

BACHELORTHESIS
Felix Naumann

Bildverarbeitungsbasierte Low-cost-3D-Vermessung von Objekten

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
Department Informatik

Faculty of Computer Science and Engineering
Department Computer Science

Felix Naumann

Bildverarbeitungsbasierte Low-cost-3D-Vermessung von Objekten

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang *Bachelor of Science Technische Informatik*
am Department Informatik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Andreas Meisel
Zweitgutachter: Prof. Dr. Tim Tiedemann

Eingereicht am: 17.06.2022

Felix Naumann

Thema der Arbeit

Bildverarbeitungsbasierte Low-cost-3D-Vermessung von Objekten

Stichworte

3D Scan, Kinect, Segelflugzeug, Photogrammetrie, ReconstructMe, RTAB-Map, Meshroom

Kurzzusammenfassung

Die digitale Rekonstruktion realer Objekte ist in diversen Anwendungsgebieten, wie dem Maschinenbau, von großem Interesse. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher mit kostengünstigen Methoden zur bildbasierten 3D-Modellierung von Objekten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zu diesem Zweck ein ein 7,03m langer Segelflugzeugrumpf in GFK-Bauweise, mit drei verschiedenen Methoden erfasst und rekonstruiert. Die Erfassung erfolgte mittels Kinect Kameras und einer Smartphonekamera, für die Rekonstruktion wurden "ReconstructMe", "RTAB-Map" und "Meshroom" genutzt. Die so erzeugten Modelle unterscheiden sich insbesondere im Grad ihrer Vollständigkeit und der aufgetretenen Darstellungsfehler. Eine quantitative Aussage, insbesondere über die Maßhaltigkeit der Modelle, lässt sich nicht treffen. Insgesamt stellte allerdings keines der erzeugten Modelle ein vollständiges und geometrisch äquivalentes Abbild des Flugzeugrumpfes dar.

In weiteren Anwendungsbeispielen konnte mit allen vorgestellten Methoden digitale Modelle diverser kleiner Objekte, mit ausreichend markanten Punkten rekonstruiert werden. Die untersuchten Methoden sind, abhängig vom Anwendungsfall, nur bedingt für die Erfassung und Rekonstruktion von Objekten geeignet, insbesondere mit steigender Objektgröße nimmt die Aussagekraft der Ergebnisse ab.

Felix Naumann

Title of Thesis

Image processing-based low-cost 3D measurement of objects

Keywords

3D scan, Kinect, glider, photogrammetry, ReconstructMe, RTAB-Map, Meshroom

Abstract

The digital reconstruction of physical objects is of great interest for various applications such as mechanical engineering. Therefore this thesis deals with cost-effective methods of image processing-based 3D-modelling of objects.

The testcase for this thesis is a 7,03 m long glider fuselage. It was captured and reconstructed using three different methods. For capturing both, Kinect Cameras and a smartphonecamera were used, whilst reconstruction was conducted using "Reconstruct-Me", "RTAB-Map" and "Meshroom". The obtained 3D-models particularly differ by their level of detail and the occurrence of display errors. A quantitative statement, especially concerning the dimensional tolerance of the models, cannot be made. Overall, none of the obtained models depicts a complete and shape equivalent reconstruction of the fuselage. Additionally the capturing and reconstruction of small objects with sufficient distinctive points were conducted in further application examples, using the described methods. The evaluated methods for capturing and reconstruction of objects are suitable to a limited extend, depending on the application, the validity of the results decreases especially with increasing object size.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	x
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	1
1.2 Struktur der Arbeit	2
2 Grundlagen	4
2.1 Theorie	4
2.1.1 Wege zum Modell	4
2.1.2 Wege vom Objekt zum Modell	4
2.1.3 Messfehler und Messungenauigkeiten	10
2.2 Hardware	12
2.2.1 Microsoft Kinect V1	12
2.2.2 Microsoft Kinect V2	14
2.2.3 Microsoft Kinect V1 vs. Kinect V2	15
2.3 Software	18
2.3.1 Punktwolke	18
2.3.2 Mesh	19
2.3.3 Libfreenect - OpenKinect	20
2.3.4 Kinect for Windows	21
2.3.5 ReconstructMe	22
2.3.6 RTAB-Map	23
2.3.7 Computer Vision	24
2.3.8 AliceVision - Meshroom	24
2.3.9 CUDA	25

3	Aufbau & Durchführung	27
3.1	Aufbau	27
3.1.1	ReconstructMe	27
3.1.2	RTAB-MAP	28
3.1.3	Meshroom	30
3.2	Durchführung	32
3.2.1	ReconstructMe	32
3.2.2	RTAB-MAP	34
3.2.3	Meshroom	36
4	Darstellung der Ergebnisse	38
4.1	ReconstructMe	38
4.2	RTAB-Map	41
4.2.1	Microsoft Kinect V1	41
4.2.2	Microsoft Kinect V2	44
4.3	Meshroom	46
5	Auswertung und Diskussion der Ergebnisse	51
5.1	Aufbau und Durchführung	51
5.1.1	Hardware	51
5.1.2	Software	53
5.2	Auswertung und Diskussion der Scan-Ergebnisse	55
5.2.1	ReconstructMe	55
5.2.2	RTAB-Map	57
5.2.3	Meshroom	59
6	Anwendung	62
6.1	Anwendungsbeispiel - Segelflugzeuganhänger	62
6.2	Anwendungsbeispiel - Pedalraum	64
7	Zusammenfassung	67
8	Fazit und Ausblick	69
8.1	Fazit	69
8.2	Ausblick	69
	Literaturverzeichnis	73
	Selbstständigkeitserklärung	76

Abbildungsverzeichnis

2.1	Händische Vermessung eines Zauberwürfels mittels Messschieber	5
2.2	Darstellung einer Messmaschine [16]	6
2.3	Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Laserscanners [13] .	8
2.4	Darstellung des Prinzips der Photogrammetrie [23]	9
2.5	Kamera und Kabel der Microsoft Kinect V1 [1]	12
2.6	Kamera der Microsoft Kinect V1 ohne Gehäuse [2]	13
2.7	Kamera der Microsoft Kinect V2 [3]	14
2.8	Tiefenbild und RGB-Bild der Microsoft Kinect V1 - Bildschirmaufnahme von "glview" aus "libfreenect"	17
2.9	Von der Microsoft Kinect V2 erzeugte Bilder - Bildschirmaufnahme von "Protoectäus" "libfreenect2"	17
2.10	RGB-Bilder der Microsoft Kinect V1 (a) im Vergleich zum RGB-Bild der Microsoft Kinect V2 (b) [22]	18
2.11	Der Stanford Bunny - links als Punktwolke und rechts als Mesh [26] . . .	19
2.12	Benutzeroberfläche von "ReconstructMe"	22
2.13	Mit "RTAB-Map" erstellte Karte eines mehrstöckigen Hauses [24]	23
2.14	Benutzeroberfläche von "Meshroom" während einer Berechnung [4]	25
3.1	Aufbau für die Erfassung mit der Microsoft Kinect V1	28
3.2	Aufbau für die Erfassung mit der Microsoft Kinect V2 und die Modellie- rung mit "RTAB-Map"	29
3.3	Händische Erfassung mit der Smartphone-Kamera	31
3.4	Bildschirmaufnahmen der getroffenen Einstellung zur 3D-Vermessung mit- tels "ReconstructMe"	33
3.5	Bildschirmaufnahme der Einstellungen für die Modellierung mit "RTAB- Map" und der Microsoft Kinect V2	35
3.6	Bildschirmaufnahme der Benutzeroberfläche von "Meshroom" nach abge- schlossener Modellierung	36

4.1	Rekonstruktion der rechte Seite des Segelflugzeugrumpfes mit "ReconstructMe"	39
4.2	Rekonstruktion beider Seiten des Segelflugzeugrumpfes mit "ReconstructMe"	39
4.3	Rekonstruktion der linken Seite des Segelflugzeugrumpfes mit "ReconstructMe" und händischer Kameraführung	40
4.4	Hallenkuller	40
4.5	Rekonstruktion eines menschlichen Oberkörpers mit "ReconstructMe" . .	41
4.6	Rekonstruktion der linken Hälfte des Segelflugzeugrumpfes mit "RTAB-Map" und Kinect V1	42
4.7	Rekonstruktion der rechten Hälfte des Segelflugzeugrumpfes mit "RTAB-Map" und Kinect V1	43
4.8	Rekonstruktion des gesamten Segelflugzeugrumpfes mit "RTAB-Map" und Kinect V1	43
4.9	Rekonstruktion der linken Hälfte des Segelflugzeugrumpfes mit "RTAB-Map" und Kinect V2	44
4.10	Rekonstruktion der rechten Hälfte des Segelflugzeugrumpfes mit "RTAB-Map" und Kinect V2	45
4.11	Rekonstruktion des gesamten Segelflugzeugrumpfes mit "RTAB-Map" und Kinect V2	45
4.12	Mit "Meshroom" berechnete Punktwolke aus horizontaler Erfassung der linken Hälfte des Segelflugzeugrumpfes	47
4.13	Mit "Meshroom" erzeugtes Mesh aus horizontaler Erfassung der linken Hälfte des Segelflugzeugrumpfes	47
4.14	Darstellung der berechneten Punktwolke aus horizontaler Erfassung im Koordinatensystem der Rekonstruktion von "Meshroom"	48
4.15	Mit "Meshroom" berechnete Punktwolke aus sinusförmiger Erfassung der linken Hälfte des Segelflugzeugrumpfes	48
4.16	Mit "Meshroom" erzeugtes Mesh aus sinusförmiger Erfassung der linken Hälfte des Segelflugzeugrumpfes	49
4.17	Mit "Meshroom" berechnete Punktwolke aus sinusförmiger Erfassung des gesamten Segelflugzeugrumpfes	50
4.18	Mit "Meshroom" erzeugtes Mesh aus sinusförmiger Erfassung des gesamten Segelflugzeugrumpfes	50
6.1	Fotografie des Segelflugzeuges, in Holz-Gemischbauweise, Ka 4 "Rhönlerche"	63

6.2	Integration der Modellierung des Segelflugzeugrumpfes (Ka 4) im CAD-Modell des Anhängergerüsts (zur Veranschaulichung wurde ein Flügel ausgeblendet)	63
6.3	Pedalraum eines Mercedes W124	65
6.4	Ergebnis der Photogrammetrie des Pedalraums	65
6.5	Pedalraum mit, auf den Pedalen montierten, Klötzen	66
8.1	Darstellung eines Gimbals zur Stabilisierung der Kameraführung [6]	70

Tabellenverzeichnis

2.1	Die verwendete Hardware im Vergleich [22]	16
5.1	Bewertung der verwendeten Methoden im Überblick	61

1 Einleitung

Im modernen Maschinenbau sind Computer nicht mehr weg zu denken. Das rechnergestützte Konstruieren hat viele Vorteile. Vor allem, wenn es darum geht Produkte weiter zu entwickeln, zu erweitern oder zu einem späteren Zeitpunkt Teile nach zu fertigen.

Allerdings stehen oft keine Daten zur Verfügung. Dafür gibt es verschiedene Ursachen. Die meisten Firmen halten ihre Entwicklungsinformationen unter Verschluss. Das erschwert es, beispielsweise Anbietern von Zubehör passende Produkte zu entwickeln. Ältere Produkte wurden oft noch händisch, am Zeichenbrett konstruiert. Diese Unterlagen zu digitalisieren ist sehr aufwendig und kostspielig. In vielen Fällen kommt hinzu, dass die Konstruktionsunterlagen teilweise oder komplett fehlen. In der Qualitätssicherung ist es wichtig, die Erfüllung der Konstruktionsvorgaben überprüfen zu können. Für die Optimierung von Produkten ist darüber hinaus die Veränderung im Laufe der Lebenszeit interessant.

Es wird eine Lösung benötigt, die es ermöglicht bestehende Objekte kostengünstig und einfach geometrisch zu erfassen. Die Anwendungsbereiche gehen weit über den Maschinenbau hinaus. In der Architektur können Häuserfassaden, Möbel oder ganze Räume aufgenommen werden. Mit diesen Daten lassen sich unter anderem Bauten darstellen, geplante Arbeiten visualisieren oder Stuckelemente einfacher reproduzieren. Im Bereich der Innenarchitektur können geplante Räume am Computer dargestellt werden und ein erster Eindruck gewonnen werden, wie verschiedene Elemente miteinander wirken.

1.1 Zielsetzung

Im vorherigen Absatz wird das breite Anforderungsspektrum deutlich. Auf der einen Seite werden präzise geometrische Formen mit Anspruch auf Formtreue benötigt. In anderen Anwendungsgebieten werden Abbilder von Gegenständen benötigt, die dem Menschen

eine Vorstellung vermitteln, aber dem realen Gegenstand nicht unbedingt im Detail entsprechen müssen.

Durch die Entwicklung von Videospielen die mittels Körperbewegung gesteuert werden sind Kameras zur Aufnahme von mehrdimensionalen Bildern in großer Stückzahl verfügbar. Durch die großen Stückzahlen sind die Kosten für den Erwerb dieser Kameras niedrig.

In dieser Arbeit soll untersucht werden, wie mit möglichst einfachen und kostengünstigen Mitteln die geometrische Erfassung von Objekten realisiert werden kann. Dabei werden von der Erfassung des Objektes, über die Darstellung, bis zur Nutzung in möglichen Anwendungsgebieten alle Schritte untersucht.

Es soll die Frage beantwortet werden, in welchen Bereichen kostengünstige 3D-Scan Ausstattung genutzt werden kann. Dafür werden mit verschiedenen Kameras Daten erfasst und diese mit unterschiedlicher Software ausgewertet.

1.2 Struktur der Arbeit

Kapitel 2: (*Grundlagen*) beschreibt die theoretischen Hintergründe, die dieser Arbeit zu Grunde liegen. Dafür werden die verschiedenen Wege zum Modell, verschiedene Vorgehensweisen sowie die genutzte Hardware und Software beschrieben.

Kapitel 3: (*Aufbau und Durchführung*) beschreibt die verschiedenen Aufbauten und Abläufe zur Erfassung und Rekonstruktion Objekts.

Kapitel 4: (*Darstellung der Ergebnisse*) stellt die, aus den in Kapitel 3 beschriebenen Erfassungen, erhaltenen Ergebnisse dar.

Kapitel 5: (*Auswertung und Diskussion der Ergebnisse*) bewertet die, in Kapitel 3 beschriebenen, Erfassungen und, in Kapitel 4 dargestellten, Ergebnisse. Dabei soll der Einfluss der verschiedenen, verfügbaren Hardware- und Softwarelösungen auf die Ergebnisse dargestellt werden.

Kapitel 6: (*Anwendung*) beschreibt die möglichen Anwendungen der untersuchten Methoden zur Erfassung und Modellierung von Objekten. Dafür werden weitere Anwendungsszenarien dargestellt.

Kapitel 7: (*Zusammenfassung*) fasst die wichtigsten Aspekte der vorangegangene Bachelorarbeit zusammen.

Kapitel 8: (*Fazit und Ausblick*) diskutiert, inwiefern kostengünstige Ausstattung zum 3D-Scan genutzt werden kann und in welchen Anwendungsgebieten die beschriebenen Methoden sinnvoll erscheinen. Davon ausgehend werden mögliche weitere Schritte und Entwicklungen dargestellt.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel sollen die theoretischen Hintergründe, welche dieser Arbeit zu Grunde liegen, beschrieben werden. Dafür werden die verschiedenen Wege zum Modell, verschiedene Vorgehensweisen sowie die genutzte Hardware und Software vorgestellt.

2.1 Theorie

In dieser Arbeit sollen große Objekte mittels 3D-Scan erfasst werden. Nachfolgend wird die zugrunde liegende Theorie näher beschrieben.

2.1.1 Wege zum Modell

Die Entwicklung eines physischen Objektes beginnt immer mit einer Idee. Diese Idee wird in einem Modell dargestellt, auf dessen Basis das physische Objekt gefertigt wird.

Bei der Erfassung von Objekten wird allerdings das physische Objekt in einem Modell abgebildet.

Im Modell werden Objekte mit Hilfe von Punkten, Linien, Kurven, Flächen und Körpern dargestellt. Der Umfang der, im Modell, dargestellten Informationen ist sowohl vom Anwendungsfeld, als auch der Art und Präzision der Erfassung abhängig.

In Unterabschnitt 2.1.2 werden verschiedene Wege vom Objekt zum Modell und damit verschiedene Methoden der Erfassung dargestellt.

2.1.2 Wege vom Objekt zum Modell

Bei der Erfassung von Objekten, zur Erstellung von Modellen, stehen verschiedene Verfahren bzw. Wege zur Verfügung. Nachfolgend sind verschiedene Verfahren beschrieben,

dabei wird insbesondere auf deren Vor- und Nachteile sowie Unterschiede in deren Präzision eingegangen.

Das Handmessen

Die vermutlich älteste Methode ein physisches Objekt zu erfassen, ist das händische Ausmessen aller relevanten Maße, wie Kantenlängen, Durchmessern, Umfängen und Abständen. Die dabei erhaltenen Messwerte beziehen sich nicht zwingend auf einen definierten Bezugspunkt, sondern meist aufeinander. Werden diese Maße inklusiver ihrer Bezüge notiert, lässt sich aus der Summe ein Modell erstellen.

Dieses Verfahren, des taktilen Messens, ist mit einfachen Mitteln und ohne besondere Anforderungen an die Umgebung umsetzbar. Allerdings kommt es bei komplexen Formen schnell an seine Grenzen. Außerdem lässt sich dieses Verfahren nicht automatisieren und ist bei größeren und/oder komplexeren Objekten sehr zeitaufwändig und fehleranfällig.

Wie in Abbildung 2.1 zu sehen, ist die Präzision dieses Verfahrens stark von der durchführenden Person und der Qualität der genutzten Messmittel abhängig. Daher unterliegt sie großen Schwankungen.



Abbildung 2.1: Händische Vermessung eines Zauberwürfels mittels Messschieber

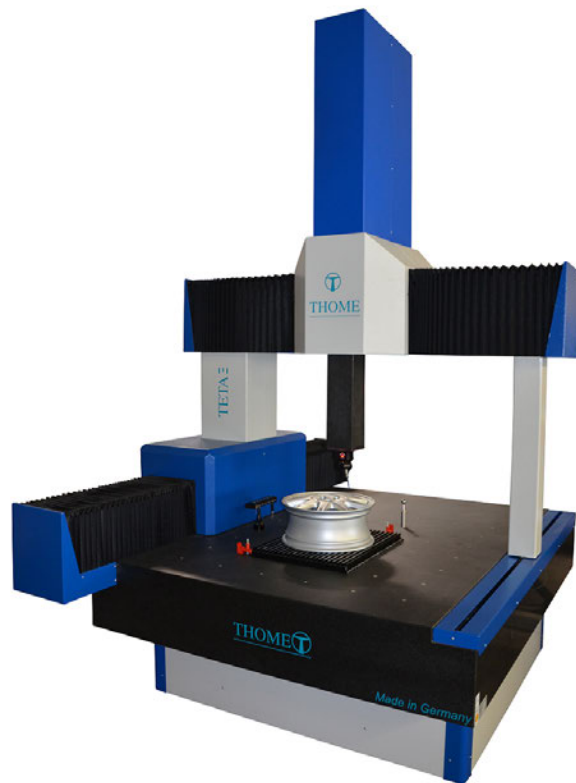


Abbildung 2.2: Darstellung einer Messmaschine [16]

Die taktile Messmaschine

Für dieses Verfahren wird das zu erfassende Objekt in einer "Koordinatenmaschine", in welche ein Messkopf eingespannt ist, platziert, wie in Abbildung 2.2 dargestellt. Dieser Messkopf kann die Oberfläche des Objektes abtasten und die Lage darauf befindlicher Punkte, in Bezug auf einen, vorher definierten, Bezugspunkt ermitteln. Dabei wird jeder Messpunkt einzeln angefahren, das kann entweder manuell oder automatisiert gesteuert werden. Mit dieser Methode ist es möglich einen analogen Wert zu erhalten. Wird dieser jedoch digitalisiert, entsteht immer eine begrenzte Anzahl Messpunkte.

Messmaschinen lassen sich alternativ nutzen, um die Genauigkeit der Fertigung eines Objektes zu beurteilen. Dafür lassen sich vorprogrammierte Konturen abfahren, wobei die Abweichungen vom Idealwert erfasst werden.

Die Messergebnisse sind ausschließlich von der Geometrie des Objektes abhängig und werden weder von dessen Farbe noch Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst. Daher ist

die, mit dieser Methode, zu erzielende Genauigkeit sehr hoch. Für kleine Objekte sind die Ergebnisse der Messungen höchst präzise, fast unschlagbar. Bei zunehmender Größe der Objekte und somit auch zunehmender Größe der Maschinen nimmt die Präzision allerdings stark ab und der Zeitaufwand enorm zu, weshalb eine Skalierung schwierig ist. Nachteilig ist außerdem der hohe Zeitaufwand, durch das einzelne Anfahren der Messpunkte, zu nennen. Hinzu kommt der finanzielle Aufwand durch die hohen Anschaffungskosten einer solchen Messmaschine.

Laserscan

Ein weiteres Verfahren ist das Erfassen eines Objektes mittels Laserscan. Das Messgerät für dieses optische Messverfahren besteht aus einer Laserquelle und einem Sensor. Dabei wird der ausgestrahlte Laserstrahl am Objekt reflektiert und vom verbauten Sensor wieder registriert. Aus der Zeitdifferenz zwischen Entsenden und Empfangen des (reflektierten) Signals lässt sich errechnen, wo im Raum, relativ zum Messgerät, die Reflexion stattfand und sich damit die Oberfläche des, zu erfassenden, Objektes befindet. Dieses Prinzip ist in Abbildung 2.3 zu erkennen. Aus dieser Information, sowie der Position des Messgerätes, relativ zu einem Bezugspunkt, lässt sich die Position der Reflexion relativ zu einem statischen Bezugspunkt berechnen. Fährt das Messgerät dabei eine definierte Fläche ab, entsteht eine Ansammlung (Wolke) aus Messpunkten im dreidimensionalen Raum, relativ zum definierten, statischen Bezugspunkt. Aus diesen Messpunkten lässt sich die Oberfläche des gescannten Objektes berechnen.

Die Vorteile dieses Messverfahrens sind die Erfassung vieler Messpunkte in geringer Zeit, sowie die Möglichkeit den Ablauf relativ einfach zu automatisieren. Außerdem ist positiv zu erwähnen, dass das zu erfassende Objekt für diese Methode nicht berührt werden muss. Ein großer Nachteil des Laserscans ist dessen Anfälligkeit für Umwelteinflüsse. Insbesondere (greller) Lichteinfall oder Regen, welcher die Laserstrahlen fälschlicherweise reflektiert, können zusätzliche oder falsche Messpunkten erzeugen. Aber auch eine Abweichung in Farbe oder Beschaffenheit der Oberfläche, von der Referenzfläche, an welcher die Kalibrierung durchgeführt wurde, kann zu fehlerhaften Ergebnissen führen. In Abbildung 2.3 sind außerdem einige Bereiche erkennbar, in denen keine Messpunkte existieren. Diese werden durch andere Teile des Raumes abgeschattet, liegen quasi im toten Winkel. Die fehlende Erfassung einiger Teile des Objektes führt zu einer verfälschten Darstellung und ist nur durch Bewegen des Laserscanners zu vermeiden.

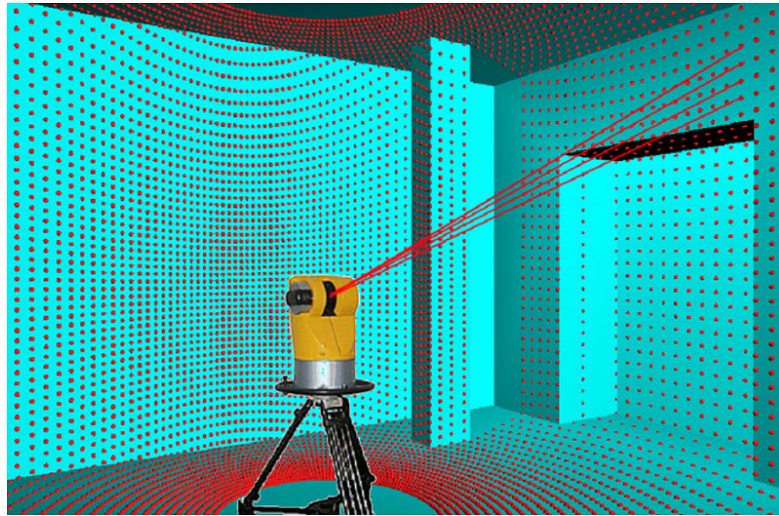


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines Laserscanners [13]

Bei optimalen Oberflächen, sowie Umgebungsbedingungen ist dieses Verfahren als sehr präzise einzustufen. Allerdings können bereits kleine Störungen, oder Änderungen der Oberflächenbeschaffenheit die Genauigkeit stark beeinflussen.

Photogrammetrie

Das Wort Photogrammetrie setzt sich aus den griechischen Worten *Photos*, für Licht, *Gramma*, für etwas Gezeichnetes/Geschriebenes und *metron* für messen zusammen [29]. Wörtlich übersetzt ist Photogrammetrie das Vermessen etwas mit Licht Gezeichnetem, einer Fotografie. Dementsprechend entstand die Photogrammetrie als Methode zum Kartographieren von Landschaften aus Fotografien. Daraus entwickelte sich die dreidimensionale Rekonstruktion der Form, Größe und Lage eines Objektes auf der Grundlage einer Reihe zweidimensionaler photographischer Aufnahmen dessen.

Es wird zwischen Luftbildphotogrammetrie und terrestrischer Photogrammetrie unterschieden. Für Luftbildphotogrammetrie werden Luftbilder aus mehreren Kilometern Höhe, beispielsweise aus Flugzeugen aufgenommen und ausgewertet. Terrestrische Photogrammetrie hingegen nutzt Fotografien, welche auf dem Erdboden aufgenommen wurden.

In Abbildung 2.4 ist dargestellt, wie ein Fotograf ein Objekt, in diesem Fall ein Fahrzeug, fotografiert. Die entstehenden Bilder überlappen in einigen Bereichen und können nach dem Stereoprinzip dreidimensional ausgewertet werden. Dafür werden die auszuwertenden Fotografien an markanten Punkten, sogenannten Markern, überlappt und zueinander

ausgerichtet. In Abbildung 2.4 sind schwarze Kreuze zu erkennen, welche als Marker dienen und die Genauigkeit des Ergebnisses verbessern sollen. In der Regel sind allerdings bereits vorhandene, weniger markante Punkte, auch im Hintergrund, ausreichend, um ein gutes Ergebnis zu erzielen. Nach diesem Prinzip funktioniert analog die menschliche Wahrnehmung.



Abbildung 2.4: Darstellung des Prinzips der Photogrammetrie [23]

Vor der Entwicklung des Computers wurden die Bilder in mühsamer Handarbeit, wie beschrieben, übereinandergelegt und vermessen, weshalb diese Methode lange Zeit fast ausschließlich militärisch genutzt wurde. Das änderte sich erst mit der Einführung der digitalen Photogrammetrie. Mit Hilfe eines Computers konnte das Punktezuordnungsverfahren automatisiert werden. So wurden aus wenigen, sorgfältig gewählten Punkten bis zu mehrere Millionen Punkte, die eine genaue Überlappung und evtl. notwendige Skalierung ermöglichen.

Auf Grundlage des Computer Vision, welches im nächsten Abschnitt näher erläutert ist, entstand mit der Zeit diverse Software. Einfach zu bedienende Software machte die Nutzung von Photogrammetrie auch im Hobbybereich nutzbar. Mittlerweile ist eine Vielzahl von Software, teilweise kostenfrei, verfügbar und auch hochauflösende Kameras sind zu niedrigen Preisen erhältlich. Dies ermöglicht eine kostengünstige Nutzung von Photogrammetrie zur dreidimensionalen Erfassung von Objekten. Photogrammetrie erscheint daher als geeignete Methode für diese Arbeit.

Für die Anforderung der kostengünstigen, dreidimensionalen Vermessung von Objekten ist ein optisches Verfahren wie der Laserscan oder die Photogrammetrie am besten geeignet, da es sich im Gegensatz zur händischen Vermessung automatisieren lässt und besser den Ansprüchen an die Genauigkeit entspricht. Eine Erfassung mit Hilfe einer Messmaschine disqualifiziert sich direkt auf Grund der hohen Kosten. Zusätzlich ist die eingeschränkte Skalierungsmöglichkeit von Nachteil. Bei einer optischen Methode ist sowohl eine kostengünstige, als auch ausreichend genaue Vermessung möglich. Außerdem lässt sich die Größe der zu erfassenden Objekte einfach skalieren ohne die Kosten noch die Genauigkeit skalieren zu müssen.

2.1.3 Messfehler und Messungenauigkeiten

Nach DIN 1319-1 wird die Differenz zwischen dem Messergebnis und dem wahren Wert einer Messgröße als Messabweichung bezeichnet [14]. In dieser Arbeit wird diese Differenz als Messfehler bezeichnet.

Es existieren verschiedene Arten von Messfehlern. Die, für die Erfassung eines Objektes, relevanten Arten und deren Ursachen werden im Nachfolgenden dargestellt.

Zufällige Messfehler = Messungenauigkeiten

Bei wiederholten Messungen unter gleichen Bedingungen weisen zufällige Fehler verschiedene Beträge und Vorzeichen auf: die Messwerte „streuen“ [14]. Die Ursachen zufälliger Fehler sind teilweise unbekannt, weshalb sie nicht kompensiert oder eliminiert werden können. "Bei Messaufgaben interessiert deshalb nicht das Ergebnis einer einzelnen, zufälligen Messung, sondern z.B. der Mittelwert über viele Messungen" [14].

Systematische Messfehler

Für systematische Fehler ist charakteristisch, dass sowohl deren Ursache als auch die Art ihrer Einwirkung auf die Messung bekannt sind. Daher ist, mit großem Aufwand, eine Kompensation des systematischen Fehlers prinzipiell möglich [14]. Auf Grund des großen Zusatzaufwandes wird dies jedoch nur selten praktiziert.

Systematische Fehler werden nicht selten als zufällig deklariert, wenn es an Verständnis

für die Messaufgabe mangelt [14]. Voraussetzung für die Vermeidung und Kompensation von systematischen Fehlern ist das Verständnis der durchzuführenden Messung.

Ursachen für Messfehler bei optischen Messungen

Unabhängig der oben beschriebenen Fehlerklassen können Fehler durch verschiedene, folgende Ursachen bedingt sein.

Ein signifikanter Faktor sind Umwelteinflüsse. Starke oder sich stark verändernde Sonneneinstrahlung kann die optische Messung verfälschen. Durch extreme Sonneneinstrahlung und Reflexionen können die optischen Messungen gänzlich unbrauchbar werden. Verändern sich, während der Messung, die Lichtverhältnisse stark, entstehen Inkonsistenzen im Verlauf der Messungen. Auch Schattenwurf kann bei optischen Messungen, insbesondere bildbasierten Methoden, das Ergebnis stark beeinflussen, da diese als Teil des Objektes interpretiert werden. Auch Luftverschmutzungen beeinflussen die Messgenauigkeit optischer Messungen stark. Die Partikel, von Schmutzpartikeln bis Wassertropfen (Regen), in der Luft führen zu Reflexionen welche falsche Messwerte provozieren. Unter Umwelteinflüssen sind auch Temperaturschwankungen zu verstehen. Diese beeinflussen in der Regel nicht direkt das Messsystem, sondern das zu erfassende Objekt, welches, zwar nur marginal, bei Temperaturänderungen Größenänderungen erfährt.

Neben Einflüssen der Messumgebung auf die Qualität der Messergebnisse beeinflusst die Qualität des Messaufbaus bzw. des Messsystems diese ebenfalls. Montagefehler der Messanlage oder große Toleranzen bei deren Fertigung resultieren in internen, systematischen Fehlern, welche, gerade bei kostengünstiger Hardware, zu verzerrten Messergebnissen führen können. Auch eine zu geringe Auflösung der Messpunkte kann zu ungenauen Messergebnissen führen. Liegt beispielsweise eine Objektkante zwischen zwei Pixelreihen oder zwei definierten Messpunktzeilen, erscheint diese mal in der einen und mal in der anderen Reihe.

Eine weitere Fehlerursache, spezifisch für bildbasierte Messungen, insbesondere Photogrammetrie, ist die Linsenverzerrung. Dabei entsteht durch die Linse ein rotationssymmetrischer Fehler um das Linsenzentrum. Dies ist ein systematischer Fehler, welcher sich theoretisch kompensieren ließe. Dafür sind allerdings genaue Kenntnisse der verbauten Linse und eine zeitaufwändige Berechnung des Fehlers nötig.

Des Weiteren können die Farbe und Struktur der Oberfläche, des zu erfassenden Objektes Einfluss auf die Qualität der Erfassung haben. Verändert sich das Reflexionsverhalten

der Objektoberfläche, durch eine veränderte Oberflächenbeschaffenheit, im Verlauf des Scans, kann es zu Fehlinterpretationen der Messpunkte kommen. Dabei erscheinen beispielsweise dunklere Segmente weiter entfernt die Hellere in der gleichen Ebene.

2.2 Hardware

Für die optische Vermessung und Erfassung von Objekten, bieten sich Kameras als kostengünstige Hardware an. Nachfolgend soll die, für diese Arbeit, genutzte Hardware vorgestellt werden. Dabei wird insbesondere auf die technischen Spezifikationen und technischen Voraussetzungen für eine bildbasierte Erfassung von Objekten eingegangen.

2.2.1 Microsoft Kinect V1



Abbildung 2.5: Kamera und Kabel der Microsoft Kinect V1 [1]

Die Kinect Kamera der ersten Generation wurde am 4. November 2010 vorgestellt. Mit dieser Erweiterung für die Spielekonsole Xbox360 [22], lassen sich Spiele mittels Körperbewegung steuern ohne ein Gerät in der Hand halten zu müssen. Die Kinect V1 besitzt folgende Komponenten [22]:

Die RGB-Kamera nimmt Farbbilder auf. Dabei beträgt die Bildfrequenz 30 fps.

Der Infrarot-Projektor projiziert ein bekanntes Muster auf die Umgebung.

Die **Infrarot-Kamera** nimmt die Reflexion des, vom Projektor projizierten, Musters auf.

Das **Multi-Array-Mikrofon**, bestehend aus vier Mikrofonen, ermöglicht die Erfassung und Ortung von Sprachbefehlen.

Der **Stellmotor**, im Fuß der Kamera, kann den Kopf der Kamera um die horizontale Achse drehen. Der Kopf lässt sich so um 28° kippen.

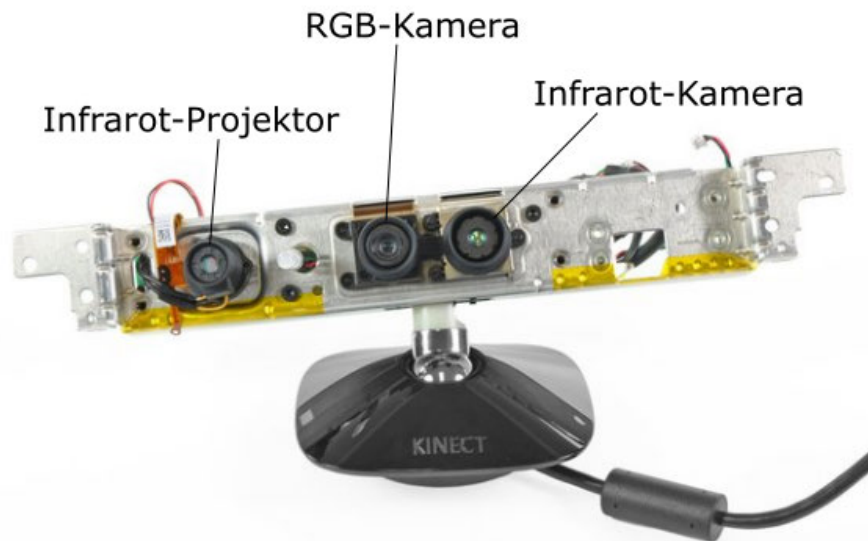


Abbildung 2.6: Kamera der Microsoft Kinect V1 ohne Gehäuse [2]

Für die Tiefenmessung nutzt die Kinect V1 die Coded Light Technique [22]. Die Qualität der so erhaltenen Daten ist relativ schlecht. Die Auflösung der RGB-Kamera ist mit der einer alten Webcam zu vergleichen. Der Infrarotsensor liefert nur sehr verrauschte Daten, weshalb die Tiefendaten eine hohe Ungenauigkeit aufweisen. Die geringe Auflösung hat zur Folge, dass kleine Details verloren gehen [22]. Für den ursprünglichen Anwendungsfall ist dies kein Problem, bei der Erfassung von komplexen, filigranen Objekten kann dies allerdings zum Verlust relevanter Informationen und Verfälschung der digitalen Darstellung führen.

Coded Light Technique

Die Coded Light Technique basiert auf einem oder mehreren projizierten Mustern, welche mit einer oder mehreren Kameras aufgenommen werden. Jedes Pixel des Musters hat ein Codeword, welches die eindeutige Identifizierung des Pixels gewährleistet. Damit lässt sich von jedem Pixel auf dessen Koordinaten schlussfolgern. Über die Abweichung des, von der Kamera, aufgenommen Musters vom Original lässt sich, z.B. mittels Triangulation, die Entfernung der Reflektionsoberfläche der Pixel berechnen [21]. So lassen sich Tiefeninformationen der gescannten Umgebung erhalten.

2.2.2 Microsoft Kinect V2



Abbildung 2.7: Kamera der Microsoft Kinect V2 [3]

Die zweite Generation der Kinect Kamera wurde am 22. November 2013 vorgestellt. Sie ist für den Nachfolger der Spielekonsole Xbox360, die Spielekonsole Xbox One, entwickelt worden.

Die neue Kinect ist präziser als die Kinect der ersten Generation. Die Anzahl der Sensoren ist unverändert, die RGB-Kamera hingegen löst die Bilder in HD auf [22]. Die Tiefenmessung unterscheidet sich von der, der ersten Generation. Microsoft definiert es als Time-Of-Flight System [22].

Time-Of-Flight System

Jedes Pixel des Infrarotsensors besteht aus zwei Teilen. Mittels einer Clock wird geregelt welcher Teil des Pixels zu welchem Zeitpunkt aktiv ist. Dies ermöglicht die Erzeugung verschiedener Bilder, wie in Abbildung 2.9 zu erkennen [22]. Neben einem Farbbild der RGB-Kamera wird zusätzlich ein errechnetes Tiefenbild, ein unverarbeitetes Infrarotbild und ein mit Farbinformationen des RGB-Bildes überlagertes Tiefenbild übertragen. Zur Berechnung der Tiefenwerte wird die Phasenverschiebung zwischen dem ausgesendeten und empfangenen Signal, für jedes Pixel, gemessen [22].

Der Tiefenwert lässt sich dabei über folgende Formel berechnen [22]:

d = Tiefenwert

$phase$ = Phasenverschiebung

c = Lichtgeschwindigkeit

f_{mod} = Frequenz des ausgesendeten Lichts

$$2d = \frac{phase}{2\pi} \cdot \frac{c}{f_{mod}} \quad (2.1)$$

Für eine genauere Berechnung der Tiefenwerte, durch Eliminierung der Mehrdeutigkeit der Ergebnisse aus der Berechnung der Phasenverschiebung, nach Gleichung 2.1, erzeugt die Kinect V2 Tiefenbilder bei verschiedenen Frequenzen. Die dafür genutzten Frequenzen des ausgesendeten Lichtes betragen ca. 120 MHz, 80 MHz und 16 MHz [22].

Dieses System funktioniert optimal bei einer möglichst geringen Beeinflussung durch Umgebungslicht. Bei direkter Sonneneinstrahlung hat die Kinect V2 Probleme das selbst ausgesendete Infrarotlicht vom Sonnenlicht zu differenzieren [22].

2.2.3 Microsoft Kinect V1 vs. Kinect V2

Um die vorgestellte Hardware besser beurteilen zu können, sollen die erste und zweite Generation der Kinect-Kamera im Folgenden miteinander verglichen werden.

Tabelle 2.1: Die verwendete Hardware im Vergleich [22]

	Kinect V1	Kinect V2
RGB Kamera [pixel]	640x480 oder 1280x1024	1920x1080
Tiefenkamera [pixel]	320x240	512x424
maximaler Abstand	4,0 m	4,5 m
minimaler Abstand	0,8 m	0,5 m
horizontales Sichtfeld	57°	70°
vertikales Sichtfeld	43°	60°
Kippmotor	Ja	Nein
USB	2.0	3.0
Anschaffungspreis	80€	199€
Gewichte		
Kamera	545 g	929 g
Netzteil + Kabel + USB-Kabel	202 g	357 g
KINECT for WINDOWS HUB	-	70 g
Gesamtgewicht	747 g	2103 g

In Tabelle 2.1 sind die technischen Spezifikationen der vorgestellten Versionen der Kinect-Kamera nebeneinander dargestellt. Es fällt direkt auf, dass die Auflösung der RGB-Kamera der zweiten Generation deutlich höher ist. Bereits die erste Generation erhielt in einem Iterationsschritt eine besser auflösende Kamera. Die Auflösung der Tiefenkamera hingegen ist bei der zweiten Generation etwas niedriger. Dennoch ist der erfasste Bereich bei der zweiten Generation deutlich größer. Die Unterschiede in der Auflösung der RGB-Kamera, sowie der Größe des erfassbaren Bereichs sind in Abbildung 2.10 dargestellt. Beim Vergleich der Abbildung 2.8 und 2.9 ist eindeutig erkennbar, dass die Kinect V2 deutlich präzisere Informationen, wie Form und Lage im Raum, über die im Erfassungsbereich befindlichen Objekte liefert. Die Kinect-Kamera der zweiten Generation besitzt eine USB 3.0 Schnittstelle um die größeren Datenmengen problemlos übermitteln zu können. Wohingegen eine USB 2.0 Schnittstelle in der ersten Generation noch völlig ausreichend ist. Mit der deutlich moderneren Technik und fortgeschrittenen Technologie der Kinect V2 gegenüber der V1 ist auch deren Anschaffungspreis um einen Faktor von etwa 2,5 von 80€ auf knapp 200€ gestiegen.

Aus den selbst ermittelten Gewichtsdaten in Tabelle 2.1 geht eindeutig hervor, dass die zweite Generation der Kinect-Kamera insgesamt fast drei mal so schwer wie deren Vorgänger ist. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Kamera der zweiten

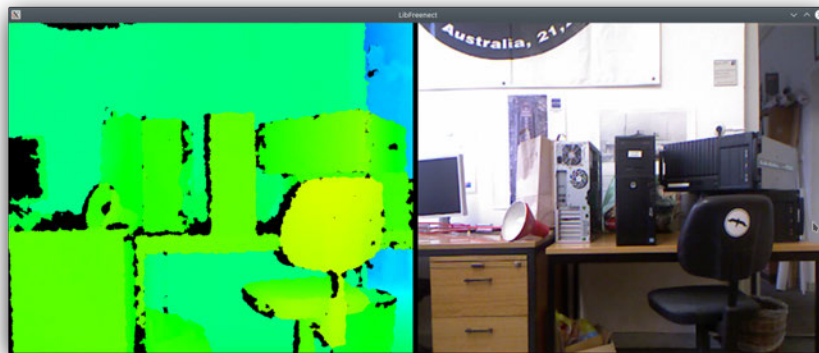


Abbildung 2.8: Tiefenbild und RGB-Bild der Microsoft Kinect V1 - Bildschirmaufnahme von "glview" aus "libfreenect"

Tiefenbild überlagert
mit Farbinformationen
des RGB-Bildes

unverarbeitetes Infrarotbild



berechnetes Tiefenbild

unverarbeitetes RGB-Bild

Abbildung 2.9: Von der Microsoft Kinect V2 erzeugte Bilder - Bildschirmaufnahme von "Protoectäus" libfreenect2"

Generation fast doppelt so schwer ist. Allerdings kommt hinzu, dass auch die zugehörigen Kabel deutlich schwerer sind als die der ersten Generation. Dies fällt auch in der Handhabung auf, die Kabel der ersten Generation sind deutlich flexibler und einfacher zu

handhaben, als die der zweiten Generation. Hinzu kommt ein Adapter, welcher notwendig ist, um die Kinect V2 an den PC anzuschließen.



Abbildung 2.10: RGB-Bilder der Microsoft Kinect V1 (a) im Vergleich zum RGB-Bild der Microsoft Kinect V2 (b) [22]

In der mobilen Anwendung bietet die Kinect V1 daher einige Vorteile in der Handhabung. Die technischen Voraussetzungen und die Qualität der ermittelten Bilder der Kinect V2 versprechen eine merklich bessere Erfassung von Objekten. In dieser Arbeit werden Objekte sowohl mit der Kinect V1 als auch der Kinect V2 erfasst. Basierend darauf werden die Handhabung in der Praxis, sowie die Qualität der Erfassung beurteilt und verglichen.

2.3 Software

Wie auch für die Hardware, stehen für die Software verschiedene Optionen zur Verfügung. Nachfolgend wird verschiedene, kostenfreie Software zur Darstellung eines digitalen Modells aus den ermittelten Daten und die zugrunde liegenden Verfahren vorgestellt.

2.3.1 Punktwolke

Eine Punktwolke ist eine Menge von Punkten in einem Vektorraum. Die Position jedes Punktes ist bekannt und wird durch Koordinaten, relativ zu einem definierten Bezugspunkt, beschrieben [20].

Das Ergebnis eines Laserscans ist beispielsweise eine Punktwolke. Die Lage einer Reflexion des Lasers ist bekannt und kann als Punkt in einem Vektorraum dargestellt werden.

Liegen ausreichend einzelne Reflexionen bzw. Punkte vor lässt sich damit ein digitales Modell des realen Objektes darstellen.

Ein gängiges Beispiel, um die verschiedenen Darstellungen eines erfassten Objektes zu veranschaulichen, ist der "Stanford Bunny". Links in Abbildung 2.11 ist der "Stanford Bunny" durch eine Punktwolke dargestellt. Mit zunehmender Zahl der Datenpunkten, bei einer ebenfalls gleichmäßigen Verteilung, nimmt die Auflösung und damit auch die Erkennbarkeit des Objektes proportional zu.

2.3.2 Mesh

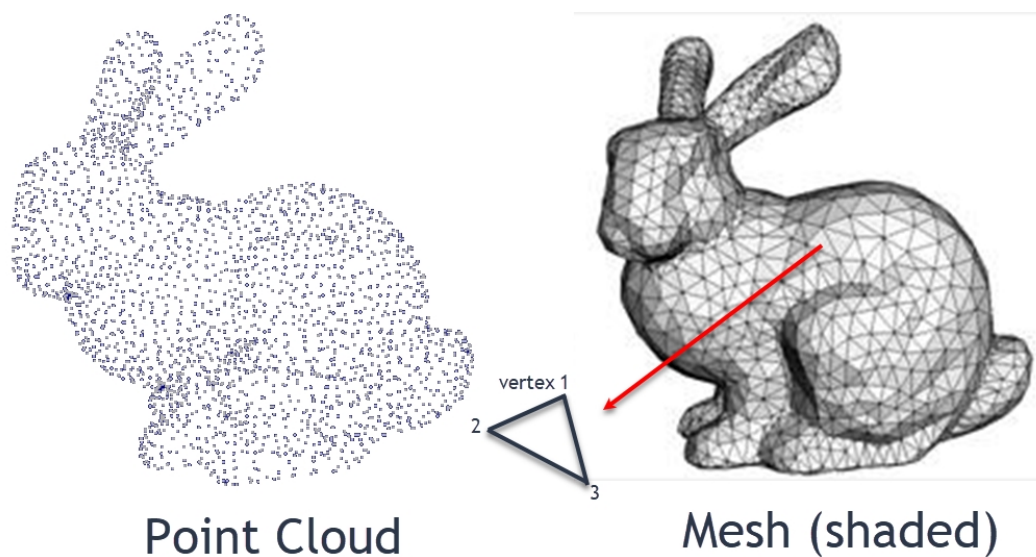


Abbildung 2.11: Der Stanford Bunny - links als Punktwolke und rechts als Mesh [26]

Eine weitere Methode, um ein Modell eines Objektes darzustellen, ist das Mesh. Ein Mesh ist ein Netz aus Polygonen, welche die Oberfläche des Objektes beschreibt. Diese Darstellung bietet eine relativ einfache Repräsentation mit vielfältigen Möglichkeiten zur Manipulation [25].

In Abbildung 2.11 ist auf der linken Seite der "Stanford Bunny" als Punktwolke dargestellt. Wird ein Netz aus Polygonen, über diese gelegt, entsteht die Darstellung auf rechten Seite. Rechts in Abbildung 2.11 ist der "Stanford Bunny" durch ein Netz aus Dreiecken beschrieben. Oberflächen lassen sich am genauesten durch ein Netz aus Dreiecken beschreiben, da diese Flächen die geringste Zahl an Ecken besitzen.

Das Problem von Polygonnetzen ist, dass sich gekrümmte Flächen nicht exakt, sondern immer nur als Annäherung darstellen lassen. Gute Annäherungen brauchen daher eine enorm große Speichermenge, was die digitale Darstellung von Objekten aus Datenpunkten erschwert [25]. Der Einsatz von Polygonnetzen ist dennoch weit verbreitet, da sie direkt durch die Grafik-Hardware unterstützt werden. Deren Visualisierungsmechanismen beschränken sich fast ausschließlich auf die Ausgabe von Dreiecken [25].

Meshes bzw. Polygonnetze sind auch heute noch in vielen populären CAD-Systemen weit verbreitet [25]. Polygonnetze, aus Ergebnissen eines 3D-Scans, lassen sich mittels Flächenrückführung auch in CAD-Modelle umwandeln, was die weitere Verwendung der erfassten Daten enorm vereinfacht.

2.3.3 Libfreenect - OpenKinect

Libfreenect ist ein Projekt der offenen OpenKinect Community mit, laut eigenen Aussagen, etwa 200 Mitgliedern [18]. Diese Gemeinschaft engagiert sich dafür, die Kinect-Hardware für PCs und andere Hardware nutzbar zu machen. Die aktuelle Softwareversion der Libfreenect ist die v0.6.2 Cobra, vom 13. Februar 2021. Diese enthält allen notwendigen Code um die Kinect-Hardware zu aktivieren, initialisieren, mit dieser zu kommunizieren und Daten zu erhalten. Das beinhaltet die benötigten Treiber, sowie eine Cross-Platform Application Programming Interface (API), welche auf den gängigen Betriebssystemen, Windows, Linux und OS X, läuft. Die API unterstützt die folgenden Sprachen bzw. Plattformen [19]:

- C
- C++
- .NET (C#/VB.NET)
- Java (JNA and JNI)
- Python
- C Synchronous Interface

Die Libfreenect Bibliothek kommuniziert mit der OpenKinect API und interpretiert die Rohdaten, welche die Kinect-Kamera liefert. Um die abweichenden, umfangreicheren Rohdaten der Kinect V2 verarbeiten zu können, wurde die Libfreenect2-Bibliothek entwickelt.

2.3.4 Kinect for Windows

Die "Kinect for Windows SDK 2.0" ist eine Sammlung von Werkzeugen und API's, welche die Verwendung einer Kinect-Kamera zur Gesten- und Spracherkennung unter Microsoft Windows ermöglicht [11]. Die Sammlung ist, in der aktuellen Version 2.0.1410.19000 aus dem Jahr 2014, kostenlos vom Hersteller der Kinect-Kameras, "Microsoft Corporation ", verfügbar.

Die "Kinect for Windows SDK 2.0 " beinhaltet folgendes:

- Treiber für die Nutzung der Kinect V2 Sensorik auf Computern mit den Betriebssystemen Windows 8 (x64), Windows 8.1 (x64), und Windows Embedded Standard 8 (x64)
- Application Programming Interfaces (APIs) und Device Interfaces
- Code Beispiele

In dieser Arbeit wurden lediglich die beinhalteten Treiber genutzt, um weitere Software mit den Kinect-Kameras verwenden zu können. Mit den zusätzlich beinhalteten APIs, Device Interfaces und Code Beispielen ist es allerdings möglich individualisierte, eigene Software zu entwickeln.

Um das "Kinect for Windows SDK 2.0 " nutzen zu können, sind folgende Systemvoraussetzungen zu erfüllen [12]:

Betriebssystem:

- empfohlen: Embedded 8 Standard, Windows 8, Windows 8.1
- getestet: Windows 10

Empfohlene Hardwarekonfiguration:

- Prozessor:
 - 64-bit (x64)
 - dual-core 3.1 GHz (2 logische Kerne pro physischen Kern) (oder besser)
- RAM: 4 GB (oder mehr)
- USB 3.0
- DirectX 11 fähige Graphikkarte

Benötigte Software:

- Visual Studio 2012 oder Visual Studio 2013

2.3.5 ReconstructMe

"ReconstructMe" ist eine Anwendung zur Echtzeit 3D Rekonstruktion. Diese Anwendung wurde von "PROFACTOR", einem Forschungsunternehmen, spezialisiert auf Robotik und Computer Vision, entwickelt. Bei nicht-kommerzieller Nutzung, stellt der Entwickler die Software dem Nutzer kostenfrei und uneingeschränkt zur Verfügung. Für die kommerzielle Nutzung ist der Erwerb einer jährlichen, kommerziellen Lizenz nötig [27].

"ReconstructMe" ermöglicht dem Anwender Objekte zu digitalisieren, indem die Kamera um das Objekt bewegt wird. Dabei lassen sich Objekte bis zu einer maximalen Größe von $4000\text{ mm} \times 4000\text{ mm} \times 4000\text{ mm}$ erfassen. Gemessen wird im metrischen System, wodurch keine fehleranfälligen und aufwendigen Skalierungen nötig sind [9]. Damit läuft die Software auf handelsüblicher Hardware und bedarf keiner besonderen Systemanforderungen, mit der Ausnahme eines Windows Betriebssystems.

"ReconstructMe" unterstützt eine Vielzahl von Kameras, unter anderem ASUS Xtion Family, the PrimeSense Carmine oder die Microsoft Kinect V1. Die Ergebnisse eines Scans lassen sich mit "ReconstructMe" sowohl als Punktwolke, als auch als Mesh darstellen. Diese können als CAD-Dateien in den verschiedenen Formaten, wie STL, OBJ, 3DS, und PLY exportiert werden. Die Farbinformationen des gescannten Objektes werden erfasst und verarbeitet, sofern diese von der Kamera geliefert werden [9]. Die Installation, Einrichtung und Bedienung der Anwendung ist sehr einfach [9]. Die in Abbildung 2.12 abgebildete Benutzeroberfläche (Graphical User Interface, kurz GUI) ist sehr aufgeräumt und übersichtlich, was eine intuitive Handhabung ermöglicht.

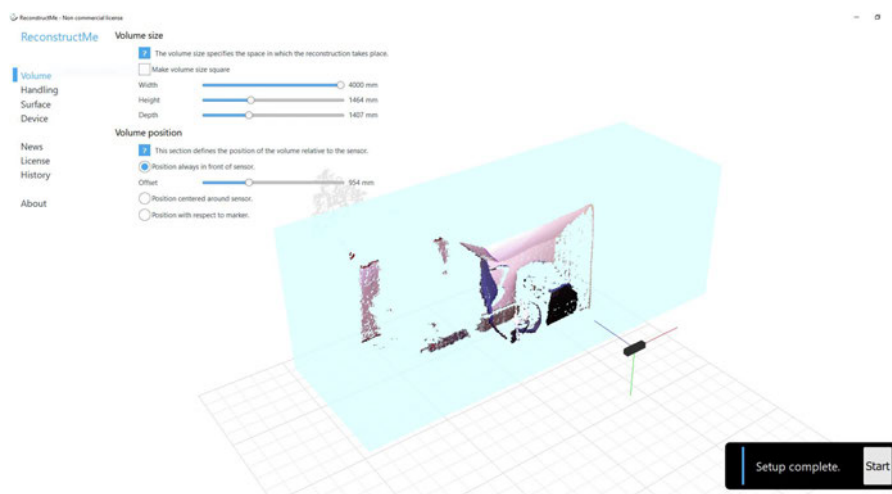


Abbildung 2.12: Benutzeroberfläche von "ReconstructMe"

2.3.6 RTAB-Map

Real-Time Appearance-Based Mapping ("RTAB-Map") ist ein merkmalsbasiertes Verfahren zur Erstellung von Karten. Diese Karten werden als Punktwolke gespeichert. Mit Appearance-Based Loop-Closure Detektion und Graphen-basiertem Speichermanagement können Echtzeit-Anforderungen erfüllt werden. Verarbeitet werden 3D-Sensordaten von RGBD-Kameras oder Stereo-Kameras [17]. Die verwendeten Sensoren müssen mindestens bei 30 Hz arbeiten können, darunter fallen unter anderem die Kinect-Kameras der ersten und zweiten Generation. Da die primäre Anwendung der Software die Erzeugung von Karten ist, kann das Programm zusätzlich Daten, wie Radbewegungen auswerten, um sich im Raum zu orientieren. So lassen sich mit dieser Software dreidimensionale Karten, wie in Abbildung 2.13, erzeugen. Die Software ist kostenfrei als Open-source-Lizenz verfügbar.

Bei der Verwendung von Kinect-Kameras wird zusätzlich Libfreenect, wie unter Abschnitt 2.3.3 beschrieben, als API, benötigt um die Rohdaten des Sensors auswerten und darstellen zu können.



Abbildung 2.13: Mit "RTAB-Map" erstellte Karte eines mehrstöckigen Hauses [24]

2.3.7 Computer Vision

"Computer Vision" entstand als Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz um Sehvorgänge in der realen, dreidimensionalen Welt zu mechanisieren. Durch "Computer Vision" wird es Computern ermöglicht, Gegenstände und Szenen räumlich zu erfassen, Objekte zu erkennen und Bewegungen zu interpretieren. Beispiele für die erfolgreiche Anwendung von "Computer Vision" im Alltag sind Gestensteuerung oder autonome Navigation. Dennoch sind viele der ursprünglich als relativ einfach eingeschätzten Aufgaben, trotz jahrelanger Entwicklung, nicht oder nur unzureichend gelöst [28].

2.3.8 AliceVision - Meshroom

Mit der "Meshroom" Software und dem, ihr zugrundeliegenden, Computer Vision Framework AliceVision lassen sich aus einer Menge ungeordneter Bilder eines Objektes dreidimensionale Rekonstruktionen erstellen.

Dafür stellt "Meshroom" ein "Nodes Environment" bereit, um diverse Computer Vision Tasks auszuführen. Jeder Task ist ein in "AliceVision" implementiertes Tool und wird durch ein Node dargestellt. Die Nodes lassen sich zu einem azyklischen Graphen verbinden. Dieser wird als Pipeline bezeichnet. Die Pipeline lässt sich je nach Anwendungsfall verändern und optimieren. Dazu können die Nodes wie einzelnen Bausteine gegeneinander ersetzt oder um weitere Nodes ergänzt werden [7].

Um die Rechenzeit zu verkürzen, kann "Meshroom" optional auf einem Computer-Cluster ausgeführt werden. Dafür können, abhängig vom vorliegenden Anwendungsfall, komplette Nodes oder sogar diverse Vorgänge innerhalb der einzelnen Nodes parallel auf mehreren Computern berechnet werden [7].

Die GUI, welche in Abbildung 2.14 zu sehen ist, ermöglicht dem Nutzer sowohl den Prozess zu beobachten und Parameter zu überprüfen, als auch diese zu verändern. Werden Parameter oder Inputs verändert, werden die, von der Änderung betroffenen Nodes erneut aufgegriffen und durchgeführt. So lässt sich der Prozess interaktiv verändern und muss nicht ständig erneut komplett durchlaufen werden. "AliceVision Meshroom" lässt sich ebenfalls ohne GUI ausführen. Dies ermöglicht es dem Nutzer die Software ohne weiteres in Scripts einzubinden, um Abläufe zu automatisieren oder sie in ein umfangreicheres Programm einzubinden [7].

Sowohl "Alice Vision" als auch "Meshroom" sind Opensource-Projekte und damit in der aktuellen Version 2021.1.0 [15] kostenfrei nutzbar.

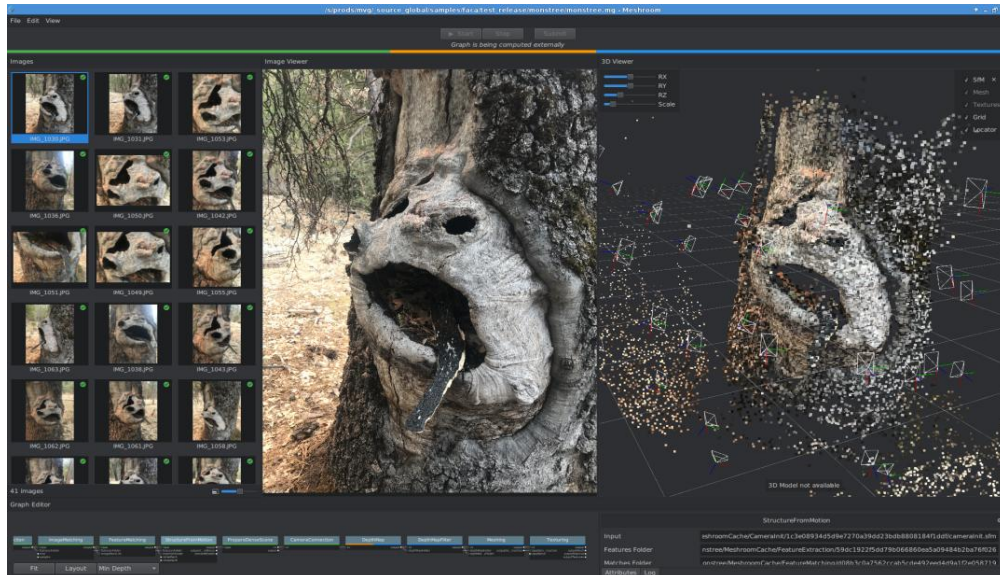


Abbildung 2.14: Benutzeroberfläche von "Meshroom" während einer Berechnung [4]

2.3.9 CUDA

"CUDA" ist eine Programmierschnittstelle, eine API, welche es ermöglicht Prozesse auf die Grafikkarte auszulagern.

Das Optimierungspaket wurde vom Grafikkartenhersteller "NVIDIA Corporation" entwickelt und weiter entwickelt. Mit CUDA lassen sich Berechnungen merklich beschleunigen, indem die Hardware der Graphics Processing Unit (GPU) optimal genutzt wird [5].

In GPU-beschleunigten Anwendungen werden die sequenziell ablaufende Teile der Arbeitsbelastung auf der CPU, welche auf Einzelthreads optimiert ist, gerechnet. Parallel werden die berechnungsintensiven Teile der Anwendung auf tausenden Kernen der GPU gerechnet [5]. Damit kann die Berechnungszeit einer Anwendung deutlich reduziert werden, da die Grafikkarte wie ein zweiter Prozessor genutzt werden kann.

Entwickler können "CUDA" in populären Programmiersprachen wie C, C++, Fortran, Python and MATLAB nutzen und programmieren [5].

Das "CUDA" Toolkit enthält die gesamte notwendige Software, um GPU-beschleunigte Anwendungen zu entwickeln:

- GPU-beschleunigte Bibliotheken
- einen Kompiler
- Development Tools
- CUDA Runtime

3 Aufbau & Durchführung

Im Rahmen dieser Arbeit werden bildverarbeitungsbasierte 3D-Vermessungen von Objekten durchgeführt. Die Verarbeitung der Daten wird mit den, in Kapitel 2 vorgestellten, Softwaretools "ReconstuctMe", "RTAB-MAP" und "Meshroom" verarbeitet. In diesem Kapitel werden der Aufbau sowie die Durchführung der verschiedenen Messungen beschrieben. Für eine bessere Vergleichbarkeit sind diese nach den verwendeten Softwaretools gegliedert.

3.1 Aufbau

Im Folgenden werden die jeweiligen Aufbauten der durchgeführten optischen Vermessungen dargestellt.

3.1.1 ReconstructMe

Für die 3D-Vermessung mittels "ReconstuctMe" wird die Kinect V1 verwendet. Um mit der Kinect V1 Objekte zu scannen, sind folgende Komponenten nötig:

- Laptop mit NVIDIA Grafikkarte
- Kamera (Kinect V1)
- Steckernetzteil
- USB Kabel
- zu erfassendes Objekt

Weiterhin werden für die bessere Handhabung genutzt:

- Tischwagen für stabile Kameraführung
- Akku mit Wechselrichter



Abbildung 3.1: Aufbau für die Erfassung mit der Microsoft Kinect V1

Um die Kamera mit Strom zu versorgen, ist eine 230V Stromversorgung nötig. Diese wird über einen Akku mit Wechselrichter am Ort der Messung zur Verfügung gestellt. Alternativ wäre die Nutzung eines Verlängerungskabels möglich. Das Gesamtgewicht der Kamera, inklusive benötigter Kabel beträgt 747 g, hinzu kommt das Gewicht des Laptops. Um die Handhabung zu vereinfachen und eine stabile Kameraführung zu erreichen, wird die gesamte Hardware, wie in Abbildung 3.1 abgebildet, auf einem Tischwagen aufgebaut. Für eine weitere Erfassung wird die Kinect V1 in der Hand gehalten, während die restliche Hardware auf dem Tischwagen verbleibt. Dies ermöglicht außerdem einen einfachen Ortswechsel.

3.1.2 RTAB-MAP

Die Vermessung mittels "RTAB-MAP" wird sowohl mit der Kinect V1 als auch der Kinect V2 durchgeführt. Der Aufbau der Kinect V1 erfolgt wie in Unterabschnitt 3.1.1 beschrieben. Daher wird nachfolgend nur auf den Aufbau mit der Kinect V2 eingegangen.

Um mit der Kinect V2 Objekte zu scannen, sind folgende Komponenten nötig:

- Laptop mit NVIDIA Grafikkarte
- Kamera (Kinect V2)
- Netzteil
- USB 3.0 Kabel
- KINECT for WINDOWS HUB
- zu erfassendes Objekt

Weiterhin werden für die bessere Handhabung genutzt:

- Tischwagen mit Aufbau für stabile Kameraführung
- Akku mit Wechselrichter



Abbildung 3.2: Aufbau für die Erfassung mit der Microsoft Kinect V2 und die Modellierung mit "RTAB-Map"

Zum Betrieb wird auch bei der Kinect V2 230V Netzstrom benötigt. Dieser wird ebenfalls über einen Akku mit Wechselrichter am Ort der Erfassung zur Verfügung gestellt. Auch

in diesem Fall hätte ein Verlängerungskabel genutzt werden können. Die Kamera, inklusive aller zugehörigen Teile wiegt 2103 g, deutlich mehr als die V1. Daher wird auch für die bessere Handhabung dieses Messaufbaus, die gesamte Hardware auf dem Tischagen aufgebaut.

3.1.3 Meshroom

Für die Erfassung eines Objekts zur Rekonstruktion mittels Photogrammetrie durch "Meshroom" wird eine Smartphone-Kamera verwendet. Dafür wird ein Samsung Galaxy S10e genutzt, auf dessen Rückseite sich zwei Kameras befinden:

- "12 Megapixel-Weitwinkelobjektiv (77°) mit doppelter Blende und Dual Pixel. Die integrierte OIS-Software (Optical Image Stabilisation) hilft, unscharfe und verwackelte Bilder zu reduzieren." [8]
- "16 Megapixel-Ultra-Weitwinkelobjektiv (123°)" [8]

Wie in Abbildung 3.3 gezeigt, wird das Smartphone für die Erfassung in der Hand gehalten. Die gesamte Erfassung findet mittels händischer Kameraführung statt.

Für die Berechnung des Modells mit "Meshroom" wird außerdem ein Laptop, ein Acer Aspire V 772G, genutzt.

Betriebssystem: Kubuntu 20.04 LTS

Prozessor: Intel® Core™ i7-4702MQ

Anzahl der Kerne	4
Anzahl der Threads	8
Grundtaktfrequenz des Prozessors	2,20 GHz
Max. Turbo-Taktfrequenz	3,20 GHz
Cache	6 MB Intel® Smart Cache
Bus-Taktfrequenz	5 GT/s
Intel® Turbo-Boost-Technik 2.0 Taktfrequenz	3.20 GHz

Grafikkarte: NVIDIA GeForce GTX 850M

Arbeitsspeicher: 8GB (DDR3) / später 24GB (DDR3)

Festplatte: Samsung SSD 850 EVO 250GB

Die Nodes PrepareDenseScene, DepthMap und DepthMapFilter benötigen eine NVIDIA Grafikkarte mit mindestens "CUDA 2.0". In Vorversuchen mit 8GB Arbeitsspeicher wurden Berechnungen mit mehr als 20 Bildern abgebrochen. Nach Aufrüstung des Laptops auf einen 24GB Arbeitsspeicher laufen Berechnungen mit 500 Bildern ohne Probleme durch.



Abbildung 3.3: Händische Erfassung mit der Smartphone-Kamera

3.2 Durchführung

Nachfolgend wird die Durchführung der Vermessungen, ebenfalls nach Softwaretools gegliedert, beschrieben und dargestellt. Als Messobjekt wird für alle Programme ein 7,03 m langer Segelflugzeugrumpf aus Glasfaserverstärktem Kunststoff, also in GFK-Bauweise, verwendet. Dieser ist in den Abbildungen 3.1 und 3.2 zu sehen. Der Flugzeugrumpf zeichnet sich durch seine gleichförmige Geometrie aus. Er weist wenige klare, glatte Kanten auf und besitzt viele gekrümmte, glatte, weiße Flächen. Der Rumpf ist nur teilweise mit optischen Merkmalen, wie dem blauen Kennzeichen (D-0142) auf der Rumpfröhre und dem Wettbewerbskennzeichen (IL) auf der Seitenflosse am Rumpfe, versehen. Aufgrund der beschriebenen Formgebung und Größe ist eine Vermessung mittels herkömmlicher Methoden nur bedingt möglich.

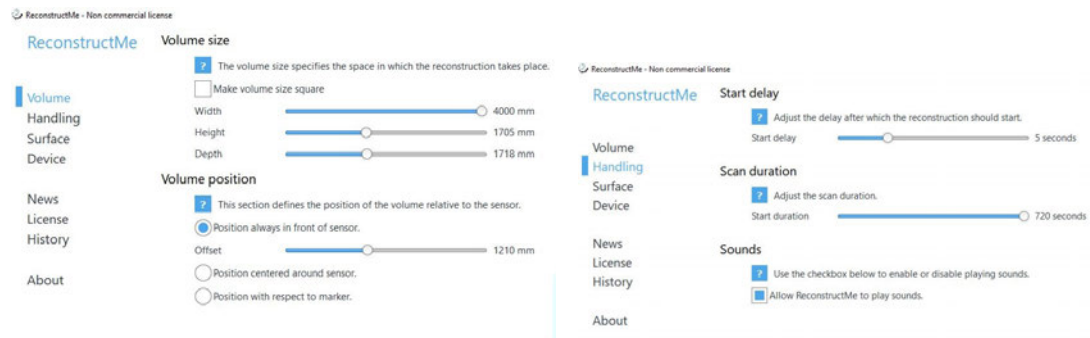
3.2.1 ReconstructMe

Bevor mit der Erfassung begonnen werden kann, muss "ReconstructMe" passend konfiguriert werden. Dafür wird das Programm, wie in Abbildung 3.4 dargestellt, konfiguriert.

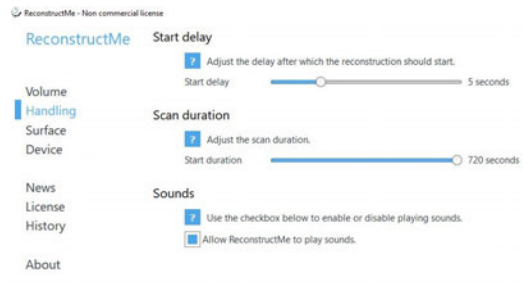
In Abbildung 3.4a sind die Einstellungen zu sehen, welche dem Tool die benötigten Informationen über das zu erfassende Objekt liefern. Um die Größe des zu erfassenden Objektes berücksichtigen zu können, wird eine Box definiert. Für diese Messung wird eine "Box" mit den Seitenlängen 4000 mm × 1705 mm × 718 mm (b x h x t) festgelegt. Mit 4000 mm in der Breite, ist der Maximalwert einer Seitenlänge der "Box" erreicht. Allerdings ist diese kürzer als der zu erfassende Flugzeugrumpf. Die relative Position des zu erfassenden Körpers wird als "position always in front of sensor with offset" definiert, da das Objekt den Sensor weder umgibt, noch ein zusätzlicher Marker verwendet wird.

Bei der Erfassung ist es wichtig, in der Mitte der Box zu beginnen. Eine Abweichung von dieser Position nach vorn oder hinten birgt das Fehlerrisiko, dass Teile des Objektes abgeschnitten werden könnten.

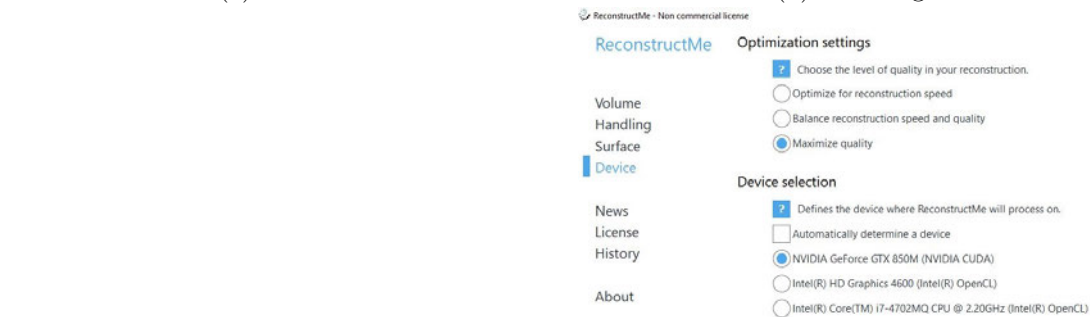
Für ein einfacheres Handling wird ein Startdelay von 5 s (0 s - 20 s sind einstellbar) gewählt. Mit dieser Verzögerung wird ausgeschlossen, dass Erschütterungen durch das Auslösen auf dem Laptop den Beginn des Scans beeinflussen. Außerdem wird, wie in Abbildung 3.4b zu sehen, die maximal mögliche Scanzeit von 720 s (10 s - 720 s) ausgewählt. Eine möglichst lange Scanzeit verhindert einen vorzeitigen Abbruch des Scans durch das



(a) Volume



(b) Handling



(c) Surface

(d) Device

Abbildung 3.4: Bildschirmaufnahmen der getroffenen Einstellung zur 3D-Vermessung mittels "ReconstructMe"

System. Sollte das gesamte Objekt früher erfasst sein, lässt sich der Scan jederzeit manuell beenden.

Für die Oberflächeneigenschaften, in Abbildung 3.4c wird "colorize my reconstruction" ausgewählt. Die farbige Darstellung des erzeugten Scans bietet dem Betrachter zusätzliche Informationen und lässt diesen realistischer erscheinen. Außerdem ist damit eine

bessere Beurteilung der Ergebnisse möglich.

Um die höchstmögliche Qualität des Scans zu erreichen, werden die Geräteeinstellungen wie in Abbildung 3.4d gewählt. Mit der Auswahl "maximize quality" wird die Qualität des Modells maximiert. Um dies zu ermöglichen, ist die Auswahl der dedizierten Grafikkarte "NVIDIA GeForce GTX850M" für die Ausführung der Berechnungen nötig, da weder die Onboard-Grafikkarte noch die CPU ausreichend Kapazitäten für die live-Berechnung des Modells bei maximaler Qualität besitzen.

Nachdem "ReconstuctMe" wie oben beschrieben konfiguriert ist, wird die Erfassung des Flugzeugrumpfes zweimal mit verschiedener Kameraführung durchgeführt:

1. Kamera stationär auf dem Tischwagen: Die Kamera wird auf dem Tischwagen in Position gebracht. Anschließend wird das Programm auf dem Computer gestartet. Beginnt der Scan, nach Ablauf des Startdelays, wird die Kamera auf dem Wagen um das Objekt herum geführt.
2. Kamera mobil in der Hand: Für diese Messung werden zwei Personen benötigt. Eine Person hält die Kamera in der Hand und bewegt diese, nach dem Start des Programms und Ablauf des Startdelays, entlang der rechten Seite des Objektes. Währenddessen folgt die zweite Person der messenden Person mit dem weiteren Equipment auf dem Tischwagen.

Während des Messvorgangs entsteht auf dem Bildschirm live das Modell. Fehlende Daten, beispielsweise verdeckte Flächen oder Kanten, werden während des Scanvorgangs durch grüne Ränder dargestellt. Entstehen während des Scanvorgangs solche Lücken im Modell, wird die Kamera erneut an diese Stellen bewegt, um die Lücken zu schließen. Der Scan wird manuell beendet, sobald das gesamte Objekt bzw. der zu erfassende Teil des Objektes gescannt ist und das angezeigte Modell den Qualitätsanforderungen entspricht.

Mit der Software "ReconstructMe " werden zusätzlich ein Hallenkuller (siehe Abbildung 4.4a) und ein menschliches Gesicht, mit händischer Kameraführung, erfasst und modelliert, um die Einflüsse der Objektgröße und Oberflächenbeschaffenheit auf das Scanergebnis zu untersuchen.

3.2.2 RTAB-MAP

Die Erfassung des Flugzeugrumpfes mittels "RTAB-MAP" wird sowohl mit der Kinect V1 als auch der Kinect V2 durchgeführt. Die Durchführung erfolgt mit beiden Kameras

analog. Um Redundanzen zu vermeiden wird nachfolgend die Durchführung mit der Kinect V2 beschrieben.

Wie auch bei der Messung mit "ReconstructMe" (siehe Unterabschnitt 3.2.1) wird zunächst "RTAB-MAP" konfiguriert. Die Einstellungen für die Vermessung mit der Kinect V2 sind in Abbildung 3.5 dargestellt.

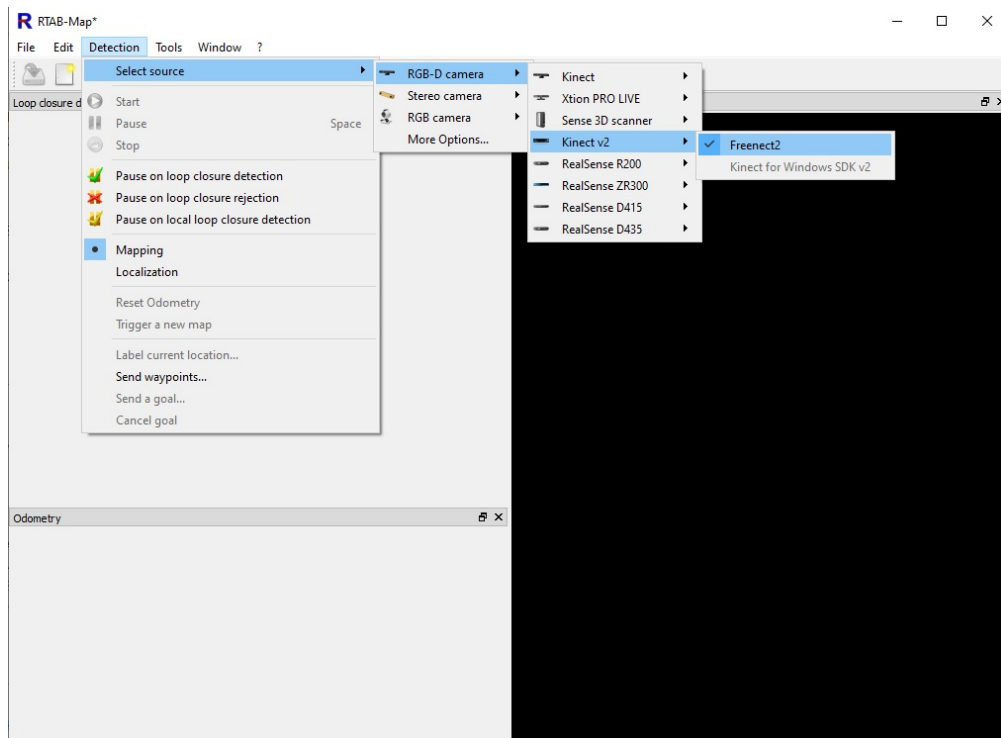


Abbildung 3.5: Bildschirmaufnahme der Einstellungen für die Modellierung mit "RTAB-Map" und der Microsoft Kinect V2

Abweichend von den Standardeinstellungen wird als Quelle aus den RGB-D Kameras, also den RGB-Kameras mit Tiefeninformation, die "Kinect V2" ausgewählt. Um die Kamera mit "RTAB-MAP" verwenden zu können, wird der Treiber "Freenect2" ausgewählt. An dieser Stelle werden für die Kinect V1 "Kinect" und der Treiber "Freenect" selektiert. Alle weiteren Schritte entsprechen denen der Kinect V2.

Im Anschluss an die Konfiguration wird in der GUI auf Start geklickt, womit die Erfassung beginnt. Anschließend wird die Kamera auf dem Wagen entlang des Flugzeugruppes bewegt. Während der Aufnahme wird die Karte bzw. das Modell bereits auf dem Bildschirm angezeigt. Sind im Modell Löcher bzw. Lücken erkennbar, wird die Kamera erneut an diese Stelle bewegt, um die fehlenden Daten zu erhalten und ein lückenloses

Modell erzeugen zu können. Ist das Objekt vollständig erfasst, wird die Erfassung im Programm beendet.

Mit der Kinect V2 werden insgesamt drei Scans durchgeführt. Dafür wird die Kamera auf dem Tischwagen jeweils einmal entlang der linken Seite des Flugzeugrumpfes, entlang der rechten Seite und um die Nase herum entlang des gesamten Rumpfes bewegt.

3.2.3 Meshroom

Der Ablauf der Erfassung mit "Meshroom" weicht deutlich von den zuvor beschriebenen Durchführungen ab.

Ohne weitere Vorbereitungen wird das Objekt mit der Smartphone-Kamera erfasst, es werden drei Scans durchgeführt. Das Smartphone wird jeweils einmal auf zwei horizontalen Linien und einmal sinusförmig an der linken Seite des Flugzeugrumpfes entlang geführt sowie einmal sinusförmig um den gesamten Rumpf herum. Die so erzeugten Videos werden anschließend in Einzelbilder zerteilt. Dabei entstehen, in diesem Beispiel, 200 bis 680 Bilder je Scan mit einer Auflösung von 1920x1088 Megapixel. Zur Berechnung der Tiefeninformationen wird das Programm "Meshroom" verwendet.

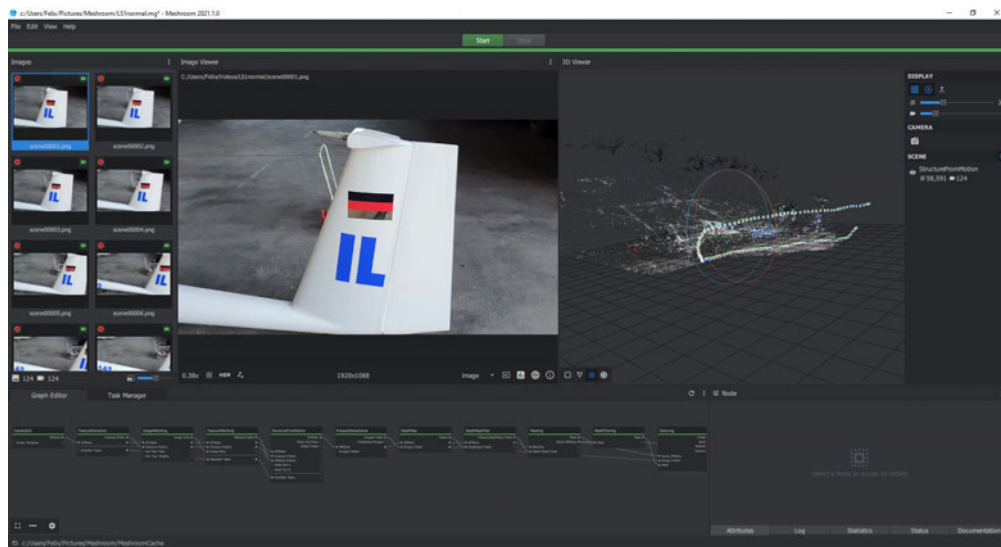


Abbildung 3.6: Bildschirmaufnahme der Benutzeroberfläche von "Meshroom" nach abgeschlossener Modellierung

Dafür werden die Einzelbilder per Drag n' Drop in "Meshroom" importiert. Die importierten Bilder sind in Abbildung 3.6 im linken Bildschirmabschnitt zu sehen. Mit

einem Klick auf die Startfläche, mittig im oberen Teil des Fensters, wird die Berechnung gestartet. In der rechten Bildhälfte in Abbildung 3.6 wird eine Vorschau des aktuellen Berechnungsstandes angezeigt, diese wird mit fortschreitender Berechnungsdauer umfangreicher. Der Fortschritt der Berechnung kann außerdem am Fortschrittsbalken unterhalb der Startfläche abgelesen werden.

Im unteren Drittel des Fensters in Abbildung 3.6 ist die Pipeline, bestehend aus den zur Berechnung genutzten Nodes, dargestellt. Diese entspricht den Standardeinstellungen. Für jeden Node werden die möglichen Input- und Outputwerte aufgeführt. Zusätzlich besitzt jeder Node einen Fortschrittsbalken, welcher den Berechnungsfortschritt innerhalb des Nodes anzeigt. Damit lassen sich die einzelnen Berechnungsschritte genauer überwachen, was besonders für die Fehlersuche hilfreich ist.

Die Dauer eines Berechnungsdurchlaufs ist abhängig von der Anzahl der Bilder. Da für die Vermessung dieses Flugzeugrumpfes eine große Zahl Bilder verarbeitet werden muss und die Rechenzeit zwischen drei und fünf Stunden beträgt, wird die Berechnung mit "Meshroom" über Nacht ausgeführt.

4 Darstellung der Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der, in Kapitel 3 beschriebenen, Methoden zur Erfassung und Modellierung eines Segelflugzeugrumpfes dargestellt.

4.1 ReconstructMe

Die Ergebnisse der Erfassung des Flugzeugrumpfes mittels "ReconstructMe" und der Kamera auf dem Tischwagen sind in den Abbildungen 4.2 und 4.1 zu sehen. In beiden Abbildungen ist eine starke Rauigkeit der Oberfläche erkennbar. Der obere Teil des Rumpfes wurde nicht erfasst, dies ist besonders in Abbildung 4.2 zu sehen. Auch die Haube aus Plexiglas ist lediglich teilweise rekonstruiert worden. Das Haubenfenster auf der linken Rumpfseite ist als Unebenheit erkennbar. Zudem ist der der Steg des mittleren Haubenrahmens mehrfach und verbreitert dargestellt.

Beim Übereinanderlegen der beiden Rumpfhälften entsteht ein Versatz, dieser ist besonders gut an der Rumpfspitze in Abbildung 4.2 erkennbar. Ebenfalls in dieser Abbildung ist auf der linken Seite des Rumpfes ein klares Ende des Scans, vor Erreichen der Kante der definierten "Box" zu sehen. An diesem Punkt brach "ReconstructMe" die Erfassung ab.

Das Ergebnis der Erfassung mit händischer Kameraführung (siehe Abbildung 4.3) zeigt eine feine, detailreiche Auflösung. Die Oberfläche des Flugzeugrumpfes ist deutlich glatter als in den Abbildungen 4.2 und 4.1. Das Haubenfenster ist deutlich als dieses erkennbar. Der Steg des mittleren Haubenrahmens ist nur einmal dargestellt, erscheint allerdings ebenfalls etwas verbreitert. Es ist lediglich die linke Rumpfseite gescannt worden, dennoch ist erkennbar, dass der Rumpf auch im oberen Teil bis etwa zur Mitte erfasst wurde. Allerdings ist die Rumpfspitze abgeschnitten worden.

Abbildung 4.4 stellt die 2D-Fotografie des händisch gescannten Hallenkullers und seine Rekonstruktion mittels "ReconstructMe" gegenüber. Dieses Objekt passt vollständig in



Abbildung 4.1: Rekonstruktion der rechte Seite des Segelflugzeugrumpfes mit "ReconstructMe"



Abbildung 4.2: Rekonstruktion beider Seiten des Segelflugzeugrumpfes mit "ReconstructMe"

die festgelegte "Box" und wird in seinem gesamten Umfang lückenlos dargestellt. Die geometrischen Konturen der Rahmenkonstruktion stimmen mit der Realität überein. Die einzelnen Komponenten (Rahmen, Schwenkkäfig und Rad) verlaufen jedoch in einander, die Abgrenzungen sind nicht klar erkennbar.

Der Scan des menschlichen Oberkörpers wurde händisch durchgeführt, das Ergebnis ist in Abbildung 4.5 abgebildet. Weiche Übergänge wie das Schlüsselbein oder der Hals sind

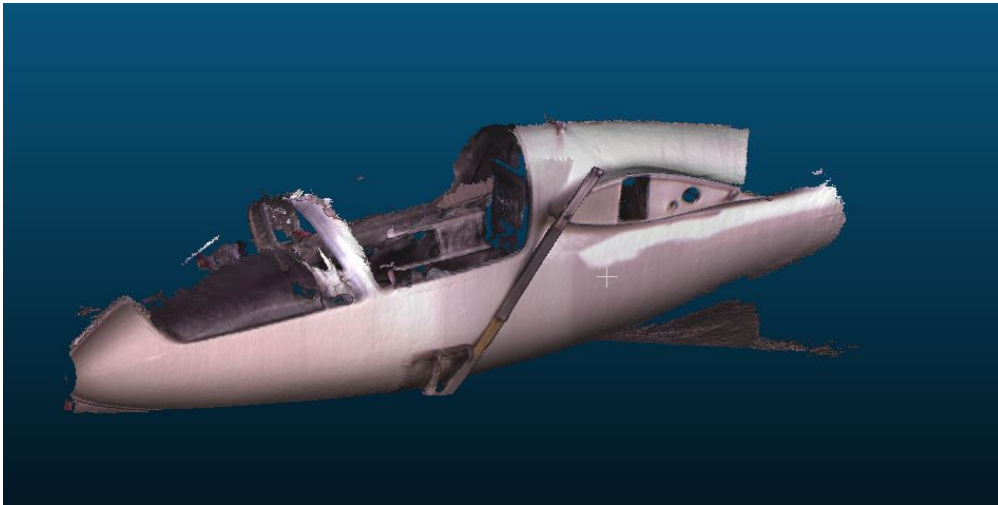


Abbildung 4.3: Rekonstruktion der linken Seite des Segelflugzeugrumpfes mit "ReconstructMe" und händischer Kameraführung

deutlich dargestellt. Feine Details wie die Brille wurden nicht aufgenommen. Aufgrund der Farbinformationen ist jedoch sehr gut zu erkennen, wo die Brille sein sollte. Die einzelnen Haare werden als ein Körper dargestellt, die feine Struktur kann nicht aufgelöst werden. Das Gesicht ist sehr ebenmäßig dargestellt, (feine) Falten sind nicht erfasst worden. Die Haut im Bereich des Dekoltees ist allerdings sehr uneben dargestellt. Die dargestellte Hautfarbe, welche auf den Farbinformationen basiert, spiegelt die Beleuchtung wieder, auf der linken Wange wirkt sie allerdings sehr fleckig.



(a) Fotografie



(b) Rekonstruktion mit "ReconstructMe"

Abbildung 4.4: Hallenkuller



Abbildung 4.5: Rekonstruktion eines menschlichen Oberkörpers mit "ReconstructMe"

4.2 RTAB-Map

Die Erfassungen mit "RTAB-Map" wurden mit beiden Kinect-Kameras am Segelflugzeugrumpf durchgeführt. Dabei konnte der Rumpf über seine gesamte Länge erfasst werden. Auf den Abbildungen 4.6 bis 4.11 ist neben dem gescannten Flugzeugrumpf eine türkisfarbene Linie zu sehen. Diese Linie visualisiert die Position der Kamera während der Messung.

4.2.1 Microsoft Kinect V1

Mit der Kinect V1 wurden insgesamt drei Messungen aufgezeichnet und gespeichert, wie in Unterabschnitt 3.2.2 beschrieben. Alle nachfolgend dargestellten Ergebnisse wurden, bei der Erfassung mit der Kinect V1, von "RTAB-Map" gespiegelt ausgegeben. Ein Phänomen, welches dabei mehrmals auftrat, ist die gekrümmte Rekonstruktion des Rumpfes,

wie in Abbildung 4.6 deutlich zu erkennen. Der Rumpf wird hinter der Einschnürung nicht als durchgehender Körper erkannt und dargestellt. In Abbildung 4.7 ist keine Krümmung des Rumpfes zu erkennen, allerdings ist die Rumpfspitze doppelt dargestellt. Beim dritten Scan wurde die Kamera komplett um den gesamten Rumpf herumgeführt, das Ergebnis ist in Abbildung 4.8 zu sehen. In dieser Abbildung ist deutlich ein Winkelversatz zwischen den beiden Rumpfhälften im hinteren Teil Rumpfes erkennbar. Insgesamt ist diese Rekonstruktion sehr fehlerhaft, es sind diverse Dopplungen und Versätze zu sehen, welche in der Realität nicht vorhanden sind. In allen Rekonstruktionen mit "RTAB-Map" und der Kinect V1 Kamera, ist der obere Teil des Rumpfes erfasst und dargestellt. Am Rumpfwagen und der Seitenflosse in Abbildung 4.7 ist erkennbar, dass der untere Teil des Objektes hingegen nicht erfasst wurde. Auch die Plexiglashaube wird nicht in den Rekonstruktionen dargestellt. Das Haubenfenster ist in Abbildung 4.6 zu erahnen, allerdings nicht ohne den Vergleich mit dem realen Objekt als Fenster erkennbar.

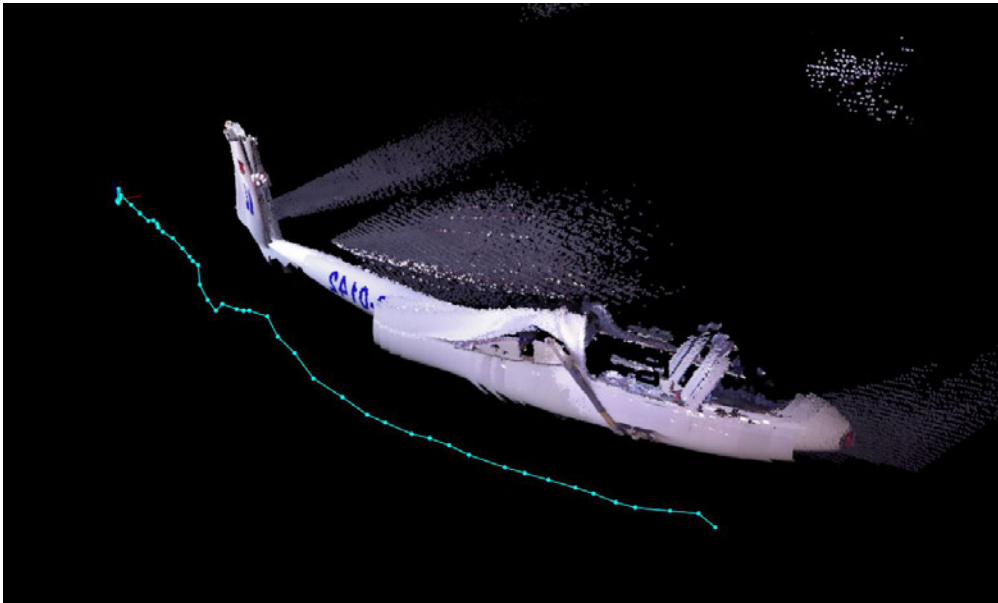


Abbildung 4.6: Rekonstruktion der linken Hälfte des Segelflugzeugrumpfes mit "RTAB-Map" und Kinect V1

In den Abbildungen 4.7 und 4.8 ist im Hintergrund ein weiterer Flugzeugrumpf zu erkennen. Neben dem zu erfassenden Objekt werden auch deutlich entfernte Objekte erfasst und dargestellt.

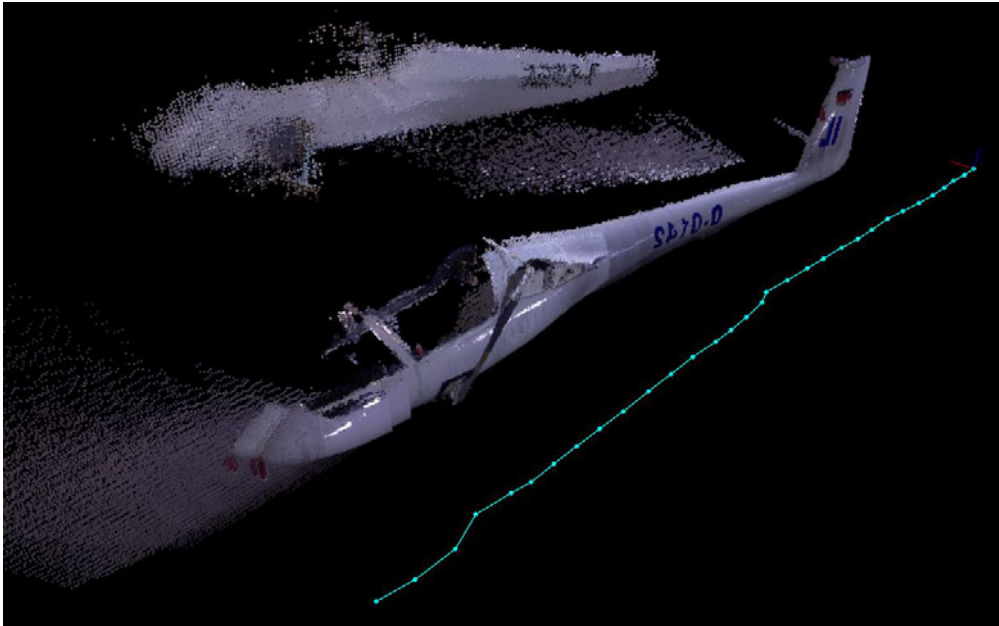


Abbildung 4.7: Rekonstruktion der rechten Hälfte des Segelflugzeugrumpfes mit "RTAB-Map" und Kinect V1

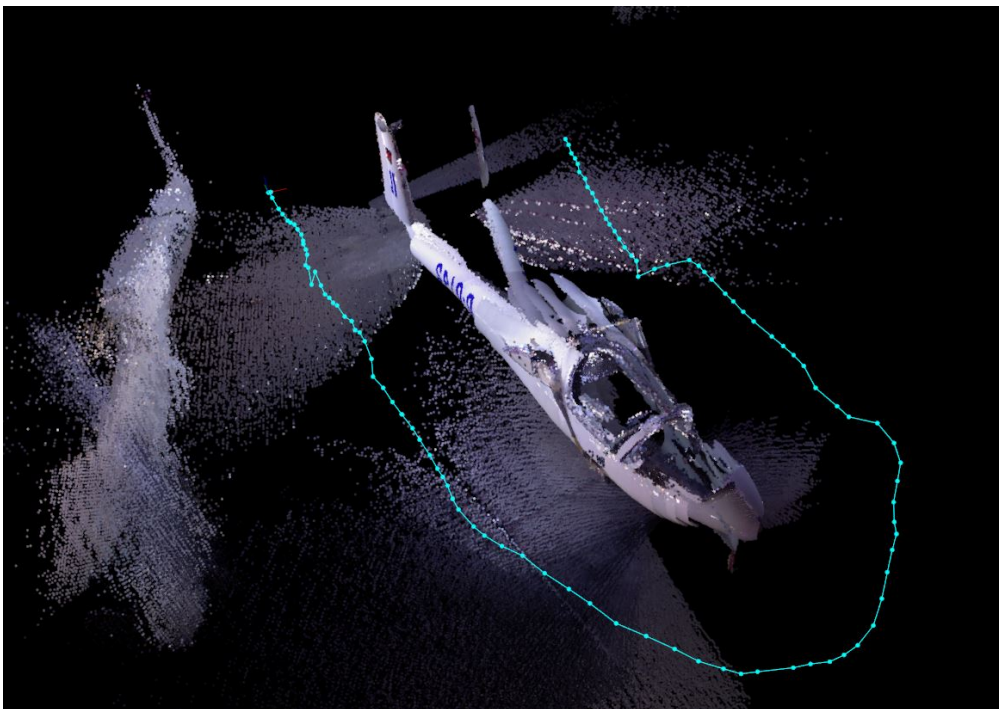


Abbildung 4.8: Rekonstruktion des gesamten Segelflugzeugrumpfes mit "RTAB-Map" und Kinect V1

4.2.2 Microsoft Kinect V2

Die Ergebnisse der drei durchgeführten Scans mit der Kinect V2 und "RTAB-Map" sind in den Abbildungen 4.9, 4.10 und 4.11 zu sehen. In diesen Abbildungen ist erkennbar, dass das Phänomen der gekrümmte Rekonstruktion des Rumpfes bei der Aufnahme mit der Kinect V2 weniger stark auftritt, als mit der Kinect V1. Außerdem ist die Auflösung der Rekonstruktionen mit der Kinect V2 deutlich besser. Insgesamt waren weniger Versuche nötig um verwertbare Ergebnisse zu erhalten.

In Abbildung 4.9 ist die Qualität der Rekonstruktion im vorderen Teil des Rumpfes deutlich besser als im hinteren Teil, dort sind vor der Seitenflosse einige Versätze erkennbar. Im Bereich des Haubenfensters ist eine Punkteansammlung zu sehen, welche allerdings nicht als Haubenfenster zu erkennen ist. Die Rekonstruktion der rechten Rumpfhälfte, in Abbildung 4.10, besitzt über die gesamte Länge des Rumpfes die gleiche Qualität. Auf der Rumpfoberfläche sind in dieser Abbildung relativ eng beieinander liegende senkrechte Linien zu sehen, diese sind auf dem realen Objekt nicht vorhanden.

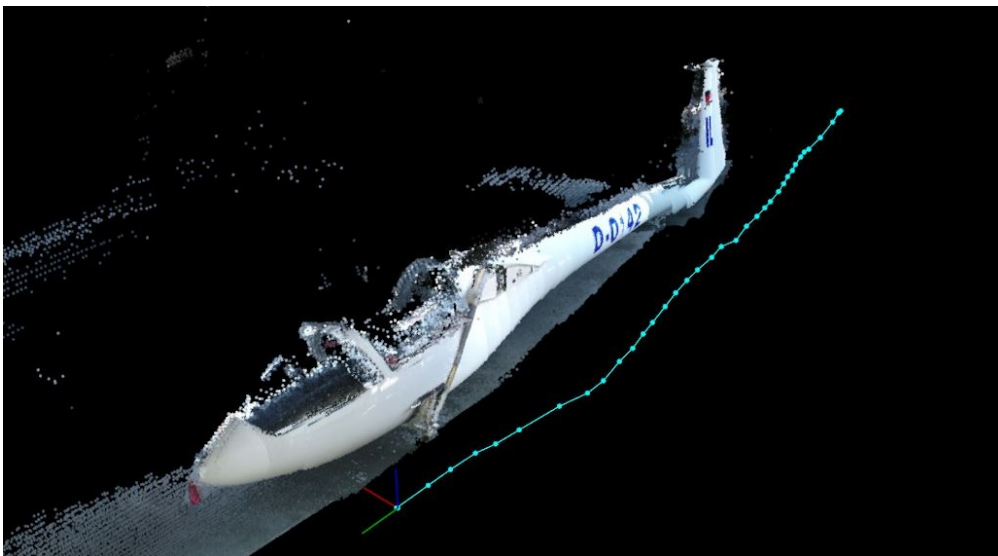


Abbildung 4.9: Rekonstruktion der linken Hälfte des Segelflugzeugrumpfes mit "RTAB-Map" und Kinect V2

Die Rekonstruktion des gesamten Flugzeugrumpfes, für welche die Kamera komplett um das Objekt herum geführt wurde, weist deutliche Fehler auf, siehe Abbildung 4.11. Wie auch bei der Erfassung mit der Kinect V1 (vergl. Unterabschnitt 4.2.1) ist im hinteren Rumpfteil ein deutlicher Winkelversatz zwischen den Rumpfhälften zu erkennen. Die

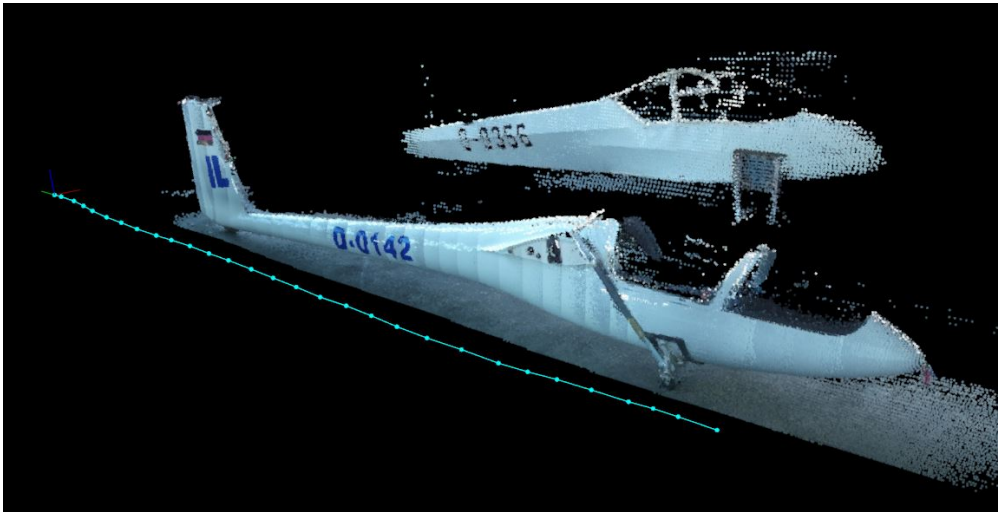


Abbildung 4.10: Rekonstruktion der rechten Hälfte des Segelflugzeugrumpfes mit "RTAB-Map" und Kinect V2

Rumpfhälften scheinen sich im Bereich der Einschnürung zu kreuzen. Außerdem sind im vorderen Teil des Rumpfes, in Abbildung 4.11, Versätze und eine Punktwolke im Bereich der Plexiglashaube zu erkennen.

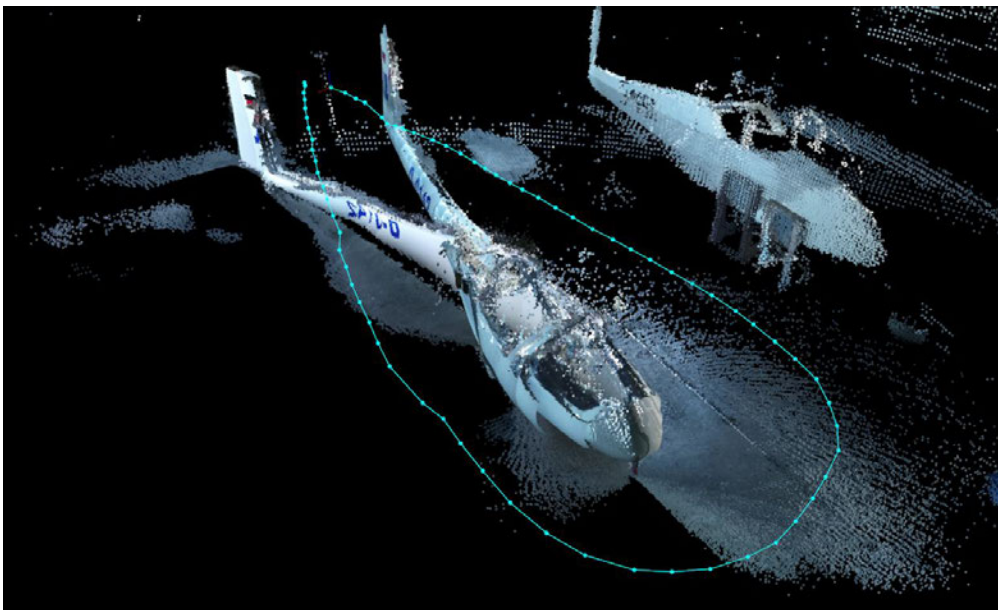


Abbildung 4.11: Rekonstruktion des gesamten Segelflugzeugrumpfes mit "RTAB-Map" und Kinect V2

In den, mit der Kinect V2 und "RTAB-Map" erstellten, Rekonstruktionen (siehe Abbildung 4.9 bis 4.11) ist das gesamte Objekt dargestellt. Es ist sowohl der obere als auch der untere Teil des Flugzeugrumpfes erfasst worden. Allerdings ist in keiner der Abbildungen die Haube erkennbar dargestellt.

In den Abbildungen 4.10 und 4.11 ist, wie auch in Unterabschnitt 4.2.1 beschrieben, im Hintergrund ein weiterer Flugzeugrumpf erkennbar. Dieser ist allerdings deutlich besser aufgelöst und definierter dargestellt als in den Abbildungen 4.7 und 4.8.

4.3 Meshroom

Es wurden, wie in Unterabschnitt 3.2.3 beschrieben, 3 Videos vom Objekt, für die Weiterverarbeitung mit "Meshroom", aufgenommen. Die daraus entstandenen Rekonstruktionen sind in den Abbildungen Abbildung 4.12 bis Abbildung 4.18 zu sehen. In allen Abbildungen ist erkennbar, dass vorwiegend in der Nähe von farbigen Kanten eine Oberfläche berechnet werden konnte, diese ist allerdings sehr rau. In den hier dargestellten Rekonstruktion wurden weder die Plexiglashaube, noch das, darin befindliche, Haubenfenster erfasst und dargestellt.

Abbildung 4.12 zeigt die, auf Grundlage der Erfassung der linken Rumpfhälfte, entlang zwei übereinander liegender, horizontaler Linien, erzeugte Punktwolke. In dieser Abbildung sind vorwiegend im Bereich um den Haubenrahmen, des Flügelrumpfübergangs, des Kennzeichens und an der Seitenflosse Punkte vorhanden. In den Bereichen des Rumpfes mit weniger Detailgrad, liegen die Punkte nicht auf der Rumpfoberfläche, sondern sind in den Hintergrund verschoben. Insgesamt ist der Flugzeugrumpf sehr verschwommen dargestellt. Aus der Punktwolke wurde ein Mesh erzeugt, welches in Abbildung 4.13 zu sehen ist. Das Mesh verdeutlicht die Unvollständigkeit des erhaltenen 3D-Modells. Es sind lediglich große Teile der Seitenflosse, der Bereich des Kennzeichens, der Flügel-Rumpfübergang und der Cockpit-Bereich dargestellt. Allerdings ist nur der Haubenrahmen im Bereich des Cockpits erkennbar, insbesondere die Nase des Rumpfes ist fehlerhaft dargestellt. An dieser Stelle sind in Abbildung 4.12 keine Datenpunkte zu sehen. Im Hintergrund ist zusätzlich der, für die Erfassungen mit den Kinect Kameras genutzte, Tischwagen erkennbar.

In Abbildung 4.14 ist die horizontale Erfassung der linken Rumpfhälfte herausgezoomt dargestellt. Es fällt auf, dass die Bodenebene der Rekonstruktion nicht mit der Ebene

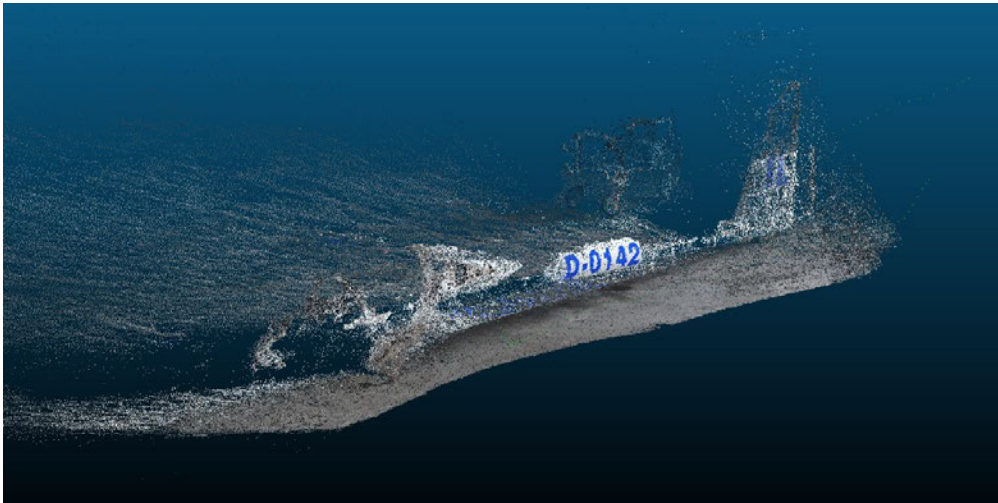


Abbildung 4.12: Mit "Meshroom" berechnete Punktwolke aus horizontaler Erfassung der linken Hälfte des Segelflzeugrumpfes

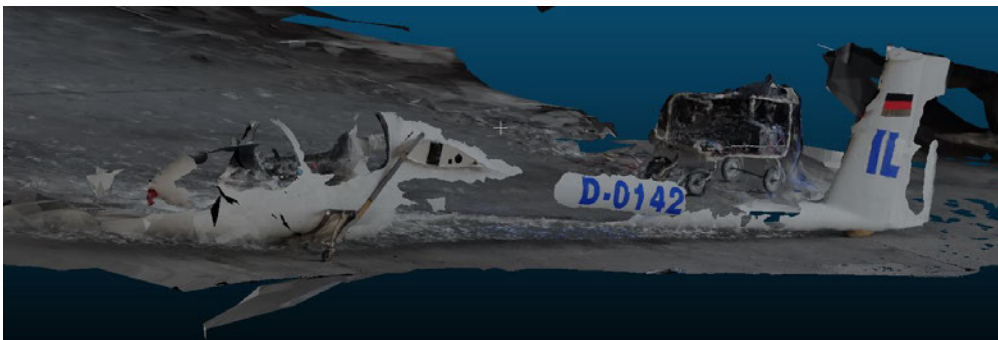


Abbildung 4.13: Mit "Meshroom" erzeugtes Mesh aus horizontaler Erfassung der linken Hälfte des Segelflzeugrumpfes

der x-y-Achsen des Programms übereinstimmt. Außerdem lassen sich die in den Hintergrund verschobenen Punkte deutlich erkennen.

Die rekonstruierte Punktwolke, basierend auf einer sinusförmigen Erfassung der linken Rumpfhälfte, ist in Abbildung 4.15 zu sehen. Auch in dieser Abbildung ist erkennbar, dass in den Bereichen des Objektes mit eindeutigen Details, wie Kanten oder farbigen Markierungen (Kennzeichen), deutlich mehr Punkte dargestellt sind. Allerdings liegen in dieser Abbildung auch in den detailärmeren Bereichen des Objektes mehr Punkte auf der Rumpfoberfläche als in Abbildung 4.12. Sowohl der obere als auch der untere Teil des Flugzeugrumpfes wurden bis zur Rumpfmittle erfasst und teilweise durch Punkte dargestellt. Der Rumpf ist insgesamt deutlich besser erkennbar, als in Abbildung 4.12. Über

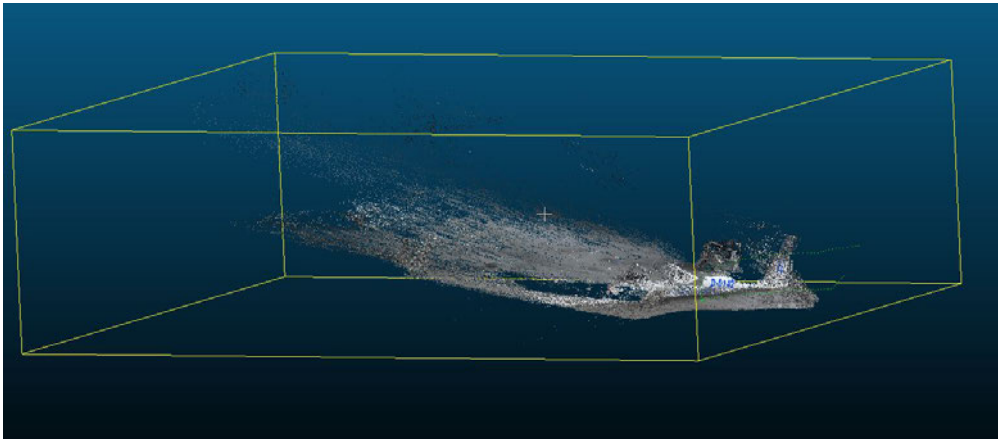


Abbildung 4.14: Darstellung der berechneten Punktwolke aus horizontaler Erfassung im Koordinatensystem der Rekonstruktion von "Meshroom"

die, in Abbildung 4.15 dargestellte, Punktwolke wurde ebenfalls ein Polygonnetz gelegt, um ein Flächenmodell zu erzeugen. Dieses Mesh ist in Abbildung 4.16 dargestellt. Es ist eine nahezu vollständige Rekonstruktion der Rumpfoberfläche erkennbar. An einigen Stellen, wie der Vorderkante der Seitenflosse und unterhalb des Flächen-Rumpfübergangs sind Fehlstellen zu sehen. Außerdem ist die, in Abbildung 4.16 dargestellte, Rumpfoberfläche sehr unebenmäßig. Wie bereits in Abbildung 4.13 ist im Hintergrund der, für die ersten Erfassungen genutzte, Tischwagen zu erkennen.

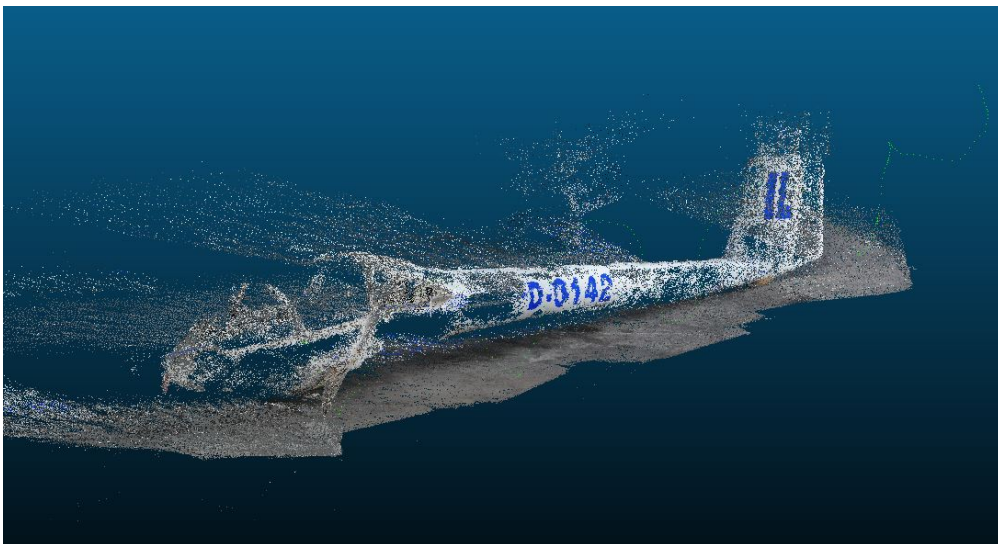


Abbildung 4.15: Mit "Meshroom" berechnete Punktwolke aus sinusförmiger Erfassung der linken Hälfte des Segelflugzeugrumpfes



Abbildung 4.16: Mit "Meshroom" erzeugtes Mesh aus sinusförmiger Erfassung der linken Hälfte des Segelflugzeugrumpfes

Basierend auf der Erfassung beider Seiten des Rumpfes entlang einer Sinuskurve, wurde der gesamte Flugzeugrumpf als Punktwolke dargestellt, wie in Abbildung 4.17 zu sehen. Es fällt auf, dass beide Rumpfhälften korrekt übereinander gelegt wurden, es besteht kein Winkelversatz zwischen den Rumpfhälften. Allerdings ist das gesamte Objekt schlecht erkennbar. Das bereits beschriebene Phänomen, der in den Hintergrund verschobenen Punkte, tritt hier ausgeprägt für beide Seiten auf. Im Bereich des Kennzeichens, welcher in den vorherigen Punktwolken (Abbildung 4.12 und Abbildung 4.15) klar dargestellt war, ergeben die Punkte in dieser Abbildung ein weniger detailliertes Bild. Die Seitenflosse und der Haubenrahmen sind fast nicht zu erkennen. Allerdings ist der Rumpfwagen in Bodennähe, mittig im unteren Bildabschnitt von Abbildung 4.17, deutlich erkennbar.

Das, in Abbildung 4.18 abgebildete, Flächenmodell des gesamten Flugzeugrumpfes stellt nur sehr bedingt das reale Objekt dar. Nur im Bereich des Kennzeichens, auf der Rumpfröhre, des Flächen-Rumpf-Übergangs und des unteren Bereiches des Cockpits ist die Oberfläche des Rumpfes überhaupt rekonstruiert worden. Diese ist, insbesondere im Bereich unterhalb der Plexiglashaube sehr uneben dargestellt. Die Seitenflosse, ist verschwommen im oberen, linken Quadranten von Abbildung 4.18 erkennbar, allerdings wurde an dieser Stelle keine Oberfläche rekonstruiert. Auch in der rechten Bildhälfte sind Farbinformationen auf den Boden projiziert, diese sind als weiße und blaue Schlieren erkennbar. Anzumerken ist, dass der Hallenboden detailliert zu erkennen sind.

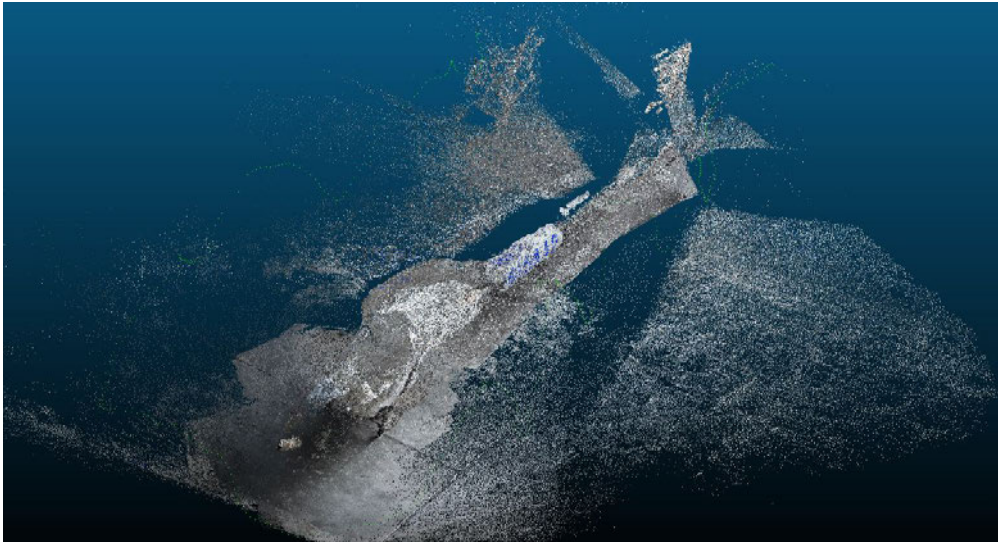


Abbildung 4.17: Mit "Meshroom" berechnete Punktwolke aus sinusförmiger Erfassung des gesamten Segelflugzeugrumpfes

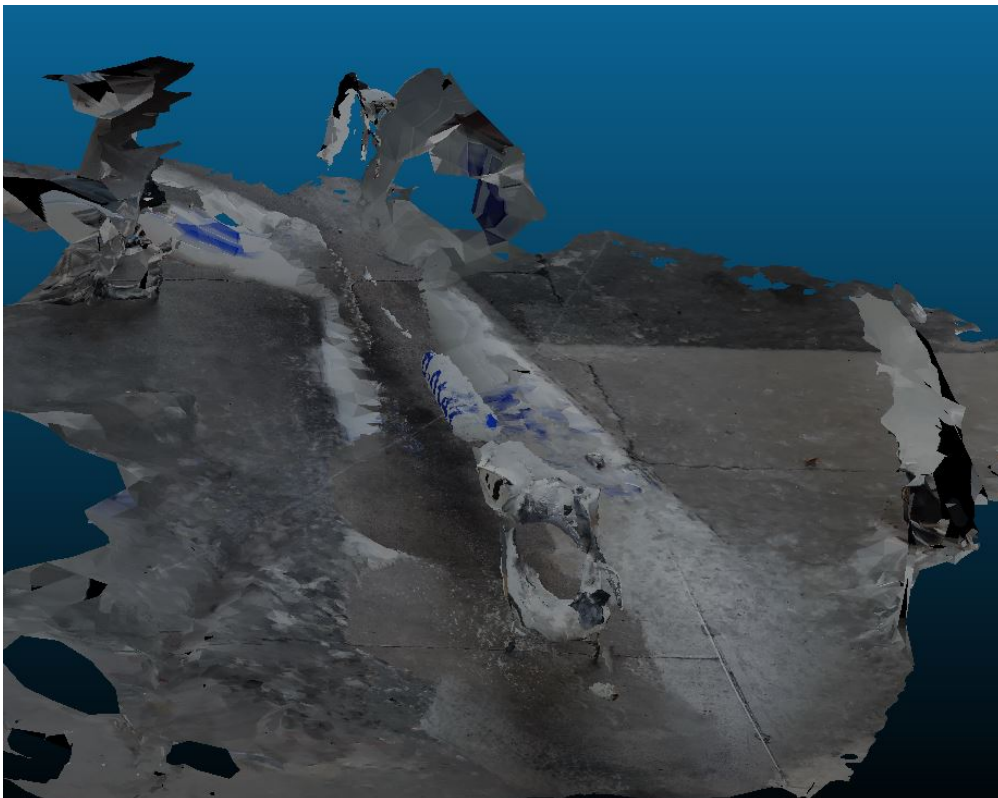


Abbildung 4.18: Mit "Meshroom" erzeugtes Mesh aus sinusförmiger Erfassung des gesamten Segelflugzeugrumpfes

5 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der, in den vorherigen Kapiteln, beschriebenen Erfassungen ausgewertet und diskutiert. Dafür werden sowohl der Aufbau und die Durchführung, als auch die erhaltenen Ergebnisse betrachtet und bewertet.

5.1 Aufbau und Durchführung

Vor der Auswertung und Diskussion der, in Kapitel 4 dargestellten, Ergebnisse werden zunächst der Aufbau und die Durchführung bewertet. Dafür werden die aufgetretenen Probleme dargestellt.

5.1.1 Hardware

Bereits beim Aufbau fällt auf, dass die Kinect-Kameras nicht für den mobilen Einsatz ausgelegt sind. Die Kinect-Kameras, beider Generationen, sind im Handling, besonders durch die Datenkabel und die benötigte 230V Stromversorgung etwas sperrig. Insbesondere die Kinect V2 ist durch das höhere Gewicht, die zusätzlichen Komponenten und die steiferen Datenkabel im mobilen Einsatz wenig praktisch. Der Aufbau der Kameras auf dem Wagen, wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, erleichtert die Handhabung deutlich. Bei diesem Aufbau müssen die Kinect-Kameras und die zusätzlich benötigte Hardware, wie Laptop und Kabel, nicht in der Hand gehalten werden. Allerdings wird der erfasste Bildbereich durch die vertikal unveränderliche Position der Kameras auf dem Tischwagen nach oben und unten beschränkt, was zu Abschattungen führt und sich auf die erlangten Scan-Ergebnisse auswirkt, wie in Kapitel 4 dargestellt und in Abschnitt 5.2 diskutiert. Außerdem ist die Kameraführung auf dem ungefederten Tischwagen anfällig für Umwelteinflüsse. Bodenunebenheiten führen zu Erschütterungen, welche die Erfassung

beeinflussen und als Fehler in der Rekonstruktion zu sehen sind. In den Abbildungen 4.6 und 4.7 sind Unregelmäßigkeiten der türkisfarbenen Linie zu erkennen. An den Stellen mit deutlichen Unregelmäßigkeiten der türkisen Linie treten deutliche Fehler in der Rekonstruktion auf. Der unebene Hallenboden, auf welchem die Erfassungen durchgeführt wurden, war unter diesem Aspekt nicht optimal. Auch die Geschwindigkeit, in welcher der Aufbau um das Objekt herum geführt wird, hat deutliche Auswirkungen auf die Qualität der Rekonstruktion. Dabei lassen sich durch langsames Schieben des Wagens Erschütterungen minimieren. Außerdem ist eine konstante Geschwindigkeit wichtig, um große Beschleunigungen oder Verzögerungen zu vermeiden, welche zum Abbruch der Erfassung führen. Die Kinect V1 Kamera ist durch ihren zentralen, instabilen Standfuß dafür deutlich anfälliger als die Kinect V2 Kamera mit den Standfüßen am rechten und linken Rand.

Die Verwendung eines Akkus und Wechselrichters zur Stromversorgung bietet nahezu uneingeschränkte Bewegungsfreiheit und ermöglicht die Arbeit unabhängig von elektrischer Infrastruktur. Die alternativ mögliche Nutzung eines Verlängerungskabels reduziert das Gesamtgewicht des Aufbaus deutlich. Allerdings schränkt ein Verlängerungskabel den Bewegungsradius ein und während der Erfassung muss dieses berücksichtigt werden.

Da das Smartphone autark, ohne zusätzliche Komponenten oder Kabel, genutzt wird, um das Objekt zu erfassen, ist dessen Handhabung deutlich vereinfacht. Dadurch ist die Vorbereitungszeit einer Erfassung mit dem Smartphone deutlich geringer, als mit den Kinect Kameras.

In Vorbereitung auf die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden diverse Test-Erfassungen durchgeführt. Dabei fiel auf, dass bei Erfassungen mittels Kinect Kamera die Lichtverhältnisse zu berücksichtigen sind. Bei starker Sonneneinstrahlung, insbesondere auf stark reflektierende Objekten, wie in diesem Fall einem lackierten Flugzeugrumpf, kann die Kamera das selbst ausgesendete Licht nicht vom Umgebungslicht unterscheiden. In der Konsequenz können keine Tiefeninformationen erfasst werden, weshalb keine brauchbaren Ergebnisse erzielt werden können. Dieser Effekt ist insbesondere bei der Kinect V1 gravierend und muss beim Aufbau berücksichtigt werden. Da mit dem Smartphone keine Tiefeninformationen gesammelt werden, tritt dieser Effekt nicht auf. Allerdings ist auch für die Aufnahme mit dem Smartphone und den daraus erzeugten RGB-Bildern auf eine gute Beleuchtung, weder zu hell noch zu dunkel, zu achten. Zudem besteht die Möglichkeit, dass Reflexionen die Qualität der Rekonstruktion beeinflussen, wie in Unterabschnitt 5.2.3 diskutiert. Bei Tageslicht lassen sich aber in der Regel ausreichend

gute Bilder erzeugen, sodass die Lichtverhältnisse für diese Methode eher wenig Probleme bereiten.

5.1.2 Software

In Vorbereitung auf die Erzeugung von 3D-Modellen mit "ReconstructMe", "RTAB-MAP" oder "Meshroom" ist die Installation der entsprechenden Software sowie der Treiber nötig. Dabei sind für "Meshroom" keine zusätzlichen Treiber notwendig, für "ReconstructMe", "RTAB-MAP" hingegen werden Treiber benötigt. Dies stellt, abhängig von den benötigten Treibern, einen signifikanten Installationsaufwand dar. Hinzu kommt, dass nicht alle Programme mit jedem Betriebssystem kompatibel sind. Die Nutzung von "RTAB-MAP" ist betriebssystemunabhängig möglich, "Meshroom" ist für Windows und Linux verfügbar und "ReconstructMe" ist ausschließlich für Windows erhältlich.

In Aufbau und Durchführung ähneln sich die Vermessungen mit "ReconstructMe" und "RTAB-MAP" sehr. Die Unterschiede liegen vorwiegend in der Datenverarbeitung bzw. der Konfigurierung der Software. Um die Kinect-Kameras während der Erfassung in der Hand zu halten und zu führen, verlieren die genutzten Programme zu schnell die Orientierung. Kleine Erschütterungen oder Ruckeln, was händisch schwer vermeidbar ist, führen bei "ReconstructMe" zum Abbruch der Berechnungen und bei "RTAB-MAP" zu fehlerhaften, verzerrten Darstellungen. Die, mit händischer Kameraführung und "ReconstructMe" durchgeführten, Scans der Objekte lieferten erst nach diversen Versuchen verwertbare 3D-Modelle (in Abschnitt 4.1 dargestellt).

Der Aufbau für die Vermessung mit Smartphone-Kamera und "Meshroom" ist mit Abstand der einfachste. Für die Erfassung des Objektes an sich ist praktisch kein Aufbau notwendig, da das Abfilmen mit einem herkömmlichen Smartphone quasi keiner Vorbereitung bedarf. Außerdem wird für die Berechnungen der Tiefeninformationen, im Gegensatz zu den anderen Softwaretools, kein mobiler Computer benötigt. Die Photogrammetrie mit "Meshroom" kann an jedem Computer mit "CUDA"-Grafikkarte und ausreichend großem Arbeitsspeicher ausgeführt werden. Allerdings dauert die Berechnung des 3D-Modells in "Meshroom" deutlich länger. Außerdem kann während der Erfassung nicht bestimmt werden, ob ausreichend Informationen gesammelt werden konnten um ein lückenloses Modell zu berechnen. Durch die live-Berechnungen in "ReconstructMe" und "RTAB-MAP" können Abschattungen und Lücken im Modell während der Erfassung erkannt und durch erneutes Erfassen behoben werden.

Im Vergleich der verwendeten Software fällt die Direktvorschau in "ReconstructMe" und

"RTAB-MAP" im Gegensatz zur Photogrammetrie in "Meshroom" als größter Unterschied auf. Während der Erfassung, eventuell entstehende, Lücken können während des Scanvorgangs erkannt und erneut erfasst werden. Aufgrund der fehlenden sofortigen Rückmeldung bei der Rekonstruktion mit "Meshroom" lassen sich unzureichend erfasste Stellen nicht nachbessern. Bei einem nicht zufriedenstellenden Ergebnis muss die gesamte Erfassung erneut durchgeführt werden.

Beide Kinect Kameras erfassen neben Bildinformationen auch Tiefeninformationen und geben diese an "ReconstuctMe" und "RTAB-Map" weiter. "Meshroom" muss diese Tiefeninformationen aus den Bildinformationen der Smartphonekamera errechnen. Daher benötigt "Meshroom", bei gleicher Rechenleistung, deutlich länger für eine Rekonstruktion als "ReconstuctMe" und "RTAB-Map", dabei hängt die Berechnungszeit direkt von der Anzahl der Bilder ab. Ohne den vollständigen Bildersatz kann "Meshroom" nicht mit der Berechnung beginnen, weshalb eine Direktvorschau nicht möglich ist.

Ein weiterer großer Unterschied der verwendeten Software ist die Begrenzung des Erfassungsbereiches. Da "RTAB-Map" und "Meshroom" den Erfassungsbereich nicht beschränken und den Hintergrund mit in das 3D-Modell aufnehmen, müssen die, mit diesen Programmen erstellten, Rekonstruktionen immer nachbearbeitet werden um ein 3D-Modell zu erhalten, welches ausschließlich das zu erfassende Objekt umfasst. Dieser Nachbearbeitungsschritt kann bei "ReconstuctMe" entfallen. Die zuvor definierte "Box" beschränkt das 3D-Modell, optimaler Weise, auf das zu erfassende Objekt. Dies minimiert zwar die Rechen- und Nachbearbeitungszeit, allerdings kann sich das Programm für die Positionsbestimmung nicht am Hintergrund orientieren. In Folge dessen verliert "ReconstuctMe" eher die Orientierung, was zum vorzeitigen Abbruch der Erfassung führt. Außerdem ist die Begrenzung des Erfassungsbereichs durch eine zu definierende "Box" für große Objekte ungeeignet. Objekte, welche größer als $4000\text{ mm} \times 4000\text{ mm} \times 4000\text{ mm}$ sind, wie auch der, in dieser Arbeit erfasste, Segelflugzeugrumpf lassen sich nicht vollumfänglich modellieren. Hinzu kommt, dass "ReconstuctMe" auf der Hoch- und Querachse immer in der Mitte der "Box" mit der Erfassung beginnt. Passt das zu erfassende Objekt vollständig in die "Box", stellt dies kein Problem dar. Ragt das zu erfassende Objekt, wie im Fall des Flugzeugrumpfes, allerdings aus der "Box" heraus, muss in der Mitte dieser mit der Erfassung begonnen werden. Zunächst wird die Kamera an ein Ende der Box bewegt, um dann entlang des bereits erfassten Teils zurück zur Mitte geführt zu werden um den restlichen Teil des Objektes erfassen zu können. Da "ReconstuctMe" nicht auf ein solches Vorgehen ausgelegt ist, verliert das Programm beim erneuten entlangführen der Kamera am zuerst erfassten Teil des Objektes regelmäßig die Orientierung. Auch die

"Nacherfassung" von Lücken im Modell ließ sich in der Realität mit "ReconstructMe" kaum umsetzen.

5.2 Auswertung und Diskussion der Scan-Ergebnisse

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt nur qualitativ, da die Qualität der erhaltenen Rekonstruktionen nicht quantifizierbar ist. Es können keine Aussagen zur Maßhaltigkeit der Modelle getroffen werden.

5.2.1 ReconstructMe

Bei der Verarbeitung der Kameradaten mit der Software "ReconstructMe" werden die Scanergebnisse unter anderem durch die vordefinierte "Box" beeinflusst. Es ist darauf zu achten, die Kamera zu Beginn der Erfassung korrekt auszurichten, um eine schiefe oder verschobene Definition der "Box" zu vermeiden. In diesem Fall werden Teile des Objektes außerhalb des Scanbereiches abgeschnitten. In Abbildung 4.3 ist erkennbar, dass die Nase des Flugzeugrumpfes abgeschnitten wurde. Es wurde zu weit hinten mit dem Scan begonnen, sodass die Nase des Flugzeuges nicht erfasst und rekonstruiert wurde. Außerdem, wurde die Kamera zu Beginn des Scans nicht parallel zum Boden ausgerichtet, weshalb die "Box" in einem Winkel zum Boden definiert wurde. In Folge dessen ist, im rechten Drittel von Abbildung 4.3, unterhalb des Rumpfes ein Teil des Hallenbodens zu sehen, der Rumpfwagen, in der Abbildung mittig, wurde allerdings nahe des Rumpfes abgeschnitten. In den dargestellten Ergebnissen für die Modellierung des Flugzeugrumpfes mit "ReconstructMe" sind lediglich in den Abbildungen 4.3 und 4.4b Teile des Hallenbodens zu sehen, da sich diese in der definierten Box befanden. Es ist erkennbar, wie der limitierte Erfassungsbereich bewirkt, dass Hintergrundobjekte nicht bzw. weniger erfasst werden. Diese müssen im Nachhinein nicht entfernt werden, fehlen allerdings zur räumlichen Orientierung für die Rekonstruktion.

Zusätzlich zur fehlenden Hintergrundorientierung wird vermutet, dass die Software keine farblichen Markierungen nutzt, was ebenfalls zu einer Verschlechterung der Ergebnisse führen kann. Der frühzeitige Abbruch der Erfassung, welcher in Abbildung 4.2 zu sehen ist, wäre bei Nutzung von Farbinformationen vermutlich nicht aufgetreten, da das farbige Kennzeichen zur Orientierung genutzt werden könnte.

Die transparente Plexiglashaube bereitet dem System Probleme. Es ist zu vermuten, dass

die Haube, aufgrund ihrer Transparenz, von der Kamera nicht als Fläche erkannt wird, da das Infrarotlicht diese durchdringt und erst von dahinter liegenden Flächen reflektiert wird. In Abbildung 4.1 ist die Haube teilweise dargestellt, allerdings ist ihr Verlauf nicht korrekt. Es scheint, als wäre Umgebungslicht auf der Haube reflektiert worden, wodurch diese Fläche erkannt wurde. Das würde außerdem den verfälschten Verlauf, entlang der farblich dargestellten Reflexion, erklären.

Der mittlere Haubenrahmen ist in Abbildung 4.1 mehrfach und verbreitert dargestellt. Das gleiche Phänomen tritt bei der Erfassung mit der Kinect V1 und der Rekonstruktion mit "RTAB-Map" auf (siehe Abbildung 4.6). Daher gilt zu vermuten, dass dieses Problem auf das eingeschränkte Sichtfeld der Kinect V1 Kamera zurückzuführen ist.

Der Vergleich der Ergebnisse mit handgeführter Kamera, in Abbildung 4.3 mit den Ergebnissen der Kameraführung auf dem Rollwagen, in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2, zeigt deutlich, dass das manuelle Bewegen der Kamera in allen drei Raumrichtungen zu sichtbar feineren, detailreicheren und weniger fehlerbehafteten Ergebnissen führt. Aufgrund der Echtzeitdarstellung der Software können gezielt Teile des Objekts erfasst werden, an denen noch Informationen fehlen und die bei der horizontalen Bewegung der Kamera verdeckt sind. Es war nicht möglich den Flugzeugrumpf in einem Durchgang beidseitig mit der händisch geführten Kamera aufzunehmen. Da die Frontansicht durch ihre linienförmige Kontur in Verbindung mit der unruhigen Kameraführung zu Fehlern in der Verarbeitung führte. Durch die händische Erfassung nur einer Rumpfseite, lässt sich keine Aussage über die Qualität einer Überlappung der Rumpfhälften, und einen möglichen Versatz, wie in Abbildung 4.2, treffen.

Während die dreidimensionale Modellierung von großen Objekten mit "ReconstructMe" Defizite aufweist, zeigt die Erfassung eines Hallenkullers, dass sich diese Methode für kleine, wenig filigrane Objekte gut eignet. Der Kuller passt vollständig in die definierte "Box". Auf der Fotografie, in Abbildung 4.4a, ist zu sehen, dass der Kuller aus einfachen Geometrien besteht und ausreichend viele, klare Kanten aufweist, um der Kamera und Software genügend markante Punkte zur Orientierung zu bieten. In der Rekonstruktion, in Abbildung 4.4b, ist die Geometrie des Kullers eindeutig zu erkennen. Lediglich das Trennen verschiedener Bauteile, wie z.B. der Räder vom Grundgerüst, ist nicht gelungen. Der Scan des menschlichen Oberkörpers, dessen Ergebnis in Abbildung 4.5 abgebildet ist, zeigt die Grenzen dieser Methode auf. Während deutliche Kanten und Formen, wie das Schlüsselbein oder die Konturen des Halses klar dargestellt sind, ist eine Separation der Objekte nicht möglich. Der Körper, die Brille und das Oberteil oder noch feinere Strukturen, wie die Haare sind nicht als einzelne Objekte erkannt und dargestellt worden, sie

lassen sich nur durch die verschiedenen Farben abgrenzen.

Die Kompatibilität der Software mit der Kinect V2 Kamera ist nicht gegeben, dadurch lassen sich Fehler, welche ausschließlich oder vorwiegend auf die Kinect V1 Kamera zurückzuführen sind, nicht durch die ausgereifere Kinect V2 beheben oder minimieren. Da es sich bei "ReconstructMe" nicht um Open-Source-Software handelt, wird lediglich das Ergebnis des Post-Processings gespeichert. Die Rohdaten lassen sich nicht speichern, wodurch das Verhalten der Software nicht nachvollzogen werden kann und die Identifizierung von Fehlern und deren Fehlerquellen im Nachhinein auf Datenbasis nicht möglich ist.

5.2.2 RTAB-Map

"RTAB-Map" bietet die Möglichkeit Rohdaten zu speichern. So kann nach der Berechnung eines 3D-Modells aus den verfügbaren Daten der Stand vor dem Post-Processing wieder geöffnet werden, um Parameter zu ändern und ein angepasstes 3D-Modell berechnen zu lassen. Außerdem kann aus den Rohdaten der Erfassungsverlauf nachvollzogen und eine Grundlage zur Fehleranalyse geschaffen werden. Zudem wird der Erfassungsweg anhand einer türkisfarbenen Linie in der Software dargestellt, sodass Stellen, an denen Unstetigkeiten auftreten, schnell identifiziert werden können. Diese Pfad-Sprünge, lassen sich auf Unebenheiten des Bodens zurückführen, welche ruckartige Bewegungen der Kamera auslösen. Dies führt zu Fehlern in der Rekonstruktion, wie sich aus den Ergebnissen ableiten lässt. In den Abbildungen 4.6 und 4.8 sind diese Fehler, aufgrund von Bodenunebenheiten, deutlich zu erkennen. In beiden Abbildungen sind deutliche Unstetigkeiten der türkisen Linie zu sehen, an diesen Stellen sind auch in der Rekonstruktion Fehler, in Form von Versätzen, zu erkennen. In Abbildung 4.6 sind diese Fehler besonders im Bereich der Rumpfeinschnürung, hinter dem Cockpit und dem Übergang zwischen Rumpf und Seitenflosse erkennbar. Der Hallenboden auf der linken Seite des Rumpfes besitzt mehr und größere Unebenheiten, was in den Ergebnissen zu sehen ist. Die am wenigsten durch Bodenunebenheiten beeinflusste Erfassung ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Die türkise Linie weist hier die wenigsten Unregelmäßigkeiten auf.

"RTAB-Map" wurde für Erfassung mit beiden Kinect Kameras genutzt, um diese besser vergleichen zu können. Im Vergleich fällt sofort auf, dass alle mit der Kinect V1 erfassten Modelle spiegelverkehrt dargestellt sind. Die Ergebnisse für die Erfassung mittels Kinect V2 sind hingegen korrekt dargestellt. Daher lässt sich dieses Phänomen vermutlich auf einen Treiberfehler zurückführen. Beim Vergleich der Ergebnisse für die Erfassung der

rechten Rumpfhälfte, in den Abbildungen Abbildung 4.7 und Abbildung 4.10, fällt auf, dass der Flugzeugrumpf im Hintergrund bei der Erfassung mit der Kinect V2 eine deutlich höhere Genauigkeit aufweist. Dies ist auf den größeren Arbeitsabstand der Kinect V2 zurückzuführen. Die bessere Erfassung des Hintergrunds von der Kinect V2 hilft dem System möglicherweise bei der Orientierung im Raum, wodurch sich unter anderem der nahezu stetige Erfassungsweg (türkise Linie) begründen ließe. Die Stetigkeit des Erfassungsweges lässt sich außerdem auf die Stabilität der Standfüße der Kinect Kameras zurückführen. Der Fuß der Kinect V2 ist deutlich stabiler als der Fuß der Kinect V1. Dies zeigt sich insbesondere bei der Anfälligkeit auf Unebenheiten des Untergrunds. Wo die V1 stark wackelt und lange nachschwingt, ist die V2 sehr viel ruhiger. Zudem ist die Auflösung der Kinect V2 signifikant höher, weshalb die Rekonstruktionen auf Grundlage der Erfassung mit der Kinect V2, in den Abbildungen 4.9 bis 4.11 deutlich heller erscheinen als die, mit der Kinect V1 erfassten, Rekonstruktionen, in den Abbildungen 4.6 bis 4.8. Beim weiteren Vergleich der jeweiligen Rekonstruktionen der rechten Rumpfhälfte, ist zu erkennen, dass die höhere Auflösung der Kinect V2 auch ein detaillierteres und feiner aufgelöstes 3D-Modell ermöglicht. Das größere Blickfeld der Kinect V2 gegenüber der Kinect V1 reduziert die Fehleranfälligkeit durch große gleichförmige Flächen. Dies ist beim Vergleich der Abbildungen 4.6 und 4.9 deutlich am mittleren Haubenrahmen zu erkennen. Durch die große, scheinbare, Lücke zwischen hinterem und mittlerem Haubenrahmen kann die Software nicht genau definieren, an welcher Stelle sich der mittlere Haubenrahmen, in Abbildung 4.6 befindet. Durch das breitere Blickfeld, ist dies in Abbildung 4.9 kein Problem. Die Tatsache, dass bei der Erfassung des Rumpfes mit der Kinect V1 und der Rekonstruktion mit "ReconstructMe" in Abbildung 4.2 der gleiche Fehler auftritt, bestätigt die Vermutung, dass dieser Fehler auf die Hardware zurückzuführen ist. Das größere Blickfeld der Kinect V2 ist zudem deutlich im Vergleich der Abbildungen 4.7 und 4.10 zu erkennen. Der Rumpfwagen und der Sporn am Heck sind bei der Erfassung mittels Kinect V1 abgeschnitten. Bei gleichem Aufbau und Erfassung mit Kinect V2 sind beide komplett dargestellt.

Bei beiden Kameras neigt das System dazu das Flugzeug krumm darzustellen. Kritische Punkte dafür sind der Übergang zwischen Seitenflosse und Rumpf sowie der Bereich des Flächen-Rumpfübergangs. Vor der Seitenflosse hat der Rumpf den geringsten Durchmesser und keine Farbakzente. Dadurch gibt es für das Programm nur sehr wenig Anhaltspunkte zur Orientierung. Am Flächen-Rumpfübergang befindet sich eine starke Änderung der Oberflächenkrümmung, was das System mit einer Kurvenfahrt verwechseln kann, dies ist in den Abbildungen 4.6 und 4.9 besonders deutlich am türkis dargestellten Erfassungs-

weg erkennbar. In beiden Abbildungen ist im Bereich des Flächen-Rumpfübergangs ein Bogen im Erfassungsweg erkennbar. Dass die Kameras bei nahezu allen Erfassungen in diesem Bogen geführt wurden, ist unwahrscheinlich, weshalb davon auszugehen ist, dass dieser Bogen im Erfassungsweg von "RTAB-Map", aufgrund der Krümmung des Rumpfes interpretiert wurde.

In den Abbildungen 4.8 und 4.11 ist deutlich zu erkennen, dass bei der Erfassung des gesamten Objektes signifikante Probleme beim Übereinanderlegen der Rumpfhälften auftreten, was besonders am Winkelversatz des hinteren Rumpfteils zu erkennen ist. Es ist zu vermuten, dass "RTAB-Map" beim herumführen der Kamera um die Spitze des Rumpfes, aufgrund der geringen Zahl markanter Punkte in der Frontansicht, die Orientierung verliert. Damit lässt sich das fehlerhafte Übereinanderlegen der beiden Rumpfsseiten begründen.

Ein großes Problem stellt auch die Plexiglashaube dar, diese wird in keiner Rekonstruktion mit "RTAB-Map" annähernd vollständig dargestellt. Wie bereits in Unterabschnitt 5.2.1 erwähnt, ist dies durch die Transparenz der Plexiglashaube zu begründen. "RTAB-Map" nutzt, zusätzlich zu den Tiefeninformationen, die von der Kinect Kamera gelieferten Farbinformationen zur Orientierung und Erfassung des Objektes. Dies fällt im Vergleich zu den Modellen, welche mit "ReconstructMe" erstellt wurden, an der bessere Auflösung des 3D-Modells, insbesondere im Bereich der Haube auf. Ein weiterer Unterschied ist der uneingeschränkte Erfassungsbereich von "RTAB-Map". Mit dieser Software ließ sich, unabhängig von der genutzten Kamera, der gesamte Segelflugzeugrumpf erfassen und rekonstruieren. Verliert "RTAB-Map" die Orientierung, wird keine Fehlermeldung angezeigt oder der Vorgang abgebrochen, wie bei "ReconstructMe". Stattdessen wird die Erfassung fortgesetzt, was zu signifikanten Fehlern führt und die 3D-Modelle unbrauchbar macht.

5.2.3 Meshroom

Durch die fehlende Direktvorschau, während der Erfassung mit der Smartphonekamera, sind alle Modellierungen des Flugzeugrumpfes mit "Meshroom" sehr lückenhaft, wie in den Abbildungen 4.12 bis 4.18 zu sehen. Besonders viele Lücken besitzt die Rekonstruktion der linken Rumpfhälfte auf Basis der horizontal geführten Erfassung, wie in Abbildung 4.13 dargestellt. Um die farbigen Kontraste, wie das Kennzeichen am Rumpf oder den Haubenrahmen, ist die Rumpfkontur nahezu originalgetreu rekonstruiert worden. Allerdings ist bereits in geringem Abstand zu diesen farbigen Kontrasten, die Qualität der

Rekonstruktion der Rumpfkontur signifikant schlechter. Aufgrund fehlenden Detailgrades sind die von "Meshroom" berechneten Punkte an den glatten, weißen Stellen des Rumpfes in den Hintergrund verschoben (siehe Abbildungen 4.12 und 4.15). Dem Programm war es an diesen Stellen nicht möglich die Tiefeninformationen aus den zweidimensionalen Bildern zu errechnen. An diesen Stellen konnten daher keine Flächen durch das erstellte Mesh (Abbildung 4.13) erzeugt werden. Die Nase des Rumpfes ist sehr fehlerhaft durch das Mesh dargestellt. An dieser Stelle sind nur sehr wenig Punkte in der Punktwolke zu erkennen, "Meshroom" hat diese Punkte scheinbar dennoch mit einem Polygonnetz überlagert und so eine Fehlerhafte Modellierung erzeugt. Es wäre von Vorteil "Meshroom" einen maximal Abstand zwischen den, für die Berechnung eines Mesh, genutzten Punkten vorzugeben. Dies ist in den Einstellungen von "Meshroom" allerdings nicht möglich.

Die Tatsache das der Boden der Rekonstruktion nicht auf der xy-Ebene liegt (Abbildung 4.14), lässt sich darauf zurück führen, dass die Kamera während der Messung nicht im 90° Winkel zum Boden positioniert war.

Das beste Ergebnis liefert die sinusförmige Erfassung der linken Rumpfhälfte, wie in Abbildung 4.15 dargestellt. Durch die Bewegung der Kamera auf einer sinusförmigen Kurve, besaßen die aufgenommenen Bilder Überlappungen zu schräg versetzten Bildern, weshalb es "Meshroom" an deutlich mehr Stellen des Rumpfes möglich war daraus Tiefeninformationen zu berechnen. Dies ist besonders gut an der Punktwolke in Abbildung 4.15 zu erkennen und begründet das annähernd vollständige Ergebnis des Mesh, wie in Abbildung 4.16 dargestellt. In dieser Abbildung ist allerdings auch deutlich zu erkennen, dass die Rumpfoberfläche sehr uneben dargestellt ist. Dies ist auf die Darstellung mittels Polygonnetz zurückzuführen. Da nicht zu jedem Pixel eine Tiefeninformation vorhanden ist, werden die berechneten (und als Punktwolke dargestellten) Punkte mit Flächen verbunden. So ergibt sich die vorliegende Oberflächenstruktur. Verstärkend können Lichtreflexionen auf der glatten Rumpfoberfläche wirken. Es lässt sich vermuten, dass diese Reflexionen als Bezugspunkte für das Überlappen der Bilder angenommen wurden, allerdings ist deren Position zum farbigen Kennzeichen von Bild zu Bild verschieden, wodurch die extrem uneben dargestellte Oberfläche im Bereich des Kennzeichens begründen ließe.

Die Rekonstruktion der sinusförmigen Erfassung des gesamten Flugzeugrumpfes ist nicht zu verwenden. Durch die Verschiebung der Punkte in den Hintergrund, tritt hier ausgeprägt für beide Seiten auf, wie in Abbildung 4.17 zu sehen, wodurch sich die Aufnahmen der Rumpfhälften gegenseitig negativ beeinflussen. Es ist es "Meshroom" nicht möglich die Tiefeninformationen korrekt zu berechnen. Insbesondere im Bereich der Seitenflosse ist dieses Problem deutlich zu erkennen. In Abbildung 4.18 scheint die Position

der Seitenflosse, erkennbar an den farbigen Buchstaben "IL", von "Meshroom" auf der Bodenebenen berechnet worden zu sein. Auch die restlichen Teile des Rumpfes sind verschwommen dargestellt, was auf die fehlerhafte Berechnung der Tiefeninformation zurück zu führen ist.

Der Mangel farbiger Kontraste oder markanter Punkte an einem glatten, nahezu einfarbig weißen Flugzeugrumpf in GFK-Bauweise macht es fast unmöglich diesen mittels Photogrammetrie zu rekonstruieren. Insgesamt ist die Qualität der Rekonstruktionen mit "Meshroom" für dieses Beispiel ungenügend und für keinen technischen Anwendungsfall nutzbar.

In der folgenden Tabelle 5.1 sind die verwendeten Methoden in einer Bewertungsmatrix miteinander verglichen.

Tabelle 5.1: Bewertung der verwendeten Methoden im Überblick

	ReconstructMe Kinect V1	RTAB-Mab Kinect V1 Kinect V2		Meshroom Smartphone
Aufbau (Aufwand)	o	—	--	++
Aufbau (Einfluss auf Ergebnisse)	—	—	o	+
Erfassung (Aufwand & Handling)	—	—	--	o
Rekonstruktion (Aufwand & Bedienung)	+	o	o	—
Unabhängigkeit von Objektgröße	—	+	+	+
Detailtreue in Bereichen mit farbigen Markern	—	o	+	o
Detailtreue in Bereichen mit einfarbigen Flächen	o	o	+	--
Unabhängigkeit von Umgebungslicht	--	--	o	+

6 Anwendung

Die Anwendungsmöglichkeiten der Kinect Kameras sind sehr eingeschränkt. Da sie nicht für den mobilen Einsatz geeignet sind, können sie nicht zur schnellen und spontanen Messung verwendet werden.

Photogrammetrie bietet die Flexibilität mit einem herkömmlichen Smartphone Bilder oder Videos aufzunehmen und anschließend ein 3D-Modell zu berechnen. Innenarchitekten können damit beispielsweise, ohne großen Aufwand, bestehende Möbel aufnehmen und ihren Kunden digital ein Konzept präsentieren. Auch ganze Wohnungen können für digitale Besichtigungen rekonstruiert werden.

Für alle Anwendungsbereiche, in denen eine hohe Genauigkeit nötig ist, sind weder die Kinect Kameras noch Photogrammetrie geeignet. Das schließt die Nutzung in Bereichen wie z.B. Qualitätskontrolle oder Anwendungen, für die feine Details gefordert sind, aus.

Die Kinect V2 Kamera lässt sich, in Verbindung mit "RTAB-Map", durchaus einsetzen, um die Geometrie eines Körpers abzuschätzen oder eine Bauraumanalyse durchzuführen, wie in Abschnitt 6.1 näher erläutert. Auch die Photogrammetrie mit "Meshroom" ist, für Objekte mit ausreichend markanten Punkten, geeignet um eine Bauraumanalyse durchzuführen, wie in Abschnitt 6.2 erläutert. Darüber hinaus ist mit dieser Methode auch das Reengineering eines geometrisch einfachen Bauteils möglich, um Anbauteile konstruieren zu können.

6.1 Anwendungsbeispiel - Segelflugzeughänger

Für ein privates Projekt soll das vorhandene Basisgerüst eines Segelflugzeughängers modifiziert werden, um ein Segelflugzeug in Holzbauweise, wie in Abbildung 6.1 dargestellt, aufnehmen zu können. Dafür wurden CAD-Modelle des Anhängergerüsts und der Flügel erstellt. Diese einfachen Geometrien lassen sich mit relativ geringem Zeitaufwand



Abbildung 6.1: Fotografie des Segelflugzeuges, in Holz-Gemischbauweise, Ka 4 "Rhönlerche"

in einem CAD-Programm modellieren. Um die Modellierung des deutlich detailreicheren Segelflugzeugumpfes zu umgehen, wurde dieser mit einer Kinect V2 Kamera und "RTAB-Map" gescannt und rekonstruiert. Das so entstandene Modell ließ sich in das

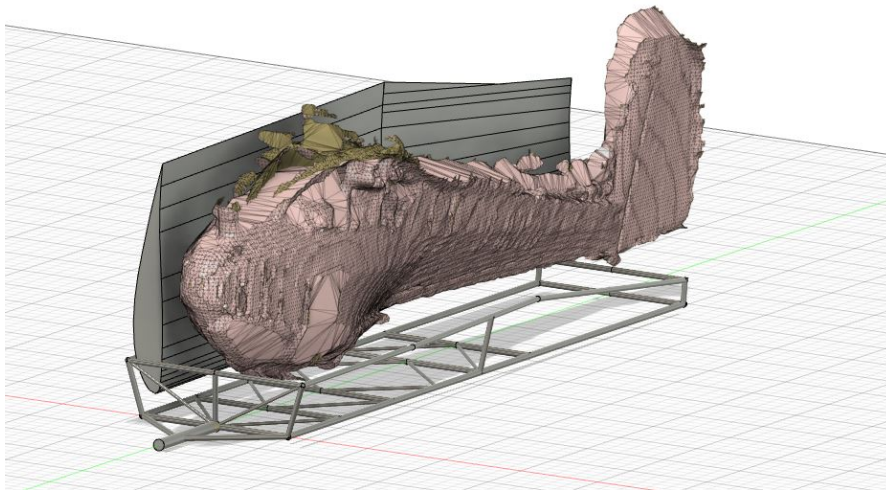


Abbildung 6.2: Integration der Modellierung des Segelflugzeugumpfes (Ka 4) im CAD-Modell des Anhängergerüsts (zur Veranschaulichung wurde ein Flügel ausgeblendet)

CAD-Modell des Anhängers integrieren, wie in Abbildung 6.2 zu sehen. So kann abgeschätzt werden ob die Teile des Segelflugzeuges auf dem vorhandenen Basisgerüst des Anhängers Platz finden, ohne aufwändig den Flugzeugrumpf im CAD-Programm modellieren zu müssen.

In Abbildung 6.1 ist deutlich erkennbar, dass der in diesem Beispiel gescannte und rekonstruierte Segelflugzeugrumpf, aufgrund seiner Bauart, deutlich mehr Kanten und markante Punkte aufweist als der, bisher in dieser Arbeit betrachtete, Flugzeugrumpf in GFK-Bauweise. Die Rekonstruktion, wie in Abbildung 6.2 zu sehen, weist deutliche Ungenauigkeiten auf, ist aber dennoch ausreichend um eine Abschätzung des Bauraumes vornehmen zu können.

6.2 Anwendungsbeispiel - Pedalraum

Im Rahmen einer Seminararbeit, von Studierenden der Technischen Universität Berlin, wurde die teilweise mangelhafte Beachtung von geschlechtsspezifischen Unterschieden in der Automobilindustrie betrachtet. Die meisten Fahrzeuge werden auf den Körper eines durchschnittlich großen Mannes ausgelegt. Das führt dazu, dass kleine Menschen, insbesondere Frauen, einem höheren Verletzungsrisiko ausgesetzt sind. Damit möglichst viele Menschen eine nahezu ideale Sitzposition einnehmen können, müssen die Pedale verstellbar sein.

Um diese Idee zu erproben, sollen Aufsätze entwickelt werden, welche sich auf den Pedalen montieren lassen. Die Entwicklung und Konstruktion dieser Pedalaufsätze ist um einiges einfacher, wenn ein 3D-Modell der Pedale und des Bauraums existiert. Dazu wurde ein Video des Fußraums, welcher in Abbildung 6.3 zu sehen ist, aufgenommen. Auf dieser Datengrundlage wurde ein solches Modell mittels Photogrammetrie in "Meshroom" erstellt.

Die mit der Photogrammetrie erreichte Qualität ist für eine Bauraumanalyse, wie in diesem Beispiel, ausreichend. Alle benötigten Informationen über die Pedale konnten dem 3D-Modell entnommen werden, um die Aufsätze passend zu konstruieren. Abbildung 6.5 zeigt den Fußraum mit den, montierten Pedalaufsätzen.

Dieses Anwendungsszenario ist prädestiniert für den Einsatz von Photogrammetrie. Die Erfassung des Bauraums kann ausschließlich mit einer handgeführten Kamera durchgeführt werden. Die Bauteile haben klare Kante und matte Oberflächen, was Reflexionen



Abbildung 6.3: Pedalraum eines Mercedes W124



Abbildung 6.4: Ergebnis der Photogrammetrie des Pedalraums

minimiert. Außerdem besitzen sie ausreichend markante Punkte um die erhaltenen Bilder übereinander legen zu können und ein 3D-Modell zu erzeugen. Die kleinen Details, welche nicht aufgelöst wurden, sind für die Arbeit bei diesem Projekt nicht relevant.



Abbildung 6.5: Pedalraum mit, auf den Pedalen montierten, Klötzen

7 Zusammenfassung

Die vorangegangene Arbeit beschäftigt sich mit kostengünstigen Methoden zur bildbasierten 3D-Modellierung von Objekten. Dazu wurden verschiedene Möglichkeiten, Objekte zu modellieren, dargestellt und begründet, weshalb bildbasierte Methoden für den Low-Cost-3D-Scan gewählt wurden. Die Grundlagen der verwendeten Methodiken, Hard- und Software wurden außerdem beschrieben.

Das zu erfassende Objekt, ein 7,03 m langer Segelflugzeugrumpf in GFK-Bauweise, wurde mit drei Methoden erfasst und rekonstruiert:

1. Erfassung mit der, auf einem Tischwagen sowie händisch geführten, Microsoft Kinect V1 und Rekonstruktion mittels "ReconstructMe"
2. Erfassung jeweils mit der, auf einem Tischwagen geführten, Microsoft Kinect V1 und V2 und Rekonstruktion mit "RTAB-Map"
3. Erfassung mit der handgeführten Smartphonekamera und Rekonstruktion mittels Photogrammetrie in "Meshroom"

Mit jeder dieser Methoden wurden drei Modelle des Segelflugzeugrumpfes rekonstruiert. Diese unterscheiden sich insbesondere im Grad ihrer Vollständigkeit und der aufgetretenen Darstellungsfehler. Eine quantitative Aussage, insbesondere über die Maßhaltigkeit der Modelle, lässt sich nicht treffen. Insgesamt stellte keines der erzeugten Modelle ein vollständiges und geometrisch äquivalentes Abbild des Flugzeugrumpfes dar.

Dies ist sowohl auf die genutzte Hardware, als auch die genutzte Software zurückzuführen. Die verwendeten Kinect Kameras sind nicht für den mobilen Einsatz konzipiert, was die Erfassung eines großen Objektes, mit diesen, vor Herausforderungen stellt, welche durch den genutzten Versuchsaufbau nicht optimal gelöst werden konnten. Die deutlich erkennbaren Einflüsse von Bodenunebenheiten lassen sich durch händisches Führen der Kamera zwar vermeiden, allerdings erhöhte dies die Gefahr des Orientierungsverlustes. Sowohl "ReconstructMe" als auch "RTAB-Map" verloren regelmäßig die Orientierung im

Raum, weshalb Scans abgebrochen wurden oder werden mussten. Trotz scheinbar guter Ergebnisse für die Rekonstruktion des gleichförmigen Modells, ist "ReconstructMe" aufgrund des beschränkten Erfassungsbereiches auf $4000\text{ mm} \times 4000\text{ mm} \times 4000\text{ mm}$ nicht für die Modellierung großer Objekte geeignet. Für die Rekonstruktion mit "RTAB-Map" war es nicht möglich die Kamera händisch zu bewegen um den kompletten Flugzeugrumpf erfassen zu können.

Die Erfassung des Rumpfes mittels Smartphone für die Rekonstruktion mit "Meshroom" bedurfte keiner Vorbereitung und war einfach und zügig umsetzbar. Die, mit dieser Methode, erzeugten Modelle wiesen deutliche Lücken auf, was aufgrund der fehlenden Direktvorschau erst nach zeitintensiver, vollständiger Berechnung der Rekonstruktion auffiel. Die Vollständigkeit des Modells ist unter anderem stark vom Weg der Kameraführung abhängig. Große, gleichförmige Objekte sind, aufgrund vieler großer, detailarmer Flächen, ungeeignet um sie mittels Photogrammetrie zu rekonstruieren, ohne zusätzliche Marker oder ein projiziertes Muster zu nutzen.

In weiteren Anwendungsbeispielen wurde gezeigt, dass mit allen vorgestellten Methoden digitale Modelle diverser kleiner Objekte, mit ausreichend markanten Punkten zu rekonstruieren waren. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die, in der vorliegenden Arbeit, vorgestellten Methoden der bildverarbeitungsbasierten Low-cost-3D-Vermessung nicht geeignet erscheinen um große, uniforme Objekte zu erfassen und digital zu rekonstruieren. Für die Erfassung und Rekonstruktion kleiner, wenig uniformer Objekte, mit diesen Methoden, ließen sich hingegen, für verschiedene Anwendungsfälle, nutzbare Ergebnisse erzielen.

8 Fazit und Ausblick

8.1 Fazit

Abschließend lässt sich sagen, dass die, in der vorliegenden Arbeit, vorgestellten Methoden der bildverarbeitungsbasierten Low-cost-3D-Vermessung durchaus geeignet sind um kleine, wenig uniforme Objekte zu erfassen und digital zu rekonstruieren. Es war allerdings nicht möglich mit den vorgestellten Methoden ein vollständiges 3D-Modell eines großen, gleichförmigen Objekts (Segelflugzeugrumpf in GFK-Bauweise) in guter Qualität zu erstellen.

Dies ist sowohl auf die genutzte Hardware als auch die genutzte Software zurückzuführen. Die verwendeten Kinect Kameras sind, ohne Modifikationen und stabilisierte, freie Kameraführung, nicht für die Erfassung großer Objekte geeignet. Sowohl "ReconstructMe" als auch "RTAB-Map" verloren regelmäßig die Orientierung im Raum, weshalb Scans abgebrochen wurden oder werden mussten. Trotz scheinbar guter Ergebnisse für die Rekonstruktion eines gleichförmigen Modells, ist "ReconstructMe" aufgrund des beschränkten Erfassungsbereiches nicht für die Modellierung großer Objekte geeignet. Die Erfassung eines Objekts mittels Smartphone ist einfach und zügig umsetzbar. Ohne Verwendung zusätzlicher Marker ist es jedoch nicht möglich große, gleichförmige Objekte mittels Photogrammetrie zu rekonstruieren. Zwar wurde der getrennte Ablauf von Erfassung und Berechnung als angenehm empfunden, allerdings war eine Beurteilung der Modellierung, aufgrund der fehlenden Direktvorschau, erst nach zeitintensiver, vollständiger Berechnung des Modells möglich.

8.2 Ausblick

Wie bereits in Kapitel 5 diskutiert, hat keines der, in dieser Arbeit vorgestellten, Konzepte zur bildverarbeitungsbasierten Low-cost-3D-Vermessung eines Segelflugzeugrumpfes

in GFK-Bauweise, zufriedenstellende Ergebnisse geliefert. Es lässt sich allerdings sagen, dass die Rekonstruktionen, welche auf Erfassungen mit den Kinect Kameras basieren, deutlich vollständiger und weniger fehlerbehaftet erscheinen.

Die Kinect Kameras sind, wie dargelegt, für den mobilen Gebrauch nur bedingt geeignet. Insbesondere die kurzen, widerspenstigen Kabel behindern die händische Kameraführung während der Erfassung. Daher würden ggf. bessere Ergebnisse erzielt werden, wenn statt der Kameras, das zu erfassende Objekt bewegt würde. In diesem Fall würden weder das Gewicht noch die widerspenstigen Kabel eine Rolle spielen. Für die mobile Anwendung, ermöglicht ein Austausch der mitgelieferten, gegen lange, biegsame Kabel, neben dem einfacheren Handling, bei ausreichend langen Kabeln, auch die Erfassung allein, da das zusätzlich benötigte Equipment, wie der Laptop, nicht bewegt werden muss. So ist eine deutlich höhere Qualität des erzeugten 3D-Modells zu erwarten. Wird die Kamera zusätzlich durch eine kardalische Aufhängung, wie ein beispielhaft in Abbildung 8.1 dargestelltes Gimbal, stabilisiert, ist mit einer weiter erhöhten Qualität der Rekonstruktion zu rechnen. Außerdem lässt sich durch die Stabilisierung der Kamera ein vorzeitiger Abbruch der Erfassung, bei "ReconstructMe", weitestgehend vermeiden. Abbrüche der Erfassung traten vorwiegend bei schnellen, ruckartigen Bewegungen der Kamera auf, welche durch eine kardalische Aufhängung deutlich minimiert würden.



Abbildung 8.1: Darstellung eines Gimbals zur Stabilisierung der Kameraführung [6]

Die händische Kameraführung für eine Rekonstruktion mit "RTAB-MAP" war nicht möglich. Ein Gimbal könnte dies, durch die Stabilisierung der Kamera, für diese Software ermöglichen. Eine, von der horizontalen Linie abweichende, Kameraführung würde die Erfassung des gesamten Objektes erlauben. Allerdings gilt es zu bedenken, dass "RTAB-MAP" eine "Mapping-Software" ist, weshalb es auf konstante, horizontale Bewegungen, wie in dieser Arbeit, ausgelegt ist. Davon abweichende, beispielsweise sinusförmige, Kamerabewegungen lassen das Programm unter Umständen, auch bei einer stabilisierten Kamera die Orientierung verlieren. Die Dämpfung des Wagens, auf welchem die Kamera aufgebaut ist, sowie ein ebener Untergrund, würden bereits eine deutliche Verbesserung der Qualität des erzeugten 3D-Modells erzielen. Da "RTAB-MAP" für das Kartografieren ausgelegt ist, kann das Programm zusätzlich Radbewegungen auswerten. Stellt man "RTAB-MAP" diese zur Verfügung, ist die Maßhaltigkeit der erzeugten Rekonstruktion gewährleistet. Allerdings würden diese zusätzlichen Daten die Orientierung der Software im Raum nicht verbessern, wodurch das fehlerhafte Übereinanderlegen der Rumpfhälften (Abbildung 4.11) nicht behoben würde.

Photogrammetrie, auf Grundlage von Smartphonebildern, ist, wie im Anwendungsbeispiel, in Abschnitt 6.2, dargestellt, in gewissem Maße möglich. Allerdings ist diese Methode nicht für alle Objekte anwendbar, wie das Beispiel des Segelflugzeugrumpfes, in Abschnitt 4.3, zeigt. Neuere Smartphones, wie die Pro-Versionen des iPhone 12 und 13 und das iPad pro 2020 von "Apple Inc." besitzen einen Tiefensensor, LiDAR (Light Detection and Ranging) [10]. Diese mobilen Endgeräte können neben den Bildern der verbauten RGB-Kameras zusätzlich Tiefeninformationen ermitteln, ähnlich der Kinect Kameras. Der Hersteller "Apple Inc." bietet für diese Geräte außerdem eine Applikation an, welche aus den Daten der RGB-Kameras und denen des LiDAR-Sensors digitale Rekonstruktionen von Objekten berechnet. Damit werden die Vorteile, der geringen Vorbereitungszeit und großen Mobilität, der Photogrammetrie mit der reduzierten Rechenzeit und der Direktvorschau, auf dem integrierten Display verbunden. In Verbindung mit einem Gimbal, sind gute Rekonstruktionen zu erwarten. Allerdings müssen dafür aktuell die Abhängigkeit von einem Hersteller, "Apple Inc.", sowie hohe Anschaffungskosten für ein Smartphone in Kauf genommen werden, was nicht dem Anspruch kostengünstiger Lösungen entspräche.

Im professionellen Bereich werden bereits handgeführte 3D-Scanner genutzt, welche noch um einiges teurer sind als die oben genannten Smartphones. Diese professionellen Scanner werden unter anderem für das Reengineering eingesetzt. Eine nähere Untersuchung der genannten mobilen Endgeräte von "Apple Inc.", unter dem Aspekt der Präzision und

Maßhaltigkeit der erzeugten Rekonstruktionen erscheint lohnenswert.

Es ist zu erwarten, dass andere Smartphonehersteller nachziehen und ihre Geräte ebenfalls mit Tiefensensoren ausstatten. Dies würde voraussichtlich die Kosten für diese Sensoren senken und zufriedenstellende Ergebnisse bildverarbeitungsbasierter 3D-Vermessung von Objekten in absehbarer Zukunft einfach, zügig und kostengünstig ermöglichen. Dabei ist zu bedenken, dass die Präzision und Maßhaltigkeit dieser Low-Cost Lösungen auf absehbare Zeit vermutlich nicht ausreichen wird um sie für die Qualitätskontrolle zu verwenden.

Perspektivisch lässt die stetig zunehmende Rechenleistung und umfangreicher werdende Ausstattung von Smartphones, in Kombination mit mechanischer Stabilisierung, bildverarbeitungsbasierte Low-cost-3D-Vermessung von Objekten in einem breiten Anwendungsspektrum möglich werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Website. – Online erhältlich unter <https://guide-images.cdn.ifixit.com/igi/dcGosZx6dEwevBXt.huge>; abgerufen am 28. Oktober 2021.
- [2] Website. – Online erhältlich unter <https://techcrunch.com/wp-content/uploads/2010/11/hemqsrmtxqupld32.jpg>; abgerufen am 28. Oktober 2021.
- [3] EVAN-AMOS: Website. – Online erhältlich unter <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Xbox-One-Kinect.jpg>; abgerufen am 28. Oktober 2021.
- [4] Website. – Online erhältlich unter <https://alicevision.org/img/product/meshroom.jpg>; abgerufen am 03. November 2021.
- [5] Website. – Online erhältlich unter <https://developer.nvidia.com/cuda-zone>; abgerufen am 01. Juni 2021.
- [6] Website. – Online erhältlich unter https://assets.mmsrg.com/isr/166325/c1/-/ASSET_MMS_71944757/fee_786_587_png; abgerufen am 12. Juni 2022.
- [7] GRIWODZ, Carsten ; GASPARINI, Simone ; CALVET, Lilian ; GURDJOS, Pierre ; CASTAN, Fabien ; MAUJEAN, Benoit ; DE LILLO, Gregoire ; LANTHONY, Yann: AliceVision Meshroom: An Open-Source 3D Reconstruction Pipeline. In: *Proceedings of the 12th ACM Multimedia Systems Conference*. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2021 (MMSys '21), S. 241–247. – URL <https://doi.org/10.1145/3458305.3478443>. – ISBN 9781450384346
- [8] Website. – Online erhältlich unter <https://www.samsung.com/ch/support/mobile-devices/wie-sind-die-kameras-des-galaxy-s10-plus-s10e-aufgebaut/>; abgerufen am 23. Juni 2021.

- [9] HEINDL, Christoph ; BAUER, Harald ; ANKERL, Martin ; PICHLER, Andreas: ReconstructMe SDK: a C API for Real-time 3D Scanning. In: *6th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning Technologies*, 2015
- [10] Website. – Online erhältlich unter <https://www.apple.com/de/iphone/compare/?modelList=iphonel2promax,iphonel3pro,iphonel2pro>; abgerufen am 12. Juni 2022.
- [11] Website. – Online erhältlich unter <https://developer.microsoft.com/de-de/windows/kinect/>; abgerufen am 14. April 2021.
- [12] Website. – Online erhältlich unter <https://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=44561>; abgerufen am 14. April 2021.
- [13] Website. – Online erhältlich unter http://www.spatialhumanities.de/typo3temp/pics/TLS_Prinzip_243616b852.png; abgerufen am 24. November 2021.
- [14] LEÓN, Fernando P.: *Messtechnik*. Springer Vieweg, 2019. – URL <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-59767-5#about>. – ISBN 978-3-662-59766-8
- [15] Website. – Online erhältlich unter <https://github.com/alicevision/meshroom>; abgerufen am 15. November 2021.
- [16] Website. – Online erhältlich unter <https://www.thome-precision.com/images/Messmaschine/Messmaschine-CNC-Sigma-800.png>; abgerufen am 12. Juni 2022.
- [17] MICHALIK, Sören: *Hardware-beschleunigte Bildmerkmale mit Subpixel-Genauigkeit zur SLAM Lokalisierung und Objekterkennung*, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Dissertation, Jan 2019. – URL https://publikationsserver.tu-braunschweig.de/receive/dbbs_mods_00066217
- [18] Website. – Online erhältlich unter https://openkinect.org/wiki/Main_Page; abgerufen am 05. November 2021.
- [19] Website. – Online erhältlich unter <https://openkinect.org/wiki/Roadmap>; abgerufen am 05. November 2021.

- [20] ОТЕПКА, Johannes ; GHUFFAR, Sajid ; WALDHAUSER, Christoph ; HOCHREITER, Ronald ; PFEIFER, Norbert: Georeferenced Point Clouds: A Survey of Features and Point Cloud Management. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 2 (2013), Nr. 4, S. 1038–1065. – URL <https://www.mdpi.com/2220-9964/2/4/1038>. – ISSN 2220-9964
- [21] PAGÈS, J. ; SALVI, J.: Coded light projection techniques for 3D reconstruction. In: *J3eA* 4 (2005), S. 001. – URL <https://doi.org/10.1051/bib-j3ea:2005801>
- [22] PAGLIARI, Diana ; PINTO, Livio: Calibration of Kinect for Xbox One and Comparison between the Two Generations of Microsoft Sensors. In: *Sensors* 15 (2015), Nr. 11, S. 27569–27589. – URL <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/11/27569>. – ISSN 1424-8220
- [23] Website. – Online erhältlich unter <https://www.aspektheins.com/3d-modelle-aus-fotos-wie-funktioniert-digitale-photogrammetrie/>; abgerufen am 03. November 2021.
- [24] Website. – Online erhältlich unter <https://raw.githubusercontent.com/wiki/introlab/rtabmap/doc/Tutorials/MultiSessionTango/mesh.jpg>; abgerufen am 17. November 2021.
- [25] SAHM, Jörg: *Kollaborative Visualisierung großer, interaktiver und dynamischer 3D Szenen auf verteilten Endgeräten*, Technischen Universität Darmstadt, Dissertation, 2004. – URL <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/559/>
- [26] Website. – Online erhältlich unter https://www.gom.com/-/media/gom-website/global/topics/photogrammetry/gom_photogrammetry-tritop-car-montage.jpg; abgerufen am 23. November 2021.
- [27] Website. – Online erhältlich unter <https://www.reconstructme.net/>; abgerufen am 03. November 2021.
- [28] WILHELM BURGER, Mark James B.: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. – URL <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/3-540-30941-1.pdf>. – ISBN 978-3-540-30941-3
- [29] WOLFGANG REISIG, Johann-Christoph F.: *Informatik*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. – URL <https://doi.org/10.1007/3-540-32743-6>. – ISBN 978-3-540-32742-4

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „— bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] — ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,


Name: Naumann

Vorname: Felix

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Bildverarbeitungsbasierte Low-cost-3D-Vermessung von Objekten

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

<u>Wittenberge</u>	<u>17.06.2022</u>	
Ort	Datum	Unterschrift im Original