



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

Workflows im terrestrischen Laserscanning und in der
UAV-Photogrammetrie: Eine Evaluation im Bereich der
archäologischen Objektdokumentation

verfasst von / submitted by

Barbara Tremel, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Master of Science (MSc)

Wien, 2017 / Vienna 2017

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066 856

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Kartographie und Geoinformation

Betreut von / Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl

Für Schnub

*„For small creatures such as we
The vastness is bearable only through love.“*

- Carl Sagan -

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	IV
TABELLENVERZEICHNIS	VII
KURZFASSUNG/ABSTRACT	VIII
DANKSAGUNG	IX
1 EINLEITUNG	1
1.1 FORSCHUNGSFRAGEN UND METHODIK	2
1.2 AUFBAU DER ARBEIT	3
2 LASERSCANNING	5
2.1 DAS PRINZIP DES LASERSCANNING – HISTORISCHES UND GRUNDLAGEN	5
2.2 ZU LANDE UND IN DER LUFT: ARTEN DES LASERSCANNING	10
2.2.1 <i>Airborne Laserscanning (ALS)</i>	10
2.2.2 <i>Terrestrisches Laserscanning (TLS)</i>	13
2.2.3 <i>Kinematisches Laserscanning (KLS)</i>	14
2.2.4 <i>Laserscanning im extremen Nahbereich</i>	16
2.3 TERRESTRISCHES LASERSCANNING IM DETAIL	17
2.3.1 <i>TLS im Vergleich mit Tachymetrie und historische Entwicklungen</i>	17
2.3.2 <i>Klassifizierung von terrestrischen Laserscannern</i>	21
2.3.3 <i>Einflussfaktoren beim terrestrischen Laserscanning</i>	25
2.4 DER TYPISCHE MESSABLAUF EINES LASERSCANNING-PROJEKTS	27
2.4.1 <i>Vorbereitung</i>	27
2.4.2 <i>Feldarbeit</i>	29
2.4.3 <i>Auswertung</i>	30
3 UAV-PHOTOGRAMMETRIE	38
3.1 BEGRIFFSDEFINITION UND HISTORISCHER ÜBERBLICK.....	38
3.2 KLASSIFIZIERUNG VON UAVS	41
3.2.1 <i>Beispiele für Klassifikationsmethoden</i>	41
3.2.2 <i>Rechtliche Rahmenbedingungen</i>	46
3.3 KOMPONENTEN EINES MULTIKOPTERS	49

3.3.1	<i>Steuerungsplatine</i>	49
3.3.2	<i>Sensoren</i>	50
3.3.3	<i>Motoren und Propeller</i>	52
3.3.4	<i>Akku</i>	53
3.3.5	<i>Fernsteuerung und Empfänger</i>	53
3.3.6	<i>Rahmenkonstruktion</i>	54
3.3.7	<i>Sicherheit</i>	55
3.3.8	<i>Navigation und Flugsteuerung</i>	56
3.4	DER STRUCTURE FROM MOTION-ALGORITHMUS UND AUSWERTESOFTWARES	57
3.4.1	<i>Structure from Motion: Grundprinzip und Funktionsweise</i>	57
3.4.2	<i>Structure from Motion-Softwares</i>	61
3.5	DER TYPISCHE MESSABLAUF EINES UAV-PROJEKTS	63
3.5.1	<i>Vorbereitung</i>	63
3.5.2	<i>Feldarbeit</i>	65
3.5.3	<i>Auswertung</i>	66
4	DIE ANWENDUNG VON TLS UND UAVS IN DER ARCHÄOLOGIE	70
4.1	BEISPIELE FÜR DEN EINSATZ VON TERRESTRISCHEM LASERSCANNING	72
4.1.1	<i>Virtuelle Rekonstruktion des Almaqah-Tempels von Yeha in Äthiopien</i>	72
4.1.2	<i>Scanning the Pyramids: TLS-Einsatz bei den Pyramiden von Gizeh</i>	74
4.2	BEISPIELE FÜR DEN EINSATZ VON UAV-PHOTOGRAMMETRIE	78
4.2.1	<i>Befliegung und Auswertung von Haufwerken mittels LowCost-UAV</i>	78
4.2.2	<i>Ein dreidimensionales Modell von Burg Landenberg (Schweiz)</i>	80
4.3	BEISPIELE FÜR DEN KOMBINIERTEN EINSATZ VON TLS UND UAVS	83
4.3.1	<i>Dokumentation archäologischer Fundstätten in Peru durch TLS und UAV</i>	83
4.3.2	<i>Erstellung von Orthophotos der tschechischen St. Nikolaus-Kirche durch kombinierten Einsatz von TLS und SfM</i>	87
5	PRAXISBEISPIEL: DAS HEIDENTOR VON PETRONELL-CARNUNTUM	90
5.1	VORBEREITUNG	90
5.1.1	<i>Der terrestrische Laserscanner Riegl VZ-6000</i>	91
5.1.2	<i>Der Multikopter DJI Phantom 3 Professional</i>	93
5.2	DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET	96
5.3	MESSUNGEN MIT DEM TERRESTRISCHEN LASERSCANNER: FELDARBEIT UND AUSWERTUNG	100
5.3.1	<i>Feldarbeit</i>	100
5.3.2	<i>Auswertung mittels RiSCAN Pro</i>	102
5.4	MESSUNGEN MIT DEM UAV: FELDARBEIT UND AUSWERTUNG	111
5.4.1	<i>Feldarbeit</i>	111
5.4.2	<i>Auswertung mittels Agisoft PhotoScan</i>	113

6	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	122
6.1	ERGEBNISSE DES HEIDENTOR-PROJEKTS	122
6.1.1	<i>TLS versus UAV-Photogrammetrie: Ergebnisse der Vorbereitung</i>	<i>122</i>
6.1.2	<i>TLS versus UAV-Photogrammetrie: Ergebnisse der Feldarbeit</i>	<i>124</i>
6.1.3	<i>TLS versus UAV-Photogrammetrie: Ergebnisse der Auswertung</i>	<i>126</i>
6.1.4	<i>Das Heidentor-Projekt: Ein Zwischenfazit</i>	<i>130</i>
6.2	DISKUSSION DER FORSCHUNGSFRAGEN	131
7	ZUSAMMENFASSUNG	138
8	LITERATUR.....	140
	LEBENS LAUF	147

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum, Quelle: [HER-09: 22].....	7
Abbildung 2: Gegenüberstellung von weißem/gefiltertem Glühlampenlicht sowie Laserlicht, Quelle: [MIT-16: 10]	8
Abbildung 3: Schematische Erzeugung eines Laserstrahls, Quelle: [KOL-10: 14], eigene Darstellung.....	9
Abbildung 4: Ablauf einer tachymetrischen Messung, Quelle: [MÖS-15: 14]	9
Abbildung 5: Signalaufzeichnung mittels Multiple Echo- und Full Waveform-Sensoren im Vergleich. Drei verschiedene Aufnahmepunkte ((a) Erdoberfläche, (b) Hausdach, (c) Mischung aus (a) und (b)) zeigen eine jeweils unterschiedliche Signalaufzeichnung, Quelle: [BER-10: 28].....	11
Abbildung 6: DOM (links) und DGM (rechts) im Vergleich, Quelle: [MIT-16: 30], verändert	12
Abbildung 7: Helixförmige Datenerfassung eines Laserscanners auf einem kinematischen Träger, Quelle: [HES-07: 11]	14
Abbildung 8: Lasertriangulation mit begrenztem Messbereich und Gefahr schleifender Schnitte, Quelle: [MIT-16: 45]	16
Abbildung 9: Klassifizierung der Messstrategien beim TLS, Quelle: [STA-07: 82]	19
Abbildung 10: Impulslaufzeitverfahren, Quelle: [HES-07: 46]	21
Abbildung 11: Phasenvergleichsverfahren, Quelle: [HES-07: 45].....	22
Abbildung 12: Klassifizierung von Laserscannern nach Größe des Gesichtsfeldes, Quelle: [KOL-10: 19], verändert.....	23
Abbildung 13: Klassifizierung von Laserscannern nach Art der Strahlableitung, Quelle: [HES-07: 47], verändert.....	24
Abbildung 14: Strahldivergenz und (Winkel-)Schrittweite: Zwei wichtige Parameter im Scanprozess, Quelle: [URL-02]	25
Abbildung 15: Arbeitsschritte im Auswertungsprozess eines TLS-Projekts, Quelle: [KER-08: 32], eigene Bearbeitung	30
Abbildung 16: Ebenensegmentierung mittels Bereichswachstumsverfahren: Von links nach rechts und oben nach unten: (a) Neues Rathaus Hannover, (b) Lutherkirche, (c) Welfenschloss und (d) Oper. Jede Farbe steht für eine segmentierte Fläche, Quelle: [BRE-07: 6]	34
Abbildung 17: Dreiecksvermaschung einer Fassade der Kaiser-Wilhelm-Gedächtniskirche in Berlin, Quelle: [URL-3]	35
Abbildung 18: Zusammenfassende Darstellung des Laserscanning-Workflows, Quelle: [MIT-16], [ZOG-06] und [KER-08], eigene Bearbeitung	37
Abbildung 19: UAV, Multikopter, Drohne? Eine einheitliche Begriffsdefinition ist schwierig, Quelle: [URL-6]	39
Abbildung 20: Beispiele für (a) horizontal, (b) senkrecht startende Systeme, (c) Quadrocopter und (d) UAVs, die leichter als Luft sind, Quelle: [SIE-09: 7], verändert	42
Abbildung 21: Kategorisierung von unbemannten Luftfahrzeugen der Klasse 1, Quelle: [AUS-15: 7]	48
Abbildung 22: Basiskomponenten eines Multikopters, Quelle: [BÜC-15: 17]	49
Abbildung 23: Nick, Roll, Gier und Gas am Multikopter und an der Fernsteuerung, Quelle: [BÜC-15: 10], verändert.....	54
Abbildung 24: Ein crashsicherer Multikopter-Rahmen, der Elektronik und Batterie in einem Metallgehäuse schützt, Quelle: [BÜC-15: 32].....	55

Abbildung 25: Im Vorhinein festgelegte Abfolge von Waypoints, Quelle: [BÜC-15], eigene Bearbeitung	57
Abbildung 26: Das Structure from Motion-Grundprinzip, Quelle: [WES-12: 301]	58
Abbildung 27: Vom digitalen Foto zum digitalen Geländemodell: Der Structure from Motion-Workflow, Quelle: [WES-12: 303]	60
Abbildung 28: 3D-Modell mit CMVS/PMVS2 (links) und CPMVS (rechts), Quelle: [ZIE-14: 5]	62
Abbildung 29: Arbeitsschritte im Auswertungsprozess eines UAV-Projekts, Quelle: [EIS-09], [KER-12], [KER-16] und [NEI-11], eigene Bearbeitung	66
Abbildung 30: (a) aufgenommenes Objekt mit definierten Kontrollpunkten (A, B und C), (b) dünne Punktwolke und (c) dichte Punktwolke, Quelle: [WES-12: 305]	68
Abbildung 31: Zusammenfassende Darstellung des UAV-Workflows, Quelle: [EIS-09], [KER-12], [KER-16] und [NEI-11], eigene Bearbeitung	69
Abbildung 32: Ansichten des virtuellen Modells des Almaqah-Tempels, Quelle: [LIN-10: 53]	73
Abbildung 33: Almaqah-Tempel in AutoCAD mit rekonstruiertem Propylon, Quelle: [LIN-10: 55]	74
Abbildung 34: Der Riegl LMS Z420i mit kalibrierter Nikon D100 Digitalkamera und WLAN-Box vor der Cheops-Pyramide, Quelle: [NEU-05: 471]	75
Abbildung 35: Ein eingefärbter Scan der Cheops-Pyramide in RiSCAN Pro in einer 2D- (oben) und 3D-Ansicht (unten), Quelle: [NEU-05: 472]	76
Abbildung 36: Das triangulierte Modell der Sphinx von Gizeh, texturiert mit RiSCAN Pro, Quelle: [NEU-05: 475]	77
Abbildung 37: Test-Haufwerke: Beispiel 1 (links) und Beispiel 2 (rechts), Quelle: [FIS-16], verändert	78
Abbildung 38: 3D-PDF des zweiten Haufwerks, Quelle: [FIS: 233]	79
Abbildung 39: In zwei Phasen durchgeführter UAV-Bildflug: Einmal kreisförmig um das gesamte Gebäude und einmal lineare Aufnahme der Frontfassade, Quelle: [PUE-08: 95]	81
Abbildung 40: Das fertige Modell des Schützenhauses der Burg Landenberg, Quelle: [EIS-09: 140]	82
Abbildung 41: Lage der Untersuchungsgebiete Santa Maria und Cutamalla in den peruanischen Anden, Quelle: [FRI-14: 207]	84
Abbildung 42: Geländemodelle von Santa Maria (links) und Cutamalla (rechts) als schattierte 3D-Reliefs; Quelle: [FRI-14: 213]	85
Abbildung 43: Vergleich des UAV-DSM mit den TLS-Modellen von Santa Maria; links: UAV-DSM - TLS-DTM, rechts: UAV-DSM - TLS-DSM, Quelle: [FRI-14: 217]	86
Abbildung 44: Vergleich des UAV-DSM mit den TLS-Modellen von Cutamalla; links: UAV-DSM - TLS-DTM, rechts: UAV-DSM - TLS-DSM, Quelle: [FRI-14: 217]	86
Abbildung 45: Mesh (links) und Orthophoto (rechts) der Westfassade, Quelle: [KOS-13: 135f.], verändert	88
Abbildung 46: Maskierung von unerwünschten Objekten im Mittelschiff der St. Nikolaus-Kirche, Quelle: [KOS-13: 137]	89
Abbildung 47: Aufbau des terrestrischen Laserscanners Riegl VZ-6000 (oben: Frontalansicht, unten: Draufsicht), alle Zahlenangaben in mm, Quelle: [RIE-15: 3], verändert	92
Abbildung 48: Bestandteile des DJI Phantom 3 Professional, Quelle [DJI-15: 2], verändert	94
Abbildung 49: Die Ausdehnung Carnuntums in der Antike und Lage der heutigen Gemeinden Petronell-Carnuntum und Bad Deutsch Altenburg, Quelle: [URL-15], verändert	96
Abbildung 50: Das Heidentor einst und heute. Links: Modell des rekonstruierten Quadrifons am Besichtigungsgelände. Rechts: Heutiges Heidentor mit zwei Pfeilern, Versturzblick und zentralem Figurensockel, Fotos: Tremel 2016	98
Abbildung 51: Das Heidentor als Punktwolke aus mobilen Laserscanning-Daten, Quelle: [STU-13: 26]	99

Abbildung 52: Aufnahmen mit dem VZ-6000 am Untersuchungsobjekt; Fotos: Tremel 2016	100
Abbildung 53: Die Benutzeroberfläche von RiSCAN Pro	102
Abbildung 54: Aufbau des Heidentor-Projekts in RiSCAN Pro	103
Abbildung 55: Die acht Einzelscans müssen erst zueinander orientiert werden	104
Abbildung 56: ScanPos001 und ScanPos002 werden über die Reflektor-Marken registriert	105
Abbildung 57: Manuelles Setzen von Tiepoints an identen Punkten. Links: bereits registriertes Polydata-Objekt, rechts: zu registrierende ScanPos003	106
Abbildung 58: Das Durchschimmern der Punktwolke ist ein Zeichen dafür, dass das Tieobject eine hohe Genauigkeit aufweist	107
Abbildung 59: Residuenverteilung und Standardabweichung nach finalem Multistation Adjustment	107
Abbildung 60: Die acht Scanpositionen sind registriert und liegen nun übereinander	108
Abbildung 61: Die Gesamtpunktwolke des Heidentors, bestehend aus acht Scans (links) bzw. sechs Scans (rechts). Das linke Modell weist zahlreiche weiße Einsprengsel auf.	109
Abbildung 62: Das fertige Modell des Heidentors, erstellt mit RiSCAN Pro	110
Abbildung 63: DJI Phantom 3 Professional mit Fernsteuerung (links) und während des Bildfluges (rechts); Fotos: Tremel 2016	111
Abbildung 64: Ergebnisse des UAV-Bildfluges mit dem DJI Phantom 3 Professional; Fotos: Riedl 2016	112
Abbildung 65: Originalaufnahme (links) und in Photoshop bearbeitete Aufnahme (rechts)	113
Abbildung 66: Das Interface von Agisoft PhotoScan.....	114
Abbildung 67: Gewählte Parameter für die Berechnung der dünnen Punktwolke	115
Abbildung 68: Ergebnis der Foto-Ausrichtung: Eine dünne Punktwolke des Heidentors.....	116
Abbildung 69: Zur Kontrolle kann die Position jedes einzelnen Fotos angezeigt werden	116
Abbildung 70: Die dichte Punktwolke des Heidentors in Agisoft PhotoScan.....	117
Abbildung 71: Gewählte Parameter für die Vermaschung der dichten Punktwolke	118
Abbildung 72: Fertiges Mesh der Mittelsäule (oben) mit vordefinierter Textur im "Shaded"-Modus (Mitte) sowie als trianguliertes Netz im "Wireframe"-Modus (rechts).....	119
Abbildung 73: Gewählte Parameter für die Texturierung des Meshes	120
Abbildung 74: Das fertige Modell des Heidentors, erstellt mit Agisoft PhotoScan	121
Abbildung 75: Die TLS-Aufnahme weist Lücken im oberen Bereich des Heidentors auf	125
Abbildung 76: Ergebnis der Datenauswertung: (a) und (c) zeigen Vorder- und Rückseite des Heidentors als texturierte Punktwolke in RiSCAN; (b) und (d) zeigen das fertige Modell in Agisoft PhotoScan	128
Abbildung 77: Detailansicht des Bogens und Heidentor aus der Vogelperspektive: Das mit RiSCAN Pro erstellte Modell weist in (a) und (c) zahlreiche Datenlücken auf. Das in Agisoft modellierte Heidentor zeigt hingegen einen fehlerlosen Bogen (b) sowie geschlossene Oberflächen im Bereich der Sockel und Pfeiler (d).	129

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Tachymetrie versus terrestrisches Laserscanning: Gemeinsamkeiten und Unterschiede, Quelle: [MIT-16: 21f.] und [STA-05: 11], verändert und ergänzt	18
Tabelle 2: Unterschiede im Bereich des terrestrischen Laserscanning: Vergleich von Vergangenheit und Gegenwart, Quelle: [STA-14: 6-15], eigene Darstellung	20
Tabelle 3: Impulslaufzeitverfahren und Phasenvergleichsverfahren im Vergleich, Quelle: [HES-07: 44] und [MIT-16: 46], eigene Bearbeitung	22
Tabelle 4: Klassifizierung von UAVs nach den Merkmalen Gewicht und Antrieb, Quelle: [EIS-09: 34], eigene Bearbeitung	43
Tabelle 5: Vor- und Nachteile verschiedener UAV-Systeme (0: niedrigster Wert, +: mittelmäßiger Wert, ++: Bestwert), Quelle: [EIS-09: 35], eigene Bearbeitung	43
Tabelle 6: Klassifizierung von UAVs unter Berücksichtigung von Anschaffungspreis und Tragfähigkeit, Quelle: [EIS-09: 38 nach BLY-99], eigene Bearbeitung	44
Tabelle 7: Klassifizierung von für geodätische Anwendungen geeignete UAVs, Quelle: [ELI-16: 12]	45
Tabelle 8: Terrestrischer Laserscanner Riegl VZ-6000 – Technische Details, Quelle: [RIE-15], eigene Bearbeitung	93
Tabelle 9: Multikopter DJI Phantom 3 Professional - Technische Details, Quelle: [DJI-15], eigene Bearbeitung	95
Tabelle 10: TLS versus UAV-Photogrammetrie am Beispiel des Heidentors von Petronell-Carnuntum.....	130
Tabelle 11: Zusammenfassung der Stärken und Schwächen des terrestrischen Laserscanning, Quelle: [BIB-11], [FRI-14], [MAR-09], eigene Bearbeitung.....	136
Tabelle 12: Zusammenfassung der Stärken und Schwächen der UAV-Photogrammetrie, Quelle: [EIS-09], [FRI-14], [REM-11], [WES-12], eigene Bearbeitung	136

Kurzfassung/Abstract

Diese Masterarbeit stellt mit dem terrestrischen Laserscanning und der UAV-Photogrammetrie zwei Erfassungsmethoden vor, die seit der Jahrtausendwende bestehen und seit dieser Zeit vermehrt Anwendung in zahlreichen wissenschaftlichen Forschungsbereichen gefunden haben. Einer dieser Forschungsbereiche ist die Archäologie, die Laserscanner und UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) zur Dokumentation von Grabungsstätten und antiken Objekten nutzt. In dieser Arbeit werden die wesentlichen Prinzipien der beiden Methoden erläutert und in Form eines Arbeitsablaufs zusammengefasst, der aus den drei Phasen Vorbereitung, Feldarbeit und Auswertung besteht. Dieser Arbeitsablauf wird in der Praxis erprobt. Als Untersuchungsobjekt dient dabei das Heidendor von Petronell-Carnuntum, das sich im Osten Niederösterreichs befindet und ein bekanntes Relikt aus der römischen Vergangenheit darstellt. Durch den Einsatz von terrestrischem Laserscanning und UAV-Photogrammetrie soll festgestellt werden, wie gut das jeweilige Erfassungssystem in der archäologischen Praxis geeignet ist und ob sich eine Methode letztendlich als die bessere erweist.

This master thesis presents two recording methods named terrestrial laserscanning and UAV-Photogrammetry which exist since the turn of the millenium and have since been applied in many scientific fields of research. One of those fields of research is archaeology where laser scanners and UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) are used for the documentation of excavation sites and ancient objects. This thesis illustrates the basic principles of both methods and summarises them in form of a workflow which consists of the three phases Preparation, Field Work and Evaluation. This workflow will be tested in praxis. The study object of the practical work is the Heidendor of Petronell-Carnuntum which is located in eastern Lower Austria and is widely known as a relict of the Roman past. Through the use of terrestrial laser scanning and UAV-Photogrammetry the autor wants to determine how well the particular recording method is suited for practical work in archaeology and if one method finally proves to be better than the other.

Danksagung

Eine Masterarbeit schreibt sich nicht von alleine. Selbst wenn das Thema noch so interessant ist, sind Zeit, starke Nerven und Durchhaltevermögen gefragt, um das Ganze zu einem guten Ende zu bringen.

Eine Masterarbeit stellt auch den Abschluss eines langen, lehrreichen und aufregenden Studiums dar. Sie bildet das letzte Element, das einen vom Start ins Berufsleben und dem Arbeitsalltag trennt.

Eine Masterarbeit umfasst letztendlich all jenes Wissen, das im Laufe des bisherigen Lebens erworben wurde. Dabei fließen nicht nur jene Dinge ein, die auf der Universität gelehrt werden, sondern auch Lebenserfahrung, die einem durch nahestehende Mitmenschen beigebracht wurde.

Eine Masterarbeit kann nicht ohne der Hilfe dieser Mitmenschen finalisiert werden. Deshalb sehe ich es an dieser Stelle angebracht, den folgenden Personen ein großes Dankeschön auszusprechen.

Danke an...

...meinen Betreuer Andreas Riedl, der nicht nur mit guten Ratschlägen und hilfreichem Feedback, sondern auch als UAV-Pilot im Praxiseinsatz zur Verfügung stand.

...meinen inoffiziellen Co-Betreuer Roland Mittermaier, der wertvolle Literatur und Theoriewissen zu meinem Thema beisteuerte und jederzeit für angenehme Gespräche (auch abseits des Unialltags) zu haben war.

...Bernhard Groiss und Michael Holzapfel, die mich im Feld und bei der Auswertung der TLS-Daten unterstützten. Eure Hilfe und eurer Einsatz waren extrem bereichernd.

...Philipp Gintensterfer, meinen Studienkollegen, Laufpartner und Spieleabend-Veranstalter. Ohne dich wäre die Studienzeit nicht dieselbe gewesen.

...Alex, Benedikt, Daniela, Ena und Isabelle – auch wenn wir mittlerweile nicht mehr alle am selben Ort studieren, gehen sich die Besuche beim Stamm-Chinesen immer aus.

...meine Eltern und Großeltern, für ihre Liebe und Unterstützung in allen Lebenslagen. Dank euch stehe ich da, wo ich heute bin.

...meine vierbeinigen Familienmitglieder, die mich zum Abschalten bewegen und mir zeigen, wie schön die Welt abseits des PC-Bildschirms sein kann.

...Lukas. Für alles.

1 Einleitung

Das Erforschen und Dokumentieren alter Kulturen, Bauwerke und Lebensstile ist eine Aufgabe, die sich die Wissenschaft der Archäologie seit jeher zum Thema gemacht hat. Um die Geschichte der Menschheit aufzuzeichnen, stehen zahlreiche unterschiedliche Methoden und Werkzeuge zur Verfügung, die selbst einem ständigen Wandel unterworfen sind. Gab es zunächst nur einfache Geräte wie Zollstöcke, Maßbänder oder Schnurgerüste, so kam es im Laufe der Jahre zu einer immer stärkeren Fusion mit Werkzeugen der Vermessungstechnik [CHR-11], wodurch der Einsatz von Tachymetern oder GPS heutzutage keine Seltenheit mehr ist. Neben diesen „klassischen“ Vermessungsmethoden hat sich das terrestrische Laserscanning (TLS) seit der Jahrtausendwende als weitere Erfassungstechnik etabliert. Gegenüber den traditionellen Messtechniken besteht hier der Vorteil, dass die Umgebung berührungslos, mit hoher 3D-Punktdichte und schnell vermessen werden kann [ZOG-06], was in der Archäologie vor allem dann Vorteile bringt, wenn das zu erfassende Objekt bestimmten Sicherheitsbeschränkungen unterliegt oder einer schnellen Aufnahme bedarf, um Baumaßnahmen in der Gegenwart fortsetzen zu können.

Abgesehen von oben erwähnten Methoden bildet auch die Fotografie seit Ende des 19. Jahrhunderts eine Grundlage für die wissenschaftliche Auswertung archäologischer Ausgrabungen [REI-13]. Die Suche nach einem idealen, erhöhten Aufnahmestandort stellt dabei eine wesentliche Herausforderung dar, da die mittige Positionierung der Kamera über der zu fotografierenden Fläche für die Erstellung von Befunden und Plana unerlässlich ist. Die konventionelle Luftbildarchäologie erfüllt zwar die Aufnahme aus der gewünschten Perspektive, ist aber mit hohen Kosten verbunden und lässt auf Grund der Flughöhe keinen großen Maßstab zu [ebd.]. Eine kostengünstige Alternative, die erstmals um 2005 zum Einsatz kam, ist der Multikopter, welcher auch als Unmanned Aerial Vehicle (UAV) bezeichnet wird. Diese unbemannten autonomen Luftfahrzeuge erfreuen sich nicht nur im Modellbau großer Beliebtheit, sondern finden zunehmend auch Anwendung im wissenschaftlichen Bereich. Besonders in der Fernerkundung, der Photogrammetrie sowie in der Archäologie bieten diese Plattformen in Verbindung mit dem Structure from Motion-Algorithmus eine sinnvolle Alternative zu den bisher verwendeten Mitteln, da sie an nahezu jedem Ort der Welt eingesetzt werden können [SIE-09]. Für die Kombination von UAVs und dem Structure from Motion-Verfahren wird in einer wegweisenden Dissertation von EISENBEIß [EIS-09] der Begriff „UAV-Photogrammetrie“ definiert. Dieser Terminus ist mittlerweile weitgehend gebräuchlich und wird auch von der Autorin aufgegriffen.

Diese Masterarbeit soll sich der Untersuchung des Einsatzes von terrestrischem Laserscanning und UAV-Photogrammetrie im archäologischen Forschungsfeld widmen. Der Schwerpunkt soll dabei auf der Objektdokumentation liegen, also der Erfassung von Gegenständen und Bauten, die bereits über der Erdoberfläche liegen. Der dabei zu vollziehende Arbeitsablauf (Workflow) – von der Vorbereitung über die Aufnahme, Registrierung, Filterung, Modellierung bis hin zur letztendlichen Visualisierung in einem 3D-

Modell [KER-08] – wird für TLS und UAV getrennt betrachtet und auf ein praktisches Beispiel angewandt.

Bei diesem praktischen Beispiel handelt es sich um das Heidentor von Petronell-Carnuntum, das sich im Osten Niederösterreichs befindet. Das Heidentor ist ein Triumphbogen von rund 14 Metern Höhe, der sich auf einer Fläche von 16 x 16 Metern erstreckt und als eines der bekanntesten Denkmäler aus Österreichs römischer Vergangenheit gilt [JOB-01]. Es besteht seit dem 4. Jahrhundert n. Chr. und gilt als das Wahrzeichen der Region Carnuntum. Mit Hilfe des terrestrischen Laserscanners Riegl VZ-6000 sowie eines Multikopters der Marke DJI Phantom 3 Professional soll das Heidentor erfasst und aus den daraus gewonnenen Daten durch den Einsatz der Softwares RiSCAN Pro sowie Agisoft PhotoScan für jedes der Erfassungssysteme ein eigenes 3D-Modell generiert werden, dessen vergleichende Betrachtung den Abschluss der Masterarbeit bilden wird.

1.1 Forschungsfragen und Methodik

Die Untersuchung der Bedeutung von terrestrischem Laserscanning und UAV-Photogrammetrie in der Archäologie bildet den Schwerpunkt dieser Masterarbeit. Der Fokus soll dabei auf dem Ablauf der jeweiligen Prozesskette (Workflow) des Erfassungssystems liegen – jeder Schritt von der Vorbereitung und Datenerfassung bis hin zur Modellierung und Visualisierung wird gesondert betrachtet. Als praktisches Beispiel wird die Aufnahme eines archäologischen Objektes – des Heidentors in Petronell-Carnuntum – die Besonderheiten und etwaigen Schwierigkeiten, die sich bei der Arbeit mit TLS und Multikopter ergeben, noch näher unterstreichen.

Folgende Forschungsfragen sollen dabei als Anhaltspunkt dienen:

I. In welchem Ausmaß, verglichen mit „traditionellen Arbeitstechniken“, können terrestrisches Laserscanning und UAV-Photogrammetrie bei der archäologischen Objektaufnahme unterstützen?

Diese einleitende Forschungsfrage wird hauptsächlich durch eine umfangreiche Literaturrecherche zu beantworten sein. Es gilt, herauszufinden, welche Arbeitstechniken in der Archäologie Anwendung finden und wie diese durch die vergleichsweise neuen Methoden ergänzt werden können. Zu diesem Zweck wird in Kapitel 4 eine Auswahl wissenschaftlicher Arbeiten präsentiert, die zeigen soll, für welche Anwendungsbereiche terrestrisches Laserscanning und UAV-Photogrammetrie geeignet sind und welche Endprodukte durch diese beiden Erfassungsmethoden erzeugt werden können. Dabei sollen sowohl Beispiele vorgestellt werden, die nur auf TLS- bzw. Multikopteraufnahmen aufbauen, als auch Beiträge, die sich mit einer Kombination und einem Vergleich der beiden Methoden beschäftigen. Durch die Beantwortung dieser ersten Forschungsfrage soll sich herausstellen, für welche Aufgabestellungen und Projekte terrestrisches Laserscanning und UAV-Photogrammetrie besonders geeignet sind, und ob bestehende Arbeitstechniken durch diese neuen Methoden eher ergänzt oder verdrängt werden.

II. Wie definiert sich der Arbeitsablauf (Workflow) eines TLS- bzw. UAV-Projekts? Inwiefern können sich Unterschiede zwischen den beiden Methoden feststellen lassen?

Der Workflow, der den beiden Erfassungsmethoden zu Grunde liegt, bildet das Kernstück dieser Masterarbeit. Von der Autorin wird versucht, ebenfalls basierend auf einer umfangreichen Literaturrecherche, einen schematischen Arbeitsablauf für terrestrisches Laserscanning bzw. UAV-Photogrammetrie zu skizzieren. Diese beiden Workflows sollen so übersichtlich und nachvollziehbar wie möglich gestaltet werden und darüber hinaus das Ziel erfüllen, auf das praktische Projekt anwendbar zu sein. Die Autorin ist sich dabei bewusst, dass es nicht ein einziges „Kochrezept“ gibt, nach dem TLS- und UAV-Projekte durchgeführt werden können, da die Anzahl der Unsicherheitsfaktoren (Budget, Zeitaufwand, Aufnahmebedingungen, verwendete Softwares etc.) zu groß ist. Die erstellten Workflows sollen daher eine idealisierte Abfolge von Arbeitsschritten darstellen, die erkennen lassen, an welchen Stellen sich die beiden Methoden voneinander unterscheiden und wo etwaige Ähnlichkeiten bestehen. Um dies zu ermitteln, wird der Praxisteil, der sich mit der Erfassung und Modell-Erstellung des Heidentors von Petronell-Carnuntum befasst, einen wertvollen Beitrag leisten. Somit werden in dieser Forschungsfrage Theorie und Praxis miteinander verwoben.

III. Überwiegen bei einer der beiden Erfassungsmethoden die Vor- bzw. Nachteile im jeweiligen Workflow so sehr, dass sie als besser bzw. schlechter gegenüber der anderen Erfassungsmethode eingestuft werden kann?

Diese dritte und letzte Forschungsfrage leitet sich direkt aus der zweiten Forschungsfrage ab. Es besteht die Möglichkeit, dass in einem Großteil der wissenschaftlichen Beiträge, auf denen sich diese Arbeit zum Teil stützt, der allgemeine Konsens in Richtung einer bestimmten Erfassungsmethode geht. Zusätzlich ist zu erwarten, dass während der Bearbeitung des praktischen Beispiels sowohl für das terrestrische Laserscanning als auch für die UAV-Photogrammetrie systemspezifische Stärken und Schwächen gefunden werden können. Diese können sich auf die Feldarbeit und die Datenauswertung wie auch auf die Qualität des fertigen Modells beziehen. Basierend auf diesen Erkenntnissen soll eine Tabelle mit Vor- und Nachteilen herausgearbeitet werden, um letztendlich eine Entscheidung treffen zu können, ob sich der Einsatz von terrestrischem Laserscanning oder UAV-Photogrammetrie als geeigneter für archäologische Fragestellungen erweist, oder ob beide Methoden als (annähernd) gleichbedeutend zu verstehen sind.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die ersten beiden Kapitel dieser Masterarbeit beschäftigen sich mit dem theoretischen Kontext von terrestrischem Laserscanning und UAV-Photogrammetrie.

Den Anfang macht terrestrisches Laserscanning in Kapitel 2. Hier erfolgen zunächst eine Beschreibung der Disziplin des Laserscanning sowie eine Erläuterung der wesentlichen Grundprinzipien. Danach werden die verschiedenen Arten des Laserscanning – Airborne,

Terrestrisch, Kinematisch und Laserscanning im extremen Nahbereich – kurz beschrieben, bevor der Fokus auf den Bereich des terrestrischen Laserscanning erfolgt. Hier werden TLS und Tachymetrie miteinander verglichen und eine Klassifizierung von terrestrischen Laserscannern anhand verschiedener Merkmale vorgestellt. Den Abschluss des Kapitels bildet eine detaillierte Beschreibung eines typischen TLS-Workflows.

Kapitel 3 widmet sich ganz den Unmanned Aerial Vehicles. Nach einer Begriffsdefinition und einem kurzen historischen Überblick werden auch diese Messinstrumente anhand verschiedener Kriterien klassifiziert und die rechtlichen Rahmenbedingungen, die es beim Gebrauch von UAVs zu beachten gilt, werden an dieser Stelle ebenfalls erläutert. Im Anschluss daran werden die einzelnen Bestandteile, also die „Hardware“ eines Multikopters, näher vorgestellt. Das darauffolgende Unterkapitel beschäftigt sich im Gegenzug mit der Software, die in der UAV-Photogrammetrie genutzt wird, wobei der Structure from Motion-Algorithmus einen besonderen thematischen Schwerpunkt hat. Analog zum TLS-Kapitel wird auch Kapitel 3 mit einer Vorstellung des UAV-Messablaufs abgeschlossen.

Nach diesem umfangreichen Theorieteil wird in Kapitel 4 Bezug auf die Wissenschaft der Archäologie genommen. Es wird erläutert, welche Arbeitsmethoden in dieser Disziplin primär Anwendung finden, wie TLS und UAVs darin eingebunden werden können und für welche Aufgabenbereiche die beiden Erfassungsmethoden im Besonderen geeignet sind. Im Zuge dessen werden insgesamt sechs Beispiele aus der wissenschaftlichen Praxis vorgestellt, die terrestrisches Laserscanning und UAV-Photogrammetrie getrennt voneinander oder in Kombination anwenden, um archäologische Fragestellungen zu bearbeiten.

In Kapitel 5 erfolgt eine Beschreibung des praktischen Arbeitsteils. Hier werden die Erfassung und die Datenauswertung des Heidentors von Petronell-Carnuntum geschildert. Dabei wird zunächst ein kurzer Einblick in das Untersuchungsgebiet gegeben und die beiden verwendeten Instrumente – der Laserscanner Riegler VZ-6000 und der UAV DJI Phantom 3 Professional – werden vorgestellt. Darauf folgt eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Arbeitsschritte, die auf den jeweiligen Workflow, der im Theorieteil vorgestellt wurde, aufbauen sollen. Ein besonderer Wert wird dabei auf die Datenauswertung durch die Softwares RiSCAN Pro und Agisoft PhotoScan gelegt, die zur Erstellung eines dreidimensionalen Heidentor-Modells aus TLS-Punktwolken und UAV-Aufnahmen genutzt werden.

Die Diskussion der Ergebnisse ist Gegenstand von Kapitel 6. Hier wird zunächst umfangreich erläutert, welche Erkenntnisse die Bearbeitung des Praxisbeispiels brachte und in welchen Bereichen sich Vor- und Nachteile in Bezug auf die beiden Erfassungssysteme finden ließen. Anschließend werden die drei in der Einleitung definierten Forschungsfragen beantwortet, wobei es an dieser Stelle sowohl die Ergebnisse der Literaturrecherche als auch die praktischen Erfahrungen der Autorin zu berücksichtigen gilt, um möglichst allgemeingültige Aussagen treffen zu können.

Zu guter Letzt erfolgt in Kapitel 7 eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse, die in dieser Masterarbeit gewonnen wurden.

2 Laserscanning

Die Methode des Laserscanning hat seit ihrem ersten Aufkommen knapp vor der Jahrtausendwende sowohl die Geländeaufnahme als auch die Objekterfassung im Nahbereich revolutioniert [KRA-04]. Auch die Geodäsie und das Vermessungswesen wurden durch das Laserscanning um eine neue Methode bereichert, welche zum bisherigen „Universalinstrument“, dem Tachymeter, eine sinnvolle Ergänzung lieferte und viele bis dato komplizierte Arbeitsschritte um ein Vielfaches vereinfachte. Egal ob auf der Erdoberfläche oder in der Luft – Laserscanning erlebt gegenwärtig ein breites Anwendungsspektrum und ist nicht zuletzt durch seinen Einsatz in der Archäologie für diese Masterarbeit essenziell.

Dieses Kapitel soll sich deshalb im Detail mit dieser vergleichsweise modernen Erfassungstechnik auseinandersetzen. Einleitend erfolgt eine kurze Einführung über das grundlegende Prinzip und die Vorgehensweise des Laserscanning sowie über die Komponenten, die in diesem Kontext eine wichtige Rolle spielen. Im Anschluss daran werden die einzelnen Arten des Laserscanning – Airborne, Terrestrisch, Kinematisch und extremer Nahbereich – näher erläutert. Ab diesem Punkt liegt der Fokus auf dem terrestrischen Laserscanning (TLS), da dieses im praktischen Teil der Masterarbeit noch genauer zur Anwendung kommen wird und demnach eine besondere Wichtigkeit innehat. Hier erfolgt u.a. ein Vergleich zwischen terrestrischem Laserscanning und Tachymetrie; außerdem wird eine Klassifikation anhand verschiedener Merkmale vorgenommen und Einflussfaktoren, die im Scanprozess eine entscheidende Rolle spielen können, näher vorgestellt. Der abschließende Teil des Kapitels widmet sich dem so genannten „Laserscanning-Workflow“, in welchem die einzelnen Schritte von den Vorbereitungen über die Feldarbeit bis hin zur (oftmals sehr aufwändigen) Auswertung in chronologischer Abfolge beleuchtet werden.

2.1 Das Prinzip des Laserscanning – Historisches und Grundlagen

Während Einstein im Jahr 1917 erstmals das Prinzip eines Lasers (*LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) im theoretischen Kontext näher erläuterte [LAR-09], dauerte es doch einige Jahrzehnte, bis erstmals entsprechende Instrumente in der Praxis gebaut und eingesetzt wurden. Im Jahr 1960 wurde von Maiman das erste System konstruiert, das den heute gebräuchlichen Lasern im weitesten Sinne nahekommt [ebd.].

Die historische Entwicklung der Disziplin des Laserscanning ist ebenfalls in diesem Zeitraum angesiedelt. 1958 entdeckten die beiden Wissenschaftler Townes und Schawlow das Potenzial eines monochromatischen, intensiven Strahlpulses zur Distanzmessung, der durch den Benutzer präzise gesteuert werden sollte [HER-09]. Im Zeitraum von 1962-1968 wurde die Lasertechnologie weiter ausgebaut und Anfang der 1970er-Jahre von einem regelrechten Boom erfasst: „*It was not long before the potential for a narrow, straight,*

reflectable beam as a reference direction in alignment was recognised. Early surveying instruments were developed specifically for laboratory use, the first laser distance-measuring instrument appeared in 1966 and the first alignment laser was marketed from 1971 onwards“ [HER-09: 1]. Die in diesem Zeitraum gebräuchlichen Instrumente wiesen oftmals eine Lebensdauer von nur 1000 Stunden auf; dennoch entwickelte sich mit der Zeit eine hohe Nachfrage seitens Wissenschaft und Forschung, wodurch erste kommerzielle Anbieter den Markt eroberten. Schritt für Schritt wurden die Scanner mit neuen Funktionen ausgestattet und deren Anfälligkeit hinsichtlich begrenzter Lebensdauer und Umwelteinflüssen (insbesondere Regen) nahm ab. Dadurch wurde um die Jahrtausendwende die Bahn für den Einsatz in neuen Arbeitsbereichen geebnet: Abgesehen von Wissenschaft und Forschung profitierte zunächst vor allem die Industrie von dieser neuen Technologie [ebd.]. Nach und nach weitete sich der Einsatz von Laserscannern aber auch auf Architektur, Archäologie, Vermessungswesen, Stadtplanung, Forensik, Risikomanagement und viele anderen Disziplinen aus [BEC-12]. Die Technologie des Laserscanning ist somit gegenwärtig in vielerlei Hinsicht eine etablierte Methode. Vor allem im Bereich der Kartographie und Geoinformation sowie der Vermessungstechnik kann das Laserscanning mit anderen bedeutenden Errungenschaften wie der elektronischen Streckenmessung, der elektronischen Tachymetrie und satellitengestützten Messverfahren (GNSS) gleichgesetzt werden.

Um den Prozess des Laserscanning genauer erläutern zu können, erscheint es aus Sicht der Autorin an dieser Stelle wichtig, sich zunächst mit den grundlegendsten physikalischen Prinzipien zu befassen, die einen Laser sowie elektromagnetische Strahlung im Allgemeinen ausmachen.

Gemäß der Wellentheorie besteht **elektromagnetische Strahlung** (und damit Licht) aus elektrischen und magnetischen Feldern, welche sich wellenförmig ausbreiten [KOL-10]. Im Sinne der Wellenoptik wird Licht als eine Transversalwelle verstanden, die vertikal zur Ausbreitungsrichtung schwingt. Durch die Wellentheorie können Phänomene wie Farbe, Interferenz (Überlagerung von zwei oder mehreren Wellen) oder Polarisation (Richtung der Schwingung einer Transversalwelle) erklärt werden [ebd.]. Gemäß dem Welle-Teilchen-Dualismus lassen sich jedoch nicht alle Eigenschaften von elektromagnetischer Strahlung durch das Wellenmodell begründen. Dies gilt unter anderem für die Erklärung der Erzeugung von Laserlicht, die sich auf die Teilchentheorie stützt und später noch genauer beschrieben wird.

Nach HERITAGE und LARGE [HER-09] besteht Licht aus masselosen Photonen (Elementarteilchen) und Energie E , welche proportional zur Wellenlänge λ ist. Des Weiteren gilt in der untenstehenden *Formel 1* für die Variable h = Planck'sche Konstante und c = Lichtgeschwindigkeit.

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Formel 1: Zusammenhang zwischen Parametern des Lichts

Die Klassifikation von elektromagnetischer Strahlung anhand der Wellenlänge wird im so genannten **elektromagnetischen Spektrum** (siehe *Abbildung 1*) beschrieben.

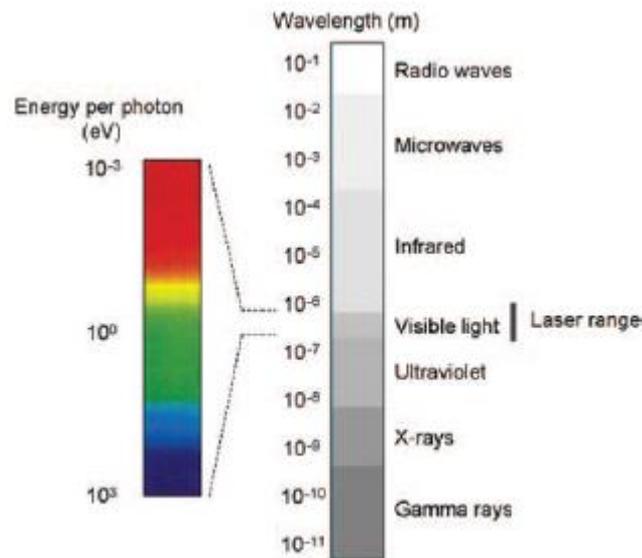


Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum, Quelle: [HER-09: 22]

Das elektromagnetische Spektrum bezeichnet die Gesamtheit aller elektromagnetischen Wellen [KOL-10]. Wie in *Abbildung 1* ersichtlich, reicht das Spektrum von einer Wellenlänge von 10^{-11} m (Gammastrahlung) bis hin zur langwelligen Radiowelle mit 10^{-1} m. Für das menschliche Sehen ist der Bereich des sichtbaren Lichts von besonderer Bedeutung. Dieser reicht in etwa von 400 bis 700 nm und wird in Richtung der langwelligen Strahlung vom Infrarot-Bereich sowie in Richtung der kurzwelligen Strahlung vom ultravioletten Bereich des Spektrums flankiert. Diese beiden Gebiete beinhalten außerdem die Wellenlängen, in welchen Laserlicht vorkommt (in der Abbildung als „laser range“ bezeichnet). Laserlicht umfasst somit auch Wellenlängen, die vom menschlichen Auge gar nicht mehr wahrgenommen werden können (insbesondere den Bereich des nahen Infrarot). Folgende Eigenschaften sind kennzeichnend für diese Art des Lichts [MIT-16]:

- **Sehr hohe Leistungsdichte:** Laserlicht erzeugt eine sehr hohe Energie pro Zeit pro Fläche
- **Monofrequenz:** Die Strahlung erfolgt in einer genau festgelegten Frequenz (siehe *Abbildung 2*)
- **Extrem geringe Divergenz:** Der Laserstrahl unterliegt einer scharfen Bündelung
- **Große Kohärenzlänge:** Die Wellenzüge sind untereinander phasensynchron und erheblich länger als Glühlampenlicht (siehe *Abbildung 2*)
- **Kurze und intensive Strahlungspulse** mit exakter Wiederholfrequenz

Auf der folgenden *Abbildung 2* ist eine schematische Gegenüberstellung von weißem und gefiltertem Glühlampenlicht sowie Laserlicht zu erkennen. Es können Unterschiede sowohl in der Wellenlänge als auch bezüglich der Länge der Wellenzüge und synchronen bzw. asynchronen Phasen ausgemacht werden.

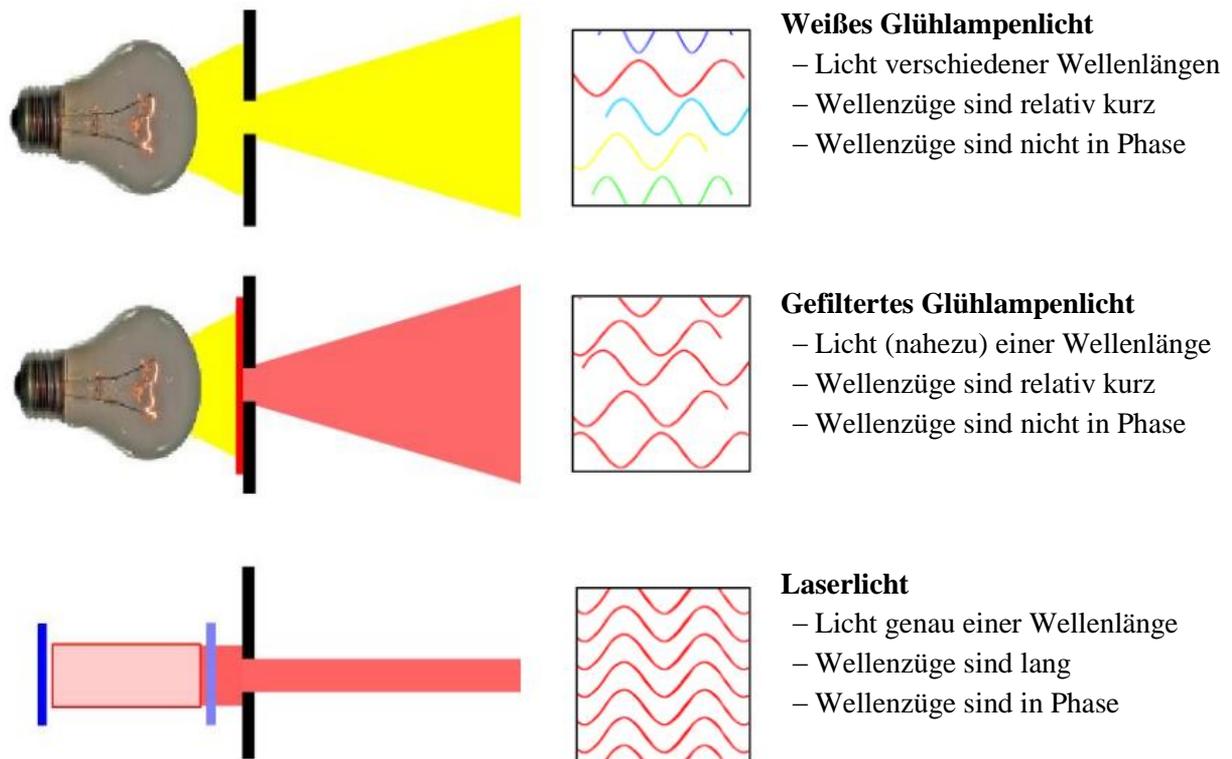


Abbildung 2: Gegenüberstellung von weißem/gedultertem Glühlampenlicht sowie Laserlicht, Quelle: [MIT-16: 10]

Um Laserlicht erzeugen zu können, bedarf es bestimmter Komponenten. Die grundsätzlichen Bestandteile eines Lasers sind eine Pumpeinrichtung, ein optischer Resonator und ein verstärkendes Medium (siehe *Abbildung 3*). Der optische Resonator besteht dabei aus zwei Spiegeln: „Während einer der Spiegel eine Reflektivität von nahezu 100% besitzt, ist der zweite Spiegel zu einem bestimmten Teil durchlässig. Es ist ein so genannter Auskoppelspiegel. Die Anordnung des Lasermediums zwischen den Spiegeln bewirkt, dass das Licht das verstärkende Lasermedium wiederholt durchläuft. Es kommt deshalb zu einer ständigen stimulierten Emission“ [KOL-10: 13f.].

Zur **Erzeugung von Laserlicht** werden die Atome im Lasermedium durch Energiezufuhr mittels Pumpeinrichtung in energetisch höher angeregte Zustände versetzt [MIT-16]. Photonen durchlaufen das Lasermedium in mehrfacher Weise, was nach und nach dazu führt, dass immer mehr Atome stimuliert werden: Ein Lichtstrahl wird erzeugt, dessen Richtung durch einen Spiegel des optischen Resonators festgelegt wird. Nach Festlegung dieser Richtung kann ein Teil des Laserstrahls beim zweiten, teildurchlässigen Spiegel austreten.

Dieser gebündelte Lichtstrahl kommt nun im Zuge des Laserscanning zu Anwendung.

Der Laserscanner tastet diskrete Objekte und kontinuierliche Flächen in einem definierten Winkelraster ab, wobei der Lichtstrahl flächenhaft die Oberfläche des zu vermessenden Mediums erfasst [PFL-08]. Durch (teils rotierende) Spiegelsysteme wird der Lichtstrahl in die horizontale und vertikale Richtung abgelenkt. Der ganze Prozess erfolgt dabei berührungslos und liefert als Endergebnis eine Punktwolke, die je nach Auflösung des Scans und Größe des Objekts mehrere Millionen Einzelpunkte umfassen kann [ebd].

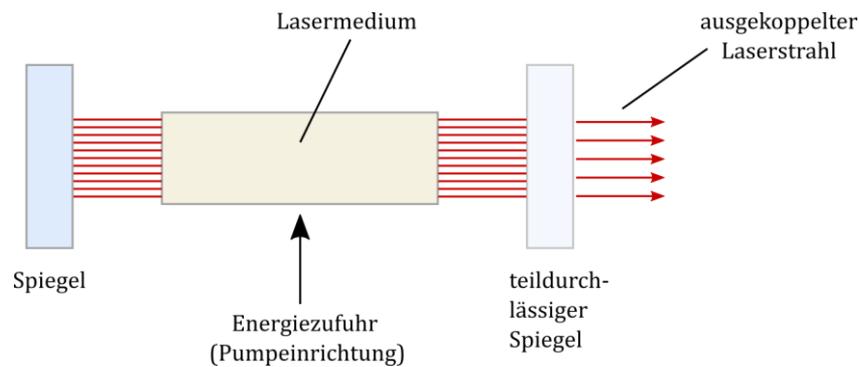


Abbildung 3: Schematische Erzeugung eines Laserstrahls, Quelle: [KOL-10: 14], eigene Darstellung

Bei jeder **Messung** erfasst der Laserscanner den Horizontal- und Vertikalwinkel sowie die Entfernung zum Objekt. Mit zwei Richtungen und einer Distanz arbeitet er somit nach dem Prinzip der Polaraufnahme, was im Grunde genommen mit dem Messprinzip der Tachymetrie gleichgesetzt werden kann (siehe *Abbildung 4*; eine genauere Betrachtung der Unterschiede zwischen Laserscanner und Tachymetrie ist in Kapitel 2.3.1 ersichtlich). Die erfassten Punkte werden in kartesischen XYZ-Koordinatenwerten wiedergegeben, die dem Standpunkt des Scanners entsprechen. Im Gegensatz zu einer tachymetrischen Messung liefert ein Laserscan zusätzlich zu zwei Richtungen und einer Distanz noch eine zusätzliche Variable: die Intensität. Sie gibt an, wie stark das auftreffende Laserlicht vom Objekt reflektiert wird und ermöglicht somit Aussagen zu Oberflächeneigenschaften.

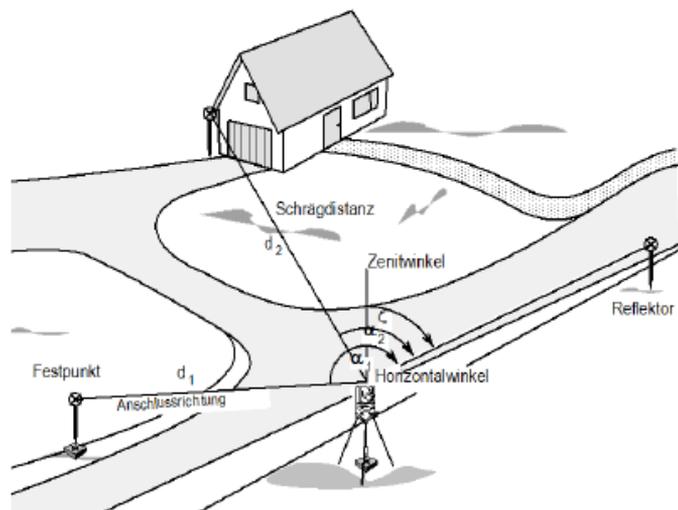


Abbildung 4: Ablauf einer tachymetrischen Messung, Quelle: [MÖS-15: 14]

2.2 Zu Lande und in der Luft: Arten des Laserscanning

Nach einer grundlegenden Einführung zur Funktionsweise und dem Aufnahmeprinzip eines Laserscanners soll nun im Detail auf die einzelnen Arten des Laserscanning eingegangen werden. Das folgende Kapitel beschäftigt sich demnach mit Airborne Laserscanning (ALS), terrestrischem Laserscanning (TLS), kinematischem Laserscanning (KLS) sowie Laserscanning im extremen Nahbereich.

2.2.1 Airborne Laserscanning (ALS)

Das flugzeuggetragene Laserscanning oder Airborne Laserscanning (ALS) ist jenes Scanverfahren, das wohl die längste Vergangenheit hat und sich einem sehr weiten Anwendungsspektrum erfreut. Seit den 1970er-Jahren wird der Begriff *Lidar* (*light detection and ranging*) im Bereich der Fernerkundung als Bezeichnung für das Airborne Laserscanning verwendet [KRA-04]. Gegenwärtig ist Lidar allerdings mit dem Überbegriff Laserscanning gleichzusetzen, da parallel zu ALS noch weitere Arten des Laserscanning existieren.

Airborne Laserscanning wird – wie der Name bereits vermuten lässt – mit Hilfe eines Tragflächenflugzeugs oder eines Helikopters durchgeführt. Durch die Möglichkeit, die Geländeoberfläche innerhalb kürzester Zeit und mit einem hohen Detaillierungsgrad zu erfassen, konnte sich ALS knapp vor der Jahrtausendwende als Alternative zur klassischen Luftbildphotogrammetrie etablieren [PFL-08]. ALS basiert auf folgendem Prinzip:

„Mit einem Laserscanner wird die Objektoberfläche abgetastet. Mit Hilfe eines stark gebündelten Laserstrahles wird aus der Laufzeit eines Impulses vom Aussenden bis zum Empfang die Entfernung zwischen dem Laserscanner und der jeweiligen Objektstelle, an der der Laserstrahl diffus reflektiert wird, gemessen. [...] Der Laserstrahl wird im Laserscanner senkrecht zur Flugrichtung abgelenkt; dieser Ablenkwinkel wird registriert. Für die Umwandlung der Polarkoordinaten in die XYZ-Koordinaten der vom Laserstrahl getroffenen Objektpunkte benötigt man die Koordinaten der Laserscannerposition und die Stellwinkel des Laserscanners“ [KRA-04: 449f.].

Die Koordinaten der Scanposition und der Stellwinkel des Laserscanners verändern sich laufend. Sie werden von einem dynamischen Positionierungs- und Orientierungssystem gemessen, das aus einem Satellitenpositionierungssystem (GNSS) und einer inertialen Messeinrichtung (IMU) besteht, die miteinander im Mikrosekundenbereich synchronisiert werden [ebd.]. Zusätzlich zu GNSS und IMU verfügt eine ALS-Einrichtung über folgende Komponenten [BER-10]:

- **Laserscanner-System:** bestehend aus Laser, Scanmechanismen und Spiegeln, die über einem Loch im Flugzeugrumpf angebracht sind. Vom Laser gehen kontinuierliche Pulse in Richtung der Erdoberfläche aus, während sich das Flugzeug in Bewegung befindet. Je nach Fluggeschwindigkeit und Flughöhe können gegenwärtig Punktdichten zwischen 0,2 und 50 Punkten/m² erreicht werden. Moderne

Geräte verfügen außerdem über die Möglichkeit, die Schwankungen des Flugzeugs entlang der Längsachse (*Roll-Winkel*) auszugleichen und somit Fehler in der Punktwolke zu vermeiden.

- **Gerät zur Datenkontrolle und -speicherung:** verantwortlich für die Zeitsynchronisation und Funktion des gesamten Systems. Die Positionsdaten von GNSS und IMU werden hier ebenso gespeichert wie die aufgenommenen Punktdaten des Laserscanners. Dabei gilt: je moderner der Scanner, desto größere Datenmengen fallen an. Bei einer Laserpulsrate von 300.000 Pulsen pro Sekunde werden pro Stunde 20 Gigabyte an Daten aufgezeichnet.
- **Operator Laptop:** stellt ein Werkzeug zur Kommunikation mit dem Gerät dar, welches für Datenkontrolle und -speicherung notwendig ist. Der Laptop wird während des Fluges von einer Fachperson bedient, die die einzelnen Flugparameter einstellt und während des Fluges überwacht, ob diese korrekt aufgezeichnet werden.
- **Flight Management System:** dient als elektronisches Hilfsmittel für den Piloten, um während des Fluges entlang der geplanten Flugstreifen zu navigieren. Diese sind u.a. in Form von Karten und Profilen auf einem Display abgebildet.

Trifft nun ein Laserstrahl auf der Erdoberfläche auf, kann das von ihr reflektierte Signal auf unterschiedliche Arten abgebildet werden: Hierbei wird zwischen den **Multiple Echo-** und **Full Waveform-Sensoren** unterschieden [BER-10]. Während die erste Form nur eine geringe Anzahl von Echos registriert, wird bei der Full Waveform das gesamte zurückgestrahlte Signal aufgezeichnet, aus welchem sich Oberflächenstrukturen wesentlich besser ableiten lassen. Um diesen Umstand zu verdeutlichen, wird *Abbildung 5* betrachtet:

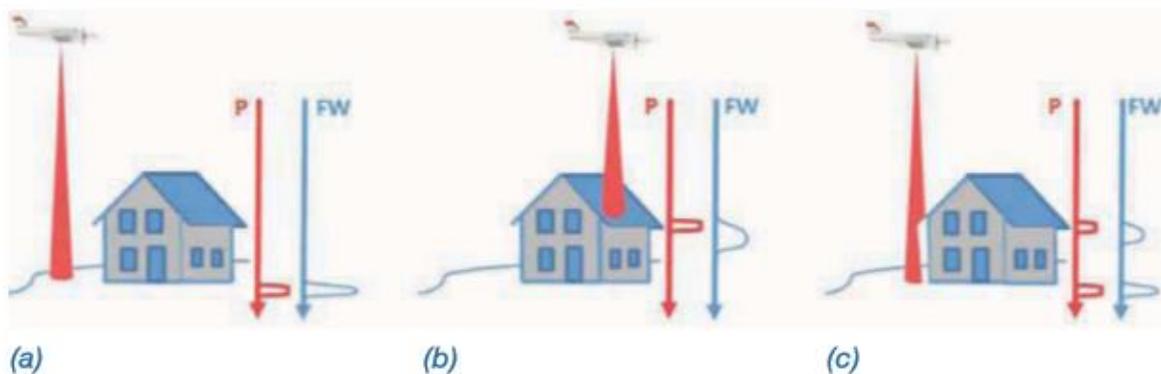


Abbildung 5: Signalaufzeichnung mittels Multiple Echo (P)- und Full Waveform-Sensoren (FW) im Vergleich. Drei verschiedene Aufnahmepunkte ((a) Erdoberfläche, (b) Hausdach, (c) Mischung aus (a) und (b)) zeigen eine jeweils unterschiedliche Signalaufzeichnung, Quelle: [BER-10: 28]

Es sind drei unterschiedliche Szenarien zu sehen, bei denen ein Laserstrahl auf die Oberfläche auftrifft. Die reflektierten Signale variieren dementsprechend und werden in der Abbildung entweder als rote (Multiple Echo) oder blaue (Full Waveform) Linie dargestellt. In Szenario (a) trifft der Laserstrahl auf flaches Terrain. Das Resultat ist ein einzel-

nes Echo, wobei es zwischen beiden Aufzeichnungsarten kaum Unterschiede gibt. In Szenario (b) trifft der Laserstrahl auf das Dach eines Gebäudes. Das Echo des Dachs wird vom Multiple-Echo-Sensor zwar zu einem anderen Zeitpunkt wahrgenommen, die Form des Echos bleibt jedoch gleich. Im Gegensatz dazu ist bei der Full Waveform bereits ein Unterschied in der Wiedergabe des Signals zu erkennen: Das Echo ist leicht verbreitert, da der Laser auf eine geneigte Oberfläche auftrifft. In Szenario (c) trifft der Laserstrahl auf die Erdoberfläche und berührt außerdem einen Teil des Daches, wodurch zwei Echos registriert werden. Während der Multiple-Echo-Sensor lediglich zwei kurze Signale verzeichnet, kann aus den Signalen des Full-Waveform-Sensors ein Unterschied zwischen beiden Signalen abgeleitet werden: „As the information on an echo’s shape is conserved in waveform recording, only this technique maintains information on the nature of a target“ [BER-10: 28 nach WAG-04].

Wie in Szenario (c) gezeigt, werden zumeist mehrere Signale aufgezeichnet, die aus unterschiedlichen Höhen zurückgesandt werden. Diese Signale können im Weiteren zur Konstruktion von digitalen Modellen verwendet werden. Dabei wird zwischen dem **Digitalen Oberflächen-Modell** (DOM) und dem **Digitalen Geländemodell** (DGM) unterschieden. Für das DOM werden die so genannten „first-echo“-Daten verwendet, also die jeweils zuerst registrierten Signale (im Falle von *Abbildung 5* wäre dies das Hausdach). Für die Erstellung eines DGM werden hingegen die „last-echo“-Daten benötigt [PFL-08]. In *Abbildung 6* sind die beiden Modelle vergleichend gegenübergestellt. Außerdem ist zu erwähnen, dass aus den Daten, die im Zuge des Scanvorgangs gewonnen werden, die Ableitung von Gebäudemodellen ebenfalls möglich ist. Dabei wird zumeist die Differenz zwischen DOM und DGM gebildet und mittels Filterverfahren werden einzelne Gebäudepunkte aus dem entstandenen Differenzmodell extrahiert. In diesen Punktwolken werden im Anschluss planare Regionen ermittelt und somit einzelne Ebenen zusammengesetzt, die eine einfache Darstellung von Gebäuden ergeben [KRA-04].

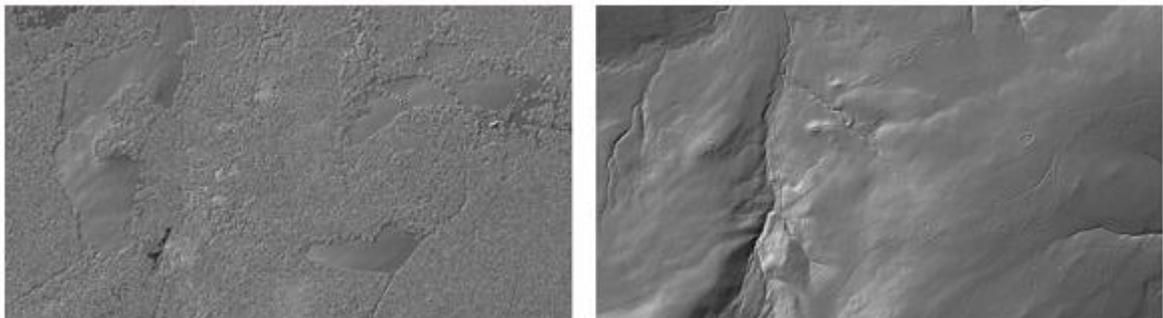


Abbildung 6: DOM (links) und DGM (rechts) im Vergleich, Quelle: [MIT-16: 30], verändert

Zu guter Letzt sei noch zu erwähnen, dass ALS zwar ein Verfahren ist, das exzellente Ergebnisse liefert, aber dennoch einen enormen wirtschaftlichen Einsatz erfordert. Zu hohen Kosten für die Hardware (Scanner, Flugzeug) kommt noch die Anforderung an den Piloten und eine umfangreiche Flugplanung hinzu. Auch darf eine gewisse Wetterabhängigkeit (Sonneneinstrahlung, Wolken- und Schneebedeckung etc.) nicht vergessen werden [CHA-09].

2.2.2 Terrestrisches Laserscanning (TLS)

Das Folgekapitel 2.3 wird sich im Detail mit terrestrischem Laserscanning auseinandersetzen, da dieses im Rahmen der praktischen Arbeiten für die Masterarbeit am relevantesten ist. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle nur eine kurze Zusammenfassung zu TLS gegeben werden, die die wesentlichsten Punkte behandelt.

Das terrestrische Laserscanning wird auf der Erdoberfläche durchgeführt und unterscheidet sich vom Airborne Laserscanning vor allem dadurch, dass der Laserscanner während des Abtastvorgangs nicht bewegt wird [KRA-04]. Der terrestrische Laserscanner ist stationär und benötigt daher Ablenkmechanismen in zwei Richtungen. (Beim ALS wird der Laserstrahl nur in einer Ebene senkrecht zur Flugrichtung abgelenkt [ebd.])

Die dreidimensionale Erfassung von Objekten geschieht vollautomatisch und berührungslos (*reflektorlos*) [BEC-12]. Das Objekt wird von mehreren Standpunkten aus so abgetastet, dass sich die Punktwolken der einzelnen Standpunkte am Objekt geringfügig überlappen [KRA-04]. Durch einen rotierenden Ablenkspiegel, der sich in der horizontalen und in der vertikalen Ebene bewegt, wird somit ein ganzer Messraum erfasst. Der Ablenkspiegel wird dabei immer um einen bestimmten Winkelbetrag in der Horizontalen und in der Vertikalen weitergedreht, sodass aus diesen beiden Winkeln und der Strecke zu jedem Punkt XYZ-Koordinaten im Raum berechnet werden können [SCH-11 nach LUH-10]. Um eine exakte Positionierung im Raum zu gewährleisten, findet auch im Falle des TLS ein Satellitenpositionierungssystem Anwendung. Mitunter komplexe Objekte können mittels terrestrischem Laserscanning somit in relativ kurzer Zeit erfasst werden, was einen klaren Vorteil gegenüber der Tachymetrie birgt.

Typisch für das TLS sind die hohe Messdatenrate (teilweise mehr als 1 Mio. Punkte pro Sekunde) und die hohe Punktdichte am Objekt [BEC-12]. Dieser Umstand kann dazu führen, dass beim Scannen eines Objekts aus mehreren Positionen eine riesige Datenmenge an unstrukturierten Punkten entsteht, was mit entsprechenden Problemen in der Datenauswertung und der Hardwareanforderung einhergeht. Zusätzlich gibt es zahlreiche Umstände, die ein Messergebnis verfälschen können und die weitere Verarbeitung der Punkte erschweren (siehe Kapitel 2.3.3).

Die Auswertung der TLS-Daten erfordert zum einen die Georeferenzierung der einzelnen Standpunkte und zum anderen die Identifikation von Zielpunkten und Objekten aus der erzeugten Punktwolke [ebd.]. Die Georeferenzierung erfolgt dabei „klassisch“ mit der Bestimmung der einzelnen Standpunkte über einen Polygonzug. Um Objekte in der Punktwolke leichter zu erkennen, werden gegenwärtig viele Laserscanner mit CCD-Kameras kombiniert, die durch die Ausgabe von Farbwerten eine optische Erkennung und Zuordnung erlauben [ebd.]. Durch die Verknüpfung der einzelnen Scans ist es somit möglich, dreidimensionale und vielseitig einsetzbare Objekte aus der Punktwolke zu generieren.

2.2.3 Kinematisches Laserscanning (KLS)

Wurde in Kapitel 2.2.2 der Aspekt des statischen terrestrischen Laserscanning betrachtet, so widmet sich dieser Abschnitt dem mobilen terrestrischen Laserscanning. Dieses Verfahren ist in der Literatur entweder als kinematisches Laserscanning (z.B. [HES-07]), mobiles Laserscanning (z.B. [STA-14]) oder Mobile Mapping (z.B. [KUT-10]) bekannt. Mitunter werden die Begriffe auch in ein und demselben wissenschaftlichen Beitrag analog zueinander verwendet. Unabhängig von der Bezeichnung wird jedoch stets dasselbe Prinzip verfolgt: Der Laserscanner befindet sich auf einem kinematischen Träger – meistens ein Kraft- oder Schienenfahrzeug – und ist während der Objekterfassung in Bewegung. Während statische Laserscannermessungen direkt in einer dreidimensionalen Punktwolke münden, werden beim kinematischen Laserscanning zweidimensionale Profilmessungen durchgeführt [HOL-15]. (In diesem Punkt lassen sich KLS und ALS voneinander abgrenzen.) Da der Scanner während des Messvorgangs mobil ist, entsteht entlang der Bewegungsrichtung des kinematischen Trägers eine räumliche Abtastung der Umgebung in Helixstruktur (siehe *Abbildung 7*): Die Bildung einer dreidimensionalen Punktwolke wird somit erst durch die Kinematik des Trägers ermöglicht [ebd.]. Zusätzlich zum Laserscanner ist auf dem Trägerfahrzeug ein System zur Trajektorienbestimmung installiert, das sich meistens aus einem GNSS-Empfänger in Kombination mit einer Inertialsensoreinheit zusammensetzt. Dieses System liefert laufend die aktuelle Position und Orientierung des Scanners [KLI-14].

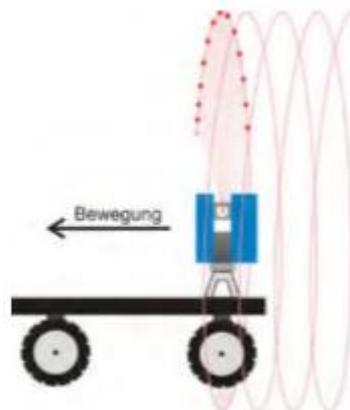


Abbildung 7: Helixförmige Datenerfassung eines Laserscanners auf einem kinematischen Träger, Quelle: [HES-07: 11]

Kinematische Laserscanner fanden bereits kurz nach der Jahrtausendwende ihre erste Anwendung; kommerziell genutzt werden sie allerdings erst seit ein paar Jahren. Mittlerweile gibt es zahlreiche Modelle (z.B. von den Firmen Riegl, Z+F, Faro, Velodyne oder Leica), die unter anderem durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet sind [ebd.]:

- **Scantyp/Sichtfeld:** Die meisten momentan auf dem Markt erhältlichen kinematischen Laserscanner sind Profils Scanner. Das heißt, durch die Drehung des Scankopfes wird entweder eine ganze Ebene oder ein Teil davon gescannt. Einige

Scanner sind Panoramascanner, die aber im Profilmodus betrieben werden, wodurch die theoretisch mögliche horizontale Drehung des Scankopfes blockiert wird.

- **Messverfahren:** In den allermeisten Fällen arbeiten die Scanner nach dem Phasenvergleichsverfahren (siehe hierzu Kapitel 2.3.2).
- **Präzision/Richtigkeit:** Diese beiden Parameter variieren, je nachdem, ob es sich um einen Scanner im oberen oder im unteren Preissegment handelt. Bei teureren Scannern werden meist detaillierte Angaben über verschiedene Arten von Messabweichungen gemacht, während bei preisgünstigeren Modellen häufig nur ein Wert maximaler Abweichung angegeben wird. In der Regel bewegen sich Präzision und Richtigkeit in einem Rahmen von 5-15 mm.
- **Maximale Distanz:** hängt von vielen verschiedenen Einflussfaktoren ab wie z.B. der Reflektivität der gescannten Oberfläche. Je nach Modell können Distanzen von 5 bis 900m erreicht werden.
- **Maximale Umdrehungen pro Sekunde, maximale Punkte pro Umdrehung:** Diese beiden Parameter bedingen sich gegenseitig. Die Erreichung des Maximalwerts bei beiden Parametern ist gleichzeitig nicht realisierbar, da eine hohe Profilrate (Umdrehungen pro Sekunde) eine geringere Anzahl von Punkten pro Profil mit sich bringt und umgekehrt. Ebenso geht die Erhöhung der Scanrate meist auf Kosten der Genauigkeit.
- **Synchronisation:** bezeichnet die Fähigkeit des Scanners zur Synchronisation mit externen Sensoren (z.B. GNSS), was vor allem im Bereich der Robotik und Sicherheitstechnik eine große Rolle spielt.

Die Anwendungsbereiche des kinematischen Laserscanning sind ebenso vielfältig wie jene des statischen TLS; oft werden beide Techniken sogar gleichzeitig verwendet (*Stop & Go*). HOLST et al. [HOL-15] liefern zu diesem Thema eine gute Zusammenfassung:

„Das kinematische Laserscanning hat sich insbesondere für die Aufnahmevermessung, Kartierung und Dokumentation etabliert, da hier weniger die Genauigkeit der Punktwolke im Vordergrund steht als es z.B. bei Deformationsmessungen der Fall ist. Denn wie [...] beschrieben, führt die kinematische im Gegensatz zu einer statischen Aufnahme meistens zu einer Verschlechterung der 3D-Punktgenauigkeit. Aufgrund dessen hat sich zwischen der statischen und kinematischen Aufnahme auch eine Mischform, die stop & go Aufnahme, entwickelt. Diese stellt einen Kompromiss zwischen Aufnahmedauer und 3D-Punktgenauigkeit dar: Kinematische Phasen steigern die Effizienz, statische Phasen die Genauigkeit. Diese Grenzen [...] sind jedoch aufgrund zusätzlich eingesetzter Sensorik und Auswertalgorithmen zunehmend fließend“ [HOL-15: 10].

Es ist zu vermuten, dass die Bedeutung des KLS in naher Zukunft noch weiter zunehmen wird. Gegenwärtig existieren bereits zahlreiche Forschungsarbeiten von der DVW (Deutscher Verein für Vermessungswesen), die sich u.a. mit der Dokumentation von Straßenoberflächen oder der Erstellung eines Lichtraumprofils auf Bahntrassen [REI-15] befassen.

2.2.4 Laserscanning im extremen Nahbereich

Beim Laserscanning im extremen Nahbereich handelt es sich um einen Sonderfall des TLS, der hier nur kurz der Vollständigkeit halber erwähnt werden soll. Laserscanning im extremen Nahbereich findet vor allem in der Industrie und Medizin Anwendung und ist für den weiteren Verlauf dieser Masterarbeit nicht weiter von Belang.

Der „extreme Nahbereich“ bezeichnet einen Aufnahmebereich von wenigen Dezimetern bis zu etwa 2 m Aufnahmeentfernung [KRA-04]. Hier kommt ein ganz anderes Aufnahmeprinzip zur Anwendung, als es im „herkömmlichen“ TLS-Bereich verwendet wird: Das Lichtschnitt- oder Triangulationsverfahren. *„Mit einer Lichtquelle wird auf dem Objekt ein Profil beleuchtet, das von einer digitalen Kamera, die von der Lichtquelle einen bekannten Abstand hat, aufgenommen wird. Bei diesem Aufnahmeprinzip wird der Laser nicht zur Entfernungsmessung benutzt; er dient lediglich zur Erzeugung einer Lichtebene, die am Objekt das erwähnte Profil „zeichnet““* [KRA-04: 483].

Die digitale CCD-Messkamera ist dabei entlang der x-Modellkoordinatenrichtung positioniert und deren Aufnahmerichtung ist parallel zur y-Modellkoordinatenrichtung angeordnet [ebd.]. Dadurch ist der Messbereich durch die Ausdehnung des CCD-Sensors begrenzt und die Genauigkeit der Messung ist abhängig vom Abstand des Lasers zum Sensor [MIT-16]. Bei zunehmender Entfernung zum Objekt werden die Schnitte im Objektpunkt immer schleifender und somit ungenauer, weshalb das Lichtschnittverfahren nur innerhalb eines begrenzten Bereichs anwendbar ist (siehe *Abbildung 8*). Durch diese Technik können Submillimeter-Genauigkeiten erzielt werden [ebd.].

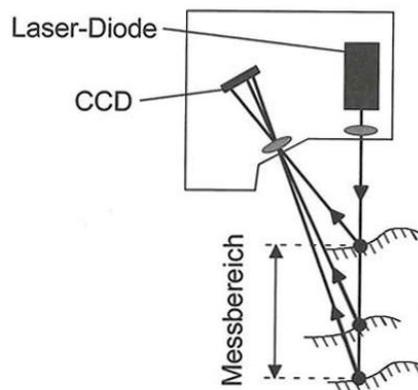


Abbildung 8: Lasertriangulation mit begrenztem Messbereich und Gefahr schleifender Schnitte, Quelle: [MIT-16: 45]

Die häufigsten Arbeitsbereiche, in denen das Laserscanning im extremen Nahbereich genutzt wird, sind in der Industrie zu finden: Einmessung und Monitoring von Maschinen, Deformationsmessungen, Roboterkalibrierung und die Überprüfung von Werkstücken auf Form- und Lagetoleranz setzen eine überdurchschnittlich hohe Genauigkeit voraus. Durchgeführt werden diese Arbeiten meist von spezialisierten Vermessungsingenieuren [URL-1].

2.3 Terrestrisches Laserscanning im Detail

Nachdem das grundlegende Messprinzip des TLS in Kapitel 2.2.2 bereits erläutert wurde, soll nun im Detail auf diese – für die Masterarbeit sehr relevante – Methode der Datenerfassung eingegangen werden. Die Einleitung wird von einem Vergleich zwischen terrestrischem Laserscanning und Tachymetrie gebildet. Zusätzlich wird versucht, den Änderungen, die sich im TLS-Bereich innerhalb der letzten zehn Jahre ereignet haben, Rechnung zu tragen. Im Anschluss daran fokussiert sich dieses Kapitel auf die Klassifikationsmethoden, anhand derer terrestrische Laserscanner eingeteilt werden können. Den Abschluss bildet ein kurzer Überblick über Faktoren, die Einfluss auf das Messergebnis eines Scans haben können.

2.3.1 TLS im Vergleich mit Tachymetrie und historische Entwicklungen

Seit der Jahrtausendwende konnte sich terrestrisches Laserscanning auf dem geodätischen Markt und im Vermessungswesen etablieren. Im Jahr 2005 kamen zum ersten Mal Wissenschaftler aus dem deutschsprachigen Raum in Fulda zusammen, um im Rahmen eines Seminars des Deutschen Vereins für Vermessungswesen (DVW) die Thematik des TLS intensiv zu diskutieren. Unter dem Stichwort „Terrestrisches Laserscanning – Ein geodätisches Messverfahren mit Zukunft“ wurden die Aspekte der Datenerfassung, Auswertung und Anwendung betrachtet und die aktuellen Ergebnisse in einer jährlich erscheinenden Schriftenreihe des DVW publiziert. Die Entwicklungstendenzen im Bereich des terrestrischen Laserscanning können somit im Laufe der Jahre anschaulich betrachtet werden.

Von manchen Herstellern wurde TLS als neues „Universalmessverfahren“ [STA-05¹] hochgelobt, das eine bahnbrechende Neuerung für die bestehenden geodätischen Methoden sei. STAIGER [STA-05¹] steht dieser Einstellung etwas kritisch gegenüber: *„Anfangs suggerierten nicht nur die Hersteller, dass Laserscanning ganz einfach sei: ‚Instrument aufstellen, Datenerfassung starten und nach 10 Minuten sind alle Daten auf der Festplatte, die es nur noch auszuwerten gilt.‘ Viele Anwender haben inzwischen in Form gescheiterter Projekte leidvoll erfahren, dass TLS nicht so einfach ist [...]. Aus Sicht des Verfassers wird das terrestrische Laserscanning die bisherigen Verfahren nicht ablösen, sondern die existierenden Hauptinstrumente (Digitalnivellier, Tachymeter, GNSS-Empfänger und Digitalkamera) ergänzen“* [STA-05¹: 14]. Der Laserscanner nimmt somit bereits die Rolle eines Standardwerkzeugs im täglichen Vermessungseinsatz ein, verdrängt aber keine anderen Methoden, sondern wirkt vielmehr ergänzend zu ihnen, was das Spektrum der Anwendungen deutlich erweitert [STA-07].

Besonders im **Vergleich zwischen TLS und Tachymetrie** lassen sich zahlreiche Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede finden. Das grundlegende Messprinzip ist für beide Methoden sehr ähnlich: Es beruht auf der Aussendung, der Reflexion und dem Empfang des vom Objekt reflektierten Laserstrahls [ZOG-06]. Sowohl TLS als auch Tachymetrie beruhen auf dem polaren Messprinzip (Ausnahme: Triangulationsmethode im extremen

Nahbereich) und arbeiten mit Richtungen und Distanzen (sowie, im Falle des TLS, mit Intensität).

Die folgende *Tabelle 1* zeigt die wesentlichen Merkmale auf, anhand derer TLS und Tachymetrie verglichen bzw. voneinander abgegrenzt werden können. Prinzipiell werden bei beiden Verfahren dieselben Messungselemente beobachtet, doch bei näherer Betrachtung zeigen sich gravierende Unterschiede, die auch weitreichende Konsequenzen auf die Anwendung beider Methoden haben [STA-05].

Tabelle 1: Tachymetrie versus terrestrisches Laserscanning: Gemeinsamkeiten und Unterschiede, Quelle: [MIT-16: 21f.] und [STA-05: 11], verändert und ergänzt

	Tachymetrie	Terrestrisches Laserscanning
Grundsätzliches Arbeitsprinzip	Wenige Punkte werden präzise betrachtet	Sehr viele Punkte werden mit mäßiger Genauigkeit betrachtet
Optimaler Anwendungsbereich	Diskrete Objekte einfacher vertikaler Struktur Komplexe Objekte bedürfen einer Generalisierung	Kontinua (Oberflächen) mit vorwiegend vertikaler und auch komplexer, ausgedehnter Struktur
Beobachtungsgrößen	Geometrisch, attributiv	Primär geometrisch, Intensität (Grau- und Farbwerte)
Eigenschaften der Messpunkte	Einzelpunkte: – Strukturiert – Codiert – Repräsentativ – Dauerhaft vermarktet	Massenpunkte, Punktwolke: – Unstrukturiert – Nicht codiert – Zufällig – Nicht dauerhaft
Aufwand pro Punkt	Hoch	Minimal
Reproduzierbarkeit der Messungen	Ja	Nein
Punktauswahl	Vor Ort	Bei der Auswertung
Qualitätsmaße	Punktbezogen	Elementbezogen
Bedingung für Aufstellung des Geräts	Lotrechte Stehachse zwingend erforderlich	Auch schiefstehende Ausrichtung der Stehachse möglich
Georeferenzierung	Tachymetrische Stationierung	Tachymetrische Stationierung Pass- und Verknüpfungspunkte
Zielstrahl-Ausrichtung	Fernrohre	Ablenkspiegel
Ablauf der Messung	Manuell (Zielerfassung teilautomatisiert)	Vollautomatisiert
Messergebnis	2D- bzw. 3D-Polarkoordinaten	3D-Polarkoordinaten
Funktion einer integrierenden Kamera	Unterstützung des Messablaufs (Zielanvisierung)	Bildhafte Darstellung erfasster Objekte (unterstützt Auswertung)
Auswertung	Einfach	Aufwendig und komplex

Ein genaueres Studium von *Tabelle 1* lässt somit deutlich werden, dass sich TLS in vielen Gesichtspunkten von der „klassischen“ Tachymetrie unterscheidet. Sie unterstützt außerdem die Möglichkeit, dass beide Methoden sinnvoll ergänzend zueinander eingesetzt werden können. Ein „besseres“ oder „schlechteres“ System per se gibt es nicht, da schlicht zu viele Faktoren in die Betrachtung mit einfließen.

Terrestrisches Laserscanning hat in den vergangenen zehn Jahren einen wichtigen Beitrag zur dreidimensionalen Objekterfassung geleistet. Auch wenn es sich bei TLS noch um eine vergleichsweise neue Technologie handelt, konnten bereits einige Änderungen verzeichnet werden – von den Anfängen knapp nach der Jahrtausendwende bis hin zur Gegenwart wurden in einigen Bereichen Modernisierungsschritte vorgenommen. Der folgende Abschnitt dieses Kapitels soll sich deshalb einem kurzen **Vergleich zwischen** der (jungen) **Vergangenheit des TLS und der gegenwärtigen Situation** widmen.

Was sich in den letzten 15 Jahren nicht verändert hat, sind die unterschiedlichen Arten des Laserscanning, die in Kapitel 2.2 bereits beschrieben wurden. Statisches und kinematisches Laserscanning (sowie der „Sonderfall“ des Stop&Go-Laserscanning) existieren parallel zueinander und beruhen auf 3D- oder 2D-Scannern (siehe *Abbildung 9*). Scanner, die zur Deformationsanalyse herangezogen werden, werden auch im eindimensionalen Bereich eingesetzt. Als Messergebnis entstehen entweder dreidimensionale Punktwolken oder mehrere bzw. einzelne zweidimensionale Profile. Das Resultat eines Messvorgangs bilden die bereits mehrfach erwähnten 3D-Koordinaten sowie die Intensitäten.

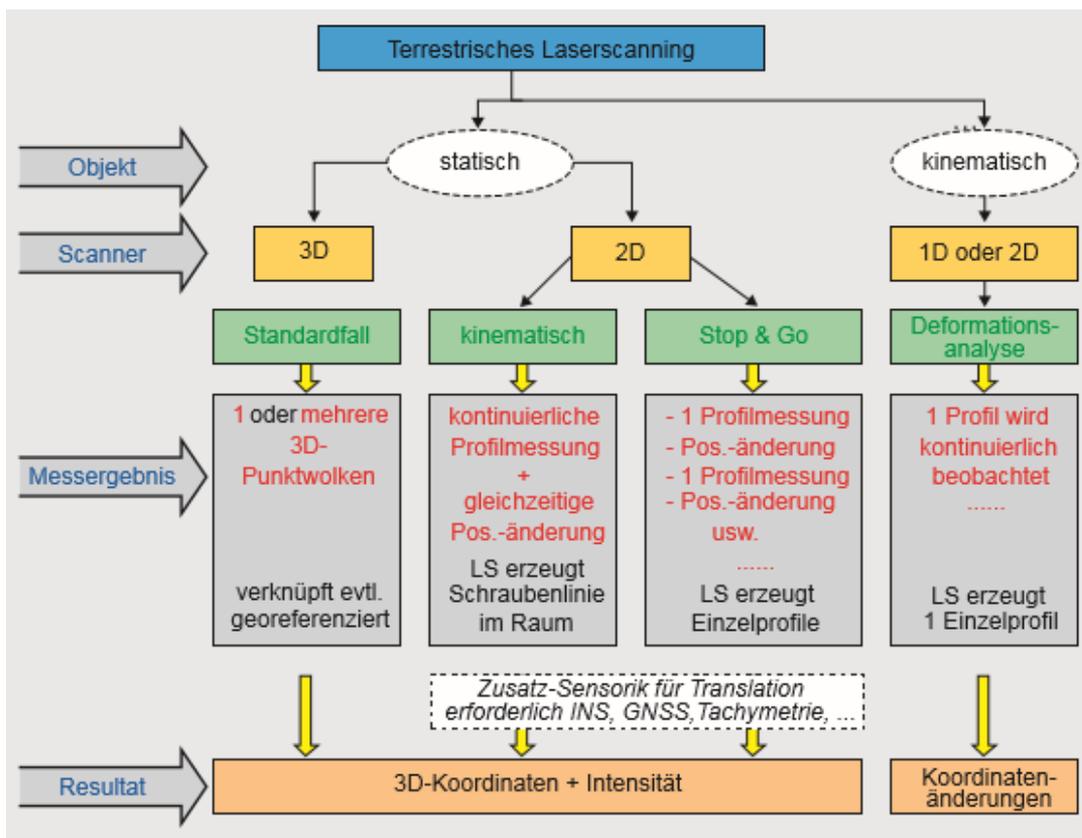


Abbildung 9: Klassifizierung der Messstrategien beim TLS, Quelle: [STA-07: 82]

Abgesehen von der grundlegenden Einteilung der Messverfahren konnten im Laufe der Jahre zahlreiche Änderungen und Trends beobachtet werden, die in der folgenden *Tabelle 2* zusammengefasst sind. Aspekte, die bis dato noch nicht ausreichend behandelt wurden (vor allem die Kalibrierung sowie die Standardisierung von Laserscannern) oder keinen direkten Vergleich zulassen, sind in der Tabelle als durchgehende Zeile angeführt.

Tabelle 2: Unterschiede im Bereich des terrestrischen Laserscanning: Vergleich von Vergangenheit und Gegenwart, Quelle: [STA-14: 6-15], eigene Darstellung

	Beginn des TLS-Einsatzes (um 2000)	Gegenwärtige Situation (2016)
Scanner-Hardware und Zubehör	Zwei Anbieter (Cyrax und Riegl) Scanner sind Stand-Alone-Sensoren	Sechs bis acht Anbieter Integration von Zusatzsensoren (Neigungssensoren, GNSS-Antennen, Digitalkameras...)
Art der Strahlableitung	Kamera-, Hybrid- und Panoramascanner	Fast vollständiger Verzicht auf Kamerascanner
Handhabung der Scanner	Datenspeicherung, Energieversorgung und Steuerung erfolgen extern	Datenspeicherung, Energieversorgung und Steuerung erfolgen scannerintern oder kabellos
Eigenschaften der Zielmarken	<ul style="list-style-type: none"> – Kugeln (3D) – Reflexmarken (2D) – Zieltafeln mit Schachbrettmuster (2D) 	Vorwiegend 2D-Targets (wirtschaftlicher in Herstellung und Lagerung)
Softwarelösungen	Wenige Anbieter Für große Punktwolken Zusatzsoftware nötig Registrierung über Passpunkte	Größeres Anbieterspektrum Integrative Softwarelösungen mit oftmaliger Viewer-Möglichkeit Vermehrt passpunktlose Algorithmen
Kalibrierung	Black-Box-Mechanik → Kalibrierung nur durch Hersteller möglich	
Standardisierung	Technische Angaben weder standardisiert noch einheitlich; kein direkter objektiver Vergleich möglich Für Punktwolken existiert das E57-Datenaustauschformat, das schon von mehreren Herstellern implementiert wurde	
Kosten	Kaufpreise für Scanner und PC-Ausstattung sind im Vergleich zur gebotenen Leistung gefallen; Kosten für Auswertesoftware sind unübersichtlich (oft Gesamtpakete von Hard- und Software kombiniert) Betriebskosten durch die vermehrte Reduktion von Zielzeichen reduziert → kürzere Arbeitszeit im Feld	
Anwendungsbereich	Archäologie, Architektur, Denkmalpflege, Bauwesen, Straßen- und Schienenwesen, Anlagenbau, Forensik uvm.	

Die größten Änderungen sind vor allem im Bereich der Laserscanner-Software zu bemerken: Ein größerer Markt mit dementsprechend größerem Angebot sowie meist kostenfreie Viewer-Möglichkeiten lassen eine wesentlich umfangreichere Auswertung der Daten zu.

In Bezug auf den Nutzerkreis bzw. die Anwendungsbereiche, in denen TLS eingesetzt wird, hat sich wenig verändert. Offene „Baustellen“, die wohl in Zukunft noch eine größere Rolle spielen werden, sind hingegen noch der Bereich der Kalibrierung, auf den der Nutzer so gut wie gar keinen Einfluss hat, sowie noch ausstehende Standardisierungsverfahren, um eine objektive technische Vergleichbarkeit der einzelnen Scanner zu ermöglichen [STA-14]. Seit 2000 befasst sich eine Arbeitsgruppe (Offenes Forum für Terrestrisches Laserscanning) mit dem Entwurf einer Richtlinie (siehe [KER-10]).

2.3.2 Klassifizierung von terrestrischen Laserscannern

Die Klassifizierung von terrestrischen Laserscannern ist nach verschiedenen Kriterien möglich, wobei einige mehr, andere weniger Sinn machen. In der Literatur durchgesetzt hat sich eine Unterscheidung nach folgenden Gesichtspunkten:

- Art der Distanzmessung
- Größe des Gesichtsfelds
- Art der Strahlablenkung

Diese Klassifizierung wird von der Autorin auf den folgenden Seiten auch weiter verfolgt.

Klassifizierung nach Art der Distanzmessung

Grundsätzlich gibt es drei Arten von Distanzmessungen, die im Bereich des TLS angewendet werden können: Impulslaufzeitverfahren, Phasenvergleichsverfahren und Triangulationsverfahren. Letzteres wird allerdings nur im extremen Nahbereich (Entfernungen unter 2 m) eingesetzt und ist im Folgenden nicht mehr relevant.

Das **Impulslaufzeitverfahren**, das auch als TOF-Verfahren (Time of Flight) bezeichnet wird, ist bei Laserscannern das am häufigsten anzutreffende Verfahren. Hierbei wird ein sehr kurzer Laserimpuls (in der Regel im Nano-Sekunden-Bereich) von der Senderdiode ausgesandt, vom Objekt reflektiert und von einem in der Regel coaxialen Empfänger registriert (siehe *Abbildung 10*) [HES-07].

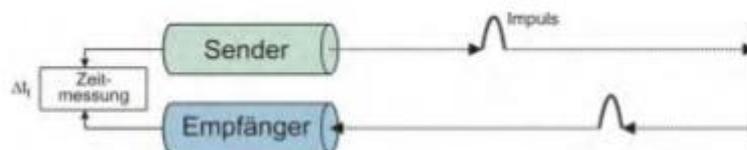


Abbildung 10: Impulslaufzeitverfahren, Quelle: [HES-07: 46]

Durch Messung der Zeitdifferenz zwischen Aussendung und Empfang des Impulses ergibt sich die Raumstrecke [ebd.]. Scanner mit Impulslaufzeitverfahren sind häufig für größere Distanzen ausgelegt; dafür genügen aber in der Regel Auflösungen im cm-Bereich. Zum Erreichen einer höheren Auflösung und Genauigkeit wird häufig über mehrere Pulse ge-

mittelt. Das Impulslaufzeitverfahren ermöglicht die Auswertung mehrerer Echos, die von unterschiedlichen teiltransparenten Objekten entlang der Messstrecke (z.B. Fenster, Vegetation) herrühren. Moderne Geräte verfügen sogar über die Option der Full Waveform Analysis, bei der das gesamte rückgestrahlte Signal aufgezeichnet wird [REI-15].

Mit dem **Phasenvergleichsverfahren** lassen sich in der Regel deutlich höhere Abtastraten als mit dem Verfahren der Impulslaufzeitmessung erzielen. Aus diesem Grund eignet sich dieses Messprinzip nicht nur für statische terrestrische Laserscanner, sondern auch für den Einsatz auf bewegten Plattformen [HES-07]. Zur Distanzmessung wird einer kontinuierlich ausgestrahlten Trägerwelle ein sinusförmiges Signal aufmoduliert, das als Maßeinheit für die Streckenmessung dient (siehe *Abbildung 11*).

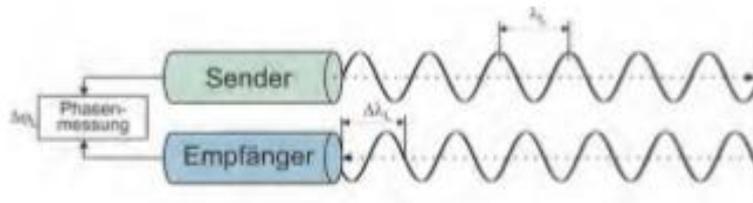


Abbildung 11: Phasenvergleichsverfahren, Quelle: [HES-07: 45]

Die Messwelle wird vom Sender ausgestrahlt und von einem Objekt zum Empfänger zurückreflektiert. Dabei trifft die über die doppelte Messstrecke gelaufene Welle beim Sender mit einer gewissen Phasenverschiebung gegenüber der ausgesandten Welle ein [MIT-16]. Die Strecke leitet sich somit aus einem Phasenvergleich zwischen ausgesandtem und reflektiertem Signal ab. Mit dieser Methode kann eine sehr hohe Messrate erzielt werden, allerdings ist die Reichweite begrenzt [STA-05¹].

Somit lässt sich festhalten, dass sich das Impulsmessverfahren vor allem für größere Distanzen eignet und das Phasenvergleichsverfahren vor allem für eine erhöhte Genauigkeit. *Tabelle 3* fasst die wesentlichen Parameter nochmals zusammen:

Tabelle 3: Impulslaufzeitverfahren und Phasenvergleichsverfahren im Vergleich, Quelle: [HES-07: 44] und [MIT-16: 46], eigene Bearbeitung

Messverfahren	Impulslaufzeit	Phasenvergleich
Distanzmessung		
Reichweite	< 6000 m	< 80 m
Genauigkeit	> 5 mm	< 5 mm
Messrate (geschätzt)	50.000 Punkte/s	500.000 Punkte/s
Spotgröße am Objekt (Entfernung = 50 m)	Mehrere cm	1 cm
Hersteller	Zoller+Fröhlich, Faro, Riegl, Callidus	Leica, Trimble Riegl, Callidus

Klassifizierung nach Größe des Gesichtsfelds

In Hinblick auf die Größe des Gesichtsfelds können nach STAIGER [STA-05¹] drei Arten von Scannern unterschieden werden: Kamera-, Hybrid- und Panoramascanner.

Die so genannten **Kamerascanner** können standardmäßig keine Drehung des Scankopfes um ihre Stehachse vollziehen, weshalb ihr Gesichtsfeld in der Regel stark eingeschränkt ist [HES-07]. Der Objektausschnitt wird „wie auf einem Foto“ [MIT-16: 39] erfasst. Aus diesem Grund ist das Einsatzgebiet dieser Scanner vor allem auf einzelne Objekte mit geringer räumlicher Ausdehnung begrenzt – gegenwärtig lässt sich ein Trend weg von Kamerascannern beobachten, da diese nicht mehr zeitgemäß sind (siehe *Tabelle 2*).

Im Gegensatz zu Kamerascannern ist das Gesichtsfeld von **Hybridscannern** nur in der vertikalen Ausdehnung begrenzt [HES-07]. Der Hybridscanner ist somit ein Rundumscanner, der in der Horizontalen uneingeschränkt messen kann. Zu Objekterfassung werden vom Scanner kontinuierlich Vertikalprofile erfasst, wobei der Scankopf während der Aufnahme um seine Stehachse gedreht wird [ebd.].

Panoramascanner vollziehen zur Objekterfassung ebenfalls eine vollständige Drehung des Scankopfes. Im Unterschied zu Hybridscannern besitzen sie allerdings ein vertikal maximal ausgedehntes Gesichtsfeld, wodurch die Umgebung in der Regel vollständig mit einem einzigen 360°-Scan erfasst werden kann [ebd.]. Der einzige „tote“ Bereich, in welchem keine Daten aufgenommen werden können, ist die eigene Standfläche des Scanners. Panoramascanner arbeiten meist mit dem Phasenvergleichsverfahren und finden in kinematischen Messsystemen große Anwendung.

Abbildung 12 zeigt schematisch die Aufnahmewinkel der unterschiedlichen Scansysteme:

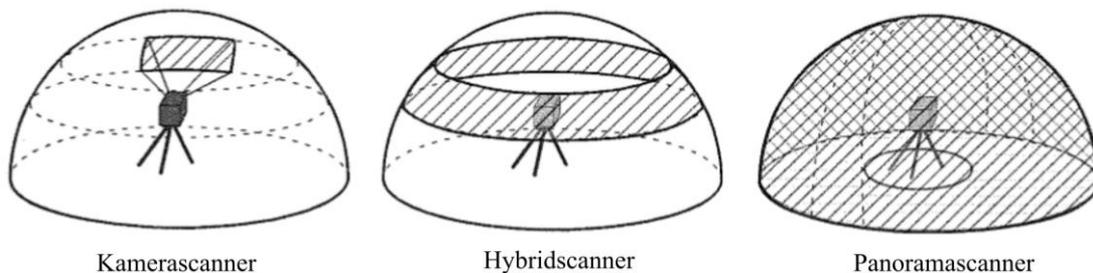


Abbildung 12: Klassifizierung von Laserscannern nach Größe des Gesichtsfeldes, Quelle: [KOL-10: 19], verändert

Klassifizierung nach Art der Strahlableitung

Die Art der Strahlableitung hängt in hohem Maße sowohl mit dem Gesichtsfeld als auch mit der Art der Distanzmessung zusammen, da hohe Datenraten der Distanzmessung eine ausreichend schnelle Form der Strahlableitung erfordern [HES-07]. Generell wird zwischen zwei Spiegelsystemen zur Art der Strahlableitung unterschieden (siehe *Abbildung 13*, in Klammer die Namen der Herstellerfirmen):

- **Oszillierender Spiegel** (Leica, Trimble u.a.)
- **Rotierender Spiegel** (Zoller+Fröhlich u.a.)

Außerdem – quasi als dritter Typ – ist die Kombination beider Spiegel zu einem Oszillierenden/Rotierenden Polygonspiegel möglich.

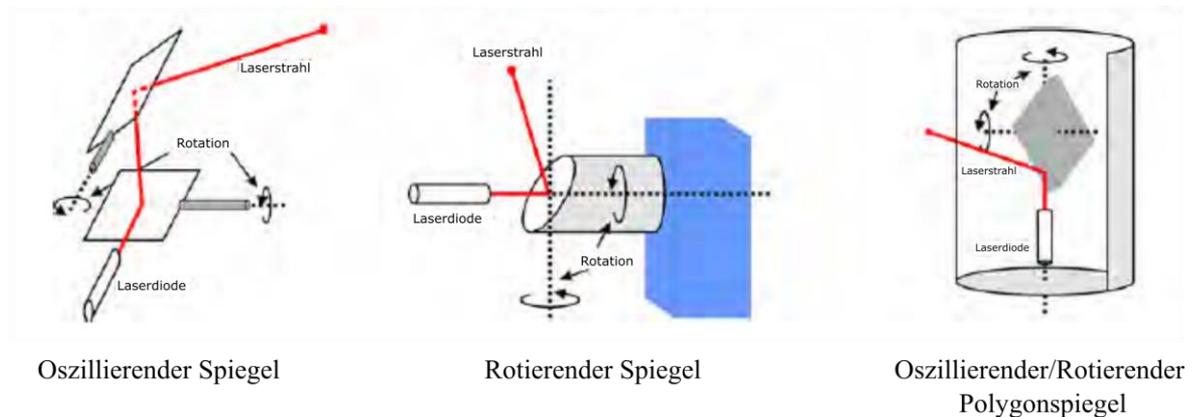


Abbildung 13: Klassifizierung von Laserscannern nach Art der Strahlableitung, Quelle: [HES-07: 47], verändert

Oszillierender Spiegel: Ein schwenkbarer Spiegel steuert den Laserstrahl über den Messbereich. Die einzelnen Datenpunkte werden in beiden Richtungen des Scans generiert. Die Abstände der Punkte variieren, da die Bewegungen des Spiegels unterschiedliche Geschwindigkeiten aufweisen. Dieser Umstand kann teilweise durch einen zusätzlich eingebauten elektrischen Antrieb kompensiert werden. Die Vorteile eines oszillierenden Spiegels sind die Variabilität des Scan-Winkels (z.B. zwischen 0 und 75°) und die Variabilität der Scanrate (z.B. 0 bis 100 Hz) [BER-10].

Rotierender Spiegel: Bei dieser Art der Strahlableitung werden die Datenpunkte nur in eine Scanrichtung registriert. Im Vergleich zu oszillierenden Spiegeln generieren rotierende Spiegel ein wesentlich homogeneres Punktemuster und können (zumindest im Falle des ALS) sogar auf einen gleichmäßigen Punkteabstand konfiguriert werden. Allerdings ist der Scan-Winkel bei diesen Systemen wesentlich geringer, da er nur zwischen 30 und 60° variiert [ebd.].

Kamerascanner arbeiten in der Regel mit oszillierenden Spiegeln; Hybridscanner mit rotierenden Spiegeln. Bei Panoramascannern kommen beide Systeme zur Anwendung; auch eine Kombination mittels Polygonspiegel ist möglich [MIT-16].

Laut HESSE [HES-07] hat die Art der Spiegelbewegung auch direkten Einfluss auf die Scangeschwindigkeit: „So besitzen Systeme mit oszillierendem Spiegel aufgrund der Trägheit des Spiegels und der notwendigen Umkehrung der Bewegungsrichtung geringere horizontale Erfassungsgeschwindigkeiten, da eine Umkehr der Scanrichtung zwischen zwei Profilen notwendig ist. [...] Insbesondere bei der Betrachtung der Strahlableitung von aktuellen Scannermodellen wird deutlich, dass prinzipiell jeder Scanner in der Lage ist, Profilmessungen durchzuführen. Aufgrund der [...] Bewegung der Ablenkeinheit (Spiegel) kommen jedoch nur Geräte mit rotierendem Schräg- und Polygonspiegel hierfür in Frage“ [HES-07: 47f.].

2.3.3 Einflussfaktoren beim terrestrischen Laserscanning

In den letzten Kapiteln wurde versucht, darzustellen, wie TLS überhaupt funktioniert und nach welchen Kriterien terrestrische Laserscanner eingeteilt werden können. Unabhängig davon, für welches Modell sich der Anwender letztendlich entscheidet, gibt es allerdings noch eine Reihe von Faktoren, die Einfluss auf den Scanprozess nehmen können. Dazu zählen sowohl die Eigenschaften des Punktrasters beim Laserscanning als auch verschiedene Arten von Fehlerquellen, die nach DOLD [DOL-10] in vier Klassen eingeteilt werden können.

Ein im Zuge des Scanprozesses entstehender Punktraster wird im Wesentlichen durch zwei Parameter definiert: Winkelschrittweite und Strahldivergenz.

Die **Strahldivergenz** ist abhängig vom Sensor und sorgt auf dem Objekt für einen Laser-spot (*footprint*), der je nach Entfernung und Schnittwinkel eine bestimmte Größe aufweist. Die **Winkelschrittweite** bezeichnet den Öffnungswinkel des Sensors [MIT-16]. Die Abstimmung zwischen Strahldivergenz und Winkelschrittweite ist dann ideal, wenn die Laserspots am Objekt direkt aneinandergrenzen [DOL-10]. Beide Parameter haben einen direkten Einfluss auf die Objektauflösung. Zur besseren Veranschaulichung sind diese beiden Eigenschaften in *Abbildung 14* dargestellt:

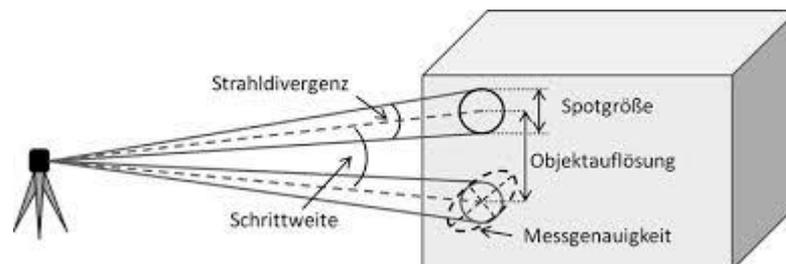


Abbildung 14: Strahldivergenz und (Winkel-)Schrittweite: Zwei wichtige Parameter im Scanprozess, Quelle: [URL-02]

Während des Erfassungsprozesses kann eine Vielzahl von Fehlern auftreten, welche sowohl systeminternen als auch -externen Ursprungs sein können. Die Arbeiten von KOLBE [KOL-10] und MITTERMAIER [MIT-16] gliedern diese Einflüsse in die Bereiche Oberflächenbeschaffenheit, Materialstruktur und Zielgeometrie. DOLD [DOL-10] geht noch etwas weiter und beschreibt zusätzlich systeminterne Faktoren. Von seiner Arbeit leitet sich die folgende Auflistung jener Bereiche ab, die einen negativen Einfluss auf die Messergebnisse haben können:

- **Instrumentenfehler**

Diese Fehler lassen sich auf die Bauart und die technischen Spezifikationen der Laserscanner zurückführen. Sie sind entweder *zufälliger* oder *systematischer* Art. Zufällige Fehler sind auf physikalische Beschränkungen der Scanner zurückzuführen und können nicht korrigiert werden. Eine Detektion von systematischen Fehler ist hingegen möglich: Durch eine Kalibrierung oder die Berücksichtigung von Korrekturwerten kann eine Ver-

besserung erreicht werden. Instrumentenfehler treten in der Regel in der Entfernungsmessung, der Ablenkeinheit und beim Achssystem des Scanners auf [DOL-10].

- **Atmosphärische Fehler**

Da die Distanzmessung nicht im Vakuum erfolgt, breitet sich der Messstrahl nicht mit Vakuum-Lichtgeschwindigkeit aus, sondern ist durch eine langsamere Ausbreitungsgeschwindigkeit gekennzeichnet. Diese ist u.a. abhängig von Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte und chemischer Zusammensetzung der Luft [GOR-08]. Dennoch haben atmosphärische Einflüsse meist vernachlässigbare Auswirkungen auf die Distanzmessung des Scanners und es ist oft ausreichend, die geschätzte Umgebungstemperatur zu berücksichtigen. Größere Partikel in der Luft – z.B. Staub, Dampf oder Regentropfen – haben hingegen einen größeren Einfluss auf das Messergebnis, da an ihnen der Messstrahl reflektiert werden kann und dementsprechend große Fehler hervorruft [DOL-10].

- **Objektbezogene Fehler**

Fehler dieser Art werden von den gescannten Objekten selbst hervorgerufen und sind durch die reflektorlose Distanzmessung des Laserscanners bedingt, bei der ein Teil des ausgestrahlten Laserlichts in Richtung des Sensors reflektiert wird [ebd.]. Dabei kann zwischen *diffuser Reflexion* (typischer Fall, tritt bei leicht rauher Oberfläche auf), *Spiegelreflexion* (bei künstlich geschaffenen Objekten, vollständige Reflexion verursacht Datenlücken) und *Retroreflexion* (Strahl wird zum größten Teil wieder zur Quelle reflektiert, grobe Distanzmessfehler) unterschieden werden [MIT-16].

Auch die Oberflächenbeschaffenheit und die Oberflächenfarbe spielen im Zuge der Signalverfälschung eine große Rolle. Die Farbe einer Oberfläche beeinflusst die Reflektivität des zurückgeworfenen Signals, da die Farbe bestimmt, welche Frequenzanteile des Lichts von ihr absorbiert und welche reflektiert werden [GOR-08]. Hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit haben Material (Stein, Holz, Metall, Styropor etc.) und Form einen großen Einfluss. Letztere hat unmittelbare Auswirkungen auf die Strahldivergenz, da im Bereich von Kanten und Ecken Fehler bei der Distanzmessung entstehen [DOL-10]. Mehrwegeeffekte (*multipath*) sind in diesem Bereich keine Seltenheit.

Weitere Einflussgrößen, die sich auf die Distanzmessung auswirken können, sind der Einfallswinkel des Messstrahls, die Polarisation des Lichts, die Temperatur und die Feuchtigkeit der Oberflächen [ebd.]. Zu objektbezogenen Fehlern (v.a. im Bereich der Oberflächenreflektivität) liefert BÖHLER [BÖH-05] umfangreiche Untersuchungen.

- **Methodische Fehler**

Methodische Fehler werden nicht durch Instrument, Objekt oder Umgebung verursacht, sondern entstehen im Zuge der Datenaufnahme und der Auswertungsverfahren zur Weiterverarbeitung der Messdaten. Werden bei der Datenaufnahme bereits Fehler gemacht, so kann es passieren, dass die resultierende Punktwolke unter Umständen für eine weitere Auswertung wertlos ist. Es ist auch möglich, dass durch Abschattungen gewisse Bereiche des Objekts nicht erfasst werden konnten und dadurch Datenlücken entstehen oder eine Verknüpfung der Scans nicht möglich ist [DOL-10].

2.4 Der typische Messablauf eines Laserscanning-Projekts

Von der ersten Planung bis zur Finalisierung eines dreidimensionalen Objektmodells aus Laserscanning-Daten ist es oft ein langer Weg. Es gilt, viele einzelne Schritte – manche mehr, manche weniger aufwendig – zu durchlaufen, um letztendlich ein brauchbares Ergebnis zu erhalten, welches wiederum in Folge für die Weiterverarbeitung in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen genutzt werden kann. MITTERMAIER [MIT-16] beschreibt diesen Messablauf (*Workflow*) sehr detailliert. Der Einfachheit halber wurde von der Autorin eine Unterteilung in drei Phasen unternommen, die wie folgt benannt wurden: **Vorbereitung**, **Feldarbeit** und **Auswertung** (angelehnt an ZOGG und SCHULZ, vgl. [ZOG-06]). Auf den kommenden Seiten soll geschildert werden, wie der typische Workflow eines TLS-Projekts aussieht und welche Schritte es zu beachten gilt. (*Anmerkung*: Der Autorin ist bewusst, dass alleine die Auswertung von TLS-Daten schon Stoff für eine ganze Masterarbeit bieten würde, da es sich hierbei um ein äußerst komplexes Thema handelt. In diesem Kapitel wird nur ein grober Überblick gegeben; eine genauere Beschreibung des Auswertungsprozesses ist am Beispiel des Heidendor-Projekts in Kapitel 5.3.2 zu finden, in welchem mit eigenen Daten gearbeitet wird.)

2.4.1 Vorbereitung

Der allererste Schritt, der im Zuge eines TLS-Projekts gemacht werden muss, ist eine genaue **Bestimmung der Ziele**. Wird das Projekt privat durchgeführt, so gelten andere Bedingungen als wenn es einen Auftraggeber (Privatperson, Firma, wissenschaftliche Einrichtung...) gibt. Ist letzteres der Fall, so ist es essenziell, die Ziele und Zielvorgaben des Kunden genau zu kennen. Alle Leistungen müssen im Vorfeld abgeklärt werden, damit es im Nachhinein nicht zu Missverständnissen kommt. Eine Auswahl von möglichen Fragestellungen, die es zu Beginn eines TLS-Projekts mit dem Kunden zu klären gilt, liefert MITTERMAIER [MIT-16]:

- Rohe Punktwolke oder bereits bearbeitete/ausgewertete Daten?
- Detaillierungsgrad der Punktwolke (hinsichtlich Genauigkeit und Auflösung)?
- Entscheidung für 2D-Profil oder 3D-Modell/Animation?
- Inkludierung von Farbinformation oder Kameraaufnahmen?
- usw.

Nachdem diese Fragen geklärt wurden, ist der nächste Schritt eine sorgfältige **Analyse des Aufnahmegebiets**. Diese kann nach Standort und Objekt unterteilt werden [ebd.]. Hinsichtlich des Standortes gilt es einige Umgebungsbedingungen zu beachten: Ist der Standort uneingeschränkt zugänglich oder gibt es Zeitbeschränkungen? Handelt es sich um einen Indoor- oder Outdoor-Bereich oder eine Kombination aus beidem? Unterliegt das

Aufnahmegebiet möglicherweise Sicherheitsbeschränkungen wie Denkmalschutz oder Einsturzgefahr? Befinden sich viele Zivilpersonen in der Nähe des Standorts?

Hinsichtlich des aufzunehmenden Objekts (bzw. der Objekte) zählen neben der Objektausdehnung vor allem die Eigenschaften des Objekts [MIT-16]. Wie hoch ist die Komplexität der einzelnen Bestandteile? Aus welchem Material besteht das Objekt und welche Farbe hat es? Durch ein genaues Objektstudium können bereits im Vorfeld potenzielle Fehlerquellen (siehe objektbezogene Fehler, Kapitel 2.3.3) aufgezeigt werden. Auf Basis der Analyse des Aufnahmegebiets sowie des Objekts wird anschließend die Entscheidung für den zu verwendenden Gerätetyp getroffen.

Ist das Aufnahmegebiet bekannt, so können in einem nächsten Schritt die **Scanner-Standpunkte** bestimmt werden. Hierbei gilt: Maximale Genauigkeit und Auflösung bei minimaler Anzahl an Aufstellungspositionen [ebd.]. Mit der Optimierung der Anzahl der Scanner-Standpunkte kann die Datenmenge reduziert und Nachmessungen vermieden werden; ein möglichst wirtschaftliches Arbeiten wird dadurch erreicht [ZOG-06]. Zusätzlich müssen folgende Regeln bzw. Einschränkungen beachtet werden, um die bestmöglichen Standpunkte zu finden [MIT-16 und ZOG-06]:

- Erfüllung der minimalen/maximalen Scanner-Entfernungsbeschränkungen
- Vermeidung spitzer Schnittwinkel (schlechte Reflexion, geringere Genauigkeit)
- Abstand des Scanners zum Boden
- Sichtbarkeit von Zielmarken und natürlichen Verknüpfungspunkten
- Umgebung (Vibrationen, Wind...)
- Gesundheitsgefährdung und Sicherheit des Messtrupps

Neben den Scanner-Standpunkten werden auch Position und Type der eingesetzten **Zielmarken** festgelegt, die am Objekt oder in dessen näherer Umgebung angebracht sind und zur Verknüpfung der einzelnen Scans dienen. Dabei können, abhängig vom verwendeten Laserscanner, Kugeln, Folien oder Zylinderreflektoren zum Einsatz kommen. Manche Systeme erlauben die Verwendung von unterschiedlich großen Reflektoren in Abstimmung zum Entfernungsbereich. Wird dieser Reflektor-Typ eingesetzt, so müssen Sicherheitsaspekte (vor allem im Bereich von Verkehrswegen) genauestens berücksichtigt werden [STA-05²]. Gegenwärtig existieren bereits zahlreiche Laserscanner, die auf den Einsatz von Zielmarken verzichten und reflektorlos messen. In diesem Fall würde dieser Planungsschritt dementsprechend entfallen.

Bevor die Arbeit im Feld begonnen werden kann, kommt es als letzter Schritt noch zur **Geräteüberprüfung**. Die verwendeten Systeme müssen vor und nach jedem Einsatz überprüft werden. Vor allem bei Instrumenten mit integrierter oder aufgesetzter Kamera muss nach Abschluss der Erfassungsarbeiten eine Überprüfung der Kamerakalibrierung erfolgen [ebd.]. Der Laserscanner selbst sollte überdies regelmäßigen Kalibrierungsmes-

sungen unterzogen werden, für die im Idealfall eine einfache (betriebsinterne) Überprüfungsstrecke angelegt ist. Auch auf regelmäßige Softwareupdates ist zu achten [ebd.].

Zuletzt wird noch der Rest der benötigten Vermessungsausrüstung (Notebook, Stativ, Stromversorgung, Absperrbänder, etc.) zusammengestellt, bevor die Aufnahme im Feld erfolgen kann [MIT-16].

2.4.2 Feldarbeit

Die Feldarbeit setzt sich im Wesentlichen aus zwei Haupttätigkeiten zusammen. Dies ist einerseits die *Aufnahme des Objekts* mit dem Laserscanner selbst und andererseits, falls erforderlich, die *Etablierung eines Referenzsystems* mit Tachymeter oder GPS [ZOG-06]. Die erste dieser beiden Tätigkeiten ist dabei noch in kleinere Nebenschritte untergliedert.

Zu Beginn sei erläutert, wie die Aufnahme des Objekts von statten geht: Im Allgemeinen wird an der ersten Position mit der **Scanneraufstellung** begonnen, wobei der Aufbau ähnlich einem Tachymeter erfolgt (mit dem Unterschied, dass der Scanner nicht zwangsläufig lotrecht stehen muss). In der Regel steht das Stativ auf einem stabilen Untergrund und der Scanner wird in Augenhöhe auf das Stativ aufgesetzt [MIT-16]. Anschließend erfolgt die Horizontierung bzw. Zentrierung des Geräts.

Befindet sich das Gerät in der gewünschten Position, so kann der Scanner eingeschaltet werden und die für das Projekt relevanten **Scannereinstellungen** werden getroffen. Im Normalfall erfolgt die Erstellung eines neuen Scan-Projekts mit mehreren Scanpositionen. In der Software können zusätzlich Einstellungen zu verschiedenen Parametern vorgenommen werden: Diese umfassen u.a. die Definition des Messbereichs, eine Auswahl des Zielgebiets sowie Punktfiltrierungen. Bei letzteren kann eine Distanz angegeben werden, die den Toleranzbereich für die aufgenommenen Punkte darstellt. Punkte, die sich über bzw. unter der angegebenen Distanz befinden, werden vom Scanner zwar registriert, aber so gleich wieder verworfen, um eine Reduzierung der Datenmenge zu erlangen [ebd.].

Nachdem diese Einstellungen festgelegt wurden, kann mit der eigentlichen **Objektaufnahme** begonnen werden. Der Scan wird gestartet und der Laserscanner beginnt mit der Datenerfassung. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Scanarten möglich. Je nachdem, ob eine 3D- oder 2D-Aufnahme gewünscht wird, erfolgt ein so genannter *Field-of-View-Scan* (FOV-Scan) oder ein *Line Scan*. Geht es primär darum, die Reflektoren zu erfassen, wird ein *Fine Scan* durchgeführt. Abgesehen von den Scanarten besteht außerdem die Option der *Bildaufnahme*, um Farbinformation zu generieren [ebd.]. Die Objektaufnahme erfolgt nun der Reihe nach von den in der Vorbereitungsphase festgelegten Scanner-Standpunkten. Bei jedem Scan wird ein Teil des Objekts sowie die an ihm befestigten Zielmarken erfasst, die der späteren Verknüpfung dienen. Die Zeiten für die Datenerfassung sind in erster Linie vom Entfernungsmesssystem des Scanners abhängig; Scanner mit Impulslaufzeitverfahren brauchen in der Regel länger, erfassen aber mehr

Punkte als Scanner mit Phasenvergleichsverfahren [KER-08]. Ein einzelner Scanvorgang kann somit zwischen wenigen Minuten bis einigen Stunden andauern [ZOG-06].

Die einzelnen Scanner-Standpunkte, von denen aus das Objekt erfasst wird, liegen jeweils in einem eigenen, lokalen Koordinatensystem vor. Die Punktwolken, die am jeweiligen Standpunkt generiert werden, sind demnach nicht aneinander orientiert, sondern unabhängig im Raum verteilt. Es ist deshalb notwendig, die Standpunkte in ein gemeinsames Koordinatensystem zu transferieren. In der Feldarbeit wird mit der **Etablierung eines Referenzsystems** der erste Schritt dafür gelegt; die weiteren Arbeitsschritte (Registrierung und Georeferenzierung) werden in Kapitel 2.4.3 ausführlicher beschrieben. Die Etablierung erfolgt mittels Tachymeter oder GPS [ZOG-06] und ist im Wesentlichen nichts anderes als eine Positionsbestimmung. Der Standpunkt im globalen Koordinatensystem wird ermittelt und dient später dazu, die bereits zueinander orientierten Scanpositionen in ein übergeordnetes nationales oder globales Koordinatensystem zu überführen.

2.4.3 Auswertung

Die Phase der Datenauswertung beansprucht mit Abstand den größten Zeitaufwand in einem Laserscanning-Projekt. Das zeitliche Verhältnis Auswertung zu Feldarbeit kann dabei 10:1 erreichen oder sogar noch größer ausfallen [ZOG-06]; auch mit der gegenwärtigen Technologie kann dieser Umstand (noch) nicht geändert werden. BRENNER [BRE-07] unterscheidet zwischen ikonischer und symbolischer Auswertung. Die ikonische Auswertung besteht aus den Arbeitsschritten Registrierung, Dreiecksvermaschung, Zusammenführung und Ausdünnung; die symbolische Auswertung bezeichnet die Rekonstruktion von Objekten. Auf Grund der höheren Anschaulichkeit sowie der Berücksichtigung des Registrierungs- und Georeferenzierungsprozesses wurde in dieser Arbeit auf die Einteilung von KERSTEN et al. [KER-08] zurückgegriffen. Diese besteht aus insgesamt vier Arbeitsschritten (siehe *Abbildung 15*). Generell kann aber gesagt werden, dass es nicht *ein* fixes Auswertungsschema gibt, sondern dass die einzelnen Schritte stark von der jeweiligen Aufgabe abhängig sind. Jene Teilaufgaben, die im Folgenden beschrieben werden, sind aber in nahezu allen Fällen Bestandteil im Auswertungsprozess eines Laserscanning-Projekts.

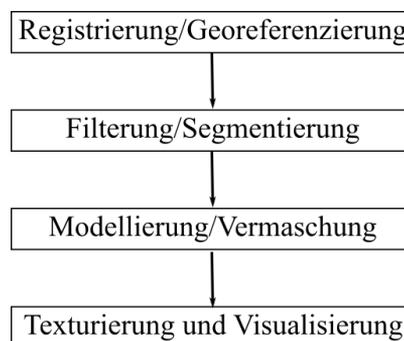


Abbildung 15: Arbeitsschritte im Auswertungsprozess eines TLS-Projekts, Quelle: [KER-08: 32], eigene Bearbeitung

Registrierung und Georeferenzierung

Wie bereits im letzten Abschnitt der Feldarbeit erwähnt, gibt es in einem Laserscanning-Projekt mehrere unterschiedliche Koordinatensysteme, die es zueinander in Beziehung zu setzen gilt. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass ein Objekt in der Regel nur von mehreren Scanner-Standpunkten vollständig erfasst werden kann. Die Messungen an jeder Scanposition liegen deshalb jeweils im lokalen Koordinatensystem des Scanners (*Scanner-Koordinatensystem*) vor [MIT-16]. Durch den Prozess der **Registrierung** erfolgt die gegenseitige Orientierung der einzelnen Scanner-Koordinatensysteme in ein gemeinsames Koordinatensystem (*Projekt-Koordinatensystem*). Der Ursprung des Projekt-Koordinatensystems ist meist durch den Standpunkt des ersten Scans festgelegt [ebd.].

Die Registrierung der einzelnen Scans ist auf drei Varianten möglich: a) über die im Feld gesetzten Zielmarken, b) durch datengetriebene Lösungen oder c) durch direkte Georeferenzierung [KER-08]. Vorläufig werden nur a) und b) betrachtet; der Prozess der Georeferenzierung wird im Anschluss daran detaillierter beschrieben.

Werden die Scans über Zielmarken miteinander verknüpft, so ist es wichtig, diese während der Feldarbeit möglichst genau zu erfassen. Bei Scannern mit Impulslaufzeitverfahren muss jede Marke gesondert gescannt und eindeutig benannt werden, wobei die entsprechende Erfassungssoftware die automatische Zielmarkenerkennung unterstützt [ebd.]. Bei Scannern mit Phasenvergleichsverfahren werden die Marken bereits im „normalen“ 360°-Panorama-Scan erfasst und müssen im Nachhinein lediglich noch halbautomatisch eingemessen werden. Mit zunehmender Zielentfernung ist dieser Prozess allerdings erschwert. Ist auf Grund von äußeren Umständen keine ausreichende Anzahl und/oder Verteilung der Zielmarken möglich, so kann die Verknüpfung auch über natürliche, eindeutig bestimmbarere Punkte erfolgen [ebd.].

Gegenwärtig gibt es viele Scanner, die auch ohne Zielmarken auskommen. Die Registrierung der Scans erfolgt daher nur anhand der Messdaten, wobei darauf geachtet werden muss, dass sich die einzelnen Punktwolken ausreichend überlappen [ebd.]. Laut KERSTEN et al. [KER-08] steht eine Georeferenzierung bei dieser Registriertechnik nicht im Vordergrund. Die Registrierung setzt sich bei datengetriebenen Lösungen aus zwei Phasen zusammen: *„Die Grobregistrierung erfolgt über identische Merkmale bzw. Modelle [...] oder über lokale Verfahren, in denen die Winkel von Normalvektoren bzw. die Krümmungen verwendet werden. Bei der Feinregistrierung mittels ICP-Algorithmus (Iterative Closest Point) sind Überlappungsbereiche und genaue Startwerte notwendig. [...] Die Verfahren sind weitestgehend automatisierbar“* [KER-08: 38f.].

Nach der Registrierung befinden sich die Scanner-Koordinatensysteme nun vereint in einem Projekt-Koordinatensystem. Was jetzt noch fehlt, ist die Transformation in ein übergeordnetes *nationales oder globales Koordinatensystem*. Diese Transformation wird durch den Prozess der **Georeferenzierung** erreicht (für die in Kapitel 2.4.2 durch die Etablierung eines Referenzsystems bereits erste Vorarbeiten geleistet wurden). Dabei kann zwischen direkter und indirekter Georeferenzierung unterschieden werden.

Die direkte Georeferenzierung kann bereits im Zuge der Registrierung (siehe oben) zur Verknüpfung der Punktwolken angewandt werden. Sie setzt voraus, dass der Laserscanner-Standpunkt – zum Beispiel mit GPS oder mit Tachymeter – und die Stellungswinkel des Laserscanners bestimmt wurden und somit bekannt sind [KRA-04]. Dementsprechend können auch die Zielmarken im übergeordneten Koordinatensystem verortet werden [KER-08].

Bei der indirekten Georeferenzierung sind die Standpunktkoordinaten und die Stellungswinkel unbekannt. Diese Parameter müssen daher indirekt aus Passpunkten abgeleitet werden [KRA-04]. Als Passpunkte dienen zumeist die Zielmarken (oder andere markante Punkte im Gelände), von denen mindestens drei Stück nötig sind, die überdies eine ausgeglichene Verteilung aufweisen müssen. Die Transformation ins nationale bzw. globale Koordinatensystem erfolgt durch die räumliche Ähnlichkeitstransformation, die der absoluten Orientierung in der Photogrammetrie entspricht [ebd.].

Filterung und Segmentierung

Nach Abschluss von Registrierung und Georeferenzierung sind die Punktwolken zueinander orientiert und können im weiteren Verlauf gemeinsam bearbeitet werden. Für die nächsten Arbeitsschritte steht immer die enorme Datenmenge bzw. eine Reduktion dieser im Vordergrund. Die gewünschte Detailgenauigkeit und die erforderlichen Rechenzeiten sollten sich dabei so gut wie möglich die Waage halten.

Auf Grund der Größe der Punktwolken ist es nahezu immer erforderlich, die Daten vor der Weiterverarbeitung zu reduzieren. Dies geschieht durch die **Filterung**, wobei unterschiedlichste Lösungen existieren. KERSTEN et al. [KER-08] führen einige davon beispielhaft an:

- *Intensitätsfilter*: Ausblendung aller Pixel mit einer höheren oder niedrigeren Intensität als spezifiziert.
- *Range-Filter*: Elimination aller Pixel mit einer größeren oder kleineren Entfernung als spezifiziert.
- *Mixed Pixel*: Entfernung von Pixeln, die nicht korrekt sind, weil der Laserstrahl auf eine Kante trifft. In diesem Fall wird ein Teil des Laserstrahls an dem nahen Objekt reflektiert, während ein weiterer Teil erst an dem entfernt gelegenen Objekt reflektiert wird. Dies ergibt ein Pixel, das sich irgendwo zwischen den beiden Objektteilen befindet und daher durch diesen Filter eliminiert wird.
- *Single Pixel*: Mit dieser Funktion können einzeln auftretende Pixel herausgenommen werden.
- *Smoothing und Median Filter*: Dienen zur Glättung der Punktwolken, beinhalten aber die Gefahr der Datenverfälschung.

Zusätzlich zu den oben genannten Optionen ist es außerdem möglich, eine **Segmentierung** anzuwenden. Diese basiert auf einer Zerlegung der Oberfläche der Punktwolke. Ziel ist es dabei, die Punktwolke in einzelne Teilflächen (Segmente) aufzuteilen, die sich wiederum

funktional beschreiben lassen [BRE-07]. Die Punktwolke wird somit in Untermengen unterteilt, wobei jeder Scanpunkt eindeutig einer dieser Untermengen zugeordnet werden muss. Diese Bedingung kann die Segmentierung erschweren, falls keine eindeutige Lösung gefunden wird. Um diesem Problem zu begegnen, werden heuristische Verfahren angewendet, die die Punktwolke „bottom-up“ oder „top-down“ zerlegen [ebd.].

Für die Segmentierung von Scandaten existiert – wie auch bei der Filterung – eine sehr große Anzahl von Verfahren. Basierend auf BRENNER [BRE-07] seien hier einige angeführt:

- *Bereichswachstumsverfahren* (region growing): Hier werden zunächst kleine Saatregionen identifiziert, typischerweise anhand ihrer geringen Restklaffung bezüglich einer lokal geschätzten Ebene. Anschließend wird die „beste“ Saatregion ausgewählt und es werden benachbarte Scanpunkte hinzugefügt, die das Homogenitätskriterium (z.B. Zugehörigkeit zu derselben Ebene) erfüllen. Das Bereichswachstumsverfahren ist in *Abbildung 16* dargestellt.
- *Scanline grouping*: Arbeitet ähnlich wie das Bereichswachstumsverfahren, jedoch werden in der Wachstumsphase nicht nur einzelne Scanpunkte, sondern lineare Segmente von Scanpunkten hinzugefügt. Das Scanline grouping ist daher schneller; allerdings müssen die Nachbarschaften zwischen den Scanzeilen bekannt sein.
- *RANSAC* (random sampling consensus): Dieses Verfahren ermittelt jene Fläche, auf der die meisten Scanpunkte liegen. Alle anderen Scanpunkte werden als Ausreißer betrachtet. Der Vorgang startet durch zufällige Auswahl der Minimalanzahl von Punkten (z.B. drei für eine Ebene) und ermittelt anschließend unter Verwendung einer gegebenen maximalen Abweichung die Zahl der übrigen Scanpunkte, welche zu dieser Fläche gehören.
- *Hough-Transformation*: Hierbei handelt es sich um ein global arbeitendes Segmentierungsverfahren. Es beruht darauf, dass jedes parametrisiert darstellbare Objekt durch einen Punkt im Parameterraum beschrieben wird. Der Parameterraum wird in diskrete Zellen aufgeteilt und jeder Scanpunkt „stimmt“ für eine oder mehrere dieser Zellen. Die Zelle, auf die anschließend die meisten Stimmen entfallen, korrespondiert mit dem dominanten Objekt in der Szene. Die Hough-Transformation eignet sich nicht für komplexe Objekte, da der dabei entstehende Parameterraum bezüglich Speicherplatz und Rechenzeit nicht mehr handhabbar ist.

Modellierung und Vermaschung

Für die Modellierung stehen dem Anwender je nach Komplexität des Objekts und je nach gewünschtem Endprodukt im Wesentlichen zwei Arbeitswege offen: Zum einen kann aus der Punktwolke in weitgehend manueller Arbeit ein CAD-Modell (*Computer-Aided-Design*, [BEC-12]) erstellt werden; zum anderen kann die Punktwolke durch Dreiecksvermaschung zu einem Oberflächenmodell verarbeitet werden [KER-08].

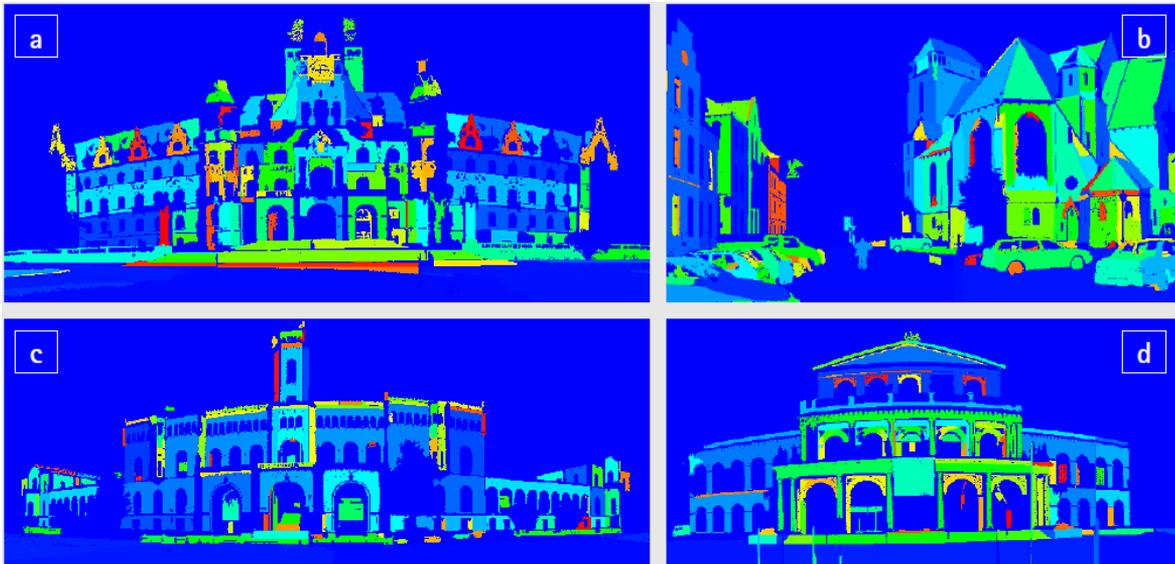


Abbildung 16: Ebenensegmentierung mittels Bereichswachstumsverfahren: Von links nach rechts und oben nach unten: (a) Neues Rathaus Hannover, (b) Lutherkirche, (c) Welfenschloss und (d) Oper. Jede Farbe steht für eine segmentierte Fläche, Quelle: [BRE-07: 6]

Bei der **CAD-Modellierung** werden die einzelnen Elemente der Punktwolke durch Raumprimitiva (u.a. Kugeln, Zylinder, Ebenen, Röhren...) nachgebildet [ZOG-06].

Dieses Verfahren kommt vor allem bei jenen Objekten zu tragen, die sich leicht durch standardisierte geometrische Körper modellieren lassen. Dementsprechend ist einer der häufigsten Anwendungsbereiche die Industrie, wo z.B. Rohrleitungssysteme und Maschinen relativ einfach in der Darstellung sind. Aber auch im Tunnelbau und in der Erzeugung von 3D-Stadtmodellen kommt die CAD-Modellierung oftmals zum Einsatz [BEC-12]. Weniger geeignet ist das Verfahren für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie, da die Objekte oft sehr komplex und die Anforderungen an eine detaillierte Auswertung recht hoch sind [KER-08].

Der größte Aufwand, der bei der CAD-Modellierung auftritt, ist die manuelle Aufteilung der einzelnen Objektteile aus der Gesamtpunktwolke – oft ist es schwierig auszumachen, wo ein Teil endet und der andere anfängt. Eine Segmentierung, wie sie bereits im letzten Arbeitsschritt beschrieben wurde, macht hier durchaus Sinn; es besteht aber auch die Möglichkeit, die Laserscannerdaten mit photogrammetrischen Bildern zu verschneiden, um die Orientierung zu erleichtern. Softwares wie z.B. 3Dipos ermöglichen eine hierarchische Aufteilung in Gruppen und Untergruppen, PHIDIAS und Z-MAP Laser sind Plug-Ins für ein CAD-Programm, mit denen eine kombinierte Auswertung orientierter Bilder mit georeferenzierten Laserscannerdaten durchgeführt werden kann [ebd.]. Die Punktwolke wird dadurch strukturiert, was nachfolgende Arbeiten erleichtert und deren Genauigkeitsgrad erhöht. Sind einzelne Teile erst einmal extrahiert, erfolgt die Modellierung selbst weitestgehend automatisch. Verbleibende Probleme sind laut BECKER und HEHL [BEC-12] bei dieser Methode noch die teilweise geringe Auflösung, die zufällige Verteilung der Messpunkte und die oft fehlende eindeutige Begrenzung der Objekte.

Neben der CAD-Modellierung besteht auch die Möglichkeit, Objekte durch **Dreiecksvermaschung** zu modellieren. Dies bietet sich vor allem für unregelmäßige Objektoberflächen an, da die Erstellung eines CAD-Modells hierfür zu kosten- und zeitintensiv wäre. Prinzipiell existieren nach KERSTEN et al. [KER-08] zwei unterschiedliche Methoden der Dreiecksvermaschung: die 2,5D- und die 3D-Triangulation. „Für eine 2,5D-Vermaschung wird eine Projektionsoberfläche (z.B. Ebene, Kugel oder Zylinder) benötigt, die dem Objekt in grober Form ähnelt. Komplexere Oberflächen, die sich nicht durch Regelgeometrien annähern lassen, können durch eine 3D-Triangulation modelliert werden“ [KER-08: 46].

Bei der Dreiecksvermaschung wird die Oberfläche des Objekts durch Dreiecke abgebildet (siehe *Abbildung 17*). Je nach Auflösung variiert die Größe dieser Dreiecke, weshalb auch in diesem Schritt die Datenmenge sowie die Rechenzeiten stets berücksichtigt werden müssen. In vielen Fällen ist es sinnvoll, zunächst eine sehr hohe Polygonzahl und eine damit einhergehende hohe Auflösung und Genauigkeit zu wählen und diese dann bei Bedarf zu reduzieren. Die Reduktion der Dreiecke bietet sich vor allem in ebenen Bereichen (z.B. Mauern) an; im Bereich komplizierter Strukturen wird hingegen eine höhere Polygonanzahl beibehalten [BIB-11]. Im Anschluss an die Erstellung eines Oberflächenmodells durch Dreiecksvermaschung können die Messpunkte noch geglättet und in Freiformflächen, zum Beispiel in so genannte NURBS (*Non-Uniform Rational B-Splines*) umgewandelt werden [KRA-04].

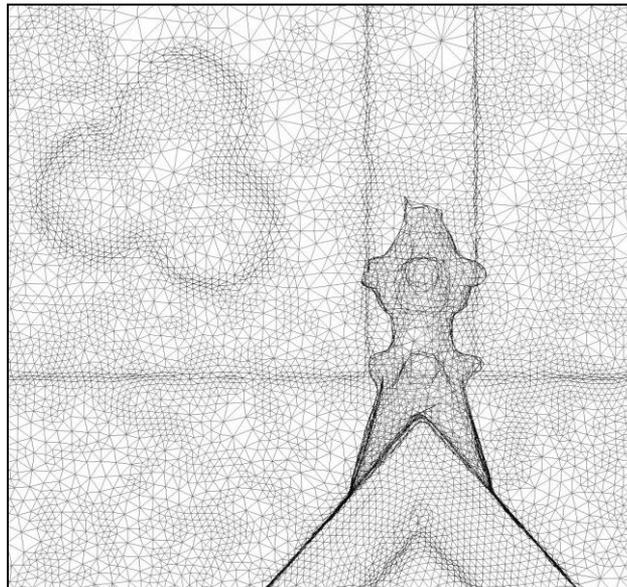


Abbildung 17: Dreiecksvermaschung einer Fassade der Kaiser-Wilhelm-Gedächtniskirche in Berlin,
Quelle: [URL-3]

Texturierung und Visualisierung

Nachdem die Punktwolke soweit reduziert und bearbeitet wurde, dass der Anwender mit dem Ergebnis zufrieden ist, kann mit der Visualisierung des Modells der letzte Schritt im Messablauf eines Laserscanning-Projekts begonnen werden. Es gilt nun, das Modell op-

tisch noch etwas attraktiver zu gestalten und für weitere Anwendungen zugänglich zu machen.

Dazu bietet es sich an, das Modell zu texturieren. **Texturierung** bedeutet die Überlagerung eines Objekts mit einer foto-realistischen oder synthetischen Textur zur Darstellung dreidimensionaler Räume bzw. Objekte [STA-12]. Dabei soll erreicht werden, dass dreidimensionale Objekte ein realistischeres Aussehen erhalten. STALLMANN und KERSTEN [STA-12] unterscheiden in ihrer Arbeit drei mögliche Arten der Texturierung:

- *Manuelle Texturierung von 3D-Modellen:* Wird ein Modell manuell texturiert, so ist dies eine sehr zeit- und kostenintensive Arbeit, „die allerdings qualitativ sehr hochwertige, ansehnliche Resultate liefert, wenn professionelle Softwarepakete [...] eingesetzt werden. Als Ergebnisse können foto-realistische Ansichten, Animationen oder Videos ausgegeben werden, in dem aus dem virtuellen 3D-Modell viele perspektivische 2D-Ansichtsbilder entlang eines vordefinierten Kamerapfads berechnet werden“ [STA-12: 382]. Softwares wie Maya oder Cinema 4D ermöglichen somit nicht nur die Texturierung, sondern auch das Rendern von Szenen, in welchen das dreidimensionale Objekt abgebildet ist.
- *Automatische Erstellung von 3D-Modellen mit Texturen:* Seit einigen Jahren gibt es leistungsfähige Kameras auf dem Markt, die mit Algorithmen wie Structure from Motion (SfM) oder Dense Image Matching (DIM) arbeiten und daraus dreidimensionale Punktwolken und Modelle aus Bildsequenzen erzeugen. Diese Systeme stellen oftmals bereits Alternativen zu den klassischen Messsystemen dar und erfreuen sich zunehmender Beliebtheit. Da sich das Folgekapitel dieser Arbeit u.a. intensiv mit dem Structure from Motion-Algorithmus auseinandersetzen wird, soll an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen werden.
- *Automatische Texturierung von 3D-Modellen:* Für die automatische Texturierung verschieden großer Modelle im Anwendungsbereich von Architektur und Archäologie wird u.a. die Software tmapper (basierend auf der Programmiersprache C++) angewandt. Diese Software basiert auf verschiedenen Algorithmen, die in der Dissertation von ABDELHAFIZ [ABD-09] vorgeschlagen werden. Um eine Texturierung zu ermöglichen, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein: (a) Vorliegen des 3D-Modells als Dreiecksvermaschung, (b) Bekanntheit der äußeren und inneren Orientierung der Bilder sowie (c) Lage des Modells und der Bilder im selben Koordinatensystem.

Für die **Visualisierung** von Punktwolken bieten die Hersteller von Laserscanning-Systemen verschiedene Viewer an, mit denen einzelne Scans oder auch ganze Punktwolken und fertige Modelle betrachtet werden können [KER-08]. So bietet z.B. Leica Geosystems mit dem Freeware-Programm TruView & CYCLONE Publisher eine Möglichkeit, große Punktwolken im Internet darzustellen, sodass von überall auf die Daten zugegriffen werden kann [URL-4].

Das fertige Modell kann nun einerseits für Präsentations- und Visualisierungszwecke weiterverwendet werden, andererseits steht es auch für Dokumentationsarbeiten zur Verfü-

gung: Koordinaten können an jedem beliebigen Punkt der Modelloberfläche abgefragt werden; Längen, Breiten und Entfernungen können gemessen werden und auch das Anlegen von Schnitten oder Segmenten ist realisierbar [BIB-11]. Somit ist es möglich, das nach zahlreichen Arbeitsschritten entstandene Endprodukt auf vielseitige Weise zu nutzen. Als Abschluss dieses Kapitels fasst *Abbildung 18* den gesamten Messablauf eines Laserscanning-Projekts noch einmal schematisch zusammen.

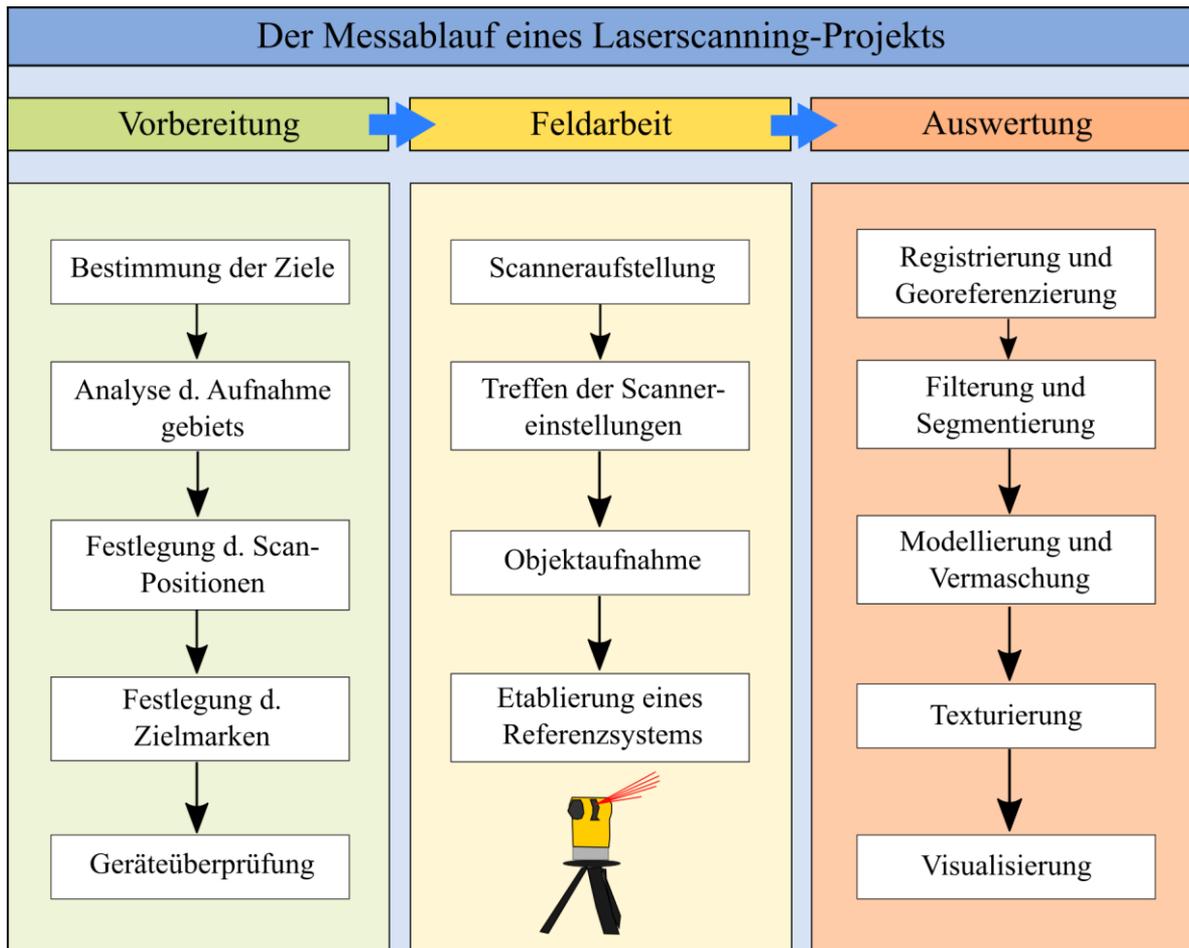


Abbildung 18: Zusammenfassende Darstellung des Laserscanning-Workflows, Quelle: [MIT-16], [ZOG-06] und [KER-08], eigene Bearbeitung

3 UAV-Photogrammetrie

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) – u.a. auch Multikopter oder Drohnen genannt – sind unbemannte autonome Luftfahrzeuge, die als Träger bildgebender Sensoren der Datenerfassung aus der Luft eine immer größere Bedeutung zukommen lassen [SIE-09]. Ursprünglich eine aus dem Militärbereich kommende Technologie, hat die Entwicklung von UAVs in den letzten Jahren rasante Fortschritte gemacht, wodurch vielfältige neue Einsatzgebiete entstanden: Sowohl in der Verkehrsüberwachung, im Katastrophenschutz und in der Bauwerksinspektion als auch im Bereich der Archäologie werden „Drohnen“ mit großem Erfolg eingesetzt [ebd.]. Auch Hobbyanwender konnten ab dem Jahr 2005 ihre ersten Systeme fliegen lassen [BÜC-15]. Im wissenschaftlichen Kontext hat sich der Begriff „UAV-Photogrammetrie“, der diese Systeme mit photogrammetrischen Erfassungsmethoden kombiniert, verbreitet durchgesetzt [EIS-09].

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der gegenwärtigen Situation der Unmanned Aerial Vehicles und gliedert sich in fünf Unterabschnitte: Zunächst erfolgen eine Begriffsdefinition und –abgrenzung sowie ein kurzer historischer Überblick. Anschließend wird versucht, die einzelnen Arten der UAVs nach verschiedenen Kriterien zu klassifizieren sowie einige wichtige rechtliche Rahmenbedingungen, die mit ihrem Einsatz verbunden sind, zu erläutern. Das darauffolgende Unterkapitel beschäftigt sich mit den einzelnen Komponenten eines Multikopters und einer kurzen Einführung in Flugmechanik und Navigation. Im Anschluss daran wird die Auswertung der mit einem UAV aufgenommenen Bilder näher betrachtet. Dabei sollen sowohl die gängigsten Auswertungssoftwares als auch der Structure from Motion-Algorithmus, der für den praktischen Teil dieser Masterarbeit eine besondere Bedeutung hat, näher vorgestellt werden. Analog zum Kapitel über Laserscanning wird auch dieses Kapitel mit einer genaueren Vorstellung des „UAV-Workflows“ beendet.

3.1 Begriffsdefinition und historischer Überblick

Unbemannte Fluggeräte (siehe *Abbildung 19*) werden in der Geodäsie meist mit der englischsprachigen Bezeichnung „UAV“ (**Unmanned Aerial Vehicle**) betitelt. Dabei werden UAVs als unbesetzte und wiedernutzbare, motorisierte Fluggeräte verstanden [ELI-16 nach BLY-99]. Bei einem Vergleich zwischen UAV und bemanntem Flugzeug ist der offensichtlichste Unterschied die fehlende physische Präsenz eines sich im UAV befindenden Piloten. Die Steuerung erfolgt extern durch eine Fernbedienung (*remote control*); der Flug kann manuell, semi-automatisch oder automatisch durchgeführt werden [ELI-16].

Der Begriff UAV wird nach EISENBEIß [EIS-09] auch in den Computerwissenschaften, der Robotik und der Künstlichen Intelligenz sowie in der Photogrammetrie und Fernerkundung vielfach genutzt. Dabei existieren auch zahlreiche Synonyme: Die Begriffe Remotely Piloted Vehicle (RPV), Remotely Operated Aircraft (ROA) oder Remotely Piloted Aircraft

Systems (RPAS) und Unmanned Vehicle Systems (UVS) werden häufig in der Literatur gefunden und sind meist US-amerikanischen Ursprungs [EIS-09]. Auch die Non-Governmental Organisation *UVS International* [URL-5] verwendet diese Begriffe.

REINHARD [REI-13] betrachtet den Begriff UAV vor allem im Kontext von am System befestigten Sensoren. Gemäß seiner Definition werden unter UAVs „*unabhängig von ihrer Bauart, unbemannte Luftfahrzeuge verstanden, die funkferngesteuert, halb- oder vollautonom fliegen und dabei eine Nutzlast, etwa Fernerkundungssensoren, tragen. Vor allem im militärischen Umfeld geläufig ist zusätzlich der Begriff UAS (Unmanned Aerial System), der nicht nur das Fluggerät selbst meint, sondern auch die Bodenstation mit einschließt*“ [REI-13: 178]. Seit einiger Zeit hat sich in der Literatur – vor allem im Modellflugbereich – auch der Begriff **Multikopter** immer weiter verbreitet. Dieser bezeichnet mehrrotorige, elektrisch angetriebene Flugplattformen, die aufgrund ihrer Eignung als Träger für Kameras und andere Sensoren auch starke Verbreitung in Wissenschaft und Forschung gefunden haben [ebd.]. Sie sind somit auch für die Archäologie äußerst relevant.

Jener Begriff, der in den Medien am häufigsten Anwendung findet, und der in der fach einschlägigen Literatur oft recht kontrovers diskutiert wird, ist die Bezeichnung des UAVs als **Drohne**. Laut ELING et al. [ELI-16] sei dieser Begriff „*aufgrund der Verbindung zu militärischen UAVs [...] negativ behaftet und wird deshalb meist vermieden, wenn es um die Bezeichnung von Fluggeräten geht, die für zivile Anwendungen genutzt werden*“ [ELI-16: 10]. REINHARD [REI-13] wiederum verwendet beide Begriffe synonym zueinander, da sich laut ihm „*die Bezeichnung Drohne [...] weitgehend als allgemeinverständlicher Ausdruck für das Akronym UAV durchgesetzt hat*“ [REI-13: 178]. Er räumt jedoch auch ein, dass es durchaus viele Nutzer gibt, die diesen Begriff auf Grund der Verbindung zu militärisch genutzten, bewaffneten Kampfdrohnen kategorisch ablehnen [ebd.].



Abbildung 19: UAV, Multikopter, Drohne? Eine einheitliche Begriffsdefinition ist schwierig, Quelle: [URL-6]

In dieser Masterarbeit sollen vor allem die Begriffe Unmanned Aerial Vehicle/Unbemanntes Fluggerät sowie Multikopter Anwendung finden. Ersteres ist dem Umstand geschuldet, dass UAV vielfach als Überbegriff gilt und im Kontext von Geodäsie und Kartographie am häufigsten verwendet wird. Wie bereits erwähnt, ist die Bezeichnung Multikopter vor allem im Modellbau gebräuchlich, beschreibt jedoch genau jenes System, das im Zuge der praktischen Arbeiten genutzt wird. Von der Autorin wird es deshalb als sinnvoll erachtet, beide Begriffe (mehr oder weniger) synonym zueinander zu verwenden.

Die Datenerfassung mit einem Multikopter wird, angelehnt an Eisenbeiß [EIS-09], in dieser Masterarbeit als UAV-Photogrammetrie bezeichnet.

Die **historische Entwicklung unbemannter Fluggeräte** wird in der Dissertation von EISENBEIß [EIS-09] sehr ausführlich beschrieben und beginnt ab dem Zeitpunkt der ersten Luftfotografien im Jahr 1858, die von einem Ballon aus aufgenommen wurden.

Die motorisierte Luftfahrt erlebte im frühen 20. Jahrhundert während des Ersten Weltkriegs eine rasche Entwicklung, als fast alle Kriegsparteien auf den Einsatz von Flugzeugen setzten. Die Konstruktionen der Flugzeughersteller erreichten damals immer neue Rekorde in Bezug auf Geschwindigkeit, Flugzeit, Flughöhe, Größe und Nutzlast [SIE-09]. Diese Errungenschaften führten zur Entwicklung von Autopiloten, um eine Entlastung des Flugzeugführers zu erreichen: *„Die Weiterentwicklung der Funktechnologie und die ersten Kreiselsysteme führten in den 40er und 50er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts dazu, dass man Luftfahrzeuge nun auch ohne Personen an Bord völlig autonom fliegen lassen konnte. Die treibende Kraft für diese Entwicklungen war das Militär. Ferngelenkte Flugzeuge kamen damals ebenfalls in der Weltraumfahrt zum Einsatz.“* [SIE-09: 2].

Einen weiteren Schritt in der Entwicklung der UAVs lieferte die Einführung der Satellitennavigationssysteme. Unabhängig von anderen Navigationssensoren, ist seitdem mit hoher Genauigkeit die Bestimmung von Position, Geschwindigkeit und (bei Einsatz von drei Antennen) die Orientierung an nahezu jedem Ort der Welt möglich [ebd.]. Dennoch war diese Entwicklung lange Zeit nur dem Militär vorbehalten; ein Einsatz von UAVs im zivilen Bereich war zu diesem Zeitpunkt noch mit zu hohen Kosten verbunden.

Die erste professionelle Nutzung von UAVs in der Geodäsie erfolgte 1979 und 1980 durch Przybilla und Wester-Ebbinghaus. Sie führten u.a. photogrammetrische Versuche mit einem Starrflügler-UAV mit einer Spannweite von drei Metern durch, der mit einer optischen Kamera ausgestattet war [ELI-16]. Außerdem erfolgte um diese Zeit erstmalig der Einsatz eines rotorbetriebenen UAVs. Dabei handelte es sich um einen Modellhelikopter, der für vermessungstechnische Zwecke benutzt wurde und der wohl einen Prototyp für zahlreiche spätere Systeme darstellte, wie sie u.a. von BÜCHI [BÜC-15] beschrieben werden. Dennoch darf nicht vergessen werden, dass zu diesem Zeitpunkt im Zivilbereich weder GPS noch INS (Inertial Navigation System) für den Anwender verfügbar waren.

Mit der Abschaltung der künstlichen Signalverschlechterung (*Selective Availability*) im Jahre 2000 wurde die Satellitennavigation auch für Zivilpersonen möglich. Neben diesem Umstand waren es vor allem Entwicklungen im Bereich der Avionik, der Elektromotoren, der Batterietechniken sowie die technischen Errungenschaften im Bereich der Sensorik, welche maßgeblich für das immer stärker aufkommende Interesse an UAVs verantwortlich waren [ELI-16]. Die Anzahl der Anwendungsbereiche ist gegenwärtig dementsprechend hoch und reicht von Verkehrsüberwachung und Vermisstensuche über Katastrophenschutz bis hin zur Erfassung von Geoinformationen für die unterschiedlichsten Forschungsbereiche [SIE-09]. Eine gute Zusammenfassung von Anwendungsbeispielen aus der Geodäsie ist unter [BER-16] und [FIS-16] zu finden.

3.2 Klassifizierung von UAVs

Generell kann gesagt werden, dass die Realisierung der einzelnen UAV-Systeme sehr vielfältig ist. Vor allem in den vergangenen Jahren sind zahlreiche neue Modelle auf dem Markt erschienen. Das derzeit größte eingesetzte UAV ist der *Global Hawk*, der mit einer Spannweite von 39 Metern und einem Gewicht von bis zu 14 Tonnen die Ausmaße eines kleinen Passagierflugzeugs einnimmt [SIE-09]. Dieses System ist jedoch für einen wirtschaftlichen zivilen Gebrauch kaum geeignet.

Jene UAVs, die für den Zivilgebrauch entwickelt wurden, bieten allerdings eine völlig neue Alternative zu den bisher in der Luft eingesetzten Fernerkundungsplattformen [ebd.]. Eine neue Bandbreite von Einsatzbereichen kann durch diese unbemannten Fluggeräte erschlossen werden. Dies ist unter anderem dadurch möglich, dass der Anschaffungspreis in den letzten Jahren rapide gefallen ist, wobei der preisbestimmende Faktor eines UAVs primär durch dessen Größe festgelegt wird. Aus der Größe resultieren wiederum weitere Kenngrößen wie Tragfähigkeit, Reichweite und Betriebsart [ebd.].

3.2.1 Beispiele für Klassifikationsmethoden

Die Einteilung der UAVs wird in der Literatur oft nach unterschiedlichen Kriterien vorgenommen. Im Folgenden sollen drei verschiedene Klassifikationsmethoden, basierend auf den Arbeiten von SIEBERT et al., EISENBEIß und ELING et al. vorgestellt werden.

SIEBERT et al. [SIE-09] unterscheiden UAVs nach deren Aufbau und der daraus resultierenden Startart, wobei zwischen horizontalem und senkrechtem Start differenziert wird: *„Horizontal startende Systeme [...] erzeugen ihren Auftrieb durch eine gewisse Mindestgeschwindigkeit relativ zur Umgebungsluft. Daher müssen sie Vortrieb über einen Motor entwickeln. Hierdurch erreichen sie einen hohen Wirkungsgrad, einen hohen Einsatzradius, einfache Bedienbarkeit und vergleichsweise geringe Kosten. Allerdings wird eine Start- und Landestrecke benötigt. Als Fernerkundungsplattformen eignen sich diese Systeme besonders für die Befliegung größerer Gebiete. Senkrecht startende Systeme [...] erzeugen ihren Auftrieb über die Drehung von Rotorblättern, die als Tragflächen dienen. Ein Heckrotor kommt dann zum Einsatz, wenn das Drehmoment des Hauptrotors ausgeglichen werden muss. Dadurch verschlechtert sich der Wirkungsgrad. Diese Systeme sind technisch anspruchsvolle Konstruktionen, deren Energieverbrauch vergleichsweise hoch ist. [...] Charakteristisch für diese Systeme sind die große Flexibilität und die Möglichkeit, nahezu überall starten und landen zu können“* [SIE-09: 6f.].

Als spezielle Form der Drehflügler führen SIEBERT et al. den so genannten **Quadrokopter** an, der aus vier quadratisch angeordneten Rotoren besteht, wobei sich jeweils zwei Rotoren in die entgegengesetzte Richtung drehen. Diese Systeme werden bis dato meist mit Elektromotoren betrieben und sind daher auf Akkus angewiesen. Der Vorteil dieses UAVs ist die hohe Stabilität und Beweglichkeit bei vergleichsweise geringem Eigengewicht.

Quadroptoren können eine Nutzlast bis zu 2 kg tragen und bieten sich daher für die Befestigung eines Zusatzsensors (z.B. einer Digitalkamera) an [ebd.]. Abgesehen von den vierrotorigen Quadroptoren gibt es auch Drehflügler mit drei (Trikopter) und mehr als vier Rotoren (Hexakopter, Oktokopter, usw.), die wiederum jeweils systemspezifische Vor- und Nachteile haben. Diese werden von BÜCHI [BÜC-15] bzw. der Autorin unter dem Begriff Multikopter zusammengefasst.

Als letzten UAV-Typ beschreiben SIEBERT et al. jene Luftfahrzeuge, die **leichter als Luft** sind und somit einem Zeppelin ähneln. Diese wurden schon seit längerem in der Fernerkundung genutzt, lassen sich aber, bedingt durch den technischen Fortschritt, mittlerweile schon völlig autonom fliegen. Mit ihnen können sehr lange Flugzeiten und große Flughöhen erreicht werden; allerdings gibt es Abstriche in Bezug auf geringe Flexibilität und Windanfälligkeit [ebd.]. In *Abbildung 20* sind Beispiele der vier unterschiedlichen UAV-Typen zu sehen.

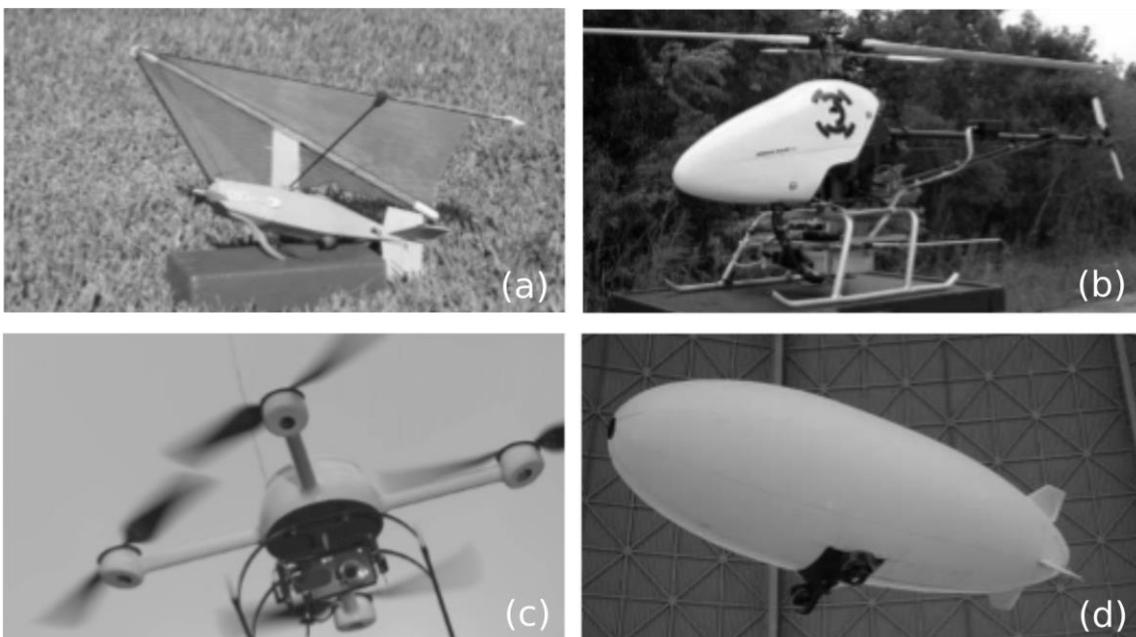


Abbildung 20: Beispiele für (a) horizontal, (b) senkrecht startende Systeme, (c) Quadropter und (d) UAVs, die leichter als Luft sind, Quelle: [SIE-09: 7], verändert

In der Klassifizierung von EISENBEIß [EIS-09] wird ein ähnliches System verfolgt, doch wird dieses ein wenig detaillierter beschrieben und die einzelnen UAVs werden zusätzlich in Bezug auf deren Vor- und Nachteile betrachtet. Als grundlegende Differenzierungsmerkmale zieht Eisenbeiß das **Gewicht** des UAVs (lighter than air/heavier than air) und dessen **Antriebsart** (unpowered/powerd) heran. Ist das System schwerer als Luft, so wird als drittes Klassifikationsmerkmal die **Stellung der Flügel** (flexible wing/fixed wing/rotary wing) herangezogen. Nach diesen Kriterien lassen sich jene unbemannten Fluggeräte einordnen, die für photogrammetrische Anwendungen geeignet sind. Das Ergebnis ist in *Tabelle 4* ersichtlich. Im Anschluss daran zeigt *Tabelle 5* eine alternative Einteilung, bei der die Stärken und Schwächen des jeweiligen UAVs hervorgehoben werden.

Tabelle 4: Klassifizierung von UAVs nach den Merkmalen Gewicht und Antrieb, Quelle: [EIS-09: 34], eigene Bearbeitung

	Lighter than air	Heavier than air		
		Flexible wing	Fixed wing	Rotary wing
Unpowered	Balloon	Hang glider	Gliders	Rotor-kite
		Paraglider		
		Kites		
Powered	Airship	Paraglider	Propeller	Single rotors
			Jet engines	Coaxial
				Quadrotors
				Multi-rotors

Tabelle 5: Vor- und Nachteile verschiedener UAV-Systeme (0: niedrigster Wert, +: mittelmäßiger Wert, ++: Bestwert), Quelle: [EIS-09: 35], eigene Bearbeitung

Type of aircraft	Range	Endurance	Weather and wind dependency	Maneuverability
Balloon	0	++	0	0
Airship	++	++	0	+
Gliders/Kites	+	0	0	0
Fixed wing gliders	++	+	+	+
Propeller & Jet engines	++	++	+	+
Rotor-kite	++	+	0	+
Single rotor (helicopter)	+	+	+	++
Coaxial	+	++	+	++
Quadrotors	0	0	0	++
Multi-copters	+	+	+	++

Wie in *Tabelle 5* ersichtlich ist, gibt es insgesamt vier Faktoren, die zur Bewertung der **Vor- und Nachteile eines UAVs** herangezogen werden: Reichweite (*range*), Flugdauer (*endurance*), Wetter- und Windabhängigkeit (*weather and wind dependency*) sowie Manövrierbarkeit (*maneuverability*). EISENBEIß verwendet dabei eine dreistufige Skala, um die Stärken und Schwächen des jeweiligen Systems zu verdeutlichen.

Ballone und Flugschiffe zeichnen sich besonders durch ihre lange Flugdauer aus und eignen sich deshalb vor allem für Langzeitmonitoring. Da ein Ballon mit Seilen befestigt ist, ist seine Reichweite deutlich geringer als die eines Flugschiffs. Beide Systeme sind auf gute Wetterverhältnisse angewiesen.

UAVs ohne Antrieb – zu dieser Gruppe zählen neben dem eben erwähnten Ballon verschiedene Realisierungen von Gleitflugzeugen und Drachen – sind generell vor allem in Bezug auf ihre Reichweite sehr effektiv. Flugdauer, Wetterabhängigkeit und

Manövrierbarkeit variieren, weisen aber zumeist eher mittelmäßige bis schlechte Werte auf.

UAVs mit Antrieb, die gleichzeitig schwerer als Luft sind, haben ihre besondere Stärke wiederum in der Manövrierbarkeit. Vor allem Helikopter, coaxiale Systeme und Multikopter schneiden auch bei den anderen drei Bewertungskategorien gut ab. Quadrocopter werden auf Grund ihrer geringen Größe sowohl im Outdoor- als auch im Indoorbereich eingesetzt. Sie werden jedoch zunehmend durch Multikopter mit mehr Rotoren ersetzt, da sie in anderen Bereichen eine gewisse Anfälligkeit aufweisen: „*However, these systems [Anm.: Quadrocopter] are more susceptible to environmental conditions like wind and the operation radius is limited more to smaller areas. Nowadays multi-rotor systems, which have usually similar size and weight as Quadrotors, are able to carry a larger payload, are more stable and they are more secure against system crashes, due to the redundancy of the multiple rotors*“ [EIS-09: 35].

Für die praktischen Arbeiten in seiner Dissertation verwendet EISENBEIß der Einfachheit halber die aus nur drei Klassen bestehende Einteilung von BLYENBURGH [BLY-99], da es keine offizielle UAV-Klassifizierung seitens der ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) gibt. Bei dieser Methode wird zwischen Open source und handgesteuerten (manual controlled) Systemen (**OM-class**), Micro & Mini-Systemen (**M-class**) und Large payload UAVs (**L-class**) unterschieden (siehe *Tabelle 6*). OM-Systeme sind nichtkommerziell und ihr Anschaffungspreis liegt unter 5.000€. Die M-Klasse umfasst Micro- und Mini-UAVs, wobei deren Tragfähigkeit (*payload*) nicht über 5 kg hinausgeht. Die L-Klasse wiederum steht für alle Systeme, deren Tragfähigkeit über 5 kg liegt [EIS-09].

Tabelle 6: Klassifizierung von UAVs unter Berücksichtigung von Anschaffungspreis und Tragfähigkeit, Quelle: [EIS-09: 38 nach BLY-99], eigene Bearbeitung

Category	Explanation	Limitation [e.g. price or payload]
OM-class	Open source and manual controlled systems: Limited commercial use and cost for the hardware of open-source systems not more than 5000 Euro	Manual controlled < 5000 Euro for Open source systems
M-class	Micro & Mini systems	< 5kg
L-class	Large payload UAVs	> 5kg

Zusätzlich bietet sich noch die Möglichkeit, die in *Tabelle 6* angeführten drei Klassen nach weiteren Gesichtspunkten zu betrachten. EISENBEIß empfiehlt hier eine Klassifizierung nach Art der integrierten Sensoren (GNSS/INS), Möglichkeit der (direkten) Georeferenzierung, Fähigkeit zur Echtzeit-Datenübermittlung und Messgenauigkeit. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass M- und L-Systeme in der Regel leistungsfähiger sind, da sie meist Navigationssensoren beinhalten und eine direkte Georeferenzierung möglich ist. Zusätzlich wird neben der Echtzeit-Fähigkeit eine relativ hohe Genauigkeit (Dezimeter bis Zen-

timeter-Bereich) erreicht [EIS-09]. Eine weitere Vertiefung dieses Themas soll auf Grund seines hohen Umfangs an dieser Stelle jedoch nicht mehr stattfinden.

Eine weitere Klassifizierung, die im Kontext dieses Kapitels vorgestellt werden soll, ist jene von ELING et al. [ELI-16], die im Rahmen des ersten DVW-Seminars zum Thema UAV publiziert wurde. Im Gegensatz zu den bisher erwähnten Beiträgen von SIEBERT et al. und EISENBEIß, in welchen nahezu alle verschiedenen UAV-Typen beschrieben wurden, konzentriert sich die Klassifizierung von ELING et al. auf jene Systeme, die in der Geodäsie Anwendung finden.

Somit erfolgt eine Unterteilung in **Starr- oder Flächenflügler** sowie **rotorbetriebene Systeme**. Starr- und Flächenflügler sind vor allem bei jenen Projekten von Vorteil, wo eine lange Flugzeit und/oder die Befliegung einer großen Fläche erforderlich sind. Sie werden mit Hilfe von Katapulten oder aus der Hand gestartet und benötigen für die Landung eine Landebahn. Steht diese nicht zur Verfügung, so besteht mittlerweile die Möglichkeit, die Systeme mit einem Fallschirm auszustatten [ELI-16].

Zu den rotorbetriebenen Systemen zählen Heli-, Quadro-, Hexa- und Oktokopter, wobei letztere drei unter dem Begriff Multikopter zusammengefasst werden können. (Die Trikotter, die grundsätzlich ebenfalls zu dieser Klasse gerechnet werden, finden in ELING et al. keine Erwähnung.) Diese UAVs kommen ohne Landebahn aus, dafür müssen in anderen Bereichen Abstriche gemacht werden: „Der Nachteil unter Verwendung von rotorbetriebenen UAVs ist die geringe zu erwartende Flugzeit, die je nach Akkugröße, Außentemperatur, Gewicht des UAVs, durchgeführten Flugmanövern und Windverhältnissen stark variieren kann. Meist liegen die Flugzeiten im Bereich zwischen 10 bis 30 Minuten“ [ELI-16: 12]. Um die Vorteile von Starr- und Flächenflüglern mit rotorbetriebenen Systemen zu verbinden, wurden in den letzten Jahren bereits erste Systeme entwickelt, die eine Mischung aus beiden UAV-Typen darstellen [ebd].

Für eine weitere Unterteilung der beiden Systeme ziehen ELING et al. analog zu EISENBEIß eine (modernere) Version der Klassifizierung von BLYENBURGH [BLY-15] heran, die auf folgenden Kriterien beruht: Reichweite (*range*), Flughöhe (*altitude*), maximale Flugdauer (*endurance*) und maximales Abfluggewicht (*MTOW*). Die drei kleinsten Kategorien, die für typische geodätische Anwendungen die beste Eignung aufweisen, sind Nano, Micro und Mini UAVs (siehe *Tabelle 7*), wobei erstere auf Grund ihrer geringen Nutzlast eher selten zum Einsatz kommen [ELI-16].

Tabelle 7: Klassifizierung von für geodätische Anwendungen geeignete UAVs, Quelle: [ELI-16: 12]

Kategorie	Range (km)	Altitude (m)	Endurance (h)	MTOW (kg)
Nano	< 1	100	< 1	< 0,025
Micro	< 10	250	1	< 5
Mini	< 10	150-300	< 2	< 30

Ein kurzes Zwischenfazit, das zum Ende dieses Unterkapitels gezogen werden kann, ist die Tatsache, dass es keine einheitliche UAV-Klassifizierungsmethode gibt, sondern dass unbemannte Fluggeräte anhand einer Vielzahl von Kriterien eingeteilt werden können. Nachfolgend soll nun der Fokus vor allem auf dem UAV-Typ des Multikopters liegen. Der Grund dafür ist die hohe Relevanz für die zukünftigen Kapitel dieser Masterarbeit: Sowohl bei archäologischen Fragestellungen, die nicht mit Airborne Laserscanning behandelt werden (siehe Kapitel 4.2 und 4.3), als auch bei den praktischen Arbeiten am Heidentor von Petronell-Carnuntum (siehe Kapitel 5) wird mit Multikoptern gearbeitet.

3.2.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Nutzung von UAVs ist mit gewissen rechtlichen Rahmenbedingungen verbunden. Ebenso wie bei der Klassifizierung mangelt es allerdings auch hier an einer einheitlichen globalen bzw. europäischen Rechtssituation. In Europa ist die EASA (European Aviation Safety Agency) nur für die Regulierung ziviler UAVs mit einer Abflugmasse von mehr als 150kg zuständig; alle Systeme, die unter dieser Marke liegen, fallen unter den Einflussbereich nationaler Regulierungen [GRE-16]. Seit dem Jahr 2015 gibt es jedoch Bestrebungen, innerhalb der EU eine zunehmende Harmonisierung der rechtlichen Rahmenbedingungen für den Betrieb von UAVs unter 150kg zu erlangen [ebd.].

Im Folgenden soll an dieser Stelle ein kurzer Überblick über die Rechtssituation im deutschsprachigen Raum gegeben werden. Die wichtigsten rechtlichen Eckdaten werden für die Schweiz, Deutschland und Österreich vorgestellt.

In der **Schweiz** ist das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) für die Zulassung der UAVs zuständig. Systeme, deren Abflugmasse über 30kg liegt, müssen von dem BAZL offiziell autorisiert sein [EIS-09]; leichtere UAVs können bewilligungsfrei geflogen werden, sofern die Regularien der „Verordnung des UVEK (Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation) über Luftfahrzeuge besonderer Kategorien“ eingehalten werden [REI-13]. Dabei spielt es keine Rolle, ob der Einsatz privat oder gewerbsmäßig erfolgt. REINHARD [REI-13] beschreibt die Rahmenbedingungen beim Einsatz eines Multikopters im archäologischen Bereich: *„Vorgeschrieben ist neben einer entsprechenden Versicherung [...] ein ständiger Blickkontakt des Piloten zur Drohne, um auch bei einem autonomen Flug im Notfall manuell in die Steuerung eingreifen zu können. Diese Bestimmung limitiert den Einsatzradius des UAV auf den wenige hundert Meter betragenden Sichtbereich des Piloten, was in der archäologischen Praxis jedoch kaum Einschränkungen nach sich zieht. Sofern nicht gegen das Datenschutzgesetz und den Schutz der Privatsphäre verstoßen wird [...] gibt es auch keine Einschränkungen beim Erstellen von Luftbildern“* [REI-13: 178]. In der Nähe von Flugplätzen und -häfen muss in der Regel eine gewisse Distanz gewahrt werden, um die Sicherheit der bemannten Luftfahrt zu gewährleisten. Von Flugpisten wird daher ein Abstand von 5 km gehalten und in Zonen kontrollierten Luftraums dürfen 150 m Flughöhe nicht überschritten werden [ebd.].

Das Luftfahrt-Bundesamt (LBA) ist in **Deutschland** die rechtliche Anlaufstelle für die Nutzung von zivilen UAVs. „Unbemannte Luftfahrtsysteme“ sind dabei seit 2012 als eigenständige Kategorie in das Luftverkehrsgesetz aufgenommen worden [GRE-16]. Zusammengefasst gelten für UAVs folgende Regeln [ebd.]:

- Im kontrollierten Luftraum (Luftraum A-D) ist der Betrieb grundsätzlich verboten, wobei es exklusive Ausnahmen geben kann.
- Im unkontrollierten Luftraum (Luftraum F-G) sind erlaubnispflichtige Flüge bei einer maximalen Abflugmasse (MTOW) < 25 kg und im Sichtbereich des Piloten möglich. Größere UAVs mit einem Gewicht > 25 kg und Flüge außerhalb des Sichtbereichs sind grundsätzlich verboten. Auch hier kann es zu Ausnahmen kommen.
- Im Rahmen der Flugdurchführung müssen UAVs bemannten Systemen immer ausweichen.
- Die Abgrenzung zwischen erlaubnisfreiem und erlaubnispflichtigem Flug für Fluggeräte < 25 kg ist der Zweck des Flugs. Dies bedeutet, dass ein Flug, der dem Sport und der Freizeit dient, als Modellflug definiert wird und somit erlaubnisfrei ist. Wenn das gleiche Fluggerät kommerziell oder für wissenschaftliche Zwecke eingesetzt wird, ist der Flug erlaubnispflichtig. Diese Abgrenzung wird in der Schweiz nicht verfolgt und sorgt in Deutschland laut GRENZDÖRFFER [GRE-16] für einen gewissen Graubereich.

Speziell für UAVs mit einer Gesamtmasse unter 5 kg, zu denen die meisten Multikopter zählen, gilt, dass generell nicht über Menschenansammlungen, Katastrophengebieten, Justizvollzugsanstalten, Industrieanlagen und Kraftwerken sowie militärischen Anlagen geflogen werden darf (außer der Auftraggeber erlaubt es). Bei Befliegungen über bebautem Gebiet oder in Naturschutzgebieten muss eine Genehmigung in der jeweiligen Gemeinde bzw. Stadt eingeholt werden. Die maximal erlaubte Flughöhe liegt bei 100m über Grund (lediglich in einigen Gebieten Baden-Württembergs sind es nur 50m). Die Verwendung von GPS und Wegpunktnavigation ist in Sichtweite erlaubt [ebd.].

In **Österreich** kümmert sich die Austro Control um die rechtliche Situation bzw. die Zulassung unbemannter Fluggeräte. Seit dem 01.01.2014 ist der Betrieb von UAVs möglich, wobei die rechtliche Grundlage das novellierte Luftfahrtgesetz bildet. Die Austro Control ist ausschließlich für die luftfahrtrechtliche Bewilligung zuständig; alle weiteren Bestimmungen (z.B. Datenschutz, Bewilligung zum Betrieb von Sicherheitszonen, Naturschutz usw.) müssen vom Nutzer selbstständig eingehalten werden [URL-7]. Generell wird von der Austro Control zwischen „unbemannten Luftfahrzeugen der Klasse 1“ und „unbemannten Luftfahrzeugen der Klasse 2“ unterschieden [ebd.]:

- *Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1 (mit Sichtverbindung)*: Diese **UAVs bis maximal 150kg** dürfen nur mit **Sichtkontakt** bis zu einer **Höhe von maximal 150m** verwendet werden. Eine Kennzeichnung ist erforderlich. Der Nutzer muss eine technische und betriebliche Prüfung ablegen, um eine Betriebsbewilligung zu bekommen. Die Austro Control führt eine Liste über die unbemannten Luftfahrzeuge der Klasse 1,

deren Anwendungsgebiet vor allem Arbeitsflüge und gewerbliche Flüge umfasst. Auf diesen Systemen können auch Kameras montiert sein.

- *Unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 2 (ohne Sichtverbindung)*: Bei diesen UAVs ist kein Sichtkontakt erforderlich. Sie werden wie Zivilluftfahrzeuge zertifiziert und zugelassen, was bedeutet, dass die Erfüllung von Bauvorschriften bzw. eine Musterprüfung vorliegen muss. Ebenso ist ein Pilotenschein erforderlich. Für die Klasse 2 gibt es momentan noch keine näheren Bestimmungen; die Regelung ist derzeit noch in Erprobung.

Für unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1 existiert ein umfangreiches Dokument, das detaillierte Durchführungsbestimmungen zum Betrieb von UAVs auf österreichischem Staatsgebiet beinhaltet. Es kann unter [AUS-15] eingesehen werden. Grundsätzlich wird bei der Bewilligung von Klasse 1-UAVs in erster Linie auf das Gefährdungspotenzial geachtet. Die Bestimmungen unterscheiden nach **Einsatzgebiet** (unbebaut, unbesiedelt, besiedelt und dicht besiedelt) und nach **Gewichtsklasse** (bis einschließlich 5 kg, größer als 5 kg bis einschließlich 25 kg und größer 25 kg bis einschließlich 150 kg). Insgesamt sind vier Kategorien von unbemannten Luftfahrzeugen definiert (A-D), die sich im Wesentlichen hinsichtlich der Strenge der Auflagen (z.B. Bauvorschriften, Leistungsparameter, Qualifikation des Piloten usw.) unterscheiden [URL-7]. *Abbildung 21* zeigt eine graphische Aufbereitung dieser Kategorisierung. Es ist zu erkennen, dass strengere Auflagen zu erfüllen sind, je bebauter das zu überfliegende Gebiet ist und je größer die Masse des genutzten UAVs ist.

	Einsatzgebiet			
	I unbebaut	II unbesiedelt	III besiedelt	IV dicht besiedelt
Betriebsmasse bis einschließlich 5 kg	A	A	B	C
Betriebsmasse bis einschließlich 25 kg	A	B	C	D
Betriebsmasse über 25 kg und bis einschließlich 150 kg	B	C	D	D

Abbildung 21: Kategorisierung von unbemannten Luftfahrzeugen der Klasse 1, Quelle: [AUS-15: 7]

Von den rechtlichen UAV-Bestimmungen der Austro Control ausgenommen sind Flugmodelle (hier gibt es eine eigene Behörde), Spielzeuge und unbemannte Luftfahrzeuge über 150kg. Spielzeuge werden als Modelle bis 79 Joule Bewegungsenergie (ca. 250 g) definiert und umfassen u.a. Spielzeughubschrauber und Minimodelle aus Schaumstoff, auf denen auch eine Kamera montiert werden darf. Bei ihnen gilt eine maximale Flughöhe von 30 m; eine Bewilligung ist nicht erforderlich. Für unbemannte Luftfahrzeuge über 150 kg gelten die Bestimmungen der EASA [ebd.].

3.3 Komponenten eines Multikopters

Gegenwärtig ist eine große Vielzahl an unterschiedlichen Multikoptern auf dem Markt zu finden. Viele werden dabei als „ready-to-fly“ angeboten und sind sofort einsetzbar. Von einigen Herstellern werden auch Komponenten zum Selbstbau geboten, wodurch das UAV den Ansprüchen des Nutzers entsprechend zusammengestellt werden kann [BÜC-15]. Multikopter – ob selbstgebaut oder nicht – setzen sich aber im Wesentlichen aus denselben Einzelteilen zusammen. Diese sollen – angelehnt an die Beschreibung von BÜCHI [BÜC-15] – in diesem Kapitel vorgestellt werden. Im Anschluss daran wird in Kapitel 3.3.8 noch ein kurzer Überblick über Flugsteuerung und Navigation gegeben. *Abbildung 22* zeigt die wichtigsten Bestandteile des „Innenlebens“ eines Multikopters.

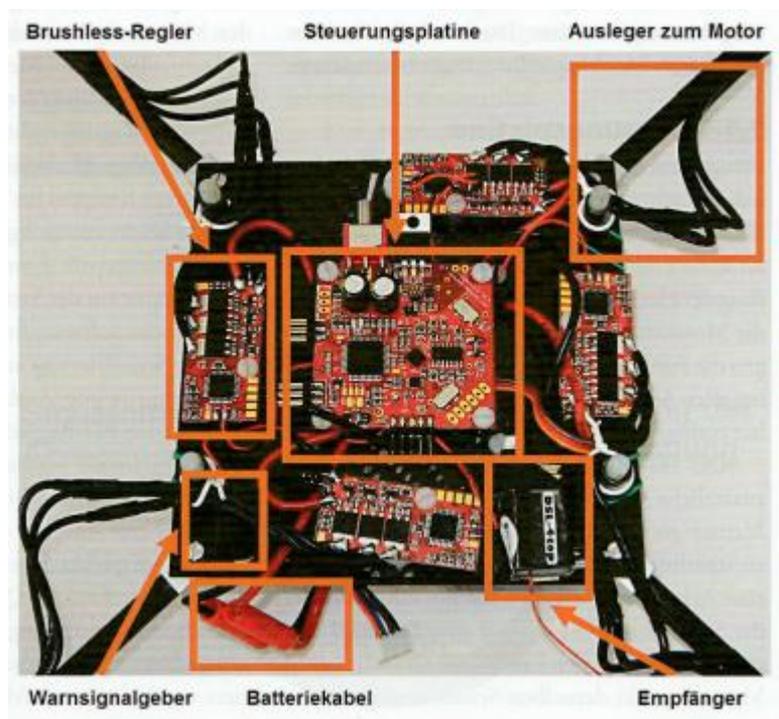


Abbildung 22: Basiskomponenten eines Multikopters, Quelle: [BÜC-15: 17]

3.3.1 Steuerungsplatine

Ferngesteuerte Flugmodelle oder Hubschrauber verfügen meist über keine Steuerungsplatine. Dort übernimmt ein Empfänger diese Funktion, welcher die Servos, den Gyro für die Stabilisierung des Heckrotors und die Brushless-Regler für die Sensoren steuert [BÜC-15]. Bei einem Multikopter reicht der Empfänger alleine nicht, da auf Grund der Bauweise des UAVs dieser vom Nutzer nicht gesteuert werden könnte. Eine Steuerungsplatine wird benötigt, um den Multikopter zu stabilisieren und ihn letztendlich zu fliegen. Sie misst in der Roll- und Nickachse (Kippbewegung nach links und rechts bzw. vorne und hinten) die Winkel sowie in der Gier-Achse (Rotation um z-Achse) die Winkelgeschwindigkeit und

gleicht somit bei den Motoren selbstständig das Gas (Bewegung entlang der z-Achse) an, ohne dass ein Eingreifen des Nutzers erforderlich ist [ebd.]. Diese Stabilisierung erfolgt über so genannte PD-Regler, die auf die Motoren und Propeller abgestimmt werden müssen und einen entscheidenden Einfluss auf das Flugverhalten des Multikopters haben (z.B. agil und wendig bzw. verhalten und langsam). Die Parameter der PD-Regler können per PC-Schnittstelle neu konfiguriert werden. Insgesamt übernimmt die Steuerungsplatine eine der wichtigsten Rollen beim Bau von Multikoptern. Ihre wichtigsten Basisfunktionen werden von BÜCHI [BÜC-15: 19] nochmals zusammengefasst:

- Stromversorgung der vier Brushless-Regler über einen zentralen Schalter
- Einlesen der vom Empfänger bereitgestellten Kanaleinstellungen
- Berechnung der Nick- und Roll-Winkel und der Winkelgeschwindigkeit in der Gier-Achse über die Gyro- und Beschleunigungssensoren
- Regelung der Nick- und Roll-Winkel und der Winkelgeschwindigkeit in der Gier-Achse mit PD-Reglern (Ausbalancieren)
- Berechnung der Motorspannungen und Ansteuerung der Brushless-Regler

3.3.2 Sensoren

Die Sensoren sind bei den meisten Multikoptern auf der Steuerungsplatine integriert. Ausgehend von der Problemstellung, in der Nick- und Roll-Achse die Winkel und in der Gier-Achse die Winkelgeschwindigkeit zu messen, damit die Steuerungsplatine selbstständig ausbalancieren kann [BÜC-15], gibt es eine ganze Bandbreite von Sensoren, die den Betrieb eines Multikopters gewährleisten:

- **Gyroskop und Beschleunigungssensor** (sowie Kombination aus beiden)

Die meisten Gyroskope, die im Modellbau eingesetzt werden, beruhen auf dem MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System)-Prinzip. Sie werden auch SMM (Silicon Micro Machine) genannt [ebd.]. Das bedeutet, dass Gyros technisch meist mit einem Silizium-Chip realisiert werden. Das **Gyroskop** ist ein einfacher Orientierungssensor, der Winkelgeschwindigkeiten misst. **Beschleunigungssensoren** sind hingegen für die Messung von linearen Beschleunigungen zuständig [DAD-14]. Auch sie sind meist nach dem MEMS-Prinzip konstruiert und messen dreidimensional auf einem Chip [BÜC-15]. Um noch bessere Ergebnisse zu gewährleisten, kommt es mittlerweile häufig zu einer Fusion dieser beiden Sensoren, da jeder Sensor für sich unter Umständen Nachteile mit sich bringt: „Der Beschleunigungssensor liefert zwar den Winkel, aber nur im so genannten stationären Fall. Wird der Quadroptor schräg gestellt, so tritt zuerst eine Beschleunigung in Richtung der Schräglage auf, welche selbstverständlich ebenfalls gemessen wird und die Winkelberechnung verfälscht. Windeinflüsse verfälschen das Resultat zusätzlich. [...] Es wird auf dem Gebiet der Sensorfusion viel Entwicklungsarbeit geleistet, um den Winkel mit einer Kombination aus Gier- und Beschleunigungssensoren exakt zu messen“ [BÜC-15: 21]. Durch modellbasierte Ansätze und Kalmanfilter wird versucht, die Messergebnisse zu ver-

bessern [ebd.]. Durch Gyroskop und Beschleunigungssensor ist eine Navigation ohne GPS-Signal und ohne externe Referenz möglich, was vor allem bei Flügen im Indoor-Bereich zur Anwendung kommt [DAD-14].

- **GNSS/INS-Sensor**

Die Verwendung von GNSS/INS (Global Navigation Satellite System/Inertial Navigation System)–Sensoren zur Positions- und Orientierungsbestimmung ist in der Vergangenheit bereits in Photogrammetrie und Airborne Laserscanning erfolgreich gewesen. Als Plattformen wurden dabei bis vor kurzem ausschließlich bemannte Flugzeuge oder Hubschrauber eingesetzt [ELI-16]. Auf Grund des zu großen Gewichts sind die dabei verwendeten Sensoren für die Positions- und Orientierungsbestimmung leichter Fluggeräte wie Multi-Kopter nicht geeignet. Dazu kommen die hohen Kosten für die inertialen Messeinheiten, die zwischen 10.000-100.000 € betragen können und einen wirtschaftlichen Einsatz sehr schwer machen [ebd.]. Als Meilenstein erwies sich auch in dieser Hinsicht die MEMS-Technologie, die es möglich macht, sehr kleine (Mikro- bis Millimeterbereich) Navigationsensoren zu nutzen, die überdies sehr leicht (Milligramm) und sehr günstig (5-50 €) sind [ELI-16 nach ELS-09]. Auch GNSS-Empfänger haben eine ähnliche Reduktion hinsichtlich Größe, Gewicht und Preis zu verzeichnen. Die Verwendung von MEMS-Chips hat somit einen wesentlichen Anteil an der Entwicklung des UAV-Marktes, da sie eine Stabilisierung des Fluggerätes und eine Reihe von Automatisierungsfunktionen ermöglichen, welche das Fliegen von UAVs deutlich erleichtern. Dennoch treten bei MEMS-Sensoren im Vergleich zu hochwertigen INS oftmals große Instabilitäten und dadurch ein Messrauschen auf, weshalb eine Koppelung mit GNSS-Signalen vor allem bei automatisierten Flügen unerlässlich ist [ebd.].

- **Objekterfassende Sensoren**

Als objekterfassende Sensoren zählen im Allgemeinen Kameras und Laserscanner. Viele UAVs sind vom Hersteller bereits mit einer Kamera ausgestattet; bei einigen Systemen bzw. bei speziellen Anforderungen wird die Kamera vom Nutzer selbst angebracht. Gewicht und Größe der Sensoren sind (wie bei vielen anderen Komponenten auch) dabei der limitierende Faktor [ebd.].

Bei den **Kameras** kann zwischen drei Typen unterschieden werden: *„Kompaktkameras, Spiegelreflexkameras und Systemkameras. Zur Vermessung mit UAVs werden meist Systemkameras eingesetzt. Systemkameras erlauben es, einen Kompromiss zwischen den kleinen und leichten Kompaktkameras und den größeren und schwereren Spiegelreflexkameras einzugehen, da sie im Vergleich zu Spiegelreflexkameras kompakter und leichter handhabbarer sind, gleichzeitig aber auch mit Wechselobjektiven ausgerüstet werden und eine ähnliche Bildqualität aufweisen. Entsprechend der Entwicklung der MEMS Inertialsensoren und GNSS Modulen sind digitale Systemkameras auch erst seit einigen Jahren auf dem Markt erhältlich“* [ELI-16: 18].

Der Einsatz von **Laserscannern** ist gegenwärtig noch sehr selten und wird nur auf Trägerplattformen durchgeführt, die eine deutlich höhere Nutzlast aufweisen als durchschnittliche Multikopter [ebd.]. Aktuelle Entwicklungen zeigen jedoch, dass sich dieser Umstand in den nächsten Jahren ändern wird, da auch Laserscanner immer kleiner und leichter gebaut werden und überdies Vorteile gegenüber Kameras aufweisen. Zu diesen Vorteilen zählen die Möglichkeiten, Vegetation zu durchdringen, Oberflächen mit wenig Textur zu vermessen sowie unter schlechten Lichtverhältnissen arbeiten zu können [ELI-16 nach GAI-15].

- **Luftdrucksensor und Kompass**

Luftdrucksensor und Kompass sind in den meisten Fällen optionale Sensoren, die nicht zwingend notwendig sind, aber die Navigation erleichtern. Der **Luftdrucksensor** misst die Höhe und sorgt für ihre Regelung [BÜC-15]. Bei steigender Höhe nimmt der Luftdruck ab. Auf eine Membran wirkt auf einer Seite ein Referenzdruck und auf der anderen Seite der Luftdruck. Verändert sich letzterer, verformt sich die Membran und ein eingearbeiteter Dehnmessstreifen setzt dies in Spannung um [ebd.]. Der **Kompass** misst den absoluten Winkel in der Gier-Achse und ermittelt die exakte Himmelsrichtung, in der sich das UAV in Bezug auf die Erde befindet. Er sollte möglichst weit weg von der Steuerelektronik eingebaut werden, da diese die Messungen negativ beeinflussen kann, und neigungskompensiert ausgeführt sein, da er sich zusammen mit dem Multikopter neigt [ebd.].

3.3.3 Motoren und Propeller

Momentaner Stand der Technik und erste Wahl bei der Motorisierung sind **Brushless-Motoren**. Durch ihre bürstenlose Konstruktion läuft der Motor ohne Schleifkontakt [URL-8], was ihm den Vorzug gegenüber Bürsten- und Gleichstrommotoren gibt, da er wesentlich verschleißärmer ist und einen höheren Wirkungsgrad aufweist [BÜC-15]. Im Gegensatz zu den Bürstenmotoren erfolgt die zum Drehen nötige Stromumkehr beim Brushless-Motor nicht mit einem mechanischen Kontakt zwischen bewegtem und stillstehendem Teil, sondern elektronisch. Dazu wird eine spezielle Elektronik benötigt: Der **Brushless-Regler** (BL-Regler, siehe *Abbildung 22*), welcher auf die drei Kabel des Motors ein jeweils um 120° versetztes Wechselsignal einspeist. Er regelt die Drehzahl der Motoren durch eine Abstimmung von Frequenz und Amplitude der Wechselspannung [ebd.].

Auf jeden Motor kommt ein **Propeller**. Er erzeugt mithilfe der Luft die Schubkraft, welche für die Bewegung des Multikopters zuständig ist. Bei Multikoptern mit einer geraden Anzahl an Motoren (Quadrokopter, Hexakopter, Oktokopter) dreht sich jeweils die eine Hälfte der Motoren in Uhrzeigersinn und die andere Hälfte gegen den Uhrzeigersinn [URL-8]. Ein Trikotpter basiert allerdings auf einer ungeraden Propellerzahl. In seinem Fall werden meist drei rechtsdrehende Propeller verwendet. Dies bringt den Vorteil, dass auf Grund der geringeren Anzahl an Motoren, Propellern und BL-Reglern eine Preisreduktion erzielt wird. Außerdem gehören rechtsdrehende Propeller im Modellbau zum Standardsortiment und sind dementsprechend in großer Auswahl verfügbar [BÜC-15]. Aller-

dings ist die Regelung eines Trikopfers etwas komplizierter, da die Nick- und Rollachse nicht mehr entkoppelt sind und eine Achse schwenkbar ausgeführt werden muss [ebd.].

3.3.4 Akku

Elektromotoren, wie sie bei Multikoptern zum Einsatz kommen, konnten sich erst durch die Entwicklung leistungsfähiger Akkus durchsetzen. Vor etwa 30 Jahren waren vor allem Nickel-Cadmium- und Nickel-Metallhydrid-Akkus gebräuchlich; seit einigen Jahren werden hauptsächlich **Lithium-Polymer-(LiPo)-Akkus** verwendet, deren Speichervermögen nahezu das Fünffache der älteren Akkumodelle beträgt [BÜC-15]. Der LiPo-Akku weist spezielle Eigenschaften auf: Eine Zelle hat eine Nennspannung von 3,7V. Es werden meistens drei oder vier dieser Zellen in Serie geschaltet, was eine Nennspannung von 11,1V bzw. 14,8V ergibt. Der Akku ist empfindlich auf Tiefentladung, weshalb der Gebrauch von Akkureglern empfohlen wird. Diese „Balancer“ laden die mehrzelligen LiPo-Akkus und sorgen dafür, dass alle Zellen nach dem Laden dieselbe Spannung aufweisen. Die Gefahr der Tiefentladung einer der Zellen ist somit weitgehend gemindert [ebd.]. Wie bei vielen anderen Komponenten ist auch die Wahl des Akkus verbunden mit nutzerspezifischen Wünschen hinsichtlich Leistung, Flugzeit und Gewicht [URL-8].

3.3.5 Fernsteuerung und Empfänger

Die **Fernsteuerung** ist für viele Flugmodellbauer eines der wichtigsten Geräte, da sie auf ihr die Eigenschaften ihres Modells einstellen – im UAV-Bereich geschieht dieser Prozess jedoch in der umgekehrten Reihenfolge. Bei einem Multikopter beinhaltet die Steuerelektronik als wichtigsten Bestandteil einen Mikroprozessor, durch den die gewünschten Parameter per PC-Schnittstelle (USB) heruntergeladen werden können [BÜC-15]. Mit einem sich auf dem PC befindlichen Konfigurationsprogramm können somit nutzerrelevante Einstellungen getroffen werden. Das bedeutet, dass bei der Fernsteuerung keine Spezialfunktionen nötig sind und die gesamte Konfiguration auf dem Modell durchgeführt wird: Anders als bei Modellflug- und Hubschrauberpiloten, welche die Fernsteuerung auf das Modell einstellen, stellt der UAV-Pilot sein Modell auf die Fernsteuerung ein. Parameter wie z.B. Exponentialfunktionen, Hebelwirkungen usw. werden über eine grafische Bedienoberfläche per Mausklick am PC festgelegt und danach über die Schnittstelle heruntergeladen [ebd.]. Modellspeicher sind also für die Steuerung der Multikopter nicht zwingend notwendig – je einfacher die Steuerung zu bedienen ist, desto besser. Nicht selten wird deshalb bereits auf konventionelle Fernsteuerungen mit Kreuzknüppeln verzichtet und stattdessen das Smartphone bevorzugt [ebd.].

Hinsichtlich der Anzahl der erforderlichen **Kanäle** legt sich BÜCHI auf einen Minimalwert von vier Stück fest, welche für Nick, Roll, Gier und Gas zuständig sind (siehe *Abbildung 23*). „Je nachdem, wie viele der [...] zusätzlichen Sensoren man im Flug noch zu- oder wegschalten will, werden noch weitere Kanäle benötigt. Das betrifft also den Luftdruck-

sensor, den Kompass-Sensor oder die GPS-Funktion. Wer Fotoflug mit schwenkbaren Kameras betreibt, benötigt dann noch zusätzliche Kanäle“ [BÜC-15: 27-28]. Die Gesamtanzahl der Kanäle variiert je nach Art der Fernsteuerung und kann mittlerweile bis zu 24 Stück betragen [ebd.].

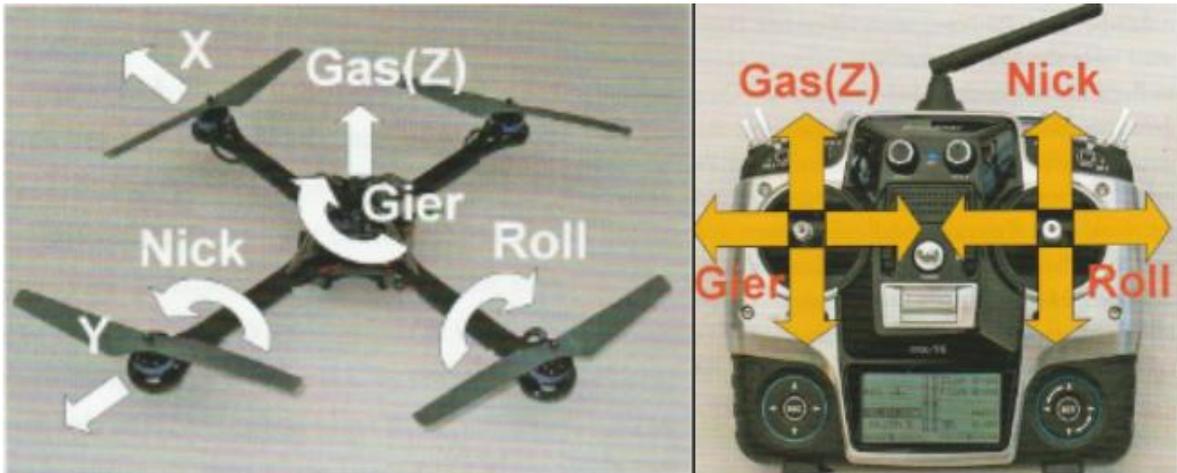


Abbildung 23: Nick, Roll, Gier und Gas am Multikopter und an der Fernsteuerung, Quelle: [BÜC-15: 10], verändert

Um einen sicheren **Empfang** zu gewährleisten, werden meist Stabantennen verwendet. Da sich Multikopter im Flug ständig drehen, ist es mitunter sinnvoll, zwei Antennen zu befestigen. Die Elektronik wertet beide Empfangssignale aus, verstärkt aber nur das bessere der beiden Signale. Um für möglichst viele Orientierungen einen guten Empfang zu erreichen, bietet es sich an, die zwei Antennen senkrecht zueinander zu montieren [ebd.].

3.3.6 Rahmenkonstruktion

Der Rahmen – auch Frame genannt – hält alle anderen Komponenten (Motoren, Steuerungsplatine, BL-Regler, Akku und Empfänger) zusammen [BÜC-15]. Zusätzlich dämpft er Vibrationen, welche die Motoren im Betrieb verursachen, ab. Der Rahmen, der je nach Bauart und Budget aus Carbonfaser, Glasfaser, Aluminium oder Holz bestehen kann, ist im Idealfall so entworfen, dass sich Robustheit und Masse möglichst die Waage halten [URL-8].

BÜCHI unterscheidet je nach Anwendungsgebiet zwischen zwei Rahmentypen: **Crashsicher** oder nur mit **Sollbruchstelle**. Erstere sind vor allem für den Speedflug empfehlenswert und bestehen meist aus Carbon. Sie werden häufig mit einem CAD-Programm entworfen und auf die auszuhaltenden Kräfte simuliert und getestet. *Abbildung 24* zeigt einen crashsicheren Rahmen, bei dem Elektronik und Batterie durch ein Metallgehäuse geschützt sind. Diese Art von Frame ist eher im oberen Preissegment angesiedelt [BÜC-15]. Billigere Rahmen sind weniger crashsicher ausgeführt und verfügen über eine Sollbruchstelle. Diese verhindert, dass im Falle eines Crashes die wesentlich teurere Elektronik oder die

Motoren zu Schaden kommen. Frames dieser Kategorie werden auch „Baumarktrahmen“ genannt, da fast alle für den Zusammenbau benötigten Komponenten im Baumarkt gefunden werden können [ebd.].

Ein weiteres Kriterium, das es zu beachten gilt, ist die Größe des Rahmens, die gleichsam die Gesamtgröße des Multikopters festlegt. Eine wichtige Kennzahl ist dabei der Achsabstand: „Gemeint ist damit der Abstand von zwei sich übers Kreuz gegenüberliegenden Motorwellen. Oftmals hört man die Begriffe: Quadrocopter der 30er, 40er oder 50er, 60er oder 70er Klasse. Die Zahlen bezeichnen dabei den Achsabstand in Zentimetern. [...] Es muss dafür gesorgt sein, dass sich die Propeller frei drehen können. Es ist aber nicht so, dass für eine größere Schweberuhe mit Kameraflügen möglichst große Achsabstände nötig sind. Es sind hauptsächlich die Qualität der Sensormessung, die Motoren und Propeller sowie die Regler-Parameter, welche dies festlegen“ [BÜC-15: 33]. Bei einer Anordnung von mehr als vier Propellern, wie es bei Hexa- oder Oktokoptern der Fall ist, muss besonders darauf geachtet werden, dass die Propeller einen ausreichend großen Abstand zueinander aufweisen.



Abbildung 24: Ein crashsicherer Multikopter-Rahmen, der Elektronik und Batterie in einem Metallgehäuse schützt, Quelle: [BÜC-15: 32]

3.3.7 Sicherheit

Ein letzter Aspekt, den es bei der Konstruktion eines Multikopters zu beachten gilt, ist jener der Sicherheit. Die Propeller dieser Systeme sind so gut wie immer waagrecht angeordnet, was ein beträchtliches Sicherheitsrisiko für Pilot und etwaige Zuschauer aufweist. Aus diesem Grund bedarf es Schutzvorrichtungen wie Ringen aus Styropor oder Kohlefaser, die außen um die Propeller angeordnet sind und den Nutzer durch diese „Polsterung“ vor Verletzungen schützen [BÜC-15].

Eine weitere Schutzkomponente ist der so genannte **Fail Safe** [ebd.]. Auch bei der teuersten und ausgeklügeltsten Fernsteuerung kann es zu Empfangsausfällen, bedingt durch Funkstörungen, kommen. Der Fail Safe sorgt dafür, dass das System nach einem erkannten

Empfangsausfall möglichst sicher selbstständig landen kann. Die Nick-, Roll- und Gier-Achse stellen sich autonom auf die Mittelstellung und die Gasstellung leitet einen Sinkflug ein [ebd.]. Somit können Pilot und Zuschauer von einem plötzlich abstürzenden Multikopter bewahrt werden.

3.3.8 Navigation und Flugsteuerung

Allgemein hat ein Körper im Raum sechs Bewegungsmöglichkeiten. Diese Möglichkeiten werden **Freiheitsgrade** genannt [BÜC-15]. In *Abbildung 23* (links) ist ersichtlich, dass es mit Nick, Roll und Gier drei Winkelfreiheitsgrade und mit x, y und z (Gas) drei Freiheitsgrade der Raumachsen gibt. Mit den in Kapitel 3.3.2 erwähnten Sensoren werden die sechs Freiheitsgrade geregelt: Gyro- und Beschleunigungssensor sowie Kompass und Luftdrucksensor regeln den Multikopter in allen drei Raumwinkeln und in der Höhe. Die verbleibenden beiden Freiheitsgrade x und y werden durch den GNSS-Sensor geregelt und entsprechen dem Längen- und Breitengrad. Prinzipiell könnte GNSS auch Höhenwerte (z) bereitstellen; da diese jedoch im Allgemeinen zu ungenau sind, wird stattdessen der Luftdrucksensor bevorzugt [ebd.]. Bei einem Multikopter, der in allen sechs Freiheitsgraden geregelt ist, erfolgt die Navigation ohne Einwirken des Benutzers; das System fliegt autonom über GPS-Verbindung. Diese Möglichkeit wird vor allem zu Monitoring-Zwecken eingesetzt. In jenen Fällen, wo kein automatisierter Flug gefragt ist, erfolgt die Navigation manuell über Fernsteuerung und Empfänger (siehe Kapitel 3.3.5).

Liegt eine GPS-Verbindung vor, so kann eine gewünschte Route anhand von **Waypoints** (Wegpunkten) festgelegt werden. Streng genommen gilt der Begriff „Waypoint“ nur für die Navigation am Boden; in der Luft wird richtigerweise der aus der Luftfahrt stammende Begriff „Intersection“ verwendet, der zur Definition von An- und Abflugstraßen bzw. allgemein von Luftstraßen dient [ebd.]. Sobald sich der Multikopter in einem bestimmten Radius um den Waypoint/Intersection befindet, wird schon die Richtung des nächsten angepeilt. *Abbildung 25* veranschaulicht dieses Prinzip: Ausgehend von einem Startpunkt (Home) werden nacheinander P1, P2 und P3 abgeflogen, wobei der Richtungswechsel immer dann erfolgt, sobald sich der Multikopter im Toleranz-Radius des anzufliegenden Punktes befindet. Der Pilot kann die gewünschten Punkte selbst anfliegen oder die Waypoint-Route im Vorfeld programmieren. *„Dazu wird der Quadrocopter beispielsweise über die USB-Schnittstelle mit einem PC verbunden. Auf diesem läuft dann eine spezielle Software. Diese überblendet Fotografien der realen Welt mit den Waypoints, welche man am Bildschirm selbst setzen kann [...]. Die konkrete Abflugfolge kann dann ebenfalls durch Verbinden der Punkte festgelegt werden. Per Mausclick kann man diese Punkte inklusive Abflugfolge anschließend auf den Quadrocopter laden“* [BÜC-15: 71]. Zu späteren Auswertungszwecken ist es auch möglich, die abgeflogene Route als so genannten **Track Log** abzuspeichern. Der Track Log hat eine ähnliche Funktion wie der Flugschreiber bei großen Flugmaschinen: durch dessen Betrachten kann der Nutzer mehr über die Flugroute erfahren. Neben den Koordinaten der Waypoints und der Route können Kompassdaten, Höhenangaben des Luftdrucksensors und viele weitere Parameter betrachtet werden [ebd.].

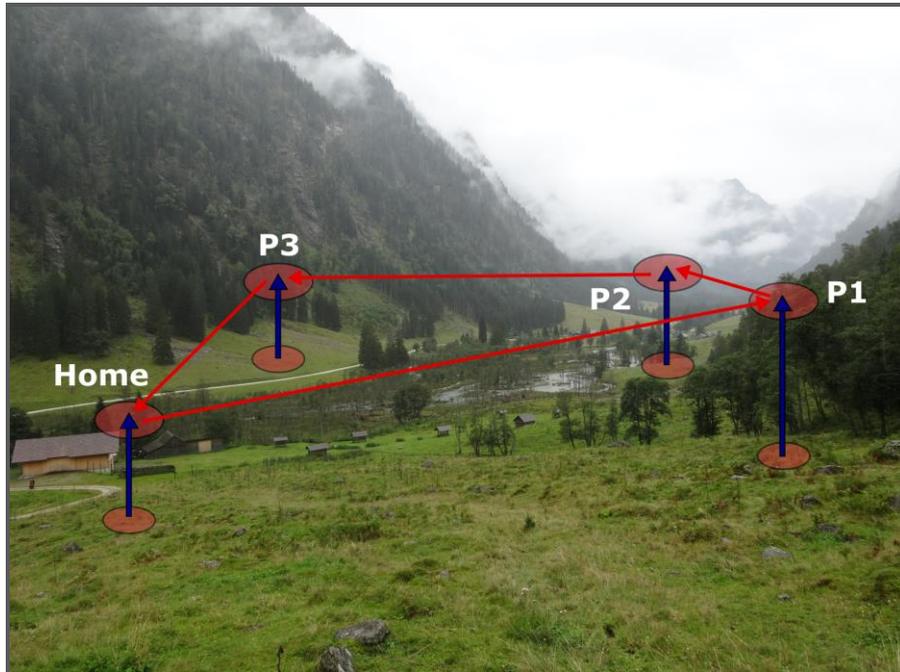


Abbildung 25: Im Vorhinein festgelegte Abfolge von Waypoints, Quelle: [BÜC-15], eigene Bearbeitung

3.4 Der Structure from Motion-Algorithmus und Auswertesoftware

Während sich Kapitel 3.3 mit den wesentlichen Komponenten eines Multikopters, also der „Hardware“ beschäftigt, widmet sich dieses Kapitel vor allem der Auswertung der mit einem UAV gewonnenen Bilder und somit der eigentlichen „UAV-Photogrammetrie“. Ein essenzieller Bestandteil ist der so genannte **Structure from Motion-Algorithmus**, kurz SfM. Er ermöglicht es, aus Digitalfotos eines Objekts oder einer Fläche 3D-Modelle zu erstellen und aus diesen bei Bedarf vollständig entzerrte und georeferenzierte Ansichten (Orthofotos) zu exportieren [HOL-13]. Im Folgenden werden SfM und die generellen Auswertungsschritte näher beschrieben sowie eine Auswahl an SfM-Softwares vorgestellt.

3.4.1 Structure from Motion: Grundprinzip und Funktionsweise

Grundsätzlich basiert Structure from Motion auf denselben Prinzipien wie die stereoskopische Photogrammetrie: aus mehreren sich überlappenden, aus verschiedenen Perspektiven aufgenommenen, zweidimensionalen Bildern ist es möglich, eine dreidimensionale Struktur abzubilden [WES-12]. Allerdings gibt es einen signifikanten Unterschied: Im Gegensatz zur „klassischen“ photogrammetrischen Methode ist weder eine Kalibrierung der Kamera noch eine Bekanntheit der genauen Kamerapositionen zum Zeitpunkt der Aufnahme nötig [REI-13]. Die Bezeichnung „Structure from Motion“ – Struktur aus Bewegung – nimmt Bezug auf das dem Verfahren zugrunde liegende Prinzip: „Durch die Bewegung der Kamera um das Motiv und die sich daraus ergebenden unterschiedlichen Aufnahme-

winkel können die dreidimensionalen Eigenschaften der Szene errechnet werden. Voraussetzung für die Anwendung ist lediglich eine gute Stereoabdeckung des Motivs; jeder Punkt der Szene muss auf mindestens zwei Bildern abgebildet sein, um im fertigen 3D-Modell rekonstruiert werden zu können“ [REI-13: 181]. Die Oberfläche (Struktur) eines Objekts wird somit durch eine Vielzahl von Bildern dargestellt, die während der Bewegung der Kamera entstehen (siehe *Abbildung 26*). Dementsprechend sind Multikopter für dieses Verfahren prädestiniert. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass es gewisse Einschränkungen gibt: Objekte oder Szenen mit reflektierenden oder untexturierten Oberflächen sowie bewegte Objekte können nur schwer abgebildet werden; auch unterschiedliche Sonnenstände oder eine sich verändernde Wolkendecke können negative Konsequenzen auf die Auswertung haben. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, die Bilddaten eines Modells in einem relativ kurzen Zeitraum und bei möglichst diffuser Beleuchtung aufzunehmen [ebd.].

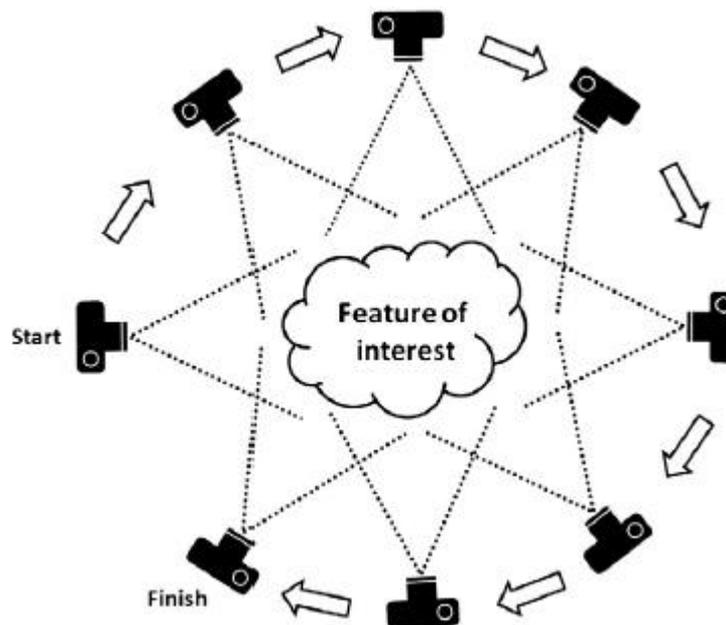


Abbildung 26: Das Structure from Motion-Grundprinzip, Quelle: [WES-12: 301]

Wie bereits einleitend erwähnt, müssen Position und Kameraorientierung bei SfM nicht bekannt sein. Diese Parameter werden simultan durch iterativen Bündelausgleich bestimmt; Voraussetzung ist nur, dass jeweils gleiche Punkte in unterschiedlichen Bildern vorkommen müssen [WES-12]. In der Praxis kann es sich anbieten, Kontrollpunkte zu setzen, die sich von der erfassten (Gelände-)Struktur deutlich abheben.

Im Wesentlichen dient der Structure from Motion-Algorithmus dazu, aus mehreren digitalen Bildern eine dreidimensionale Punktwolke zu generieren, welche wiederum in weiteren Arbeitsschritten verfeinert werden kann (siehe u.a. TLS-Workflow, Kapitel 2.4.3). WESTOBY et al. [WES-12] haben in ihrer Arbeit einen eigenen **SfM-Workflow** entwickelt, der auf Bundler, CMVS und PMVS2 (siehe Kapitel 3.4.2) beruht und sich in insgesamt drei Arbeitsschritte gliedert: Bildaufnahme und Keypoint-Extraktion, Rekonstruktion einer

3D-Szene sowie Postprocessing und Generierung eines Digitalen Höhenmodells. In *Abbildung 27* ist dieser Workflow schematisch dargestellt.

Bildaufnahme und Keypoint-Extraktion

Die wesentliche Aufgabe, mit der sich SfM beschäftigt, ist die Bestimmung der dreidimensionalen Position von in zwei oder mehreren Bildern vorkommenden Punkten. Dazu müssen diese Punkte in einem ersten Schritt ausgemacht werden. Eine in diesem Zusammenhang oft angewandte Methode ist der **SIFT**-(Scale Invariant Feature Transform)-**Algorithmus**. Er identifiziert in jeder Aufnahme Punkte, die invariant gegenüber Bildmaßstab, Bildrotation und Beleuchtungsverhältnissen sind. Diese Punkte werden von WESTOBY et al. als Keypoints bezeichnet und dienen der Verknüpfung der Aufnahme. Die Anzahl der gefundenen Keypoints hängt hauptsächlich von der Oberflächentextur und der Bildauflösung ab; detaillierte, hoch auflösende Texturen liefern in der Regel die meisten Punkte. Für die Qualität der anschließend entstehenden Punktwolke gibt es auch eine Reihe von Einflussfaktoren: *„The density, sharpness, and resolution of the photoset, combined with the range of natural scene textures will [...] determine the quality of the output point cloud data. Similarly, decreasing the distance between the camera and the feature of interest [...] will enhance the spatial density and resolution of the final point cloud“* [WES-12: 302]. Bedingt durch die enorme Variabilität der Aufnahmen hinsichtlich Komplexität, Beleuchtung, Material uvm. kann keine Empfehlung abgegeben werden, wie viele Aufnahmen insgesamt erforderlich sind, um eine den Ansprüchen des Nutzers genügende Punktwolke zu generieren. Zwar werden minimal drei Bilder benötigt, damit SfM überhaupt durchgeführt werden kann, doch WESTOBY et al. empfehlen, so viele Aufnahmen wie möglich in den Verarbeitungsprozess miteinzubeziehen, wobei es natürlich Einschränkungen seitens der Hardware gibt [ebd.].

Rekonstruktion einer 3D-Szene

Nachdem die Keypoints identifiziert wurden, kann nun mit der Erstellung der Punktwolke begonnen werden. Wie bereits erwähnt, nutzen WESTOBY et al. zu diesem Zweck die Software **Bundler**, wobei alternativ natürlich auch andere Softwares (siehe Kapitel 3.4.2) zur Anwendung kommen können. Zur Generierung der Punktwolke werden die Keypoints verschiedener Aufnahmen durch den Nearest-Neighbour- oder RANSAC-Algorithmus (siehe Kapitel 2.4.3) miteinander verglichen. Dabei werden so genannte „Tracks“ erstellt. Diese dienen der Verbindung der einzelnen Aufnahmen; ein Track muss aus mindestens zwei Keypoints und drei Aufnahmen bestehen, damit eine Punktwolke rekonstruiert werden kann. Durch diese Methode können nicht-statische Objekte, die die digitalen Bilder durchkreuzen (z.B. Personen, Verkehrsmittel, Tiere, usw.) erkannt und dementsprechend aus der Punktwolke ausgeschlossen werden. Nachdem dies geschehen ist, wird durch Triangulation die dreidimensionale Szene rekonstruiert, die in einem relativen Koordinatensystem orientiert ist. Der gesamte Prozess von der Extraktion der Keypoints bis hin zur Rekonstruktion der Geometrie des aufgenommenen Objekts verläuft automatisch, was SfM einen deutlichen Vorteil gegenüber traditionellen photogrammetrischen Arbeitstechniken beschert [WES-12].

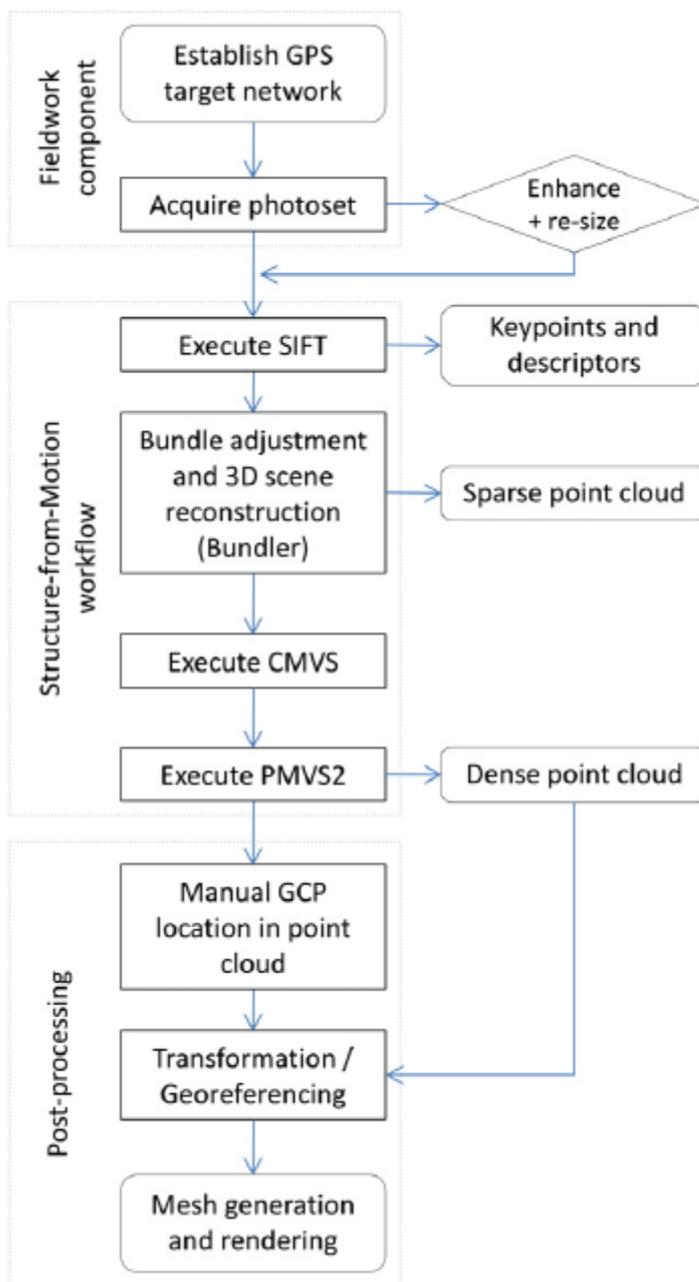


Abbildung 27: Vom digitalen Foto zum digitalen Geländemodell: Der Structure from Motion-Workflow, Quelle: [WES-12: 303]

halb der Punktwolke manuell selektiert werden, bevor die Transformation erfolgen kann. Anschließend kann aus der Punktwolke ein DGM abgeleitet werden, wobei dieses oftmals eine geringere Auflösung hat als die Punktwolke selbst. WESTOBY et al. empfehlen daher, die Punktwolke im Vorfeld zu reduzieren, da die Generierung des DGM eine beachtliche Rechenleistung erfordert [WES-12].

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass der Structure from Motion-Algorithmus ein für zahlreiche Anwendungen geeigneter Prozess ist, der im Prinzip automatisch abläuft und „lediglich“ einer Abschätzung der erforderlichen Datenmenge bedarf.

Es bietet sich an, die mit Bundler erstellte Punktwolke, die vergleichsweise dünn ist (*Sparse Point Cloud*), noch weiter zu verdichten. Zu diesem Zweck kommen u.a. **CMVS** (Clustering View for Multi-view Stereo) und **PMVS2** (Patch-based Multi-view Stereo) zum Einsatz. Diese beiden Algorithmen nutzen die Kamerapositionen von Bundler, um die einzelnen Aufnahmen zu Bild-Clustern zu verarbeiten und daraus eine Punktwolke mit wesentlich höherer Punktdichte (*Dense Point Cloud*) zu generieren.

Postprocessing und Generierung eines Digitalen Höhenmodells

Da dieser Schritt nur noch indirekt mit dem SfM-Workflow zu tun hat bzw. eine mögliche Erweiterung desselben darstellt, soll an dieser Stelle nur noch kurz darauf eingegangen werden. Die im letzten Abschnitt erstellte Dense Point Cloud kann in ein übergeordnetes, globales Koordinatensystem transformiert werden. Zu diesem Zweck müssen einzelne Referenzpunkte innerhalb

3.4.2 Structure from Motion-Softwares

Einen ersten Überblick über Softwarelösungen für die Auswertung von UAV-Bilddaten liefert EISENBEIß [EIS-09]. Seit dieser Zeit hat sich das Angebot in diesem Bereich jedoch stark weiterentwickelt. In einem aktuellen Beitrag aus dem Jahr 2016 beschreibt KERSTEN [KER-16] die gegenwärtig gängigsten SfM-Softwares, die er in fünf Kategorien samt Beispielen gliedert: (1) **open-source Software** (Bundler/PMVS2, Apero/MicMac), (2) **freie Software** (VisualSfM, CPMVS), (3) **Webservices** (Microsoft Photosynth, Autodesk 123D Catch, ARC 3D), (4) **low-cost Software** (Agisoft PhotoScan) und (5) **kommerzielle Software** (Pix4Dmapper, aSPECT, SURE, smart3Dcapture, ERDAS IMAGINE oder Trimble Business Center) [KER-16]. Für jede dieser Kategorien soll nun ein Beispiel näher vorgestellt werden. Die unter Punkt (4) vorgestellte low-cost Software Agisoft PhotoScan wird überdies von der Autorin im Zuge der praktischen Arbeiten am Heidendor von Petronell-Carnuntum (siehe Kapitel 5.4.2) verwendet.

- **Bundler/PMVS2**

Bundler und PMVS2 wurden an der Universität von Washington in Seattle (USA) in den Programmiersprachen C und C++ als frei verfügbare Software entwickelt. Bundler arbeitet als Structure from Motion-System für beliebig angeordnete Bilddaten; die Merkmalsextraktion in den Bildern erfolgt durch den in Kapitel 3.4.1 bereits erwähnten SIFT-Algorithmus. Die Software berechnet für einen beliebigen Bilddatensatz die Kalibrierungsdaten der Kamera, die Bildorientierungen und eine dünn besetzte 3D-Punktwolke der aufgenommenen Szene durch eine modifizierte Bündelblockausgleichung [KER-16]. Die Ergebnisse von Bundler werden in PMVS2 verwendet, um durch das so genannte *Dense Image Matching* eine dichtere Punktwolke aller nicht-bewegten Objekte zu generieren. Dabei erhält jeder Punkt neben der 3D-Koordinate auch die Farbwerte des Objekts aus den Bildern [ebd.]. Bundler/PMVS2 ist das erste Tool, das die komplette SfM-Prozesskette in einem Programm implementiert hatte [URL-9].

- **VisualSfM**

VisualSfM ist eine schnelle, auf Multicore-Berechnungen basierende SfM-Software mit graphischer Benutzeroberfläche, die ebenfalls an der Universität von Washington entwickelt wurde. Sie enthält gegenüber Bundler signifikante Verbesserungen hinsichtlich der Berechnungsgeschwindigkeit, indem sowohl der SIFT-Algorithmus auf dem Grafikprozessor (SIFT-GPU) als auch eine Multicore-Bündelausgleichung integriert wurden [KER-16]. Im Standardfall sind drei aufeinanderfolgende Aktionen durchzuführen, bis der Nutzer als Ergebnis eine dünne Punktwolke erhält [ZIE-14]: Abmessung der Fotos, Matchingverfahren und Korrektur der Kameraverzeichnung. Um eine detaillierte Objektrekonstruktion zu erreichen, kann auch bei VisualSfM eine Kombination mit CMVS/PMVS2 erfolgen, um eine dichtere Punktwolke zu erreichen. Noch bessere Ergebnisse – allerdings mit deutlich längeren Rechenzeiten – liefert das externe Programm CPMVS [ebd.]. Ein Vergleich der beiden Algorithmen ist in *Abbildung 28* ersichtlich.



Abbildung 28: 3D-Modell mit CMVS/PMVS2 (links) und CPMVS (rechts), Quelle: [ZIE-14: 5]

- **Autodesk 123D Catch**

Dieser erstmals 2011 erschienene freie Webservice beruht auf den Grundlagen der kommerziellen Software smart3Dcapture der französischen Firma acute3D. Voraussetzung zur Nutzung der aktuellen Version von Autodesk 123D Catch ist eine Registrierung als Anwender bei Autodesk und eine Installation des Programmes auf dem Computer [KER-16]. Über eine übersichtlich aufgebaute Benutzeroberfläche werden die ausgewählten Bilder auf einen Server übertragen und je nach Komplexität in wenigen Minuten oder einigen Stunden Rechenzeit in ein 3D-Modell umgewandelt. Das fertige Modell kann drei unterschiedliche Qualitätsstufen – Mobile, Standard oder Maximum – aufweisen [ebd.]. ZIEGLER et al. [ZIE-14] beschreiben die Vor- und Nachteile dieses Webservice wie folgt: „Ein Vorteil von 123D-Catch sind die geringen Anforderungen an die Leistung des Anwenders PCs sowie die Tatsache, dass es praktisch keine Einarbeitungszeit erfordert. Da die Daten bereits im Internet liegen, sind sie entsprechend auch andernorts verfügbar. Ein großer Nachteil von 123D-Catch ist der Zwang einer ständigen Online-Verbindung. Selbst wenn man das berechnete Modell auf den Arbeitsrechner geladen hat, ist für dessen Betrachtung mit 123D-Catch eine Internetverbindung erforderlich“ [ZIE-14: 5].

- **Agisoft PhotoScan**

Agisoft PhotoScan ist eine preiswerte 3D-Rekonstruktionssoftware der russischen Firma Agisoft LLC, die genau texturierte 3D-Modelle unter Verwendung digitaler Fotos von Szenen automatisch erstellt. Die Software liefert robuste Bildorientierungen mit und ohne kodierte Zielmarken und ohne spezielle Bildaufnahmebedingungen [KER-16]. Die aktuellen Preise für PhotoScan betragen 179 \$ für die Standardversion und 3.499 \$ für die professionelle Version [URL-10]. Das Programm ist unter Windows-Betriebssystemen ausführbar, was bedeutet, dass alle mit dieser Software erstellten Daten auf dem lokalen PC des Anwenders bleiben. Kersten [KER-16] fasst die Vorteile von PhotoScan wie folgt zusammen: (a) sehr einfacher Workflow mit Option zur Automation durch Batch-Prozessierung, (b) vergleichsweise schnelle Berechnungen mit CPU und GPU, (c) genaue interaktive Bildpunktmessungen von Maßstäben und Passpunkten, sofern man über die Professional Version verfügt, (d) Bildorientierung und Kamerakalibrierung durch Bündel-

blockausgleichung, (e) Modellierung der inneren Orientierung der Kamera(s) durch verschiedene Parameter sowie (f) verschiedene Exportmöglichkeiten der Ergebnisse. Generell erfreut sich Agisoft PhotoScan eines weiten Benutzerkreises und viele wissenschaftliche Arbeiten (u.a. [REI-13], [HOL-13], [KOS-13], [KER-16]) bedienen sich dieser Software. In Kapitel 5.4.2 werden die wichtigsten Arbeitsschritte noch detaillierter beschrieben.

- **Pix4Dmapper**

Pix4Dmapper ist, ähnlich wie Agisoft PhotoScan, eine in sich geschlossene, professionelle und kommerzielle Software für die Bearbeitung von UAV-Bildflugdaten. Die aktuelle Version von der Firma Pix4D, einer Spin-Off-Firma der ETH Lausanne (Schweiz), kostet 6.500 €. Sie generiert automatisch 3D-Punktwolken, digitale Oberflächenmodelle und Geländemodelle, Höhenlinien, georeferenzierte Orthophotos und texturierte vermaschte Modelle in einer Vielzahl von Ausgabeformaten [KER-16]. Zur präzisen Georeferenzierung der Daten können Bildorientierungen, Passpunkte und Geotags eingegeben werden. Es ist sogar möglich, mit dieser Software Vegetationskarten (z.B. NDVI) für landwirtschaftliche Anwendungen zu erstellen [ebd.]. Für Pix4Dmapper existiert eine eigene Support-Seite mit einem Forum für Diskussionsbeiträge; zusätzlich werden für Interessierte freie einstündige Webinars angeboten [URL-11].

3.5 Der typische Messablauf eines UAV-Projekts

Analog zum Workflow eines TLS-Projekts wird nun auch an dieser Stelle versucht, einen typischen Messablauf für ein UAV-Projekt zu skizzieren. Dabei wird sich herausstellen, dass sich einzelne Teilabschnitte der Workflows sehr ähneln; andere wiederum grundverschieden sind. Es muss auch gesagt werden, dass es nicht *die* idealtypische Abfolge von Arbeitsschritten gibt, die um jeden Preis durchlaufen werden muss. Die folgenden Seiten enthalten somit jene Schritte, die bei UAV-Projekten in den meisten Fällen durchgeführt werden, aber durchaus noch durch weitere Möglichkeiten ergänzt werden können, je nachdem, welches Endergebnis vom Nutzer gewünscht ist. Der Übersicht halber ist auch dieses Kapitel wieder in die drei Phasen **Vorbereitung**, **Feldarbeit** und **Auswertung** unterteilt.

3.5.1 Vorbereitung

Die ersten beiden Punkte, die in der Vorbereitungsphase berücksichtigt werden müssen, sind im Wesentlichen dieselben, die es auch im TLS-Messablauf zu beachten gilt. Auch in einem UAV-Projekt kommt es zu Beginn zu einer **Bestimmung der Ziele**, im Zuge derer wesentliche Projektparameter (Auftraggeber, Auftragsdauer, gewünschtes Endprodukt usw.) festgelegt werden.

Anschließend ist der nächste Schritt – analog zum TLS-Projekt – die **Analyse des Aufnahmegebiets**. Allerdings gibt es hier unter Umständen Abweichungen bzw. andere Din-

ge, die bedacht werden müssen: So ist zum Beispiel die Art des Einsatzgebietes zu ermitteln und den UAV-Flug an die dortigen Sicherheitsbeschränkungen (siehe *Abbildung 21*) anzupassen bzw. bei der zulässigen Behörde anzumelden. Ferner ist auch darauf zu achten, dass keine Gefährdung von etwaigen anwesenden Personen besteht. Auch die Wetterverhältnisse (handelt es sich um einen besonders windigen/sonnigen/schattigen Standort?) spielen – auch wenn sie nicht beeinflussbar sind – unter Umständen eine große Rolle. Der Aufnahmezeitpunkt sollte bei möglichst idealen Belichtungsverhältnissen stattfinden.

Für das zu erfassende Objekt (bzw. die Objekte) gelten nahezu dieselben Rahmenbedingungen wie auch im TLS-Workflow: Ein genaues Objektstudium im Vorfeld ist wichtig, um abschätzen zu können, wie viele Aufnahmen in etwa benötigt werden, wie groß die Überlappung der einzelnen Bilder sein soll und in welcher Flughöhe geflogen werden kann. Diese ganzen Aspekte sind in Abhängigkeit von der meist eher geringen Akkulaufzeit des UAVs zu planen. Die Eigenschaften des Objekts (vor allem dessen Größe und Komplexität) sollten bei der Planung auch nicht vernachlässigt werden.

In vielen Fällen kommt es an diesem Punkt zur **Bildflugplanung**, die auch in der klassischen Photogrammetrie und im Bereich des Airborne Laserscanning eingesetzt wird. Die Bildflugplanung ist vor allem dann von großer Bedeutung, wenn die Bilder entlang einer Route in festgelegten Intervallen aufgenommen werden, wenn der Flug überhaupt gänzlich autonom erfolgt oder wenn der Aufnahmebereich sehr groß ist. Gegenwärtig existieren UAV-Bildflugplanungstools für Militär, Robotik und im KI-Bereich, und auch für GIS-Anwendungen gibt es zunehmend neue Möglichkeiten [EIS-09]. Eine Navigation von Punkt zu Punkt ist mittlerweile obligatorisch; zusätzliche Funktionen können integriert werden: *„In general, UAV mission planning software requires some additional functions integrated such as the photogrammetric aerial flight planning tools. For the autonomous flights of UAVs, a start and a home point have to be defined. Based on the start point, the mission is set up relative to its coordinate. Moreover, some packages allow in addition to the way points, the definition of lines, paths, boundaries and no go areas“* [EIS-09: 64]. Flugplanungssoftwares speziell für UAVs ermöglichen somit die Einstellung von Parametern wie Flughöhe, Flugposition, Sichtwinkel, Positionierung von Waypoints uvm. [ebd.].

Der letzte Schritt, der vor der Feldarbeit getätigt werden muss, ist – wie auch im Workflow des terrestrischen Laserscanning – die **Geräteüberprüfung**. Nachdem Multikopter in der Regel um einiges günstiger sind als Laserscanner, hat der Nutzer unter Umständen die Möglichkeit, zwischen mehreren Systemen zu wählen. An diesem Punkt ist somit die Entscheidung zu treffen, welcher Multikopter sich für das konkrete Projekt am besten eignet. Selbiges gilt für die Kamera. Diese kann bereits im UAV integriert sein oder aber extern angebracht werden. Möchte der Anwender mit der Kamera Bildausschnitte aus jeder beliebigen Perspektive fotografieren, so muss diese in alle Richtungen gedreht werden können. Realisiert wird dies durch einen so genannten Gimbal [BÜC-15]. Dieser aus dem Englischen kommende Begriff bezeichnet Halterungen, welche Kameras um mehrere Rotationsachsen drehen können. In jedem Fall ist eine Kalibrierung der Kamera vor und nach jedem Einsatz empfehlenswert (siehe auch [CRA-16]). Zuletzt sollte der Ladungsstatus der Akkus überprüft und der Rest der Ausrüstung zusammengestellt werden.

3.5.2 Feldarbeit

Vor Ort kommt es zunächst zur **Herstellung der Flugbereitschaft**. Der Multikopter wird aufgestellt und zusammengesetzt. Die einzelnen Montageschritte variieren, je nachdem, welches Modell gewählt worden ist. So kann es u.a. sein, dass das UAV in mehreren Schritten zusammengeschaubt werden muss, dass lediglich eine Befestigung der Propeller erforderlich ist, oder dass das Gerät überhaupt bereits zusammengebaut aus einer Schutzvorrichtung entnommen werden kann. Anschließend wird eine Verbindung zwischen Multikopter und Fernsteuerung hergestellt. Ist diese gegeben und besteht eine freie Sichtverbindung, dann kann das UAV gestartet werden.

Ist das Gerät flugbereit, dann wird der UAV-Pilot in einem nächsten Schritt die **Aufnahmeeinstellungen** näher spezifizieren. Diese umfassen sämtliche Parameter, die nicht zuvor schon bei der Bildflugplanung festgelegt wurden bzw. nicht festgelegt werden konnten. Sie sind meist situationsbedingt und vor allem von den herrschenden Belichtungsverhältnissen abhängig. Die besten Ergebnisse werden bei einem UAV-Bildflug unter diffusen Lichtverhältnissen erzielt. Herrscht keine ausreichende Wolkenbedeckung bzw. starke Sonneneinstrahlung, dann müssen die Aufnahmeeinstellungen dementsprechend konfiguriert werden, je nachdem, ob mit oder gegen die Sonne fotografiert wird. Während des Fluges werden diese Parameter unter Umständen je nach Bedarf angepasst. Wurde im Vorfeld keine Bildflugplanung durchgeführt, so können an dieser Stelle auch noch andere Einstellungen (Bildauflösung, Bildintervalle usw.) getroffen werden.

Sobald alle Parameter festgelegt wurden, wird der **UAV-Bildflug** gestartet. Das Objekt wird mit dem Multikopter überflogen bzw. umkreist, während die Kamera entweder automatisch über fixe Intervalle Bilder aufnimmt, oder die Aufnahme manuell ausgelöst wird. Während des Fluges behält der Pilot über ein an der Fernsteuerung befestigtes Display die Übersicht, oder eine zweite Person verfolgt den Flug über ein externes Gerät (z.B. ein Notebook). Die ganze Zeit über sollten Wind- und Belichtungsverhältnisse sowie der Zustand des Akkus im Auge behalten werden. Stehen mehrere Akkus zur Verfügung, werden diese je nach Bedarf gewechselt. Die Aufnahmezeit mittels UAV dauert in der Regel kürzer als mittels terrestrischem Laserscanner, da keine Aufstellungspositionen gewechselt werden müssen und die Fotos schneller erstellt werden können als die einzelnen Scans. Dafür wird die Aufnahmezeit des Multikopters möglicherweise durch die geringere Akkudauer limitiert.

Verfügt der Multikopter über GNSS-Sensoren, so werden Position und Orientierung des Systems bestimmt und es liegt somit eine direkte Georeferenzierung vor. Bei UAVs ohne diese Sensoren wird meist wie auch beim TLS-Workflow die **Etablierung eines Referenzsystems** durchgeführt. Dies kann zum Beispiel über Passpunkte erfolgen, welche entweder markante Punkte im Gelände bzw. am Objekt bezeichnen oder vom Messtrupp selbst erstellt wurden. Im Zuge der Feldarbeit werden die Passpunkte mit Tachymeter oder GPS genau eingemessen, um die aufgenommenen Bilder im weiteren Verlauf des Workflows an ihnen zu referenzieren [BOF-14].

3.5.3 Auswertung

In Kapitel 2.4.3 wurde bereits beschrieben, dass die Auswertung den größten Zeitaufwand in einem Laserscanning-Projekt beansprucht. Auch im UAV-Workflow ist diese Phase die aufwändigste. Viele Arbeitsschritte im Auswertungsprozess beruhen auf denselben Prinzipien, wie sie im TLS-Workflow bereits ausführlich beschrieben wurden. Aus diesem Grund wird die Beschreibung an diesen Stellen etwas kürzer ausfallen; nähere Informationen sind Kapitel 2.4.3 zu entnehmen.

Das Auswertungsschema wird von der Autorin in insgesamt fünf Schritte eingeteilt (siehe *Abbildung 29*) und beruht auf den Erkenntnissen der Arbeiten von EISENBEIB [EIS-09], KERSTEN et al. [KER-12], KERSTEN [KER-16] sowie NEITZEL und KLONOWSKI [NEI-11]. Die Autoren dieser wissenschaftlichen Publikationen verwenden zum Teil unterschiedliche Software-Pakete und haben unterschiedliche Anforderungen an das Endprodukt, weshalb das im Folgenden vorgestellte Schema nicht zu hundert Prozent auf jedes UAV-Projekt passen wird. Es wurde nach bestem Wissen und Gewissen erarbeitet und stellt aus der Sicht der Autorin einen guten Überblick über die wesentlichen Arbeitsschritte dar.

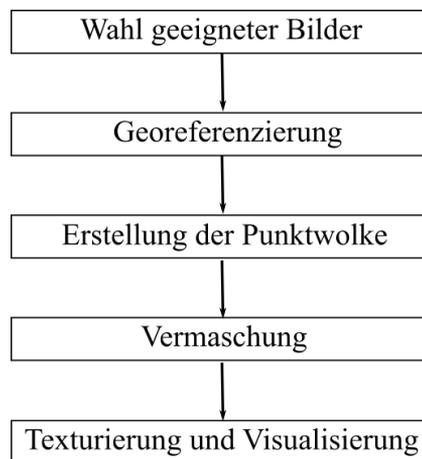


Abbildung 29: Arbeitsschritte im Auswertungsprozess eines UAV-Projekts, Quelle: [EIS-09], [KER-12], [KER-16] und [NEI-11], eigene Bearbeitung

Wahl geeigneter Bilder

Grundsätzlich ist es empfehlenswert, während des Bildfluges so viel Material wie möglich aufzunehmen, um später auf einen großen Datenpool zurückgreifen zu können. Eine große Anzahl von Bildern geht aber automatisch mit einer großen Datenmenge einher, was zum einen ein Problem an das Speichermedium stellen kann, und zum anderen auch enorm lange Rechenzeiten bei der Auswertung verursacht. Deshalb werden in der Regel nicht sämtliche Aufnahmen in die Auswertungssoftware geladen. Die einzelnen Bilder werden zunächst durchgesehen; redundante oder unpassende Fotos finden im weiteren Verlauf keine Anwendung mehr. Wenn erforderlich, werden die Aufnahmen mit Bildbearbeitungsprogrammen wie z.B. Adobe Photoshop überarbeitet. Insgesamt kann es während dieses Pro-

zesses zu einer starken Reduktion der Aufnahmen kommen, bei der unter Umständen nur noch ein Bruchteil aller Fotos weiterverwendet wird [KER-16].

Georeferenzierung

Einen wesentlichen Bestandteil bei der Auswertung von Bildflügen stellt die Georeferenzierung der aufgenommenen Bilder dar, so dass der Bezug zu einem übergeordneten Koordinatensystem erfolgen kann [KLI-16]. Wie auch beim TLS kann zwischen indirekter und direkter Georeferenzierung unterschieden werden: „Bei der ‚indirekten Georeferenzierung‘ geschieht die Schätzung der Orientierung (Position und Rotation) der einzelnen Bilder über im Objektraum befindliche, im Zielkoordinatensystem bekannte Punkte (Passpunkte), die in den Bildern erkennbar sind, und mittels entsprechender photogrammetrischer Methoden (Aerotriangulation, Bündelblockausgleichung). Im Gegensatz dazu werden bei der ‚direkten Georeferenzierung‘ die Orientierungen der Bilder mit Hilfe eines auf dem Fluggerät befindlichen Sensorsystems [...] bestimmt“ [KLI-16: 119]. Im Unterschied zum TLS-Workflow, wo jeder Scanner-Standpunkt zunächst in einem eigenen Referenzsystem liegt, ist eine vorherige Registrierung der Bilder im UAV-Workflow nicht erforderlich.

Bei der direkten Georeferenzierung ist in diesem Zusammenhang die zeitliche Synchronisierung zwischen Kamera und UAV essenziell. Der Multikopter enthält ein Sensorsystem, mit dem die Position und Orientierung der Kamera zu den Auslösemomenten der Bilder bestimmt werden. Die relative Orientierung zwischen Kamera und Sensorsystem muss zudem ebenfalls bekannt sein, um die gemessenen Positionen und Rotationen auf das Projektionszentrum der Kamera übertragen zu können [KLI-16]. Soll die Auswertung komplett ohne Passpunkte mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern erfolgen, sind differentielle GNSS-Sensoren erforderlich. Weitere Informationen zu Sensorsystemen zur direkten Georeferenzierung können der Arbeit von KLINGBEIL et al. [KLI-16] entnommen werden.

Erstellung der Punktwolke

Die ausgewählten und georeferenzierten Bilder werden der Auswertesoftware übergeben, die im nächsten Schritt mit der Erstellung der Punktwolke beginnt. Bei diesem Prozess kommt der bereits in Kapitel 3.4.1 ausführlich beschriebene Structure from Motion-Algorithmus zur Anwendung, durch den zunächst eine dünne Punktwolke generiert wird. Dabei werden mit dem SIFT-Operator oder anderen, ähnlichen Operatoren Merkmale in benachbarten Bildern extrahiert, die anschließend nach Korrespondenzanalyse meistens mit dem RANSAC-Verfahren zugeordnet und eliminiert werden [KER-16]. Dieser Ablauf kann je nach verwendeter Software leichte Variationen aufweisen; allen Softwares gemeinsam ist jedoch die Tatsache, dass die Erstellung der Punktwolke automatisch abläuft. Dieser Arbeitsschritt erfordert die längste Rechenzeit, da hier jede Aufnahme mit allen anderen Aufnahmen abgeglichen werden muss und die Zeit des Rechenprozesses exponentiell zur Anzahl der Bilder steigt [HOL-13]. Um von der dünnen zu einer dichten Punktwolke zu kommen, wird das *Dense Image Matching* (Kapitel 3.4.1) angewendet, wodurch

eine Punktwolke mit einem wesentlich höheren Informationsgehalt entsteht (siehe *Abbildung 30*).

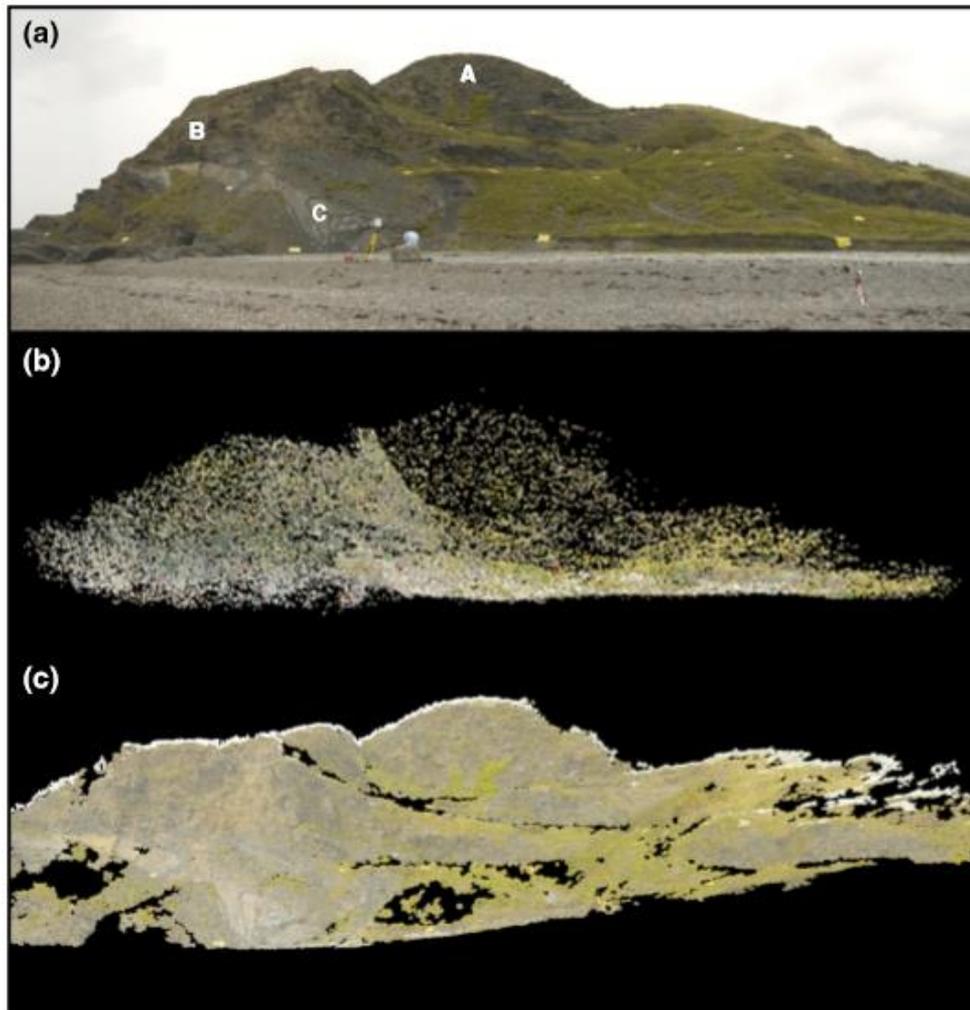


Abbildung 30: (a) aufgenommenes Objekt mit definierten Kontrollpunkten (A, B und C), (b) dünne Punktwolke und (c) dichte Punktwolke, Quelle: [WES-12: 305]

Vermaschung

Im Zuge des TLS-Worflkows kamen die Arbeitsschritte Filterung und Segmentierung, sowie Modellierung und Vermaschung zur Anwendung. Filterung und Segmentierung erfolgen automatisch während der Erstellung der Punktwolke; eine CAD-Modellierung wird im UAV-Bereich an dieser Stelle eher selten angewandt. Übrig bleibt die Vermaschung – ein polygonisiertes 3D-Modell [KER-16], das durch Dreiecke abgebildet wird. Zu diesem Zweck kann der Anwender manuell Parameter wie Auflösung und Genauigkeit definieren, damit das Modell für die weitere Anwendung ausreichend detailliert ist. Dreiecke können hinzugefügt und entfernt werden, wobei darauf geachtet werden sollte, nicht zu viele Elemente zu entfernen, da sonst später im Texturierungsprozess Datenlücken auftreten können [URL-12]. Überdies ist es an dieser Stelle möglich, aus dem vermaschten 3D-Modell Orthophotos abzuleiten [KER-16].

Texturierung und Visualisierung

Die Texturierung des vermaschten 3D-Modells erfolgt durch die im Zuge des Bildflugs erhobenen Aufnahmen. Jedem Dreieck wird die entsprechende Fototextur zugewiesen, wodurch das Modell ein foto-realistisches Aussehen erhält. Auch dieser Schritt wird von der Auswertesoftware automatisch durchgeführt [KER-16]. Auf die manuelle Texturierung, wie sie von STALLMANN und KERSTEN [STA-12] für TLS-Anwendungen beschrieben wird, wird im UAV-Bereich weitestgehend verzichtet.

Nach diesen Schritten ist das durch Multikopter-Bilder erstellte 3D-Modell im Grunde genommen finalisiert. In Visualisierungssoftwares wie z.B. Cinema4D oder Maya kann das fertige Modell weiterbearbeitet, animiert oder in Videosequenzen eingearbeitet werden [KER-16]. Je nach Wünschen des Nutzers bzw. des Auftraggebers ist eine große Bandbreite von weiteren Anwendungen möglich.

Analog zum Abschluss des TLS-Kapitels ist auch an dieser Stelle in *Abbildung 31* der gesamte Messablauf eines UAV-Projekts skizzenhaft zusammengefasst.

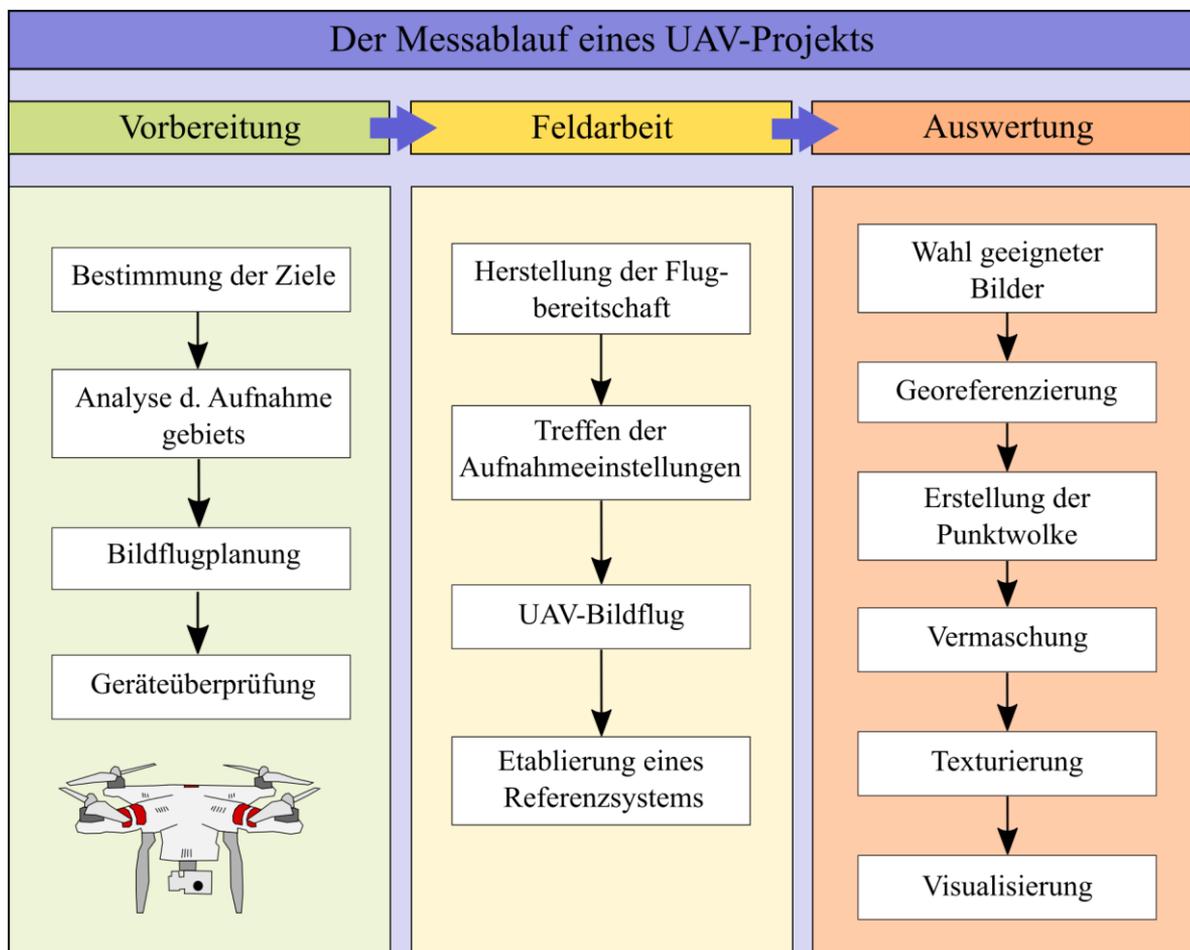


Abbildung 31: Zusammenfassende Darstellung des UAV-Workflows, Quelle: [EIS-09], [KER-12], [KER-16] und [NEI-11], eigene Bearbeitung

4 Die Anwendung von TLS und UAVs in der Archäologie

Die Aufnahme archäologischer Befunde mit großen Unterschieden hinsichtlich Zeitepoche, Fundort und Objektausdehnung war schon immer mit Vermessungstätigkeiten verbunden. Begonnen mit einem einfachen Handaufmaß durch Zollstock oder Maßband und einer dreidimensionalen Vermessung durch Schnurgerüste [CHR-11], bestand die **klassische Messausrüstung** für archäologische Arbeiten bis vor ca. 30 Jahren meist aus einem optisch-mechanischen Theodolit sowie einem Nivelliergerät [PRZ-07]. Die Messwerte wurden abgelesen, im Feldbuch notiert und in analoge Auswerteformulare übertragen. Die Weiterverarbeitung der Daten erfolgte durch Handrechnung (Logarithmentafel, Taschenrechner) oder automatisiert (Großrechner) [ebd.]. Zusätzlich zu den Messdaten wurde eine beschreibende Dokumentation in Form von Feldskizzen, Geländeplänen und Zeichnungen angefertigt.

Die beschreibende Dokumentation ist auch gegenwärtig noch gang und gäbe, wird jedoch durch eine **Vielzahl neuer Messinstrumente** ergänzt, die PRZYBILLA und STAIGER [PRZ-07] in ihrer Arbeit thematisieren: *„Die Vermessungstechnik verfügt [...] heute über wesentlich leistungsfähigere Werkzeuge um archäologische Arbeiten effektiv, kostengünstig und nachhaltig zu unterstützen. Zweifelsfrei stellen vermessungstechnische Produkte einen wichtigen und unverzichtbaren Baustein in einem archäologischen Projekt dar. [...] Aufgrund der umwälzenden Entwicklungen der Elektronik, der Sensorik und der elektronischen Datenverarbeitung allgemein hat sich die geodätische Messtechnik grundlegend gewandelt. [...] Die Datenaufbereitung erfolgt heute ausnahmslos digital, ebenso wie die Auswertung und Analyse. Zur Archivierung und fachlichen Analyse können die Daten in geeignete GIS [Anm: Geographische Informationssysteme] oder Datenbanksysteme transferiert werden“* [PRZ-07: 1-2]. Das digitale Zeitalter hat somit auch in Form von elektronischen Tachymetern, Digitalnivellieren, GNSS-Empfangssystemen und nicht zuletzt in Form von terrestrischen Laserscannern Einzug in die Archäologie erhalten.

Für zahlreiche archäologische Projekte (v.a. Ausgrabungen) ist überdies eine **senkrechte Aufnahme des Untersuchungsgeländes** bzw. –objekts unerlässlich. Bereits in den Jahren 1912/1913 startete der Versuch einer Überfliegung eines Ausgrabungsgeländes im Sudan mit Hilfe eines Drachen als Kameraträger; nur wenige Jahre später kamen Holzgerüste und Leiterstative zur Anwendung [REI-13]. Die Liste der in der Archäologie eingesetzten Lösungsansätze zur Objektaufnahme ist lang: *„Neben technischen Hilfsmitteln vom Boden aus, etwa Feuerwehr-Drehleitern, Hubarbeitsbühnen, Fototürmen oder Teleskopmasten, gab es auch immer wieder Versuche, Grabungen von unbemannten fliegenden Kameraplattformen wie Ballonen, Blimps, Drachen, Helikites oder ferngesteuerten Flugmodellen aus zu dokumentieren“* [REI-13: 177]. Für eine flächenhafte Aufnahme ganzer Landschaften, die auf archäologische Relikte untersucht werden, bietet sich die klassische Luftbildphotogrammetrie (z.B. [DON-13] mit einem Beispiel aus Carnuntum) sowie der Einsatz von Airborne Laserscanning (z.B. [BOF-10] und [GRU-10]) an. Für eine Anwendung im großen Maßstabsbereich sind diese beiden Systeme, die überdies mit einem hohen Kosten-

aufwand verbunden sind, jedoch nur bedingt geeignet. Im Messbereich der so genannten Nahbereichsluftbildfotographie, die auf eine Höhe von 100 Metern begrenzt ist und sich vor allem auf hochauflösende und detailreiche Aufnahmen von Einzelobjekten konzentriert, sind hingegen UAVs bestens aufgehoben [BOF-14].

Der Einsatz von terrestrischem Laserscanning und UAV-Photogrammetrie ist in der modernen Archäologie somit zunehmend verbreitet. Beide Verfahren sind zwar nur für lokale Aufgabenstellungen einsetzbar, zeichnen sich aber gegenüber den etablierten, luftgestützten Verfahren (Airborne Laserscanning bzw. Luftbildphotogrammetrie) durch deutlich geringere Anschaffungs- und Betriebskosten sowie durch eine sehr hohe Flexibilität in der Anwendung aus [FRI-14]. Bei Bedarf ermöglichen sie auch die sehr kurzfristige und wiederholte Aufnahme kleinräumiger Gebiete. Sowohl TLS als auch UAVs eignen sich – insbesondere in Kombination mit GNSS – zum Einsatz in abgelegenen Gebieten, wo fehlende Infrastruktur (Stromversorgung, Internetzugang, Festpunktfeld), schwierige Erreichbarkeit und harsche Umgebungsbedingungen eine rasche Datenerfassung mit robusten Geräten erfordern [ebd.]. Außerdem vermögen sie es, Objekte mit einer komplexen Geometrie zu erfassen, die im Bereich der Archäologie häufig anzutreffen sind und von „herkömmlichen“ Messinstrumenten wie dem Tachymeter oft nur unzureichend gemessen werden können [GRU-10]. Auch hinsichtlich diverser Aufnahmeparameter, der Datenauswertung sowie der Qualität der Daten bieten sich dem Nutzer ausreichend Einflussmöglichkeiten.

Die Anwendung von TLS und UAVs ist somit in vielerlei Hinsicht begünstigt. Durch ihren Einsatz können u.a. folgende **Endprodukte** erstellt werden [PRZ-07 und FRI-14]:

- Digitale Geländemodelle (DGM bzw. DTM)
- Digitale Oberflächenmodelle (DOM bzw. DSM)
- 2D-Pläne und Karten für den archäologischen Gebrauch: Lage, Topographie, Fundstückskartierung, Schadenskartierung, Thematische Karten etc.
- 3D-Modelle (mit Ausrichtung auf das Objekt oder die Topographie)
- Beliebige Horizontal- und Vertikalschnitte
- Videos des archäologischen Geländes und dessen Umgebung
- Virtual Reality (Modelle des ehemaligen Zustands der Objekte)

Um die große Bandbreite an Anwendungen zu demonstrieren, sollen in den folgenden drei Unterkapiteln je zwei Beispiele für den Einsatz von terrestrischem Laserscanning, den Einsatz von UAV-Photogrammetrie sowie einen kombinierten (bzw. vergleichenden) Einsatz beider Systeme in archäologischen Fragestellungen vorgestellt werden. Analog zu PRZYBILLA und STAIGER [PRZ-07] sei auch hier der Begriff **Archäologie als Oberbegriff** für Archäologie, Denkmalpflege, Baugeschichte und Denkmalschutz zu verstehen. Der Autorin war es ein Anliegen, vor allem jene Beispiele zu thematisieren, die in ihrer Herangehensweise und Durchführung eine Ähnlichkeit zu den selbst durchgeführten praktischen Arbeiten in Kapitel 5 aufweisen. Aus diesem Grund sind die folgenden sechs wissenschaftlichen Beispiele durch eine hohe inhaltliche Relevanz gekennzeichnet.

4.1 Beispiele für den Einsatz von terrestrischem Laserscanning

Die beiden wissenschaftlichen Arbeiten, die die Anwendung von terrestrischem Laserscanning im archäologischen Bereich demonstrieren sollen, sind zum einen ein Beitrag zur virtuellen Rekonstruktion des Almaqah-Tempels in Äthiopien [LIN-10] und zum anderen der Einsatz eines Riegl Long Range-Laserscanners zur Erfassung der Pyramiden von Gizeh [NEU-05].

4.1.1 Virtuelle Rekonstruktion des Almaqah-Tempels von Yeha in Äthiopien

In der Arbeit von LINDSTAEDT et al. [LIN-10], erschienen in den Beiträgen der Oldenburger 3D-Tage, wird der äthiopische Almaqah-Tempel von Yeha mit Hilfe eines terrestrischen Laserscanners erfasst. Das Projekt wurde im Jahr 2009 in Zusammenarbeit zwischen dem Deutschen Archäologischen Institut und der HafenCity Universität Hamburg durchgeführt. Durch Anlegung eines geodätischen Netzes, das mittels GPS-Messungen in das UTM-Koordinatensystem eingebunden wurde, konnte eine Basis für die darauffolgenden TLS-Aufnahmen geschaffen werden. Mit Hilfe eines Laserscanners der Firma Zoller+Fröhlich wurde der Tempel aufgenommen und als dreidimensionales Modell dargestellt. Dieses Modell erlaubte zum einen Deformationsmessungen, um die Gefährdung von Besuchern des Tempels durch loses Baumaterial einschätzen zu können, sowie zum anderen eine Rekonstruktion gegenwärtig nicht mehr vorhandener Bestandteile.

Der **Almaqah-Tempel von Yeha** ist in etwa 2700 Jahre alt und befindet sich im Norden Äthiopiens. Seine Abmessungen betragen in etwa 18 x 15 m und die ursprüngliche Höhe betrug ungefähr 14 m. Die Tempelwände sind bis auf wenige Ausnahmen sehr gut erhalten, da die bis zu 3 m langen Steinblöcke glatt und präzise übereinander geschichtet sind. Im Eingangsbereich deutet das dort noch vorhandene Fundament auf ein heute nicht mehr existierendes Propylon (Torbogen) hin, dessen Rekonstruktion durch TLS-Aufnahmen ermöglicht werden soll.

Die **Datenerfassung** erfolgte im Oktober und November 2009 an sechs Messtagen. Für die Aufnahme wurde der terrestrische Laserscanner IMAGER 5006 der Firma Zoller+Fröhlich eingesetzt, der auf Entfernungen bis zu 79 m misst und mit dem Phasenvergleichsverfahren arbeitet. Der Tempel wurde von 58 Standpunkten erfasst, wobei die reine Scanzeit innerhalb der sechs Messtage zwölf Stunden betrug. Um die spätere Texturierung des Modells zu ermöglichen, kamen zusätzlich zwei Kameras (Nikon D40 und Nikon D200) zum Einsatz, die auf dem Scanner bzw. auf einem Nodalpunktadapter montiert wurden. Insgesamt wurde für das Projekt eine Datenmenge von 11,1 GB generiert.

Mit den TLS-Aufnahmen einher ging die **Erstellung eines geodätischen Netzes**: *„In dieser ersten Kampagne wurde als Grundlage ein geodätisches Netz angelegt, um sich in den folgenden Expeditionen auf das identische geodätische Grundlagennetz beziehen zu können. Dafür wurden acht Punkte mit GPS bestimmt, die sich sowohl um das Dorf verteilten*

als auch in Tempelnähe befanden. Dieses Netz wurde tachymetrisch verdichtet, zudem wurde für den Tempel ein spannungsfreies Sondernetz geschaffen, um [...] die höchstmögliche Genauigkeit erreichen zu können. Für jeden Scan wurden im Tempelareal eine ausreichende Anzahl von Zielzeichen gut verteilt signalisiert, so dass immer eine direkte Georeferenzierung der jeweiligen Station erfolgen konnte. Auf diese Weise konnte eine Genauigkeit von 2-3 mm für die Georeferenzierung erreicht werden“ [LIN-10: 52f.].

Das klare Ziel des Projekts war eine Bestandsaufnahme des gegenwärtigen Tempelzustandes, welcher durch ein dreidimensionales Modell vollständig und detailliert visualisiert werden sollte. Durch das Modell sollten in einem weiteren Schritt eine Deformationsmessung sowie die Rekonstruktion des Propylons möglich gemacht werden. Die **Datenauswertung** beruhte somit auf den folgenden drei Schritten:

- **Dreiecksvermaschung**

Mit Hilfe der Software Geomagic Studio erfolgte zunächst die Ausdünnung und Segmentierung der Punktwolke von 300 Mio. auf 12 Mio. Punkte, was im Falle des Tempels einem Punktabstand von 10 mm entsprach. Das Gesamtmodell des Tempels wurde aus fünf Bestandteilen – den vier Fassaden und dem Boden – zusammengesetzt und ist in *Abbildung 32* zu sehen.



Abbildung 32: Ansichten des virtuellen Modells des Almaqah-Tempels, Quelle: [LIN-10: 53]

- **Deformationsmessung der Tempelfassaden**

Der Almaqah-Tempel von Yeha ist für Touristen und Besucher frei zugänglich, doch obwohl eine potenzielle Gefährdung durch herabfallende, lose Steine besteht, sind keine Sicherheitshinweise am Gebäude oder dessen Umgebung angebracht. Um ein mögliches Risiko zu ermitteln und Restaurierungsmaßnahmen in Gang leiten zu können, wurden Deformationsmessungen mit Hilfe der TLS-Daten durchgeführt.

Für diesen Zweck wurden für die einzelnen Tempelfassaden die Abweichungen aus der Senkrechten dokumentiert: „Die senkrechte Wand wurde aus der Punktwolke idealisiert auf den Grundriss rekonstruiert, während die Punktwolke der jeweiligen Fassade trianguliert wurde. Mit beiden Datensätzen wurde ein 3D-Vergleich durchgeführt und ein Diffe-

renzenplot erstellt, in dem farbcodiert die Gefahrenstellen jeder Fassade sofort als Maß erkannt werden können“ [LIN-10: 54]. Die dabei entstehenden Ergebnisse zeigen sowohl gefährliche Überhänge in der Nordfassade des Tempels sowie allgemeine Variationen der Wandstärke.

- **Virtuelle Rekonstruktion des Propylons**

Als langfristiges Ziel ist die Rekonstruktion des gesamten Tempels für touristische Zwecke geplant; im Zuge dieses Beitrags wird aber nur die Erstellung des Propylons (Torbogens) geschildert. Um dessen früheres Aussehen zu ermitteln, waren neben den TLS-Aufnahmen umfassende Untersuchungen und Literaturrecherchen erforderlich. Die eigentliche Rekonstruktion wurde mit Hilfe der Softwares LupoScan und AutoCAD durchgeführt. In LupoScan wurden die einzelnen Scans der Tempelfassaden vektorisiert und Spot-Bilder berechnet, die den Auftreffwinkel des Laserspots auf der Oberfläche darstellen und somit für eine plastischere Darstellung sorgen. Anschließend wurden die Vektordaten nach AutoCAD transferiert, wo die Rekonstruktionszeichnungen des Propylons erfolgten, das in *Abbildung 33* dargestellt ist.

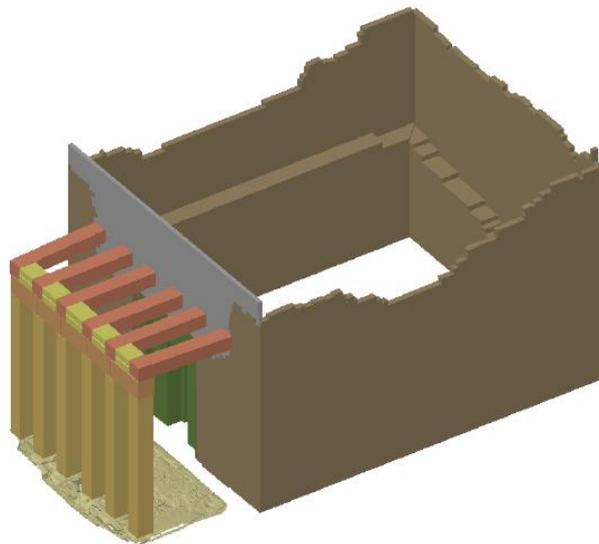


Abbildung 33: Almaqah-Tempel in AutoCAD mit rekonstruiertem Propylon, Quelle: [LIN-10: 55]

Das fertige Modell des Almaqah-Tempels kann somit sowohl für geplante Restaurierungsarbeiten und zukünftige Messaufgaben als auch für touristische Anschauungszwecke genutzt werden.

4.1.2 Scanning the Pyramids: TLS-Einsatz bei den Pyramiden von Gizeh

Ebenfalls in Afrika, diesmal allerdings in Ägypten, ist das zweite Beispiel für TLS-Einsatz in der Archäologie angesiedelt. Der wissenschaftliche Artikel wurde von NEUBAUER et al. [NEU-05] verfasst und findet auch im Buch „*Airborne and Terrestrial Laserscanning*“ im

Kapitel „*Cultural Heritage Applications*“ von GRUSSENMEYER und HANKE [GRU-10] Erwähnung. Das im Jahr 2004 durchgeführte „*Scanning of the Pyramids Project*“ erfolgte in Zusammenarbeit des Österreichischen Archäologischen Instituts (Zweigstelle Kairo), des Vienna Institute for Archaeological Sciences und des Egyptian Supreme Council of Antiquities. Um das Weltkulturerbe der Pyramiden von Gizeh zu dokumentieren, wurde eine Kombination eines Long Range-Laserscanners der Firma Riegl und einer auf dem Scanner adaptierten Digitalkamera eingesetzt. Die zu diesem Zeitpunkt noch verhältnismäßig neue Technologie des terrestrischen Laserscanning sollte auf ihre Eignung in archäologischen Fragestellungen geprüft werden, wobei der Schwerpunkt auf der dreidimensionalen Modellierung von lange bestehenden Monumenten („*standing monuments*“) für Dokumentation und Monitoring lag. Mit der Cheops-Pyramide sowie der Sphinx von Gizeh als Untersuchungsobjekten wurden insgesamt **drei Hauptziele** verfolgt:

- Erstellung eines Digitalen Geländemodells (DGM) des Gizeh-Plateaus
- Erstellung eines dreidimensionalen Modells der Cheops-Pyramide und ihrer Umgebung sowie
- Erstellung eines dreidimensionalen Modells der Sphinx von Gizeh

Für dieses Projekt wurde der terrestrische Long Range-Laserscanner LMS Z420i der Firma Riegl genutzt, der mit einer kalibrierten, am Scannerkopf angebrachten Nikon D100 Digitalkamera kombiniert wurde. Die Datenerfassung sowie die Sensor-Konfiguration und die Datenverarbeitung erfolgten mit der Software RiSCAN Pro, die auf einem externen Laptop installiert war, wodurch die aufgenommenen Daten direkt im Feld betrachtet werden konnten. Laserscanner und Digitalkamera waren überdies mit einer am Scannergerüst befestigten WLAN-Box verbunden (siehe *Abbildung 34*). Der LMS Z420i ermöglicht eine Messung über Entfernungen bis zu einem Kilometer und verfügt über ein weites Gesichtsfeld von 80 x 360°.



Abbildung 34: Der Riegl LMS Z420i mit kalibrierter Nikon D100 Digitalkamera und WLAN-Box vor der Cheops-Pyramide, Quelle: [NEU-05: 471]

Vor der eigentlichen **Datenerfassung** wurde zunächst eine große Anzahl von Zielmarken (*tiepoints*) im Untersuchungsgebiet bzw. auf den Untersuchungsobjekten angebracht, die größtenteils mit einer Totalstation eingemessen wurden und später für eine einfache Verknüpfung der einzelnen Scans sorgen sollten. Insgesamt standen für das Projekt fünf Mess-tage zur Verfügung, während derer 100 Millionen Punkte sowie knapp 1000 Bilder aufgenommen wurden.

Die **Cheops-Pyramide** wurde von neun Standpunkten erfasst. Neben einem Modell der Pyramide sollte auch ein DGM des Gizeh-Plateaus entstehen, das einen Radius von ca. 1,3 km mit der Pyramide im Zentrum umfassen würde. Die ersten vier Aufstellungen wurden auf der Spitze der Cheops-Pyramide durchgeführt; die anderen fünf Standpunkte befanden sich im Norden, Nordosten, Osten, Süden und Westen des Monuments. Auch die in der Nähe befindliche Chepren-Pyramide wurde vom Laserscanner erfasst; auf Grund der Tatsache, dass ein Großteil der Zielmarken über Nacht von Sicherheitskräften entfernt wurde, konnte in diesem Fall allerdings nur die Nord- und Ostfront des Gebäudes gescannt werden. *Abbildung 35* zeigt eine eingefärbte Punktwolke der Cheops-Pyramide in einer 2D und 3D-Ansicht.



Abbildung 35: Ein eingefärbter Scan der Cheops-Pyramide in RiSCAN Pro in einer 2D- (oben) und 3D-Ansicht (unten), Quelle: [NEU-05: 472]

Die **Sphinx von Gizeh** wurde zunächst von der Spitze der rund 570 m entfernten Cheops-Pyramide erfasst, um Daten der ansonsten nicht sichtbaren Rückseite des Monuments zu bekommen. Die weiteren sechs Standpunkte befanden sich um die Sphinx herum, wobei auch hier insgesamt 20 Zielmarken für die spätere Verknüpfung der Scans angebracht wurden. Da die Arbeitszeit von den vor Ort befindlichen Aufsichtspersonen auf fünf Stunden limitiert war, wurde der Laserscanner mit einer speziellen Vorrichtung transportiert, um Zeit zu gewinnen. Nach abgeschlossener Datenerfassung erfolgte eine grobe Triangulierung der Daten bereits im Feld mittels RiSCAN Pro. Dieser Schritt diente vor allem einer ersten Abschätzung der Datenqualität.

Im Zuge der **Datenauswertung** wurde zunächst mit der Erzeugung des Digitalen Geländemodells des Gizeh-Plateaus begonnen. Dazu wurde zu Beginn ein Resampling der Punktwolke in Zellen mit einer Größe von jeweils 0,5 x 0,5 m durchgeführt. Anschließend wurden die Daten in das ASCII-Format umgewandelt und in ArcGIS importiert, um das DGM zu erstellen: „For the determination of the height value of each cell the lowest Z-values were selected. Using the functionality of 3D-Analyst the point cloud was triangulated into the external TIN-format of ArcGIS. For future processing we plan to extract breaklines from the point cloud using the photographic record to be added in the triangulation process to enhance the DTM“ [NEU-05: 474]. Das fertige Modell fiel den Wünschen der Autoren entsprechend sehr detailliert aus und zeigte u.a. Anomalien auf den Seiten der Pyramide, wo korrodierte Rillen im Gestein gefunden werden konnten.

Für die Erstellung der dreidimensionalen Modelle von Cheops-Pyramide und Sphinx war zunächst eine Filterung der Punktwolken notwendig, die sich am geforderten Level of Detail (10 cm) richten sollte. Anschließend erfolgte die Triangulation. Hier wurde zunächst jeder Scan extra mit einer 2D-Triangulation bearbeitet, bevor die einzelnen Meshes zu einer großen Gesamtdatei zusammengefügt wurden. Für die Texturierung wurden die mit der Digitalkamera aufgenommenen Fotos verwendet. Das Endergebnis der triangulierten und texturierten Sphinx ist in *Abbildung 36* zu sehen.



Abbildung 36: Das triangulierte Modell der Sphinx von Gizeh, texturiert mit RiSCAN Pro, Quelle: [NEU-05: 475]

4.2 Beispiele für den Einsatz von UAV-Photogrammetrie

Für eine Demonstration der vielfältigen Einsatzgebiete von UAVs wurde zum einen ein Beitrag aus dem DVW-Seminar „UAV 2016“ ausgewählt, der die Massenberechnung von Haufwerken mittels Multikopter schildert [FIS-16], und zum anderen ein praktisches Beispiel aus der Doktorarbeit von EISENBEIß [EIS-09], in welchem ein UAV in Kombination mit terrestrischer Photogrammetrie für die Rekonstruktion der Burg Landenberg in der Schweiz eingesetzt wird.

4.2.1 Befliegung und Auswertung von Haufwerken mittels LowCost-UAV

Dieses Beispiel ist streng genommen weniger auf die Archäologie ausgerichtet als vielmehr auf die Bauvermessung. FISCHER [FIS-16] beschreibt den Einsatz von UAVs bei der Vermessung von Haufwerken (Schüttgüter), um deren Masse zu ermitteln. Haufwerke fallen bei den verschiedensten Bautätigkeiten an und bezeichnen im Wesentlichen festes, unförmig aufeinander geschichtetes Material. Auf Grund der oft schwierigen und unsicheren Begehbarkeit ist meistens keine Vermessung mittels Tachymeter oder terrestrischem Laserscanner möglich; außerdem kann in einigen Fällen auch der Arbeitsschutz die Begehung dieser Stätten verbieten. Eine Überfliegung mit UAVs bietet sich deshalb für die Massenberechnung der Haufwerke an. Aus Sicht der Autorin scheint dieser Beitrag deshalb als erwähnenswert, weil sich das Prinzip auch auf archäologische Ausgrabungen anwenden ließe und der Arbeitsablauf dieses Artikels demselben Schema folgt, das auch im Praxisbeispiel dieser Masterarbeit (siehe Kapitel 5) geschildert wird.

FISCHER verwendet für die Befliegung der Haufwerke neben vermessungstechnischen Geräten, die für die Bestimmung der Passpunkte notwendig sind, eine **DJI Phantom II Vision**, die er als „Standard (LowCost)-UAV“ bezeichnet. Für die Auswertung wird die Software Agisoft PhotoScan genutzt. Um die Eignung von Multikoptern im Vergleich mit anderen Messinstrumenten testen zu können, werden als Messobjekte zwei Haufwerke gewählt, die zum Teil auch gescannt bzw. begangen werden können. Dabei handelt es sich um Schütthaufen aus geschreddertem Abbruchmaterial (im Beitrag als Beispiel 1 bezeichnet) und Erdmieten (Beispiel 2), die in *Abbildung 37* zu erkennen sind.

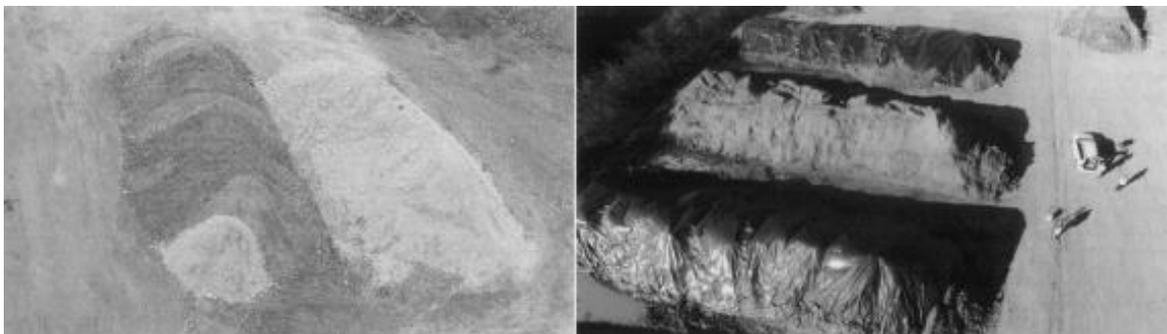


Abbildung 37: Test-Haufwerke: Beispiel 1 (links) und Beispiel 2 (rechts), Quelle: [FIS-16], verändert

Der Ablauf der Arbeiten wurde vom Autor in mehrere Arbeitsschritte aufgeteilt, die nun im Folgenden vorgestellt werden sollen:

- *Bestimmung der Passpunkte:* Bei diesem Projekt fungierten CDs als Passpunkte. Insgesamt 20 Stück wurden über die Haufwerke verteilt und tachymetrisch eingemessen.
- *Klassische Vermessung der Haufwerke:* Die klassische Vermessung bestand aus einer tachymetrischen Messung der Verschneidungslinien (Beispiel 1) und der Fußpunkte (beide Beispiele) sowie einer Erfassung der gesamten Haufwerke mit einer Trimble VX Spatial Station zu anschließenden Vergleichszwecken.
- *Befliegung:* Da es sich um einen sehr kleinflächigen Messbereich handelte (ca. 0,5 – 1 Hektar) und auch keine passende Software zur Verfügung stand, wurde auf eine vorhergehende Flugplanung verzichtet. Während der Überfliegung der Haufwerke wurden die meisten Bilder manuell ausgelöst, wobei darauf geachtet wurde, eine Überlappung von 70-80% einzuhalten.
- *Auswertung der Befliegung:* Die UAV-Aufnahmen wurden zuerst in der Software Adobe Lightroom entzerrt, bevor sie gemeinsam mit einer Datei, die die Koordinaten der Passpunkte enthielt, in Agisoft importiert wurde. Anschließend wurde das Auswerteschema der Software durchgeführt: *„Die Software richtet in einem ersten Schritt die Bilder grob aus. In den Bildern werden die Passpunkte manuell markiert und zugeordnet. [...] Unnötige Bilder wurden händisch entfernt. Danach erfolgt softwareseitig die Feinausrichtung. Nach Kontrolle der erzeugten Parameter erfolgt die Erzeugung der Punktwolke. [...] In Agisoft wird dann ein Mesh generiert und texturiert“* [FIS-16: 232].

Am Ende der Auswertung wurden die fertigen Dateien als 3D-PDF exportiert. *Abbildung 38* zeigt das Endergebnis der befliegenen Erdmieten aus Beispiel 2.



Abbildung 38: 3D-PDF des zweiten Haufwerks, Quelle: [FIS: 233]

Um die Messergebnisse miteinander zu vergleichen, wurden sowohl aus den klassisch erfassten Koordinaten als auch aus den mittels UAV aufgenommenen Koordinaten Geländemodelle erzeugt und deren Masse berechnet. Für **Beispiel 1** (Schütthaufen aus geschreddertem Abbruchmaterial) ergaben sich bei einem Volumen von 600m³ Abweichungen von 3%, wobei die Qualität des tachymetrisch vermessenen Geländemodells vor allem bei den Verschneidungslinien besser war. Im Bereich der Hauptflächen gab es jedoch kaum Unterschiede. Für **Beispiel 2** (Erdmieten), das ein ähnliches Volumen aufwies, betrug die Abweichung zwischen beiden Modellen weniger als 2%, wodurch in diesem Fall beide Erfassungsmethoden als gleichwertig bezeichnet wurden.

FISCHER schließt mit dem Fazit, dass sich UAVs gut für Anwendungen in der Bauvermessung eignen, da die Befliegungsdaten vergleichsweise schnell und einfach ausgewertet werden können. Die Ergebnisse seien allerdings von sehr vielen Faktoren abhängig: „Die wichtigsten Punkte sind die Qualität der Kamera, der Kontrast des zu messenden Objekts sowie die Lichtverhältnisse. [...] Auch zeigt sich, dass nicht beeinflussbare Faktoren wie das Wetter nicht durch noch so gute Technik ausgeglichen werden können“ [FIS-16: 234].

4.2.2 Ein dreidimensionales Modell von Burg Landenberg (Schweiz)

Die Erschaffung eines digitalen, fotorealistischen Modells der Burg Landenberg im Schweizer Kanton Obwalden ist eines jener praktischen Projekte, die EISENBEIß [EIS-09] in seiner Dissertation „UAV Photogrammetry“ vorstellt. Ursprünglich von einem Studenten als Bachelorarbeit konzipiert, die darauf ausgelegt war, das Gebäude terrestrisch zu fotografieren (siehe [PUE-08]), wurde das Projekt von EISENBEIß um den Einsatz eines UAVs ausgeweitet und das Thema weiter vertieft. Dies lag vor allem daran, dass einige Bereiche des Objekts (u.a. das Dach, die Fassade sowie einige Vorsprünge) nicht vollständig sichtbar waren und daher einer Befliegung bedurften.

Burg Landenberg liegt in Sarnen, der Hauptstadt des Kantons Obwalden, und ist ein bedeutendes Relikt aus dem Mittelalter. Die Burg wurde im 13. Jh. unter der Regentschaft Rudolfs von Habsburg errichtet. Gegenwärtig sind noch zwei Gebäude verblieben und nahezu unbeschädigt; eines davon ist das so genannte Schützenhaus, das Gegenstand des Projekts ist. Das Schützenhaus ist das offizielle Symbol des Kantons und wird vor allem für kulturelle Veranstaltungen genutzt.

Die Erfassung des Gebäudes wurde im Jahr 2007 durchgeführt. Im Zuge der **Feldarbeit** wurde ein Bildmaßstab von 1:3000 definiert, was einer Auflösung am Objekt von ca. einem Zentimeter entspricht. Sowohl für die terrestrischen Aufnahmen als auch für den UAV-Bildflug wurde eine Nikon D2X-Digitalkamera verwendet. Für den Bildflug wurde ein namentlich nicht näher spezifizierter Modell-Helikopter der ETH Zürich genutzt, der von der französischen Firma Survey-Copter hergestellt wurde. Er verfügt über integrierte GNSS- und INS-Sensoren sowie über ein Magnetometer und ein Barometer. Überdies kann der Anwender zwischen manueller Steuerung und autonomem Flugmodus wählen, wobei letzteres über das wePilot 1000-System realisiert wird.

Die praktischen Arbeiten sind im Wesentlichen in zwei Teilbereiche gegliedert:

- **Terrestrische Aufnahmen**

Die Erfassung des Schützenhauses vom Boden aus erfolgte von unterschiedlichen Standorten um das Gebäude herum, wobei stets eine Entfernung von 20 bis 25 m eingehalten wurde. Dieselben Aufnahmen wurden an zwei unterschiedlichen Tagen durchgeführt – einmal unter nebligen Bedingungen und einmal während wolkenlosem Himmel und Sonnenschein. Es zeigte sich, dass am zweiten Tag einige Details, die im Schatten lagen, nicht ausgemacht werden konnten, und dass die optimale Belichtungszeit nur schwer festzulegen war. Der Autor zog für die Datenauswertung somit jene Aufnahmen heran, die unter nebligen Wetterbedingungen erzeugt wurden.

- **UAV-Bildflug**

Im Gegensatz zu dem in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Beispiel, wo Haufwerke mittels Multi-Kopter ohne Vorarbeit manuell vermessen wurden, wurde im Falle von Burg Landenberg im Vorfeld eine Bildflugplanung durchgeführt. In der Planungssoftware weGCS wurden Waypoints erstellt und der gesamte Flug wurde zunächst am PC simuliert, bevor die Aufnahme im Feld beginnen konnte.

Die UAV-Aufnahmen wurden in zwei Phasen gegliedert: Zuerst wurde in einem Kreis um das Schützenhaus geflogen, wobei die Kamera auf einen Zenitwinkel von 70° eingestellt war. Sicherheitshalber wurde der Kreisflug ein zweites Mal wiederholt. In der zweiten Phase wurde nur die Frontfassade des Gebäudes in Form eines einzelnen Flugstreifens aufgenommen (siehe *Abbildung 39*). Die Flughöhe betrug in beiden Fällen rund 30 m.



Abbildung 39: In zwei Phasen durchgeführter UAV-Bildflug: Einmal kreisförmig um das gesamte Gebäude und einmal lineare Aufnahme der Frontfassade, Quelle: [PUE-08: 95]

Start und Landung des Modell-Helikopters erfolgten manuell. Sobald sich das UAV in der Luft befand, wurde die Steuerung vom wePilot-System übernommen.

Für die terrestrischen Aufnahmen wurden einige Stunden benötigt; der UAV-Bildflug beanspruchte hingegen nur wenige Minuten. Bei letzterem sind allerdings vorbereitende Maßnahmen im Sinne der Flugplanung zu berücksichtigen.

Bevor Burg Landenberg modelliert werden konnte, war es zunächst notwendig, das aufgenommene Bildmaterial zu sichten und unpassende Bilder zu entfernen. In die **Datenauswertung** flossen letztendlich 18 Bilder aus terrestrischen Aufnahmen und 17 UAV-Bilder ein.

In der Software PhotoModeler wurde die relative Orientierung der Bilder durchgeführt. Der daraus resultierende RMS (Residual Mean Square)-Fehler betrug 0,99 Pixel, was vom Autor als positiv bewertet wurde. Die weitere Datenauswertung des Schützenhauses, die in [PUE-08] etwas genauer beschrieben wird, erfolgte ebenfalls mit PhotoModeler, wobei u.a. eine NURBS-Modellierung angewandt wurde, um die Oberflächen des Gebäudes zu glätten. Im Anschluss an die Modellierung geschah die absolute Orientierung in das Schweizer Koordinatensystem LV03, wobei mit insgesamt 12 Passpunkten eine Genauigkeit von 2,5 cm erreicht werden konnte. Zu guter Letzt wurde das Objekt mit den aufgenommenen Bilddaten in der Software Blender texturiert und in das VRML-Format exportiert, wodurch die Betrachtung in beliebigen VRML-Viewern ermöglicht wurde. *Abbildung 40* zeigt das fertig texturierte Modell des Schützenhauses der Burg Landenberg, das nun vielseitig genutzt werden kann: „*The generated model can now serve as a high quality digital representation of Castle Landenberg. On the one hand it is suitable for presentation and visualization purposes, e.g. to promote the site in terms of tourism, while on the other hand it represents an important digital preservation of the castle which allows the user to perform measurements on the model or derive façade plans*“ [EIS-09: 140]. Durch eine Kombination aus terrestrischer und UAV-Photogrammetrie konnte somit ein fotorealistisches Modell eines mittelalterlichen Gebäudes rekonstruiert werden.



Abbildung 40: Das fertig texturierte Modell des Schützenhauses der Burg Landenberg, Quelle: [EIS-09: 140]

4.3 Beispiele für den kombinierten Einsatz von TLS und UAVs

Die letzten Seiten haben gezeigt, dass terrestrische Laserscanner und UAVs mittlerweile seit einigen Jahren in vielerlei Ausprägung für die Vermessung archäologischer Stätten und Objekte genutzt werden. Über eine kombinierte bzw. vergleichende Nutzung wurde bisher noch wenig berichtet. Zu diesem Zweck stellt die Autorin im Folgenden zwei Arbeiten vor, die sich mit eben jenem Aspekt beschäftigen. Aus dem DVW-Seminar „*TLS 2014*“ stammt eine vergleichende Untersuchung zu archäologischen Fundstätten in Peru [FRI-14] und KOSKA und KRĚMEN [KOS-13] kombinieren Laserscanner-Daten und Structure from Motion zur Erstellung von Orthophotos einer tschechischen Barockkirche.

4.3.1 Dokumentation archäologischer Fundstätten in Peru durch TLS und UAV

FRIEDLI et al. [FRI-14] wenden in ihrem Projekt sowohl einen terrestrischen Laserscanner als auch UAV-Photogrammetrie an, um Geländeaufnahmen an zwei abgelegenen archäologischen Stätten in den peruanischen Anden durchzuführen. Nach Meinung der Autoren zeichnen sich beide Systeme durch ihre hohe Flexibilität und ihren – im Vergleich zu Airborne Laserscanning und Luftbildphotogrammetrie – geringen Anschaffungspreis aus. Die im Rahmen des Forschungsprojekts „Anden-Transect“ des Deutschen Archäologischen Instituts (DAI) im Jahr 2011 vollzogene Untersuchung hatte das **Ziel**, digitale Gelände- und Oberflächenmodelle der Fundstätten Santa Maria und Cutamalla zu erstellen. Diese Modelle wurden einem Qualitätsvergleich hinsichtlich Genauigkeit, Auflösung und Vollständigkeit unterzogen und auch ökonomische sowie praktische Faktoren im allgemeinen Arbeitsablauf wurden berücksichtigt.

Das Untersuchungsgebiet **Santa Maria** erstreckt sich über einen Bereich von etwa 20 ha und liegt in einem Hochgebirgstal rund 2800 m über dem Meeresspiegel. Es ist durch Terrassen strukturiert, enthält Überreste antiker Gebäude und ist mit eher spärlicher Vegetation (Gras, Gebüsch, Kakteen) bedeckt. **Cutamalla**, das zweite Untersuchungsgebiet, liegt auf einem Bergkamm in 3300 m Seehöhe und ist mit 40 ha deutlich größer als Santa Maria. Auch hier dominieren kleinere Büsche das Vegetationsbild; auf den stark erodierten Terrassen sind ebenfalls alte Gebäude zu finden. Die Lage der Untersuchungsgebiete ist auf *Abbildung 41* zu sehen.

Die eingesetzten **Sensoren** umfassten zwei Falcon 8 UAVs der Firma Ascending Technologies sowie den terrestrischen Laserscanner VZ-1000 der Firma Riegl. Bei den UAVs handelt es sich um Multi-Rotor-Systeme, die mit einer Sony NEX5-Kamera ausgestattet sind und pro Akku rund sieben Minuten in der Luft bleiben können. Für das Projekt wurde ein vollautomatischer Aufnahmemodus gewählt, der eine Flugplanung im Vorfeld erforderte. Der Laserscanner VZ-1000 misst bis zu 1400 m Entfernung und arbeitet nach dem Full-Waveform-Prinzip. Ein Neigungssensor, ein digitaler Kompass sowie ein GPS-Empfänger sind im Scanner integriert; für die spätere Einfärbung der Punktwolke wurde außerdem eine Kamera des Typs Nikon D700 auf dem Scanner montiert.

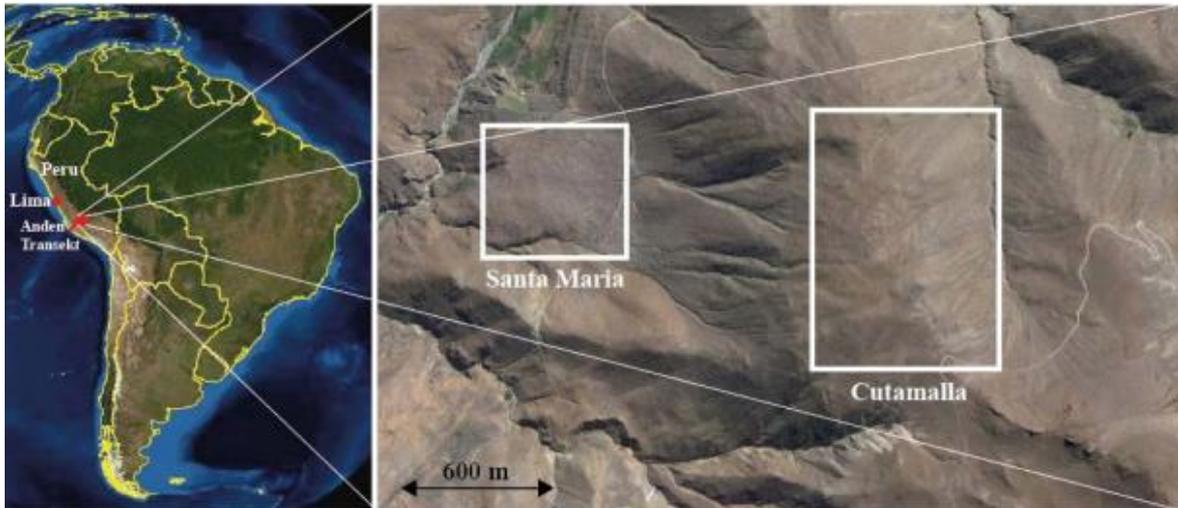


Abbildung 41: Lage der Untersuchungsgebiete Santa Maria und Cutamalla in den peruanischen Anden, Quelle: [FRI-14: 207]

Die Geländeaufnahme sowie die Auswertung der dabei entstandenen Daten erfolgen der Übersicht halber für jedes System separat.

- **UAV-Bildflug und Auswertung**

Während der Feldarbeit wurde eine Flughöhe von 60 m eingehalten und eine konstante Bild-Überlappung von 75% angestrebt. Bei einer Auflösung von 2,5 cm (Bodenpixel) entstanden 240 Aufnahmen von Santa Maria und 790 Aufnahmen von Cutamalla. Für die Georeferenzierung wurden Zielmarken aus A4-Papier im gesamten Untersuchungsgebiet verteilt und tachymetrisch eingemessen.

Bevor mit der eigentlichen Auswertung gestartet werden konnte, mussten unerwünschte Aufnahmen manuell aussortiert werden. Nachdem dies geschehen war, wurde mit der Erstellung zweier DSM und Orthophotos von Santa Maria und Cutamalla begonnen. Verwendet wurde dafür die Software Pix4Dmapper (siehe Kapitel 3.4.2), die zunächst die relative und absolute Orientierung der Bilder mit einer Bündelblockausgleichung berechnete. Im Anschluss daran erfolgte das *Dense Image Matching* zur Generierung einer Punktwolke, aus der schlussendlich das jeweilige DSM sowie das Orthophoto erzeugt wurden. Der gesamte Auswerteprozess wurde von der Software vollautomatisch durchgeführt.

- **TLS-Aufnahme und Auswertung**

Das Untersuchungsgebiet Santa Maria konnte von höher gelegenen Standpunkten betrachtet werden, wodurch günstige Aufnahmewinkel und daraus resultierend lediglich elf Aufstellungen erforderlich waren. Cutamalla war auf Grund seiner hohen Lage problematischer. Die Aufnahme erfolgte deshalb entweder im Gebiet selbst bzw. von Punkten mit gleicher oder geringerer Höhe auf naheliegenden Hügeln. Ungünstigere Einfallswinkel und Sichtbehinderungen sowie die Größe des Gebiets machten deshalb 31 Aufstellungen not-

wendig. Zur Georeferenzierung wurden die Scanner-Standpunkte selbst eingemessen; Zielmarken waren in diesem Fall nicht erforderlich.

Aus den erfassten Daten wurden für jedes Untersuchungsgebiet ein DSM und ein DTM erstellt. Auf Orthophotos wurde auf Grund der zu stark wechselnden Belichtungsverhältnisse verzichtet. Die Registrierung der einzelnen Scans und sowie die Georeferenzierung erfolgten in der Software RiSCAN Pro. Anschließend wurde jeder einzelne Scan gefiltert, um unerwünschte Punkte zu eliminieren. Danach wurden Octree- und Geländefilter auf die Gesamt-Punktswolke angewendet, wobei je nach gewünschtem Endergebnis unterschiedliche Grenzwerte der vertikalen Abweichung gewählt wurden (DTM: 0,2 m; DSM: 1 m). Im DSM war die Erhaltung künstlicher Strukturen und dichter Vegetation besonders wichtig, wohingegen diese im DTM nicht benötigt wurden. In einem letzten Schritt wurde eine Rasterinterpolation in ArcMap durchgeführt, um das Endprodukt zu erhalten. Die DTMs von Santa Maria und Cutamalla können in *Abbildung 42* betrachtet werden.

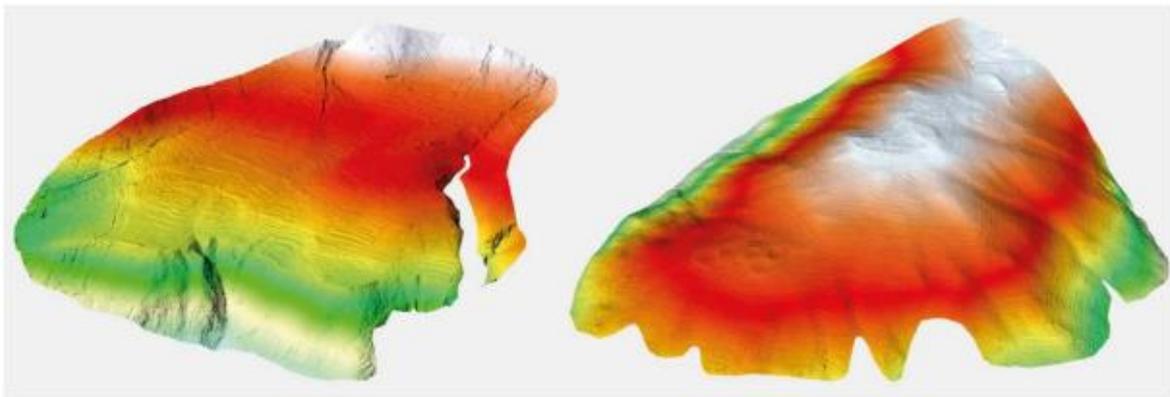


Abbildung 42: Geländemodelle von Santa Maria (links) und Cutamalla (rechts) als schattierte 3D-Reliefs; Quelle: [FRI-14: 213]

Das UAV-DSM wird nun im Folgenden mit den beiden TLS-Modellen (TLS-DSM und TLS-DTM) verglichen. Der **Vergleich der Modelle** konzentriert sich vor allem auf die Qualität hinsichtlich Genauigkeit und Höhendifferenz.

Eine Abschätzung der Genauigkeit ergab für das UAV-DSM 4 cm in den horizontalen Komponenten und 6 cm in der vertikalen. Die größte Abweichung in Lage und Höhe betrug 2,9 cm für Santa Maria und 5,1 cm für Cutamalla. Für die TLS-Modelle konnten Genauigkeiten von 6 cm horizontal und 8 cm vertikal geschätzt werden. Die Abweichungen in Lage und Höhe fielen hier etwas größer aus: 7 cm in Santa Maria und 8 cm in Cutamalla.

Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen die Höhendifferenz zwischen den TLS-Modellen und den UAV-DSM für beide Gebiete. Es sind mehrere Unterschiede zu finden: „Flächenhaft größere Differenzen von einigen dm findet man in erster Linie am Rand der Modelle. [...] Im Falle von Cutamalla ist das Gebiet auf der westlichen Seite des Hügels durch TLS nur lückenhaft abgedeckt [...]. Kleinräumigere Abweichungen zeigen in beiden Gebieten im Wesentlichen die Vegetation sowie die vorhandenen künstlichen Strukturen.

Die Unterschiede zwischen UAV-DSM und TLS-DTM weisen fast ausschließlich positive Höhendifferenz auf (DSM ist höher als DTM) und fallen mit den künstlichen Strukturen zusammen. [...] Höhenunterschiede zwischen TLS-DSM und UAV-DSM treten praktisch nur an den größeren künstlichen Strukturen und in Bereichen mit dichter Vegetation auf (z.B. Kakteen), während Abweichungen auf schmalere Strukturen und mit niedrigerer Vegetation unter 10 cm bleiben und damit von der Unsicherheit der Modelle überlagert werden“ [FRI-14: 216f.].

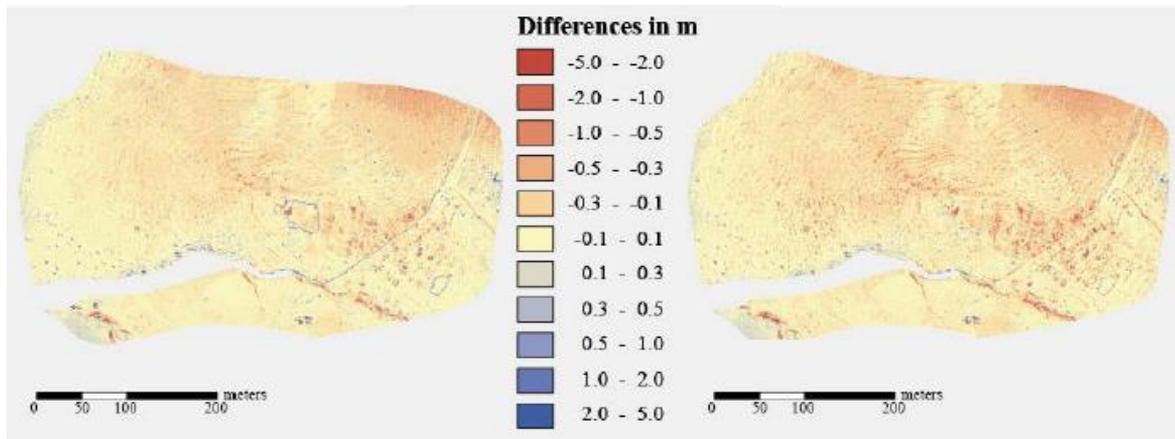


Abbildung 43: Vergleich des UAV-DSM mit den TLS-Modellen von Santa Maria; links: UAV-DSM - TLS-DTM, rechts: UAV-DSM - TLS-DSM, Quelle: [FRI-14: 217]

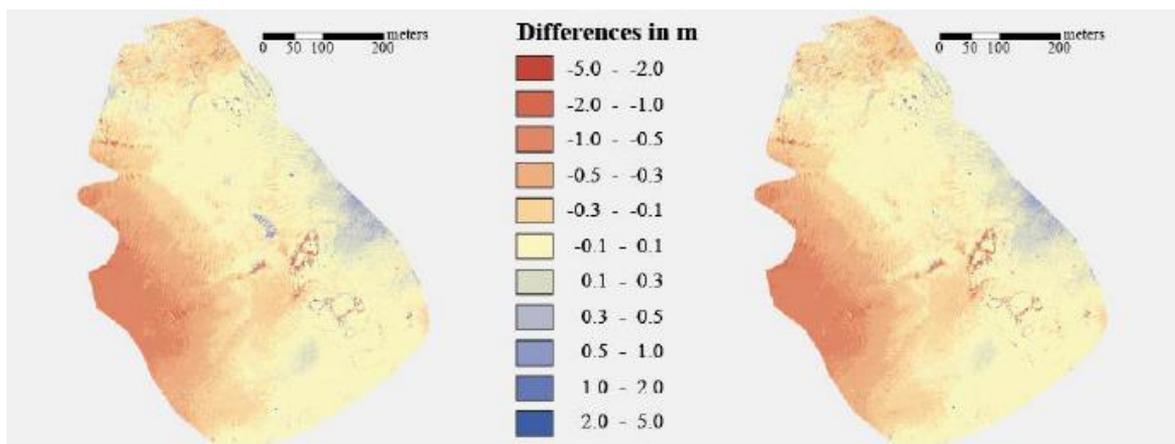


Abbildung 44: Vergleich des UAV-DSM mit den TLS-Modellen von Cutamalla; links: UAV-DSM - TLS-DTM, rechts: UAV-DSM - TLS-DSM, Quelle: [FRI-14: 217]

Hinsichtlich der ökonomischen und praktischen Aspekte wird der Zeitaufwand für Planung, Aufnahme und Datenauswertung von den Autoren als etwa gleichwertig erachtet. Bei der Datenakquisition hat der Laserscanner einen leichten Vorteil, da mit ihm in kürzerer Zeit größere Gebiete erfasst werden können. Dafür ist die größtenteils manuelle Auswertung mit einem größeren Zeitaufwand verbunden als die UAV-Auswertung, welche nahezu vollautomatisch verläuft.

Insgesamt haben sich beide Methoden als geeignet erwiesen, um Oberflächenmodelle von 20-40 ha großen Gebieten in einer Auflösung zu generieren, die den Ansprüchen der archäologischen Vermessung gerecht werden. Künstliche Strukturen konnten somit durch beide Systeme identifiziert werden. In Bezug auf Unterschiede zwischen TLS und UAV-Photogrammetrie kommen FRIEDLI et al. zu folgendem **Ergebnis** [FRI-14]:

- Das flache Gebiet auf dem hoch gelegenen Hügelkamm von Cutamalla ist besser geeignet für luftgestützte Aufnahme; die TLS-Messungen sind wegen der ungünstigen Sichtverbindungen aufwändig, die Auftreffwinkel sind ungünstig, und durch künstliche Strukturen und Vegetation ergeben sich viele abgeschattete Bereiche.
- Die Beobachtung des tiefer gelegenen Gebiets Santa Maria war mit beiden Methoden erfolgreich, mit TLS aber besonders effizient.
- Für die steilen Flanken des Hügelkammes von Cutamalla ist TLS von den nahegelegenen Hügeln aus zu bevorzugen. In diesem Fall ist der Blickwinkel von oben beim UAV unvorteilhaft, da die großen Höhendifferenzen variierende Grundpixelgrößen erzeugen und die Flugplanung deutlich herausfordernder ist.

Zusammenfassend empfehlen die Autoren vor allem für Gebiete mit unterschiedlichen vertikalen und horizontalen Bereichen einen kombinierten Einsatz von TLS und UAV.

4.3.2 Erstellung von Orthophotos der tschechischen St. Nikolaus-Kirche durch kombinierten Einsatz von TLS und SfM

Sowohl terrestrische Laserscanner als auch photogrammetrische Aufnahmen – vom Erdboden und aus der Luft – werden in der Baudokumentation und in der Erstellung von zwei- bzw. dreidimensionalen Modellen genutzt. Beide Methoden haben aber auch Einschränkungen, vor allem, wenn es um die Rekonstruktion von Fassaden und Innenaufnahmen geht. Während sich TLS in diesem Bereich vor allem durch eine genaue Lageinformation auszeichnet, liefern photogrammetrische Aufnahmen eine hochqualitative Farbinformation und eine exakte Bildorientierung durch den Structure from Motion-Algorithmus. KOSKA und KŘEMEN [KOS-13] machen sich die Vorteile beider Verfahren zu Nutze und wenden eine Kombination von TLS und SfM an der tschechischen St. Nikolaus-Kirche an.

Die St. Nikolaus-Kirche ist eine Barockkirche, die von 1732 bis 1737 erbaut wurde und sich im Zentrum von Prag befindet. Sie wurde von den Autoren mit TLS und Kameras vom Boden und aus der Luft aufgenommen, um folgende **Endprodukte** zu erstellen:

- Baupläne des gesamten Gebäudes
- Dokumentation der Fassade und des Mittelschiffs der Kirche
- Hochauflösende Orthophotos der Fassade und des Mittelschiffs der Kirche

Die Autoren widmen sich in diesem Beitrag vor allem der Erstellung der Orthophotos.

Die **Datenerfassung** begann zunächst mit dem Einsatz von zwei verschiedenen terrestrischen Laserscannern – einem Leica HDS3000 für den Außenbereich und einem Surphaser 25HSX für die Innenaufnahmen. Die Scanner wurden dabei sowohl am Boden als auch auf umliegenden Gebäuden sowie am Kirchendach aufgestellt. Eine Totalstation diente der Georeferenzierung der Messpunkte. Die photogrammetrischen Aufnahmen erfolgten vom Boden aus mit einer Canon EOS5D und von der Luft mit einem UAV der Marke Mikro-Kopter Hexa2, auf welchem eine Kamera des Typs Sony NEX5 befestigt war. Beide Kameras wurden im Vorfeld kalibriert.

Die **Weiterverarbeitung der Laserscanning-Daten** wurde zunächst mit einer Transformation der Scanner-Standpunkte in das tschechische Koordinatensystem begonnen. Anschließend wurden die einzelnen Punktwolken mit der Software Leica Cyclone zusammengefügt. Mit dem Leica-Scanner waren im Vorfeld ganze 170 Mio. Punkte aufgenommen worden; der Surphaser-Scanner hatte lediglich 2500 Punkte erfasst. Um das Datenvolumen zu reduzieren, wurde der Punktabstand von 5 auf 10 mm verringert, wodurch die gesamte Punktwolke nur noch 100 Mio. Punkte umfasste.

Im Anschluss daran erfolgte die Erstellung der Polygonnetze (Meshes) in der Software Geomagic Studio. Auf Grund des hohen Datenvolumens wurde jeder Scan extra bearbeitet. Dieser Prozess nahm die meiste Zeit in Anspruch; für die Modellierung einer Fassade waren bis zu 30 Arbeitsstunden erforderlich. Spezielle Tools ermöglichten die Reduktion von Dreiecken in flachen Bereichen ohne spezielle Details, dennoch umfassten die fertigen Meshes im Schnitt 10 Millionen Dreiecke. Die fertige Westfassade der Kirche ist in *Abbildung 45* (links) zu sehen.

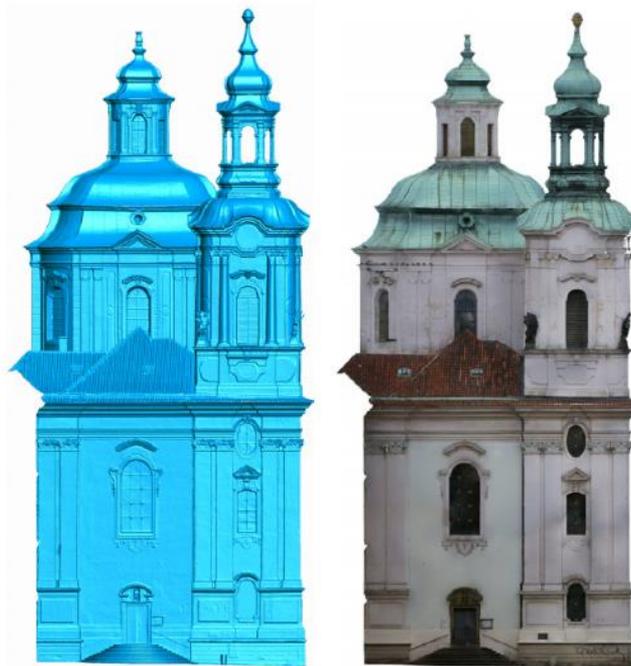


Abbildung 45: Mesh (links) und Orthophoto (rechts) der Westfassade, Quelle: [KOS-13: 135f.], verändert

Für die **Auswertung der Bilddaten** wurde die Software Agisoft PhotoScan genutzt. Nach dem Import der Bilder wurde auch hier mit der Transformation in das nationale Koordinatensystem begonnen, was durch das Setzen von Kontrollpunkten an markanten Stellen realisiert wurde. Anschließend wurde der SfM-Algorithmus wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben durchgeführt. Zur Generierung von Orthophotos bzw. Texturen für das fertige Modell stellt Agisoft die beiden Optionen „Average“ und „Mosaik“ zur Verfügung. Ersteres verwendet für die Einfärbung der Pixel einen Durchschnitts-Farbwert; „Mosaik“ hingegen zieht immer nur ein Foto als Farb-Input heran. Der genaue Unterschied zwischen den beiden Optionen wird von der Software nicht definiert und bei geringerer Auflösung gibt es auch kaum Unterschiede. Für die Erstellung von hochauflösenden Orthophotos, wie sie beispielhaft in *Abbildung 45* (rechts) für die Westfassade der St. Nikolaus-Kirche zu sehen sind, empfehlen die Autoren allerdings die Option „Mosaik“.

Für die Fertigstellung der Orthophotos fehlte allerdings noch ein wichtiger Schritt: die Maskierung der Aufnahmen. Durch dieses Verfahren werden unerwünschte Objektdetails (z.B. Menschen, Tiere, Autos, Straßenbeleuchtung etc.) aus den Bildern entfernt. Auch dieser Abschnitt war mit einem hohen Zeitaufwand verbunden, da er manuell durchgeführt werden musste. Besonders aufwändig waren die Innenansichten der Kirche, wo kleine Objekte wie Kabel und Lampen maskiert werden mussten (siehe *Abbildung 46*).



Abbildung 46: Maskierung von unerwünschten Objekten im Mittelschiff der St. Nikolaus-Kirche, Quelle: [KOS-13: 137]

Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass eine Kombination von TLS und SfM angewendet werden kann, um hoch aufgelöste Orthophotos von komplexen Objekten mit unregelmäßiger Geometrie und vielen Details zu erstellen. Die fertigen Orthophotos können für Dokumentation und Messungen von Fassaden und Innenansichten genutzt werden. Gegenüber Punktwolken haben Orthophotos den Vorteil, dass ihr Datenvolumen wesentlich geringer ist und dass eine Dateninterpretation durch die zweidimensionale Ansicht vereinfacht wird.

5 Praxisbeispiel: Das Heidentor von Petronell-Carnuntum

Dieser Teil der Arbeit soll sich nun mit der Anwendung von terrestrischem Laserscanning und UAV-Photogrammetrie in der Praxis befassen. Von der Autorin wurde im Zeitraum von Ende August 2016 bis Anfang Dezember 2016 ein eigenes Projekt durchgeführt, das den Einsatz beider Systeme am Beispiel eines archäologischen Objekts untersucht. Bei diesem Objekt handelt es sich um das so genannte Heidentor – ein römisches Siegesmonument, das sich in der niederösterreichischen Gemeinde Petronell-Carnuntum befindet. Das Ziel des Projekts ist es, jeweils ein dreidimensionales Modell des Heidentors aus TLS-Messungen bzw. UAV-Bildern zu generieren und die Vollständigkeit beider Modelle miteinander zu vergleichen. Zusätzlich wird auch dem Workflow beider Systeme, der am Ende von Kapitel 2 und Kapitel 3 beschrieben wurde, besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

Das Projekt wird in die bereits mehrfach erwähnten Phasen Vorbereitung – Feldarbeit – Auswertung gegliedert. Die vorbereitenden Maßnahmen werden für TLS und UAV im ersten Unterkapitel gemeinsam erläutert, da es an dieser Stelle noch wenig Unterschiede im Arbeitsablauf gibt. Auf die technischen Details der verwendeten Systeme (terrestrischer Laserscanner VZ-6000 und Multikopter DJI Phantom 3 Professional) soll an dieser Stelle ebenfalls eingegangen werden. Das Folgekapitel widmet sich einem kurzen Überblick über das Untersuchungsgebiet bzw. -objekt. In den anschließenden beiden Kapiteln werden die restlichen Hauptphasen des Workflows – Feldarbeit und Auswertung – für Laserscanner und UAV getrennt voneinander betrachtet. Die Beschreibung der Feldarbeit wird eher kurz gehalten und befasst sich mit den Aufnahmebedingungen und dem generellen Arbeitsablauf im Untersuchungsgebiet. Wesentlich detaillierter beschrieben wird hingegen die Auswertung: Diese erfolgt im Fall des TLS mit der Software RiSCAN Pro; zur Verarbeitung der UAV-Bilder wird die SfM-Software Agisoft PhotoScan eingesetzt. Durch Erklärungen und Screenshots soll gezeigt werden, wie aus TLS-Punktwolken und UAV-Aufnahmen ein dreidimensionales Modell des Heidentors erstellt werden kann.

5.1 Vorbereitung

Die Vorbereitungsphase des Projekts war hauptsächlich organisatorischer Natur. Dass das Heidentor Gegenstand der praktischen Arbeiten sein sollte, wurde von der Autorin bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt entschieden. Es galt nun vor allem festzulegen, welche Instrumente für die Aufnahme genutzt werden sollten und welche Personen zu diesem Zweck kontaktiert werden mussten.

Im Falle des terrestrischen Laserscanners kamen der VZ-2000 von der Technischen Universität Wien sowie der **VZ-6000** des Instituts für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien in Frage. Beide Gerätetypen stammen von der Firma Riegl. Letztendlich fiel die Entscheidung zu Gunsten des VZ-6000, wobei die Autorin wertvolle Unterstützung

durch Mag. Roland Mittermaier und Ing. Bernhard Groiss erhielt. Am 21. September 2016 wurde ein kurzes informatives Treffen abgehalten, an dem die genannten Personen sowie die Autorin teilnahmen. Im Zuge dieses Treffens wurde der Arbeitsablauf des Laserscanners nochmals genau durchbesprochen und anhand von zwei Testscans erprobt. Anschließend erfolgten eine Durchbesprechung der einzelnen Schritte, die während der Arbeit im Gelände berücksichtigt werden mussten, sowie eine kurze Vorstellung des Untersuchungsobjekts seitens der Autorin. Außerdem wurde beschlossen, den VZ-6000 mit GPS zu koppeln, um eine direkte Georeferenzierung zu ermöglichen.

Hinsichtlich des UAVs standen der Autorin ebenfalls mehrere Geräte zur Auswahl, die entweder einer bestimmten Herstellerfirma entstammten oder eigens für den Gebrauch durch Personen des Instituts für Geographie und Regionalforschung von Privatpersonen angefertigt wurden. Es wurde entschieden, für den Bildflug über das Heidedor den **Phantom 3 Professional** der Firma DJI zu verwenden. Da die Autorin über keine entsprechende Fluglizenz verfügte, stellte sich freundlicherweise Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl als Multikopter-Pilot zur Verfügung. In einem Telefongespräch wurden die wesentlichen Details besprochen und der Aufnahmetermin (der zu einem anderen Zeitpunkt erfolgte als die TLS-Aufnahmen) festgelegt.

Die technischen Details des terrestrischen Laserscanners Riegl VZ-6000 sowie des Multikopters DJI Phantom 3 Professional sollen an dieser Stelle kurz erläutert werden.

5.1.1 Der terrestrische Laserscanner Riegl VZ-6000

Wie der Name bereits impliziert, handelt es sich bei dem terrestrischen Laserscanner Riegl VZ-6000 um einen so genannten Long-Range-Laserscanner, der auf Entfernungen bis zu 6000 m messen kann. Innerhalb der Riegl-Produktpalette ist dieser Scanner jener mit der höchsten Reichweite. Die primären Anwendungsbereiche des VZ-6000 sind vor allem im physiogeographischen Bereich (Gletscher- und Schneefeldmessungen, Hangrutschungen etc.) sowie in der Ziviltchnik und der Archäologie angesiedelt [RIE-15]. Da im Rahmen der praktischen Arbeiten am Heidedor von Petronell-Carnuntum der Abstand des Scanners zum Objekt maximal 50 m betrug, wäre ein Scanner mit einer niedrigeren Reichweite in jedem Fall ausreichend gewesen. Auf Grund der einfacheren Organisation hinsichtlich Ausleihbedingungen und Versicherung fiel die Wahl letztendlich dennoch auf den VZ-6000.

Der Riegl VZ-6000 ist ein Hybridscanner, der in der Horizontalen uneingeschränkt messen kann und in der Vertikalen auf einen Bereich von 60° eingegrenzt ist. Das Gesichtsfeld (Field of View) beträgt somit 60° x 360°. Der Scanner ist in der Lage, eine nahezu uneingeschränkte Anzahl von Zielen zu erfassen und verfügt über einen integrierten Kompass sowie integrierte Inklinationssensoren und eine GPS-Antenne [ebd.]. Anschlüsse am Kopfteil des Scanners ermöglichen die Kombination mit einer digitalen Kamera und/oder zusätzlicher GNSS-Sensoren, wobei letzteres im Zuge der Feldarbeit genutzt wurde. Da der VZ-6000 der Laserklasse 3B (die Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge, außer es han-

delt sich um diffuses Streulicht, [MIT-16]) zugeordnet ist, wird vom Hersteller empfohlen, gewisse Mindestabstände zu Personen, bewohnten Gebieten und Straßen einzuhalten, sowie während der Arbeit eine Schutzbrille zu tragen. Da sich das Heidentor in einem komplett unbesiedelten Bereich befindet, war dieser Umstand glücklicherweise leicht zu erfüllen.

Abbildung 47 zeigt den Aufbau des Laserscanners mit einer Beschriftung der einzelnen Komponenten. Der obere Abschnitt der Abbildung liefert eine Frontalansicht; der untere Abschnitt bildet den Scanner von oben ab, wobei die bereits erwähnten Anschlüsse für Kamera und GNSS ersichtlich sind.

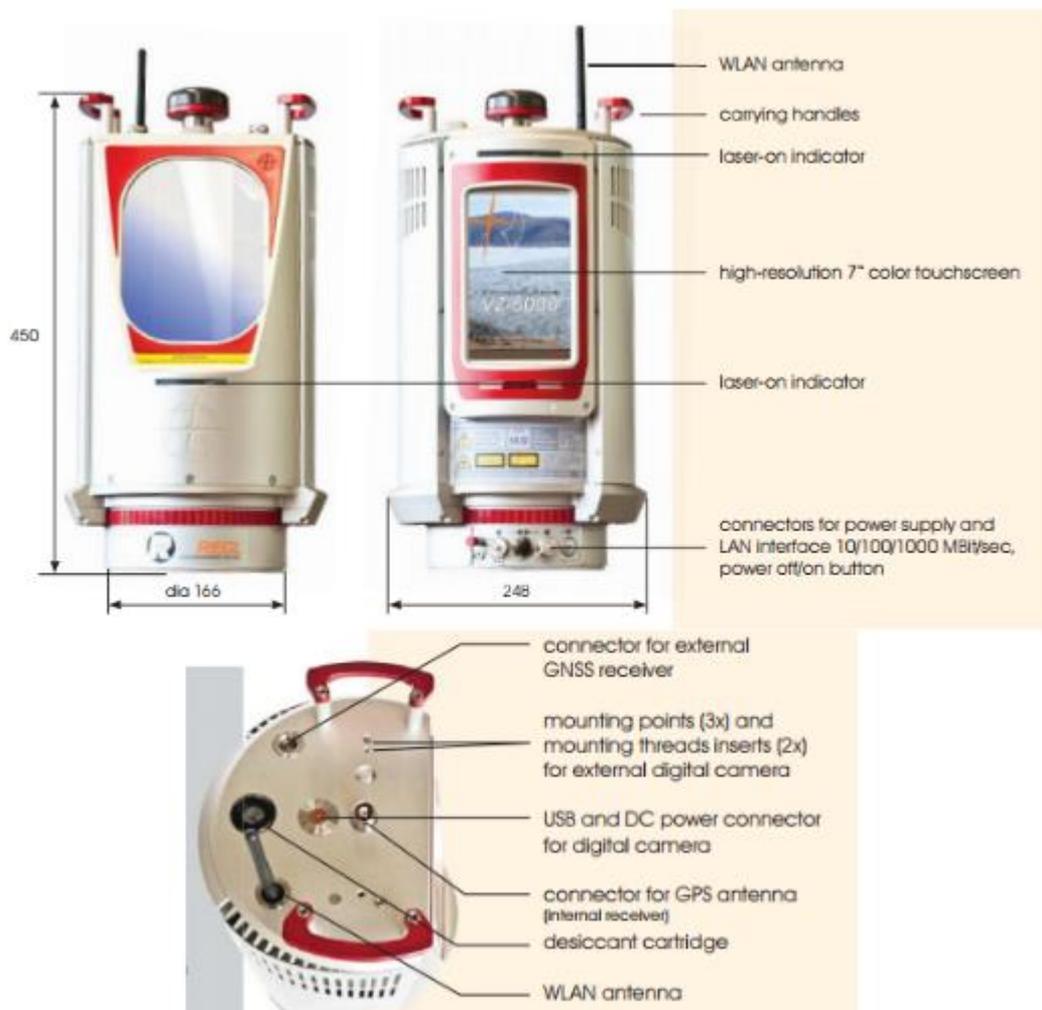


Abbildung 47: Aufbau des terrestrischen Laserscanners Riegl VZ-6000 (oben: Frontalansicht, unten: Draufsicht), alle Zahlenangaben in mm, Quelle: [RIE-15: 3], verändert

Die folgende *Tabelle 8* fasst die wesentlichen technischen Details des VZ-6000 zusammen. Eine komplette Auflistung aller Maßzahlen kann dem Produktblatt auf der Herstellerwebsite [siehe RIE-15] entnommen werden.

Tabelle 8: Terrestrischer Laserscanner Riegl VZ-6000 – Technische Details, Quelle: [RIE-15], eigene Bearbeitung

Laserklasse	3B	
Distanzmessung		
Messprinzip	Impulslaufzeitverfahren	
Full-Waveform-Möglichkeit?	Ja	
Laser Pulse Repetition Rate	30 kHz – 300 kHz	
Effektive Messrate (Messungen pro Sekunde)	23.000 – 222.000	
Maximale Anzahl von Targets pro Laserpuls	praktisch unlimitiert	
Genauigkeit	15mm	
Präzision	10mm	
Maximale / minimale Reichweite	6000m / 5m	
Laser-Wellenlänge	nahes Infrarot	
Strahldivergenz	0,12mrad	
Winkelschrittweite	15mm @ exit, 120mm @ 1000m	
Scanner-Performance		
Scanmechanismus	<i>Vertikaler Scan</i> Rotierender/oszillierender Spiegel	<i>Horizontaler Scan</i> Rotierender Scannerkopf
Gesichtsfeld	60°	360°
Scan-Geschwindigkeit	100°-14.400°/Sekunde	0°-60°/Sekunde
Integrierte Zusatzkomponenten		
	Inklinationssensoren GNSS-Empfänger Kompass Optisches Laserlot Echtzeituhr	
Allgemeine technische Daten		
Dimensionierung / Gewicht	248 x 226 x 450mm / 14,5kg	
Luftfeuchtigkeit / Schutzklasse	max. 80% / IP64: Staub- und Sprühwasserschutz	
Temperaturreichweite	-10C° - 50°	
Integrierte digitale Kamera		
	Gesichtsfeld 7,2° x 5,5° Auflösung 2560 x 1920 Pixel	
Display	7“ Farb-Touchscreen, Stand-Alone-Modus möglich	

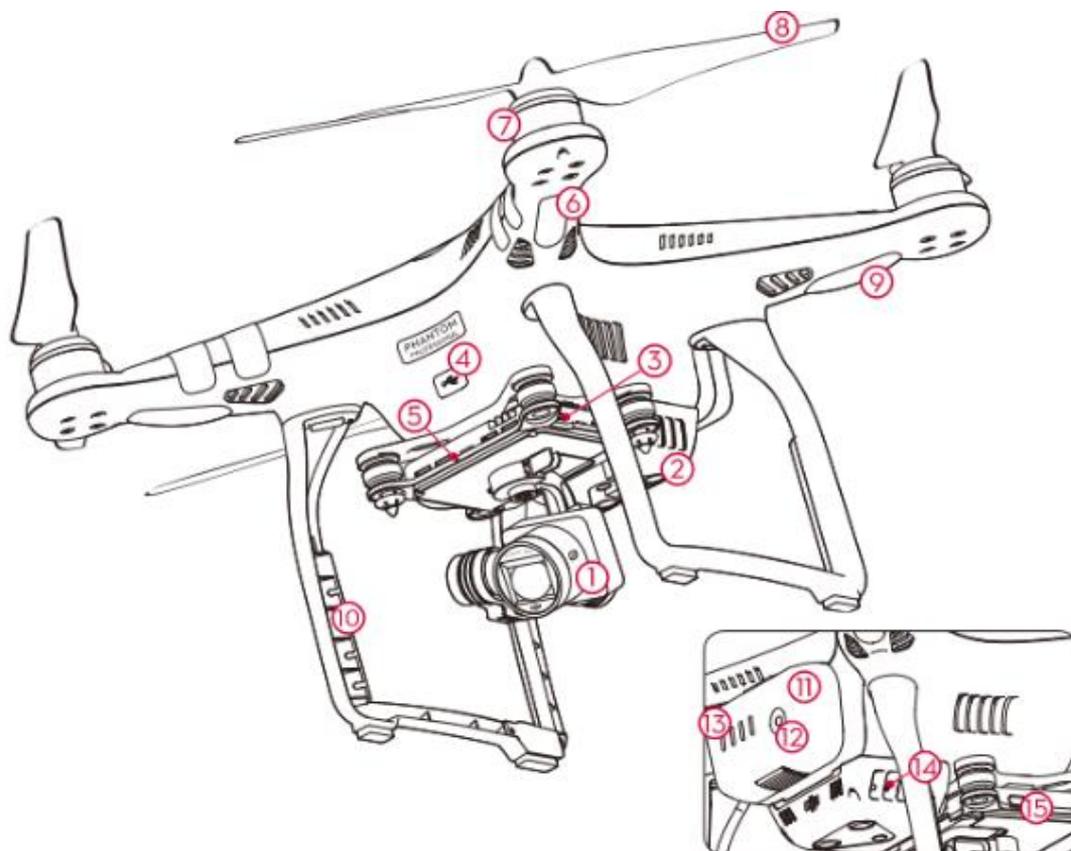
5.1.2 Der Multikopter DJI Phantom 3 Professional

Bei dem Modell Phantom 3 Professional der chinesischen Firma Dà-Jiāng Innovations Science and Technology (kurz DJI) handelt es sich um einen Multikopter mit vier Motoren bzw. Propellern, der somit korrekterweise auch als Quadrocopter bezeichnet werden kann. Die „Phantom 3“-Reihe setzt sich aus vier unterschiedlichen Modellen – Phantom 3 Standard, Phantom 3 Professional, Phantom 3 Advanced und Phantom 3 4K – zusammen. Der Vorteil der Professional-Version gegenüber den anderen Modellen liegt vor allem in der

höheren Kameraqualität [URL-13]. Die Kamera ist fest mit dem Quadrokopter verbunden und auf einem Gimbal befestigt, das in einem Bereich von -90° bis 30° gesteuert werden kann.

Das Fluggerät selbst weist ein Eigengewicht von 1280 g (inklusive Akku und Propeller) auf und kann gemäß der Definition von BLYENBURGH (siehe *Tabelle 7*) der Klasse der Micro-UAVs zugeordnet werden. Der Flugbetrieb ist theoretisch bis zu einer Höhe von 6000 m möglich; die Software schränkt die Flughöhe jedoch auf einen Maximalwert von 120 m ein [ebd.], was für die Aufnahmen des Heidentors jedoch vollkommen ausreichend war. Zwei Akkus mit je ca. 23 Minuten Laufzeit ermöglichen einen rund 45-minütigen Flugbetrieb.

Auf *Abbildung 48* ist eine Skizze des Phantom 3 Professional mit seinen wesentlichen Bestandteilen zu sehen.



- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1. Gimbal und Kamera | 9. Statusleuchten des Fluggeräts |
| 2. Optisches Positionsbestimmungssystem | 10. Antennen |
| 3. Steckplatz der Micro SD-Speicherkarte | 11. Intelligent Flight Battery |
| 4. Micro USB-Anschluss am Fluggerät | 12. Einschalttaste |
| 5. Kamera LED Anzeige | 13. Akkuladezustandsanzeige |
| 6. Vordere LEDs | 14. Koppeltaste |
| 7. Motoren | 15. Micro USB-Anschluss an der Kamera |
| 8. Propeller | |

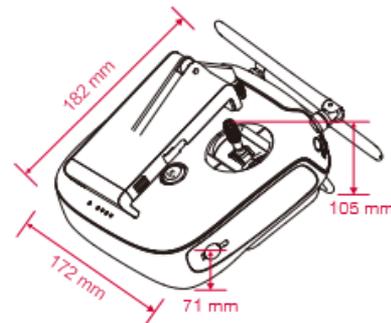
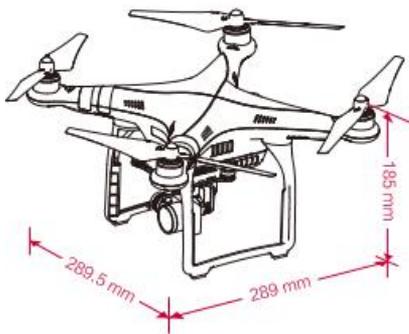
Abbildung 48: Bestandteile des DJI Phantom 3 Professional, Quelle [DJI-15: 2], verändert

Analog zum terrestrischen Laserscanner VZ-6000 sollen auch an dieser Stelle in *Tabelle 9* die wichtigsten technischen Eckdaten des in der Praxis eingesetzten Multikopters erläutert werden. Für eine umfangreichere Version empfiehlt die Autorin das Phantom 3-Produktblatt auf der Website des Herstellers [siehe URL-13] sowie die Kurzanleitung [siehe DJI-15].

Tabelle 9: Multikopter DJI Phantom 3 Professional - Technische Details, Quelle: [DJI-15], eigene Bearbeitung

Dimensionierung

Fluggerät: 289,5 x 289 x 185 mm
Fernbedienung: 182 x 172 x 71 bzw. 105mm



Fluggerät

Gewicht (inkl. Akku)	1280g
Max. Steiggeschwindigkeit	5 m/s
Max. Sinkgeschwindigkeit	3 m/s
Max. Geschwindigkeit	16 m/s (kein Wind)
Max. Flughöhe	6000m
Max. Flugzeit	ca. 23 Minuten
Betriebstemperatur	0 bis 40°C
GNSS-Verbindung	GPS/GLONASS

Gimbal

Kontrollierter Bereich	Nickwinkel: -90 bis +30°
Stabilisierung	3 Achsen: Nicken, Rollen, Gieren

Kamera

Sensor	Sony EXMOR 1/2.3" 12,4MP
ISO-Bereich	100 – 3200 (Videos), 100 – 1600 (Fotos)
Belichtungszeit	8 bis 1/8000s
Max. Bildgröße	4000 x 3000px

Fernbedienung

Betriebsfrequenz	2400 bis 2483 GHz
Sendereichweite	FCC-konform: 5km; CE-konform: 3,5km
Videoausgang	USB
Akku	6000 mAh LiPo 2S
Mobilgerätehalter	Tablet PCs, Smartphones

5.2 Das Untersuchungsgebiet

Die antike Stadt Carnuntum in den heutigen niederösterreichischen Gemeinden Bad Deutsch-Altenburg und Petronell-Carnuntum (Bezirk Bruck an der Leitha) erstreckte sich über eine Fläche von 10 km². Im Osten reichte das römertime besiedelte Areal bis zum Pfaffenberg in Bad Deutsch-Altenburg, im Westen bis etwa 1,5km westlich der heutigen Marktgemeinde Petronell-Carnuntum in Richtung Wildungsmauer. Im Norden wurde das Siedlungsgebiet römischer Zeit durch die Donau bzw. ihre damals existierenden Nebenarme begrenzt, im Süden verlief die Bebauung in etwa bis zur heutigen Umfahrung an der Bundesstraße B9 [URL-14]. Im Jahre 6 n. Chr. erstmals besiedelt, wurde das Gebiet im Laufe der Jahrzehnte immer weiter befestigt und ausgebaut, wodurch sich 124 n. Chr. unter der Herrschaft Kaiser Hadrians eine Zivilstadt, ein Legionslager sowie ein Tempelbezirk am heutigen Pfaffenberg etablierten (siehe *Abbildung 49*).

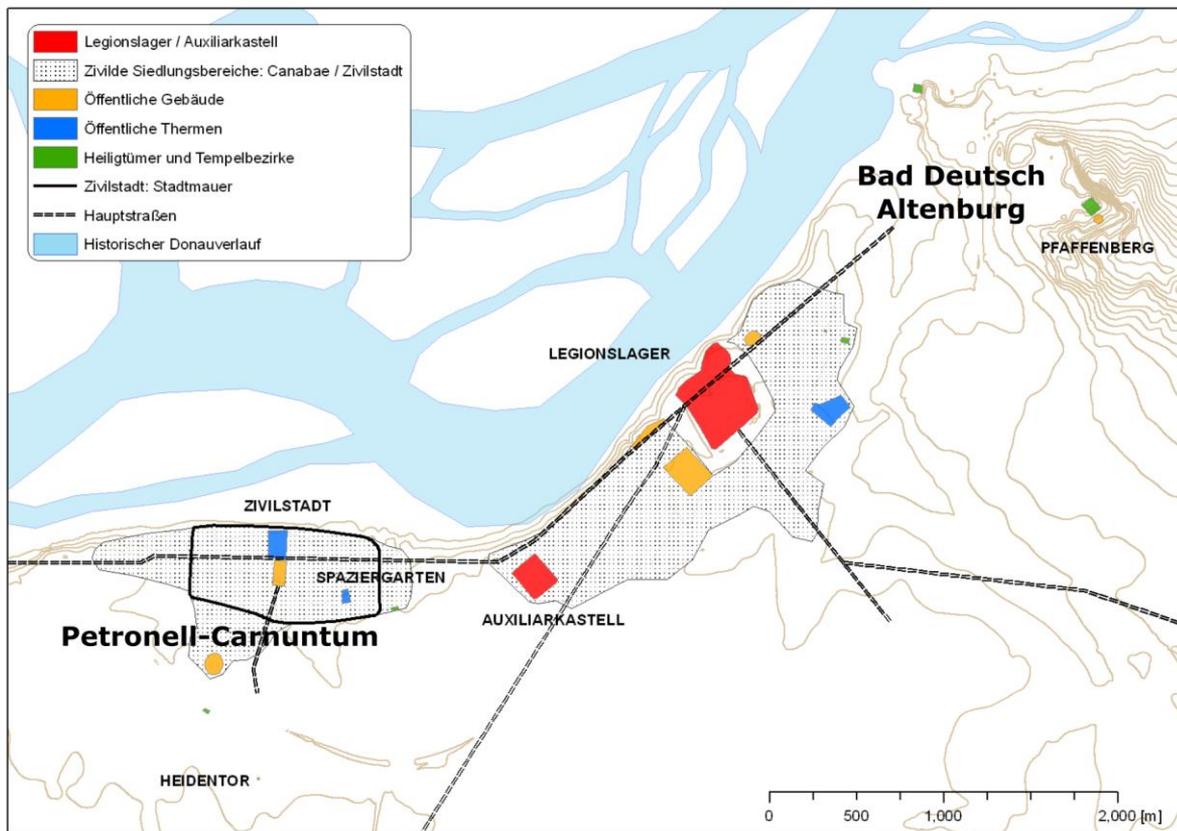


Abbildung 49: Die Ausdehnung Carnuntums in der Antike und Lage der heutigen Gemeinden Petronell-Carnuntum und Bad Deutsch Altenburg, Quelle: [URL-15], verändert

Seine Blütezeit erreichte Carnuntum unter der Herrschaft Lucius Septimus Severus', als es den Rang einer *colonia* erreichte und somit die ranghöchste Stadt in der Provinz *Pannonia superior* war [ebd.]. Der Aufstieg Carnuntums zur politischen und kulturellen Drehscheibe am Beginn des mittleren Donaulimes erklärt sich aus dessen Lage am Schnittpunkt zweier transkontinentaler Verkehrswege: „Einerseits ist es der Wasserweg der Donau, der die

europäischen Länder in westöstlicher Richtung verbindet, andererseits die so genannte Bernsteinstraße, jene nordsüdliche Verkehrsachse, die Nordeuropa und das Baltikum mit den Küstengebieten des Mittelmeeres zusammenführte. Hier an den Ausläufern der kleinen Karpaten [...] entwickelte sich einer der bedeutendsten Siedlungs- und Verteidigungsschwerpunkte an der Nordgrenze des Römischen Reiches“ [JOB-02: 8]. Bis in die Zeit um 400 n. Chr. bemühte sich Rom um die Aufrechterhaltung des Imperiums. Zu propagandistischen Zwecken wurden während dieser Zeit zahlreiche Monumente – unter anderem auch das heutige Heidentor – in und am Rande von römischen Städten errichtet [ebd.].

Nach der Mitte des 4. Jahrhunderts n. Chr. begann die langsame, aber kontinuierliche Abwanderung der Bevölkerung Carnuntums. Die Gründe dafür waren vielfältig: So ereignete sich um diese Zeit ein mittelschweres Erdbeben in der Region, das zusammen mit einer allgemeinen klimatischen Verschlechterung in Pannonien einherging. Durch den Beginn der Völkerwanderung kam es außerdem immer wieder zu kriegerischen Einbrüchen fremder Völkerschaften am Limes [URL-14]. Einige Teile der Stadt wurden allerdings bis in die erste Hälfte des 5. Jahrhunderts n. Chr. genutzt, wobei sich die zivile Bevölkerung zunehmend in das Legionslager zurückzog. 433 n. Chr. wurden die pannonischen Provinzen und damit Carnuntum den Hunnen überlassen. Die römische Siedlung wurde dabei nicht zerstört, sondern verödete [ebd.]. Ihre Überreste stellen ein bedeutendes archäologisches Erbe Österreichs dar, waren Schwerpunkt der Niederösterreichischen Landesausstellung im Jahr 2011 und können gegenwärtig im Archäologiepark Carnuntum besichtigt werden.

Viele Bauwerke aus der römischen Vergangenheit Carnuntums gerieten im Laufe der Jahrhunderte unter die Erdoberfläche und mussten erst wieder gefunden und freigelegt werden. Einige Gebäude und Monumente sind allerdings bis heute über dem Erdboden erhalten geblieben und in der archäologischen Landschaft Carnuntum meistens frei und ungehindert zugänglich [JOB-02]. Eines dieser Monumente, das gleichzeitig das Wahrzeichen der Region Carnuntum, des Archäologieparks Carnuntum, sowie das Wappen der Marktgemeinde Petronell-Carnuntum darstellt, ist das **Heidentor**.

Der Name „Heidentor“ geht dabei auf eine Interpretation des Gelehrten Wolfgang Lazius zurück, der in der Ruine eine *porta urbis Carnuntinae*, also ein Stadttor Carnuntums im urbanistischen Sinne sehen wollte [JOB-01]. „Das alte Heidnische Stadt-Tor“ oder „Heidnisch Tor der alten Stadt Carnunta“ wurde es hundert Jahre später während der vorwissenschaftlichen Periode der Carnuntumforschung genannt [ebd.]. Die „Stadttor-Theorie“ war allerdings fehlgeleitet: Ursprünglich auf vier Pfeilern erbaut, war in der Renaissance bereits die Hälfte des Gebäudes verschwunden und nur mehr der westliche Bogen des Heidentors vorhanden [ebd.]. Das Tor war somit nicht – wie von den Gelehrten der Renaissance angenommen – in eine Stadtmauer integriert, sondern stand in freier Umgebung. Dennoch hielt sich der Name „Heidentor“ bis zum heutigen Tag und steht in Verbindung mit einer urtümlichen Volkssage, nach der Riesen einst dieses Gebäude erbaut haben sollten [ebd.].

Der tatsächliche Zweck des Heidentors wurde erst viele Jahre später ermittelt und von JOBST [JOB-02] zusammengefasst: „Das Heidentor war kein Stadttor, auch kein Straßen-

tor, das mit seinen vier Durchgängen eine Kreuzung überspannte. Es war auch kein Grabmonument, wie eine der häufigsten Erklärungen lautet, und auch kein Ehrenbogen, welcher anlässlich des kaiserlichen Gipfeltreffens [...] errichtet worden ist. Dieser mächtige Quadrifons ist eindeutig das Beispiel eines Triumphalmonuments, das Macht und Erfolg des kaiserlichen Siegers in einer Zeit demonstrieren sollte, als das Römische Reich im Inneren wie an den Grenzen gewaltigen Veränderungsprozessen unterworfen war“ [JOB-02: 6].

Von den ursprünglich vier Pfeilern des genau nach den Himmelsrichtungen ausgerichteten Doppeldurchgangsbogens (Quadrifons) stehen gegenwärtig noch die beiden westlichen (13,4 bzw. 14,8 m hoch), die bis heute Reste der Wölbung tragen (siehe *Abbildung 50*). Ein großer Versturzblock, der heute östlich neben der Ruine liegt, war ein Bestandteil des heute nicht mehr bestehenden nordöstlichen Pfeilers. An wenigen Stellen sind am Heidentor Reste der originalen Architekturgliederung in Form von Gesimsen und Konsolen enthalten [JOB-02]. Eine Besonderheit stellt ein mächtiger Figurensockel im Zentrum der Anlage dar, von dem in etwa die Hälfte des Steinmaterials noch erhalten ist. Möglicherweise war hier eine Statue des Kaisers aufgestellt [ebd.]. Das gesamte Areal, das sowohl das Heidentor als auch die Überreste der Pfeiler umfasst, erstreckt sich auf einer Fläche von rund 16 x 16 m [JOB-01].



Abbildung 50: Das Heidentor einst und heute. Links: Modell des rekonstruierten Quadrifons am Besichtigungsgelände. Rechts: Heutiges Heidentor mit zwei Pfeilern, Versturzblock und zentralem Figurensockel, Fotos: Tremel 2016

Seit 1985 wurden zunehmende Verschlechterungen bei der Bausubstanz des Heidentores festgestellt, weshalb im Zeitraum von 1998-2001 umfassende Restaurationsmaßnahmen durchgeführt wurden, die gleichzeitig mit einer vollständigen Freilegung des Monuments einhergingen. Die ausgrabungswissenschaftliche Untersuchung konzentrierte sich dabei auf die vier Pfeilerfundamente, den Innenraum mit Figurensockel, die das Gebäude umgebenden Außenflächen sowie seine nähere Umgebung [JOB-02]. Zum damaligen Zeitpunkt wurde „trotz der weitreichenden Möglichkeiten der elektronischen Vermessung“ [JOB-01: 183] eine Bauaufnahme mittels Handaufmaß durchgeführt, „bei dem durch direkten Kontakt von Zeichner und Gebäude eine ständige genaue Beobachtung des Befundes, seine Interpretation sowie die Kontrolle der Meßergebnisse [sic!] gewährleistet ist. Gerade an den vielfach überarbeiteten und zerstörten Oberflächen am Heidentor war es wichtig, Ori-

ginalbestand und Überarbeitungen gleich bei der Aufnahme auseinanderzuhalten [...] um auf dieser Grundlage eine möglichst gesicherte zeichnerische Rekonstruktion erstellen zu können“ [JOB-01: 183f.]. Im Jahr 2001 wurden die Restaurationsarbeiten am Heidentor fertiggestellt und die Überreste dieses römischen Triumphalmonuments können gegenwärtig ganzjährig von Interessierten besichtigt werden.

Abgesehen von Untersuchungen mit rein archäologischem Schwerpunkt, die sich über die Jahrzehnte erstrecken und zu zahlreich sind, um sie alle zu nennen, gab es in jüngerer Vergangenheit auch schon wissenschaftliche Arbeiten, die das Heidentor als Untersuchungsobjekt für Anwendungen im Laserscanning-Bereich heranzogen. Hier sind speziell die Arbeiten von BRIESE et al. [BRI-12] sowie STUDNICKA et al. [STU-13] zu nennen, die Photogrammetrie und mobiles Laserscanning miteinander verknüpfen, um die Fassade des Heidentors zu rekonstruieren (siehe *Abbildung 51*). Dabei wurden für die Datenaufnahme das mobile Laserscannermodell VMX-450 der Firma Riegel und für die Datenauswertung die Softwares RiProcess, Agisoft PhotoScan und OPALS verwendet. Als Ergebnis entstand ein dreidimensionales Modell des Heidentors, wobei die Autoren zwischen direkter und indirekter Georeferenzierung unterschieden und qualitative Unterschiede zu ermitteln versuchten [STU-13].

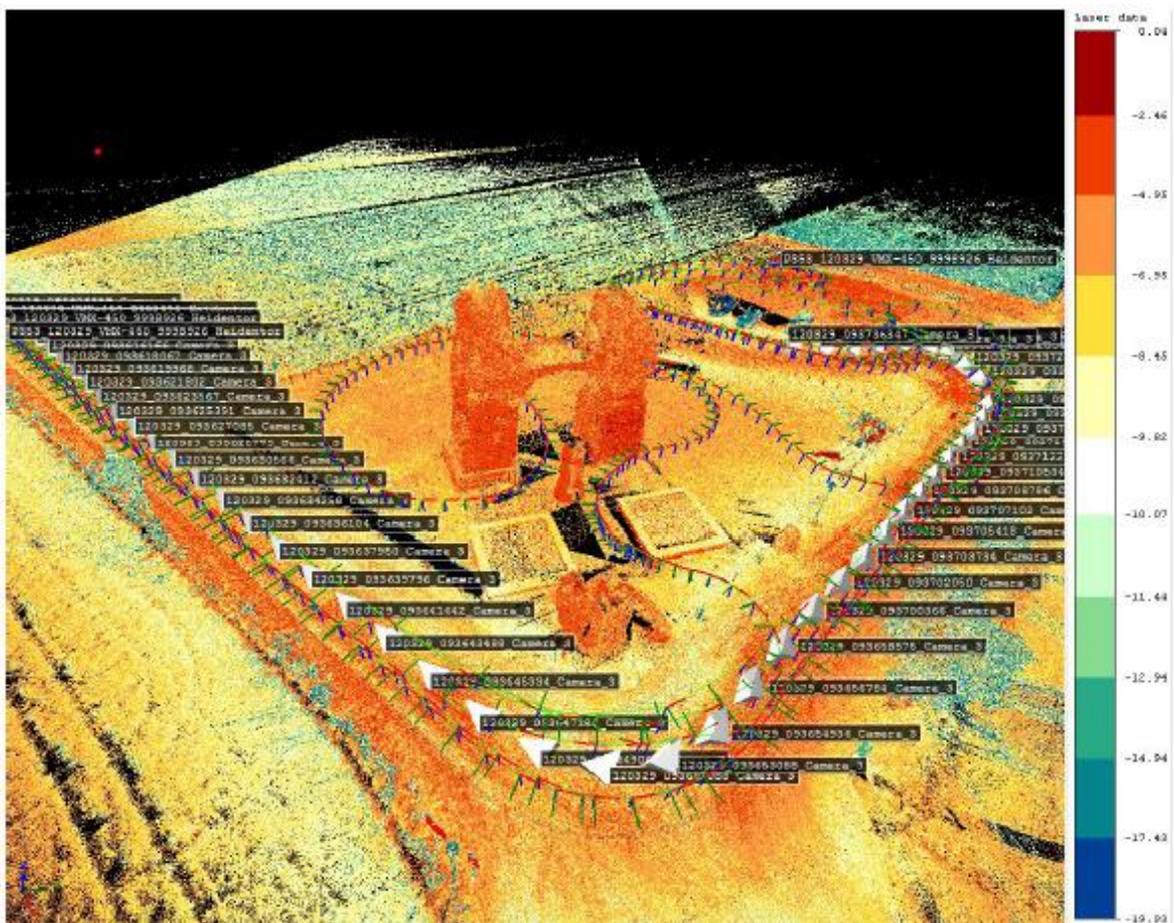


Abbildung 51: Das Heidentor als Punktwolke aus mobilen Laserscanning-Daten, Quelle: [STU-13: 26]

5.3 Messungen mit dem terrestrischen Laserscanner: Feldarbeit und Auswertung

Dieses Kapitel ist ausschließlich den Arbeiten mit dem terrestrischen Laserscanner Riegl VZ-6000 gewidmet. Die Datenakquisition in Petronell-Carnuntum wird im Unterkapitel 5.3.1 näher erläutert; Kapitel 5.3.2 widmet sich der umfangreichen Auswertung der Laserscanner-Daten sowie der Erstellung des dreidimensionalen Heidentor-Modells.

5.3.1 Feldarbeit

Die Aufnahmen mit dem terrestrischen Laserscanner fanden am 27. September 2016 statt und wurden von der Autorin sowie Mag. Roland Mittermaier und Ing. Bernhard Groiss durchgeführt. Als Treffpunkt wurde der Parkplatz vor dem Archäologiepark von Petronell-Carnuntum vereinbart, von dem es dann um 9:45 Uhr direkt zum Untersuchungsobjekt ging. Nach einer kurzen Besichtigung des Geländes und einer Ermittlung der besten Aufstellungspositionen wurden die Messbereitschaft des Laserscanners hergestellt sowie insgesamt 31 retroreflektierende Marken (*tiepoints*) am Heidentor sowie an dessen näherer Umgebung angebracht.

Der eigentliche Aufnahmeprozess begann um 10:30 Uhr. Im Vorfeld wurde der Scanbereich stark eingegrenzt, sodass nur das Heidentor und der unmittelbar angrenzende Bereich aufgenommen werden würde. Dies lag zum einen daran, dass für die spätere Rekonstruktion nur dieser Bereich wirklich relevant sein würde, und zum anderen an einer Berücksichtigung der Akkulaufzeit des Scanners, da die Kapazität des Akkus für insgesamt acht Scanneraufstellungen reichen musste. Das vertikale Gesichtsfeld des VZ-6000 beträgt 60° (siehe *Tabelle 8*), wodurch eine entsprechende Entfernung zum Objekt eingehalten werden musste, um dieses vollständig zu erfassen. Diese Entfernung betrug in der Regel rund 30 Meter (siehe *Abbildung 52*), was bei einem Scan mit einer Auflösung von $0,03 \text{ deg}$ in einer Genauigkeit von ca. 1,5 cm resultierte und von der Autorin als akzeptabel erachtet wurde.



Abbildung 52: Aufnahmen mit dem VZ-6000 am Untersuchungsobjekt; Fotos: Tremel 2016

Der Arbeitsablauf gestaltete sich an jedem der acht Scanner-Standpunkte annähernd gleich und lief nach folgendem Schema ab:

- *Scanneraufstellung*: Der Laserscanner wird am vorhin festgelegten Standpunkt annähernd waagrecht aufgestellt und die Pfeiler des ihn tragenden Stativs werden im Boden fixiert.
- *Wahl des Aufnahmebereichs*: Auf dem mit dem Scanner verbundenen Notebook wird das Scanfenster eingeblendet und der Aufnahmebereich genau eingegrenzt.
- *Wahl der Genauigkeit* unter Berücksichtigung der Entfernung zum Objekt, der Modellgenauigkeit in Hinblick auf die spätere Auswertung sowie der Scandauer.
- *(Overview-Scan)*: Hierbei handelt es sich um einen schnellen Überblicksscan mit geringer Auflösung, der zur Kontrolle vor dem eigentlichen Detail-Scan durchgeführt werden kann. Der Overview-Scan kam nicht bei jeder Scanposition zum Einsatz.
- *Detail-Scan*: Die eigentliche Objektaufnahme erfolgt mittels Detailscan in der bereits erwähnten Genauigkeit von rund 1,5 cm. In der Regel nimmt dieser Prozess pro Standpunkt in etwa fünf Minuten in Anspruch. Der mit dem Scanner gekoppelte GPS-Empfänger ermöglicht eine direkte Georeferenzierung.
- *Erstellung der Objekt-Fotos*: Direkt im Anschluss an den Detail-Scan ist es möglich, den gescannten Bereich zu fotografieren. Diese Möglichkeit wurde bei jeder Aufstellung genutzt, wodurch eine Aufnahme von rund 150 Fotos pro Standpunkt erfolgte. Diese Option ermöglicht eine spätere Texturierung des dreidimensionalen Heidentor-Modells.
- *Reflektor-Scan*: In einem letzten Schritt werden die am Objekt angebrachten Reflektor-Marken erfasst, um die Orientierung der einzelnen Scans im Auswerteprozess zu erleichtern.

Pro Aufstellung wurden rund zehn Minuten benötigt, bis sämtliche der oben angeführten Schritte abgeschlossen waren. Die Scannereinstellungen sowie der Start des Scans erfolgten am Notebook, das mit dem Laserscanner verbunden war. Für die Erstellung der Objekt-Fotos musste direkt mit der Benutzeroberfläche des VZ-6000 interagiert werden, da dieser Arbeitsschritt nicht über das Notebook gestartet werden konnte. Während der gesamten Feldarbeit herrschten gute Wetterverhältnisse, was zwar keinen Einfluss auf die Qualität der Scans hatte, aber zu angenehmen Arbeitsbedingungen beitrug. Generell kann an dieser Stelle hervorgehoben werden, dass die Wetterunabhängigkeit des terrestrischen Laserscanners als äußerst positiv zu bewerten ist. Allerdings nutzten viele Personen diesen Tag für eine Besichtigung des Heidentors, wodurch immer wieder laufende Scans abgebrochen werden mussten bzw. der Start eines Scans verzögert wurde. Aus diesem Grund waren die Aufnahmen erst um 13:30 Uhr abgeschlossen. Insgesamt wurde in rund drei Stunden Feldarbeit eine Datenmenge von 840 MB generiert, die es nun in Kapitel 5.3.2 zu verarbeiten gilt.

5.3.2 Auswertung mittels RiSCAN Pro

Die Auswertung der TLS-Daten wurde Ende November bzw. Anfang Dezember 2016 mit der Software RiSCAN Pro durchgeführt. RiSCAN Pro ist ein Produkt der Firma Riegl und kann auch bereits im Feld zur Datenaufnahme in Verbindung mit dem terrestrischen Laserscanner verwendet werden. Das Interface ist modular aufgebaut; eine Anpassung an die Bedürfnisse des Nutzers ist somit leicht möglich. *Abbildung 53* zeigt die Benutzeroberfläche von RiSCAN Pro mit jenen Elementen, die von der Autorin genutzt wurden.

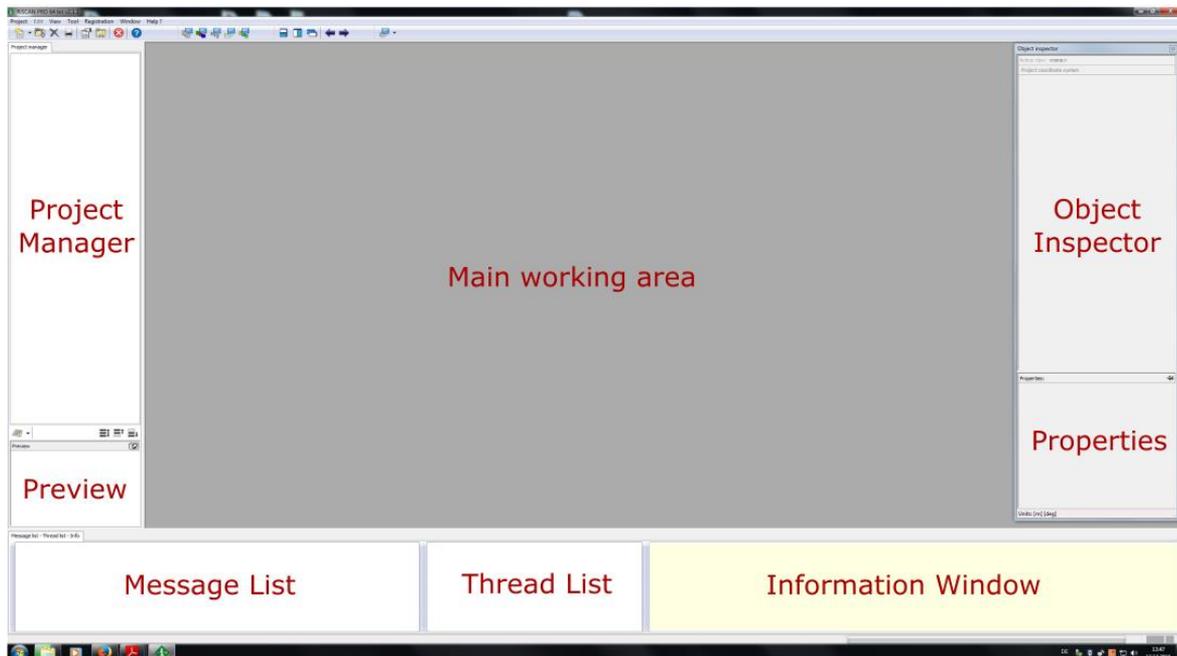


Abbildung 53: Die Benutzeroberfläche von RiSCAN Pro

- *Project Manager*: In diesem Bereich wird das aktuelle Projekt mit all seinen dazugehörigen Elementen (Calibrations, Scans, Views, Objects etc.) angezeigt. Hier werden alle zu bearbeitenden Objekte ausgewählt. Die einzelnen Elemente des Project Managers werden anschließend noch extra behandelt.
- *Preview*: Ist ein Scan ausgewählt, aber noch nicht in den Haupt-Arbeitsbereich in der Mitte des Bildschirms gezogen, so ist in diesem kleinen Fenster eine Vorschau zu sehen, die der Überprüfung dient.
- *Message List/Thread List*: In der Message List werden die einzelnen Arbeitsschritte und etwaige Fehlermeldungen dokumentiert. Die Thread List bietet eine Übersicht über den Fortschritt des aktuellen Arbeitsschritts in Form eines grün bzw. blau gefärbten Ladebalkens.
- *Information Window*: Zeigt Informationen (z.B. Punktdichte, Anzahl der Dreiecke, Größe der Datei etc.) über das aktuell selektierte Objekt an.

- *Main working area:* Arbeitsbereich, in welchem die zu bearbeitenden Objekte abgebildet werden.
- *Object Inspector/Properties:* Der Object Inspector ist die zentrale Schnittstelle zwischen den Elementen eines Projekts und deren Ansicht im Arbeitsbereich. Vom Aufbau ähnelt er dem Project Manager, doch er enthält nur jene Objekte, die bereits dem Arbeitsbereich hinzugefügt wurden. In diesem Bereich ist es möglich, die Objekte zu verwalten: Operationen wie Hinzufügen, Löschen, Suchen und Bearbeiten können hier durchgeführt werden. Im Fenster Properties werden die Eigenschaften (z.B. Farbe, Farbmodus, Sichtbarkeit etc.) des aktuell angewählten Objekts abgebildet.

Zur besseren Anschaulichkeit soll an dieser Stelle der **Project Manager** abgebildet werden, der die Struktur des Heidentor-Projekts enthält. Zusätzlich werden die einzelnen Elemente einer Scanposition aufgeschlüsselt (siehe *Abbildung 54*):

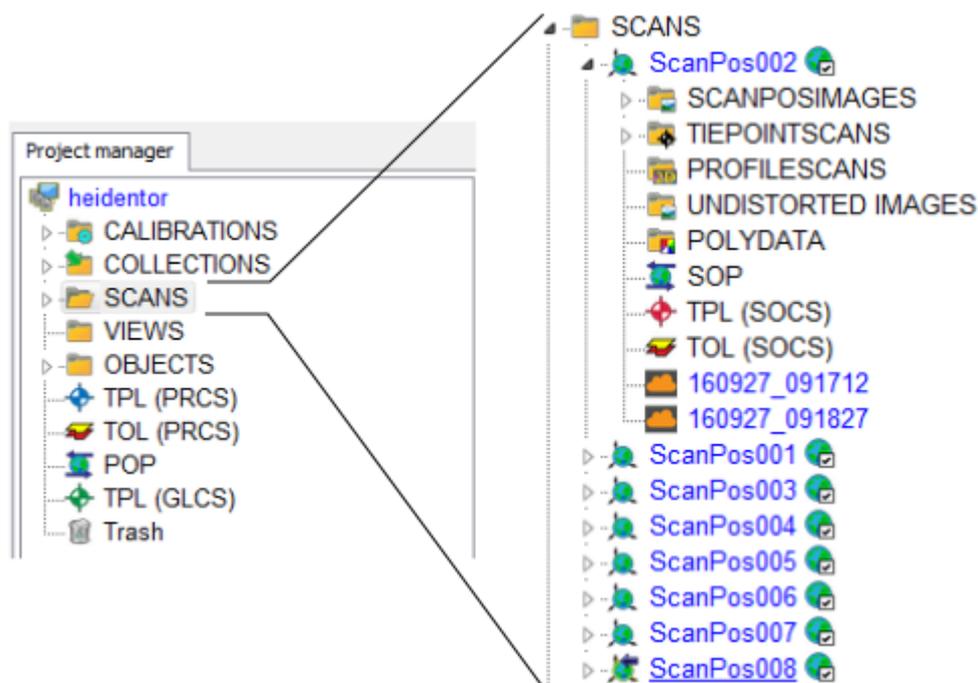


Abbildung 54: Aufbau des Heidentor-Projekts in RiSCAN Pro

Für die Auswertung waren nicht alle Elemente relevant. Aus diesem Grund sollen an dieser Stelle nur die wesentlichen Punkte angeführt werden:

- *Calibrations:* enthält Informationen zur Kamera, dem Mounting und den Reflektoren.
- *Scans:* enthält die acht Scans und ist weiter unterteilt in:
 - Scanposimages:* alle Fotos, die am aktuellen Standpunkt gemacht wurden
 - Tiepointscans:* entspricht dem Reflektor-Scan im Feld und enthält die Scans der Passpunkte
 - Profilescans:* Profilaufnahmen, hier nicht relevant
 - Undistorted Images:* unverzerrte Bilder/Orthophotos, hier nicht relevant

Polydata: z.B. neue, reduzierte Punktwolke nach einem Filtervorgang

SOP: Matrix mit Roll-, Pitch- und Yaw-Werten

TPL (SOCS): Tiepoint (Passpunkt)-Liste des Scannerstandpunkts

TOL (SOCS): Tieobject-Liste des Scannerstandpunkts

Wolkensymbol mit Bezeichnung: enthält die Punktwolke. Die erste Punktwolke bezeichnet den Overview-Scan; in der zweiten Punktwolke ist der hochaufgelöste Detail-Scan enthalten, der für die Auswertung herangezogen wird.

- *Objects*: enthält alle Objekte, die nicht auf eine bestimmte Scanposition bezogen sind, z.B. Punkte, Linien und Polydaten.
- *TPL (PRCS)*: enthält eine Liste jener Tiepoints, die im Projekt-Koordinatensystem vorliegen.
- *TPL (GLCS)*: enthält eine Liste jener Tiepoints, die im globalen Koordinatensystem vorliegen.

Basierend auf diesen Grundlagen kann nun mit der eigentlichen Auswertung begonnen werden. In *Abbildung 54* ist neben den einzelnen Scanpositionen ein kleines Globussymbol mit einem Häkchen zu erkennen. Dies bedeutet, dass der entsprechende Scan zwar bereits georeferenziert wurde (Koppelung von Laserscanner und GPS), sich aber noch in Scanner-Koordinatensystem befindet. In einem ersten Schritt – der **Registrierung** – mussten deshalb die einzelnen Scanner-Standpunkte (siehe *Abbildung 55*) zueinander ausgerichtet werden. Die Globussymbole wurden daher mit der Option „Unregister“ bei sieben Scans entfernt. Die Position des ersten Scanner-Standpunkts „ScanPos002“ wurde als Referenz behalten. An dieser Stelle mag es verwirrend erscheinen, dass mit dieser Nummerierung begonnen wurde. Während der Feldarbeit wurde ScanPos001 zunächst falsch angelegt und nach der Aufnahme wieder gelöscht. Defaultmäßig wurde daher mit der Benennung ScanPos002 fortgesetzt, die nicht mehr rückgängig gemacht werden konnte. Aus diesem Grund handelt es sich bei ScanPos002 tatsächlich um den ersten Scanner-Standpunkt.

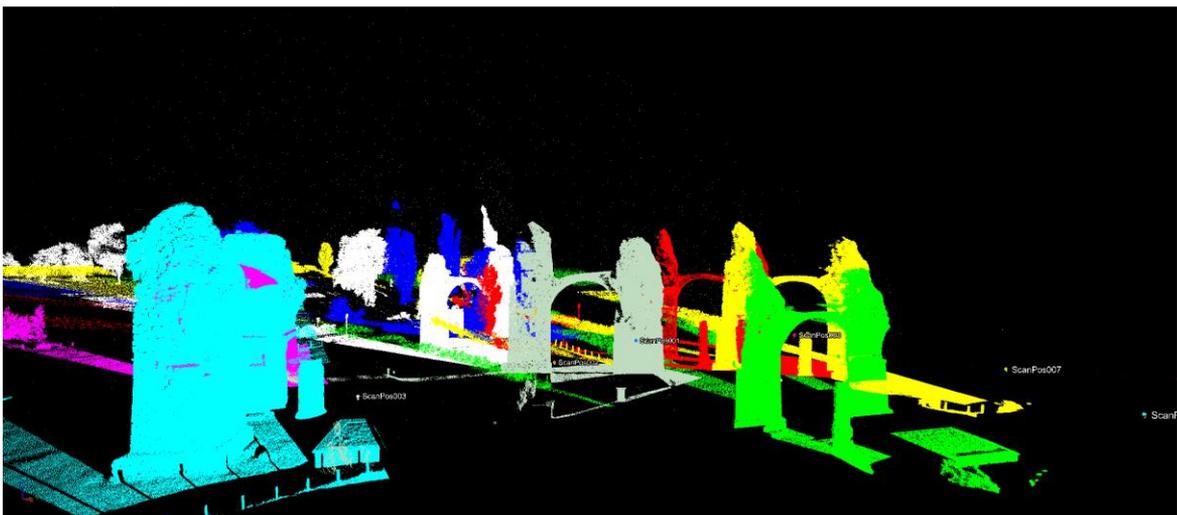


Abbildung 55: Die acht Einzelscans müssen erst zueinander orientiert werden

Um die Scans zueinander auszurichten, bietet RiSCAN Pro verschiedene Registrieroptionen an. Für das Heidentor-Projekt wurden drei verschiedene Registriertechniken angewendet, welche im weiteren Verlauf beschrieben werden:

- Registrierung durch Reflektor-Marken
- Coarse Registration (manuell)
- Multistation Adjustment

Da während der Feldarbeit **Reflektoren** – im Folgenden als Tiepoints bezeichnet – am Objekt angebracht wurden, bot es sich nun an, die einzelnen Scans anhand dieser zusammenzufügen. In RiSCAN wird dazu die Tiepoint-Liste (TPL) des zu registrierenden Scans aufgerufen. Über die Option „Find Corresponding Tiepoints“ werden jene Scanpositionen angewählt, in welchen nach korrespondierenden Tiepoints gesucht werden soll. Diese Methode der Registrierung ist sehr schnell und einfach – wenn denn genug Tiepoints gefunden werden können. Die erste und die zweite Scanposition konnten auf diese Weise zusammengesetzt werden (siehe *Abbildung 56*).

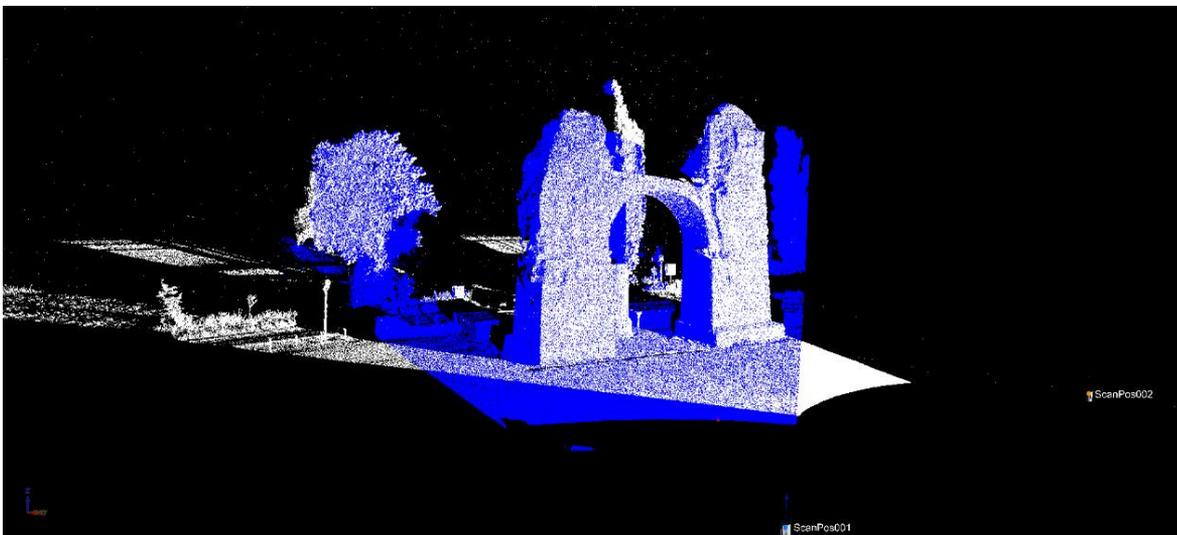


Abbildung 56: ScanPos001 und ScanPos002 werden über die Reflektor-Marken registriert

Ab diesem Zeitpunkt ergab sich unglücklicherweise das Problem, dass die nachfolgenden Standpunkte ScanPos003, ScanPos004 und ScanPos005 zu wenige idente Tiepoints aufwiesen. Obwohl im Feld auf eine ausgewogene und sinnvolle Verteilung geachtet worden war, konnte die Software nicht genug Verknüpfungspunkte erkennen. Eine optimale Verteilung der Reflektor-Marken ist somit alles andere als trivial und vermutlich nur durch ausreichend Praxiserfahrung realisierbar.

Für die erwähnten drei Standpunkte musste daher eine manuelle Registrierung (**Coarse Registration**) durchgeführt werden. Zu diesem Zweck wurden die zwei bereits registrierten Scans in einem so genannten „Polydata-Objekt“ miteinander vereint, das im Folgenden als Referenz dienen sollte. Über den Menüpunkt „Registration → Coarse Registration → Manual“ wurden das Polydata-Objekt und die zu registrierende ScanPos003 in zwei sepa-

raten Views geöffnet. Nun wurde nach identen Objektdetails (z.B. Mauervorsprüngen und Kanten) gesucht, wo anschließend in beiden Ansichten manuell Tiepoints gesetzt wurden (siehe *Abbildung 57*). Dieser Prozess wurde insgesamt vier Mal wiederholt, bevor die Scanposition mittels „Register“-Befehl an dem Polydata-Objekt ausgerichtet wurde.

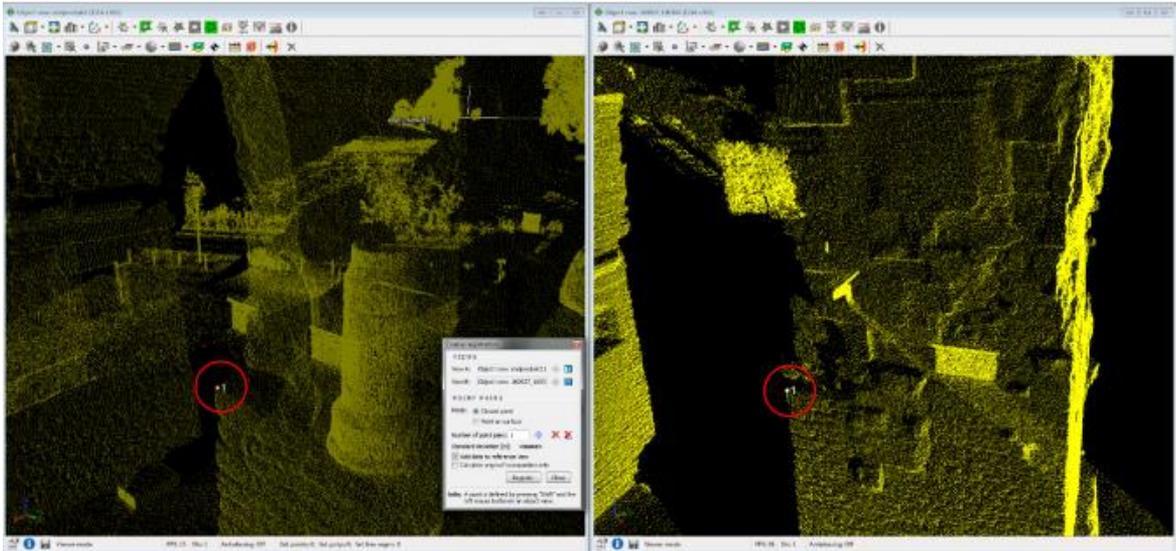


Abbildung 57: Manuelles Setzen von Tiepoints an identen Punkten. Links: bereits registriertes Polydata-Objekt, rechts: zu registrierende ScanPos003

Da diese Technik allerdings noch sehr ungenau ist, musste ein anschließendes **Multistation Adjustment** durchgeführt werden. Das Multistation Adjustment (MSA) ist ein Folgeverfahren des Registrierungsprozesses, das dazu dient, andere (manuelle) Registriermethoden zu verbessern. Verschiedene Objekte (Tiepoints, Tieobjects, Polydaten, bereits registrierte Scanpositionen) sowie zahlreiche Parameter, die vom Nutzer selbst definiert werden können, fließen in das MSA ein und steigern dadurch die Genauigkeit des Ergebnisses.

Wie bereits erwähnt standen nicht genügend Tiepoints zur Verfügung, weshalb manuell mehrere Tieobjects für ScanPos003 erzeugt wurden. Diese erfüllen im Wesentlichen dieselbe Funktion wie Tiepoints, liegen aber auf einer Ebene. In ScanPos003, die gleichzeitig mit dem Polydata-Objekt in denselben View geladen wurde, erfolgte eine Selektion ebener Flächen, die anschließend als Tieobject abgespeichert wurden. Insgesamt wurden vier Objekte erzeugt. Ein gutes Zeichen während dieses Vorganges ist, wenn sich die erstellte Ebene bereits mit den Punktwolken überlagert und zu „flimmern“ beginnt (siehe *Abbildung 58*). Nach der Erstellung der Tieobjects konnten diese in das Multistation Adjustment mit einbezogen werden. Hierzu wurde die Position des ersten Standpunktes (ScanPos002) fixiert und die Option „Use Tiepoints“ sowie „Use Tieobjects“ angewählt. Anschließend erfolgte eine Auswahl des zu registrierenden Scans (ScanPos003). Je nach Bedarf konnte zuerst eine Ergebnisanalyse ausgewählt oder das MSA sofort berechnet werden. Die Betrachtung der Ergebnisanalyse bietet sich an, da bei Bedarf noch Parameter angepasst werden können. Nach Durchführung des MSA ist keine Änderung mehr möglich.

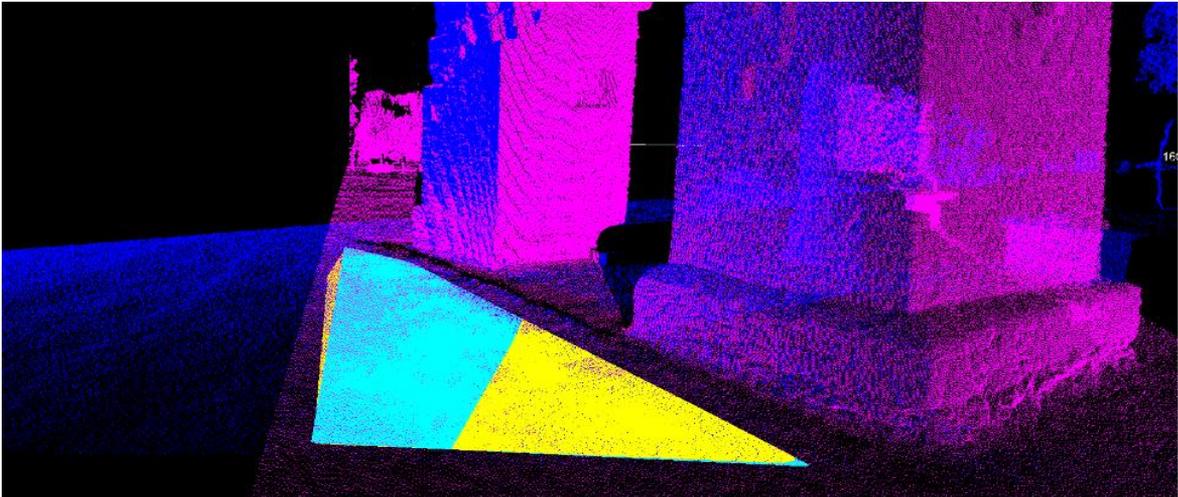


Abbildung 58: Das Durchsimmern der Punktwolke ist ein Zeichen dafür, dass das Tieobject eine hohe Genauigkeit aufweist

Nach dem Abschluss des MSA war auch der dritte Scan registriert. Dasselbe Prinzip – Coarse Registration, Erstellung von Tieobjects und Multistation Adjustment - wurde auch für die Standpunkte ScanPos004 und ScanPos005 angewendet. Im Anschluss daran konnten für die verbliebenen drei Scanpositionen wieder genug korrespondierende Tiepoints gefunden werden, weshalb hier wieder eine Registrierung durch Reflektor-Marken möglich war. In einem finalen Multistation Adjustment wurden nun alle acht Scanpositionen zusammengefügt. Die endgültige Standardabweichung betrug 0,006 m, was als absolut zufriedenstellendes Ergebnis beurteilt werden kann (Abbildung 59). Ein Screenshot der fertig registrierten Scans ist in Abbildung 60 zu sehen.

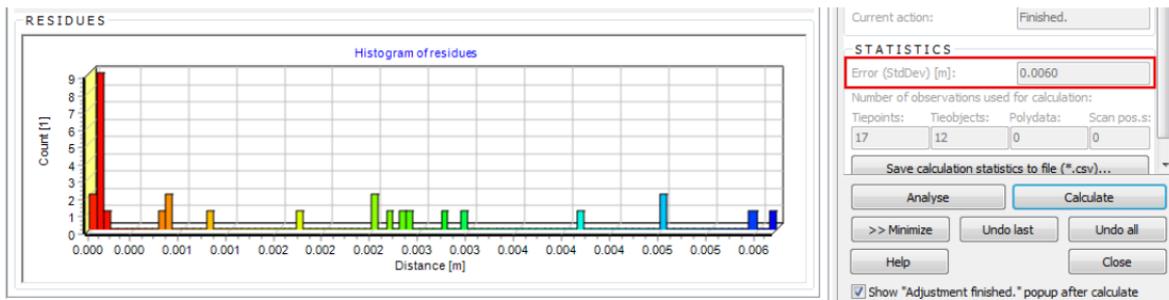


Abbildung 59: Residuenverteilung und Standardabweichung nach finalelem Multistation Adjustment

Nach diesem relativ aufwändigen Schritt konnte mit der **Filterung** der Daten begonnen werden. Es wurde entschieden, dass nur das Heidentor selbst, die Mittelsäule und die beiden Sockelfundamente verbleiben sollten. Die Grundfläche des Endprodukts würde somit annähernd quadratisch sein. RiSCAN bietet eine große Auswahl an Filtermöglichkeiten; das beste Ergebnis wurde aber durch manuelle Filterung erreicht, bei der jene Bereiche, die nicht Teil des Endprodukts sein sollten, selektiert und entfernt wurden. Auf Grund der großen Belastung des Arbeitsspeichers war es allerdings nicht möglich, unerwünschte Bereiche aus der Gesamtpunktwolke zu entfernen, da es in diesem Fall zu einem Absturz der Software kam. Somit wurde jeder Scan einzeln bearbeitet.

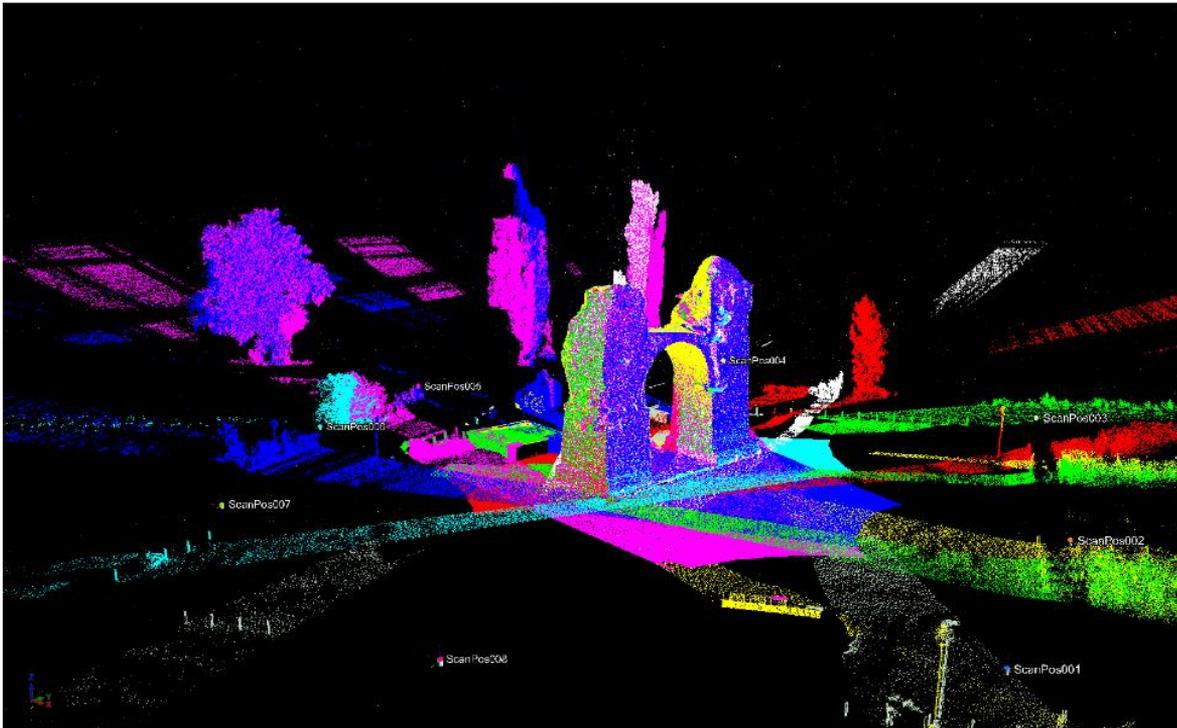


Abbildung 60: Die acht Scanpositionen sind registriert und liegen nun übereinander

Da das Entfernen von Punkten nicht mehr rückgängig gemacht werden kann, wurde zunächst von jeder Scanposition ein Polydata-Objekt (im Wesentlichen eine Kopie der Punktwolke) erzeugt, mit welchem dann weitergearbeitet wurde, um die Originaldaten nicht zu beschädigen. Diese acht Polydata-Objekte erhielten anschließend mit der Option „Color from Images“, die jedem Punkt einen Farbwert aus den aufgenommenen Fotos zuweist, eine realistische Textur. Die Vorwegnahme der Texturierung, die in Kapitel 2.4.3 erst als vorletzter Arbeitsschritt beschrieben wird, hatte den Grund, dass die Selektion des gewünschten Darstellungsbereiches durch realistisch eingefärbte Punktwolken vereinfacht wurde. Allerdings stellte sich heraus, dass bei der Erfassung der Objekt-Fotos im Feld Probleme aufgetaucht waren: ScanPos007 enthielt nur sehr wenig Farbinformation und für ScanPos008 standen gar keine Fotos zur Verfügung, weshalb die Punktwolke vollständig weiß blieb. Da keiner der Scans im Feld abgebrochen werden musste und noch vor Ort kontrolliert wurde, bleibt es unerklärlich, warum dieser Umstand auftreten konnte. Möglicherweise waren beim Datentransfer oder beim Überspielen des Projekts in RiSCAN Probleme aufgetreten. Im Nachhinein zeigte sich, dass das Objekt auch von sechs Standpunkten ausreichend gut erfasst worden war, um in allen Bereichen genügend Farbinformation zu bieten.

Im weiteren Verlauf der Auswertung wurde trotzdem mit allen acht Punktwolken weitergearbeitet. Der Reihe nach wurde jeder Scan in das View-Fenster hineingeladen und mittels einer einfachen Selektion wurden jene Bereiche entfernt, die außerhalb des gewünschten Darstellungsbereiches lagen. Obwohl technisch wenig anspruchsvoll, nahm dieser Schritt mitunter eine lange Zeit in Anspruch, da die Software sehr lange benötigte, um die unerwünschten Punkte zu löschen.

Nachdem alle acht Scans auf diese Weise bearbeitet wurden, konnten sie miteinander zu einem Polydata-Objekt vereint werden, das nun schon auf den wesentlichen Darstellungsbereich reduziert war. Einige wenige Ausreißer wurden noch entfernt, bis die Gesamtpunktwolke schlussendlich den Wünschen der Autorin entsprach. Auf Grund der Tatsache, dass zwei Scans nur über wenig bzw. keine Farbinformation verfügten, war das Modell durch zahlreiche weiße Punkte gekennzeichnet. *Abbildung 61* zeigt einen Vergleich des Heidentor-Modells, wenn alle acht Scans oder nur sechs Scans in der Gesamtpunktwolke berücksichtigt werden. Liegt der Fokus auf einer realistischen Darstellung, so bietet sich Zweiteres an, da das Tor vollständig abgebildet wird. Ist für eine etwaige Weiterverarbeitung der Daten keine Farbinformation notwendig, so empfiehlt es sich selbstverständlich, alle acht Scans in das Projekt mit einzubeziehen. Auf Grund der besseren Anschaulichkeit wurde ab diesem Zeitpunkt nur noch mit dem aus sechs Punktwolken bestehenden Modell (in der Abbildung rechts) fortgeföhren.

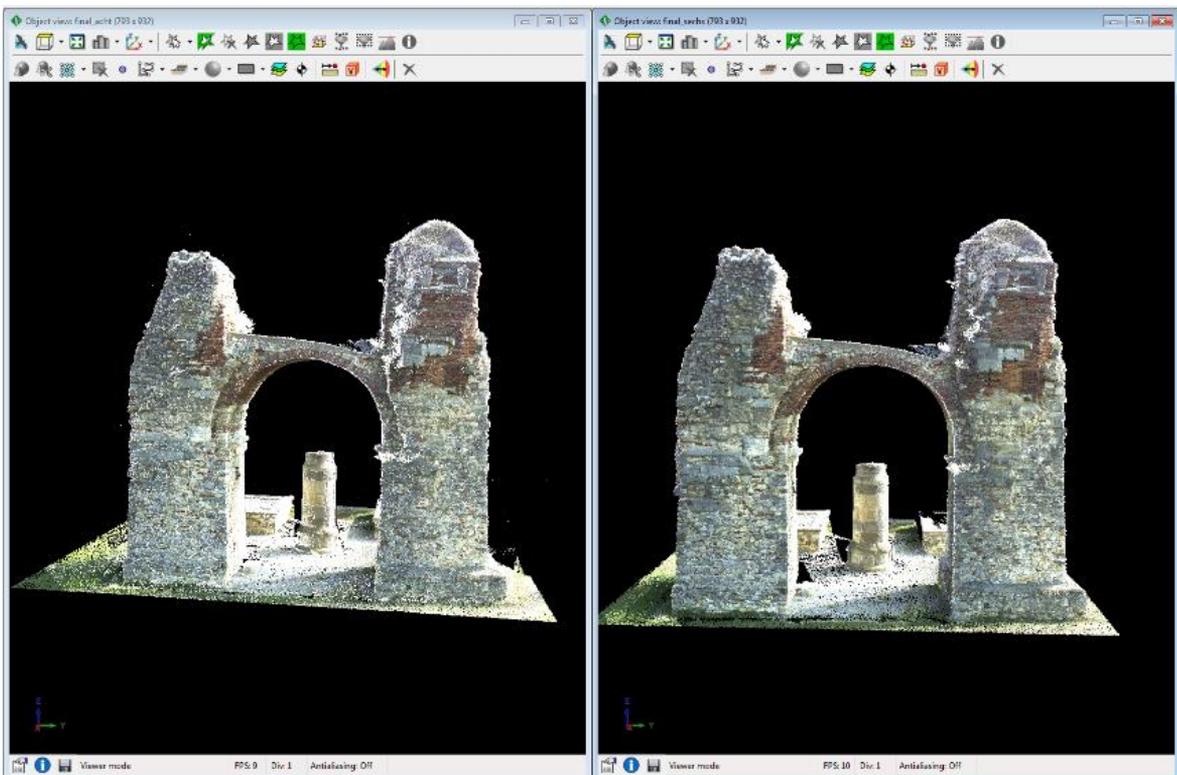


Abbildung 61: Die Gesamtpunktwolke des Heidentors, bestehend aus acht Scans (links) bzw. sechs Scans (rechts). Das linke Modell weist zahlreiche weiße Einsprengsel auf.

Wie in *Abbildung 61* außerdem zu erkennen ist, gibt es über dem linken Ende des Torbogens, wo dieser in den Pfeiler übergeht, einen weißen Bereich. Dabei handelt es sich um mehrere Grasbüschel, die nach Zusammenfügen der Einzelscans ebenfalls noch selektiert und entfernt wurde. Das fertige Modell, das aus insgesamt sechs Scans besteht, realistisch eingefärbt und auf den wesentlichen Darstellungsbereich reduziert wurde, ist in *Abbildung 62* zu sehen. Auf eine Vermaschung, wie sie in Kapitel 2.4.3 beschrieben wurde, musste in diesem Fall verzichtet werden, da sich der Triangulierungs-Algorithmus von RiSCAN für diesen Arbeitsschritt als nicht geeignet erwies.



Abbildung 62: Das fertige Modell des Heidentors, erstellt mit RiSCAN Pro

Das fertige Modell besteht aus insgesamt 4.160.000 Punkten. Bereiche, in denen Fehler bzw. Lücken in der Punktwolke auftraten, waren – wie vermutet – an der Oberseite der Pfeiler sowie an der Oberseite des Bogens zu finden (eine ausführlichere Diskussion dieser „Problemzonen“ ist in Kapitel 6.1.3 angeführt). Letzterer wurde außerdem nicht zu 100% korrekt übernommen, was in *Abbildung 62* an jener Stelle zu erkennen ist, wo der Bogen in den rechten Pfeiler übergeht. Ansonsten konnten das Heidentor sowie die Mittelsäule lückenlos erfasst werden. Durch die sehr hohe Punktdichte erhielt das Objekt ein sehr realistisches Aussehen und erst bei einer hohen Zoomstufe waren die einzelnen Punkte zu erkennen.

Insgesamt war die Auswertung der TLS-Daten mit einem Arbeitsaufwand von rund 30 Stunden verbunden. Zusätzlich entfielen auch einige Stunden auf die Einarbeitung in RiSCAN Pro, da es sich um eine sehr komplexe Software handelt, die wenig intuitiv ist und ein relativ großes Vorwissen des Nutzers erfordert. Glücklicherweise erhielt die Autorin an dieser Stelle Hilfe von Mag. Michael Holzapfel und Ing. Bernhard Groiss, was diesen Schritt etwas einfacher machte. Dennoch stellte vor allem der Prozess der Registrierung die Autorin immer wieder vor Herausforderungen. Im Zuge der Auswertung konnte außerdem die Erkenntnis gewonnen werden, dass korrektes Arbeiten im Feld (bezogen auf die ungünstig gesetzten Reflektor-Marken und die Tatsache, dass zwei Scans kaum bzw. keine Farbinformation enthielten) eine immens hohe Bedeutung auf Vollständigkeit des Endmodells hat. Letztere wurde trotz einiger Fehler dennoch eindeutig als ausreichend befunden.

5.4 Messungen mit dem UAV: Feldarbeit und Auswertung

Analog zu Kapitel 5.3, das sich auf die Arbeiten mit dem terrestrischen Laserscanner fokussierte, widmet sich dieser Teil der Arbeit nun den Messungen mit dem DJI Phantom 3 Professional. Auch hier werden Feldarbeit und Auswertung in jeweils ein Unterkapitel aufgeteilt.

5.4.1 Feldarbeit

Der UAV-Bildflug fand bereits einige Tage vor den Laserscanner-Aufnahmen statt. Am 22. September 2016 traf sich die Autorin mit Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl, der sich als Multikopter-Pilot zur Verfügung gestellt hatte, am vereinbarten Treffpunkt vor dem Carnuntiner Archäologiepark. Nach einer kurzen Fahrt zum Untersuchungsobjekt konnten die Arbeiten um ca. 10 Uhr vormittags gestartet werden.

Zunächst erfolgte eine Montage des Quadropters, im Zuge derer die vier Propeller befestigt wurden. Danach wurde die Verbindung zwischen UAV und Fernsteuerung über WLAN hergestellt, wobei dieser Prozess eine Weile dauerte und ein Neustart des Geräts erforderlich war. Nach kurzer Zeit war die Flugbereitschaft jedoch gegeben und der Bildflug konnte gestartet werden (siehe *Abbildung 63*). Da die zwei mitgebrachten Akkus eine maximale Flugzeit von insgesamt 40 Minuten erlaubten, war die Aufnahmezeit dementsprechend begrenzt.



Abbildung 63: DJI Phantom 3 Professional mit Fernsteuerung (links) und während des Bildflugs (rechts); Fotos: Tremel 2016

Während des ersten Bildfluges wurde das Heidedorf in einer Höhe von etwas mehr als 10 m und einer Entfernung von 20-25 m umkreist. Es wurde festgelegt, dass zunächst jede Aufnahme das gesamte Heidedorf abbilden sollte – der zweite Akku würde anschließend für Detailaufnahmen genutzt werden. Jedes Foto wurde von der fix am Quadropters befestigten Kamera Sony EXMOR aufgenommen, wobei die Aufnahme händisch am Touch-

pad der Fernbedienung ausgelöst wurde. Da der Phantom 3 Professional über einen integrierten GPS-Sensor verfügt, war eine direkte Georeferenzierung der Bilder gegeben.

Wie auch während der Laserscanner-Aufnahmen herrschte während der Feldarbeit mit dem UAV mildes, sehr sonniges Wetter ohne jegliche Wolkenbedeckung. Dieser Umstand erwies sich als relativ problematisch, da sich die starke Sonneneinstrahlung in den Bildern widerspiegelte und somit negative Auswirkungen auf die Modellrekonstruktion haben würde. Aus diesem Grund wurden die Aufnahmeeinstellungen während des Bildfluges regelmäßig und so gut als möglich angepasst, um den störenden Lichteinfluss zu minimieren. Auch der in der Region immer sehr präsente, mitunter starke Wind kam als erschwerender Faktor bei der Steuerung des Quadropters hinzu.

Nachdem die ersten 20 Minuten verstrichen waren, war das Heidtor zum ersten Mal umkreist und der Akku wurde gewechselt. Während des zweiten Bildfluges erfolgte der Fokus vor allem auf dem Torbogen (was in einer größeren Flughöhe resultierte) sowie auf den Objektdetails und Texturen, wobei die Entfernung zum Objekt verringert wurde. In einem letzten Schritt wurde die Innenseite des Bogens, die nicht mit dem UAV angefliegen werden konnte, händisch aufgenommen.

Insgesamt entstanden somit während rund 40 Minuten Flugzeit 58 Bilder mit einer Datenmenge von 218 MB. Eine Auswahl davon ist in *Abbildung 64* zu sehen. Abgesehen von den schlechten Lichtverhältnissen wurden die Aufnahmen durch keine anderen störenden Faktoren (Personen, Fahrzeuge etc.) behindert.



Abbildung 64: Ergebnisse des UAV-Bildfluges mit dem DJI Phantom 3 Professional; Fotos: Riedl 2016

5.4.2 Auswertung mittels Agisoft PhotoScan

Bevor mit der eigentlichen Auswertung begonnen werden konnte, war eine umfangreiche Durchsicht und Bearbeitung der 58 gewonnenen Aufnahmen erforderlich. Ein Bild, das unmittelbar vor dem Start des Bildflugs aufgenommen wurde und hauptsächlich die Wiese vor dem Heidentor beinhaltete, wurde entfernt. Dementsprechend standen insgesamt 57 Bilder für die Erstellung des Modells zur Verfügung.

Da – wie bereits erwähnt – zum Zeitpunkt der Aufnahme sehr ungünstige Lichtverhältnisse herrschten, erfolgte eine Bearbeitung der Bilder in Adobe Photoshop, bei der jedes einzelne Bild überprüft und bestmöglich angepasst wurde. Vor allem Helligkeits- und Kontrastparameter wurden je nach Bedarf verändert. In *Abbildung 65* ist eine der Aufnahmen vor und nach der Bearbeitung in Photoshop zu sehen. In diesem Beispiel wurde die Helligkeit vermindert, der Kontrast erhöht, der Belichtungsparameter leicht negativ gesetzt und ein Gammawert etwas kleiner als eins gewählt. Das Ziel dieser Bildbearbeitung war es, die Belichtungsverhältnisse aller Aufnahmen so gut wie möglich aneinander anzugleichen ohne dass zu viel Bildinformation verloren ging. Nach der Bearbeitung wurden die im Datenformat .jpeg vorliegenden Bilder deshalb in der höchstmöglichen Auflösung abgespeichert. Der gesamte Bearbeitungsprozess nahm in etwa vier Stunden in Anspruch.



Abbildung 65: Originalaufnahme (links) und in Photoshop bearbeitete Aufnahme (rechts)

Im Anschluss an diese vorbereitenden Maßnahmen wurde mit der Datenauswertung in Agisoft PhotoScan (64-bit Professional Version) gestartet. Das dieser Software zugrunde liegende Interface (siehe *Abbildung 66*) soll, angelehnt an das offizielle Manual [AGI-16], im Folgenden kurz beschrieben werden.

- *Toolbar*: ist einfach und übersichtlich aufgebaut und besteht im Wesentlichen aus den Optionen *File*, *Edit*, *Workflow*, *Tools*, *Photo* und *Help*. Für die Erstellung des Heidentor-Modells war vor allem die Option *Workflow* von essentieller Bedeutung.
- *Workspace/Reference*: Als Default-Einstellung ist der *Workspace* zu sehen, in welchem die einzelnen Elemente des aktuellen Projekts (z.B. Fotos, Punktwolken, Passpunkte, fertige Modelle etc.) abgebildet sind. Das Fenster *Reference* dient zur Darstellung der Bild- und Passpunktkoordinaten, der Kameraorientierung und der Genauigkeiten bzw. Lagefehler.

- *Model*: In diesem Fenster können die dreidimensionalen Daten betrachtet werden. Welche Daten abgebildet sind, hängt vom momentanen Projektfortschritt ab. Dementsprechend beinhaltet dieser Viewer dünne und dichte Punktwolken, Meshes und fertige Ergebnisse (texturierte Modelle, DGMs, Orthophotos etc.). Die Navigation ist anhand von drei Achsen möglich.
- *Photos/Console*: Seinem Namen entsprechend werden im *Photos*-Bereich die einzelnen Bilder und etwaige Maskierungen aufgelistet. Dieser Bereich dient zur Übersicht; die einzelnen Bilder können gedreht und skaliert werden. Das *Console*-Fenster stellt im Wesentlichen das Logbuch der Software dar. Hier werden die einzelnen Arbeitsschritte dokumentiert und Fehlermeldungen angezeigt. Wird mit Python gearbeitet, so dient dieser Bereich als Input für die Befehle.

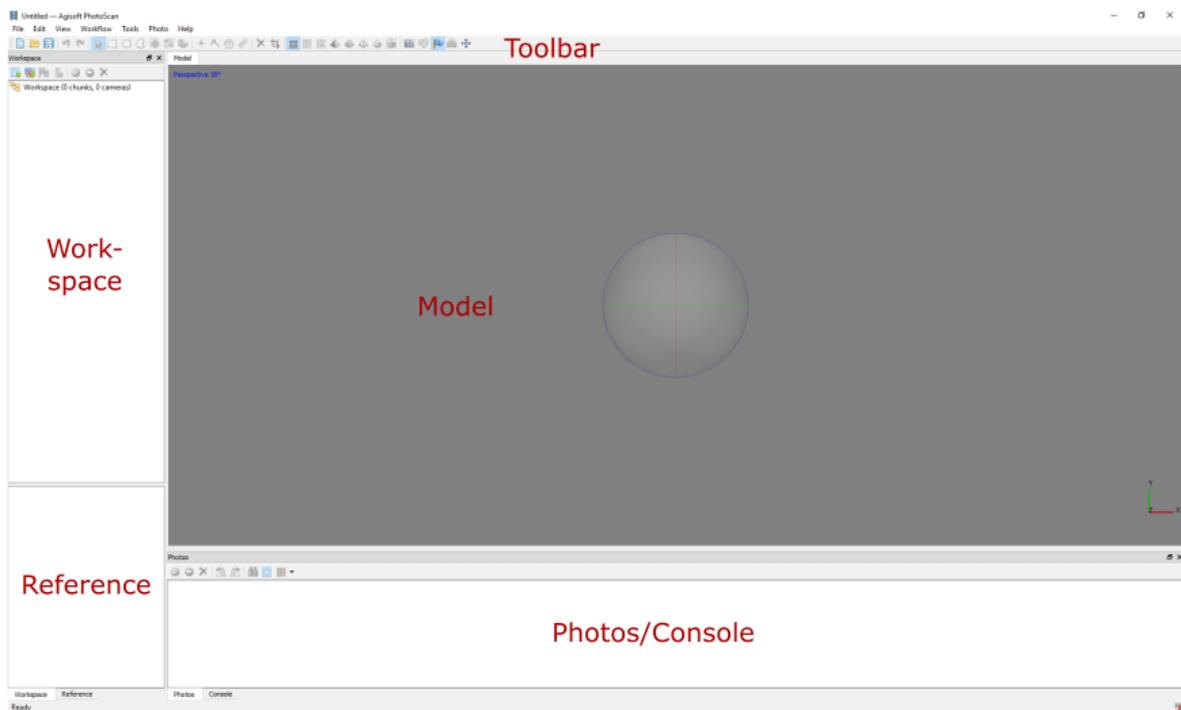


Abbildung 66: Das Interface von Agisoft PhotoScan

Agisoft PhotoScan (im Folgenden kurz als Agisoft bezeichnet) besticht vor allem durch die einfache Handhabbarkeit und eine gute Übersicht des Workflows, weshalb diese Software für die Aufgabenstellung der Masterarbeit als ideal erachtet wurde. Dennoch gibt es einige wesentliche Nachteile, die in Kapitel 6.1.3 noch genauer diskutiert werden. Die folgenden Seiten sind nun jedoch der Datenauswertung und der Erstellung des dreidimensionalen Heidentor-Modells aus UAV-Aufnahmen gewidmet. Die Autorin versuchte dabei, sich so gut wie möglich an den in *Abbildung 31* dargestellten Workflow zu halten.

Mit einem Klick auf die Option *Workflow* in der *Toolbar* wurden zunächst die 57 bearbeiteten Bilder in die Software importiert. Diese waren nun im *Workspace* in einem so genannten „Chunk“ abgespeichert. Um sicherzugehen, dass wirklich nur brauchbare Bilder für die Erstellung des Modells genutzt wurden, wurden im *Photos*-Bereich die Bildeigen-

schaften betrachtet und die Qualität der Aufnahmen berechnet. Bei einem Wert unter 0,5 empfehlen die Hersteller der Software, die entsprechenden Bilder aus dem Workflow zu entfernen [AGI-16]. Dies war jedoch nicht notwendig, da sämtliche Werte zwischen 0,80 und 1,29 angesiedelt waren.

Im nächsten Schritt erfolgte die **Ausrichtung** der Fotos mit Hilfe des Structure from Motion-Algorithmus. Agisoft berechnet an dieser Stelle die Kameraposition bzw. Orientierung jeder Aufnahme und generiert daraufhin eine dünne Punktwolke (*sparse point cloud*). Dabei wurde mit den in *Abbildung 67* ersichtlichen Einstellungen gearbeitet:

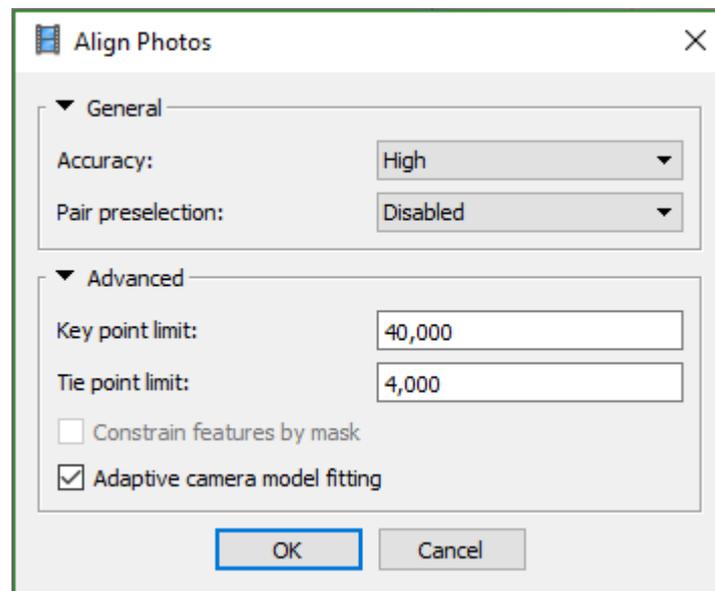


Abbildung 67: Gewählte Parameter für die Berechnung der dünnen Punktwolke

Accuracy: Bei nahezu jedem Arbeitsschritt im Workflow kann zwischen fünf verschiedenen Genauigkeitsstufen gewählt werden, die die Qualität des Modells dementsprechend beeinflussen. Die Rechenzeit und die Belastung des Arbeitsspeichers steigen pro höherer Stufe sehr stark an. Für das Heidentor-Projekt wurde mit „High“ die zweithöchste Genauigkeitsstufe gewählt, da dies für einen guten Kompromiss gehalten wurde.

Pair preselection: Da die Ausrichtung der Fotos mitunter eine lange Zeit beansprucht, ist es möglich, die Rechendauer durch diese Option etwas zu verkürzen. Dabei kann zwischen dem „Generic“- und dem „Reference“-Modus unterschieden werden: „*In the Generic preselection mode the overlapping pairs of photos are selected by matching photos using lower accuracy setting first. In the Reference preselection mode the overlapping pairs of photos are selected based on the measured camera locations*“ [AGI-16: 13]. Da die *Pair preselection* allerdings negative Auswirkungen auf die Qualität des Modells hat, wurde sie hier deaktiviert.

Key point limit/Tie point limit: Agisoft sucht während der Ausrichtung nach gleichen Punkten in den einzelnen Bildern. Die maximalen Schwellenwerte können in dieser Option eingestellt werden und wurden basierend auf Empfehlungen der Hersteller ausgewählt.

Die Option *Adaptive camera model fitting* ist defaultmäßig angewählt und wurde auch so belassen. Nach diesen Einstellungen und rund zwanzig Minuten Rechenzeit waren die Bilder zueinander ausgerichtet und die dünne Punktwolke, die knapp 54.000 Punkte umfasste, konnte betrachtet werden (siehe *Abbildung 68*). Agisoft bietet auch die Möglichkeit, die Kameraposition jeder einzelnen Aufnahme anzuzeigen, um diese nach Bedarf noch zu verändern (siehe *Abbildung 69*). Dadurch, dass der im Feld verwendete Multikopter bereits mit GPS-Verbindung ausgestattet war und auch sonst keine Aufnahmefehler aufgetreten waren, musste in diesem Fall nichts mehr korrigiert werden.



Abbildung 68: Ergebnis der Foto-Ausrichtung: Eine dünne Punktwolke des Heidentors

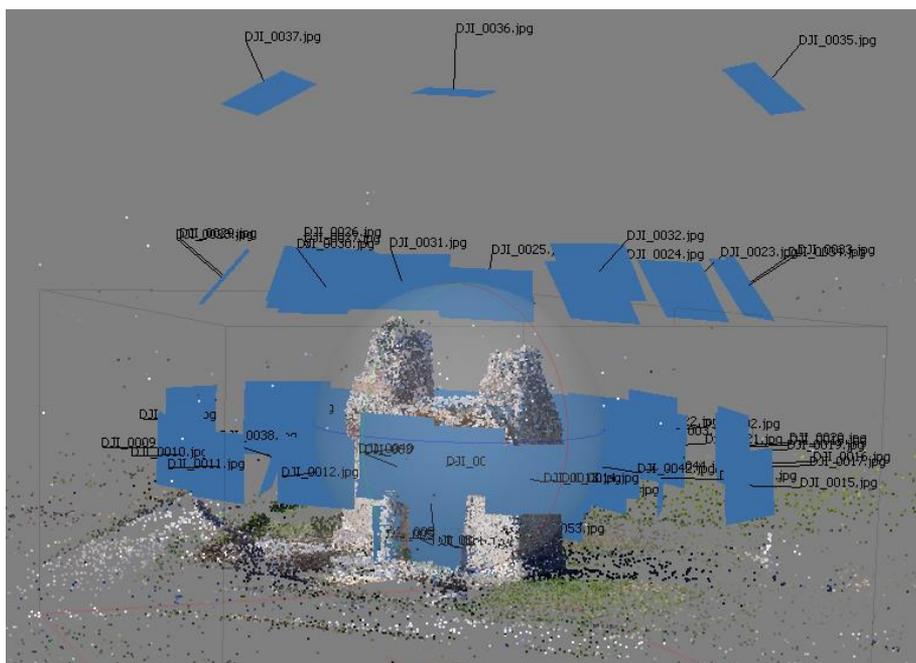


Abbildung 69: Zur Kontrolle kann die Position jedes einzelnen Fotos angezeigt werden

Im Gegensatz zu RiSCAN Pro bietet Agisoft keine Möglichkeit, die Punktwolke manuell zu filtern. Allerdings kann ein Arbeitsbereich definiert werden, der so angelegt wird, dass nur die Punkte innerhalb dieses Bereichs für die weitere Verarbeitung berücksichtigt werden. Auf diese Weise ist es möglich, bereits zu diesem Zeitpunkt einen Großteil der unerwünschten Punkte zu entfernen. Der Arbeitsbereich wurde annähernd würfelförmig auf das Heidentor, die Mittelsäule und die beiden Sockel eingegrenzt.

Der nächste Schritt im Workflow war die **Berechnung der dichten Punktwolke** (*dense point cloud*). In diesem Schritt mussten nur zwei Parameter festgelegt werden. Der Parameter *Accuracy* wurde abermals auf „High“ eingestellt. Für den erweiterten Parameter *Depth filtering* wurde der Modus „Aggressive“ gewählt, der allgemein für Luftbild-Aufnahmen empfohlen wird [AGI-16] und die meisten Ausreißer aus der Punktwolke (innerhalb des Arbeitsbereichs) entfernt. Mit rund 40 Minuten Rechenzeit stellte dieser Schritt den zeitintensivsten Abschnitt in der Auswertung dar. In *Abbildung 70* ist das Heidentor als dichte Punktwolke zu sehen, wobei zu erkennen ist, dass die Punkte nur mehr im festgelegten Arbeitsbereich auftreten. Das Modell, das nach dem *Dense Image Matching* (DIM) entstand, setzt sich nun aus ganzen 6,4 Mio. Punkten zusammen.

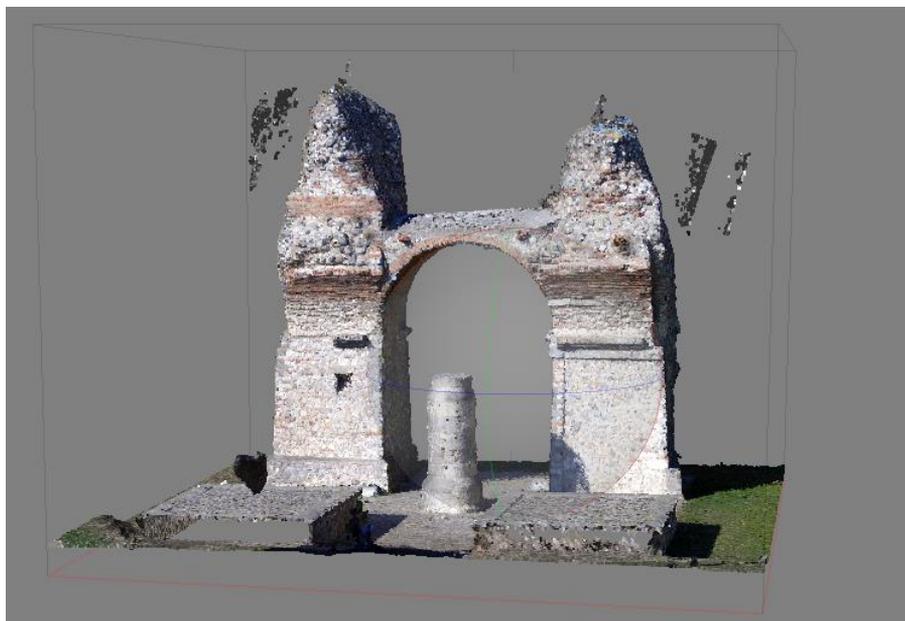


Abbildung 70: Die dichte Punktwolke des Heidentors in Agisoft PhotoScan

Wie in *Abbildung 70* leicht festgestellt werden kann, gab es innerhalb der dichten Punktwolke immer noch fehlerhafte Bereiche. Diese Zonen entstanden im Zuge des DIM und traten vor allem im obersten Drittel der beiden Pfeiler auf. Durch eine manuelle Selektion wurden die überflüssigen Punkte eliminiert. Anders als bei RiSCAN war dieser Prozess nicht mit langen Wartezeiten verbunden; das Herausschneiden der Punkte nahm somit nur kurze Zeit in Anspruch und konnte bei Bedarf auch rückgängig gemacht werden. Allerdings gestaltete sich das Navigieren innerhalb der Punktwolke mit einem hohen Zoomfaktor als relativ schwierig. Dem Entfernen von Einzelpunkten ging oftmals ein Herumprobieren mit den drei Achsen voraus, um nicht versehentlich falsche Bereiche zu selektieren.

Auch war nach diesem Schritt bereits zu erkennen, dass die starke Belichtung der Bilder trotz Nachbearbeitung einen negativen Einfluss auf die Textur des Endmodells haben würde. Dieses Problem wäre nur noch durch eine Wiederholung des Bildfluges unter besseren Witterungsbedingungen zu beheben gewesen.

Im nächsten Abschnitt wurde die **Vermaschung** der dichten Punktwolke vorgenommen. Wie auch in den anderen Schritten zuvor wurde diese Option von Agisoft vorgegeben und konnte anhand mehrerer Parameter spezifiziert werden (siehe *Abbildung 71*):

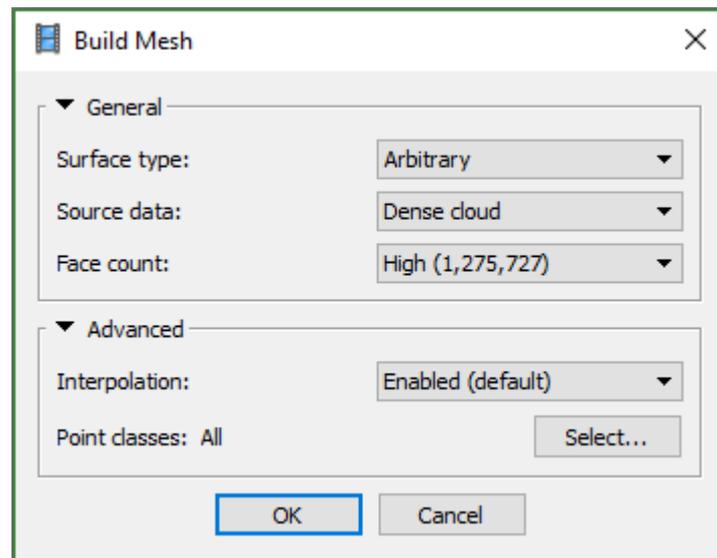


Abbildung 71: Gewählte Parameter für die Vermaschung der dichten Punktwolke

Surface type: Hier kann zwischen den Optionen „Arbitrary“ und „Height Field“ unterschieden werden. Da sich „Height Field“ vor allem für ebene Oberflächen sowie großflächige Geländeaufnahmen eignet und „Arbitrary“ von den Herstellern für die Rekonstruktion von Gebäuden und Einzelobjekten empfohlen wird [AGI-16], fiel die Entscheidung leicht.

Source data: Als Input zur Mesh-Erzeugung kann die dünne oder dichte Punktwolke definiert werden; für dieses Projekt wurde letzteres gewählt.

Face count: Dieser Parameter gibt die Anzahl der Polygone im fertigen Mesh wieder, wobei sich der Nutzer für „High“, „Medium“, „Low“ oder „Custom“ entscheiden kann. Da der *Face count* den Genauigkeitsgrad des fertigen Modells beeinflusst, wurde eine hohe Polygonanzahl gewählt.

Interpolation: Ist eine Interpolation erlaubt, so wird die Füllung von Datenlücken unterstützt. Da diese vor allem im Bereich der Sockel zu finden waren, wurde die Entscheidung zugunsten der Interpolation getroffen. Agisoft bietet überdies die Möglichkeit, diesen Parameter abzuwählen („Disabled“), was meist in einer manuellen Füllung der Datenlücken resultiert, bzw. das Modell zu extrapolieren („Extrapolated“), wodurch ein lückenloses Modell mit zusätzlicher Geometrie entsteht [ebd.].

Point classes: In diesem Fall flossen sämtliche Punkte der dichten Punktwolke in die Vermaschung ein. Es wäre möglich, im Vorfeld Punktclassen zu definieren, um beispielsweise zwischen Digitalem Gelände- und Digitalem Oberflächenmodell unterscheiden zu können. Für das vorliegende Beispiel war diese Option jedoch nicht von Bedeutung.

Nach nur fünf Minuten Rechenzeit entstand das Mesh, in welchem bereits sämtliche Datenlücken geschlossen waren. Das fertige Polygonnetz konnte bereits mit einer voreingestellten, niedrig aufgelösten Textur oder als trianguliertes Netz betrachtet werden. *Abbildung 72* zeigt diese Optionen beispielhaft für die Mittelsäule vor dem Heidentor.

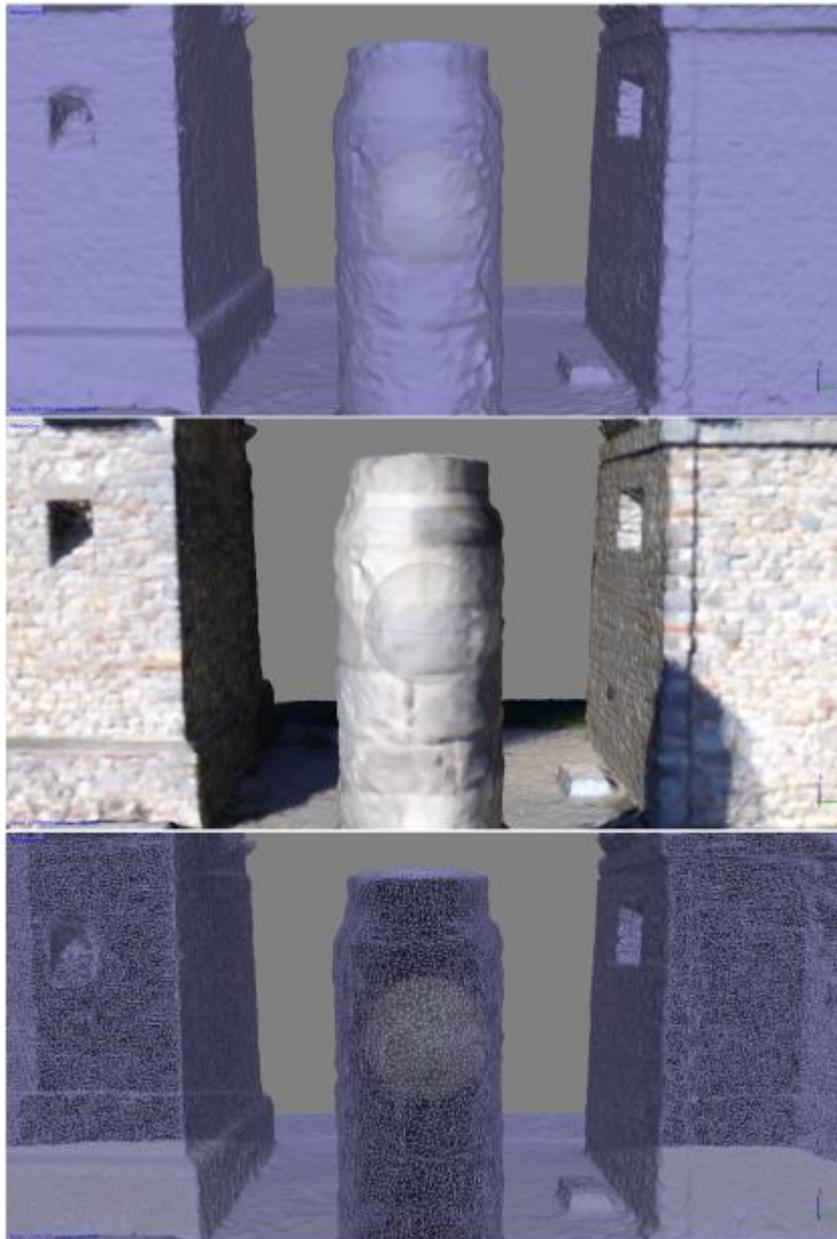


Abbildung 72: Fertiges Mesh der Mittelsäule (oben) mit vordefinierter Textur im "Shaded"-Modus (Mitte) sowie als trianguliertes Netz im "Wireframe"-Modus (rechts)

Um dem Modell noch ein realistisches Aussehen zu verleihen, wurde als abschließender Schritt die **Texturierung** des Heidentors durchgeführt. Zur leichteren Nachvollziehbarkeit sollen auch in diesem Fall die gewählten Parameter kurz beschrieben werden (siehe *Abbildung 73*).

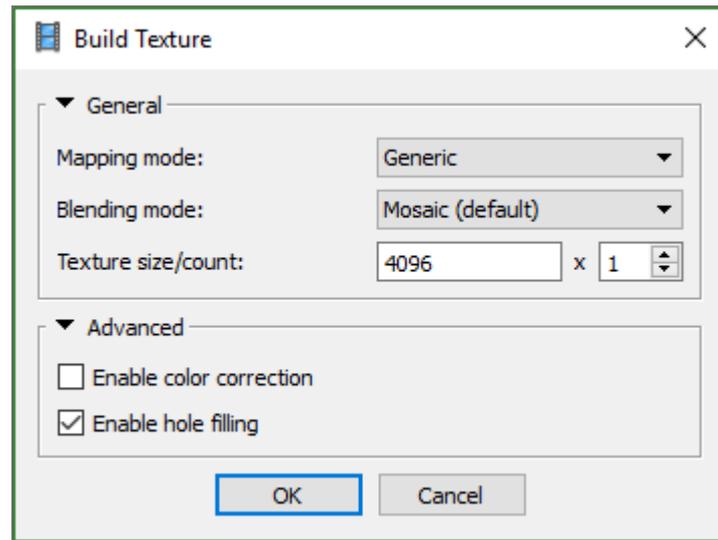


Abbildung 73: Gewählte Parameter für die Texturierung des Meshes

Mapping mode: Hier kann zwischen den Optionen „Generic“, „Adaptive Orthophoto“, „Orthophoto“, „Spherical“ und „Single Photo“ gewählt werden. „Adaptive Orthophoto“ berücksichtigt im Gegensatz zu „Orthophoto“ auch senkrechte Flächen; für einfache Gebäude wurde aber die Option „Generic“ empfohlen [AGI-16]. „Spherical“ dient vor allem zur Texturierung von runden Objekten und bei „Single Photo“ wird nur eine einzige Aufnahme verwendet.

Blending mode: Dieser Parameter beschreibt die Art und Weise, wie die Pixel der einzelnen Fotos für die fertige Textur kombiniert werden. Bei „Mosaic“ handelt es sich um die Default-Einstellung, die folgendermaßen vorgeht: „*Mosaic implies two-step approach: it does blending of low frequency component for overlapping images to avoid seamline problem [...], while high frequency component, that is in charge of picture details, is taken from a single image – the one that presents good resolution for the area of interest while the camera view is almost along the normal to the reconstructed surface of that point*“ [AGI-16: 18]. Weitere Optionen arbeiten mit den Durchschnitts-, Maximal- oder Minimalwerten der Pixel; außerdem ist es möglich, den *Blending mode* zu deaktivieren.

Texture size/count: Gibt die Größe der Textur in Pixeln an und legt fest, in wie viele Dateien die fertigen Texturen exportiert werden. Um eine Belastung des Arbeitsspeichers zu vermeiden, kann die Anzahl der Export-Dateien erhöht werden.

Enable color correction/hole filling: Zuerst wurde eine Farbkorrektur angewählt, um zu sehen, ob diese das Ergebnis verbessern würde. Da eher das Gegenteil eintrat, wurde diese Option deaktiviert. Das Füllen von eventuellen Lücken wurde zugelassen.

Der Prozess der Texturierung nahm nicht viel Zeit in Anspruch und war nach wenigen Minuten abgeschlossen. Das Endergebnis ist in *Abbildung 74* zu sehen.



Abbildung 74: Das fertige Modell des Heidentors, erstellt mit Agisoft PhotoScan

Für das erstellte Modell stand nun eine Vielzahl von Exportoptionen (u.a. im VRML-, COLLADA- oder KMZ-Format) zur Verfügung, um das Heidentor beispielsweise in unterschiedlichen Viewern zu betrachten oder in Softwares wie Autodesk weiterzubearbeiten. Auch ein Export der Punktwolke in verschiedenen Qualitätsstufen war möglich.

Das in Agisoft erstellte Heidentor-Modell wies keine Datenlücken mehr auf und wurde in den meisten Bereichen auch fehlerlos erfasst. Im Gegensatz zu den TLS-Daten ermöglichten die UAV-Aufnahmen eine komplette Darstellung der Oberseite des Tors sowie des Bogens. In jenen Bereichen, wo Datenlücken automatisch geschlossen wurden, wurde die Texturierung nicht immer richtig durchgeführt. Dieses Problem ist in *Abbildung 74* z.B. an den Seitenflächen der Sockel ersichtlich. Darüber hinaus ist der einzig wirklich große Nachteil des Modells in der minderen Qualität der Ausgangsdaten zu finden, die durch die starke Sonneneinstrahlung während der Feldarbeit verursacht und auch durch eine umfangreiche Nachbearbeitung nur sehr spärlich behoben werden konnte.

Insgesamt wurden rund zehn Stunden für die Auswertung der UAV-Daten benötigt – vier für die Bildbearbeitung und sechs für die Modellierung in Agisoft. Eine umfangreiche Einarbeitung in die leicht verständliche Software war nicht notwendig; das Finden der optimalen Einstellungen während der einzelnen Workflow-Schritte nahm aber dennoch einige Zeit in Anspruch.

6 Diskussion der Ergebnisse

Nach Abschluss des Praxisbeispiels, in welchem der Arbeitsablauf des terrestrischen Laserscanning sowie der UAV-Photogrammetrie beispielhaft am Heidentor von Petronell-Carnuntum gezeigt wurde, soll dieses Kapitel nun dazu dienen, die dabei gewonnenen Erkenntnisse zusammenzufassen und zu bewerten. Die Diskussion der Ergebnisse gliedert sich zunächst in die drei bekannten Phasen Vorbereitung, Feldarbeit und Auswertung, in welcher die beiden Methoden miteinander verglichen und deren Vor- und Nachteile zum Schluss in einem Zwischenfazit tabellarisch aufbereitet werden. Dieser erste Abschnitt orientiert sich an dem Praxisbeispiel. Anschließend wird versucht, die drei Forschungsfragen, die in der Einleitung dieser Arbeit gestellt wurden, ausreichend zu beantworten, wobei die positiven und negativen Aspekte von terrestrischem Laserscanning und UAV-Photogrammetrie für archäologische Fragestellungen *im Allgemeinen* diskutiert werden, um eine möglichst neutrale Bewertung zu ermöglichen. In diesen Abschnitt fließen somit nicht nur die praktischen Erfahrungen der Autorin ein, sondern auch jene Erkenntnisse, die aus der Literaturrecherche und den in Kapitel 4 vorgestellten wissenschaftlichen Arbeiten gewonnen werden konnten.

6.1 Ergebnisse des Heidentor-Projekts

Die Planung und Durchführung des praktischen Projekts am Heidentor von Petronell-Carnuntum nahm ihren Anfang im Frühjahr 2016, als erste Überlegungen zum Arbeitsablauf gestellt wurden. Nach der Datenerfassung im September desselben Jahres lagen die endgültigen Ergebnisse der Auswertung rund drei Monate später Mitte Dezember vor. Die Autorin hatte während dieser Zeit Gelegenheit, sich der Vorzüge und Nachteile beider Methoden bewusst zu werden. In den folgenden Unterkapiteln werden die beiden Arbeitsweisen daher vergleichend betrachtet.

6.1.1 TLS versus UAV-Photogrammetrie: Ergebnisse der Vorbereitung

Die größten Herausforderungen, die es während der ersten Phase des Projekts zu bewältigen galt, waren die Suche nach einem idealen Objekt sowie die Organisation der Messinstrumente und der beteiligten Personen.

Neben dem Heidentor wären auch noch andere archäologische Monumente in der Region Carnuntum als Untersuchungsobjekt geeignet gewesen (u.a. das Amphitheater, die Palastruinen oder original erhaltene Mauern der römischen Siedlung). Dennoch entschied sich die Autorin nach einer Besichtigung der in Frage kommenden Standorte relativ rasch zugunsten des Heidentors, da es einige Faktoren gab, die für dieses Untersuchungsobjekt sprachen:

- *Abgegrenztes Gebiet mit Ausdehnung in Länge, Breite und Höhe:* Das Heidentor erstreckt sich, wenn das eigentliche Tor, die Mittelsäule sowie die zwei Sockelfundamente berücksichtigt werden, auf einer fast quadratischen Fläche von rund 16 x 16 m. Es kann dadurch sowohl mit dem Laserscanner als auch mit dem Multikopter in einer relativ kurzen Zeit erfasst werden. Dadurch, dass das Objekt eine gewisse Höhe aufweist, muss auch die „Oberseite“ des Tors erfasst werden, wodurch sich gut erkennbare Unterschiede zwischen den beiden Erfassungsmethoden feststellen lassen.
- *Sichtbarkeit:* Durch die sehr exponierte Lage des Heidentors gibt es keine Hindernisse, die die Arbeit mit TLS oder UAV einschränken würden. Das Objekt liegt offen auf den Feldern; in nächster Umgebung befindet sich keine höhere Vegetation. Eine gute Sichtbarkeit und einfache Manövrierbarkeit der Instrumente ist deshalb gegeben.
- *Sicherheitsaspekt:* Das Heidentor befindet sich knapp einen Kilometer vom Ortsgebiet und 300 Meter von der Bundesstraße entfernt mitten auf den Feldern. Da es mit dem Laserscanner und dem UAV jeweils bestimmte Sicherheitsbedingungen einzuhalten gilt (siehe Kapitel 3.2.2, 5.1.1 und 5.1.2), musste dieser Umstand entsprechend berücksichtigt werden. Durch die Entfernungen zum Ortsgebiet und zur Straße sowie die gute Einsicht in die umliegenden Feldwege konnte eine Gefährdung von Personen ausgeschlossen werden.
- *Erreichbarkeit:* Vor allem der terrestrische Laserscanner VZ-6000 weist ein hohes Eigengewicht und zahlreiche Zusatzkomponenten auf. Er kann deshalb nicht ohne weiteres transportiert werden. Da das Gelände, auf dem sich das Heidentor befindet, mit einem Parkareal ausgestattet ist, konnten die Messinstrumente direkt zum Untersuchungsobjekt befördert werden, was die Feldarbeit sehr erleichterte. Andere in Frage kommende Objekte wären weitaus schwieriger zu erreichen gewesen und hätten sich zum Teil im abgesperrten Areal des Archäologieparks befunden, was eine Genehmigung erfordert hätte.

Da der Autorin für die Feldarbeit Hilfe sowie die Bereitstellung der Messinstrumente zugesichert wurden, entfielen einige Schritte des „typischen“ Workflows: Sowohl der terrestrische Laserscanner als auch der Multikopter waren bereits kalibriert und wurden von den verantwortlichen Personen regelmäßig überprüft und versichert. Während eines Treffens, das wenige Tage vor der Feldarbeit abgehalten wurde, konnte sich die Autorin mit dem VZ-6000 und den Reflektor-Marken vertraut machen und erste Überlegungen zu der erforderlichen Anzahl der Scan-Positionen anstellen. Es wurde entschieden, die Messinstrumente per PKW zum Untersuchungsgebiet zu transportieren.

Im Messablauf eines UAV-Projekts (siehe *Abbildung 31*) wird in der Vorbereitungsphase die Bildflugplanung angeführt. Diese entfiel beim Heidentor-Projekt, da entsprechende Tools nicht zur Verfügung standen und die geringe Größe des Objekts eine Flugplanung auch nicht unbedingt erforderlich machte. Dennoch ist anzumerken, dass eine Bildflugplanung prinzipiell sinnvoll ist, da sie auf Grund der genau definierten Aufnahmeeinstellungen qualitativ hochwertigere Messergebnisse ermöglicht.

Für dieses Unterkapitel kann zusammenfassend festgehalten werden, dass während der Vorbereitung kaum Differenzen zwischen beiden Erfassungsmethoden auftreten (siehe *Tabelle 10*). Viele Schritte waren der Autorin bereits extern vorgegeben, weshalb sich tatsächliche Unterschiede erst während der Phase der Feldarbeit manifestieren.

6.1.2 TLS versus UAV-Photogrammetrie: Ergebnisse der Feldarbeit

Die Erfassung des Heidentors wurde an zwei unterschiedlichen Tagen im September 2016 durchgeführt. An beiden Tagen herrschten für diese Jahreszeit milde Temperaturen mit einem wolkenlosen Himmel und Sonnenschein. Diese Verhältnisse ermöglichten zwar eine angenehme Feldarbeit, hatten aber negative Auswirkungen auf die Messergebnisse – vor allem bei den UAV-Aufnahmen. Obwohl versucht wurde, die Aufnahmeeinstellungen bestmöglich anzupassen und die Bilder bestmöglich nachzubearbeiten, konnten die unterschiedlichen Belichtungsverhältnisse und der Schattenwurf des Objekts nicht behoben werden, was sich in der Textur des fertigen Modells zeigt. Auch wenn zusätzliche Erfahrungswerte womöglich eine gewisse Besserung gebracht hätten, kann an dieser Stelle gesagt werden, dass das zum Zeitpunkt der Feldarbeit herrschende **Wetter** starken Einfluss auf die Qualität der UAV-Aufnahmen hat. Besonders hervorzuheben ist dabei die Sonneneinstrahlung bzw. die fehlende Wolkenbedeckung; starker Wind kann sich aber ebenso negativ auswirken. Auf die Messergebnisse des terrestrischen Laserscanners haben die herrschenden Wetterverhältnisse wenig bis keine Auswirkungen. Bei der Einfärbung der Punktwolke in RiSCAN Pro zeigten sich zwar auch Belichtungsunterschiede, doch fielen diese insgesamt deutlich geringer aus.

Die gesamte **Aufnahmedauer** betrug drei Stunden für die TLS-Aufnahmen bzw. 40 Minuten für den Bildflug mit dem Multikopter. Der Datenerfassung mit dem VZ-6000 ging zusätzlich die Verteilung der Reflektor-Marken voraus, die rund 30 Minuten in Anspruch nahm. Während dieser Zeit wurden außerdem die acht Scan-Positionen festgelegt und die Messbereitschaft des Scanners wurde hergestellt. Dadurch, dass die Autorin während der Feldarbeit mit dem Laserscanner von zwei zusätzlichen Personen unterstützt wurde, gingen die einzelnen Arbeitsschritte relativ schnell voran. Dennoch musste der Scan-Vorgang immer wieder abgebrochen werden, wenn Personen das Gelände betraten, um eine Gefährdung auszuschließen und eine homogene Punktwolke zu erhalten. Die tatsächliche Messdauer wurde dadurch erhöht. Wie die Wetterverhältnisse war dies jedoch ein Umstand, der nicht beeinflusst werden konnte.

Dass die gesamte Aufnahmedauer mit dem Multikopter auf 40 Minuten limitiert war, kann sowohl als Vorteil als auch als Nachteil gesehen werden. Prinzipiell dauert die Phase der Feldarbeit mit einem UAV wesentlich kürzer als mit einem terrestrischen Laserscanner, da die Messbereitschaft schneller hergestellt, das Gerät wesentlich flexibler und kein Positionswechsel des Multikopter-Piloten nötig ist. Dadurch konnte mit dem UAV in kürzerer Zeit ein größeres Gebiet erfasst werden. Andererseits ist die Aufnahmezeit durch die Anzahl der Akkus beschränkt. Für das Heidentor-Projekt standen zwei Stück zur Verfügung,

deren Laufzeit voll ausgenutzt wurde. Bei einer Verfügbarkeit von mehr Akkus könnte die Flugzeit und damit die Anzahl der aufgenommenen Bilder erhöht werden, was wiederum Auswirkungen auf die Qualität des Endmodells hätte. Das Heidentor konnte mit den 58 erzeugten Aufnahmen aber sehr gut abgebildet werden, wodurch die Aufnahmezeit als ausreichend erachtet wird. Eine vorhergehende Bildflugplanung hätte womöglich wirtschaftlicheres Arbeiten und eine größere Anzahl an Aufnahmen ermöglicht.

Ein weiterer Aspekt, bei dem Unterschiede zwischen TLS und UAV gefunden werden konnten, war der **Grad der Erfassbarkeit** des Untersuchungsobjekts. Wie bereits in Kapitel 5.2 erwähnt, weist das Heidentor eine Höhe von rund 14 m auf. Dieser Umstand stellte für den Multikopter kein Problem dar, da die Oberseite des Bogens bzw. der beiden Pfeiler problemlos erfasst werden konnte. Lediglich die Innenseite des Bogens musste manuell aufgenommen werden, da die Navigation in diesem Bereich zu riskant gewesen wäre. Ansonsten gab es aber keine störenden Umgebungsobjekte (hohe Bäume, Masten, Stromkabel etc.), die den Bildflug erschwerten oder einen negativen Einfluss auf die Aufnahmen gehabt hätten.

Da der terrestrische Laserscanner – wie der Name bereits impliziert – vom Boden aus operiert, können Bereiche ab einer bestimmten Höhe nicht mehr erfasst werden. Wäre das Projekt in einem größeren Umfang durchgeführt worden, hätte der Scanner auf einem höhenverstellbaren Gerüst montiert werden können. Da dies aber nicht realisiert werden konnte, entstanden Lücken an der Oberseite des Heidentors (siehe *Abbildung 75*). Auch die beiden Sockel konnten nicht vollständig erfasst werden, da der Laserstrahl über ihre Oberseite hinwegstrich und keine Punkte registrieren konnte. Niedrige Vegetation und der Felsblock sorgten außerdem dafür, dass die Seitenflächen eines Sockels unvollständig blieben. Da das primäre Augenmerk aber dem Heidentor selbst galt, wurde dieser Umstand als wenig bedeutsam eingestuft. Zusätzliche Aufstellungen hätten zwar eine dichtere Punktwolke bei den Sockeln gebracht; das Heidentor wurde von acht Scan-Positionen aber absolut ausreichend erfasst.

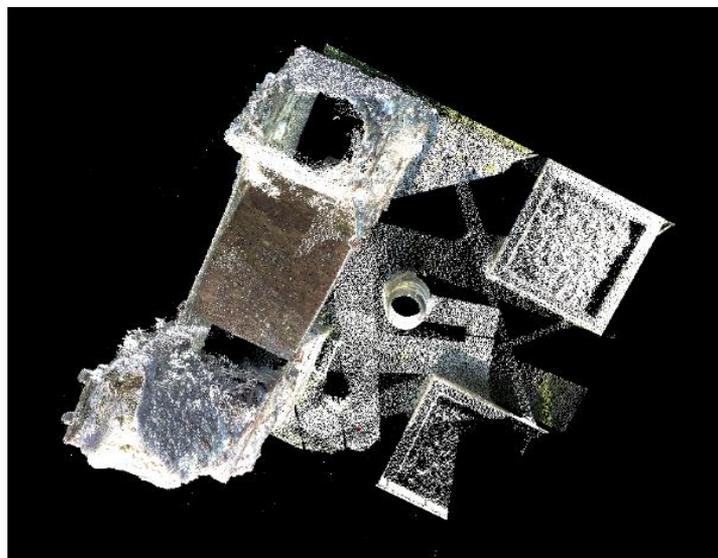


Abbildung 75: Die TLS-Aufnahme weist Lücken im oberen Bereich des Heidentors auf

Ein Punkt, der beim Heidentor-Projekt zwar kaum eine Rolle spielte, aber trotzdem noch kurz erwähnt werden soll, ist die **erfasste Datenmenge**. Hier standen 840 MB TLS-Daten den UAV-Bildern mit einer Datenmenge von 218 MB gegenüber. Der Laserscanner generiert somit eine größere Menge Datenmaterial als die Kamera eines Multikopters und die TLS-Daten beanspruchen deshalb mehr Speicherplatz. Beide Auswerte-Softwares (siehe nächstes Kapitel) konnten jedoch problemlos mit der jeweiligen Datenmenge umgehen. Da diese auch in Bezug auf gegenwärtige Speichermedien keine Herausforderung darstellt, kann dieser Aspekt als relativ unbedeutend eingestuft werden. Bei größeren Untersuchungsobjekten hat die Datenmenge jedoch eine zunehmende Relevanz.

6.1.3 TLS versus UAV-Photogrammetrie: Ergebnisse der Auswertung

In diesem Kapitel gilt es zu berücksichtigen, dass etwaige Vor- bzw. Nachteile, die im Folgenden aufgelistet werden, auf der Basis der beiden verwendeten Softwares RiSCAN Pro und Agisoft PhotoScan erfolgen. Mit anderen Programmen wären unter Umständen gänzlich andere Ergebnisse erzielt worden. Dieser Abschnitt ist somit in gewisser Hinsicht ein Software-Vergleich; dennoch muss bedacht werden, dass es eine Vielzahl von anderen Optionen für die Auswertung von TLS- und UAV-Daten gibt.

Zunächst sollen die **Komplexität und Nutzerfreundlichkeit** der beiden Programme beurteilt werden. Hierzu sei gesagt, dass sowohl RiSCAN als auch Agisoft für die Autorin völlig neues Neuland darstellten (bzw. in einer einzelnen Lehrveranstaltung zu terrestrischem Laserscanning kurz behandelt wurden) und daher eine Einarbeitung notwendig machten. Letztere war vor allem im Fall von RiSCAN sehr zeitaufwändig, da das Programm wenig intuitiv gestaltet ist und teilweise mit Tastenkombinationen gearbeitet wird, die dem Nutzer nicht erklärt werden (z.B. im Selektions-Modus). Während des Arbeitens in RiSCAN muss sich der Nutzer daher immer im Klaren sein, welche Schritte zu welchem Ergebnis führen. Eine fix vorgegebene Reihenfolge, in der die einzelnen Schritte zu vollziehen sind, gibt es nicht. Die Komplexität von RiSCAN stellt aber gleichzeitig auch die Stärke der Software dar: Durch eine enorme Bandbreite an Filter-, Selektions-, Anzeige- und Registrier-Optionen können die Daten auf vielfache Weise manipuliert und den Wünschen des Nutzers entsprechend ausgewertet werden. Dies erfordert vergleichsweise hohes Fachwissen und einen erheblichen Zeitaufwand, doch letztendlich sprechen die Transparenz sowie die hohe Variabilität der einzelnen Arbeitsschritte für RiSCAN Pro.

Agisoft PhotoScan bietet in Sachen Komplexität und Nutzerfreundlichkeit ein völlig entgegengesetztes Bild: Dies fängt bereits beim Interface an, das deutlich weniger vielschichtig aufgebaut ist als jenes in RiSCAN Pro. Unter dem Reiter „Workflow“ sind alle wesentlichen Arbeitsschritte, die während der Auswertung durchlaufen werden müssen – angefangen von der Ausrichtung der Bilder mittels Structure from Motion-Algorithmus bis hin zur Texturierung des vermaschten Modells – bereits fix vorgegeben. Pro Arbeitsschritt können einige wenige Parameter eingestellt werden (siehe z.B. *Abbildung 67*), die hauptsächlich Auswirkungen auf die Rechenzeit und die Qualität des Endmodells haben. Inse-

samt ist Agisoft somit schnell verständlich und durchaus nutzerfreundlich, da die meiste „Arbeit“ von der Software übernommen wird und der Nutzer nur die Grundeinstellungen festlegen muss. Durch die geringe Auswahl an Optionen verläuft die Auswertung schnell und problemlos und es ist schwer, Fehler zu machen. Gerade deshalb ist Agisoft aber ein zweischneidiges Schwert: Die einzelnen Arbeitsschritte sind nicht transparent gestaltet – es ist zwar zu erkennen, dass die Software „etwas macht“, aber was sie macht, wird dem Nutzer nicht eindeutig erschlossen. Aus diesem Grund stellt Agisoft PhotoScan eine Black Box dar, die die Auswertung der UAV-Daten zwar sehr einfach macht, aber wenig Interaktion ermöglicht.

Da beide Softwares zum Teil ziemlich komplexe dreidimensionale Berechnungen durchführen müssen, werden bestimmte **Anforderungen an die Hardware** gestellt. Diese betreffen vor allem den Arbeitsspeicher (RAM), der Prozessor (CPU) sowie die Grafikkarte. Die Auswertung in RiSCAN Pro wurde auf einem PC an der Universität Wien durchgeführt, der einen 16 GB-RAM, eine CPU der Marke Intel Xeon E3-1241 mit 3,5 GHz und eine Grafikkarte des Typs NVIDIA Quadro K620 besaß. Die Betrachtung der Scans im View-Fenster des Programms sowie einfache Operationen (Zoomen, Selektieren, Visualisieren in verschiedenen Farbabstufungen etc.) gestalteten sich problemlos. Die Registrierung der Scans sowie die Einfärbung der Punktwolke stellten die Hardware ebenfalls vor keine Herausforderung. Ging es allerdings darum, größere Mengen an unerwünschten Punkten zu entfernen, kam es mitunter zu langen Rechenzeiten (für Einzelpunkte manchmal mehrere Minuten) und Systemabstürzen. Letztere konnten durch eine Aufteilung der Punktwolke in mehrere kleinere Abschnitte meistens abgefangen werden, aber es war dennoch zu merken, dass die Hardware durch diesen Schritt recht stark beansprucht wurde.

Die Auswertung in Agisoft PhotoScan fand am PC der Autorin (8 GB-RAM, CPU Intel i5-4590 mit 3,3 GHz sowie eine AMD Radeon HD 6900-Grafikkarte) statt. Da die Ausrichtung der Bilder und die Erzeugung der dichten Punktwolke in der höchsten der insgesamt fünf Qualitätsstufen sehr lange Rechenzeiten erfordert hätte, wurde mit der zweithöchsten Qualitätsstufe vorliebgenommen, die immer noch kein Down-Scaling der Originaldaten verursacht und daher für ausreichend befunden wurde. Die Rechenzeiten waren nun vertretbar und die Hardware wurde während der gesamten Auswertung kein einziges Mal an ihre Grenzen getrieben, was vermutlich auch an der gut gewählten Anzahl der importierten Bilder liegt. Mit insgesamt 57 Aufnahmen war das Heidentor ausreichend abgedeckt und sowohl Hardware als auch Software konnten diese Datenmenge problemlos verarbeiten. Für diesen Aspekt soll jedoch zusammenfassend gesagt werden, dass kein direkter Vergleich möglich ist, da einerseits an zwei verschiedenen PCs gearbeitet wurde und andererseits die Systemanforderungen der Hersteller (siehe [URL-16] für RiSCAN Pro und [URL-17] für Agisoft PhotoScan) recht unterschiedlich spezifiziert werden.

Hinsichtlich der **insgesamt benötigten Auswertungszeit** sind die beiden Arbeitsweisen durch starke Unterschiede geprägt. Der wohl wichtigste Punkt ist, dass die Auswertung in RiSCAN Pro mit 30 Stunden um ein Dreifaches länger gedauert hat als die Bildbearbeitung und Auswertung in Agisoft PhotoScan (insgesamt zehn Stunden). Dies ist darauf zurückzuführen, dass RiSCAN eine lange Einarbeitung erfordert und gewisse Arbeitsschritte

wie z.B. das manuelle Setzen von Tiepoints schlicht und einfach mehr Zeit in Anspruch nehmen, um möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen. Solange keine Punkte entfernt werden, gibt es keinen Moment, in dem der Nutzer nur vor dem Bildschirm auf die Fertigstellung eines Arbeitsschritts wartet. Im direkten Vergleich mit Agisoft ist RiSCAN somit wesentlich zeitaufwändiger – vor allem, wenn in Betracht gezogen wird, dass ein wesentlicher Arbeitsschritt, nämlich die Vermaschung, gar nicht durchgeführt wurde.

Abgesehen von der Bildbearbeitung, die im Heidentor-Projekt auf Grund der starken Belichtung der Aufnahmen als notwendig erachtet wurde, verlief die UAV-Auswertung in Agisoft größtenteils automatisiert. Es war kein langwieriges Auseinandersetzen mit der Software nötig, da die einzelnen Schritte des Workflows bereits vorgegeben waren. Die meiste Zeit wurde mit Abwarten verbracht, bis der jeweilige Arbeitsschritt vollzogen war. Somit gestaltete sich die Auswertung in Agisoft als vergleichsweise einfach und kurzweilig. Abermals ist jedoch darauf hinzuweisen, dass in diesem Zusammenhang nicht pauschalisiert werden darf: Die Verarbeitung von TLS- und UAV-Daten ist auch in einer Vielzahl anderer Programme möglich, weshalb die Auswertungszeit je nach verwendeter Software stark variieren wird.

Letztendlich gilt es nun, die **Vollständigkeit des fertigen Modells** zu bewerten. Wie bereits angeführt, lieferte die Auswertung der TLS-Daten eine texturierte, nicht vermaschte Punktwolke; aus den UAV-Bildern entstand hingegen ein fertig vermaschtes Modell. In *Abbildung 76* sind die Ergebnisse beider Arbeitsweisen in zwei Ansichten zu sehen:



Abbildung 76: Ergebnis der Datenauswertung: (a) und (c) zeigen Vorder- und Rückseite des Heidentors als texturierte Punktwolke in RiSCAN; (b) und (d) zeigen das fertige Modell in Agisoft PhotoScan

Das fertige Modell aus TLS-Daten (*Abbildung 76, a und c*) weist – wie bereits in Kapitel 6.1.2 erwähnt – einige Lücken auf, die sich vor allem am Bogen, der Oberseite der Pfeiler und an den Ober- bzw. Seitenflächen der Sockel finden lassen und in der Detailansicht (*a*) bzw. in einer senkrechten Ansicht (*c*) in *Abbildung 77* zu sehen sind. Abgesehen davon wird das gesamte Untersuchungsobjekt fehlerfrei abgebildet und auf Grund der hohen Punktdichte wirken die Punkte wie eine zusammenhängende Einheit; erst bei einer hohen Zoomstufe fällt auf, dass es sich um Einzelpunkte handelt. Zwischen Vorder- und Rückseite sind zwar Belichtungsunterschiede festzustellen, doch fallen diese im Vergleich zum anderen Modell nicht so gravierend aus.

Das Endergebnis der UAV-Auswertung (*Abbildung 76, b und d*) ist lückenlos, da etwaige Löcher im Zuge der Vermaschung geschlossen und mit einer aus den Bildern errechneten Textur überlagert werden. Diese ist zum Beispiel an der Vorderseite der beiden Sockel zu sehen und fällt mal mehr, mal weniger realistisch aus. Jene Stellen, die mit dem terrestrischen Laserscanner schwer zu erfassen waren – vor allem im oberen Bereich des Untersuchungsobjekts – werden durch die UAV-Aufnahmen sehr gut abgedeckt, was in *Abbildung 77 (b und d)* ersichtlich ist. Das große Manko dieses Modells ist die unterschiedliche Belichtung der Vorder- und Rückseite; vor allem letztere erscheint sehr dunkel und der Schattenwurf ist stark erkennbar. Das Ergebnis der UAV-Photogrammetrie ist somit stark von den herrschenden Wetterverhältnissen abhängig und kann bei schlechten Ausgangsdaten kaum noch verbessert werden.

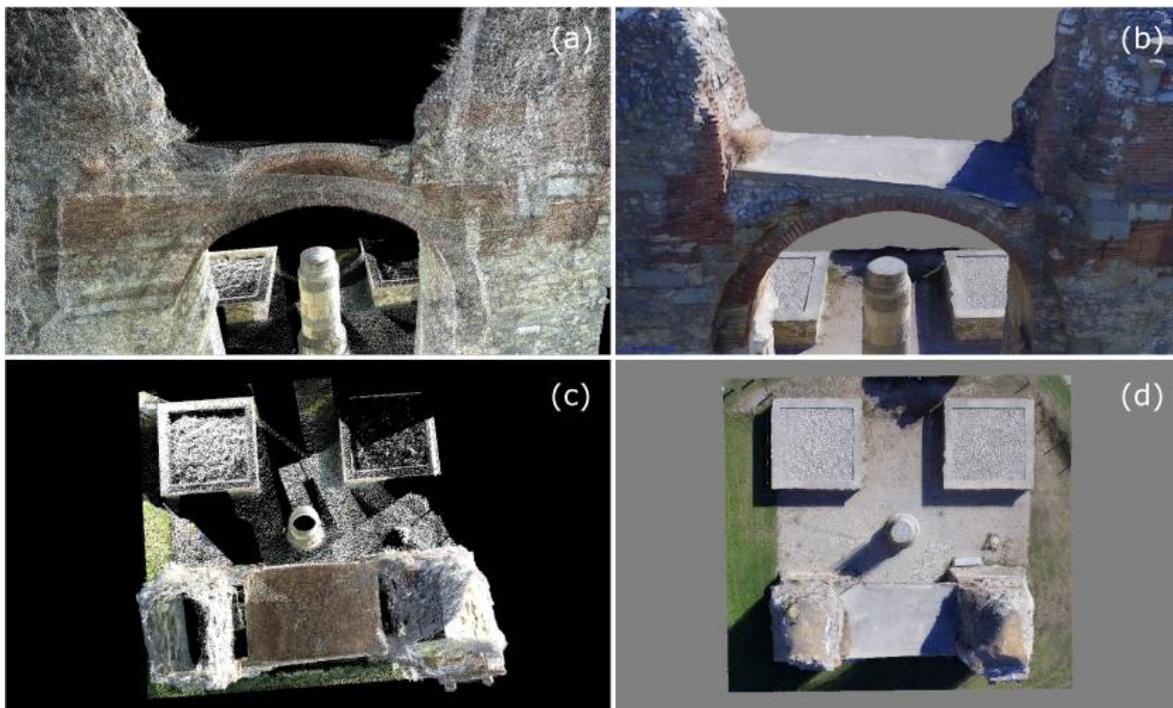


Abbildung 77: Detailansicht des Bogens und Heidentor aus der Vogelperspektive: Das mit RiSCAN Pro erstellte Modell weist in (a) und (c) zahlreiche Datenlücken auf. Das in Agisoft modellierte Heidentor zeigt hingegen einen fehlerlosen Bogen (b) sowie geschlossene Oberflächen im Bereich der Sockel und Pfeiler (d).

6.1.4 Das Heidentor-Projekt: Ein Zwischenfazit

Das Heidentor von Petronell-Carnuntum stellte ein ideales Testobjekt dar, um die beiden Arbeitsweisen des terrestrischen Laserscanning und der UAV-Photogrammetrie miteinander zu vergleichen. Die drei Phasen Vorbereitung, Feldarbeit und Auswertung konnten klar voneinander abgegrenzt werden und die meisten Punkte der in Kapitel 2.4 und 3.5 vorgestellten Messabläufe traten bei diesem Praxisbeispiel auch tatsächlich auf. Wie erwartet, zeigten sich während der Arbeiten am Untersuchungsobjekt Stärken und Schwächen der jeweiligen Methode. *Tabelle 10* fasst diese nochmals zusammen:

Tabelle 10: TLS versus UAV-Photogrammetrie am Beispiel des Heidentors von Petronell-Carnuntum

	Terrestrisches Laserscanning		UAV-Photogrammetrie	
	Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
Vorbereitung		umständlicher Transport		
Feldarbeit	(nahezu) wetterunabhängig	aufwändige Herstellung der Messbereitschaft	schnelle Herstellung der Messbereitschaft	sehr anfällig für Sonneneinstrahlung und Wind
	leistungsfähiger Akku	etwas anfällig für Sichteinschränkungen	sehr flexibles Instrument	Aufnahmedauer durch Akkus stark begrenzt
	Zielmarken und eingemessene Scan-Positionen ermöglichen genaues Arbeiten	Feldarbeit von einer Einzelperson nur schwer durchführbar (Instrument ist eher sperrig)	größtenteils unabhängig von Hindernissen (problemlose Erfassung des gesamten Objekts)	nicht-automatischer Flug erfordert ständige Interaktion
	hohe Automatisierung nach Scan-Start	längere Aufnahmedauer	kurze Aufnahmedauer	
Auswertung	hohe Komplexität ermöglicht vielfältige Datenmanipulation	lange Einarbeitung in die Software notwendig	hohe Nutzerfreundlichkeit mit genau vorgegebenem Workflow	wenige Interaktionsmöglichkeiten, wenig Transparenz ("Black Box")
	Navigation innerhalb der Punktwolke problemlos und schnell möglich	wenig intuitiv und nutzerfreundlich	Software liefert ein vermaschtes, texturiertes Modell als Endergebnis	Navigation innerhalb der Punktwolke auf einer hohen Zoomstufe mühsam
	sehr genaues und detailliertes Endergebnis	Entfernen größerer Punktwolken stellt Problem dar	vergleichsweise wenig Zeitaufwand nötig	vorhergehende Bildbearbeitung erforderlich
	hohe Resistenz gegenüber Belichtung	insgesamt lange Auswertungszeit	Modell ist vollständig	Schließen von Datenlücken führt zu schlecht eingefärbten Bereichen
	große Anzahl an Exportformaten	keine geeignete Möglichkeit zur Vermaschung	große Anzahl an Exportformaten	sehr stark von der Qualität der Ausgangsdaten abhängig (Belichtung!)
		Datenlücken an schwer zugänglichen Stellen		

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Vor- und Nachteile der beiden Erfassungsmethoden annähernd ausgleichen. Jedes System hat seine individuellen Stärken und Schwächen, die vor allem im Feld und während der Auswertung zutage treten (und in diesem Fall stark von der verwendeten Software abhängig sind). Geht man nur davon aus, wie gut die einzelnen Punkte der in Kapitel 2.4 und 3.5 vorgestellten Workflows abgearbeitet werden konnten, so kommt die Autorin zu dem Schluss, dass diese Aufgabe mittels UAV-Photogrammetrie wesentlich einfacher zu erfüllen war als durch terrestrisches Laserscanning. In nicht einmal einer Stunde Feldarbeit und wenigen Stunden Auswertung entstand ein vollständiges Modell des Heidentors. Für ein vollständiges Modell aus TLS-Daten wären weitere, umfangreiche Arbeitsschritte erforderlich gewesen, die den Einsatz zusätzlicher Softwares und dementsprechend ein größeres Know-how sowie einen größeren Zeitaufwand erfordert hätten. Insgesamt konnte, bezogen auf die Erfassungsmethode des terrestrischen Laserscanning, in mehr Zeit weniger erreicht werden, auch wenn das Ergebnis definitiv robuster gegenüber Belichtungsunterschieden ist und in dieser Hinsicht eine höhere Qualität aufweist. Dennoch stellte sich, wenn alle relevanten Faktoren betrachtet werden, die UAV-Photogrammetrie für die Erstellung des Heidentor-Modells als die geeignetere Erfassungsmethode heraus.

6.2 Diskussion der Forschungsfragen

Auch wenn sich die UAV-Photogrammetrie aus Sicht der Autorin für das Heidentor letztendlich als die bessere Erfassungsmethode entpuppte, darf trotzdem nicht vergessen werden, dass dies eine individuelle Entscheidung war, die auf einer einmaligen Erkenntnis und auf einem einzelnen praktischen Beispiel beruht. In den letzten Kapiteln dieser Arbeit wurden die Arbeitsweise und das vielfältige Anwendungsspektrum von terrestrischem Laserscanning und UAV-Photogrammetrie im archäologischen Kontext umfangreich erläutert. Dabei traten sowohl die individuellen Stärken und Schwächen als auch die Möglichkeit einer Kombination beider Methoden ans Tageslicht. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird nun versucht, die in der Einleitung gestellten Forschungsfragen möglichst ausreichend zu beantworten.

I. In welchem Ausmaß, verglichen mit „traditionellen Arbeitstechniken“, können terrestrisches Laserscanning und UAV-Photogrammetrie bei der archäologischen Objektaufnahme unterstützen?

Dieser Aspekt wurde vor allem in Kapitel 4 in Form einer Vorstellung von Beispielen aus der wissenschaftlichen Praxis thematisiert. Als „traditionelle Arbeitstechniken“ sind in diesem Kontext hauptsächlich klassische Vermessungsinstrumente wie Tachymeter, Nivelliere und GPS-Empfänger sowie eine beschreibende Dokumentation (Handzeichnungen, Feldskizzen etc.) zu verstehen. Von ebenso großer Bedeutung sind Kameras, die die archäologischen Standorte vom Boden oder aus der Luft erfassen. Sämtliche dieser Techniken werden bereits seit Jahren bzw. Jahrzehnten in der Archäologie angewendet. Der Einsatz von terrestrischen Laserscannern und UAV-Photogrammetrie stellt noch ein gewisses

Neuland dar, das knapp nach der Jahrtausendwende nach und nach Einzug in die archäologische Praxis erhalten hat.

Terrestrische Laserscanner und UAVs sind selbstverständlich nicht für alle Anwendungszwecke geeignet. Bei sehr großflächigen Aufnahmen und bei Gebieten, deren archäologische Objekte noch vollständig unter der Erde verborgen sind, sind die klassische Luftbildphotogrammetrie und Airborne Laserscanning wesentlich effizienter. Bei bestehenden Ausgrabungen, kleinräumigen Gebieten und bei der Dokumentation von Einzelobjekten, die sich über der Erdoberfläche befinden, bieten diese vergleichsweise neuen Arbeitstechniken jedoch entscheidende Vorteile, wodurch traditionelle Arbeitsweisen ergänzt und zum Teil sogar vollständig ersetzt werden können. Diese Vorteile manifestieren sich u.a. in folgenden Punkten:

- Erfassung von Objekten mit komplexer Geometrie
- Hochauflösende, genaue und detaillierte Messergebnisse
- Hohe Flexibilität durch hohen Automatisierungsgrad
- Einsatz in unzugänglichen, mitunter gefährlichen Gebieten möglich
- Aufnahmen können bei Bedarf kurzfristig wiederholt werden
- Messinstrumente erfordern nur wenig Personal
- Breite Palette an (Open Source-) Auswertungs- und Visualisierungssoftwares
- Große Vielfalt an Endprodukten (DTM, DOM, 2D- und 3D-Modelle, Pläne, Schnitte, Videos und VR-Anwendungen)

Der Einsatz von TLS und UAVs bietet sich somit vor allem für jene Aufgabenstellungen an, die durch folgende Merkmale gekennzeichnet sind [SEM-05]:

- Projekte mit sehr umfangreichen Anforderungen an die Menge und Vielfalt der Kartierungs- und Planungsunterlagen, „Z.B. *hochwertige, aber stark beschädigte Denkmale, bei denen Orthobilder als Kartierungs-Grundlagen, zahlreiche Schnitte zur Darstellung der räumlichen Zusammenhänge und des Kräfteverlaufs, komplexe Grundrisse, Verformungsanalysen, 3D-Modelle für Planungs- und Visualisierungsaufgaben sowie eine begehbare virtuelle Form des Vorzustandes und ggf. baubegleitende Ergänzungen und Soll-Ist-Analysen erforderlich sind*“ [SEM-05: 155].
- Objekte, bei denen ein hohes Interesse an der vollständigen, räumlichen Erfassung des Ist-Zustandes besteht (z.B. Schlösser, Museen oder bedrohte Denkmale). Der 3D-Datensatz wird digital archiviert, um im Falle einer Beschädigung oder einer notwendigen Restauration eine Dokumentation des Vorzustandes zu besitzen.
- Objekte, die mit einem Aus- oder Anbau versehen werden sollen, der dreidimensional am Computer geplant wird. Durch Laserscanner und UAVs wird das benötigte Datenmaterial für die Visualisierung und Konstruierung der Objekte bereitgestellt. Ein bestehender (archäologischer) Baubestand kann dadurch einfach ergänzt werden.

Zusammenfassend kann für diese Forschungsfrage gesagt werden, dass das Potenzial von TLS und UAV-Photogrammetrie in archäologischen Fragenstellungen sehr hoch und bis dato mit Sicherheit noch nicht vollständig ausgeschöpft ist. Auch wenn beide Erfassungsmethoden doch recht unterschiedlich sind, sind ihnen eine hohe Flexibilität und ein breites Anwendungsspektrum gemein. Traditionelle Arbeitstechniken werden von diesen neuen Methoden zwar nicht verdrängt, aber sinnvoll ergänzt, wie REINHARD [REI-13] beispielhaft für UAVs beschreibt: „Mit der *Structure-from-Motion-Photogrammetrie* steht der Archäologie eine neue, hochpräzise dreidimensionale Dokumentationsmethode zur Verfügung, die einfach, universell und breit skaliert [...] anwendbar ist und die sich ideal zur Ergänzung der konventionellen Dokumentation von Ausgrabungen eignet. Die [...] Orthophotos können aber auch als Grundlage für die zeichnerische Befunddokumentation verwendet werden: Da ein georektifiziertes Orthophoto verzerrungsfrei und maßstabsgetreu ist, bildet es den Befund bereits präzise ab [...]. Dieses Vorgehen vereinfacht und beschleunigt den Zeichenvorgang deutlich“ [REI-13: 185f.]. Der Einsatz von TLS und UAVs ermöglicht somit in vielen Fällen sowohl wirtschaftlicheres als auch schnelleres Arbeiten und die gewonnenen Daten können in vielerlei Hinsicht manipuliert werden.

II. Wie definiert sich der Arbeitsablauf (Workflow) eines TLS- bzw. UAV-Projekts? Inwieweit können sich Unterschiede zwischen den beiden Methoden feststellen lassen?

Der Workflow eines TLS- bzw. UAV-Projekts ist eine idealisierte Abfolge von einzelnen Arbeitsschritten, die abhängig vom Arbeitsauftrag stärker oder schwächer variieren können. Von der Autorin wurde versucht, ein bestmöglich passendes Schema zu erstellen, indem die Erkenntnisse einer umfangreichen Literaturrecherche miteinander kombiniert wurden. Die Ergebnisse wurden dabei jeweils am Ende von Kapitel 2 und Kapitel 3 in *Abbildung 18* und *Abbildung 31* zusammengefasst.

Von besonderer Bedeutung ist in diesem Kontext die Einteilung in die drei Phasen „Vorbereitung“, „Feldarbeit“ und „Auswertung“, die auf ZOGG und SCHULZ [ZOG-06] beruht. Dadurch, dass jeder der einzelnen Arbeitsschritte einer dieser drei Hauptphasen zugeordnet werden kann, entsteht eine bessere Übersicht, wodurch das Projekt als Ganzes besser gegliedert werden kann. Es ist somit auch einfacher möglich, Unterschiede zwischen terrestrischem Laserscanning und UAV-Photogrammetrie festzustellen.

In der **Vorbereitungsphase** sind viele Arbeitsschritte für beide Erfassungsmethoden sehr ähnlich. Es gilt, das Ziel festzulegen, sich mit den Eigenschaften des Untersuchungsgebiets bzw. -objekts vertraut zu machen und die benötigten Geräte vor ihrem Einsatz zu überprüfen. Im Idealfall werden in dieser Phase die Scan-Positionen und die Positionen der Zielmarken für den terrestrischen Laserscanner bereits festgelegt. Für das UAV kann während dieser Phase eine Bildflugplanung durchgeführt werden, um die Anzahl, die Position und die Überlappung der Aufnahmen besser einschätzen zu können. In dieser Hinsicht unterscheiden sich die beiden Methoden zwar voneinander, doch haben beide Arbeitsschritte denselben Zweck: Sie dienen dazu, bereits im Vorfeld abschätzen zu können, wie das Objekt bestmöglich erfasst werden kann.

Im **Feld** muss zunächst die Messbereitschaft des jeweiligen Systems hergestellt werden. Nachdem dies geschehen ist, werden projektspezifische Einstellungsparameter festgelegt. Beim terrestrischen Laserscanner sind diese hauptsächlich vom Objekt und der gewünschten Datenqualität abhängig; beim UAV spielen zusätzlich noch die herrschenden Wetterverhältnisse eine große Rolle. Anschließend erfolgt die Objekterfassung. Diese wird im Falle des Laserscanners von Standpunkt zu Standpunkt durchgeführt. Ein einzelner Scan kann dabei zwischen wenigen Minuten und mehreren Stunden dauern. Der UAV-Bildflug kann hingegen kontinuierlich durchgeführt werden und erfordert prinzipiell keinen Positionswechsel. Es ist deshalb möglich, das Objekt durch einen Flug vollständig zu erfassen. Da die Laufzeit eines Akkus dies in vielen Fällen aber nicht zulassen wird, muss der UAV in der Regel kurz gelandet werden, um das System mit einem frischen Akku zu versorgen. Während der Feldarbeit ist es möglich, ein Referenzsystem zu etablieren, indem die jeweiligen Instrumente mit GNSS-Empfängern gekoppelt werden (sofern diese nicht bereits eingebaut sind), oder ein externer GNSS-Empfänger mitgenommen wird. Dieser Schritt muss, wie in *Abbildung 18* und *Abbildung 31* dargestellt, nicht zwingend als letztes durchgeführt werden. Das Arbeitsprinzip bleibt hier aber für beide Erfassungsmethoden gleich.

Bei der **Auswertung** wird im Falle des terrestrischen Laserscanners zunächst mit der Registrierung der einzelnen Aufnahmen begonnen. Dieser Prozess erfordert unter Umständen viel Zeit und ist bei den UAV-Aufnahmen nicht erforderlich. Letztere müssen allerdings, bevor sie der Auswertesoftware übergeben werden können, manuell durchgesehen und bei Bedarf aussortiert oder nachbearbeitet werden. Auch dieser Schritt kann sich recht zeitintensiv gestalten. Sind die Bilder zueinander ausgerichtet, wird eine dünne bzw. dichte Punktwolke erstellt – bei den TLS-Aufnahmen liegt diese bereits von Beginn an vor. Alle weiteren Arbeitsschritte – von der Filterung über die Vermaschung bis hin zur Texturierung und Visualisierung – verlaufen für beide Erfassungsmethoden annähernd gleich bzw. sind stark von der verwendeten Software abhängig. Im Regelfall kann eine TLS-Punktwolke nach mehreren Kriterien gefiltert werden, wodurch diesem Schritt im TLS-Workflow etwas mehr Bedeutung zukommt.

Es war das Ziel der Autorin, beide Arbeitsabläufe so darzustellen, dass sie auch in der Praxis erprobt werden konnten. Die Schemata sollten somit auf das Heidendor-Projekt anwendbar sein. Diese Vorgabe konnte auch zu weiten Teilen erfüllt werden; Abweichungen gab es lediglich bei der nicht durchgeführten Bildflugplanung und während der Auswertung der TLS-Aufnahmen, als sich die Software für eine Vermaschung der Punktwolke als nicht geeignet erwies. Ansonsten konnten die beiden im Vorfeld definierten Messabläufe gut in den Praxisteil integriert werden.

Die Workflows eines Laserscanning- bzw. eines UAV-Projekts sind vom Grundprinzip her zwar sehr ähnlich aufgebaut, doch innerhalb der drei Hauptphasen lassen sich einige Unterschiede finden. Wird eine Bildflugplanung durchgeführt, so wird die Vorbereitungsphase eines UAV-Projekts in der Regel mehr Zeit in Anspruch nehmen. Im Feld gestaltet sich hingegen der Einsatz eines terrestrischen Laserscanners als aufwendiger, da der gewählte Standort der Scan-Positionen Einfluss auf die Vollständigkeit des Endprodukts hat und dementsprechend genau überdacht werden muss. Zwar wird auch dieser Schritt während

der Vorbereitung bereits berücksichtigt, doch die Zielmarken können erst vor Ort am Objekt angebracht werden. Dazu kommt, dass die gesamte Scanzeit meistens länger dauert als der UAV-Bildflug und ein Positionswechsel auf Grund der umfangreichen Hardware auch recht zeitintensiv ist (vor allem, wenn das Untersuchungsgebiet eine entsprechende Größe aufweist). Hinsichtlich der Auswertung ist vor allem die Registrierung der Scans recht aufwendig, was jedoch durch eine etwaige Nachbearbeitung der UAV-Aufnahmen wieder ausgeglichen wird. Die anderen Arbeitsschritte dieser Phase gestalten sich je nach Software zu unterschiedlich, als dass eine konkrete Aussage getroffen werden kann.

III. Überwiegen bei einer der beiden Erfassungsmethoden die Vor- bzw. Nachteile im jeweiligen Workflow so sehr, dass sie als besser bzw. schlechter gegenüber der anderen Erfassungsmethode eingestuft werden kann?

Wie bereits in der letzten Forschungsfrage beantwortet werden konnte, gibt es Unterschiede zwischen beiden Arbeitsabläufen, die zum Teil recht deutlich sind. Beide Workflows konnten im Zuge der Erfassung des Heidentors von Petronell-Carnuntum erprobt werden. Dabei stellte sich die UAV-Photogrammetrie letztendlich als die geeignetere Methode heraus, da – vereinfacht gesagt – mit weniger Zeitaufwand ein besseres Ergebnis erreicht wurde. Der Autorin ist allerdings bewusst, dass diese Erkenntnis keine allgemeine Schlussfolgerung darstellen kann. Bei dem gewählten Praxisbeispiel handelte es sich um ein Einzelobjekt ohne Vergleichswerte. Würden beide Workflows auf ein gänzlich anderes Untersuchungsobjekt oder –gebiet angewandt werden, gäbe es vermutlich ganz andere Ergebnisse. Auch darf nicht vernachlässigt werden, dass die Arbeit mit einem terrestrischen Laserscanner in der Regel mehr Praxiserfahrung erfordert, was sich im Feld unter anderem in der Tatsache zeigte, dass die Reflektor-Marken zum Teil an unpassenden Stellen gesetzt wurden. Ginge man somit von der Idealsituation aus, dass für beide Erfassungsmethoden ein Expertenteam mit entsprechender Erfahrung zur Verfügung stünde, dann hätte sich terrestrisches Laserscanning womöglich als die genauere Methode erwiesen.

Eine Tatsache, die abschließend ebenfalls noch erwähnt werden soll, ist, dass nur zwei unterschiedliche Softwares verwendet wurden. Agisoft PhotoScan stellte sich dabei als sehr nutzerfreundlich heraus; RiSCAN Pro erwies sich als das genaue Gegenteil. Dadurch nahm die Auswertung der TLS-Daten eine lange Zeit in Anspruch. Dies als „Nachteil“ zu werten, wäre jedoch nicht angebracht, da in RiSCAN schlichtweg mehrere Optionen zur Verfügung stehen und das Ergebnis (mit entsprechendem Know-how) dadurch wesentlich genauer wird (siehe Kapitel 6.1.3 und 6.1.4). Es ist stark anzunehmen, dass es auch Software-Lösungen gibt, die die TLS-Auswertung vereinfachen und umgekehrt die UAV-Auswertung aufwendiger machen. Auf Grund mangelnder Erfahrungswerte kann dieser Aspekt daher nicht eindeutig beurteilt werden.

An dieser Stelle sollen die Stärken und Schwächen von terrestrischem Laserscanning und UAV-Photogrammetrie abschließend zusammengefasst werden. In die folgenden beiden *Tabellen 11* und *12* fließen dabei sowohl die praktischen Erfahrungswerte der Autorin als auch die Ergebnisse der Literaturrecherche ein. Dadurch werden die wichtigsten Merkmale beider Methoden im Allgemeinen dargestellt, ohne zu sehr auf Details einzugehen.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Stärken und Schwächen des terrestrischen Laserscanning, Quelle: [BIB-11], [FRI-14], [MAR-09], eigene Bearbeitung

Stärken	Schwächen
Sehr schnelle flächenhafte, automatische Erfassung	Scanner misst ohne Intelligenz Punkte im vorgegebenen Winkelraster
sehr gute Anwendbarkeit bei komplexen Oberflächen und bei Beobachtung tiefer gelegener Gebiete	Weniger geeignet für flache, großflächige Gebiete
hohe Detailgenauigkeit (kann beschreibende Dokumentation ersetzen)	nahe Objekte: hohe Punktdichte; entfernte Objekte: geringe Punktdichte
je nach Gerätetyp auf sehr kurze oder sehr lange Distanzen einsetzbar	viele überflüssige Punkte verursachen zum Teil extrem große Datenmengen
unabhängig von herrschenden Wetterverhältnissen	kritische Bereiche wie Ecken und Kanten werden oftmals unzureichend erfasst
sofortige Gewinnung von 3D-Koordinaten	künstliche Strukturen und Vegetation verursachen abgeschattete Bereiche
Kombination mit High-End Navigationssensoren (DGPS, INS) möglich	manuelle Auswertung erforderlich
Möglichkeiten der Punktwolken-Darstellung und Punktwolken-Filterung sehr vielfältig	Finanzieller Aufwand mitunter nicht unerheblich

Tabelle 12: Zusammenfassung der Stärken und Schwächen der UAV-Photogrammetrie, Quelle: [EIS-09], [FRI-14], [REM-11], [WES-12], eigene Bearbeitung

Stärken	Schwächen
Anwendung in Gebieten mit hohem Risikopotenzial möglich (z.B. Rutschungen, Lawinen, Vulkane etc.)	Begrenzung auf eine gewisse Flughöhe
insbesondere für flache Gebiete geeignet	wenig geeignet in steilen Gebieten und für Innenaufnahmen
kleinflächige Untersuchungsgebiete können innerhalb sehr kurzer Zeit erfasst werden	stark abhängig von herrschenden Wetterverhältnissen
wenn Flugbestimmungen eingehalten werden, stellen UAVs keine Gefährdung für Personen dar	Messergebnisse stark von der Qualität der Flugplanung bzw. den Flugkünsten des UAV-Piloten abhängig
wenig personeller Einsatz erforderlich (im Idealfall zwei Personen)	Ausstattung mit (notwendigen) hochwertigen Sensoren oftmals sehr kostspielig
kostengünstig in der Anschaffung	Geringe Belastungskapazität führt zu Abstrichen bei Sensorqualität
Betrieb sowohl mit Standard- als auch High-End-Kameras möglich	Ausrichtung der Bilder und Erstellung der Punktwolke ist mit sehr langen Rechenzeiten verbunden
	Manuelle Auswahl geeigneter Bilder erforderlich

Wenn sämtliche Aspekte, die in dieser Masterarbeit beschrieben wurden und die in *Tabelle 11* und *Tabelle 12* nochmals zusammenfassend dargestellt sind, in Betracht gezogen werden, kommt die Autorin zu dem Schluss, dass es für archäologische Fragestellungen nicht *die* Methode gibt, die genug Stärken aufweist, als dass sie sich eindeutig als die geeignetere herausstellen würde. Die dritte Forschungsfrage kann somit prinzipiell mit einem „Nein“ beantwortet werden. Es steht allerdings fest, dass das Anwendungspotenzial von

terrestrischem Laserscanning und UAV-Photogrammetrie in der Archäologie sehr groß ist, wie die umfangreiche Bandbreite an Beispielen in Kapitel 4 zeigen konnte. Für jedes dieser Beispiele erwies sich entweder das Laserscanning, die UAV-Photogrammetrie oder sogar eine Kombination beider Verfahren als passend für die jeweilige Fragestellung, wie es z.B. bei der Dokumentation der archäologischen Fundstätten in Peru der Fall gewesen war: „Die Untersuchung zeigte, dass beide Methoden sich ergänzen, wenn das abzudeckende Gebiet sowohl fast vertikale als auch fast horizontale Bereiche enthält. Deshalb wird es sinnvoll sein, die Kombination beider Verfahren für solche Fälle ins Auge zu fassen und in Zukunft zu untersuchen“ [FRI-14: 220].

Terrestrisches Laserscanning und UAV-Photogrammetrie bestehen seit knapp nach der Jahrtausendwende und fanden wenige Jahre später auch Anwendung in der Archäologie. Auch wenn sich die Messabläufe beider Methoden annähernd ähnlich gestalten, läuft die Erfassung und Datenverarbeitung nach sehr unterschiedlichen Prinzipien ab. Durch die enorme Vielfalt an archäologischen Fragestellungen wird es aus Sicht der Autorin nicht *das* System geben, welches besser geeignet ist. Es gilt immer zu berücksichtigen,

- wie das Untersuchungsobjekt oder das Untersuchungsgebiet gestaltet ist (sowohl bezüglich der Geometrie als auch bezüglich der vorherrschenden Aufnahmebedingungen) und
- auf welche Weise die Ergebnisse der Datenauswertung weiterverwendet werden („reine“ Visualisierung in einem Museum/für ein Fachpublikum, Dokumentation des aktuellen Zustandes, Datenquelle für Messungen und Rekonstruktionsarbeiten...).

Auf Basis dieser Anforderungen kann dementsprechend die Entscheidung zugunsten des terrestrischen Laserscanning, der UAV-Photogrammetrie oder einer Kombination beider Erfassungsmethoden getroffen werden.

7 Zusammenfassung

Diese Masterarbeit hatte sich zum Ziel gesetzt, die beiden Erfassungsmethoden terrestrisches Laserscanning und UAV-Photogrammetrie zu beschreiben und ihren Einsatz im archäologischen Arbeitsfeld zu erläutern. Terrestrische Laserscanner und UAVs existieren seit knapp nach der Jahrtausendwende und finden seither Schritt für Schritt Anwendung in den unterschiedlichsten Einsatzbereichen.

Das Arbeitsprinzip eines terrestrischen Laserscanners beruht darauf, dass ein Laserstrahl ein Objekt von mehreren Standpunkten abtastet und aus diesen Messungen eine dreidimensionale Punktwolke erzeugt. Die Punktwolke kann auf vielfältige Weise ausgewertet und weiterverarbeitet werden. Terrestrische Laserscanner können je nach verwendetem Modell mit sehr unterschiedlich großen Entfernungen arbeiten und weisen eine ähnlich hohe Genauigkeit auf wie herkömmliche Tachymeter.

In der UAV-Photogrammetrie erfolgt die Datenaufnahme aus der Luft. Ein unbemanntes Fluggerät, auf welchem eine Kamera befestigt ist, erfasst das Objekt durch Bildaufnahmen. Das UAV ist währenddessen immer in Bewegung. Durch die Überlappung der Fotos, die aus verschiedenen Perspektiven erstellt werden, kann – wie auch bei der stereoskopischen Photogrammetrie – die Struktur eines Objekts abgebildet werden. Dieser Vorgang wird als „Structure from Motion“ bezeichnet und bildet den Mittelpunkt der UAV-Auswertung.

Beide Methoden wurden schematisch in einem idealisierten Messablauf dargestellt, der sich aus vielen verschiedenen Arbeitsschritten zusammensetzt, wobei alle Schritte einer der drei Hauptphasen namens Vorbereitung, Feldarbeit und Auswertung angehören. Es wurde versucht, die Workflows so zu konstruieren, dass sie möglichst universell einsetzbar waren.

Der Einsatz von TLS und UAV-Photogrammetrie wurde in der Praxis am Heidentor von Petronell-Carnuntum erprobt. Das Heidentor stellt ein römisches Siegesmonument dar und bot durch seine Maße (16 m in Länge und Breite sowie 14 m in der Höhe) und durch seine Abgeschlossenheit ein ideales Testobjekt. Mit dem terrestrischen Laserscanner Riegl VZ-6000 und dem Multikopter DJI Phantom 3 Professional wurde das archäologische Monument an zwei unterschiedlichen Tagen erfasst. Die dabei generierten Daten wurden mit den Softwares RiSCAN Pro und Agisoft PhotoScan ausgewertet. Letztendlich entstand für beide Arbeitsweisen ein dreidimensionales Modell des Heidentors. Die Autorin kam zu dem Schluss, dass beide Workflows auf das Heidentor-Projekt sehr gut anwendbar waren. Auf Grund der Tatsache, dass mit dem Multikopter in kürzerer Zeit mit einfachen Mitteln ein vollständiges Modell des Objekts erstellt werden konnte, wurde die UAV-Photogrammetrie für dieses Praxisbeispiel als die geeignetere Methode bewertet. Abzüge gab es allerdings für die starke Anfälligkeit gegenüber den vor Ort herrschenden Lichtverhältnissen, die die Qualität des dreidimensionalen Modells etwas minderten.

Zusätzlich zur Anwendbarkeit des TLS- und UAV-Workflows in einem praktischen Beispiel wurde der Einfluss der beiden Erfassungsmethoden auf archäologische Fragestellungen im Allgemeinen untersucht. Die Autorin bediente sich dabei einer Auswahl an wissenschaftlichen Beiträgen, die den Einsatz von terrestrischen Laserscannern und Multikoptern im Forschungsfeld der Archäologie behandelten. Dabei stellte sich heraus, dass sich beide Methoden als geeignet erwiesen, um traditionelle Arbeitstechniken zu ersetzen bzw. zu ergänzen, da TLS und UAV-Photogrammetrie auf Grund ihrer Schnelligkeit, Flexibilität und Genauigkeit in einem breiten Ausmaß in der archäologischen Objektdokumentation angewendet werden können. Vor allem in schwer zugänglichen Gebieten und bei Objekten mit komplexer Geometrie sind die beiden Verfahren geradezu prädestiniert.

Jedes der beiden Erfassungssysteme ist dennoch durch spezifische Stärken und Schwächen gekennzeichnet, die einerseits allgemeiner Natur sein können (z.B. hohe Anschaffungskosten) und sich andererseits erst während dem Praxiseinsatz in der Vorbereitung, Feldarbeit und/oder Auswertung bemerkbar machen. Auf dieser Basis wurden die jeweiligen Vor- und Nachteile bestmöglich herausgearbeitet. Letztendlich konnte der Schluss gezogen werden, dass sich keine der beiden Methoden „besser“ für den Einsatz in der Archäologie eignet, da eine Tendenz zu terrestrischem Laserscanning oder zur UAV-Photogrammetrie zu stark von der jeweiligen Fragestellung geprägt wird.

Für die Zukunft erwartet sich die Autorin, dass das Einsatzgebiet von terrestrischen Laserscannern und UAVs noch mehr ausgeweitet wird. Auch wenn beide Erfassungssysteme bereits seit mehr als zehn Jahren bestehen, gibt es immer noch eine Vielzahl von Bereichen, die bisher noch nicht erschlossen wurden. Vor allem bei UAVs muss der vollständige Wandel vom „Modellspielzeug“ zu einem seriösen wissenschaftlichen Forschungsinstrument noch erfolgen. Ist dies gelungen, so stellen das terrestrische Laserscanning und die UAV-Photogrammetrie zwei wertvolle dreidimensionale Erfassungsmethoden dar, die nicht nur in der Archäologie, sondern auch in einer Vielzahl von anderen Forschungsfeldern mitunter bahnbrechende neue Erkenntnisse liefern werden.

8 Literatur

- [ABD-09] ABDELHAFIZ A. (2009): Integrating Digital Photogrammetry and Terrestrial Laserscanning. – Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.
- [AGI-16] AGISOFT LLC (2016): Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.2; online unter: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf (09.01.2017).
- [AUS-15] AUSTRO CONTROL (2015): Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitshinweis Nr. 67. Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen für unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1; online unter: http://www.austrocontrol.at/jart/prj3/austro_control/data/dokumente/Am85q_LTH_LF_A_ACE_067.pdf (09.01.2017).
- [BEC-12] BECKER M. und HEHL K. (2012): Geodäsie. – Darmstadt.
- [BER-10] BERARDIN J.-A., BLAIS F. und LOHR U. (2010): Laser Scanning Technology. – In: VOSSELMAN G. und MAAS H.G. (Hrsg.): Airborne and Terrestrial Laser Scanning. – Dunbeath, 1-44.
- [BER-16] BERTELS U. (2016): Bauwerksinspektionen und Vermessungen mit dem Multikopter – Welche Ergebnisse sind möglich! – In: UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen, Beiträge zum 148. DVW-Seminar am 18. und 19. Februar 2016 in Bonn, 205-226.
- [BIB-11] BIBBY D. und STEFFEN M. (2011): Millimetergenau mit 3D-Laserscanning. Neue Dokumentationsmöglichkeiten für die Landesarchäologie. – In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 43 (4), 218-221.
- [BLY-15] BLYENBURGH, van P. (2015): 2015-2016 RPAS Yearbook: Remotely Piloted Aircraft Systems – The Global Perspective 2015/2016. 13th Annual Edition. – Paris.
- [BLY-99] BLYENBURGH, van P. (1999): UAVs: An Overview. – In: Air & Space Europe, 1 (5-6), 43-47.
- [BOF-10] BOFINGER J. und HESSE R. (2010): Der Einsatz von Airborne Laserscanning zur Entdeckung von archäologischen Geländemerkmale. – In: BOFINGER J. und MERKL M. (Hrsg.): Mit Hightech auf den Spuren der Kelten. – Stuttgart (= Schriftenreihe des Keltenmuseums Hochdorf 8), 70-89.
- [BOF-14] BOFINGER J. und STEFFEN C. (2014): Die fliegende Kamera. Neue Methoden der archäologischen Fotodokumentation aus der Luft. – In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 43 (2), 108-112.
- [BÖH-05] BÖHLER W. (2005): Vergleichende Untersuchungen zur Genauigkeit und Auflösung von Laserscannern. – In: Terrestrisches Laserscanning 2005 (TLS2005), Beiträge zum 65. DVW-Seminar am 21. und 22. November 2005 in Fulda, 17-28.
- [BRE-07] BRENNER C. (2007): Interpretation terrestrischer Scandaten. – In: Terrestrisches Laserscanning 2007 (TLS2007), Beiträge zum 74. DVW-Seminar am 5. und 6. Dezember 2007 in Fulda, 1-10.

- [BRI-12] BRIESE C., ZACH G., VERHOEVEN G., RESSL C., ULLRICH A., STUDNICKA N. und DONEUS M. (2012): Analysis of mobile laser scanning data and multi-view image reconstruction. – In: SHORTIS M.R. und MILLS J. (Hrsg.): Proceedings of the XXII ISPRS Congress. Technical Commission V. – Melbourne, 163-168.
- [BÜC-15] BÜCHI R. (2015): Faszination Multikopter. – Baden-Baden.
- [CHA-09] CHARLTON M.E., COVENEY S.J. und MCCARTHY T. (2009): Issues in Laser Scanning. – In: HERITAGE G.L. und LARGE A.R.G. (Hrsg.): Laserscanning for the Environmental Sciences. – Oxford, 35-48.
- [CHR-11] CHRISTOFORI E. (2011): Laserscanning von historischen Gebäuden und Bauwerken. – In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 136 (4), 247-254.
- [CRA-16] CRAMER M. und LEINSS B. (2016): Welche ist am besten? – Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAV-Luftbildphotogrammetrie. – In: UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen, Beiträge zum 148. DVW-Seminar am 18. und 19. Februar 2016 in Bonn, 97-118.
- [DAD-14] DADAFSHAR M. und RINORTNER K. (2014): MEMS-Sensoren. Funktion und Anwendungen von Beschleunigungssensoren und Gyroskopen. – In: Elektronik Praxis, 05.09.2014; online unter: <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/analogtechnik/articles/458045/index3.html> (09.01.2017).
- [DJI-15] DÀ-JIANG INNOVATIONS SCIENCE AND TECHNOLOGY (DJI) (2015): Phantom 3 Professional. Kurzanleitung V1.2; online unter: https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_3/de/De_Phantom_3_Professional_Quick_Start_GuideV1.2.pdf (09.01.2017).
- [DOL-10] DOLD C. (2010): Ebenenbasierte Verfahren für die automatische Registrierung terrestrischer Laserscans. – Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover.
- [DON-13] DONEUS M., GUGL C. und DONEUS N. (2013): Die Canabae von Carnuntum – eine Modellstudie der Erforschung römischer Lagervorstädte. Von der Luftbildprospektion zur siedlungsarchäologischen Synthese. – Wien. (= Die römische Limes in Österreich 47).
- [EIS-09] EISENBEIB H. (2009): UAV Photogrammetry. – Dissertation, ETH Zürich, Zürich.
- [ELI-16] ELING C., KLINGBEIL L. und KUHLMANN H. (2016): Warum UAVs und warum jetzt? – In: UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen, Beiträge zum 148. DVW-Seminar am 18. und 19. Februar 2016 in Bonn, 9-30.
- [ELS-09] EL-SHEIMY N. (2009): Emerging MEMS IMU and its impact on mapping applications. – In: Photogrammetric Week, Stuttgart, 7-11. September.
- [FIS-16] FISCHER C. (2016): Erfahrung mit Standard (LowCost)-UAV bei der Befliegung und Auswertung von Haufwerken. – In: UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen, Beiträge zum 148. DVW-Seminar am 18. und 19. Februar 2016 in Bonn, 227-234.
- [FRI-14] FRIEDLI E., THEILER P. und WIESER A. (2014): Dokumentation abgeschiedener archäologischer Fundstätten – Ein Praxisvergleich von UAV-basierter photogrammetri-

- scher Aufnahme und Long-Range Laserscanning. – In: *Terrestrisches Laserscanning 2014 (TLS2014)*, Beiträge zum 139. DVW-Seminar am 11. und 12. Dezember 2014 in Fulda, 205-221.
- [GAI-15] GAISECKER T., RIEGL U., AMON P. und PFENNIGBAUER M. (2015): UAV-basiertes Airborne Laserscanning für den Einsatz in anspruchsvollen, luftgestützten Vermessungsaufgaben. – In: *Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS2015)*, Beiträge zum 147. DVW-Seminar am 8. und 9. Dezember 2015 in Fulda, 163-182.
- [GOR-08] GORDON B. (2008): Zur Bestimmung von Messunsicherheiten terrestrischer Laserscanner. – Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.
- [GRE-16] GRENZDÖRFFER G. (2016): Unbemannte Flugroboter – aktuelle technologische Entwicklungen und die wichtigsten rechtlichen Rahmenbedingungen. – In: *UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*, Beiträge zum 148. DVW-Seminar am 18. und 19. Februar 2016 in Bonn, 31-51.
- [GRU-10] GRUSSENMEYER P. und HANKE K. (2010): Cultural Heritage Applications. – In: *VOSSELMAN G. und MAAS H.G. (Hrsg.): Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. – Dunbeath, 271-290.
- [HER-09] HERITAGE G.L. und LARGE A.R.G. (2009): Principles of 3D Laser Scanning. – In: *HERITAGE G.L. und LARGE A.R.G. (Hrsg.): Laserscanning for the Environmental Sciences*. – Oxford, 21-34.
- [HES-07] HESSE C. (2007): Ein Beitrag zur hochauflösenden kinematischen Objekterfassung mit terrestrischen Laserscannern. – Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover.
- [HOL-13] HOLTFFESTER U. und SCHREIBER T. (2013): „Structure from Motion“ am Beispiel der Ausgrabungen am Philosophikum in Münster. – In: *LWL-Archäologie (Hrsg.): Archäologie in Westfalen-Lippe 2013*, 226-229.
- [HOL-15] HOLST C., KUHLMANN H., PAFFENHOLZ J.-A. und NEUMANN I. (2015): TLS im statischen, stop & go sowie kinematischen Einsatz. – In: *Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS2015)*, Beiträge zum 147. DVW-Seminar am 8. und 9. Dezember 2015 in Fulda, 9-26.
- [JOB-01] JOBST W. (2001): Das Heidentor von Carnuntum. Ein spätantikes Triumphalmonument am Donaulimes. – Wien.
- [JOB-02] JOBST W. (2002): Das Heidentor von Petronell-Carnuntum. Ein Führer. – Wien.
- [KER-08] KERSTEN T., STERNBERG H., MECHELKE K. und LINDSTAEDT M. (2008): Datenfluss im terrestrischen Laserscanning – Von der Datenerfassung bis zur Visualisierung. – In: *Terrestrisches Laserscanning 2008 (TLS2008)*, Beiträge zum 79. DVW-Seminar am 6. und 7. November 2008 in Fulda, 31-56.
- [KER-10] KERN F. (2010): Prüfrichtlinie zur Abnahme und Überwachung von Terrestrischen Laserscanner-Systemen. ENTWURF V1.0.1. – FH Mainz, Mainz.
- [KER-12] KERSTEN T.P., LINDSTAEDT M., MECHELKE K. und ZOBEL K. (2012): Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie. – In: *SEYFERT E. (Hrsg.): 32. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF*. – Potsdam (= Publikationen der

- Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 21), 137-148.
- [KER-16] KERSTEN T. (2016): Auf Knopfdruck – Auswertung und Resultate UAV-gestützter Bildflugdaten. – In: UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen, Beiträge zum 148. DVW-Seminar am 18. und 19. Februar 2016 in Bonn, 135-158.
- [KLI-14] KLINGBEIL L., LOTTES P. und KUHLMANN H. (2014): Laserscanning-Technologie auf sich bewegendenden Plattformen. – In: Terrestrisches Laserscanning 2014 (TLS2014), Beiträge zum 139. DVW-Seminar am 11. und 12. Dezember 2014 in Fulda, 19-29.
- [KLI-16] KLINGBEIL L., ELING C. und KUHLMANN H. (2016): Zur Georeferenzierung von UAV Bildflügen: Direkt oder indirekt, was braucht man dafür? – In: UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen, Beiträge zum 148. DVW-Seminar am 18. und 19. Februar 2016 in Bonn, 97-118.
- [KOL-10] KOLBE A. (2010): Bestandserfassung eines denkmalgeschützten Gebäudekomplexes unter Verwendung des terrestrischen Laserscanners FARO Photon 120 und der dazugehörigen Software. – Diplomarbeit, Hochschule Neubrandenburg, Neubrandenburg.
- [KOS-13] KOSKA B. und KŘEMEN T. (2013): The combination of laser scanning and structure from motion technology for creation of accurate exterior and interior orthophotos of St. Nicholas Baroque Church. – In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 40 (5) [3D-ARCH 2013 – 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 25-26 February 2013, Trento, Italy], 133-138.
- [KRA-04] KRAUS K. (2004): Photogrammetrie. – Berlin.
- [KUT-10] KUTTERER H. (2010): Mobile Mapping. – In: VOSSELMAN G. und MAAS H.G. (Hrsg.): Airborne and Terrestrial Laser Scanning. – Dunbeath, 293-311.
- [LAR-09] LARGE A.R.G. und HERITAGE G.L. (2009): Laser Scanning – Evolution of the Discipline. – In: HERITAGE G.L. und LARGE A.R.G. (Hrsg.): Laserscanning for the Environmental Sciences. – Oxford, 1-20.
- [LIN-10] LINDSTAEDT M., MECHELKE K., SCHNELLE M. und KERSTEN T. (2010): Virtuelle Rekonstruktion des Almaqah-Tempels von Yeha in Äthiopien mit Hilfe terrestrischer Laserscanning-Daten. – In: LUHMANN T. und MÜLLER C. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2010. – Berlin und Offenbach, 50-75.
- [LUH-10] LUHMANN T. (2010): Photogrammetrie und Laserscanning. Anwendungen für As-Built-Dokumentation und Facility Management. – Heidelberg.
- [MAR-09] MARBS A. (2009): Laserscanning zur dreidimensionalen Objekterfassung: Grundlagen und Anwendungen; online unter: https://www.ise.kit.edu/rd_download/SEB/Kolloquium_SEB_09-01_A_Marbs.pdf (09.01.2017)
- [MIT-16] MITTERMAIER R. (2016): 3D-Laserscanning. Methoden, Modellierung und Anwendung. Materialien zur gleichnamigen Lehrveranstaltung. – Wien.
- [MÖS-15] MÖSER M. (2015): Einführung in die Geodäsie. Ingenieurgeodäsie. Bachelorstudiengang Geodäsie und Geoinformation; online unter: <https://tu->

- dresden.de/bu/umwelt/geo/gi/ig/ressourcen/dateien/lehrveranstaltungen/geodaesie/bachelor_ig/Bsc_Ring_IG.pdf?lang=de (09.01.2017).
- [NEI-11] NEITZEL F. und KLONOWSKI J. (2011): Mobile 3D Mapping with a Low-Cost UAV System on Example of a Landfill Survey. Präsentation im Rahmen der UAV-g in Zürich 2011; online unter: http://www.geometh.ethz.ch/uav_g/proceedings/neitzel_presentation (09.01.2017).
- [NEU-05] NEUBAUER W., DONEUS M., STUDNICKA N. und RIEGL J. (2005): Combined High Resolution Laser Scanning and Photogrammetrical Documentation of the Pyramids at Giza. - In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Teil 5/C 34), 470-475.
- [PFL-08] PFLEGERL M. (2008): Laserscanning und 3D-Modellierung von ingenieurbioologischen Bauelementen. – Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- [PRZ-07] PRZYBILLA H.-J. und STAIGER R. (2007): Messen und Dokumentieren in der Archäologie – Ein aktuelles Tätigkeitsfeld für den Geodäten? – In: Allgemeine Vermessungsnachrichten 114 (8-9), 284-289.
- [PUE-08] PUESCHEL H., SAUERBIER M. und EISENBEIß H. (2008): A 3D model of Castle Landenberg (CH) from combined photogrammetric processing of terrestrial and UAV-based images. – In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 37 (Teil B8), 93-98.
- [REI-13] REINHARD J. (2013): Structure from Motion, Drohnen & Co. Neue Wege in der Dokumentation archäologischer Ausgrabungen. – In: TUGIUM 29, 177-188.
- [REI-15] REITERER A., HÖFLER H. und WÖLFELSCHNEIDER H. (2015): Aufbau und Funktionsprinzip mobiler Laserscanner – Stand der Technik und neueste Trends. – In: Terrestrisches Laserscanning 2015 (TLS2015), Beiträge zum 147. DVW-Seminar am 8. und 9. Dezember 2015 in Fulda, 27-44.
- [REM-11] REMONDINO F., BARAZZETTI L., NEX F., SCAIONI M. und SARAZZI D. (2011): UAV Photogrammetry for mapping and 3D modelling – Current status and future perspectives. – In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38 (1) [UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland], 1-7.
- [RIE-15] RIEGL (2015): Datasheet Riegl VZ-6000; online unter: http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/Datasheet_VZ-6000_2015-01-22.pdf (09.01.2017).
- [SCH-11] SCHÜTZ D. (2011): Visualisierung des Dingerkus-Gartenhauses in Essen-Werden. – Diplomarbeit, Hochschule Bochum, Bochum.
- [SEM-05] SEMMLER A. (2005): Das terrestrische Laserscanning als Dokumentationsmethode in Bauforschung und Denkmalpflege. – In: Terrestrisches Laserscanning 2005 (TLS2005), Beiträge zum 65. DVW-Seminar am 21. und 22. November 2005 in Fulda, 147-167.
- [SIE-09] SIEBERT S., KLONOWSKI J. und NEITZEL F. (2009): Unmanned Aerial Vehicles (UAV) – Historische Entwicklung, rechtliche Rahmenbedingungen und Betriebskonzepte; online unter:

https://www.microdrones.com/fileadmin/web/PDF/Referenzen/veroeffentlichungen/UV-Historische_Entwicklung_rechtliche_Rahmenbedingungen_Betriebskonzepte.pdf (09.01.2017).

- [STA-05¹] STAIGER R. (2005): Terrestrisches Laserscanning – eine neue Universalmessmethode? – In: Terrestrisches Laserscanning 2005 (TLS2005), Beiträge zum 65. DVW-Seminar am 21. und 22. November 2005 in Fulda, 3-15.
- [STA-05²] STANEK H. (2005): Einsatz von terrestrischen Laserscannern – Herausforderung und Lösungspotenzial. – In: Terrestrisches Laserscanning 2005 (TLS2005), Beiträge zum 65. DVW-Seminar am 21. und 22. November 2005 in Fulda, 171-184.
- [STA-07] STAIGER R. und WUNDERLICH T. (2007): Terrestrisches Laserscanning 2006 – Technische Möglichkeiten und Anwendungen. – In: Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement 132 (2), 81-86.
- [STA-12] STALLMANN D. und KERSTEN T.P. (2012): Automatisches Texture Mapping von 3D-Modellen in Architektur und Archäologie. – In: SEYFERT E. (Hrsg.): Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. – München [32. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 14.-17.März 2012 in Potsdam], 381-391.
- [STA-14] STAIGER R. (2014): Terrestrisches Laserscanning – eine Bestandsaufnahme 2014. – In: Terrestrisches Laserscanning 2014 (TLS2014), Beiträge zum 139. DVW-Seminar am 11. und 12. Dezember 2014 in Fulda, 3-17.
- [STU-13] STUDNICKA N., BRIESE C., VERHOEVEN G., KUCERA M., ZACH G. und RESSL C. (2013): The Roman Heidentor as study object to compare mobile laserscanning data and multi-view image reconstruction. – In: NEUBAUER W., TRINKS I., SALISBURY R.B. und EINWÖGERER C. (Hrsg.): Archaeological prospection: Proceedings of the 10th International Conference on Archaeological Prospection. – Wien, 25-28.
- [WAG-04] WAGNER W., ULLRICH A., MELZER T., BRIESE C. und KRAUS K. (2004): From single-pulse to fullwaveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges. – In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 35 (Teil B3), 201-206.
- [WES-12] WESTOBY M.J., BRASINGTON J., GLASSER N.F., HAMBREY M.J. und REYNOLDS J.M. (2012): „Structure-from-Motion“ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. – In: Geomorphology 179 (2012), 300-314.
- [ZIE-14] ZIEGLER M., GÜLCH E. und RAWIEL P. (2014): 3D-Rekonstruktion von Objekten mittels „Structure-from-Motion“ aus einer photogrammetrischen Aufnahme mit den Programmen VisualSFM und CPMVS. – In: SEYFERT E., GÜLCH E., HEIPKE C., SCHIEWE J. und SESTER M. (Hrsg.): Geoinformationen öffnen das Tor zur Welt. 34. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF. - Hamburg (= Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 23), 1-9.
- [ZOG-06] ZOGG H. M. und SCHULZ T. (2006): Terrestrisches Laserscanning in der Geomatik. – In: Geomatik Schweiz: Geoinformation und Landmanagement 104 (8), 420-424.

Online-Quellen:

- [URL-01] <http://www.laserscan-berlin.de/industrie.html> (08.01.2017)
- [URL-02] http://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-3-662-46900-2_35-1 (09.01.2017)
- [URL-03] http://www.gilan-survey.com/referenz_kwg.html (09.01.2017)
- [URL-04] http://www.leica-geosystems.at/de/Leica-TruView-Cyclone-PUBLISHER_64524.htm (09.01.2017)
- [URL-05] <http://uvs-international.org/> (09.01.2017)
- [URL-06] <http://www.drohnen-forum.de/index.php/Attachment/862-phantomfc40-feature-phantomfc40-jpg/> (09.01.2017)
- [URL-07] http://www.austrocontrol.at/luftfahrtbehoerde/lizenzen_bewilligungen/flugbewilligungen/unbemannte_lfz (09.01.2017)
- [URL-08] <http://fpvracing.ch/de/content/8-multicopter-komponenten> (09.01.2017)
- [URL-09] https://tu-dresden.de/bu/umwelt/geo/ipf/photogrammetrie/studium/materialien/software_sfm (09.01.2017)
- [URL-10] <http://www.agisoft.com/buy/online-store/> (09.01.2017)
- [URL-11] <https://support.pix4d.com/hc/en-us#gsc.tab=0> (09.01.2017)
- [URL-12] <http://paulbourke.net/miscellaneous/photoscantutorial/> (09.01.2017)
- [URL-13] <http://www.dji.com/de/phantom-3-pro/info#specs> (11.01.2017)
- [URL-14] <http://www.carnuntum.at/de/wissenschaft-geschichte/carnuntum-zur-roemerzeit> (11.01.2017)
- [URL-15] [https://de.wikipedia.org/wiki/Carnuntum_\(Zivilstadt\)#/media/File:Carnuntum_map_Roman_city.png](https://de.wikipedia.org/wiki/Carnuntum_(Zivilstadt)#/media/File:Carnuntum_map_Roman_city.png) (11.01.2017)
- [URL-16] http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/11_DataSheet_RiSCAN-PRO_2016-09-19_01.pdf (15.01.2017)
- [URL-17] <http://www.agisoft.com/downloads/system-requirements/> (15.01.2017)

Lebenslauf

BARBARA TREMEL, BSC.

Wohnsitz: Burggasse 21 • 2404 Petronell-Carnuntum

Mobil: +43699 181 247 54

E-Mail: babsi.tremel@gmx.at

Persönliche Information

Staatsangehörigkeit: Österreich

Geburtsdatum und -ort: 06.12.1992, Wien

Familienstand: ledig



Ausbildung

März/April 2017

März 2015 – März 2017

22.01.2015

Oktober 2011 – Jänner 2015

30.05.2011

2003 - 2011

1999 - 2003

Voraussichtlicher Studienabschluss

Masterstudium Kartographie und Geoinformation (Universität Wien)

Abschluss Bachelor Geographie (mit Auszeichnung)

Bachelorstudium Geographie (Universität Wien)

Abschluss der Reifeprüfung (mit Auszeichnung)

Gymnasium Bruck a. d. Leitha, Schwerpunkt Wirtschaftskundliches Realgymnasium

Volksschule Petronell-Carnuntum

Fachliche Qualifikation

- *Sprachen:*

Deutsch (Muttersprache), Englisch (sehr gute Kenntnisse in Wort und Schrift), Französisch (gute Kenntnisse in Wort und Schrift)

- *Software-Kenntnisse:*

Esri ArcGIS, Adobe Illustrator, Adobe Photoshop, Audacity, Maxon Cinema 4D, Inkscape, MS Office, Basiskenntnisse in Python, Java, HTML sowie SQL

Stipendien

Leistungsstipendium der Universität Wien für die Studienjahre 2012, 2013, 2014 und 2015

Interessen

Laufsport (insbesondere 10.000m und Halbmarathon), Leichtathletik, Fußball, Fantasy-Bücher, Gaming, meine zwei Hunde und meine drei Schildkröten

Ich versichere:

- dass ich die Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- dass alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten und nicht veröffentlichten Publikationen entnommen sind, als solche kenntlich gemacht sind.
- dass ich dieses Masterarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.
- dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Datum

Unterschrift