der Hochschule Mainz durchgeführt. Mithilfe eines Algorithmus wird aus den ungeordneten Drohnenaufnahmen eine Punktwolke generiert.

Das terrestrische Laserscanning wird mit der ScanStation P40 der Firma Leica durchgeführt.

Die Ergebnisse aus beiden Verfahren werden anschließend miteinander verglichen.

Zur Auswertung werden die Softwares PhotoScan von Agisoft und Cyclone von Leica verwendet. Im Verlauf der Datenauswertung werden unterschiedliche Produkte erzeugt, wie zum Beispiel eine georeferenzierte Punktwolke, ein texturiertes 3-dimensionales Oberflächenmodell, ein digitales Höhenmodell sowie ein Orthophotomosaik. Das abgeleitete 3D-Oberflächenmodell dient anschließend der Webvisualisierung.

Schlagwörter: Flurbereinigung, terrestrisches Laserscanning, Photogrammetrie, Bildflug, UAV, 3D-Punktwolken, 3D-Oberflächenmodell, Orthophoto, Webvisualisierung, PhotoScan, Cyclone, 3DHOP

Abstract Summary

The subject of the present work is the georeferenced 3D-capture and subsequent modeling of the wall restoration project "Winzerweg" within the historic vineyard sites in Walporzheim an der Ahr.

The capture is realized by a combination of terrestrial laser scanning and photogrammetric data acquisition.

The flight is performed freely due to local conditions. For this, the drone RKM 8X of the company RotorKonzept and the system camera Sony Alpha 7R is used. The flight is done by a pilot of the University of Mainz. By means of a algorithm a point cloud is created from the disordered drone images.

The terrestrial laser scanning is done with the ScanStation P40 from Leica.

The resulting point clouds emerging from both capture methods will be compared afterwards.

For evaluation the software Photoscan from Agisoft and Cyclone from Leica are used. In the course of the data analysis, different products, such as a georeferenced point cloud, a textured 3-dimensional surface model, a digital elevation model, and an orthomosaic are created. The derived 3D surface model is then utilized for a web visualization.

Keywords: Land Consolation, terrestrial laser scanning, photogrammetry, aerial photography, UAV, 3D point clouds, 3D surface model, orthophoto, web visualization, PhotoScan, Cyclone, 3DHOP

Verantwortlichkeiten

Diese Bachelorarbeit wurde in Zusammenarbeit von Malte Retterath und Henrik Thelen angefertigt. In der folgenden Tabelle werden die Verantwortlichkeiten für die einzelnen Kapitel dargestellt.

Kapitel	Titel	Bearbeiter
1	Einleitung	Malte Retterath & Henrik Thelen
2	Weinbergstflurbereinigung in Walporzheim	Malte Retterath & Henrik Thelen
3	GNSS-Messung	Malte Retterath
4	Terrestrisches Laserscanning	Malte Retterath
5	Grundlagen der Photogrammetrie	Henrik Thelen
6	Photogrammetrische Auswertung	Henrik Thelen
7	Gegenüberstellung der Punktwolken	Malte Retterath
8	Webvisualisierung	Henrik Thelen
9	Fazit	Malte Retterath & Henrik Thelen

Tabelle 1: Verantwortlichkeiten

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	5
Abstract Summary	6
Verantwortlichkeiten	7
Inhaltsverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	10
Abbildungsverzeichnis	11
1 Einleitung	13
2 Weinbergstflurbereinigung in Walporzheim	14
2.1 Bedeutung historischer Weinbergstmauern für die Kulturlandschaft	14
2.1.1 Denkmalpflege	15
2.1.2 Naturschutz	15
2.1.3 Tourismus	16
2.1.4 Wirtschaft	16
2.2 Maßnahmen für den Erhalt der Weinbergstmauern	17
2.3 Wahl des Messgebiets	19
3 GNSS-Messung	21
3.1 Differenzielles Globales Navigationssatellitensystem	21
3.2 SAPOS-Verfahren zur DGNSS-Messung	22
3.3 Durchführung der GNSS-Messung	25
4 Terrestrisches Laserscanning	26
4.1 Grundlagen des Laserscanning	26
4.1.1 Distanzmessung	27
4.1.2 Winkelmessung	29
4.1.3 Registration	30
4.1.4 Innere Einflussfaktoren	31
4.1.5 Äußere Einflussfaktoren	33
4.2 Leica ScanStation P40	39
4.3 Messablauf	40
4.4 Auswertung	42
4.4.1 Import der Punktwolken	42
4.4.2 Registrierung der Punktwolken	43

4.4.3	Bearbeitung der Punktwolken	45
5	Grundlagen der Photogrammetrie	48
5.1	Mathematische Beziehungen	48
5.2	3D-Triangulation	51
5.3	Mehrbildauswertung	53
6	Photogrammetrische Aufnahme	55
6.1	Flugvorbereitung	56
6.1.1	Verwendete Kamera und Objektiv	56
6.1.2	UAV	57
6.1.3	Rechtliche Rahmenbedingungen	59
6.1.4	Bildflugplanung	60
6.2	Durchführung der Befliegung	68
6.3	Auswertung	71
7	Gegenüberstellung der Punktwolken	86
7.1	Import der Punktwolken	86
7.2	Vergleich der Punktwolken	87
8	Webvisualisierung	92
8.1	Aufbau von 3DHOP	92
8.2	Umsetzung von 3DHOP	93
9	Fazit	99
	Literaturverzeichnis	101
10	Anhang	103
10.1	Verfahrensgebiet Flurbereinigung Walporzheim	103
10.2	Übersicht Referenz- und TLS-Standpunkte	104
10.3	Aufstiegsgenehmigung für die Drohnenbefliegung	105
10.4	Verzeichnisstruktur der CD	106
	Eidesstattliche Erklärung	107

Abkürzungsverzeichnis

3DHOP	3D Heritage Online Presenter
AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
DEM	Digital elevation model
DGNSS	Differenzielles globales Navigations-Satelliten-System
DHHN16	Deutsches Haupthöhennetz 2016
DHM	Digitales Höhenmodell
EDM	Elektronische Distanzmessung
EPS	Echtzeit-Positionierungs-Service
ETRS89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989
GPPS	Geodätischer Postprocessing Positionierungs-Service
HDR	High Dynamic Range
HEPS	Hochpräziser-Echtzeit-Positionierungs-Service
ISTI-CNR	Institute of the National Research Council of Italy
LuftVO	Luftverkehrs-Ordnung
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
TLS	Terrestrischer Laserscanner
UAV	Unbemanntes Flugfahrzeug
UTM	Universale Transversale Mercatorprojektion
WFD	Wave Form Digitizer Technology

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel einer Mauersanierung (Jacoby, 2014)	19
Abbildung 2: Abgrenzung des Messgebiets (LVermGeo, 2019)	20
Abbildung 3: Funktionsprinzip des DGNSS (CGS Europe, 2019)	21
Abbildung 4: Übersicht der SAPOS-Referenzstationen in Deutschland (Infotip Service GmbH, 2019).....	24
Abbildung 5: Schematische Darstellung der WFD-Technologie (Leica Geosystems AG, 2014)	27
Abbildung 6: Impulse bei einfachem Signal und akkumulierten Signalen (Leica Geosystems AG, 2014)	28
Abbildung 7: Rasteraufnahme einer Wand von einen Laserscanner mit tachymetrischem Aufbau (Klonowski, 2017)	29
Abbildung 8: Leica HDS Black and White Tilt and Turn Target.....	30
Abbildung 9: Phaseninhomogenität, ideale Kugelwellen in Schwarz, tatsächliche Wellenfronten in Rot (Deumlich & Staiger, 2002)	32
Abbildung 10: Laserstrahl-Reflexion auf a) diffus reflektierenden und b) spiegelnden Oberflächen (Gordon, 2008)	34
Abbildung 11: Einfluss von Außenkanten (links) und Innenkanten (rechts) bei reflektorlosen Distanzmessungen (Kern, 2003).....	35
Abbildung 12: Einfluss von Stufen bei reflektorlosen Distanzmessungen.....	36
Abbildung 13: Einfluss vom Einfallswinkel bei reflektorlosen Distanzmessungen (Kern, 2003)	37
Abbildung 14: Ausgestrahlte (links) und rückgestrahlte Wellenfront bei schrägem Einfallswinkel (Schäfer, 2017)	37
Abbildung 15: Regenbogenintensität.....	38
Abbildung 16: Leica ScanStation P40 (Leica Geosystems AG, 2019)	39
Abbildung 17: Datenstruktur in Cyclone	42
Abbildung 18: Ausschnitt aus dem Ergebnis der Registrierung	44
Abbildung 19: Ergebnis der Registrierung der Koordinatendatei	44
Abbildung 20: Gesamtpunktwolke nach Registrierung	45
Abbildung 21: Bearbeitete Laserscan-Punktwolke.....	46
Abbildung 22: Mauerstruktur in der TLS-Punktwolke.....	47
Abbildung 23: Detailaufnahme der Mauerstruktur in der TLS-Punktwolke	47
Abbildung 24: Mathematische Beziehung zwischen Bild- und Objektpunkten.....	49
Abbildung 25: 3D-Punktbestimmung mittels Triangulation	51
Abbildung 26: Kamera Sony Alpha 7R (dkamera, 2019)	57
Abbildung 27: Drohne RKM 8X und Gimbal (ArduPilot, 2019).....	58
Abbildung 28: Bildflugplanung (Schlüter, 2017)	61

Abbildung 29: Flugplanung via Mission Planner	65
Abbildung 30: Einstellungen in Mission Planner – Simple.....	66
Abbildung 31: Einstellungen in Mission Planner - Grid Options.....	66
Abbildung 32: Einstellungen in Mission Planner - Camera Config	67
Abbildung 33: Berechnete Flugparameter in Mission Planner.....	67
Abbildung 34: Wetterbedingungen am Tag der Befliegung.....	69
Abbildung 35: Start der UAV	70
Abbildung 36: Camera Calibration.....	72
Abbildung 37: Parametereingabe Align Photos.....	72
Abbildung 38: Punktwolke aus Verknüpfungspunkten	73
Abbildung 39: Kamerapositionen und Bildüberlappung	74
Abbildung 40: Reference Settings	74
Abbildung 41: Markieren der Passpunkte	76
Abbildung 42: Genauigkeit der Passpunkte.....	76
Abbildung 43: Parameter der Dense Cloud	77
Abbildung 44: Dense Cloud	78
Abbildung 45: Mesh, links mit und rechts ohne Farbwerte.....	80
Abbildung 46: Eingabeparameter Build Texture.....	81
Abbildung 47: Texturiertes 3D-Modell	82
Abbildung 48: Eingabeparameter Build DEM	83
Abbildung 49: Digitales Höhenmodell.....	83
Abbildung 50: Eingabeparameter Build Orthophotomosaic	84
Abbildung 51: Orthophotomosaik	85
Abbildung 52: Import von georeferenzierten Koordinaten	87
Abbildung 53: Ergebnis des Punktwolkenvergleichs	88
Abbildung 54: Entstehung der Abweichungen durch Datenlücken.....	88
Abbildung 55: Histogramm der gesamten Abweichungen (links) und der Abweichungen unter 50 Zentimetern (rechts).....	89
Abbildung 56: Vergleich der Punktwolken	90
Abbildung 57: Vergleich eines kleinen Ausschnitts der Gesamtpunktwolke, Histogramm (links) und Darstellung (rechts)	90
Abbildung 58: 3D-Modell im Nexus Viewer	94
Abbildung 59: Definition der Toolbar inklusive Hintergrund.....	95
Abbildung 60: JavaScript Funktion „setup3dhop()“	96
Abbildung 61: JavaScript Funktion "actionToolbar(action)"	97
Abbildung 62: 3DHOP-Viewer	98
Abbildung 63: Vergleich zwischen alter (links) und neuer Weinbergsmauer (rechts).....	100

1 Einleitung

Im Zuge des rasanten technischen Fortschritts entstehen stetig neue Aufnahmetechnologien, welche die Aufgabenfelder der modernen Geodäsie erweitern und die Vermessung an steigende Genauigkeitsanforderungen anpassen. Dabei ergeben sich besonders in den Bereichen des Laserscannings und der Photogrammetrie stetig Weiterentwicklungen.

Der Laserscanner ermöglicht eine schnelle und präzise Aufnahme komplexer geometrischer Strukturen im Innen- und Außenbereich und findet besonders in der 3D-Modellierung Anklang. Anstelle der Aufnahme von Einzelpunkten steht vor allem die flächenhafte Erfassung im Vordergrund. Jedoch erfasst der Laserscanner nur unmittelbar sichtbare Punkte und ist zudem in seiner Reichweite beschränkt, was besonders die Aufnahme großer Objekte erschwert.

Eine kostengünstigere und flexible Alternative dazu bietet die Photogrammetrie in Verbindung mit einem UAV (Unbemanntes Flugfahrzeug), welches es ermöglicht, schwer zugängliche Bereiche eines Messobjekts zu erreichen. Mithilfe photogrammetrischer Auswertungen können die Aufnahmen anschließend zu dreidimensionalen Modellen weiterverarbeitet werden, es werden jedoch noch nicht die Genauigkeiten eines terrestrischen Laserscans erreicht.

Diese Bachelorarbeit befasst sich mit der georeferenzierten 3D-Aufnahme und Modellierung des Mauersanierungsprojektes „Winzerweg“ im Zuge des Flurbereinigungsverfahrens in Walporzheim an der Ahr. Dabei wird sich aufgrund der Größe des Gebiets auf einen begrenzten Teil des gesamten Sanierungsprojekts beschränkt. Das entstandene 3D-Modell soll im Anschluss für eine web-basierte Visualisierung aufbereitet werden.

Diese Thesis schließt mit einem Fazit ab, um die gewonnenen Erkenntnisse und hervorgebrachten Resultate zusammenzufassen.

2 Weinbergsflurbereinigung in Walporzheim

Das vereinfachte Flurbereinigungsverfahren Walporzheim umfasst alle Rebflächen und sonstigen Flächen zwischen der Bundesstraße 267 und dem Verbindungsweg Hohenzollern – Försterhof – Bunte Kuh sowie die noch nicht flurbereinigten Rebflächen nördlich dieses Verbindungsweges in den Gewannen „Hinter dem Altenweg“, „Ober dem Altenweg“ und „Auf dem Altenwegsfeld“. Das Verfahrensgebiet hat eine Gesamtfläche von rd. 79 ha, davon ca. 40 ha Rebfläche.

Das Hauptziel des Verfahrens ist es, größere Bewirtschaftungseinheiten zu bilden und die Voraussetzungen für die maschinelle Bewirtschaftung zu verbessern. Dabei sind die verschiedenen Nutzungsansprüche an die Landschaft harmonisch zu verbinden, indem für einen Ausgleich zwischen den Interessen des Weinbaus, den Belangen des Arten- und Biotopschutzes und der Erhaltung des traditionellen Landschaftsbildes gesorgt wird.

Durch die Verbesserung und Sanierung der Erschließung, der Trockenmauern und der Grundstücksstruktur soll der Verbrachung von Rebflächen entgegengewirkt werden. Zudem sollen möglichst aufgelassene Rebflächen zur Erhaltung des traditionellen Landschaftsbildes wieder zum Weinbau genutzt werden. Gleichzeitig sollen vorhandene Biotopstrukturen erhalten bleiben und durch sinnvolle landespflegerische Maßnahmen ergänzt werden. (Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinland Pfalz, 2006)

2.1 Bedeutung historischer Weinbergsmauern für die Kulturlandschaft

Die Weinberge an der Ahr sind Zeugnisse einer fast 1000 Jahre alten Wirtschafts- und Sozialgeschichte des Weinbaus in dieser Region. Die handwerklich hochanspruchsvollen Mauerbauten sind durch ihre optische Verzahnung mit den benachbarten Orten und Burgen besondere Erlebnis- und Erholungsfaktoren für den Tourismus und bieten zudem einen Lebensraum für zahlreiche Tier- und Pflanzenarten.

Der Erhalt der historischen Weinbergsmauern in Steillagen an der Ahr benötigt Maßnahmen in besonderer Weise, da sie viele unterschiedliche Vorteile mit sich bringen.

Zum einen um als Hangstabilisierungsmaßnahme das Abrutschen von Erdmassen in steilem Gelände zu verhindern, zum anderen um durch die Terrassierung Neigungen zu reduzieren, was zum Erhalt neuer Wirtschaftsflächen führt. Aber auch um das Wärmespeichervermögen der Natursteine auszunutzen.

Da diese meist lose aufeinandergeschichteten Natursteine jahrhundertlang allen Witterungseinflüssen ausgesetzt waren, bedürfen diese nun einer dringenden Sanierung, um die Standsicherheit wiederherzustellen. (Gottesch, 2016)

Radikale Flurbereinigungsverfahren würden die Nutzflächen zwar ertragreicher machen, gleichzeitig aber auch zu eintönigen Monokulturen. Daher müssen Strategien entwickelt werden, die eine nachhaltige Nutzung im Einklang mit der Denkmalpflege, dem Naturschutz, dem Tourismus und der Wirtschaft ermöglicht. Auf den Einfluss der Weinbergsmauern auf diese Bereiche wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

2.1.1 Denkmalpflege

Durch die Einzigartigkeit der historischen Weinberge und Weinbergsmauern liegt die Erhaltung der Kulturlandschaft zweifelsfrei im öffentlichen Interesse. Die Weinbergterrassen nordwestlich von Walporzheim sind daher aufgrund ihrer stark terrassierten Weinbergslagen, Trockenmauern mit Treppenaufgängen und kleinteiligen Terrassen als Denkmalzone geschützt. Ziel des Denkmalschutzes ist es, den Charakter der Landschaft zu erhalten, die architektonischen Werte zu schützen und die weinbauliche Tradition zu pflegen. Das heißt, dass die Instandhaltung, Modernisierung, Sanierung und der Neubau baulicher Anlagen sich in das geschichtsträchtige Umfeld einfügen sollen, damit die Kulturlandschaft für zukünftige Generationen bewahrt werden kann. (Saftig, 1993)

2.1.2 Naturschutz

Weinbergsmauern bieten Schutz für die verschiedensten Arten der Pflanzen- und Tierwelt. Offene Fugen, durchgängige Bereiche von der Luftseite bis in das dahinter liegende Erdreich und Versätze im Steinbild bieten den Pflanzen und Tieren Rückzugsmöglichkeiten, Brutstätten und Nahrungsquellen. Neben den Insekten und Spinnen können

auch Reptilien wie Schlingnattern und Mauereidechsen bei der Jagd oder beim Sonnenbaden im Bereich der Mauern beobachtet werden. (Gottesch, 2016)

Stark beschädigte oder überwucherte Mauern können entweder zu einer Verbesserung oder Verschlechterung des aktuellen Zustandes führen. Es siedeln sich zwar neue Pflanzen an, aber die dadurch entsehende flächige Beschattung verringert das Wärmespeichervermögen und schränkt so den Lebensraum für wärmeliebende Tiere und Pflanzen ein. Durch einen Wiederaufbau von Weinbergsmauern werden vorhandene Hohlräume zwar geschlossen, jedoch bilden sich durch den natürlichen Werkstoff neue Spalten und Hohlräume in denen sich Pflanzen und Tiere ansiedeln können. (Wendling, 1993)

2.1.3 Tourismus

Die Weinberge im Ahrtal und die damit verbundene Terrassenlandschaft zählen für Wanderer und Touristen bereits seit vielen Jahren aufgrund ihres Landschaftsbildes zu einem der beliebtesten Ausflugszielen Deutschlands. Durch den Ausbau von Wanderwegen, wie zum Beispiel dem Rotweinwanderweg, wird Touristen die Möglichkeit gegeben Weinbergslagen des gesamten Ahrtals zu durchwandern.

Zerfallene Weinbergsmauern und brach liegende Weinberge in den prägenden Landschaftsteilen würden die Wanderwege uninteressant machen, da verwucherte Weinreben das Landschaftsbild trüben. Das hätte zur Folge, dass der Fremdenverkehr zurück geht und damit auch ein Rückgang des Weinverkaufs an den Endverbraucher zu erwarten ist.

Daher müssen besonders die Steillagenterrassen erhalten und weiter bewirtschaftet werden, um den Tourismus in der Region weiterhin zu erhalten. (Meyer, 1993)

2.1.4 Wirtschaft

Da die meisten der aktiven Winzer über 60 Jahre alt sind und zudem keinen Betriebsnachfolger besitzen, ist es abzusehen, dass in Zukunft lediglich die wirtschaftlich interessanten Flächen weiter bewirtschaftet werden. Daher müssen alle Weinbergsterrassen so gestaltet werden, dass sie weiterhin von wirtschaftlichem Interesse sind.

Laut *Bender* [1993] benötigt man für alte Terrassenanlagen fast doppelt so viele Arbeitsstunden pro Jahr wie für flurbereinigte Gebiete. Die Erneuerung von Weinbergsmauern ist jedoch mit einem sehr hohen Kostenfaktor verbunden, der fast ausschließlich in der Flurbereinigung im Rahmen von Aufbereitungen der Bewirtschaftungsstrukturen zu bewerkstelligen ist. Hinzu kommt, dass die Parzellengröße und -struktur in diesen Steillagen in der Regel nicht mehr den heutigen Ansprüchen entsprechen. Daher muss auch der Arbeitsplatz Weinberg der Zeit entsprechend verändert werden um die Wirtschaftlichkeit nachhaltig sicherzustellen. (Bender, 1993)

Zudem ist der Tourismus seit Jahren ein ständig wachsender Wirtschaftsfaktor. Von ihm profitieren unter anderem die Geschäfte, Gastronomie, Pensionen und Hotelbetriebe der gesamten Region.

Andere Ersatzangebote oder Gewerbebezüge als der Weinanbau sind in der Regel nicht möglich oder machen keinen Sinn.

2.2 Maßnahmen für den Erhalt der Weinbergsmauern

In Kapitel 2.1 ist die Bedeutung der Weinbergsmauern für die Kulturlandschaft und die Bewirtschaftung dargestellt. Da diese teilweise vom Verfall bedroht sind, müssen Erhaltungs- bzw. Ersatzmaßnahmen geplant und vollzogen werden. Hierfür hat das Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum detaillierte Planungs- und Zielvorstellungen für die umweltverträgliche Neugestaltung des Flurbereinigungsgebiets ausgearbeitet. Diese leiten sich aus der Verträglichkeitsprüfung, der allgemeinen Artenschutzprüfung sowie der Bestandserfassung und Bewertung der Flora ab.

Im Hinblick auf den Arten- und Biotopschutz sind die Sicherung, der Erhalt und die Weiternutzung des Trockenmauersystems in Verbindung mit Felsen, Brachen und Weingärten geplant. Die Sanierung und Freistellung von Trockenmauern dienen darüber hinaus dem Erhalt des vorhandenen Bodengefüges. Das Landschaftsbild ist ein weiterer Aspekt bei der Planung. Hierzu ist der Erhalt der Terrassenlandschaft mit den Trockenmauern und der Weinbergsnutzung auf kleinster Fläche maßgebend. Durch das gesamte Flurbereinigungsgebiet zieht sich eine Treppenlandschaft. Diese ist prägend für

das Landschaftsbild und unterstützt die Bewirtschaftung durch die Winzer. Folglich ist der Erhalt und die Sanierung dieser Treppen geplant. (Jacoby, 2014)

Im Rahmen der Flurbereinigung wurde ein Wege- und Gewässerplan nach §41 Flurbereinigungsgesetz erstellt. Als wichtigster Grundsatz gilt hier, der Erhalt und die Entwicklung des vorhandenen Wegenetzes und den Landschaftsstrukturen, anstatt der Neuanlage. Das heißt, die Sanierung von Trockenmauern mit ortsüblichem Material hat Priorität vor dem Neubau von Gabionenmauern und ähnlichen Maßnahmen.

Ober- und unterhalb der Hauptwege ist eine umfassende Mauersanierung geplant. Diese Sanierungen werden vorzugsweise als Trockenmauern oder Gabionenmauern ausgeführt. Da hier der Lebensraum einer Vielzahl von Tieren und Pflanzen langfristig gesichert wird, ist die Sanierung aus naturschutzfachlicher Sicht eine positive Maßnahme. Zusätzlich wird der Verfall der Mauern verhindert, wodurch die Bewirtschaftung und gleichzeitig der Tourismus profitieren. (Jacoby, 2014)

Trockenmauern eignen sich durch das Eigengewicht für die Stabilisierung von Geländesprüngen und Böschungen. Im Flurbereinigungsverfahren Walporzheim werden die Mauern zu Instandsetzung zunächst abgetragen und mit den vorhandenen sowie neuen Steinen wiedererrichtet. In diesem Fall werden unbehauene oder behauene Natursteine trocken aufgeschichtet. Durch die Aufschichtung der natürlichen Werkstoffe bilden sich Spalten und Hohlräume, in denen sich Pflanzen und Tiere ansiedeln können. Durch die Errichtung von Stützmauern kommt es zu einer Terrassenbildung, wodurch eine Bewirtschaftung in der steilen Lage möglich gemacht wird. Aufgrund der Wärmespeicherfähigkeit der Mauern wird eine Erwärmung der Weinbergslagen erzielt. Dies bringt ökologische sowie wirtschaftliche Vorteile mit sich. (Gottesch, 2016)

Als ökologische Alternative bietet sich die Sanierung als Gabionenmauern an. Gabionen sind Drahtkörbe, die mit grobem Schüttgut befüllt werden. Sie sind durch ihr eigenes Gewicht ebenso wie die Trockenmauern in der Lage, Böschungen und Hänge vor dem Abrutschen zu bewahren. Gabionenmauern sind nach oben offen. Das heißt, hier kann ungehindert Regenwasser in das Spaltsystem dringen. Um dies zu verhindern, werden diese in der Regel mit Steinplatten abgedeckt. (Gottesch, 2016)



Abbildung 1: Beispiel einer Mauersanierung (Jacoby, 2014)

In Abbildung 1 ist auf der linken Seite des Bildes eine durch Verwitterung eingestürzte Trockenmauer dargestellt. Durch den Verfall dieser Mauer ist hier der Lebensraum der Tiere und Pflanzen zerstört. Des Weiteren ist durch das Abrutschen der Erdmassen eine Bewirtschaftung ober- und unterhalb der Mauer auf Dauer nicht mehr möglich. Um dem entgegenzuwirken, wurde im Rahmen der Flurbereinigung diese Mauer saniert. Auf der rechten Seite der Abbildung ist zu erkennen, dass die Mauer in der Trockenbauweise neu errichtet wurde. Im Fall der Mauersanierung ist zu erwähnen, dass aus Gründen des Natur- und Artenschutzes die Sanierungs- und Abbrucharbeiten nur in der Zeit vom 15. Juli bis zum 15. September durchgeführt werden dürfen. So werden Paarungs-, Brut- und Winterschlafzeiten der angesiedelten Tiere berücksichtigt. (Jacoby, 2014)

Das vereinfachte Flurbereinigungsverfahren Walporzheim beinhaltet etwa 27 laufende Kilometer Weinbergmauern, die sanierungsbedürftig sind. Der finanzielle Aufwand beträgt schätzungsweise 20 Millionen Euro. Da in diesem Gebiet lediglich 20 Prozent der Mauern in öffentlicher Hand liegen, ist die Sanierung aller Mauern in diesem Rahmen nicht möglich.

2.3 Wahl des Messgebiets

Aufgrund der großen Fläche des gesamten Verfahrensgebiets und der begrenzten Messzeit muss zur 3D-Aufnahme das Messgebiet auf einen kleineren Bereich begrenzt wer-

den. Dabei wird darauf geachtet, dass sich in dem gewählten Gebiet sowohl viele alte als auch neue im Zuge des Sanierungsprojekts errichtete Weinbergsmauern befinden.

Da die Laserscan-Messung jedoch lediglich von befestigten Standpunkten aus durchgeführt werden kann, muss darauf geachtet werden, dass möglichst der gesamte Bereich vom Laserscanner erfasst werden kann. Dafür ist es von Vorteil sich am Fuß des Weinbergs stationieren zu können. Außerdem muss bei der Auswahl des Messgebiets darauf geachtet werden, dass die betroffenen Eigentümer zur Durchführung von Messarbeiten auf ihren Grundstücken zugestimmt haben.

Daher fällt die Wahl des Messgebiets auf einen ca. 7000 Quadratmeter großen Bereich, der das charakteristische Bild des gesamten Flurbereinigungsgebiets widerspiegelt. Im abgegrenzten Gebiet beträgt die durchschnittliche Steigung circa 65-70%.

In Anhang 10.1 ist das Messgebiet, auf dem das 3D-Modell der Bachelorthesis beruht, in Bezug auf das gesamte Verfahrensgebiet der Flurbereinigung Walporzheim, abgegrenzt.

In der Abbildung 2 ist hingegen lediglich das Messgebiet dargestellt, welches in der Bachelorthesis behandelt wird. Die Abstände zwischen den Eckpunkten sind in Schwarz und deren Höhen in Blau dargestellt.



Abbildung 2: Abgrenzung des Messgebiets (LVermGeo, 2019)

3 GNSS-Messung

Zur späteren Georeferenzierung der Punktwolken aus dem terrestrischen Laserscanning und der Drohnenbefliegung wurde eine DGNSS-Aufnahme (Differenzielles globales Navigations-Satelliten-System) in Verbindung mit dem SAPOS-Dienst (Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung) der AdV (Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen) durchgeführt. Diese Methode hat sich bereits in der rheinland-pfälzischen Landesvermessung etabliert und wird dort für den Großteil der Außendienstarbeiten genutzt. Von einer Nutzung der im Rahmen der Flurbereinigung aufgemessenen Passpunkte wird abgesehen, da neben der geringen Anzahl von zwei Passpunkten zudem eine für die 3D-Aufnahme unzureichende Verteilung der Punkte vorliegt.

3.1 Differenzielles Globales Navigationssatellitensystem

DGNSS ist ein Verfahren, welches über Korrekturdaten die Positionsbestimmung eines GNSS-Empfängers signifikant erhöht.

Das Grundprinzip ist, mindestens zwei GNSS-Empfänger in Verbindung zueinander zu betreiben. Dafür müssen die Empfangsbedingungen für beide Empfänger gleich sein.

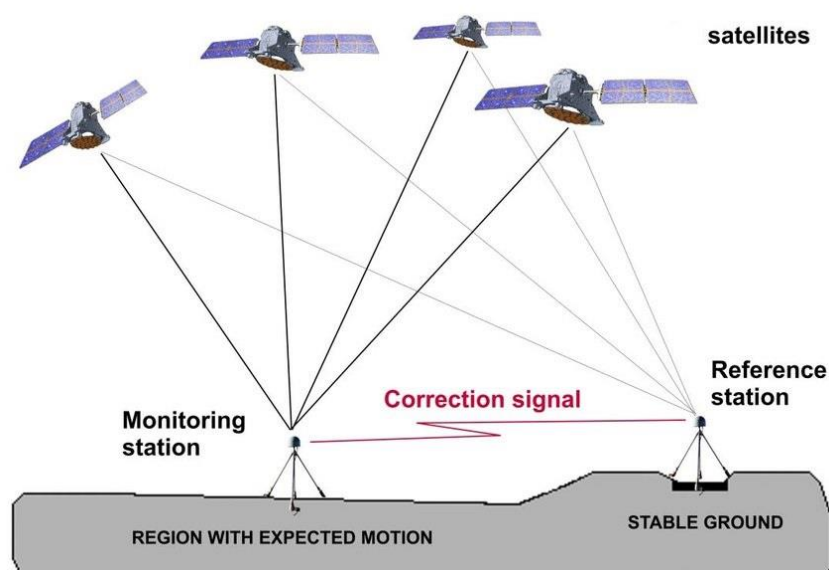


Abbildung 3: Funktionsprinzip des DGNSS (CGS Europe, 2019)

Da bei der genau koordinierten Referenzstation (Reference station in Abbildung 3) die exakte Position bekannt ist, kann diese die Differenz zwischen tatsächlicher und gemessener Position berechnen und so Korrekturdaten erzeugen. Diese werden anschließend an den Empfänger mit der unbekannt Position (Monitoring station in Abbildung 3) weitergegeben. Dabei sollte der Abstand zwischen den beiden Empfängern, möglichst kurzgehalten werden. (MagicMaps GmbH , 2019)

3.2 SAPOS-Verfahren zur DGNSS-Messung

Die Vermessungsverwaltungen der Länder betreiben als Gemeinschaftsprojekt der AdV den Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung, kurz SAPOS.

Ziel von SAPOS ist es, ein einheitliches homogenes Raumbezugssystem für alle Aufgaben des Vermessungs- und Katasteramts und für weitere Anwendungen zur Verfügung zu stellen.

Grundlage des Dienstes ist ein flächendeckendes Netz von GNSS-Referenzstationen, die als Festpunkte im einheitlichen Bezugssystem ETRS89 (Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989) bestimmt sind. In Deutschland gibt es insgesamt über 270 GNSS-Referenzstationen, wovon sich in Rheinland-Pfalz 18 Stationen befinden. Der Abstand zwischen den Stationen beträgt ungefähr 30 bis 50 Kilometer.

Diese Referenzstationen sind hoch genau koordinierte Festpunkte und bilden die Grundlage für zahlreiche Vermessungen. Die permanent registrierten Signale der GNSS werden zentral ausgewertet und als Korrekturdaten bereitgestellt. (AdV, 2016)

Bei einer SAPOS-Messung schickt der Rover seine grobe, lediglich durch GNSS-Messung ermittelte Position, an die SAPOS-Zentrale. Diese ermittelt die nächstgelegenen Referenzstationen und berechnet, nachdem die Stationen ihrer Entfernung zum Rover entsprechend gewichtet wurden, die Korrekturdaten für die angeforderte Position. Nachdem diese an den Rover geschickt wurden, beginnt dieser mit der Lösung und kann so die Messung mit einer Genauigkeit im Zentimeterbereich durchführen.

SAPOS umfasst drei Servicebereiche mit unterschiedlichen Eigenschaften und Genauigkeiten:

Mind. 5 Satelliten	EPS Echtzeit- Positionierungs-Service	HEPS Hochpräziser-Echtzeit- Positionierungs-Service	GPPS Geodätischer-Postprocessing Positionierungs-Service
Verfahren	Echtzeit	Echtzeit	Postprocessing
Übertragungs- medium:	GPRS/ UMTS/ LTE	GPRS/ UMTS/ LTE, GSM	Internet
Datenformat:	RTCM 2.0	RTCM 2.3/ RTCM 3	RINEX 2.11
Genauigkeit: Lage	0,3 – 0,8 m	0,01 – 0,02 m	<0,01 m
Genauigkeit: Höhe	0,5 – 1,5 m	0,02 – 0,03 m	0,01 – 0,02 m
Anwendungs- beispiele:	Navigationsgeräte, Schifffahrt	Liegenschafts-, Bau-, Ingenieurvermessung	Grundlagenvermessung (Trigonometrische Punkte), Referenzsysteme

Tabelle 2: Servicebereiche von SAPOS (AdV, 2019)

Während das Postprocessing eine Verarbeitungszeit von bis zu mehreren Tagen erfordert, erhält man bei einer Echtzeit-Messung die Daten direkt im Feld. Wie in Tabelle 2 ersichtlich, kann am genauesten mithilfe des SAPOS-GPPS gemessen werden. Der damit verbundene Aufwand ist jedoch im Vergleich zu den anderen Verfahren relativ groß, da sowohl die Messung als auch die Auswertung länger dauert. Deshalb wird sich dazu entschieden, für die Messungen im Rahmen der Bachelorarbeit den SAPOS-HEPS zu nutzen. So kann in Echtzeit innerhalb weniger Sekunden mit einer Genauigkeit von unter zwei Zentimetern gemessen werden. Eine SAPOS-EPS-Messung fällt aufgrund der Lagegenauigkeit von 0,3-0,8 Metern und einer Höhengenaugigkeit von 0,5 bis 1,5 Metern nicht in die nähere Auswahl. (AdV, 2019)

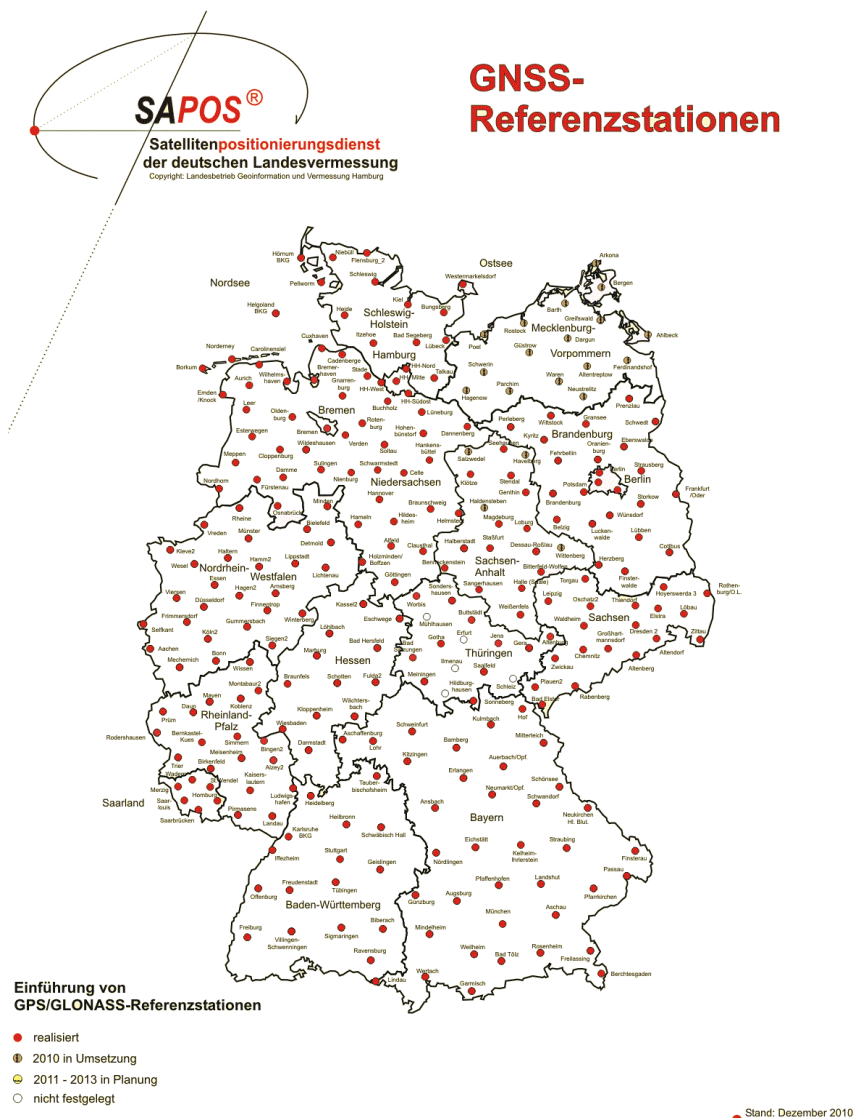


Abbildung 4: Übersicht der SAPOS-Referenzstationen in Deutschland (Infotip Service GmbH, 2019)

In der Abbildung 4 sind die Referenzstationen in Deutschland dargestellt. Bei der SAPOS-HEPS-Messung werden zur Korrekturdatenberechnung die nahegelegenen Stationen rund um das Messgebiet genutzt und entsprechend der Entfernung gewichtet. Da sich Walporzheim im Norden von Rheinland-Pfalz befindet kann man zum Beispiel davon ausgehen, dass die Daten der Referenzstationen Bonn, Wissen, Montabaur 2, Koblenz und Mayen auf die Positionierung Einfluss hatten. Dass auch Daten aus Nordrhein-Westfalen genutzt werden können, wird durch die länderübergreifende Verwaltung des SAPOS-Dienstes ermöglicht.

3.3 Durchführung der GNSS-Messung

Zur Datenerhebung wird der Feldrechner Panasonic FZ-G1 und das GNSS-System „VIVA GS10“ der Firma Leica eingesetzt.

Die Referenzpunkte sollen für die spätere Auswertung möglichst markant und aus der Vogelperspektive eindeutig sichtbar sein. Durch die Hanglage ist es nicht möglich natürliche, markante Punkte zu wählen, welche sowohl beim Laserscanning als auch bei der Drohnenbefliegung sichtbar sein würden. Daher wird als Vermarktungsart „Rohr mit Kappe“ gewählt, um die Referenzpunkte später jederzeit mit Black and White Targets ausstellen zu können. Die insgesamt 9 GNSS-Punkte, blaue Darstellung in Anhang 10.2, werden jeweils vor der Aufnahme vermarktet.

Zu Beginn wird im Feldrechner das gewünschte Koordinatensystem, ETRS89 (Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989) und der Höhenmodus, DHHN16 (Deutsches Haupthöhennetz 2016) eingestellt. Anschließend wird die aktuelle Liegenschaftskarte in das Projekt eingeladen, um während der Messung anhand der groben Lage in der Karte einschätzen zu können, ob die Messergebnisse realistisch sind. Die Datenübertragung wird per GSM-Verbindung (Mobiltelefon) hergestellt. Hierbei erfolgt die Authentifizierung des Benutzers bei der SAPOS-Zentrale über die Teilnehmerrufnummer. (SAPOS®-Qualitätsmanagement, 2017)

Vor jeder Messung erfolgt automatisch die Lösung der Mehrdeutigkeiten mit Hilfe von Suchalgorithmen, welche anschließend mitgeführt werden. Die Dauer der Lösungsfindung ist abhängig von der Satellitenkonstellation und entsprechend auch von gegebenenfalls vorhandenen Abschattungen.

Die Aufnahme der Referenzpunkte erfolgt mittels RTK-Vermessung (Real Time Kinematic) in Verbindung mit SAPOS-HEPS. Da die Bestimmung entsprechend in „Echtzeit“ erfolgt, beträgt die Messzeit pro Punkt jeweils nur wenige Sekunden.

Zur durchgreifenden Kontrolle der erhobenen Koordinaten wird zu einem späteren Zeitpunkt eine zweite Messung durchgeführt. Die Koordinaten aus beiden Aufnahmen werden anschließend gemittelt, wodurch Genauigkeiten von unter 2 Zentimetern erreicht werden können. Die Abspeicherung der Referenzpunktkoordinaten erfolgt im ASCII-Dateiformat als Textdatei.

4 Terrestrisches Laserscanning

Durch die Entwicklung geodätischer Messinstrumente ist es heutzutage möglich, mithilfe von Laserscannern Objekte ganzheitlich und flächenhaft in kürzester Zeit zu erfassen. Das bedeutet, dass nicht wie bei einer tachymetrischen Aufnahme ausschließlich diskrete Punkte aufgenommen werden, sondern eine elementbezogene Erfassung, zum Beispiel die Aufnahme geometrischer Elemente einer Fassade, ermöglicht wird. (Witte & Sparla, 2015)

Die Aufgabenfelder und das Anwendungspotenzial von Laserscanning befindet sich hauptsächlich in den Bereichen der Architektur, der Archäologie und 3D-Modellierung, aber auch in der Forensik und der Unfallrekonstruktion.

Der Begriff „terrestrisch“ bedeutet, dass es sich beim Terrestrischen Laserscanning um eine erdgebundene Messung handelt.

4.1 Grundlagen des Laserscanning

Die Aufnahme erfolgt beim terrestrischen Laserscanning durch eine Vielzahl von Einzelmessungen von einem Standpunkt aus. Die gesamte erkennbare Oberfläche eines Objekts wird durch Entfernungs- und Winkelmessungen rasterförmig abgetastet. Als Ergebnis erhält man eine aus mehreren Millionen Punkten bestehende Punktwolke mit x , y , z -Koordinaten. Zusätzlich wird die Intensität des zurückgeworfenen Signals gespeichert. Im Nachgang wird aus der gemessenen Punktwolke ein dreidimensionales Modell erstellt, welches das gesamte Objekt darstellt. Zur ganzheitlichen Aufnahme großer Objekte können mehrere Laserscans miteinander verbunden werden. (Witte & Sparla, 2015)

Im folgenden Kapitel wird genauer auf die Grundlagen des terrestrischen Laserscannings eingegangen.

4.1.1 Distanzmessung

Die Distanzmessung erfolgt bei Laserscannern grundsätzlich mit Hilfe des Impulszeit- oder Phasenvergleichsverfahren. Beim Impulszeitverfahren wird bei Distanzen von mehreren hundert Metern eine Genauigkeit von etwa einem Zentimeter erreicht. Das Phasenvergleichsverfahren hingegen findet vorwiegend bei kurzen Entfernungen Anwendung, wo es eine Genauigkeit von wenigen Millimetern erzielen kann. (Witte & Sparla, 2015)

Da der in dieser Arbeit verwendete Scanner die beiden Verfahren kombiniert nutzt, wird im Folgenden ausschließlich auf die Kombination von Impulszeit- und Phasenvergleichsverfahren eingegangen.

Bei dem zur Messung benutzten Laserscanner Leica P40 basiert die elektrooptische Entfernungsmessung auf der Grundlage einer Wellenform-Digitalisierungstechnologie (WFD). Diese Technologie ist eine Art der Impulszeitmessung, welche die Vorteile des Phasenvergleichsverfahrens mit denen der Impulszeitmessung in einem System kombiniert.

Bei der Entfernungsmessung mit WFD wird nicht nur ein einzelner Impuls gemessen. Es werden viele kurze Impulse vom Sensor versendet, während ein kleiner Teil jedes Impulses durch einen internen Kanal im Inneren des Teleskops direkt auf den Empfänger geleitet wird. Dieses Pulsfragment heißt Startpuls (Abbildung 5, Rote Darstellung). Der Hauptteil des Pulses verlässt jedoch das Teleskop und wird vom Ziel reflektiert. Das reflektierte Signal wird erfasst und als Stoppimpuls bezeichnet. (Abbildung 5, Blaue Darstellung) (Leica Geosystems AG, 2014)

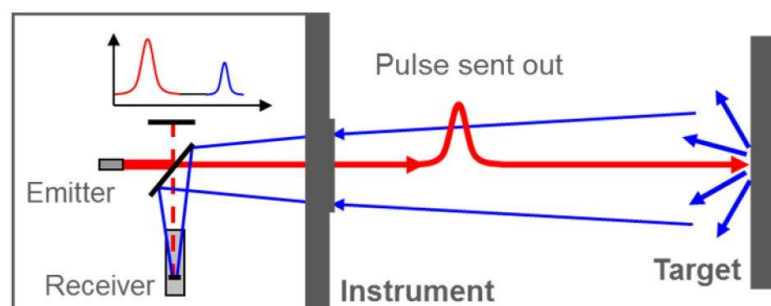


Abbildung 5: Schematische Darstellung der WFD-Technologie (Leica Geosystems AG, 2014)

Anschließend werden die beiden Impulse als vollständige Wellenform digitalisiert und aus mehreren Signalen akkumuliert. Über den Zeitunterschied zwischen akkumuliertem Start- und Stoppimpuls kann dann die Entfernung berechnet werden. (Leica Geosystems AG, 2014)

In Abbildung 6 wird der Unterschied zwischen einem einzelnen Impuls und der WFD-Messung mit mehreren Pulsen verdeutlicht.

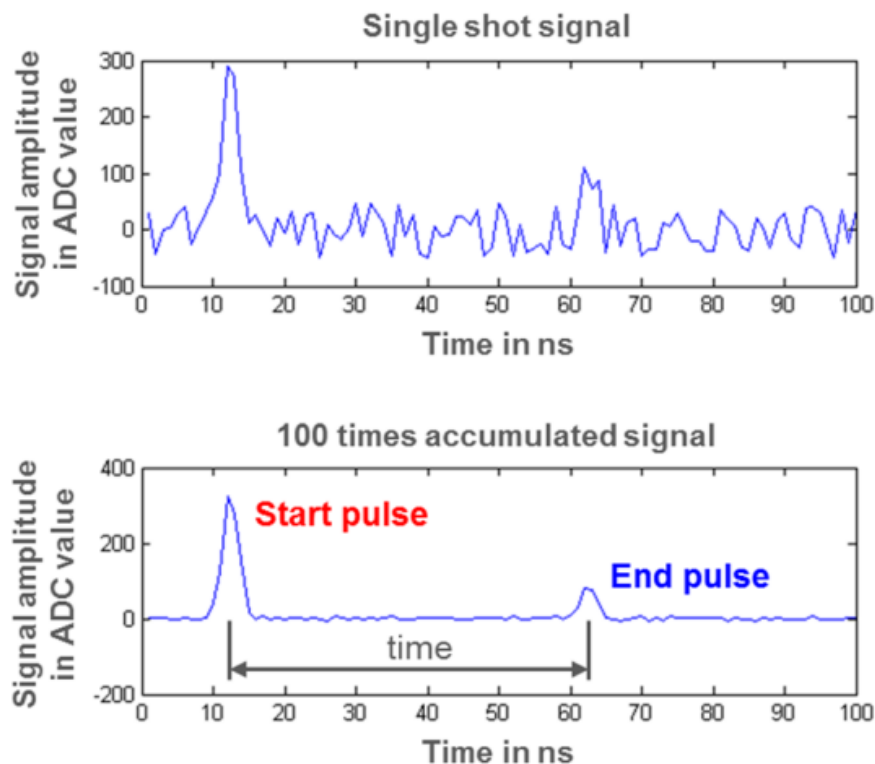


Abbildung 6: Impulse bei einfachem Signal und akkumulierten Signalen (Leica Geosystems AG, 2014)

Die Vorteile der WFD-Technologie liegen in der gleichzeitig vorhandenen Schnelligkeit der Messung, geringen Größe des Laserpunkts, hohen Messgenauigkeit und der großen Reichweite. (Leica Geosystems AG, 2014)

Um die Genauigkeit der Distanzmessung zu steigern, empfiehlt es sich, das Instrument möglichst senkrecht zum Objekt auszurichten, da so ein regelmäßiges Raster entsteht. Außerdem reflektieren senkrecht auftreffende Strahlen besser.

4.1.2 Winkelmessung

Beim Laserscanning werden Objekte in einem in Winkelschritten aufgeteilten Raster, wie in Abbildung 7 dargestellt, aufgenommen.

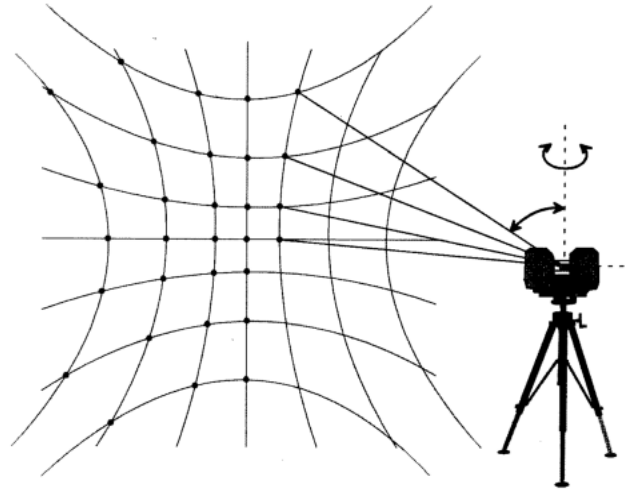


Abbildung 7: Rasteraufnahme einer Wand von einem Laserscanner mit tachymetrischem Aufbau (Klonowski, 2017)

Während der Messung werden innerhalb des Vertikalwinkels wiederholt Punkte in einem konstanten Abstand gemessen. Nachdem alle Punkte eines Vertikalwinkels gemessen wurden, dreht sich das TLS in sehr kleinen Winkelschritten um die Stehachse und führt den Vorgang für die restlichen Zeilen aus. Durch diesen Abtastvorgang wird die gesamte sichtbare Oberfläche des ausgewählten Bereichs abgescannt.

Um eine schnelle Messung von mehreren Millionen Punkten innerhalb weniger Sekunden zu gewährleisten, wird eine andere Technik als bei der tachymetrischen Aufnahme angewandt. Dazu wird bei terrestrischen Laserscannern das Prinzip der Ablenkung durch einen Planspiegel oder ein Spiegelpolygon genutzt, die über einen Motor gedreht werden. Die kontinuierliche Drehbewegung erlaubt eine extrem hohe Messgeschwindigkeit. (Witte & Sparla, 2015)

Der verwendete Laserscanner Leica P40 erlaubt das Scannen in einem Sichtfeld von 360° in der Horizontalen und 290° in der Vertikalen, wobei sich das Sichtfeld vor der Aufnahme frei wählen lässt.

4.1.3 Registration

Die Anzahl der benötigten Standpunkte hängt vom aufzunehmenden Objekt ab. Je größer oder komplexer das Objekt ist, desto mehr Standpunkte sind nötig. Da jeder Standpunkt dabei ein eigenes lokales Koordinatensystem definiert, müssen diese im Zuge der Auswertung miteinander verknüpft werden. Dieser Prozess wird als „Registration“ bezeichnet. Sie kann entweder über Passpunkte (z.B. Zielmarken) oder über die Punktwolken selbst erfolgen. Die Passpunktmarkierungen werden durch einen Feinscan mit hoher Genauigkeit abgetastet, weil es mit Laserscannern nicht möglich ist diskrete Punkte gezielt anzumessen. Spezielle Zielmarken werden dabei aufgrund ihres Reflexionsverhaltens von der geräteinternen Software automatisch erkannt. (Witte & Sparla, 2015)

Zur Registration stehen unterschiedliche Methoden zur Auswahl. Eine Möglichkeit ist es, dem TLS eine GNSS-Antenne aufzusetzen, welche die Position während der Aufnahme misst. So können nicht nur die verschiedenen Standpunkte miteinander verknüpft werden, es wird sogar direkt die Georeferenzierung hergestellt. Eine weitere Methode die häufig Anwendung findet, ist die Verwendung von koordinierten Zielmarken. Dabei spricht man von einer indirekten Registration und Georeferenzierung, da die Passpunktkoordinaten unabhängig vom Laserscan bestimmt werden müssen. (Witte & Sparla, 2015)

Da die Laserscannmessung später mit den Daten der photogrammetrischen Aufnahme verglichen werden soll, wurde die Methode der indirekten Registration verwendet. So können für beide Verfahren die gleichen Passpunkte zur Registration und Georeferenzierung genutzt werden. Als Verknüpfungspunkte wurden „Leica HDS Black and White Tilt and Turn Targets“ in den Größen 3“, 4,5“ und 6“ verwendet (Abbildung 8).



Abbildung 8: Leica HDS Black and White Tilt and Turn Target (Datum Tech Solutions, 2019)

Es wurde sich für diese Art Targets entschieden, da sie durch die Tilt and Turn-Funktion zum jeweiligen Standpunkt gedreht werden können. Zusätzlich kann zwischen der Laserscan-Aufnahme und der photogrammetrischen Erfassung das Target einfach nach oben gekippt werden. So können für beide Verfahren die gleiche Position und Höhe gemessen werden, was die anschließende Auswertung vereinfacht.

4.1.4 Innere Einflussfaktoren

Die Aufnahme mittels terrestrischer Laserscanner unterliegt zahlreichen beeinflussenden Faktoren. Die Faktoren, welche sich auf das Gerät selbst beziehen werden als „innere Einflussfaktoren“ bezeichnet. Damit sind hauptsächlich gerätebedingte systematische Einflüsse gemeint, die theoretisch durch Kalibrierungen bestimmt werden können, um Messergebnisse durch entsprechende Korrekturen zu berichtigen. Die bei der elektrooptischen Distanzmessung bekannten Fehlerquellen können auf terrestrische Laserscanner übertragen werden, da grundsätzlich das gleiche Messverfahren angewandt wird. (Gordon, 2008)

In den folgenden Abschnitten werden einige der inneren Einflussfaktoren aufgezeigt.

Nullpunkts-/Additionskorrektur

Durch die Laserstrahlablenkungen mittels rotierender Spiegelsysteme, wie es bei Laserscannern üblich ist, entstehen Totwege des Messstrahls innerhalb des Messsystems. Als Totweg wird die Distanz des Laserstrahls von seinem Aussendepunkt zum gedachten Nullpunkt des Messsystems, also der Abstand zwischen mechanischen und elektronischen Nullpunkten, bezeichnet. Wenn für diesen Weg geräteintern ein fehlerhafter Wert abgelegt wurde, sollte die gemessene Strecke zusätzlich um die Abweichung zum tatsächlichen Wert durch eine Additionskorrektur berichtigt werden. (Gordon, 2008)

Maßstabskorrektur

Wenn eine streckenproportionale Abweichung von der Sollstrecke trotz berücksichtigter meteorologischer Korrektur besteht, liegt ein instrumentell bedingter Maßstabsfehler

vor. Obwohl die Abweichungen der Messinstrumente in der Regel sehr gering sind, können betriebszeitabhängig und temperaturbedingt jedoch Größenwerte auftreten, die unbedingt durch eine Maßstabskorrektur zu berichtigen sind. Diese Abweichungen werden in der Regel im Zuge einer Netzausgleichung geschätzt. (Schäfer, 2017)

Zyklischer Phasenfehler

Die Ursachen für den zyklischen Phasenfehler liegen an der kompakten Bauweise elektrooptischer Distanzmessgeräte und resultieren aus der engen Nachbarschaft von Sendeeinheit und Empfangseinheit. Dadurch ist die vollständige Abschirmung zwischen den beiden Einheiten nicht gewährleistet, was zu einer teilweisen Signalüberlagerung führen kann, wodurch die Messung verfälscht wird. Außerdem können durch Reflexionen an Linsen, Sende- und Empfangsdioden weitere zyklische Fehlerkomponenten hervorgerufen werden. Die Bestimmung des zyklischen Phasenfehlers erfolgt auf Komparatorstrecken und kann mit Verbesserungsgleichungen rechnerisch kompensiert werden. (Schäfer, 2017)

Phaseninhomogenitäten

Eine weitere Fehlerquelle der Distanzmessung sind die sogenannten Phaseninhomogenitäten. Sie treten auf, wenn nicht alle modulierten Strahlen des Messkegels zur gleichen Zeit dieselbe Phasenlage haben. Die Ursache dafür liegt meist an einer Inhomogenität der Sendedioden, was zur Folge hat das durch unterschiedliche Reaktionszeiten eine unterschiedliche Modulation des Lichtstrahls entsteht (Abbildung 9). Bei modernen Geräten überschreitet der Einfluss der Phaseninhomogenitäten jedoch nur in den äußeren Randbereichen des Strahls die Millimetergrenze. (Schäfer, 2017)

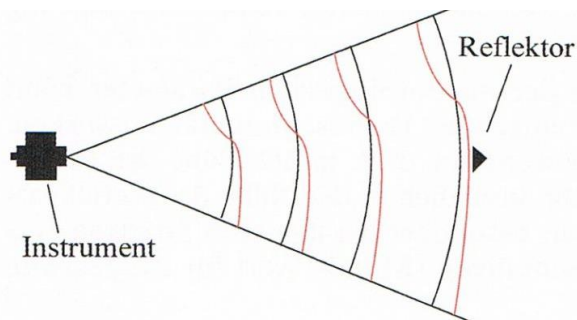


Abbildung 9: Phaseninhomogenität, ideale Kugelwellen in Schwarz, tatsächliche Wellenfronten in Rot (Deumlich & Staiger, 2002)

4.1.5 Äußere Einflussfaktoren

Der Messstrahl ist auf seinem Weg vom Laserscanner zum Messpunkt und zurück den sogenannten „äußeren Einflüssen“ ausgesetzt, die sich auf die Messung negativ auswirken können. Zu den äußeren Einflussfaktoren zählen unter anderem die Oberflächenbeschaffenheit und -farbe, der Einfallswinkel des Messstrahls auf dem Messobjekt sowie die anderen atmosphärischen Einflüsse, die den Messstrahl auf seinem Weg beeinträchtigen. Im Gegensatz zu den inneren Einflussfaktoren können hier im Allgemeinen keine Korrekturgrößen angebracht werden. (Gordon, 2008)

In den folgenden Abschnitten werden einige der äußeren Einflussfaktoren näher erläutert.

Einfluss der Atmosphäre

Da die elektrooptische Streckenmessung nicht im Vakuum erfolgt, stimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserlichts nicht mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit überein. Das ist damit zu begründen, dass die reale Ausbreitungsgeschwindigkeit durch metrologische Parameter wie Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte und der chemischen Zusammensetzung verlangsamt wird.

Unter normalen Bedingungen kann man mit Korrekturen von -10 ppm (parts per million) bis 10 ppm rechnen, was die Folge hat, dass beim Laserscanner keine Korrekturanpassung erforderlich ist, da die Messabweichung meist unterhalb der Genauigkeit des Messgerätes liegt.

Eine Korrektur ist jedoch nicht generell unentbehrlich. Bei extremen Temperaturen um die 40°C schwanken die Korrekturen in einer Bandbreite um die 50 ppm, was für eine 100 Meter lange Strecke eine Streckenabweichung von 5 Millimeter ausmachen würde.

Da die durch die Refraktion hervorgerufene Bahnkrümmung des Messstrahls erst für Strecken ab 50 Kilometern zu berücksichtigenden Größenordnungen erreicht, bleibt diese beim terrestrischen Laserscanning in der Regel ungeachtet. (Kern, 2003)

Reflexion

Beim Laserscanning geschieht die Entfernungsmessung reflektorlos, was bedeutet, dass das auftreffende Signal auch an nicht spiegelnden oder lichtdurchlässigen Objekten reflektiert wird. Dabei ist zu beachten dass unterschiedliche Objektoberflächen unterschiedliche Reflexionseigenschaften aufweisen, sodass das Signal nicht unbedingt in die gleiche Richtung zurück geworfen wird.

Beim terrestrischen Laserscanning begegnet man hauptsächlich rauen Oberflächen, welche das Signal in verschiedene Richtungen zurückwirft. Dabei handelt es sich um diffuse Reflexionen (Abbildung 10, a)).

Für die reguläre Reflexion auf glatten, spiegelnden Oberflächen (z.B. Glas oder Metall) gilt das Reflexionsgesetz: Einfallswinkel ist gleich Ausfallswinkel (Abbildung 10, b)). Die Folge sind Datenlücken, da der Laserstrahl nicht zum Lasescanner zurück gelangt.

Die Art der Reflexion hat daher grundsätzlich keine Auswirkung auf die Genauigkeit der Streckenmessung, es besteht lediglich die Möglichkeit dass sie fehlschlägt. Dies ist damit zu begründen, dass nicht genügend Energie zurückgeworfen wird.

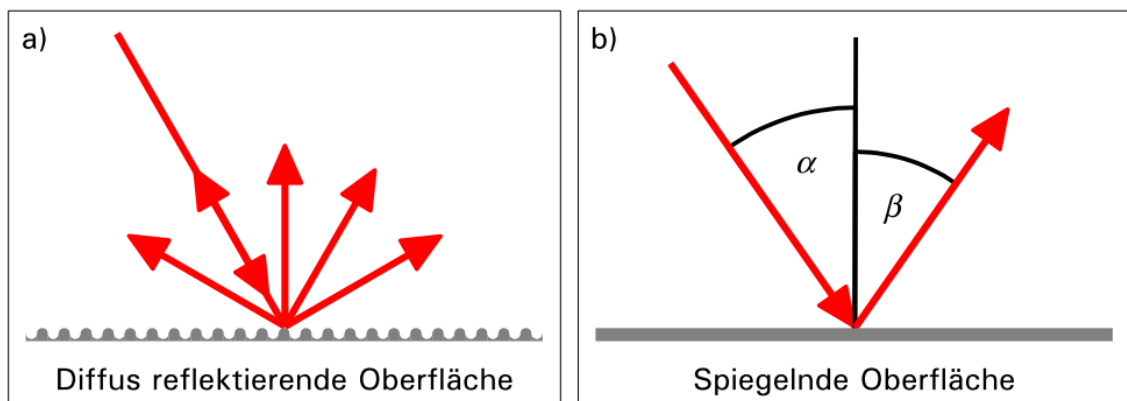


Abbildung 10: Laserstrahl-Reflexion auf a) diffus reflektierenden und b) spiegelnden Oberflächen (Gordon, 2008)

Ein weiterer negativer Effekt von spiegelnden Oberflächen tritt auf, wenn die Energie nach der Reflexion an einem solchen Objekt auf eine weitere Oberfläche trifft, die hingegen diffus reflektiert. Gelangen so Teile des Strahls wieder zurück zur Empfangseinheit, wird der Empfänger nicht auf dem kürzesten Weg erreicht und es wird eine falsche

Strecke ermittelt. Die durch diesen sogenannten „Mehrwegeeffekt“ entstandenen Punkte sind entsprechend vor der Weiterverarbeitung der Messdaten aus diesen zu entfernen. (Schäfer, 2017)

Einfluss der Zielgeometrie

Beim Auftreffen eines Laserstrahls ist ein Leuchtkreis bzw. eine Leuchtellipse sichtbar, deren Durchmesser mit zunehmender Entfernung vom Objekt größer wird. Diese Strahlquerschnittsfläche wird beim Laserscanning als Spotgröße bezeichnet.

Wie in Abbildung 11 zu sehen, sollte grundsätzlich nicht reflektorlos auf Kanten oder Innenecken gemessen werden, da bei Außenkanten (Abbildung 11, links) die Strecken zu lang und bei Innenkanten (Abbildung 11, rechts) die Strecken zu kurz bestimmt werden. Das liegt daran, dass die Strahlflächen, also der Spot, sich über die Objektbereiche verteilt, welche eine unterschiedliche Entfernung zum Empfänger des Distanzmessers aufweisen. Die vom EDM-Gerät (Elektronisches Distanzmessgerät) angezeigte Strecke entspricht somit eher einer Art Durchschnittswert der ermittelten Entfernung anstatt der Strecke zur Mitte des Spots. (Klonowski, 2017)

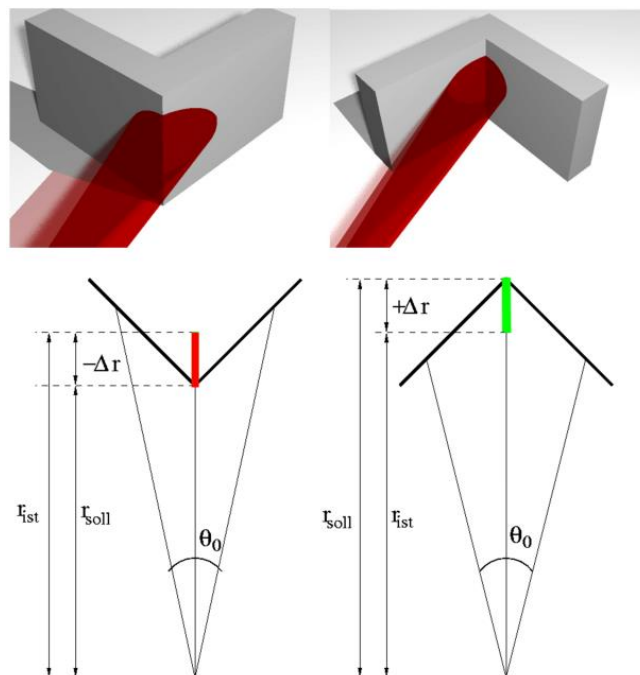


Abbildung 11: Einfluss von Außenkanten (links) und Innenkanten (rechts) bei reflektorlosen Distanzmessungen (Kern, 2003)

Der gleiche Effekt tritt bei Kanten, die wie Stufen ausgeprägt sind, auf. Vom Messstrahl fällt ein Teil auf die Vordergrundsfläche und ein Teil auf die Hintergrundsfläche der Stufe, was zu einem falschen Messwert führt. Die am Empfänger angezeigte Strecke hängt von der Größe der Spotteilflächen auf der Vorder- und Hintergrundsfläche ab, wobei sich die Entfernung entsprechend anteilig zwischen den Flächen einpendeln wird. (Klonowski, 2017)

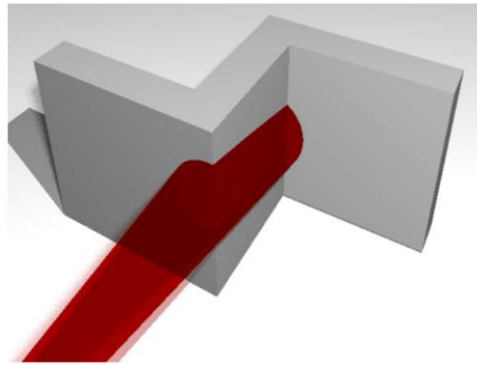


Abbildung 12: Einfluss von Stufen bei reflektorlosen Distanzmessungen (Kern, 2003)

Einfluss des Einfallswinkels

Ähnlich der Effekte der Objektgeometrie lassen sich auch die Abhängigkeiten der gemessenen Strecken vom Auftreffwinkel des Signals erläutern.

Trifft die Energiewelle eines Strahls rechtwinklig auf das Zielobjekt, ist der Spot kreisförmig. Wenn der Einfallswinkel jedoch kleiner als 100 gon ist, wird der Spot zur Ellipse deformiert und wird zu Gunsten der näher am Empfänger befindlichen Fläche verformt. Laut *KERN* [2003] liegt das daran, dass für die näher gelegenen Teile der Reflexionsfläche die wirksamen Intensitäten zusammenrücken, während sie sich im weiter entfernten Teil der Reflexionsfläche auseinanderziehen (Abbildung 14). Die Folge ist, dass die Intensitätsverteilung zu Gunsten der näheren Reflexionsteilfläche verschoben ist, wodurch eine zu kurze Entfernungsmessung registriert wird. (Kern, 2003)

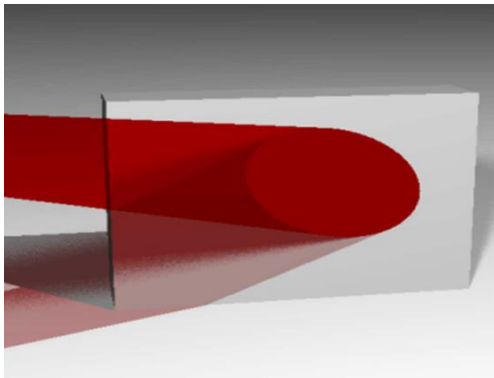


Abbildung 13: Einfluss vom Einfallswinkel bei reflektorlosen Distanzmessungen (Kern, 2003)

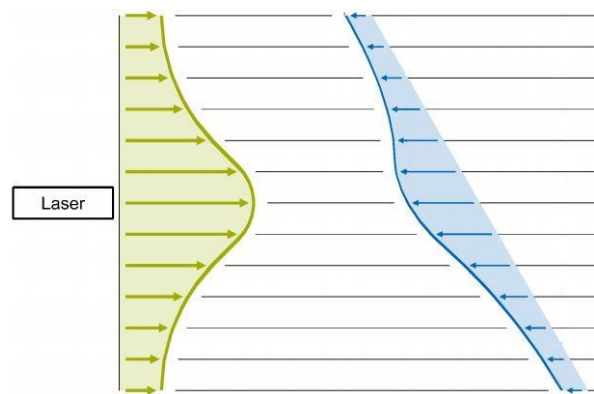


Abbildung 14: Ausgestrahlte (grün) und rückgestrahlte (blau) Wellenfront bei schrägem Einfallswinkel (Schäfer, 2017)

Einfluss der Materialbeschaffenheit

Im folgenden Abschnitt wird auf den Einfluss der Materialfarbe, der Oberflächenstruktur des Materials, sowie die Auswirkungen unterschiedlicher Objektbeleuchtungen eingegangen.

Die Oberflächenfarbe beeinflusst, wie stark ein Objekt reflektiert. Von ihr hängt ab, welche Wellenlängen des Lichts absorbiert und welche reflektiert werden. Die Anteile, die nicht absorbiert werden, bestimmen mit welchem Farbeindruck man das Objekt wahrnimmt. Wird zum Beispiel ein rotes Objekt von einem roten Laser angestrahlt, wird wenig rotes Licht absorbiert, was zur Folge hat, dass die sogenannte Reflektanz für den Laserstrahl besonders hoch ist. Die Materialfarbe eines Objekts hat somit keinen direkten Einfluss auf die Genauigkeit der Streckenmessung, sie beeinflusst lediglich die Empfangsleistung des zurückgestrahlten Lichtes.

Der Einfluss der Oberflächenstruktur, wie bereits in dem Abschnitt „Reflexion“ beschrieben, hängt von der Rauheit des Materials ab. Entscheidend dabei ist, ob das Signal zurück zum Empfänger oder ausschließlich in andere Richtungen reflektiert wird. Ein besonderes Problem stellen poröse Oberflächen wie Schnee oder Styropor dar, da dort die Strahlung in Hohlräume eindringt, was zu verfälschten Distanzen führt. Zudem gibt

es Oberflächenarten wie zum Beispiel Teppich, bei denen sich die Frage stellt, in welcher Höhe die Oberfläche definiert wird. (Kern, 2003)

Auch die Umgebungsbeleuchtung wirkt sich oft ungünstig auf die erzielten Messergebnisse aus. Die besten Ergebnisse ergeben sich bei einer Messung in Dunkelheit, da dort keine negative Beeinträchtigung durch eine Beleuchtung gegeben ist. Erst mit zunehmender Umgebungsbeleuchtung, zum Beispiel durch starke Sonneneinstrahlung, wird die interne Verarbeitung im Empfänger durch die erhöhte Energiedichte des Strahls stark beeinträchtigt.

Intensität

Die Intensität beschreibt grundsätzlich wie stark ein Objekt reflektiert. Sie ist abhängig davon, wie stark die in diesem Kapitel behandelten äußeren Einflussfaktoren auf die reflektierten Lasersignale wirken. Je größer die äußeren Einflüsse, desto geringer die Intensität. Sie wird vom Gerät registriert und neben den geometrischen Informationen als weitere Messgröße an den Nutzer weitergegeben.

Die Intensitätswerte des von den Oberflächen reflektierten Laserlichtes werden in Form von Intensitätsbildern festgehalten, die in der Regel in Graustufen oder Falschfarben dargestellt werden. Wie in Abbildung 15 zu sehen, ist der Intensitätswert am glatten Gestein relativ gering (rote Darstellung), während an den rauen Mauersteinen eine höhere Intensität vorliegt (grüne Darstellung).

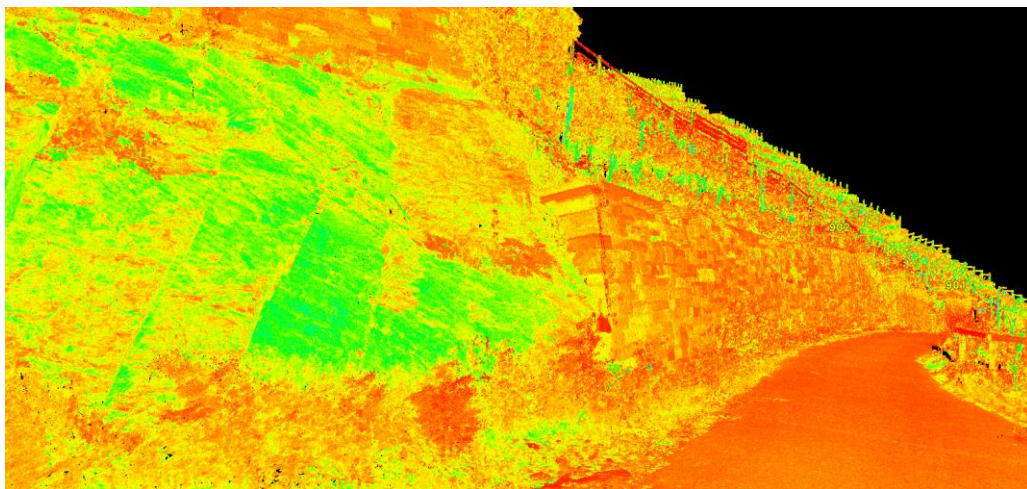


Abbildung 15: Regenbogenintensität

4.2 Leica ScanStation P40

Zur terrestrischen Laserscan-Aufnahme der Weinbergssteillagen in Walporzheim an der Ahr wurde die Leica ScanStation P40 (Abbildung 16), bereitgestellt vom i3mainz, verwendet.



Abbildung 16: Leica ScanStation P40 (Leica Geosystems AG, 2019)

Der Laserscanner der Firma Leica Geosystems AG liefert eine sehr gute 3D-Datenqualität mit einer Scanrate von bis zu einer Millionen Punkten pro Sekunde. Die hohe 3D-Lagegenauigkeit von 3 Millimetern auf 50 Metern wird durch einen Zwei-Achs-Kompensator ermöglicht. Zur Distanzmessung wird ein Hochgeschwindigkeits-EDM verwendet, welches durch die von Leica entwickelte WFD-Technologie optimiert wird. Der Laserstrahl des Instrumentes liegt im Bereich der Laserklasse 1 und somit in einem nicht sichtbaren Wellenlängenbereich. Die maximale Reichweite bei Reflektivität beträgt 270 Meter und es kann in einem Sichtfeld von 360° in der Horizontalen und maximal 290° in der Vertikalen gemessen werden. Die integrierte Kamera ermöglicht HDR-Aufnahmen (High Dynamic Range) bei einer Auflösung von vier Megapixeln, wobei auch eine externe Kamera angeschlossen werden kann. Es kann bei Temperaturen zwischen -20°C und 50°C gemessen werden, wobei eine Betriebszeit von circa sechs Stunden erreicht wird. Die integrierte Scan-Steuerung und die Auswahl verschiede-

dener anderer Funktionen erfolgt über einen integrierten Vollfarb-Touchscreen. Zu den Funktionen gehören unter anderem: Freie Stationierung, Polygonzug, Zielmarkenerfassung, Scanbereichdefinition, Prüfung und Justierung von Winkelparametern, Neigungskompensation und Reichweitenversatz. (Leica Geosystems AG, 2019)

Zur Messung wurde ein besonders massives Dreibein-Stativ wegen des relativ hohen Gewichts von circa 13 Kilogramm verwendet.

4.3 Messablauf

Aufgrund der extremen Steillage im Weinberg ist es nicht möglich sich mit dem TLS zwischen den Weinreben aufzustellen, da ein sicherer Stand nicht garantiert werden kann. Daher muss sich mit der Verteilung der Standpunkte auf die befestigten Wege beschränkt werden. Um das Gebiet möglichst flächenhaft abzuscannen, wird am Fuß des Weinbergs von zwei Standpunkten aus und auf dem Weg auf mittlerer Höhe von vier Standpunkten aus gemessen.

Damit bei der Auswertung die Verknüpfung der Laserscanstandpunkte möglich ist, müssen von den Standpunkten mindestens drei günstig verteilte Targets gemessen werden. Die Anordnung sollte dabei ähnlich einer freien Stationierung erfolgen, so dass der Standpunkt sich innerhalb des Umringspolygons der Verknüpfungspunkte befindet. Erst dann lassen sich die lokalen Koordinaten in das Koordinatensystem der Passpunkte transformieren. Eine derartige Transformation nennt man Ähnlichkeitstransformation, bei der sieben Parameter (drei Transformations-, drei Rotations- und ein Maßstabparameter) verwendet werden.

Als Verknüpfungspunkte werden lediglich die neun zuvor georeferenzierten Punkte verwendet, welche durch Rohre mit Kappen vermarktet wurden. Mithilfe von Lotstäben und Stabstativen werden diese in einer Höhe von 1,60 Metern mit Targets ausgestellt.

Die Aufnahme der Weinbergsmauern wird an drei Tagen durchgeführt, wobei die Messungen des ersten Tages verworfen werden müssen, da eine zu hoch gewählte Auflösung zu Problemen bei der Auswertung führt. So entsteht eine zu große Datenmenge, die die zur Verfügung stehenden Rechner nicht verarbeiten können.

Zu Beginn werden die Targets jeweils mit Lotstab und Stabstativ aufgestellt und zu den geplanten TLS-Standpunkten ausgerichtet. Anschließend wird das Messinstrument aufgestellt und die notwendigen Einstellungen getroffen. Dazu gehört das Job anlegen, sowie die Auswahl des Messgebiets, der Auflösung und der Messdistanz.

Da ein 360°-Scan nicht notwendig ist, wird bei der Auswahl des Messgebiets lediglich der Bereich der gemessen werden soll, gewählt. Die Einstellung der Vertikalen von -55° bis 90° wird stets beibehalten, nur die Horizontale wird auf den jeweiligen Abschnitt begrenzt, um die Messzeit gering zu halten. Es wird für alle Scans eine Auflösung von 3,1 Millimeter auf 10 Meter gewählt, da eine höhere Auflösung zu Problemen bei der Auswertung führt. Besonders von den Standpunkten, die auf einer großen Distanz messen müssen, würde dies Sinn machen, da je größer der Abstand, desto größer ist der Punktabstand untereinander. Das führt dazu, dass mit einer Auflösung von 3,1 Millimeter bei einer Entfernung von 150 Metern der Punktabstand 4,6 Zentimeter beträgt, während bei einer Auflösung von 1,6 Millimeter ein Abstand von 2,4 Zentimetern erreicht werden kann. Jedoch würde dann eine entsprechend deutlich größere Datenmenge entstehen.

Aufgrund der großen Distanzen wird zur elektrooptischen Distanzmessung die maximale Reichweite von 270 Metern eingestellt. Auf die geräteinterne Bildaufnahme wurde verzichtet, da die Bildauflösung für die zu messende Entfernung zu gering ist, sich die Messzeit und die Datenmenge erheblich steigern würde und das Gebiet ohnehin photogrammetrisch erfasst werden soll.

Nach der vollständigen Eingabe der Einstellungen wird der Scan gestartet. Dieser Prozess dauert pro Standpunkt circa zwei bis zehn Minuten, abhängig von der Größe des Scanbereichs und der Entfernung zum Objekt. Deutlich zeitintensiver ist der Feinscan der Zielmarken, welcher durchgeführt wird, um die Verknüpfung der Standpunkte bei der späteren Auswertung zu erleichtern. Beim Feinscan wird zunächst über das Bedienfeld in der Punktwolke das Target gesucht und ausgewählt. Anschließend wird die Target-ID, der Target-Typ und die Höhe eingegeben, woraufhin der Laserscanner die Zielmarke mit der höchsten Auflösung abscannt. Sobald der Feinscan abgeschlossen ist zeigt der Scanner an, ob die Zielmarke erkannt wurde oder nicht. Dieser Vorgang wird

für jedes auffindbare Target und jeden Standpunkt wiederholt. Die sechs Standpunkte des Laserscans sind in Anhang 10.2 rot markiert.

Um die spätere Auswertung zu vereinfachen ist bei der Messung zu beachten, dass temporäre Objekte, wie zum Beispiel die Messausrüstung oder Personen, nicht mit aufgenommen werden.

Nachdem die Aufnahme abgeschlossen ist, werden die Daten als Leica-ScanStation-Projekt auf einen USB-Stick übertragen. Die Datenmenge für die insgesamt sechs Standpunkte beträgt 2,8 Gigabyte.

4.4 Auswertung

Im folgenden Abschnitt wird auf die Auswertung der vom terrestrischen Laserscanner erhobenen Daten mittels des Programmes Cyclone eingegangen.

4.4.1 Import der Punktwolken

Nachdem die Aufnahme des Weinbergs mittels des Laserscanners ScanStation P40 erfolgt ist, wird die Auswertung mit dem Programm Cylone, ebenfalls ein Produkt der Leica Geosystems AG, durchgeführt. Das ermöglicht ein einfaches Einlesen und Verarbeiten der Daten.

Für den Import wird zunächst eine neue Datenbank angelegt, in der das gesamte Datenpaket eingelesen wird. Anschließend wird für jeden Standpunkt ein eigener Ordner angelegt, welcher jeweils entsprechend Abbildung 17 in Unterordner unterteilt ist.

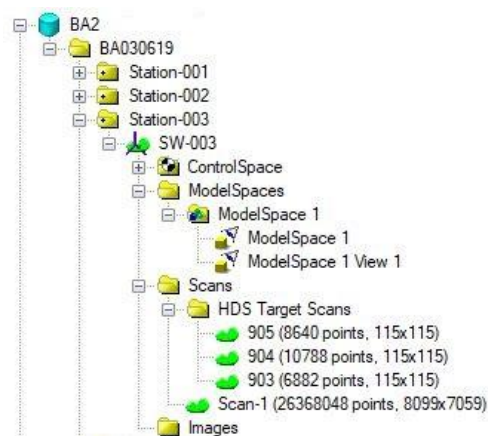


Abbildung 17: Datenstruktur in Cyclone

Im „ControlSpace“ wird dokumentiert ob der Standpunkt bereits über eine Registrierung mit anderen Punktwolken verknüpft wurde. Die Darstellung im Ordner „ModelSpace“ ermöglicht es die Punktwolke zu bearbeiten, während der Ordner „Scans“ die tatsächlichen Daten der Punktwolken enthält. In ihm sind neben den geometrischen Informationen auch die Feinscans der Targets enthalten. Der „Images“-Ordner verbleibt leer, da keine Bildaufnahmen durchgeführt wurden.

4.4.2 Registrierung der Punktwolken

Als Registrierung wird der Prozess zur Verknüpfung mehrerer Punktwolken bezeichnet. Das Ziel ist es eine Gesamtpunktwolke mit einem einheitlichen Koordinatensystem zu erhalten.

Um eine Registrierung durchzuführen, wird im Projekt eine „Registration“ erstellt in die die einzelnen Scans eingelesen werden. Zusätzlich muss die TXT-Datei mit der Target-ID, dem Rechts- und Hochwert sowie der Höhe der georeferenzierten Punkte importiert werden, um den Anschluss an das korrekte Koordinatensystem zu gewährleisten. Da sich die Registration auf dieses übergeordnete System beziehen soll, wird diese Datei als Referenzsystem bestimmt. Da der Feinscan der Targets direkt bei der Aufnahme durchgeführt wurde, müssen die Verknüpfungspunkte nicht mehr manuell gesetzt werden. Das hat zur Folge, dass Cyclone diese automatisch erkennt und über die beim Scan eingegebene Target-ID zuordnen kann. Daher kann ohne weitere Vorarbeiten der Befehl „Auto-Add-Constraints“ durchgeführt werden, der die erkannten Targets der Registration hinzufügt. Die anschließend durchgeführte Registrierung wird von Cyclone vollautomatisch durchgeführt. Dabei werden die Scans, bei denen die gleichen Targets aufgenommen wurden, miteinander verknüpft. Die vorhandenen Abweichungen zwischen den Zielmarken werden als 3D-Restklaffe (Error in Abbildung 18) und als Abweichung in X-, Y- und Z-Richtung (Error-Vector in Abbildung 18) angegeben.

Die 3D-Restklaffe liegt bei der Registrierung der einzelnen Scans untereinander überwiegend unter einem Zentimeter und es sind keine Auffälligkeiten erkennbar. Da die Abweichungen im Toleranzbereich liegen, besteht kein Grund einen Wert ausschließen.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
904	Station-003: S...	Station-010: S...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.009 m	(0.002, -0.001, 0.009) m
903	Station-003: S...	Station-005: S...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.003 m	(-0.002, -0.002, 0.000) m
903	Station-003: S...	Station-006: S...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.005 m	(-0.001, -0.005, -0.001) m
903	Station-003: S...	Station-008: S...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.005 m	(-0.002, -0.005, 0.000) m
903	Station-003: S...	Station-009: S...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.009 m	(0.001, 0.004, -0.008) m
903	Station-003: S...	Station-010: S...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.007 m	(0.000, 0.002, -0.007) m
904	Station-003: S...	Station-005: S...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.005 m	(0.002, 0.003, -0.003) m
904	Station-003: S...	Station-009: S...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.009 m	(0.001, 0.003, 0.008) m
903	Station-005: S...	Station-006: S...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.001, -0.003, -0.001) m
903	Station-005: S...	Station-008: S...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.000, -0.003, 0.000) m
903	Station-005: S...	Station-009: S...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.010 m	(0.003, 0.006, -0.008) m
903	Station-005: S...	Station-010: S...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.008 m	(0.002, 0.004, -0.007) m
901	Station-005: S...	Station-006: S...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.003 m	(0.001, 0.000, -0.003) m
901	Station-005: S...	Station-008: S...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.005 m	(0.001, 0.001, -0.005) m

Abbildung 18: Ausschnitt aus dem Ergebnis der Registrierung

Beim Einlesen der UTM-Koordinaten (Universale Transversale Mercatorprojektion) aus der Georeferenzierung fällt auf, dass die größte 3D-Restklaffe lediglich 3,2 Zentimeter beträgt (Abbildung 19), was für eine 3D-Koordinate ein sehr guter Wert ist. Die größten Abweichungen ergeben sich durch die Z-Richtung, was auf die Messgenauigkeit der GNSS-Messung zurückzuführen ist. In der Lage beträgt die maximale Abweichung lediglich 1,4 Zentimeter. Da keine Ausreißer im Ergebnis der Registrierung ersichtlich sind, kann auf eine Anpassung der Koordinatendatei verzichtet werden.

Constraint ID	ScanWorld	ScanWorld	Type	Status	Weight	Error	Error Vector
901	ScanWorld [R...	Passpunkte_B...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.015 m	(0.007, 0.008, 0.010) m
904	ScanWorld [R...	Passpunkte_B...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.008 m	(-0.001, -0.005, 0.006) m
905	ScanWorld [R...	Passpunkte_B...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.024 m	(-0.014, 0.001, 0.020) m
903	ScanWorld [R...	Passpunkte_B...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.007 m	(0.002, 0.003, -0.006) m
902	ScanWorld [R...	Passpunkte_B...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.011 m	(0.002, 0.006, -0.009) m
909	ScanWorld [R...	Passpunkte_B...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.016 m	(0.007, 0.001, -0.014) m
910	ScanWorld [R...	Passpunkte_B...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.032 m	(0.003, -0.008, -0.031) m
908	ScanWorld [R...	Passpunkte_B...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.006 m	(0.004, -0.004, 0.003) m
906	ScanWorld [R...	Passpunkte_B...	Coincident: Vertex - Vertex	On	1.0000	0.024 m	(-0.011, -0.002, 0.022) m

Abbildung 19: Ergebnis der Registrierung der Koordinatendatei

Da das Ergebnis zufriedenstellend ist, wird die Registrierung mit dem Befehl „Freeze“ festgesetzt, woraufhin eine neue „ScanWorld“, also eine aus allen Scans zusammengesetzte Punktwolke erstellt wird. (Abbildung 20).

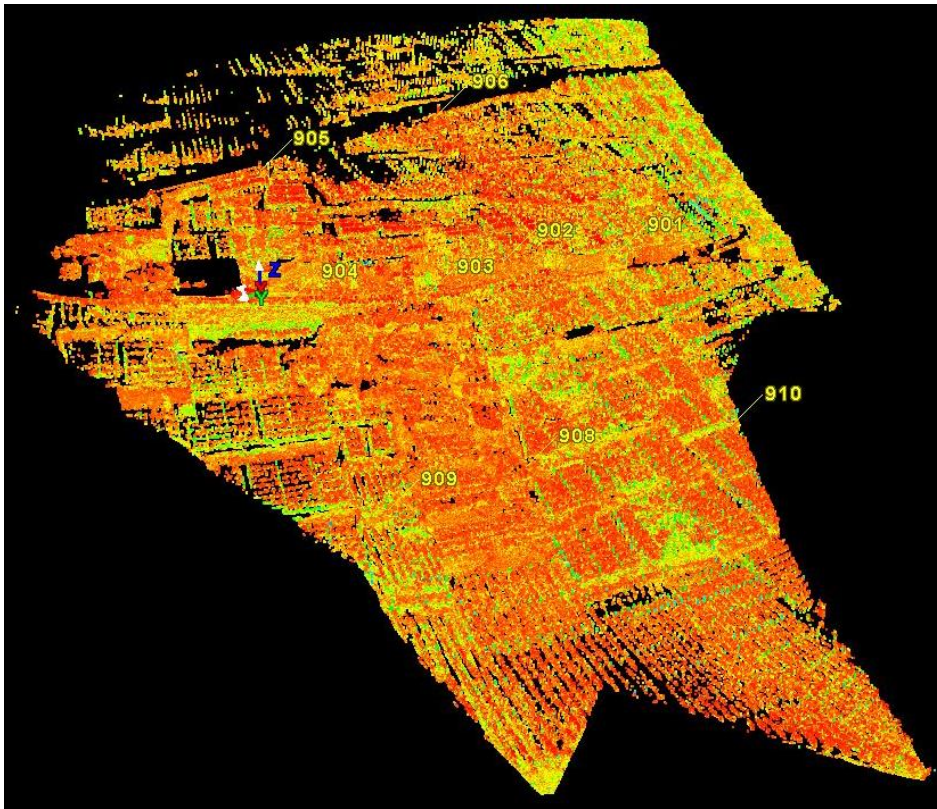


Abbildung 20: Gesamtpunktwolke nach der Registrierung

4.4.3 Bearbeitung der Punktwolken

Um die Datenmenge zu Beginn der Bearbeitung zu reduzieren, wird die Funktion „Estimate Cloud Normals“ genutzt. Die Option, dass Punkte in der Nachbarschaft jedes Punktes betrachtet werden, um sie einer geometrischen Oberfläche anzunähern wird jedoch nicht genutzt. Es wird lediglich der Teil der Funktion genutzt, der die Originaldatenmenge intelligent ausdünn, ohne die geometrische Qualität der Punktwolke zu stark zu beeinträchtigen. Dabei werden hauptsächlich die Teile betrachtet, bei denen sich mehrere Scans überlappen, da dort die doppelte Anzahl an Punkten kaum bis gar keinen Mehrwert hat. Als Ergebnis erhält man eine kleinere Datenmenge und eine Punktwolke die wieder annähernd eine Rasterstruktur aufweist.

Anschließend werden temporäre Objekte zum Beispiel Messausrüstung oder Personen und die Umgebung außerhalb des festgelegten Messgebiets aus der Punktwolke entfernt. Dies geschieht über den „Fence“-Modus, in dem man Punkte in Rechteck-, Kreis- oder Polygonform selektieren und löschen kann. Ebenso müssen für den späteren Ver-

gleich mit den Daten der photogrammetrischen Erfassung die Tilt and Turn Targets mit Reflektorstab und Stabstativ entfernt werden.

Somit erhält man entsprechend Abbildung 21 die fertige Punktwolke.

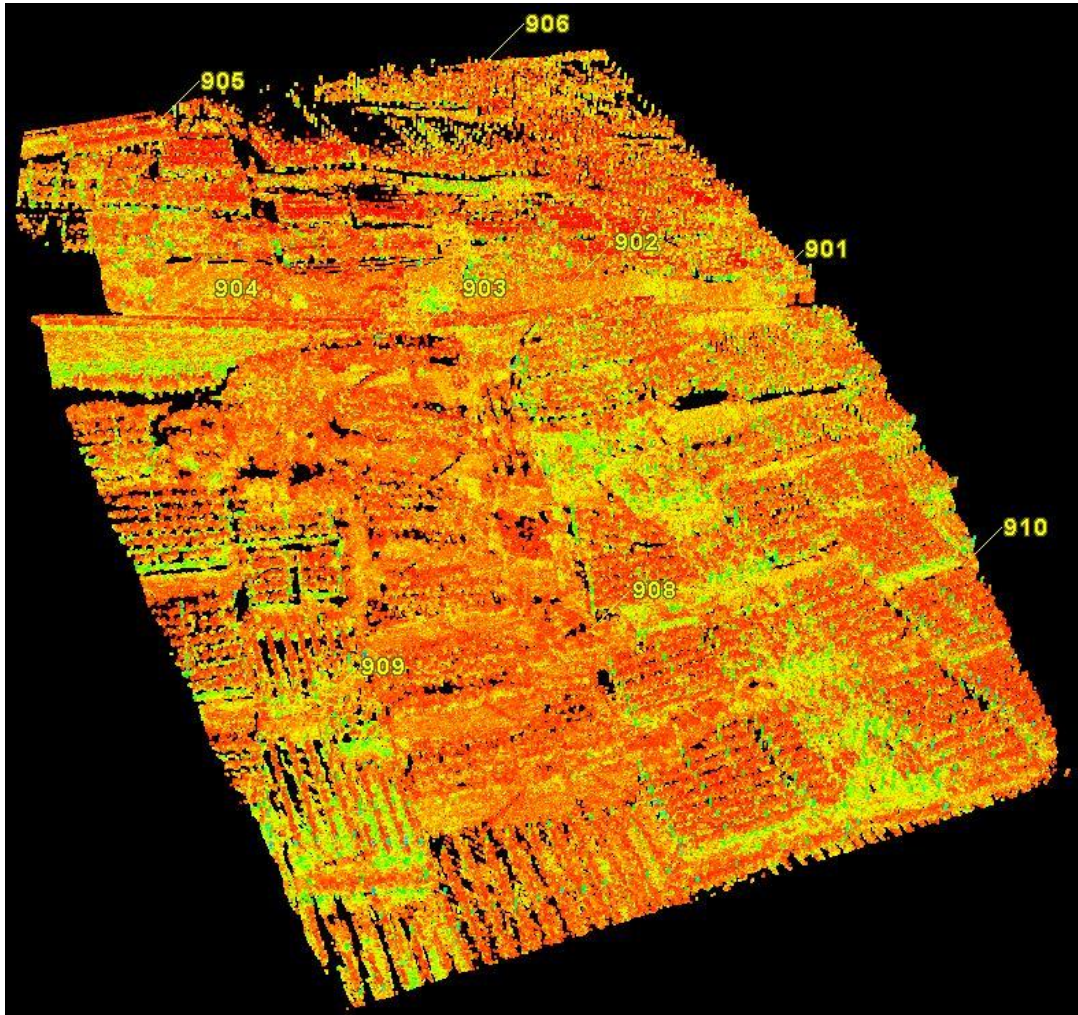


Abbildung 21: Bearbeitete Laserscan-Punktwolke

Aufgrund der Nähe einiger Standpunkte zu den neuen Weinbergsmauern, sind bei diesen die Struktur im 3D-Modell sehr gut zu erkennen (Abbildung 22 und 23).

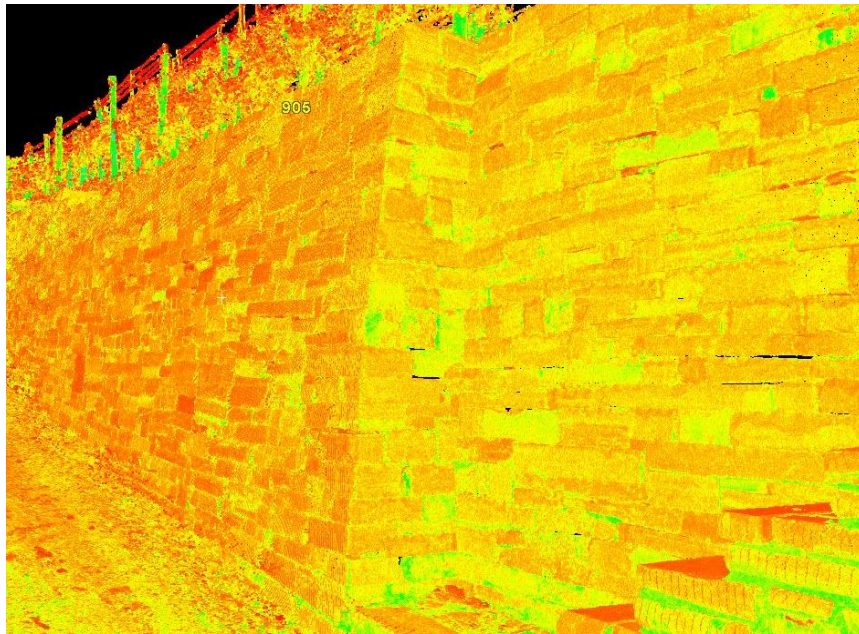


Abbildung 22: Mauerstruktur in der TLS-Punktwolke

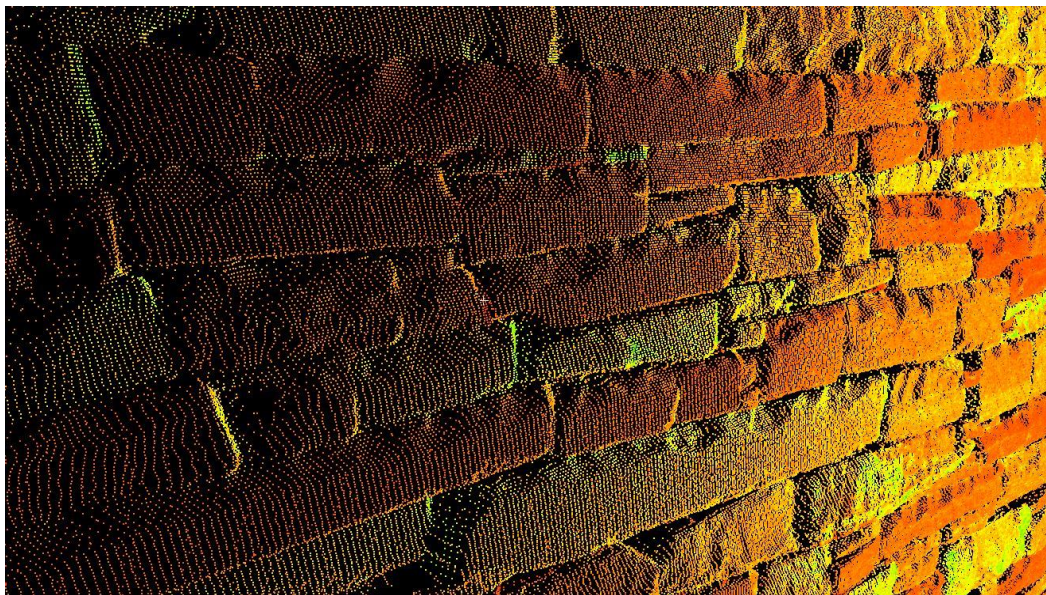


Abbildung 23: Detailaufnahme der Mauerstruktur in der TLS-Punktwolke

Abschließend wird die Gesamtpunktwolke im PTS-Format exportiert. Die Datei ist 1,5 Gigabyte groß und enthält mehr als 34 Millionen Punktkoordinaten.

5 Grundlagen der Photogrammetrie

In der Photogrammetrie wird durch das mathematische Auswerten von photographisch erzeugten Bildern die Form und Lage von Objekten bestimmt. Es handelt sich hierbei um ein berührungsloses Messverfahren mit dem Teile der Erdoberfläche, sowie alle darauf befindlichen Objekte, deren räumliche Lage und geometrische Eigenschaften bestimmt werden. Die durch die Kamera erhobenen Aufnahmen können zum einen mittels photographischer Prozesse in der zweidimensionalen Bildebene und zum anderen als 3D-Photomodelle abgebildet werden. Um dies zu verwirklichen sind jedoch einige Berechnungen notwendig.

Dieses Kapitel soll die mathematischen Grundlagen, die für eine photogrammetrische Messung benötigt werden, beleuchten. Als Grundlage dieser Zusammenschrift wurde das Kapitel 9 „Photogrammetrie und Kartographie“ aus der Fachliteratur „Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen“, 8. Auflage von Berthold Witte und Peter Sparla verwendet (Witte & Sparla, 2015).

5.1 Mathematische Beziehungen

Die Zentralprojektion ist ein mathematisches Gesetz, welches beschreibt, wie Aufnahmen von dreidimensionalen Objekten in der zweidimensionalen Ebene abgebildet werden. Die sichtbaren Objektpunkte P_i sind in den Messbildern als Bildpunkte P'_i wiederzufinden, wobei die Abbildungsstrahlen durch das gemeinsame Projektionszentrum O gehen. Hierbei spricht man zunächst von einem Negativ, welches auf der anderen Seite des Projektionszentrums liegt. Für die Beschreibung des mathematischen Abbildungsmodells wird dieses gedanklich in ein Positiv umgewandelt, wobei der lotrechte Abstand zum Projektionszentrum gleich bleibt.

Für die weitere Berechnung werden zwei Koordinatensysteme eingeführt, siehe Abbildung 24. Zur Koordinierung der Objektpunkte P_i , wird das dreidimensionale, kartesische Objektkoordinatensystem S_O verwendet. Dieses Koordinatensystem ist in der Regel lokal definiert und wird mit X_i , Y_i und Z_i beschrieben. In diesem System werden die Endergebnisse der photogrammetrischen Auswertung aufgezeigt.

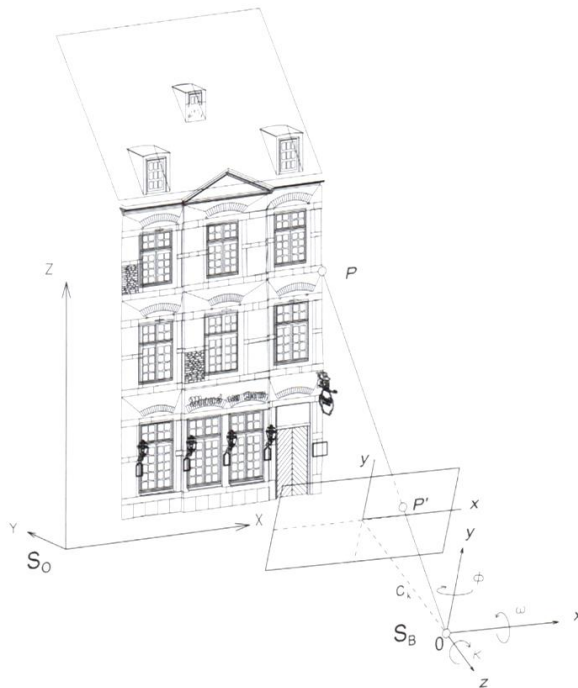


Abbildung 24: Mathematische Beziehung zwischen Bild- und Objektpunkten

Das Bildkoordinatensystem S_B ist das zweite Koordinatensystem. Dieses System ist ebenso dreidimensional, wobei hier die Besonderheit besteht, dass alle Bildpunkte P'_i denselben z -Wert aufweisen. Dadurch, dass die z -Achse senkrecht auf der Bildebene steht, ist der senkrechte Abstand des Projektionszentrums zur Bildebene gleich der Kamerakonstante c_k . Da der Ursprung des Koordinatensystems mit dem Projektionszentrum O zusammenfällt und die x - y -Ebene parallel zur Bildebene liegt, werden die Bildpunkte P'_i im Bildsystem mit x_i , y_i , und c_k beschrieben.

Da der Aufnahmeort frei wählbar ist, ist das Bildkoordinatensystem gegenüber dem Objektkoordinatensystem verdreht. Diese Rotation wird mit den Drehwinkeln ω (um X), φ (um Y) und κ (um Z) beschrieben. Mit diesen drei Winkeln kann die Verdrehung von S_B in S_O überführt werden. Mittels der Kollinearitätsgleichung kann der funktionale Zusammenhang zwischen den Objektpunkten P_i in S_O und den Bildpunkten P'_i in S_B hergestellt werden.

$$x_i = x_h - c_k \cdot \frac{r_{11} \cdot (X_i - X_0) + r_{21} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{31} \cdot (Z_i - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_i - X_0) + r_{23} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_i - Z_0)} + dx$$

$$y_i = y_h - c_k \cdot \frac{r_{12} \cdot (X_i - X_0) + r_{22} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{32} \cdot (Z_i - Z_0)}{r_{13} \cdot (X_i - X_0) + r_{23} \cdot (Y_i - Y_0) + r_{33} \cdot (Z_i - Z_0)} + dy$$

„Mit dem Begriff „kollinear“ drückt man aus, dass die drei Punkte P_i , P'_i und O im Moment der Aufnahme auf einer gemeinsamen Geraden liegen. In diesen Gleichungen spielen neben den Objektkoordinaten (X_i, Y_i, Z_i) und den Bildkoordinaten (x_i, y_i) folgende Parameter eine Rolle“ (Witte & Sparla, 2015, S. 343):

- X_0, Y_0, Z_0 : Koordinaten des Projektionszentrums O (=Aufnahmeort) in S_O
- r_{ij} : Komponenten der Rotationsmatrix R , die von den drei unabhängigen Drehwinkeln ω , φ und κ abhängt
- c_k : Kamerakonstante
- x_h, y_h : Koordinaten des Bildhauptpunktes H in S_B
- dx, dy : Bildfehler

Als äußere Orientierung wird in der Photogrammetrie die Lage und Position der Aufnahme in Bezug auf den Aufnahmegegenstand selbst beschrieben. Die Position wird mit den Koordinaten des Projektionszentrums (X_0, Y_0, Z_0) beschrieben. Die Lage der Aufnahme wird mit den Drehwinkeln ω , φ und κ beschrieben. Bei jeder Aufnahme ist von einer unterschiedlichen äußeren Orientierung auszugehen. Aus diesem Grund muss diese bildindividuell bestimmt werden.

Als innere Orientierung werden die Kameraparameter bezeichnet. Diese beschreiben die Position des Projektionszentrums O bezogen auf die Bildebene. Die Parameter c_k , x_h , y_h dx und dy können als konstant angesehen werden und müssen folglich vorab kalibriert

werden. Die Kalibrierung der Kameradaten stellt also die eigentliche innere Orientierung dar.

Mit Hilfe der Kollinearitätsgleichung und den Parametern der äußeren sowie inneren Orientierung kann zu jedem Objektpunkt P_i der entsprechende Bildpunkt P'_i bestimmt werden.

5.2 3D-Triangulation

Um ein Modell zu erstellen, werden 3D-Objektkoordinaten benötigt. Da diese nicht anhand eines einzelnen Bildes bestimmt werden können, werden mehrere Aufnahmen erzeugt. Die mathematische Auswertung beruft sich auf das Verfahren der Triangulation. Dies ist das Grundprinzip zur Berechnung von photogrammetrisch bestimmten 3D-Punkten.

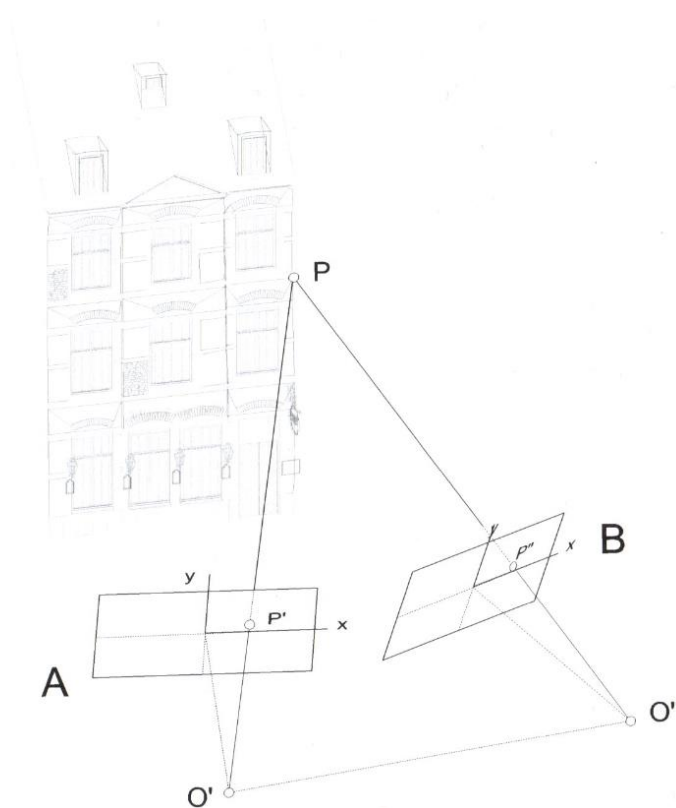


Abbildung 25: 3D-Punktbestimmung mittels Triangulation

In Abbildung 25 sind zwei Aufnahmen (A und B) dargestellt. Diese Aufnahmen haben nebeneinanderliegende Standorte mit den dazugehörigen Projektionszentren O' und O'' . Der zu sehende Objektpunkt P wird in beiden Aufnahmen als P' und P'' wiedergegeben. Hierbei wird angenommen, dass für beide Bilder die innere und äußere Orientierung bereits kalibriert bzw. berechnet worden ist. Mittels der Orientierung und den gemessenen Bildpunktkoordinaten können nun die entsprechenden räumlichen Bildstrahlen rekonstruiert werden. Dadurch, dass O' , O'' und P ein räumliches Dreieck bilden, kann durch das Vorwärtsschneiden der Bildstrahlen die 3D-Koordinaten von P berechnet werden.

Sind die Aufnahmeorte in einem rechten Winkel zueinander angeordnet, so steigt die Punktgenauigkeit von P . Dies hat jedoch den Nachteil, dass einige Objektbereiche verdeckt bleiben. Infolgedessen muss die Anzahl der Bilder erhöht werden, damit die Aufnahmeorte näher beieinander liegen und der Verdeckungsgrad möglichst gering gehalten wird. Die Schwierigkeit besteht also darin, einen Kompromiss zwischen optimaler Anordnung der Bilder und einem möglichst niedrigen Verdeckungsgrad zu finden.

Darüber hinaus ist der Bildmaßstab M_b nicht zu verachten. Dieser ist eine ausschlaggebende Größe für die Messgenauigkeit. Je größer der Bildmaßstab gewählt wird, umso besser können Details in den Bildern erkannt und lokalisiert werden. Um dies zu erreichen, wird entweder die Aufnahmeentfernung möglichst geringgehalten oder es wird ein Objektiv mit großer Brennweite eingesetzt, sodass die Kamerakonstante möglichst groß ist. Ein zu großer Bildmaßstab hat den Effekt, dass die abgedeckte Objektfläche pro Bild sinkt. Es muss also die Anzahl der Aufnahmen erhöht werden, welches simultan einen höheren Arbeitsaufwand mit sich bringt. Hier muss folglich ein Kompromiss zwischen den aufgeführten Kriterien gefunden werden.

$$M_b = \frac{c_k}{E} = \frac{d'}{d}$$

In der oben genannten Formel ist zu erkennen, dass der Bildmaßstab das Verhältnis zwischen der Kamerakonstante c_k und der Aufnahmeentfernung E beschreibt. Dementsprechend ist der Bildmaßstab der Quotient aus der Strecke d' im Bild und der entsprechenden Strecke d im Objektraum.

5.3 Mehrbildauswertung

Da es sich bei einer Luftbildaufnahme in der Regel um einen Bildverband handelt, wird in solch einem Fall die Mehrbildauswertung angewendet. Bevor mit der eigentlichen Auswertung begonnen werden kann, muss zunächst die Orientierung aller Aufnahmen berechnet werden.

Bei der Mehrbildorientierung werden in einem Verfahren die Positionen und Rotationen der Kameras zum Zeitpunkt der Aufnahmen im Nachhinein rechnerisch rekonstruiert. Dieser Arbeitsschritt wird auch Bündel- beziehungsweise Bündelblockausgleichung genannt. „Bildlich gesprochen werden hierbei die Strahlenbündel der Aufnahme im Zuge einer Ausgleichsrechnung so aufeinander eingepasst, dass sich die Strahlen von korrespondierten Punkten bestmöglich schneiden. Mathematisch gesehen findet eine Verkettung von räumlichen Rückwärtsschnitten statt“ (Witte & Sparla, 2015, S. 373).

Für die Berechnung müssen die in Abschnitt 5.1 erwähnten Kollinearitätsgleichungen literarisiert werden. Folgende Gleichungen ergeben sich als Beobachtungsgleichungen der Bildkoordinaten (x_i, y_i) für die Ausgleichberechnung.

$$x_i = f(c_k, x_h, dx, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, X_i, Y_i, Z_i)$$

$$y_i = f(c_k, y_h, dy, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, X_i, Y_i, Z_i)$$

Pro Bildpunkt ergeben sich also zwei Beobachtungsgleichungen, die sich aus folgenden drei Parametergruppen zusammensetzen:

- Innere Orientierung (c_k, x_h, dx)
- Äußere Orientierung $(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa)$
- Objektpunktkoordinaten (X_i, Y_i, Z_i)

Während der Linearisierung werden Näherungswerte geschätzt, da in diesem Ausgleichungssystem neun Parameter als unbekannt auftreten. Es sind pro Bild je sechs Parameter der äußeren Orientierung und pro Neupunkt je eine Koordinate, bestehend aus X, Y und Z zu beachten. Falls die Parameter der inneren Orientierung nicht vorliegen, besteht die Möglichkeit eine Simultankalibrierung im Rahmen der Mehrbildorientierung durchzuführen.

Als Resultat der Orientierungsberechnung werden die ausgeglichenen Parameter der äußeren und gegebenenfalls inneren Orientierung aufgezeigt. Als Endergebnis der Mehrbildauswertung stehen die ausgeglichenen Koordinaten der Neupunkte mit den dazugehörigen Standartabweichungen als Genauigkeitsangabe zur Verfügung.

6 Photogrammetrische Aufnahme

Die UAV – Photogrammetrie hat sich in den letzten Jahren bei der Bilddatenverarbeitung etabliert. Die Abkürzung UAV bedeutet „Unmanned Aerial Vehicle“ übersetzt „Unbemanntes Luftfahrzeug“. Daraus lässt sich schließen, dass es sich hier um Luftfahrzeuge handelt, die sich ohne einen Piloten an Bord in der Luft bewegen. Stattet man ein UAV mit einer Kamera aus, sind die Grundvoraussetzungen für den photogrammetrischen Zweck erfüllt. In diesem Zusammenspiel ergibt sich die Möglichkeit schwer zugängliche Bereiche wie zum Beispiel Deponien, Hangrutschungen oder große Gebäude photogrammetrisch zu erfassen.

Hierzu eignen sich besonders die sogenannten Rotorflügler. Diese Multikopter sind mit zwei, vier, sechs, acht oder mehr Rotoren ausgestattet. Sie besitzen die Eigenschaft senkrecht zu starten und können im Schwebeflug gesteuert werden. Durch eine Traglast zum Beispiel in Form einer Kamera steigen die Ansprüche an die Energieversorgung. Dies hat die Folge, dass in diesem Fall eine leichte Kamera mit entsprechend kleiner Sensorgröße eingesetzt wird. Aufgrund der Flexibilität, Preis, Energieverbrauch und Aufwand ist die UAV-Photogrammetrie qualifiziert für Projekte mit einer geringen Gesamtfläche.

Eine Messdrohne ist für die Bestimmung der absoluten Position mit einem GNSS-Empfänger ausgestattet. Dies ermöglicht eine im Voraus angefertigte Flugplanung mit der Flugstrecke. Des Weiteren können hierbei, wie bei der Luftbildphotogrammetrie, Angaben zur Flughöhe, Längs- und Querüberdeckung gemacht werden. Nach entsprechender Flugplanung ist ein UAV in der Lage die Befliegung autonom durchzuführen. Mit den gewonnenen Aufnahmen und einer geeigneten Auswertesoftware können digitale Oberflächenmodelle, Orthophotos und 3D-Modellierungen erstellt werden. (Witte & Sparla, 2015)

In diesem Kapitel wird der Arbeitsablauf der Bildflugplanung, sowie die Erstellung der Aufnahmen und der photogrammetrischen Auswertung mit den verschiedenen Endprodukten näher beschrieben.

6.1 Flugvorbereitung

Um ein qualitativ hochwertiges Produkt aus einem Bildflug zu erzeugen, muss eine Vielzahl an Vorbereitungen getroffen werden.

Zu einer erfolgsversprechenden Flugvorbereitung gehören folgende Arbeitsschritte:

Erkundung bzw. Auswahl des Messgebietes, Auswahl der Ausrüstung für den Bildflug, Genehmigung für den Drohnenflug, Bestimmung der Passpunkte und die Flugplanung mit der Berechnung der Flugparameter. In diesem Kapitel werden die aufgezählten Punkte dargestellt und detailliert beschrieben.

Die Auswahl des Messgebietes und die Bestimmung der Passpunkte wurden bereits in den Kapiteln 2.3 und 3 erläutert.

6.1.1 Verwendete Kamera und Objektiv

Die Luftbildaufnahmen stellen die Grundlage für eine photogrammetrische Auswertung dar. Sie sind somit entscheidend für die Qualität der Endprodukte. Bildsensor, Objektiv und elektronische Bildverarbeitung sind die Hauptkomponenten, die anschließend die Qualität der Aufnahmen beeinflussen.

Für die Aufnahme der Bilder wird die Kamera Alpha 7R der Marke Sony an der vorgesehenen Halterung der Drohne befestigt. Die spiegellose Systemkamera ist mit einem 36,2 Megapixel auflösendem Exmor-COMOS-Sensor ausgestattet. Sie ist ISO erweiterbar und benutzt keinen Tiefpassfilter. In der Kamera ist ein Bionz-X-Bildprozessor verbaut. Der Kontrast Autofocus mit 25 Fokuspunkten ermöglicht folgende Aufnahmen: Einzelaufnahmen, Serienaufnahmen, Direkt-Manueller-Fokus, Tracking-Autofocus und Eye-Autofocus. Für einen Bildflug ist die Serienaufnahme relevant. Die Fotoausgabe erfolgt in einer 4K-Auflösung. Des Weiteren verfügt die Sony Alpha 7R über 13 digitale Bildeffekte und 13 Kreativstile. Die Kamera verfügt über eine Fernbedienung und ist zudem durch das Kameragehäuse aus Magnesium vor Staub und Spritzwasser geschützt. Die eingebaute Wasserwaage ermöglicht eine genaue Ausrichtung der Kamera. (dkamera, 2019)

Für den Bildflug wird an der Kamera ein 35mm Objektiv montiert.



Abbildung 26: Kamera Sony Alpha 7R (dkamera, 2019)

6.1.2 UAV

Die Suche nach einem geeigneten Fluganbieter stellt sich als eine der leichteren Aufgaben dar, da die Hochschule Mainz eine Drohne mit Piloten bereit stellt.

Für die Befliegung wird die Drohne RKM 8X von Rotor Konzept verwendet.

Die RKM zeichnet sich durch ihre Steifigkeit bei geringem Gewicht aus, da sie aus Vollkarbon besteht. Durch eine Sandwich-Bauweise werden positive Flugeigenschaften erreicht, sowie eine Verwindungssteife des Rahmens. Außerdem ist anzumerken, dass alle Rahmenteile einzeln austauschbar sind, was eine einfache und günstige Reparatur gewährleistet.

Die Drohne ist mit acht Motoren (T-Motoren MN3110 KV700) aus der Navigator Serie des Herstellers Tiger-Motor ausgestattet. Durch die acht Motoren kann ein Motorausfall gut kompensiert werden.

Über ein in die Centerplate integriertes Display kann beim Anschließen des Akkus die Einzelspannung optisch kontrolliert werden. Während des Flugs wird die Spannung über zwei voneinander unabhängige Spannungssensoren kontrolliert. Diese Spannungssensoren geben zudem ein optoakustisches Feedback an den Flugkontroller wenn der Akku leer wird. Beim Flugkontroller handelt es sich um einen ArduCopter, der eine leistungsstarke Steuerung gewährleistet.

Eine leistungsstarke Steuereinheit ermöglicht zudem ein automatisiertes Anfliegen von Punkten und ein automatisiertes Landen.

Zusätzlich zur Systemkamera, die an der RKM 8X montiert werden kann, besitzt die UAV eine fest im Rahmen verbaute starre Pilotenkamera.

Die RKM VZ3A Gimbal, ein zwei-Achs Brushless Gimbal, ermöglicht die Aufnahme einer Systemkamera vom Typ Sony Alpha 7, Sony Alpha 6000 oder Canon EOS M. Durch ein integriertes GPS/ Kompass uBlox 8 wird zu jedem aufgenommenen Bild eine Koordinate, sowie eine geschätzte Genauigkeit der Koordinate abgespeichert. (RotorKonzept, 2019)



Abbildung 27: Drohne RKM 8X und Gimbal (ArduPilot, 2019)

Technische Daten im Überblick:

- Spannweite: ca. 470 mm
- Gewicht: ca. 2.600 g
- Traglast: 1.000 g
- Flugdauer: bis 18 Minuten mit Sony Alpha 6000
- Flugkontroller: Pixhawk inkl. externem GPS/Kompass uBlox 8
- autonome Steuerung über PC / Tablet
- Motoren: T-Motor MN3110 KV700
- Motorregler: 20 A
- Luftschrauben: Aeronaut CAMCarbon light 12x5"
- Video-Sender: FPV-Sender 5,8 GHz mit einer Leistung von 25 mW (für den Gebrauch in Europa zugelassen)

- 2-Achs Brushless Gimbal für Systemkameras (Sony Alpha 6000 oder Canon EOS M), steuerbar auf der Pitch- und Roll-Achse, sowie Fernauslöser über Fernsteuerung und automatisiert über Flugcontroller (RotorKonzept, 2019)

6.1.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur definiert eine Drohne folgendermaßen:

„Unter einer „Drohne“ versteht man ein unbemanntes Fluggerät. Das Luftrecht unterscheidet zwischen unbemannten Luftfahrtsystemen und Flugmodellen. Gemäß § 1 Luftverkehrsgesetz handelt es sich bei unbemannten Luftfahrtsystemen um ausschließlich gewerblich genutzte Geräte. Flugmodelle sind hingegen privat, also zum Zwecke des Sports oder der Freizeitgestaltung genutzte Geräte“ (BMVI, 2019).

Die Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) regelt ausführlich Grundsätze und Beschränkungen für Luftfahrzeuge sowie deren Piloten in Deutschland. Neben allgemeinen Verkehrsregeln enthält diese unter anderem auch Regelungen über die Nutzung des Luftraums, Sichtflugregeln und besondere Meldepflichten. Der am 6. April 2017 eingefügte Abschnitt 5a behandelt den Betrieb von unbemannten Luftfahrtsystemen und Flugmodellen.

Bei der Benutzung einer Drohne bis zu fünf Kilogramm sind folgende Regelungen zu beachten.

Um bei einem Schadensfall den Halter feststellen zu können, müssen alle Drohnen von mehr als 0,25 kg mit Namen und Adresse des Eigentümers gekennzeichnet sein. Des Weiteren muss der Pilot einer Drohne ab 2 kg eine gültige Pilotenlizenz oder eine Bescheinigung durch eine vom Luftfahrt-Bundesamt anerkannte Stelle vorweisen können. Da das Gewicht der Drohne RKM 8X mehr als 2 kg beträgt, stellt die Hochschule Mainz einen Piloten zur Befliegung. Grundsätzlich ist für den Betrieb von unbemannten Luftfahrtsystemen unterhalb einer Gesamtmasse von 5 kg keine Erlaubnis erforderlich. Es ist jedoch notwendig, dass der Pilot eine Genehmigung des Drohnenstarts auf dem entsprechenden Grundstück vorweisen kann. Hierzu muss der Eigentümer des Grundstücks auf dem gestartet und gelandet wird dem Vorhaben ausdrücklich und nachweis-

lich zustimmen. Bei der Befliegung im Rahmen dieser Bachelorarbeit befindet sich das Flurstück des geplanten Start- und Landeplatzes im Besitz der Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler. Es wird ein Antrag auf Erteilung einer Flugerlaubnis formlos via E-Mail bei der entsprechenden Stadtverwaltung eingereicht. Dieser Antrag muss den Zeitraum der Befliegung, Grund der Befliegung und das betroffene Flurstück enthalten. Die entsprechende Aufstiegs Genehmigung für den Drohnenflug befindet sich in Anhang 10.3.

Außerhalb der Sichtweite des Steuerers ist der Betrieb von Drohnen unter 5 kg grundsätzlich verboten. Außerdem darf eine Flughöhe von 100 Metern nicht überschritten werden. Für unbemannte Luftfahrtsysteme gilt die Ausweichpflicht. Das heißt, dass Drohnen und Flugmodelle verpflichtet sind bemannten Luftfahrzeugen auszuweichen. Es gilt ein Betriebsverbot in und über sensiblen Bereichen wie z.B. Einsatzorten von Polizei und Rettungskräften, Krankenhäuser oder Menschenansammlungen. Der Mindestabstand zu Bundesfernstraßen, Bundeswasserstraßen und Bahnanlagen beträgt 100 Meter. In der Nähe des Messgebietes befindet sich die Bundesstraße B267. Bei der Flugplanung muss hier der vorgegebene Mindestabstand beachtet werden.

Aus datenschutzrechtlichen Bestimmungen ist es Drohnen mit ausgerüsteter Kamera verboten über Wohngrundstücke zu fliegen. (LuftVO, 2015, Abschnitt 5a)

6.1.4 Bildflugplanung

Die Bildflugplanung dient als elementare Grundvoraussetzung bevor eine Befliegung durchgeführt wird. Eine Kalkulation der verschiedenen Handlungsschritte und der gewünschten Flugparameter sind Voraussetzung für eine unproblematische Durchführung des Fluges. Um eine geeignete Qualität des Produktes zu erreichen, ist es hilfreich, verschiedene Varianten mit unterschiedlichen Parametern zu berechnen. Im Nachhinein findet eine Entscheidung im Hinblick auf die wirtschaftlichen Aspekte und die Qualität für einen geeigneten Lösungsansatz statt.

Aus gegeben Parametern (Werte der verwendeten Kamera, verwendetes Objektiv, Ausdehnung des Messgebietes), variablen Parametern (Flughöhe, -geschwindigkeit, Überdeckung, Kameraeinstellungen) und berechneten Parametern (Bildmaßstab, Bildseite im Gelände, Basis, Abstand der Flugachsen, Anzahl der Bilder/Streifen, Pixelgröße am

Boden und weitere Parameter) lassen sich mehrere Szenarien berechnen. Dies wird zunächst händisch in Excel und anschließend in der Planungssoftware „Mission Planner“ durchgeführt. Im Folgenden werden die notwendigen Arbeitsschritte zur erfolgreichen Flugplanung beschrieben.

Händische Flugplanung

Um ein Gefühl für den Zusammenhang der einzelnen Werte zu erlangen, werden im Voraus die einzelnen Parameter in Microsoft-Excel händisch berechnet. Die folgenden Berechnungen dienen außerdem als Vorlage für die spätere Auswertung in der Planungssoftware „Mission Planner“.

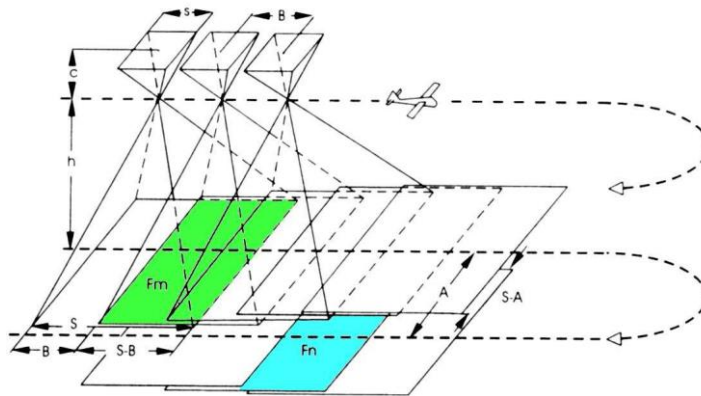


Abbildung 28: Bildflugplanung (Schlüter, 2017)

A → Abstand der Flugachse, Streifenabstand B → Basis bei der Aufnahme

c → Kamerakonstante

s → Bildseite im Bild

S → Bildseite am Boden

L → Länge des Blockes

Q → Querausdehnung des Blockes

h → Flughöhe über Grund

v → Fluggeschwindigkeit über Grund (Schlüter, 2017)

Die Zentralprojektion wird hier als mathematische Grundlage angewendet.

Da die Maße des Fluggebietes lediglich grob abgegriffen sind, dient die Berechnung in Excel lediglich als Anhaltspunkt. Die maximale Bildauflösung, die Sensorgröße sowie die Kamerakonstante sind feste Parameter, die sich aus dem Datenblatt der Kamera entnehmen lassen. Die Fluggeschwindigkeit, Flughöhe und Überdeckung sind variable Flugparameter, die ebenso maßgebend für die Qualität des Endproduktes sind. Hier wird auf Erfahrungswerte von früheren, vergleichbaren Bildflügen zurückgegriffen. Demnach ergeben sich für die Bildflugplanung folgende Parameter:

Fluggebiet					
Längsausdehnung des Blocks	$L =$	70000	mm	70	m
Querausdehnung des Blocks	$Q =$	100000	mm	100	m
Fläche des Blocks	$F =$	7000000000	mm ²	7000	m ²
Kameradaten					
Maximale Bildauflösung (lang)		7360	Bildpunkte		
Maximale Bildauflösung (kurz)		4912	Bildpunkte		
Sensorgröße (lang)	$s_l =$	35,9	mm	0,0359	m
Sensorgröße (kurz)	$s_k =$	24	mm	0,024	m
Kamerakonstante	$c =$	35	mm	0,035	m
Flugparameter					
Fluggeschwindigkeit	$v =$	5000	mm/s	5	m/s
Flughöhe	$h =$	40000	mm	40	m
Längsüberdeckung	$l =$	80	%		
Querüberdeckung	$q =$	60	%		

Tabelle 3: Gegebene Parameter

Wie aus Tabelle 3 zu entnehmen ist, hat das Fluggebiet ein Ausmaß von 70x100m und folglich eine Fläche von 7000m². Die verwendete Kamera hat eine Sensorgröße ($s_l \times s_k$) von 24 x 35,9mm und eine Kamerakonstante c von 35mm. Nach Rücksprache mit dem Fachpersonal der Hochschule Mainz werden eine Fluggeschwindigkeit von 5m/s und eine Flughöhe von 40m angenommen. Ist die Fluggeschwindigkeit zu hoch, schafft es die Kamera nicht genügend Bilder aufzunehmen. Ausschlaggebend für eine hohe Bodenaufklärung der Bilder, ist die Flughöhe. Folglich sollte diese nicht zu hoch angesetzt

werden. Aufgrund der steilen Hanglage des Messgebietes, wird eine Längsüberdeckung von $l = 80\%$ und eine Querüberdeckung von $q = 60\%$ festgelegt. Da einzelne Punkte von möglichst vielen Bildern abgedeckt werden sollen, ist die Längs- bzw. Querüberdeckung der Bilder ein wichtiger Faktor.

Berechnung

Der Bildmaßstab m_b wird proportional zur Flughöhe h und der Kamerakonstante c folgendermaßen berechnet.

$$m_b = \frac{h}{c}$$

Mithilfe des errechneten Bildmaßstabs m_b und der Bildseiten im Bild s_k, s_l lässt sich mit folgender Formel die Bildseiten im Gelände S_k, S_l berechnen. (Schlüter, 2017)

$$S_k = s_k \cdot m_b$$

$$S_l = s_l \cdot m_b$$

Aus den gegebenen Überlappungen (quer = q , längs = l) und den zuvor errechneten Bildseiten im Gelände, lassen sich die Basislänge B und der Streifenabstand A berechnen. Mittels Maßstabs können diese dann auf die Bildebene umgerechnet werden. (Schlüter, 2017)

$$B = S_k \cdot \left(1 - \frac{l}{100}\right) \quad A = S_l \cdot \left(1 - \frac{q}{100}\right)$$

Die Aufnahmezeit lässt sich mit Hilfe der Basislänge B und der Fluggeschwindigkeit v berechnen. (Schlüter, 2017)

$$\Delta t = \frac{B}{v}$$

Um die Bodenauflösung zu erhalten, wird der Quotient aus der Bildseite im Gelände S und der Pixelanzahl gebildet. (Schlüter, 2017)

$$P = \frac{S}{\text{Pixelanzahl}}$$

Bildparameter					
Bildmaßstab	$m_b =$	1142,85714			
Bildseite im Gelände (lang)	$S_l =$	41028,5714	mm	41,02857143	m
Bildseite im Gelände (kurz)	$S_k =$	27428,5714	mm	27,42857143	m
Basis im Bild (lang)	$b_l =$	14,36	mm	0,01436	m
Basis im Bild (kurz)	$b_k =$	4,8	mm	0,0048	m
Bildauflösung (lang)	$p_l =$	0,00487772	mm	4,87772E-06	m
Bildauflösung (kurz)	$p_k =$	0,00488599	mm	4,88599E-06	m
Bildauflösung	$p =$	0,00488186	mm	4,88186E-06	m
Bodenauflösung (lang)	$P_l =$	5,57453416	mm	0,005574534	m
Bodenauflösung (kurz)	$P_k =$	5,58399255	mm	0,005583993	m
Bodenauflösung	$P =$	5,57926336	mm	0,005579263	m
Flugparameter					
Streifenabstand bei 60% Querüberdeckung	$A =$	16411,4286	mm	16,41142857	m
Basislänge bei 80% Längsüberdeckung	$B =$	5485,71429	mm	5,485714286	m
Aufnahmefolgezeit	$t =$	1,09714286	s		

Tabelle 4: Berechnete Parameter

Nach der Berechnung der oben aufgeführten Formeln ergeben sich die in Tabelle 4 ersichtlichen Bild- und Flugparameter.

Der Bildmaßstab m_b hat einen Wert von rund 1143. Die Ausdehnung der Bilder im Gelände wird mit 41,089m x 27,429m kalkuliert. Nach dem Ermitteln des Abstands zwischen zwei Projektionszentren ergibt sich eine Basislänge von 5,486 m. Der Streifenabstand beträgt 16,411m. Nach der Berechnung der Bildauflösung p liegt diese bei 0,005mm und die Bodenauflösung P bei 5,579mm. Die Aufnahmefolgezeit t der Kamera beträgt 1,097s.

Flugplanung in Mission Planner

Im Anschluss der händischen Berechnung wird die Open-Source-Software Mission Planner für eine genauere Planungsgrundlage verwendet.

Mission Planner kann als Konfigurationsprogramm oder als Ergänzung zur dynamischen Steuerung der UAV verwendet werden. Die Software berechnet nach Eingabe der festen Parameter (Werte der verwendeten Kamera, verwendetes Objektiv, Ausdehnung des Messgebietes) und den variablen Parametern (Flughöhe, -geschwindigkeit, Überdeckung, Kameraeinstellungen) die restlichen Bild- und Flugparameter.

Das Programm bietet die Möglichkeit den Bildflug im Voraus zu planen und anschließend mit der Software der Drohne zu verknüpfen. Ist dies getan, kann die Drohne per Autopilot das Messgebiet befliegen (ArduPilot, 2019).

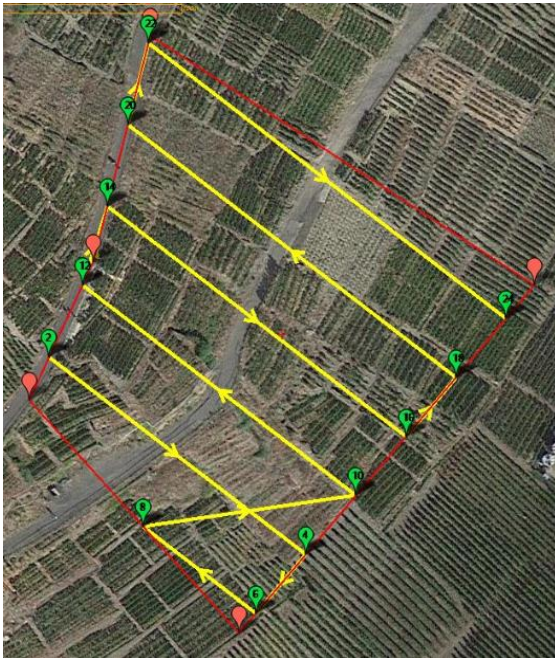


Abbildung 29: Flugplanung via Mission Planner

Im ersten Arbeitsschritt wird das Messgebiet mit einem Umringspolygon abgegrenzt. Das Polygon wird händisch erzeugt. Als Hilfestellung hierfür dient das Satellitenbild von Google Maps im Hintergrund. Das Fluggebiet ist in Abbildung 29 deutlich anhand der roten Linien und Markierungen zu erkennen. Das Befliegungsgebiet weist hier eine Größe von 6901 m² auf. Um die Fluglinie und die Wendepunkte zu erzeugen, wird der Button „Survey (Grid)“ verwendet. Nun berechnet das Programm automatisch die in Abbildung 29 gelb eingefärbte Flugstrecke und grün abgebildeten Wendepunkte.

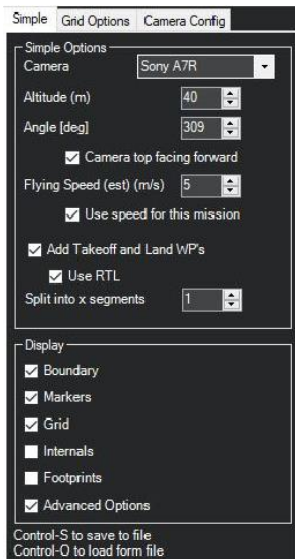


Abbildung 30: Einstellungen in Mission Planner – Simple

Im nächsten Arbeitsschritt werden einige Grundeinstellungen vorgenommen. Hierzu muss der Reiter „Simple“ angeklickt werden. An dieser Stelle kann man in dem Fenster „Camera“ die verwendete Kamera auswählen, in diesem Fall die Kamera Sony Alpha 7R. Unter „Altitude“ lässt sich die geplante Flughöhe von 40 Metern einstellen. Als Neigungswinkel („Angle“) wird der vorgeschlagene Wert übernommen. Wichtig ist es die Fluggeschwindigkeit unter „Flying Speed“ festzulegen. Hier wird eine Geschwindigkeit von 5m/s ausgewählt. Alle weiteren Einstellungen, die in diesem Fenster zu sehen sind, werden nicht verändert.



Abbildung 31: Einstellungen in Mission Planner - Grid Options

Um die Längs- und Querüberdeckung einzustellen wird der Reiter „Grid Options“ ausgewählt. Wie in Abbildung 31 dargestellt, wird bei „Overlap“ eine Längsüberdeckung von 80 Prozent festgelegt. Unter „Sidelap“ wird die Querüberdeckung auf 60 Prozent eingestellt. Alle weiteren Parameter berechnet die Software selbständig.

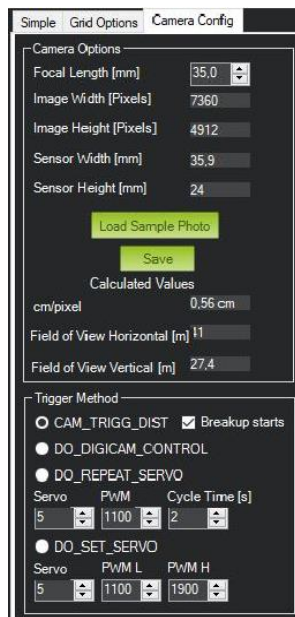


Abbildung 32: Einstellungen in Mission Planner - Camera Config

Im nächsten Fenster, welches in Abbildung 32 dargestellt ist, wird lediglich unter „Camera Config“ die Brennweite des Objektivs eingestellt. Durch das Auswählen der entsprechenden Kamera ergeben sich alle weiteren Parameter.

Stats							
Area:	6901 m ²	Pictures:	79	Flight Time (est):	2:50 Minutes	Min Shutter Speed:	1/1785
Distance:	0.68 km	No of Strips:	6	Photo every (est):	1.10 Seconds		
Dist between images:	5.5 m	Footprint:	41 x 27.4 m	Turn Dia (at 45d):	7 m		
Ground Resolution:	0.56 cm	Dist between lines:	16.41 m	Ground Elevation:	131-181 m		

Abbildung 33: Berechnete Flugparameter in Mission Planner

Sind die oben aufgezählten Arbeitsschritte ausgeführt, berechnet Mission Planer die in Abbildung 33 dargestellten Flugparameter. Diese berechneten Parameter ergeben sich, wie bei der händischen Flugplanung, aus den gegebenen und variablen Parametern.

Vergleich der berechneten Parameter

		Excel		Mission Planner		Differenz	
Fläche des Blocks	$F =$	7000	m ²	6901	m ²	99,000	m ²
Bildseite im Gelände (lang)	$S_l =$	41,029	m	41	m	0,029	m
Bildseite im Gelände (kurz)	$S_k =$	27,429	m	27,4	m	0,029	m
Streifenabstand bei 60% Querüberdeckung	$A =$	16,411	m	16,41	m	0,001	m
Basislänge bei 80% Längsüberdeckung	$B =$	5,486	m	5,5	m	-0,014	m
Aufnahmefolgezeit	$t =$	1,097	s	1,1	s	-0,003	s
Bodenauflösung	$P =$	5,579	mm	5,6	mm	-0,021	mm

Tabelle 5: Vergleich der berechneten Parameter

Wie in Tabelle 5 ersichtlich, sind die Differenzen zwischen der händischen Flugplanung und der Flugplanung via Mission Planner minimal. Daraus lässt sich schließen, dass keine groben Fehler in beiden Verfahren gemacht wurden. Die Fläche des Fluggebietes weist eine Differenz von 99 m² auf. Dieser Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass in Excel nicht mit dem genauen Umring des Gebiets gerechnet wurde. Während Mission Planner mit dem um einiges genaueren Umringspolygon arbeitet.

6.2 Durchführung der Befliegung

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, die Kulturlandschaft mit den historischen Weinbergsmauern zu erfassen und zu visualisieren. Um die Aufnahme des terrestrischen Laserscanning zu komplettieren, besonders bei den unzugänglichen Stellen, wird hier die Unterstützung der UAV-Photogrammetrie benötigt. Aus diesem Grund wird das Aufnahmegebiet mit der Vermessungsdrohne RKM 8X befliegen.

Bevor die Drohnenbefliegung durchgeführt wird ist es wichtig auf die richtigen Wetterverhältnisse zu achten. Bei Niederschlag oder einer zu hohen Windgeschwindigkeit ist es nicht möglich die Drohne kontrolliert zu steuern. Bei Nebel besteht die Gefahr, dass der Pilot den Sichtkontakt zu Drohne verliert.

Die besten Bedingungen herrschen bei bewölktem und windstillem Wetter. Bei diesen Verhältnissen gibt es einen geringen Schattenwurf, sodass sich keine übermäßig hellen oder dunklen Flächen bilden.

Die Vegetation spielt eine weitere Rolle. Ist das Messgebiet zu stark bewachsen, ist der Boden auf den Bildaufnahmen nicht gut zu erkennen. Dies hat die Folge, dass die generierte Punktwolke an Qualität verliert.

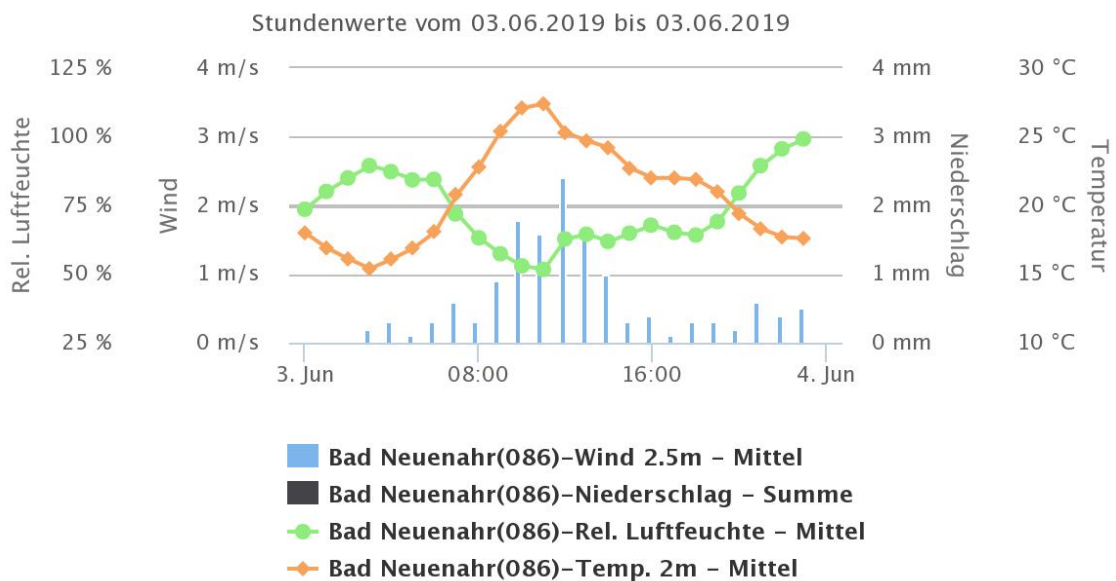


Abbildung 34: Wetterbedingungen am Tag der Befliegung (Agrarmeteorologie RLP, 2019)

Die Drohnenbefliegung fand am Montag den 03.06.2019 statt. Aus dem in Abbildung 34 ersichtlichen Diagramm lassen sich die Wetterverhältnisse des Befliegungstags ablesen. Die Wetterdaten wurden von der Wetterstation in Bad Neuenahr aufgezeichnet.

Aus dem dargestellten Diagramm ist zu erkennen, dass an dem Tag der Befliegung gute Wetterverhältnisse herrschten. Es gab keinen Niederschlag und die Windgeschwindigkeit betrug kaum mehr als 1 m/s.

Lediglich der Bewölkungsgrad hätte etwas höher sein können. Alles in allem waren jedoch die Wetterverhältnisse für eine erfolgreiche Befliegung gegeben.

Da die Drohe RKM 8X ein Gesamtgewicht von mehr als zwei kg hat, wird der Bildflug von einem Mitarbeiter der Hochschule durchgeführt. Dieser besitzt den hierfür benötigten Pilotenschein.

Nachdem die Drohne aufgebaut ist, kann die Kamera Sony Alpha 7R im dafür vorgesehenen Gimbal platziert werden. Jetzt wird der Akku angeschlossen und die Drohne kann gestartet werden.

Die gesamte Befliegung muss vom Piloten manuell durchgeführt werden. Die steile Hanglage des Messgebietes lässt eine vollautomatische Befliegung mit den Planungsdaten von Mission Planner nicht zu. Demnach muss der Pilot darauf achten, dass das gesamte Messgebiet beflogen und aufgenommen wird. Die Folgen einer lückenhaften Aufnahme spiegeln sich später negativ im 3D-Modell wider.

Um dies zu verhindern werden vier Befliegungen à 10 bis 15 Minuten angesetzt. Der Pilot versucht während des Flugs bei gleichbleibender Fluggeschwindigkeit und –höhe die Aufnahmen zu tätigen. Als Hilfestellung dient hier die Pilotenkamera der Drohne in Verbindung mit einem Monitor. Weitere Orientierung bieten die Passpunkte. Um eine bessere Bildperspektive zu erhalten, passt der Pilot den Neigungswinkel der Kamera manuell an.

In folgender Abbildung 35 ist die Drohne während des Startmanövers zu betrachten.



Abbildung 35: Start der UAV

6.3 Auswertung

Um ein georeferenziertes 3D-Modell zu erzeugen wird die Modellierungssoftware Photoscan von Agisoft verwendet. Dieses Programm ist in der Lage aus mehreren Bildern ein zusammenhängendes 3D-Modell zu erzeugen. Hierfür muss das darzustellende Objekt auf mehr als zwei Bildern zu erkennen sein.

In diesem Abschnitt wird der Auswerteprozess der 3D-Modellierung via Agisoft PhotoScan ausführlich beschrieben. Als Quelle wird im gesamten Kapitel Auswertung das Benutzerhandbuch in der Version 1.4 von Agisoft Photoscan verwendet (Agisoft LLC, 2018).

Bevor die eigentliche Auswertung via Agisoft PhotoScan beginnen kann, müssen zunächst die erzeugten Daten gesichtet werden. Dabei lässt sich feststellen, dass bei der Befliegung 926 Bilder im JPG-Format aufgenommen wurden. Diese haben ein Gesamtdatenvolumen von ca. 27 GB. Im ersten Schritt werden beim Begutachten der Daten, die unbrauchbaren Bilder aussortiert. Diese sind zum Beispiel im Vorfeld durch Testaufnahmen entstanden. Zur Auswertung verbleiben folglich 913 Bilder.

Voreinstellungen

Nun kann die Auswertesoftware Photoscan von Agisoft gestartet werden. Es wird ein neues Projekt angelegt und zunächst einmal die Programmeinstellungen überprüft. Um die erste wichtige Voreinstellung zu tätigen, wird unter dem Reiter Tools das Fenster PhotoScan Preferences geöffnet. Hier wird bei GPU die Grafikkarte des PCs für die weitere Bearbeitung aktiviert. Als nächstes sind die Aufnahmen in das Projekt zu importieren. Die Bilder werden in der Workspace unter einem sogenannten Chunk aufgeführt. Mit einem Doppelklick auf die Bilder lassen sich diese begutachten. Die Metadaten zur Kamera und den Einstellungen sind in jedem Bild gespeichert. Diese lassen sich unter Tools – Camera Calibration einsehen (Abbildung 36).

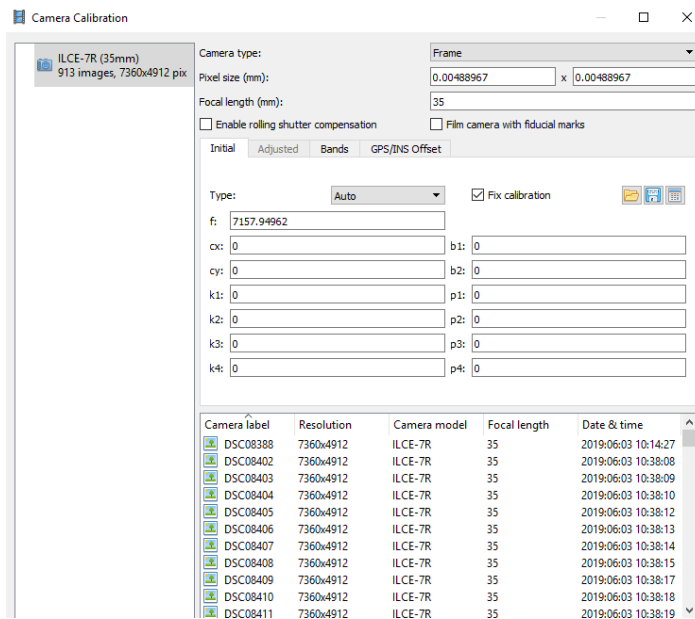


Abbildung 36: Camera Calibration

Align Photos

Im nächsten Schritt wird die Lage der Bilder im Raum zueinander hergestellt. Dies wird relative Orientierung genannt. Bei der relativen Orientierung schneiden sich die Strahlen homologer Bildpunkte. Das sind die einzelnen Objektpunkte, die auf mehr als einem Bild zu erkennen sind. Daraus wird ein photogrammetrisches Modell gebildet, welches aus Verknüpfungspunkten besteht. Die erzeugten Koordinaten liegen in einem sogenannten Modellkoordinatensystem. (Schlüter, 2017)

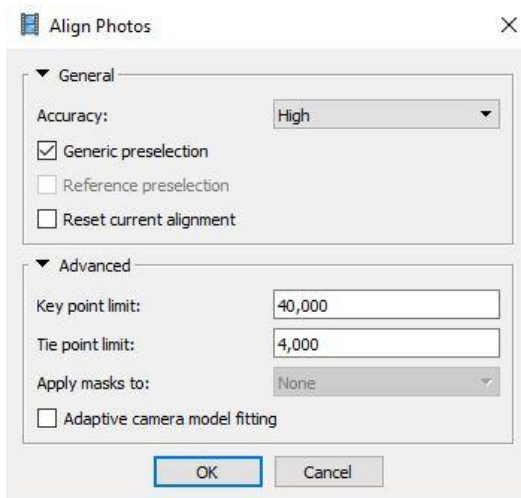


Abbildung 37: Parametereingabe Align Photos

Um die Wolke aus Verknüpfungspunkten (tie points) zu erzeugen, wird unter dem Reiter Workflow der Arbeitsschritt Align Photos ausgewählt. Es öffnet sich ein Fenster, welches einige Einstellungsmöglichkeiten zulässt.

Abbildung 37 spiegelt die getroffenen Einstellungen wider. Es wird die Möglichkeit geboten aus vier verschiedenen Genauigkeitsstufen auszuwählen. Diese Genauigkeitsstufe hat Auswirkung darauf, wie genau die Schätzung der Kamerapositionen ausfällt. Hier wird die Einstellung „high“ gewählt, da hierbei mit der Originalgröße der Bilder gearbeitet wird. Außerdem wird der Haken bei „Generic preselection“ gesetzt. „Generic preselection“ bedeutet, dass die Software Bildpyramiden zur Bildpaarsuche nutzt. Bei „Key Point Limit“ wird ein maximaler Wert von 40000 eingetragen. Dies ist die obere Grenze für die Anzahl an Feature Points. Dies sind markante Punkte, die im Bild gefunden werden, unabhängig davon, in wie vielen Bildern diese vorhanden sind. Feature Points dienen als Verknüpfungspunkte. Bei „Tie Point Limit“ wird der Wert auf 4000 festgelegt. Hierbei handelt es sich um „Matching Points“. Diese Punkte sind in mehreren Bildern vorhanden und dienen als eigentliche Verknüpfungspunkte.

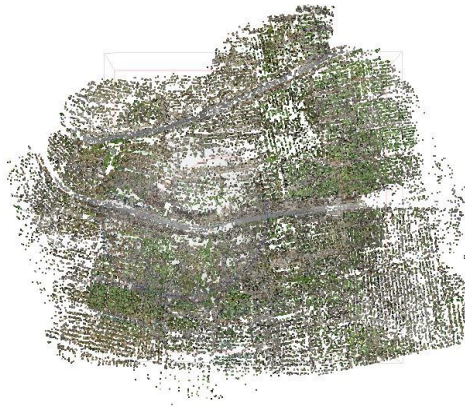


Abbildung 38: Punktwolke aus Verknüpfungspunkten

Die Eingaben werden mit Ok bestätigt und das Programm führt den Arbeitsschritt „Align Photos“ selbstständig aus. Wie in Abbildung 38 zu sehen ist, erhält man nachdem der Rechenprozess abgeschlossen ist, eine dünne Punktwolke. Aus den insgesamt 913 Bildern hat PhotoScan 181.475 Verknüpfungspunkte berechnet. Bei einer durchschnittlichen Flughöhe von 31,5 m wurde eine Bodenauflösung von 4,03 mm/pix erreicht. Zudem lassen sich jetzt die Kamerapositionen anzeigen.

Die manuell gesteuerte Befliegung hat die Folge, dass die Kamerapositionen ungeordnet und teilweise willkürlich über dem Messgebiet verteilt sind.

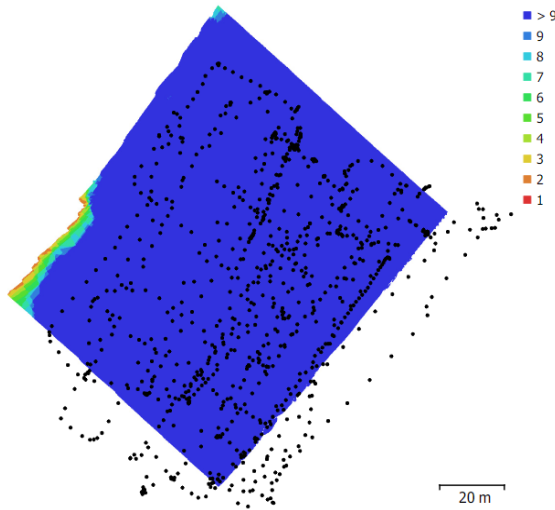


Abbildung 39: Kamerapositionen und Bildüberlappung

Abbildung 39 zeigt das Messgebiet mit den Kamerapositionen und der Bildüberlappung. Anhand der blauen Einfärbung lässt sich schließen, dass hier eine sehr große Überlappung vorhanden ist. Die schwarzen Punkte signalisieren die Kameraposition. Aufgrund der Neigung der Kamera liegen diese teilweise neben dem Aufnahmegebiet.

Reference Settings

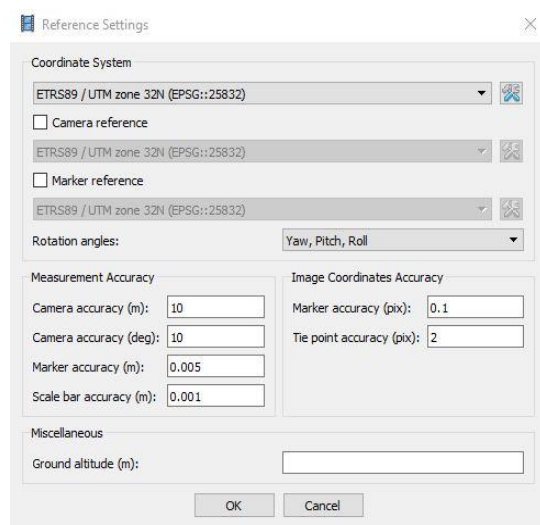


Abbildung 40: Reference Settings

Als Vorbereitung der Georeferenzierung werden die Kamerapositionen in ein metrisches Bezugssystem transformiert, da sich die Kopterpositionen und die Passpunkte im selben Koordinatensystem befinden müssen. Um dies zu verwirklichen wird der Button „Convert“ betätigt. Hier wird bei dem Koordinatensystem „ETRS89, UTM Zone 32, EPSG-Code: 25832“ eingetragen. Die Kameragenauigkeit trifft keine Bedeutung, da der GNSS Chip der Drohne die Koordinaten jeder Kameraposition mit Lage- und Rotationsgenauigkeit speichert. Diese werden zusammen mit den Bildern in PhotoScan importiert (Abbildung 40).

Ist dieser Vorgang abgeschlossen, ist das relative Modell in ein übergeordnetes Koordinatensystem transformiert.

Georeferenzierung

Um die Georeferenzierung abzuschließen, müssen im nächsten Schritt die Koordinaten der Passpunkte importiert und auf den Fotos zugeordnet werden. Theoretisch ist es möglich, dass die Pass- und Kontrollpunkte an einer anderen Stelle der Auswertung bestimmt werden. Dies ist allerdings nicht zu empfehlen, da es bei Fehlern zu einer unnötig hohen Rechenzeit kommt.

Die mit dem GNSS-Empfänger aufgenommenen Koordinaten werden in eine txt-Datei geschrieben, welche anschließend in PhotoScan importiert wird. Nun können auf den einzelnen Bildern die Passpunkte mittels Marker zugeordnet werden. Hierzu wird in dem Fenster „Photo“ ein geeignetes Bild ausgewählt und der Marker auf den bekannten Passpunkten per rechtem Mausklick platziert. Die Punktnummernauswahl ermöglicht eine richtige Zuweisung der Passpunkte. Wird ein Passpunkt in mehr als zwei Bildern markiert, positioniert PhotoScan diese in allen weiteren Aufnahmen. Diese sind allerdings zu ungenau und müssen demnach an die richtige Stelle geschoben werden.



Abbildung 41: Markieren der Passpunkte

Abbildung 41 zeigt zum einen die automatische Zuweisung und zum anderen die händische Zuweisung. Auf der linken Bildhälfte ist deutlich zu erkennen, dass das blaue Fähnchen neben der Mitte des Passpunktes liegt. Auf der rechten Seite wurde das Fähnchen händisch auf der Mitte des Passpunktes platziert. Dieser Vorgang wird also auf jedem Bild mit jedem Passpunkt durchgeführt.

PhotoScan berechnet über den „Optimize Camera“ Button automatisch für jeden Passpunkt einen Fehlerwert in Meter und in Pixel. Außerdem wird der Gesamtfehler ebenso in Meter und Pixel angegeben. „Optimize Camera“ ist gleichzeitig ein Optimierungslauf, der die Berechnungsgenauigkeit der inneren und äußeren Orientierung erhöht.

Markers	East err (m)	North err (m)	Alt. err (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> 910	-0.007842	-0.032717	0.018994	0.005000	0.038635	40	0.072
<input checked="" type="checkbox"/> 903	-0.021509	0.029264	-0.056743	0.005000	0.067371	31	0.082
<input checked="" type="checkbox"/> 902	-0.022928	-0.005256	0.017753	0.005000	0.029470	53	0.093
<input checked="" type="checkbox"/> 904	-0.011411	-0.013582	-0.004359	0.005000	0.018267	51	0.098
<input checked="" type="checkbox"/> 901	-0.009183	0.027320	0.010995	0.005000	0.030848	100	0.109
<input checked="" type="checkbox"/> 908	-0.017241	0.025185	-0.030972	0.005000	0.043483	38	0.124
<input checked="" type="checkbox"/> 905	0.020327	-0.043794	-0.008181	0.005000	0.048970	27	0.138
<input checked="" type="checkbox"/> 906	0.037817	0.038872	0.008658	0.005000	0.054919	24	0.142
<input checked="" type="checkbox"/> 909	0.031984	-0.025296	0.043891	0.005000	0.059910	53	0.158
Total Error							
Control points	0.022181	0.029037	0.028014		0.046043		0.115
Check points							

Abbildung 42: Genauigkeit der Passpunkte

In Abbildung 42 sind alle Passpunkte aufgeführt. Die Haken vor den Passpunkten verdeutlichen, dass diese für die Auswertung als Passpunkt und nicht als Kontrollpunkt verwendet werden. Des Weiteren ist hier für jeden Passpunkt der Fehler in Meter und in Pixel angegeben. Da sich keine Ausreißer zeigen, kann ein grober Fehler ausgeschlossen werden. Als nächstes ist der „Total Error“, also der Gesamtfehler, zu betrachten. Dieser ist ausschlaggebend für die Genauigkeit der Georeferenzierung. Nach Rücksprache mit einem erfahrenen Mitarbeiter der Hochschule Mainz, ist ein Gesamtfehler von 0,046043m in der Lage sehr gut vertretbar, sodass die Auswertung fortgesetzt werden kann.

Dense Cloud

Als Grundlage für die spätere Vermaschung zu einem Polygonnetz wird eine dichte Punktwolke erzeugt. Hierzu berechnet PhotoScan basierend auf den geschätzten Kamerapositionen die Tiefeninformationen für jedes Bild. In Kombination ergeben diese dann eine dichte Punktwolke, die „Dense Cloud“.

Beim Erstellen der dichten Punktwolke wird zwischen vier Genauigkeitsstufen unterschieden. Die höchste Genauigkeit rechnet mit der Auflösung der Originalfotos. Jede Stufe darunter wird mit dem Faktor vier herabskaliert.

Außerdem lässt sich einer von drei Filtern auswählen. Diese bieten verschiedene Filteralgorithmen, die für mehr oder weniger Details sorgen.

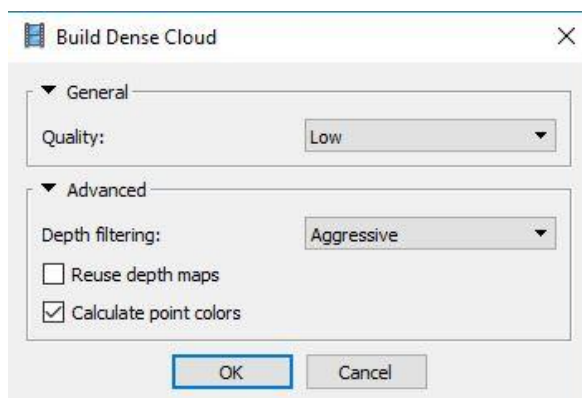


Abbildung 43: Parameter der Dense Cloud

Bevor die dichte Punktwolke erstellt wird, muss zunächst die Bounding Box an das Messgebiet angepasst werden. Hierdurch wird eine unnötig hohe Rechenzeit vermieden und gleichzeitig die irrelevanten Gebiete ausgeschlossen.

Abbildung 43 zeigt die Parameter, die zu Erstellung der Dense Cloud eingestellt werden. Bei der Qualität wird „Low“ gewählt. Hierzu lässt sich sagen, dass alle höheren Qualitätsstufen eine zu hohe Rechenzeit beanspruchen und dadurch den PC leistungsmäßig an seine Grenzen bringen. Die Masse an Punkten bei einer hohen Qualitätsstufe lässt sich außerdem in den weiteren Arbeitsschritten nicht mehr gut handhaben. Da es sich in diesem Fall um keine Nahaufnahme handelt, wird hier der Filter „Aggressive“ eingestellt. Dieser Filter ist für grobe Objekte geeignet, bei denen die kleinen Details eher unwichtig sind. Der Haken bei „Calculate point colors“ wird gesetzt, da mit dieser Option die Farbwerte der Punkte berechnet werden.



Abbildung 44: Dense Cloud

In Abbildung 44 wird das Ergebnis der dichten Punktwolke dargestellt. PhotoScan hat insgesamt 22.352.775 Punkte erzeugt. Die beanspruchte Rechenzeit liegt hier bei 5 Stunden und 2 Minuten.

Mesh

Im nächsten Schritt wird ein Polygonnetz erzeugt. Dies ergibt ein Modell, welches aus der dünnen oder der dichten Punktwolke errechnet werden kann.

Mit der dünnen Punktwolke aus den Verknüpfungspunkten kann ein grobes Modell erzeugt werden, welches wenig Rechenzeit beansprucht, jedoch keine gute Qualität aufweisen kann. Nimmt man die dichte Punktwolke als Quelle, so erhält man ein detailliertes Modell mit einer guten Qualität. Hierbei ist jedoch die Verarbeitungszeit um einiges höher.

Bei der Erstellung des Modells wird zwischen drei Qualitätsstufen unterschieden. Diese sind entscheidend für die maximale Anzahl der Polygone im endgültigen Netz. Die vorgeschlagenen Werte werden auf Grundlage der Anzahl der Punkte, der vorher erzeugten Punktwolke errechnet: high – 1/5 der Gesamtpunkte, medium – 1/15 der Gesamtpunktwolke, low – 1/45 der Gesamtpunktwolke. Bei der hohen Einstellung wird ein entsprechender Detaillierungsgrad erlangt, jedoch besteht hier die Gefahr von späteren Problemen bei der Modellvisualisierung in einer externen Software. Des Weiteren bringt eine hohe Punktzahl der Ausgangspunktwolke einen enorm hohen Berechnungsanspruch mit sich.

PhotoScan verwendet eine Interpolation, um ein verbessertes Rekonstruktionsergebnis zu erzielen. Hierbei wird die Oberfläche in einem bestimmten Radius um jeden Punkt interpoliert, sodass ein lückenloses Oberflächenmodell entsteht.

Bei der Erstellung des Mesh wird die Dense Cloud, also die dichte Punktwolke, als Quelle verwendet. Die Qualitätsstufe wird nach mehreren Testläufen auf „Low“ gestellt. Das heißt, die maximale Anzahl der Polygone beträgt 1/45 der Gesamtpunktwolke. Eine Berechnung mit einer höheren Stufe ist nicht möglich, da hier die Fehlermeldung „bad allocation“ erscheint. Diese Meldung bedeutet, dass der Arbeitsspeicher des PCs überlastet ist und folglich die Vermaschung abbricht.

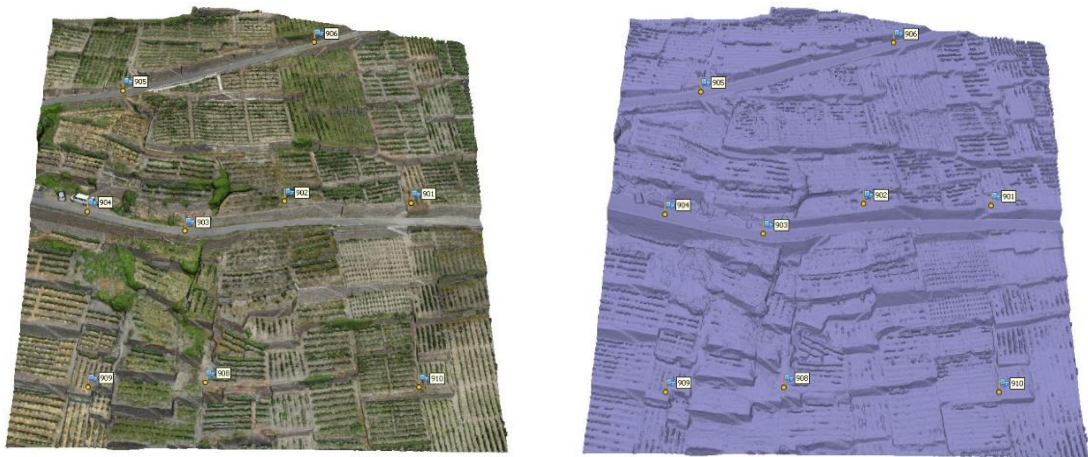


Abbildung 45: Mesh, links mit und rechts ohne Farbwerte

In Abbildung 45 ist das vermaschte Modell zu sehen. In der linken Darstellung ist das Mesh mit den Farbwerten dargestellt. Die rechte Seite zeigt das Mesh in Polygonform, also ohne Farbwerte.

Model Texture

Nachdem das Modell erstellt ist, kann mit der Texturierung begonnen werden.

Der Texturabbildungsmodus bestimmt wie die Objekttextur in den Texturatlas geschrieben wird. Die richtige Auswahl des Textur-Mapping-Modus hilft dabei, eine optimale Bündelung der Textur und folglich eine bessere visuelle Qualität des endgültigen Modells zu erzielen.

PhotoScan bietet hier die Auswahl eines Texturierungsmodus.

Der Standardmodus ist der „Generic“-Zuordnungsmodus. Er ermöglicht die Parametrisierung des Texturatlas für beliebige Geometrien. Es werden keine Annahmen bezüglich der zu texturierenden Objektform gemacht. Das Programm versucht eine möglichst gleichmäßige Textur zu erzeugen.

Im „Adaptiven Orthophoto“-Mapping-Modus wird die Objekt Oberfläche in horizontale und vertikale Bereiche aufgeteilt. Der horizontale Teil der Oberfläche wird unter Verwendung der orthogonalen Projektion texturiert, während vertikale Bereiche separat texturiert werden, um eine genaue Texturdarstellung in solchen Bereichen zu erhalten.

Im adaptiven Orthophoto-Mapping-Modus erzeugt das Programm in der Regel eine kompaktere Texturdarstellung für nahezu ebene Objekte, während die Texturqualität für vertikale Oberflächen wie Gebäudewände erhalten bleibt.

Im „Orthophoto“-Mapping-Modus wird die gesamte Objektoberfläche in der orthogonalen Projektion texturiert. Der Orthophoto-Mapping-Modus erzeugt auf Kosten der Texturqualität in vertikalen Bereichen eine noch kompaktere Texturdarstellung als der Adaptive Orthophoto-Modus.

Für kugelförmige Objekte würde sich der „Spherical“-Mapping-Modus am besten eignen.

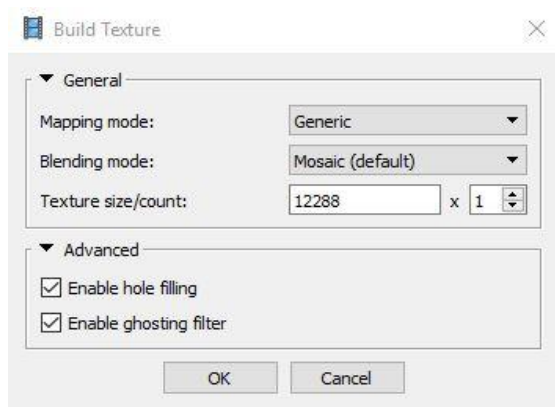


Abbildung 46: Eingabeparameter Build Texture

Wie in Abbildung 46 zu erkennen ist, wird der Mapping-Modus „Generic“ gewählt. Der „Blending mode“ sagt aus, auf welche Art und Weise die Pixelwerte kombiniert werden, um aus den verschiedenen Fotos eine endgültige Texturierung zu generieren. Hierfür bietet sich der „Mosaic“-Modus an. Bei diesem Modus werden die Niederfrequenzkomponenten mit den Hochfrequenzkomponenten kombiniert. Ersteres wird hauptsächlich für die sich überlappenden Bilder durchgeführt. Die Hochfrequenzkomponente ist für die Bilddetails zuständig und wird aus den einzelnen Bildern entnommen, welche eine gute Auflösung für den interessanten Bereich aufweisen.

Bei „Texture size/count“ wird die Größe des TexturenAtlas in Pixel festgelegt. Das Erzeugen einer Texturierung in einer zu hohen Qualität kann durch eine Arbeitsspeicher-Einschränkung fehlschlagen. Hier wird nach mehreren Versuchen der Wert 12288 ausgewählt.

Um zu verhindern, dass Teile des Modells abgeschattet werden, ist der Befehl „Enable Hole filling“ standartmäßig aktiviert.

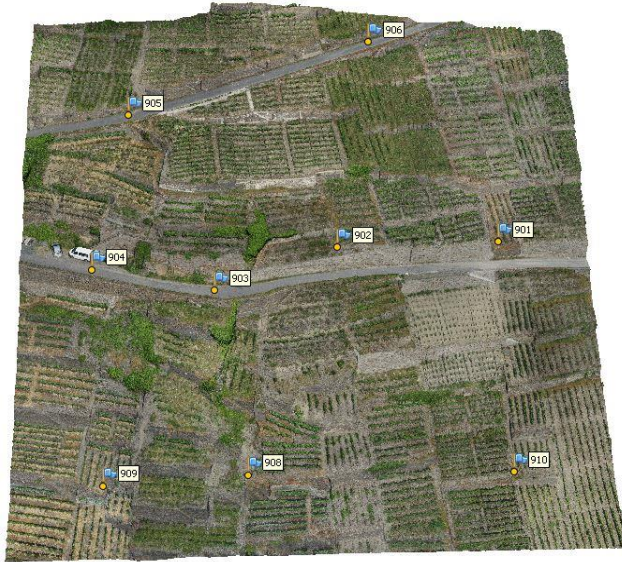


Abbildung 47: Texturiertes 3D-Modell

In Abbildung 47 ist das fertiggestellte 3D-Modell zu sehen. Durch die Texturierung des Mesh lassen sich Details, wie zum Beispiel die Strukturierung der Mauer, deutlich besser erkennen.

Digital elevation model

Als Nebenprodukt lässt sich mit PhotoScan ein digitales Höhenmodell (DHM; eng. digital elevation model - DEM) erstellen und visualisieren. Ein DEM ist ein Oberflächenmodell aus einem regelmäßigen Gitter bestehend aus Höhenwerten. Dieses Modell kann aus der dünnen Punktwolke, aus der dichten Punktwolke oder aus dem Mesh erzeugt werden. Aus dem digitalen Höhenmodell können voll automatisch Konturlinien erstellt werden. Außerdem bietet es die Möglichkeit DEM-basierte Punkt-, Distanz-, Flächen- oder Volumenmessungen durchzuführen.

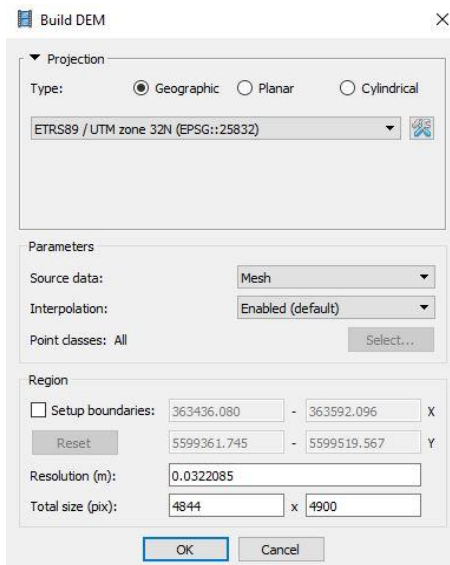


Abbildung 48: Eingabeparameter Build DEM

In Abbildung 48 sind die Eingabeparameter zur Erstellung des DEM dargestellt. Wird hier „Geographic“ ausgewählt, ergibt sich die Möglichkeit ein geografisches Koordinatensystem auszuwählen. Standardmäßig ist das Koordinatensystem eingestellt, welches zuvor für das Erstellen des 3D-Modell ausgewählt wurde. Das DEM wird aus dem vorab erzeugten Mesh erstellt. Außerdem lässt sich zusätzlich eine Interpolation aktivieren. In der unten zu sehenden Abbildung 49 ist das aus den beschriebenen Parametern erzeugte DEM dargestellt.

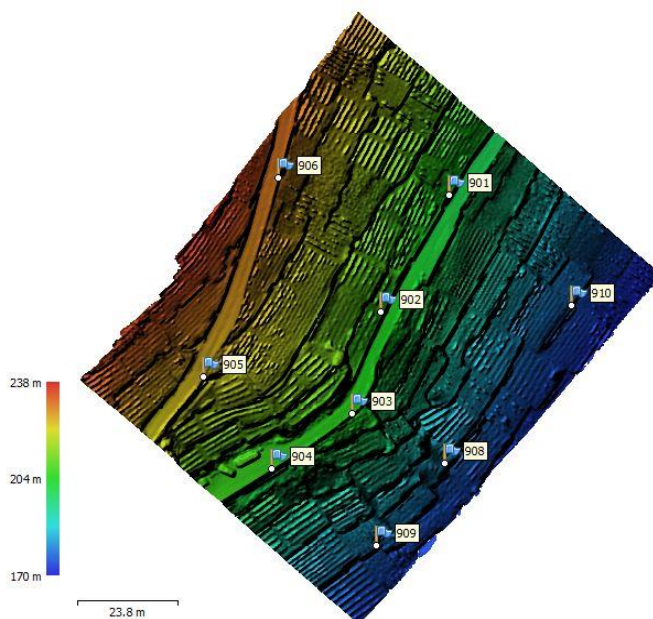


Abbildung 49: Digitales Höhenmodell

Das Höhenmodell verdeutlicht den im Messgebiet vorhandenen Höhenunterschied. Anhand der verschiedenen Farben lässt sich die Höhe grob ablesen. Die Farbskala reicht von blau bei ca. 170 Meter über grün bei ca. 200 Meter bis rot bei ca. 240 Meter.

Orthophotomosaic

Ein weiteres Nebenprodukt ist das „Orthophotomosaic“. Ein Orthophotomosaik ist ein blattschnittfreies Orthophoto, welches durch ein Zusammenfügen und radiometrisches Angleichen von benachbarten Orthophotos gewonnen wird. Hierbei handelt es sich um ein hochauflösendes Bild, welches auf den Quellfotos und dem rekonstruierten 3D-Modell basiert. In Abbildung 50 sind die hierfür eingestellten Parameter zu sehen.

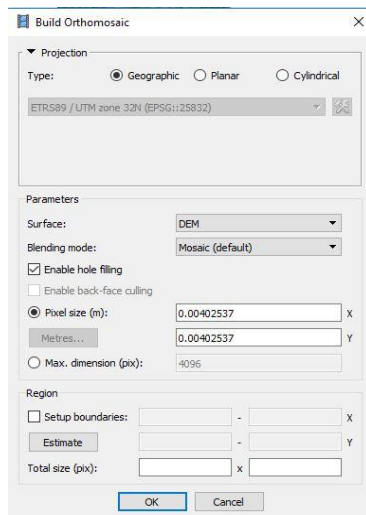


Abbildung 50: Eingabeparameter Build Orthophotomosaic

Bei der Projektion wird, wie schon beim zuvor erzeugtem DEM, „Geographic“ ausgewählt. Hier wird dann das gleiche Koordinatensystem wie bei dem Modell ausgewählt. Das DEM dient als Quelle und wird demnach bei „Surface“ eingestellt. Die Orthomosaik-Erstellung auf der Basis von DEM-Daten ist besonders effizient für Datenverarbeitungsszenarien in der Luftaufnahme und spart Zeit bei der Netzgenerierung. Der „Blending mode“ wird standardmäßig auf „Mosaic“ gestellt. Dieser Modus implementiert einen Ansatz mit einer Datenteilung in mehrere Frequenzbereiche, die unabhängig voneinander gemischt werden.

Die Daten werden in mehrere häufig vorkommende Gebiete unterteilt. Das am häufigsten vorkommende Gebiet wird entlang der Randlinie gemischt. Umso weiter man sich von der Linie entfernt, umso weniger Gebiete werden vermischt.

Das fertiggestellte Orthophotomosaik ist in Abbildung 51 dargestellt. Hierzu ist zu erwähnen, dass die Qualität auf Grund der hohen Datenmenge reduziert wurde.



Abbildung 51: Orthophotomosaik

7 Gegenüberstellung der Punktwolken

Zur Gegenüberstellung der Punktwolken aus dem terrestrischen Laserscanning und der photogrammetrischen Aufnahme wurden verschiedene Programme untersucht. Die Ausgabe der Punktwolken erfolgte aus Agisoft PhotoScan im PLY-Format und in Cyclone im PTS-Dateiformat.

Da die Software Agisoft Photoscan lediglich den Export und nicht den Import von Punktwolken erlaubt, eignet sie sich nicht für den Vergleich der Daten.

Der Versuch die Punktwolken in das kostenlose Programm MeshLab zu importieren wird trotz angeblicher Unterstützung der Dateiformate durch eine Fehlermeldung verhindert.

Daher wird die Gegenüberstellung in der herstellerunabhängigen Software CloudCompare durchgeführt. Bei dem Programm CloudCompare handelt es sich um eine Open Source-Software die ursprünglich zum Aufzeigen von Veränderungen in Punktwolken entwickelt wurde. Mittlerweile kann sie zur allgemeinen 3D-Bearbeitung genutzt werden und unterstützt als unabhängige Software den Import vieler verschiedener Dateiformate, darunter auch der Import von PLY- und PTS-Dateien. (Cloudcompare, 2019)

7.1 Import der Punktwolken

Beim Import von georeferenzierten Punktwolken wird der Nutzer von der Software über die zu große Stellenanzahl der Koordinaten informiert. Zur weiteren Bearbeitung werden die Koordinaten in einer Abfragemaske gekürzt, da in CloudCompare lediglich in lokalen Koordinatensystemen gearbeitet werden kann. Das liegt daran, dass die Software lediglich mit 32-Bit-Werten arbeitet. Dadurch wird zwar die Arbeitsgeschwindigkeit erhöht und der benötigte Speicherplatz verringert, jedoch verringert sich die Darstellungsgenauigkeit aufgrund der vielen Ziffern von UTM-Koordinaten. Denn je größer die importierten Zahlen sind, desto weniger Dezimalstellen können gespeichert werden, was zur Folge hat, dass die Koordinaten an Genauigkeit

verlieren. Daher ist es wichtig die Koordinaten in der Abfragemaske entsprechend Abbildung 52 zu kürzen.

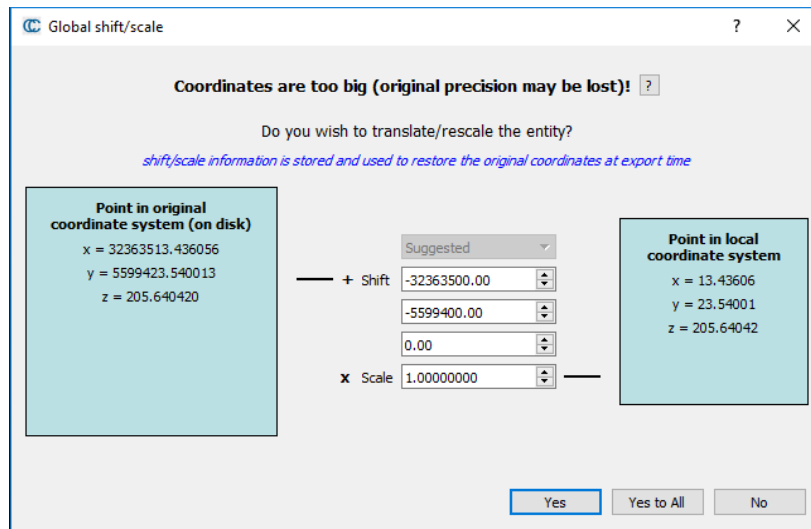


Abbildung 52: Import von georeferenzierten Koordinaten

Der Kürzungsbetrag wird von CloudCompare automatisch vorgeschlagen. Da zwei Punktwolken miteinander verglichen werden sollen, wird darauf geachtet, dass beim Import beide Dateien um denselben Betrag gekürzt werden. Lediglich beim Rechts- und Hochwert muss eine Kürzung vorgenommen werden, da die Höhe „z“ bereits dreistellig ist.

7.2 Vergleich der Punktwolken

Im linken Bildrand werden anschließend unter dem „DB-Tree“ die importierten Daten angezeigt. Durch Anklicken der einzelnen Punktwolken können die Eigenschaften im Reiter „Properties“ eingesehen und geändert werden.

Durch die bereits durchgeführte Georeferenzierung der Punktwolken liegen die Daten aus PhotoScan und Cyclone bereits übereinander. Da Teile der Punktwolken sich nicht überlappen, müssen diese Bereiche entfernt werden, um beim Vergleich keine fehlerhaften Abweichungen zu erhalten. Zur Bereinigung wird das Werkzeug „Segment“ gleichzeitig für beide Punktwolken benutzt. Mit dieser Funktion wird ein Polygon defi-

niert, das alle überlappenden Bereiche eingrenzt und die außenliegenden Punkte per Befehl entfernt.

Anschließend kann der Vergleich mit der Funktion „Compute cloud/ cloud distance“ gestartet werden. Die Berechnung der Distanzen zwischen den beiden Punktwolken geschieht anschließend vollautomatisch. Wie in Abbildung 53 zusehen, beträgt der maximale Abstand 2,17 Meter während im Durchschnitt 22 Zentimeter Differenz auftraten.

1	Min dist.	0
2	Max dist.	2.17015
3	Avg dist.	0.0517748
4	Sigma	0.223593
5	Max error	0.485261

Abbildung 53: Ergebnis des Punktwolkenvergleichs

Die maximale Distanz von 2,17 Metern ist auf die Datenlücken beim terrestrischen Laserscan zurückzuführen, da sich lediglich auf den Wegen stationiert werden kann. Durch die punktleeren Löcher wird die Distanz zum nächsten Punkt zu weit gemessen was zu den großen Abweichungen führt. In Abbildung 54 ist links eine Datenlücke zu erkennen und auf der rechten Seite die dadurch entstehende Abweichung (größte Abweichungen in Rot, geringste in Blau dargestellt).

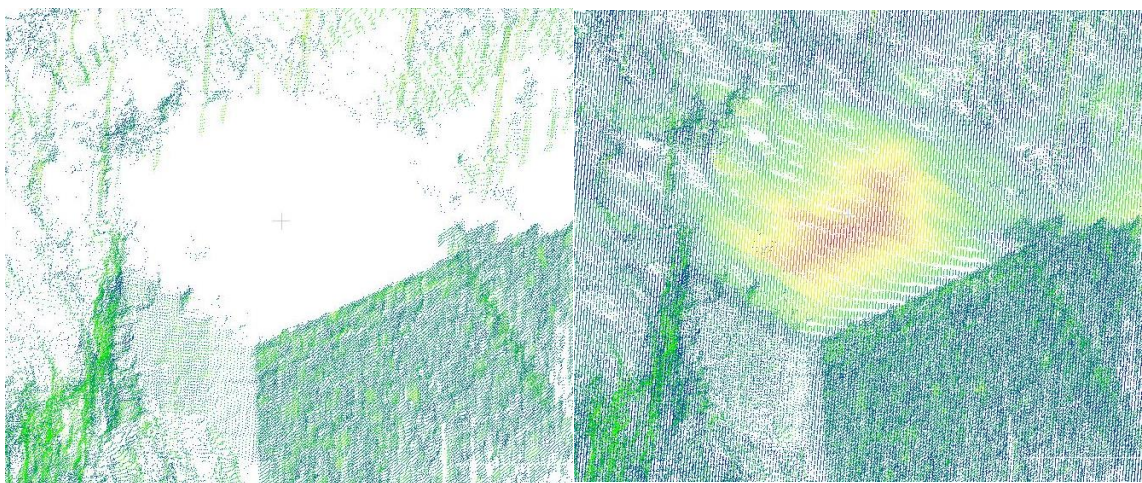


Abbildung 54: Entstehung der Abweichungen durch Datenlücken

In den von Cloudcompare automatisch erstellten Histogrammen sieht man, dass die meisten Punkte geringe Abweichung aufweisen (Abbildung 55, links). Daher wird genauer betrachtet, wie die Verteilung unter 50 Zentimetern aussieht (Abbildung 55, rechts). Eine Verteilung geringerer Distanzen ist nicht möglich, da das Programm beim Versuch diese zu berechnen abstürzt. Im Histogramm wird die Aussage, dass die durchschnittliche Distanz circa 20 Zentimetern beträgt, bestätigt. Im Histogramm bezeichnet „Count“ die Anzahl der Punkte und „Approximate distances“ die Abweichung zwischen beiden Punktwolken in Metern.

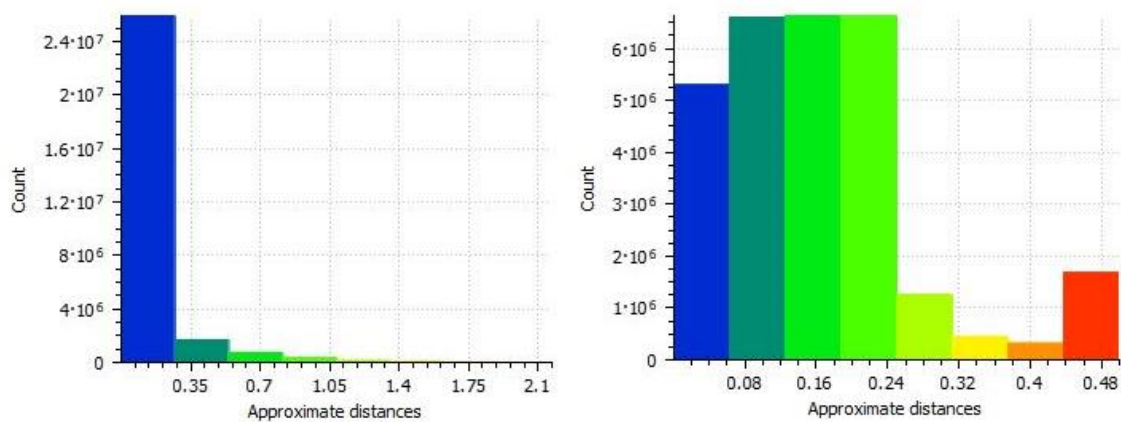


Abbildung 55: Histogramm der gesamten Abweichungen (links) und der Abweichungen unter 50 Zentimetern (rechts)

Es ist davon auszugehen, dass wenn keine Lücken in der Laserscanpunktwolke wären, die durchschnittliche Abweichung deutlich geringer ausfallen würde.

Die lückenlose Laserscan-Aufnahme des Gebiets ist jedoch aufgrund der örtlichen Gegebenheiten nicht möglich, was verhindert, dass die Überdeckung problemlos miteinander verglichen werden kann. Daher kann kein eindeutiges Ergebnis der Gegenüberstellung erreicht werden.

In Abbildung 56 sind die Datenlücken (rote Darstellung) deutlich zu erkennen. Lediglich die vom Laserscanner nicht erreichten Teile des Objekts weisen größere Abweichungen auf.

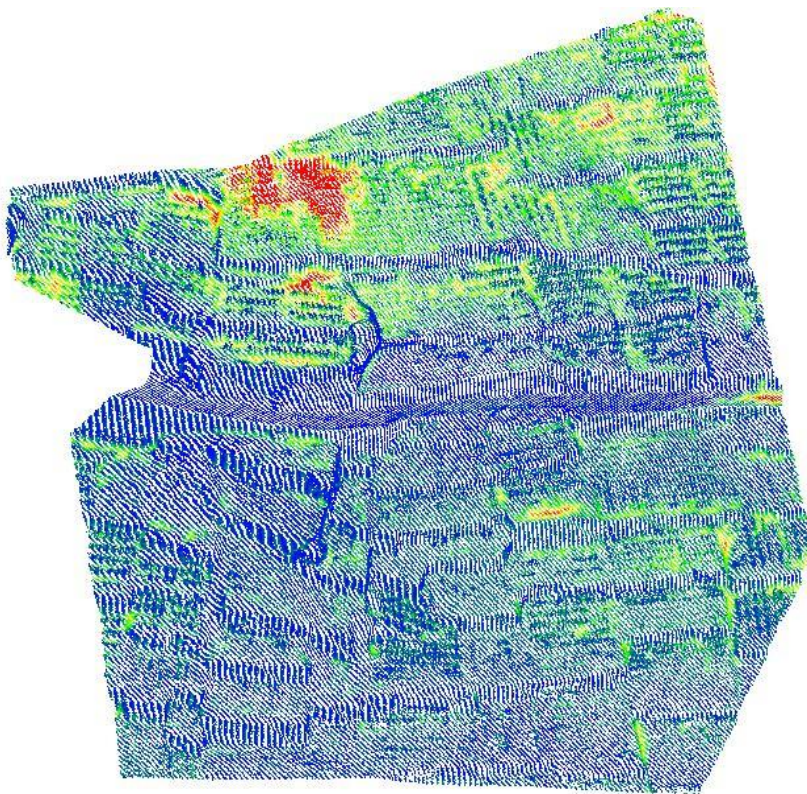


Abbildung 56: Vergleich der Punktwolken

Wird jedoch ein kleinerer Bereich, in diesem Fall ein Teil einer Mauer (Abbildung 57) betrachtet, erreicht man maximale Abweichungen von 15 Zentimetern und eine durchschnittliche Distanz zwischen beider Punktwolken von unter 4 Zentimetern. Jedoch sind auch hier Abweichungen aufgrund Datenlücken zu erwarten.

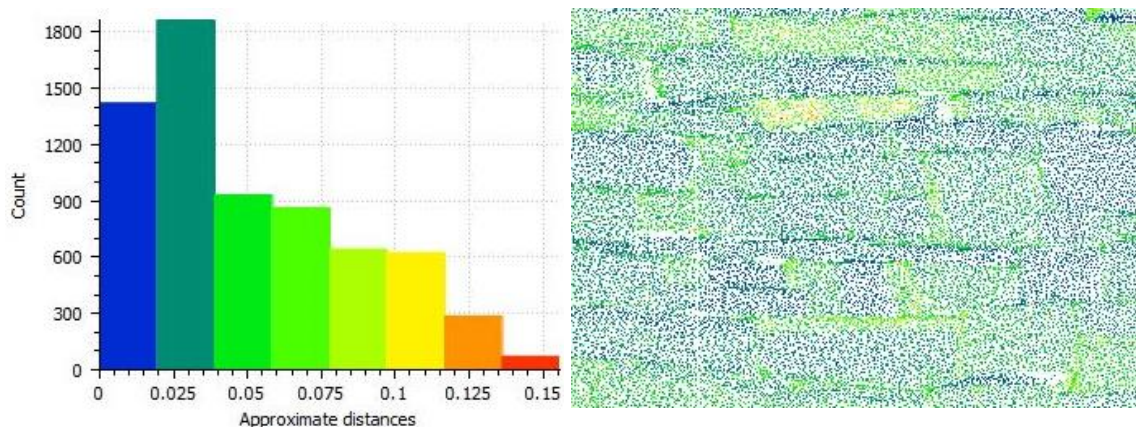


Abbildung 57: Vergleich eines kleinen Ausschnitts der Gesamtpunktwolke, Histogramm (links) und Darstellung (rechts)

Grundsätzlich besitzt das Modell des terrestrischen Laserscans eine höhere Genauigkeit als das der photogrammetrischen Erfassung. Aufgrund der teilweise großen Messdistanzen beim Laserscanning und der hohen Anzahl an Bildern bei der Drohnenbefliegung ist es jedoch wahrscheinlich, dass die Modellgenauigkeit der beiden Verfahren annähernd gleich ist.

Von einer Verknüpfung der beiden Punktwolken wird abgesehen da die Darstellung der 3D-Struktur der Oberflächen, insbesondere der Stützmauern, aufgrund der geringen Verschiebungen an Genauigkeit verlieren würde. Das 3D-Modell würde dann verschwommen wirken. Außerdem würde das Zusammenführen der Daten zur fehlerhaften Darstellung „schwebender“ Objekte wie den Weinreben und den Geländern führen. Aufgrund der geringen Rechenleistung muss zudem die Auflösung der Punktwolke möglichst gering gehalten werden, da sonst die kombinierte Punktwolke aufgrund von Komprimierungsvorgängen fehlerhaft dargestellt werden würde.

8 Webvisualisierung

Um das in Kapitel 6.3 erzeugte 3D-Modell zu veranschaulichen, wird es zunächst in eine graphische bzw. visuell erfassbare Form gebracht. Danach kann das Modell beispielsweise auf einer Website implementiert und sichtbar gemacht werden. Zur Webvisualisierung wird die Open-Source-Software 3DHOP verwendet.

3DHOP (3D Heritage Online Presenter) ist ein Open-Source-Softwarepaket, welches zur Erstellung interaktiver Webpräsentationen von hochauflösenden 3D-Modellen entwickelt wurde. Das Programm bietet die Möglichkeit der Erstellung einer interaktiven Visualisierung, indem die vorgefertigten HTML- und JavaScript-Komponenten in den HTML-Code eingefügt werden. Dadurch, dass eine Reihe an JavaScript-Funktionen bereitgestellt werden, können die Veranschaulichung und die Benutzerinteraktionen mittels deklarativen Programmierens konfiguriert werden. Neben der reinen Funktion als Viewer, bei dem beispielsweise die Beleuchtungsquelle und die Kameraansicht geändert werden kann, ist es möglich mit Hilfe eines Messtools Strecken auf dem 3D-Modell zu ermitteln.

Das Grafiklabor des italienischen Instituts für Informatik und Technologie (ISTI-CNR: Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione – Consiglio Nazionale delle Ricerche) hat das Softwarepaket im Interesse des Kulturerbes entwickelt. Aufgrund dessen findet 3DHOP hauptsächlich in der Archäologie Anwendung.

Für die Umsetzung von 3DHOP werden weder spezielle Server noch serverseitige Berechnungen benötigt. Aufgrund dieser Tatsache und der einfachen Realisierbarkeit wird eine solche Umsetzung der Webvisualisierung für die 3D-Aufnahme des Mauersanierungsprojekts „Winzerweg“ durchgeführt. Da alle weiteren Funktionen von 3DHOP keine Anwendung finden, wird sich die Webpräsentation auf die Basisfunktionen des Viewers beschränken. (ISTI-CNR, 2019)

8.1 Aufbau von 3DHOP

Mit Hilfe von 3DHOP kann mit wenig Aufwand eine interaktive multimediale Webpräsentation auf Basis digitaler 3D-Modelle erstellt werden. Die Software ist in JavaScript

geschrieben und basiert auf der SpiderGL-Bibliothek und der jQuery-Bibliothek. Dadurch, dass die einzelnen JavaScript-Komponenten in eine Standard-HTML-Seite eingefügt werden können, ist die Konfiguration dem Benutzer überlassen. 3DHOP kann auf allen üblichen Betriebssystemen verwendet werden, wenn ein Webbrowser installiert ist. Es sind keine Plug-Ins oder zusätzliche Komponenten für den Browser erforderlich. (ISTI-CNR, 2019)

Das erzeugte 3D-Modell beansprucht in der gewünschten Qualität eine hohe Datenmenge. Um die spätere Darstellung zu gewährleisten, muss das Modell formatiert werden. Hierzu wird das von 3DHOP empfohlene Open-Source-Tool „Nexus“ verwendet. Nexus besteht aus mehreren Komponenten und lässt sich direkt über die Homepage von 3DHOP herunterladen. Wie schon erwähnt sorgt Nexus dafür, dass große 3D-Modelle durch einen Komprimierungsalgorithmus in OpenGL bzw. JavaScript visualisiert werden können. Um dies zu ermöglichen, wird die Datenstruktur in eine ansichtsabhängige Auflösung umgewandelt.

Nexus besteht aus vier Elementen: „nxsbuild.exe“, „nxscompress.exe“, „nxsedit.exe“ und „nxsview.exe“. Das zu bearbeitende 3D-Modell sollte als eine PLY- oder OBJ-Datei exportiert werden. Im ersten Schritt wird somit das 3D-Modell mit Hilfe des „nxsbuild.exe“ Tool in das gewünschte NXS-Format konvertiert. Dieses Format sorgt dafür, dass 3D-Modelle durch die Bildung multipler Instanzen mit ansichtsabhängiger Auflösung erstellt werden. Das konvertierte Modell wird dann mit dem Werkzeug „nxscompress.exe“ komprimiert. Die dadurch erzeugte NXZ-Datei kann jetzt mit dem Tool „nxsedit.exe“ in Bezug auf die Hierarchieebenen nachbearbeitet werden. Um das erstellte Endprodukt zu begutachten, wird der Viewer „nxsview.exe“ verwendet. (Ponchio, 2019)

8.2 Umsetzung von 3DHOP

Nachdem 3DHOP und Nexus jeweils in der Version 4.2 gedownloadet sind, kann mit der Bearbeitung begonnen werden. Im ersten Schritt wird das 3D-Modell in denselben Dateordner kopiert, in dem sich auch das Nexus-Tool befindet. Um das Modell von einer PLY-Datei in das gewünschte NXS-Format zu konvertieren, wird dieses per Drag

and Drop auf das „nxsbuild.exe“ Tool gezogen. Nachdem sich die Windows Eingabeaufforderung öffnet und wieder schließt, ist die Konvertierung erfolgreich.

Jetzt kann die Datei komprimiert werden. Die Vorgehensweise ist hierbei identisch wie beim Konvertieren. Als Endprodukt erhält man ein 3D-Modell im NXZ-Format, welches weniger Speicherplatz benötigt als zuvor. Vor der Komprimierung betrug die Dateigröße des 3D-Modells rund 357 MB und danach lediglich 198 MB. Nexus bietet einen Viewer an mit dem vorab das umgewandelte Modell betrachtet werden kann. Hierzu wird die „3D-Modell.nxz“-Datei per Drag and Drop auf das Viewer Tool gezogen. In Abbildung 58 ist das umgewandelte 3D-Modell in der Viewer-Ansicht dargestellt.

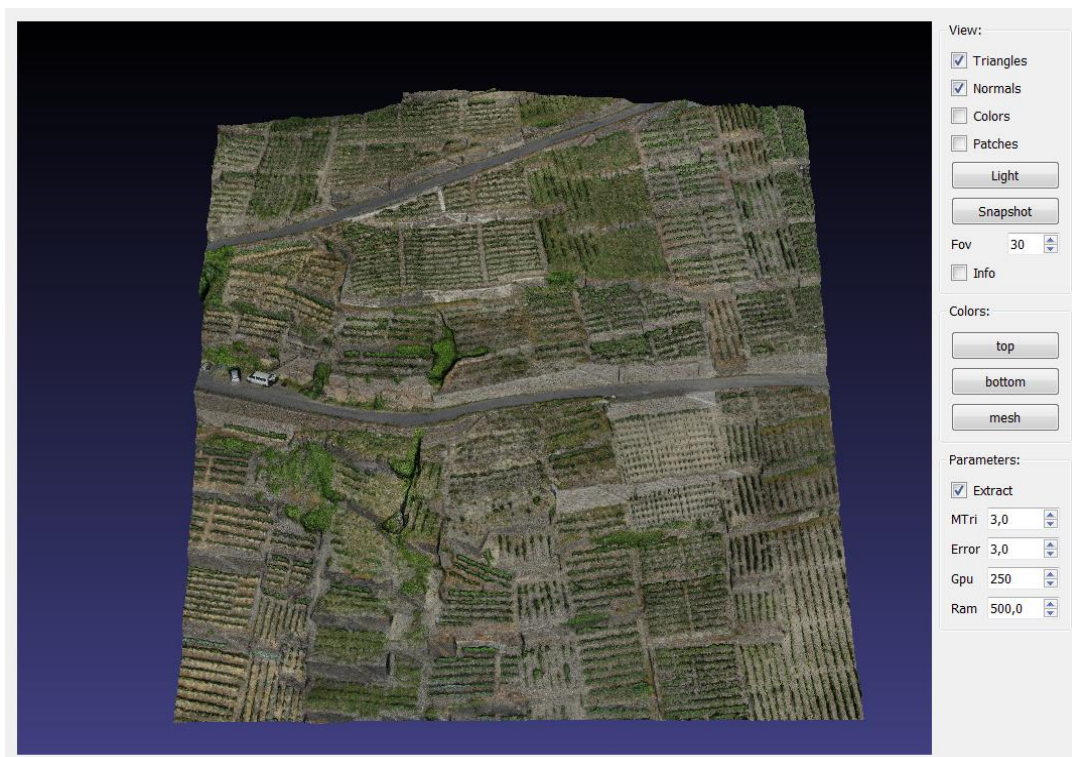


Abbildung 58: 3D-Modell im Nexus Viewer

Nachdem diese vorbereitenden Maßnahmen abgeschlossen sind, wird der 3DHOP-Viewer als unabhängiges HTML-Element in die bereits vorbereitete HTML-Seite eingefügt. Vorweg wird das Stylesheet (CSS) eingebunden, welches den gestalterischen Teil der HTML-Seite ausmacht. Des Weiteren werden einige JavaScript-Files eingebunden, um externe Bibliotheken mit einzubeziehen und den Viewer zu initialisieren.

```
<body>
<div id="3dhop" class="tdhop" onmousedown="if (event.preventDefault) event.preventDefault()"><div id="tdhlg"></div>
<div id="toolbar">
  <br/>
  <br/>
  <br/>
  
  <br/>
  
  
</div>
<canvas id="draw-canvas" style="background-image: url(skins/backgrounds/White.jpg)"/>
</div>
</body>
```

Abbildung 59: Definition der Toolbar, inklusive Hintergrund

In Abbildung 59 ist der „Body“ der HTML-Seite zu sehen. Hier ist die Hauptkomponente von 3DHOP in einem einzigen div-Bereich mit der ID „3dhop“ definiert. In dem danach befindlichen Definitionsbereich ist die Toolbar mit der ID „toolbar“ programmiert. Hier lassen sich die verschiedenen Bedienelemente des Viewers festlegen. In diesem Fall wird die Toolbar auf vier Funktionen beschränkt: einen Home-Button, zwei Buttons zum Zoomen, zwei Buttons um die Helligkeit zu verändern und einen Button mit dem der Vollbildmodus aktiviert werden kann. In diesem Bereich könnten weitere Werkzeuge implementiert werden, wie zum Beispiel ein Messtool. Um die Webansicht übersichtlich zu gestalten und die Anwendung lediglich der reinen Visualisierung des Weinbergs dienen soll, wird hier auf weitere Tools verzichtet. Im unteren Bereich der Abbildung ist ein HTML spezifisches Canvas-Element definiert. Dies ist in der HTML-Sprache ein mit Höhen- und Breitenangaben beschriebener Bereich, in dem per JavaScript gezeichnet oder dynamische Bitmap-Grafiken gerendert werden können (Quaese, 2019). In diesem Skript wird über die Canvas-Definition der Hintergrund durch ein JPG-Bild im Viewer festgelegt.

```
<script type="text/javascript">
var presenter = null;

function setup3dhop() {
  presenter = new Presenter("draw-canvas");

  presenter.setScene({
    meshes: {
      "3DModell" : { url: "models/Final3D.nxz" }
    },
    modelInstances: {
      "Modell" : { mesh : "3DModell" }
    },
    trackball: {
      type : PanTiltTrackball,
      trackOptions : {
        startPanX: 0.0,
        startPanY: 0.0,
        startAngleX: 0.0,
        startAngleY: 0.0,
        startDistance: 1.6,
        minMaxPanX: [-0.7, 0.7],
        minMaxPanY: [-0.7, 0.7],
        minMaxAngleX: [-90.0, 90.0],
        minMaxAngleY: [-70.0, 70.0],
        minMaxDist: [0.1, 3.0]
      }
    }
  });
}
```

Abbildung 60: JavaScript Funktion „setup3dhop()“

Um das 3DHOP-Tool einzurichten, müssen JavaScript-Methoden in das HTML-Skript eingefügt werden.

In Abbildung 60 ist die elementare Funktion „setup3dhop()“ zu sehen. Diese Funktion sorgt für die Einbindung des Canvas-Elements und beinhaltet das Setup für die 3D-Szene. Als erstes wird ein „presenter“-Objekt erstellt, dem die ID des Canvas-Elements („draw-canvas“) übergeben wird. Im nächsten Schritt wird in der Funktion „presenter.setScene“ das 3D-Modell eingebunden und konfiguriert. Unter „meshes“ wird das gewünschte 3D-Modell eingelesen und erzeugt. Hierzu muss die richtige Ordnerstruktur angegeben werden. Das Objekt erhält den Namen „3DModell“ mit dem entsprechenden Dateipfad „models/3D-Modell.nxz“. Nun wird unter „modelInstances“ die Instanz „Modell“ erstellt. Diese bezieht sich auf das zuvor eingebundene Modell mit der ID „3DModell“. Die erstellte Instanz sorgt dafür, dass dem Viewer bekannt ist, welches Modell er rendern soll.

Als nächstes wird die JavaScript-Funktion „trackball“ definiert. Dabei wird festgelegt, in wie weit sich das Modell über den Trackball bewegen bzw. drehen lässt. Des Weiteren lässt sich in dieser Funktion die Startansicht des Modells beim erstmaligen Laden

definieren. Die maximale und minimale Zoomstufe wird in dieser Funktion unter „minMaxDist“ festgelegt.

```
function actionsToolbar(action) {
    if(action=='home') presenter.resetTrackball();
    else if(action=='zoomin') presenter.zoomIn();
    else if(action=='zoomout') presenter.zoomOut();
    else if(action=='light' || action=='light_on')
        { presenter.enableLightTrackball(!presenter.isLightTrackballEnabled()); lightSwitch(); }
    else if(action=='full' || action=='full_on') fullscreenSwitch();
}

$(document).ready(function() {
    init3dhop();

    setup3dhop();

    resizeCanvas(800,600);

    moveToolbar(20,20);
});
</script>
</html>
```

Abbildung 61: JavaScript Funktion "actionToolbar(action)"

In Abbildung 61 ist die Toolbar in der letzten Funktion „actionToolbar(action)“ definiert. In dieser JavaScript-Funktion ist die Umsetzung der verschiedenen Bedienelemente der Toolbar realisiert.

Abschließend wird durch das Aufrufen der Funktionen „init3dhop()“ sowie „setup3dhop()“ der Viewer initialisiert und mit den übergebenen Werten der Canvas-Szene dargestellt.

Um das Endergebnis zu betrachten, wird das erstellte HTML-Skript über den Webbrowser aufgerufen. Das Resultat ist eine übersichtliche Ansicht des modellierten Weinbergs, der mit Hilfe der Viewertools von allen Seiten betrachtet werden kann. Die Abbildung 62 spiegelt die Vieweransicht auf der Website wider. In der linken oberen Ecke der Abbildung sind die beschriebenen Buttons mit ihren entsprechenden Funktionen zu sehen. Dadurch, dass alle Arbeitsschritte mit Hilfe einer Anleitung getätigt werden, können alle individuellen Vorstellungen auf einfache Weise umgesetzt werden.



Powered by 3DHOPE

Abbildung 62: 3DHOP-Viewer

9 Fazit

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Bachelorarbeit zeigen, dass bei der Betrachtung von Punktwolken aus terrestrischen Laserscandaten und UAV-Daten die Grenzen beider Messverfahren aufgezeigt werden.

Die hohe Genauigkeit des terrestrischen Laserscanning ist derzeit noch nicht mit der photogrammetrischen Auswertung von UAV-Daten realisierbar. Das liegt daran, dass die 3D-Koordinaten direkt auf der Objektoberfläche gemessen und nicht wie bei der photogrammetrischen Berechnung im Nachhinein rekonstruiert werden.

Das Laserscan-Messverfahren ist jedoch bauartbedingt an einen festen Aufnahmestandpunkt gebunden, wodurch entweder verdeckte Teile des Objekts nicht erfasst werden können oder durch große Entfernungen Abweichungen entstehen. Blicktote oder nicht erreichbare Teile eines Objekts können daher durch die UAV-Befliegung ausgeglichen werden.

Jedoch ist die Drohnenbefliegung von vielen verschiedenen Faktoren wie zum Beispiel den Witterungsverhältnissen oder den Fähigkeiten des Piloten abhängig. Dazu gehören unter anderem zu hohe Windgeschwindigkeiten oder Regen. Die Genauigkeit der Aufnahme hängt zudem von den Kameraeigenschaften und der Objektoberfläche ab. Um unscharfe Fotos zu vermeiden werden daher kurze Belichtungszeiten und ein Bildstabilisator verwendet.

Bedingt durch die Größe des Objekts muss bereits bei der Messung die gewählte Auflösung geringgehalten werden und zusätzlich im Nachhinein eine Reduzierung der Datenmenge erfolgen. Das liegt daran, dass es selbst leistungsstarke Rechner nicht schaffen eine so große Datenmenge zu verarbeiten. Die daraus resultierende geringere Genauigkeit hat zum einen Einfluss auf die dreidimensionale Visualisierung der Weinberge, beeinflusst aber auch die Gegenüberstellung der Verfahren negativ.

Zu Forschungszwecken wäre es daher besser ein Objekt zu wählen, was durch beide Aufnahmemethoden annähernd lückenlos aufgenommen werden kann.

Trotz der Einschränkungen ist der Unterschied zwischen alten und neuen Weinbergsmauern klar erkennbar. Wie in Abbildung 63 sichtbar sind die neuen Mauern hell, während die alten Weinbergsmauern dunkel dargestellt werden.



Abbildung 63: Vergleich zwischen alter (links) und neuer Weinbergsmauer (rechts)

Literaturverzeichnis

- AdV. (2016). *SAPOS-Broschüre*.
- AdV. (Juli 2019). <https://www.sapos.de>.
- Agisoft LLC. (2018). Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4.
- Agrarmeteorologie RLP. (2019). *Agrarmeteorologie RLP*. Von <https://www.wetter.rlp.de> abgerufen
- ArduPilot. (2019). *ArduPilot*. Von <http://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html> abgerufen
- Bender, E. (11. Sonderheft 1993). Kostensituation im Weinbau sowie wirtschaftliche Aspekte bei Flurbereinigungsverfahren an der Ahr. *Nachrichten aus der Landeskulturverwaltung Rheinland Pfalz*.
- BMVI, B. f. (2019). *Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur*. Von <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/LF/151108-drohnen.html> abgerufen
- CGS Europe. (Juli 2019). *cgseurope.net*. Von <http://repository.cgseurope.net/eng/cgseurope/knowledge-repository/key-reports/monitoring/2/2/2.aspx> abgerufen
- Cloudcompare. (Juli 2019). <http://www.cloudcompare.org/>. Von <http://www.cloudcompare.org/> abgerufen
- Datum Tech Solutions. (Juli 2019). *datumtechsolutions.com*. Von <https://datumtechsolutions.com/products/leica-hds-6-black-white-target> abgerufen
- Deumlich, F., & Staiger, R. (2002). *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik*. Wichmann.
- Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinland Pfalz. (Juli 2006). *Flurbereinigungsbeschluss zum Verfahren Walporzheim*. Mayen.
- dkamera. (2019). *dkamera, Das Digitalkamera-Magazin*. Von <https://www.dkamera.de/datenblatt/sony-alpha-7r/> abgerufen
- Gordon, B. (2008). *Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner*. Darmstadt.
- Gottesch, G. (57. Heft 2016). Darstellung und Bewertung von unterschiedlichen Möglichkeiten zur Sanierung bzw. Wiederherstellung von Weinbergsmauern aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht. *Landentwicklung und Ländliche Bodenordnung Nachrichtenblatt*.
- Infotip Service GmbH. (Juli 2019). *kompedium.infotip.de*. Von <https://kompedium.infotip.de/id-4-fehlerquellen-erweiterungen-und-verbesserungen.html> abgerufen

- ISTI-CNR. (2019). *3DHOP*. Von <http://vcg.isti.cnr.it/3dhop/> abgerufen
- Jacoby, H. (2014). *Wege und Gewässerplan Beiheft 3 Landespflege*. Mayen.
- Kern, F. (2003). *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten*. Braunschweig.
- Klonowski, J. (2017). *Skript Vermessung3*. Mainz.
- Kuhlmann, H., & Holst, C. (25. Februar 2016). https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-662-46900-2_35-1. Von Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning. abgerufen
- Leica Geosystems AG. (September 2014). *WFD – Wave Form Digitizer Technology*. Heerbrugg.
- Leica Geosystems AG. (2019). *Leica ScanStation P30/P40*. Heerbrugg, Schweiz.
- LuftVO. (2015, Abschnitt 5a). Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO). In B. f. BMVI.
- LVerGeo. (Juli 2019). [geoportal.rlp.de](http://www.geoportal.rlp.de). Von <http://www.geoportal.rlp.de/portal/karten.html?WMC=11721> abgerufen
- MagicMaps GmbH. (Juli 2019). [magicmaps.de](http://www.magicmaps.de). Von <https://www.magicmaps.de/produktinfo/gps-grundlagen/praezise-gps-messungen-mit-hilfe-von-dgps-und-rtk.html> abgerufen
- Meyer, A. (11. Sonderheft 1993). Erhaltung historischer Weinbergslagen als Ziel des Tourismus. *Nachrichten aus der Landeskulturverwaltung Rheinland Pfalz*.
- Ponchio, F. (2019). *Nexus: adaptive 3D*. Von (C++ and Javascript): <http://vcg.isti.cnr.it/nexus/> abgerufen
- Projektgruppe SAPOS®-Qualitätsmanagement. (02. Juni 2017). <https://www.sapos.de>. Von Produktdefinition SAPOS. abgerufen
- Quaese, J. (2019). *<Canvas>*. Von <http://canvas.quaese.de/> abgerufen
- RotorKonzept. (2019). *RotorKonzept*. Von <https://www.rotorkonzept.de/octocopter-drohne-rkm-8x> abgerufen
- Saftig, A. (11. Sonderheft 1993). Schutz von historischen Weinbergen aus der Sicht der Unteren Denkmalschutzbehörde. *Nachrichten aus der Landeskulturverwaltung Rheinland Pfalz*.
- Schäfer, T. (2017). *Berührungslose und flächenhafte Deformationsmessungen an Betonoberflächen unter besonderer Berücksichtigung der Interaktion zwischen Laserstrahl und Oberfläche*. München.
- Schlüter, M. (2017). *Skript Photogrammetrie*.
- Wendling, W. (11. Sonderheft 1993). Die Rebterrassen des Ahrtals aus der Sicht des Natur- und Artenschutzes. *Nachrichten aus der Landeskulturverwaltung Rheinland Pfalz*.
- Witte, B., & Sparla, P. (2015). *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen*. Aachen: Wichmann-Verlag.

10.3 Aufstiegsgenehmigung für die Drohnenbefliegung

BAD NEUENAHR · AHRWEILER



STADTVERWALTUNG

Kreisstadt Bad Neuenahr-Ahrweiler
Hauptstraße 116 · 53474 Bad Neuenahr Ahrweiler
Fon 02641-87-0 · Fax 02641 - 87-180
stadt@bad-neuenahr-ahrweiler.de
www.bad-neuenahr-ahrweiler.de

Stadtverwaltung - Postfach 10 10 51 - 53448 Bad Neuenahr-Ahrweiler

Herrn
Malte Retterath
Brunnenstraße 4
53518 Quiddelbach

Pia Vogt
Gebäude- und Grundstücksmanagement
Fon 0 26 41 – 87-247
pia.vogt@bad-neuenahr-ahrweiler.de

Anlage	Datum und Zeichen Ihres Schreibens	Unser Zeichen	Datum
	23.05.2019	1.3.1	27.05.2019

Aufstiegsenehmigung für eine Drohne

Sehr geehrter Herr Retterath,

unter Bezugnahme auf Ihren Antrag vom 23.05. bzw. 24.05.2019 erteilt die Stadt Bad Neuenahr-Ahrweiler als Grundstückseigentümerin des Flurstücks 108, Flur 56, Gemarkung Ahrweiler, die Genehmigung, das Flurstück zwischen dem 03.06. und dem 14.06.2019 zum Starten und Landen mit einer Drohne zu benutzen sowie die geplanten Luftaufnahmen zu erstellen.

Die Genehmigung erfolgt unbeschadet sonstiger Genehmigungspflichten und auf jederzeitigen Widerruf.

Mit freundlichen Grüßen

Im Auftrag

Wiemer



10.4 Verzeichnisstruktur der CD

Verzeichnis	Inhalt
\01_Messergebnisse	3D-Modell.ply DEM.pdf Orthomosaik.pdf Referenzkoordinaten.txt
\02_Bachelorarbeit	\Abbildungen Aufgabenstellung_Retterath_Thelen.pdf Bachelorarbeit_Retterath_Thelen.pdf Bachelorarbeit_Retterath_Thelen.docx
\03_Website	\images \js \models \skins \stylesheet Anleitung_Nutzung_3D-Modell.pdf Aufgabenstellung.html Durchfuehrung.html Ergebnis.html
\04_Poster	\Abbildungen Poster_Retterath_Thelen.pdf Poster_Retterath_Thelen.pptx
\05_Erfassungsbogen	Erfassungsbogen_Retterath.pdf Erfassungsbogen_Thelen.pdf
\Inhaltsverzeichnis.txt	

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Malte Matthias Retterath, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit

„3D- Aufnahme und Modellierung des Mauersanierungsprojekts „Winzerweg“ innerhalb der historischen Weinbergslagen in Walporzheim an der Ahr“

selbständig ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Ich habe nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Hennrik Thelen, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit

„3D- Aufnahme und Modellierung des Mauersanierungsprojekts „Winzerweg“ innerhalb der historischen Weinbergslagen in Walporzheim an der Ahr“

selbständig ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Ich habe nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift