

# Allgemeine Probleme von photogrammetrischen Scans

Ein praktischer Vergleich von drei aktuellen Softwarelösungen  
für photogrammetrische Anwendungen

## Diplomarbeit

Ausgeführt zum Zweck der Erlangung des akademischen Grades  
**Dipl.-Ing. für technisch-wissenschaftliche Berufe**

am Masterstudiengang Digitale Medientechnologien an der  
Fachhochschule St. Pölten, **Masterklasse Postproduktion**

von:

**Franz Bischof, BSc**

dm141506

Betreuer/in und Erstbegutachter/in: Dipl.-Ing. (FH) Mario Zeller  
Zweitbegutachter/in: Mag. Franz Schubert

Stegersbach, 11.09.2019

# **Ehrenwörtliche Erklärung**

Ich versichere, dass

- ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- ich dieses Thema bisher weder im Inland noch im Ausland einem Begutachter/einer Begutachterin zur Beurteilung oder in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Diese Arbeit stimmt mit der vom Begutachter bzw. der Begutachterin beurteilten Arbeit überein.

.....  
Ort, Datum

.....  
Unterschrift

# Kurzfassung

Der Gegenstand dieser Diplomarbeit ist ein praktischer Vergleich dreier Photogrammetrie Softwarelösungen: Agisoft Metashape, RealityCapture und AliceVision Meshroom. Zwei davon haben sich durchaus schon als Industriestandard implementiert; die dritte glänzt durch ihre kostenlose Verwendungsmöglichkeit, da sie Open Source ist. Die Arbeit erklärt was Photogrammetrie eigentlich ist, gibt einen kurzen Überblick über den geschichtlichen Verlauf dieses Vermessungsverfahrens und versucht auf einfache Art und Weise die komplexen, einzelnen Arbeitsschritte des Photogrammetrie Workflows zu erläutern.

Für den Softwarevergleich wurden die Ausgangsbilder der vier verschiedenen Objekte, die es in 3D nachzubilden gilt, selbstständig aufgenommen. Bei den Modellen handelt es sich um eine kleine Burg, einen Leiterwagen, eine handliche Truhe und eine Anhäufung von Steinen.

Im Laufe der Arbeit wird auf die korrekte Aufnahme der zu verwendeten Bildern eingegangen und mögliche Problemlösungen aufgezeigt, die das Endergebnis zum Positiven verändern können. Auch etwaige Objekte, die sich absolut nicht für die Rekonstruktion mittels Photogrammetrie eignen, werden angesprochen.

Die drei verwendeten Photogrammetrie Programme werden im praktischen Teil erklärt und auf ihre speziellen Einstellungsmöglichkeiten wird ebenfalls eingegangen.

Die einzelnen Berechnungszeiten der benötigten Arbeitsschritte werden miteinander verglichen, die erhaltenen 3D Modelle werden auf etwaige Artefakte, Fehler, Texturprobleme oder Ähnliches untersucht und einige Distanzen der realen Maße werden jenen im 3D Raum gegenübergestellt, um Abweichungen feststellen zu können.

Zusammen mit der Auswertung einer Online Expertenbefragung, ergeben sich eine Vielzahl von Kriterien, die eine Beurteilung der Photogrammetrieprogramme ermöglicht und zeigt, dass auch Freeware wie Meshroom konkurrenzfähige, realistische Objekte erstellen kann.

# Abstract

The subject matter of this diploma thesis is a practical comparison of three photogrammetry software solutions: Agisoft Metashape, RealityCapture and AliceVision Meshroom. Two of them are more or less already implemented as an industry standard; the third one is open source. The thesis explains what photogrammetry is, gives a brief overview of its history and describes the complex, individual steps of the photogrammetry workflow in a simple way.

The author took the source images of the four different objects that are replicated in 3D. The models are a small castle, a handcart, a handy chest and an arranged pile of stones.

In the course of the thesis, the correct capture setup for the pictures is discussed and solutions to possible occurring problems are given, which can enhance the result. Even objects, which are not suited for the reconstruction through photogrammetry, are addressed.

The three programs are explained in the practical part, as well as their various options in their corresponding settings.

After the respective 3D models have been created by the three software solutions, the individual processing times of the required worksteps are compared. Furthermore, the 3D models are examined for any errors, artefacts, texture problems etc. Since the real objects were measured by hand and the exact dimensions documented, the corresponding distances in 3D space are also compared in the computer animation software Autodesk Maya.

Together with the evaluation of the online expert survey, this results in a variety of criteria that allows an appraisal of the photogrammetry programs and proofs, that freeware, as Meshroom, is capable of creating competitive and realistic objects.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Ehrenwörtliche Erklärung</b>	<b>II</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>IV</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ziele der Arbeit	2
1.2 Struktur der Arbeit	2
<b>2 Was ist Photogrammetrie?</b>	<b>4</b>
2.1 Arten der Photogrammetrie	5
2.2 Anwendungsbereiche	6
2.2.1 Anfänge der Photogrammetrie in der Unterhaltungsindustrie	7
2.3 Abbildungsmodell	8
2.4 Geschichte der Photogrammetrie	9
<b>3 Equipment und Software</b>	<b>12</b>
3.1 Kamera	12
3.1.1 Auswahl der Kamera	12
3.1.2 Capture Setup	13
3.2 Hardware	13
3.3 Software	14
<b>4 Der Photogrammetrische Workflow</b>	<b>15</b>
4.1 Bildaufnahme oder Capturing	15
4.2 Kameraeinstellungen	17
4.2.1 Capturevorgang	17
4.2.2 Skalierungsfaktor	19
4.3 Processing	20
4.3.1 3D Rekonstruktion	20
<b>5 Praktischer Teil Softwarevergleich</b>	<b>22</b>
5.1 Auswahl der Kameras	22
5.1.1 Sony A7SII	22
5.1.2 Canon 5D Mark III	23
5.2 Computer Konfiguration	24

5.3 Auswahl der Software	24
5.3.1 Agisoft Metashape	24
5.3.2 RealityCapture	25
5.3.3 Meshroom	25
5.4 Aufnahme der Bilder	26
5.4.1 Shooting	26
5.4.2 Vermessung	27
5.4.3 Referenzbilder	28
5.5 Processing der Modelle	33
5.5.1 Bildaufbereitung	33
5.5.2 Programmaufbau und Settings	35
5.6 Aufbereitung der Modelle in Autodesk Maya	48
5.6.1 Real World Scale	48
<b>6 Auswertung der 3D Modelle</b>	<b>53</b>
6.1 Burg	53
6.1.1 Agisoft Metashape	53
6.1.2 RealityCapture	59
6.1.3 Meshroom	64
6.2 Leiterwagen	70
6.2.1 Agisoft Metashape	70
6.2.2 RealityCapture	72
6.2.3 Meshroom	76
6.3 Truhe	78
6.3.1 Agisoft Metashape	78
6.3.2 RealityCapture	82
6.3.3 Meshroom	85
6.4 Steine	89
6.4.1 Agisoft Metashape	89
6.4.2 RealityCapture	93
6.4.3 Meshroom	96
<b>7 Expertenbefragung</b>	<b>99</b>
7.1 Aufbau der Befragung	99
7.2 Befragungsergebnisse im Detail	101
7.2.1 Burg	101
7.2.2 Leiterwagen	103
7.2.3 Truhe	105
7.2.4 Steine	107
<b>8 Vermessungsgenauigkeit</b>	<b>109</b>
8.1.1 Burg	109

8.1.2	Leiterwagen	110
8.1.3	Truhe	111
8.1.4	Steine	112
<b>9</b>	<b>Analyseergebnisse und Vergleich der Programme</b>	<b>114</b>
9.1	Ergebnisse der Processing Times	114
9.2	Ergebnisse der Expertenbefragung	115
9.3	Ergebnisse der Vermessungsgenauigkeit	117
<b>10</b>	<b>Fazit</b>	<b>124</b>
10.1	Ausblick	126
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>127</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>		<b>130</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>		<b>136</b>
<b>Listingverzeichnis</b>		<b>138</b>
<b>Anhang</b>		<b>139</b>
A.	Gemessene Distanzen	139
B.	Links zu den Modellen auf Sketchfab	141
C.	Aufbau der Umfrage	142

# 1 Einleitung

Photogrammetrie erfreut sich aktuell großer Beliebtheit und es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, um mit Hilfe von Photogrammetrie digitale Assets zu erstellen. Sowohl in der Film- und Serienindustrie als auch bei der Spieleentwicklung wird immer wieder auf Photogrammetrie zurückgegriffen, da diese Technik viele auftauchende Probleme bei der Umsetzung des gewünschten Endergebnisses lösen kann. Sei es um ein Set digital zu erfassen um es dann in der Postproduktion weiterverwenden zu können, oder um digitale Assets wie Bäume, Steine oder Terrain zu generieren, und dass bei einem sehr hohen Grad an Realismus, den man teilweise unmöglich nachahmen kann.

Die Priorität bei der Verwendung liegt hier sowohl auf der Schnelligkeit als auch auf der Genauigkeit der Technik. Es werden Modelle generiert die dem realen Objekt zum Verwechseln ähnlich sehen, dieselben Details und Abmessungen aufweisen und auch hochauflösende Texturen, die den Objekten ihr finales Aussehen geben, werden von den Photogrammetrieprogrammen erstellt.

In der Industrie wird den professionellen, meist hochpreisigen Softwarelösungen der Vorzug gegeben. Es stellt sich also die Frage, ob nicht auch gleichwertige bzw. sogar bessere Ergebnisse mit billigerer Software zu erzielen sind oder ob man tatsächlich tief in die Tasche greifen muss, um gute 3D Modelle zu erhalten.

Photogrammetrie kann kleineren Firmen oder auch freiberuflichen 3D-Artists unter die Arme greifen, um ihr gewünschtes Ziel zu erreichen. Relevant ist hier natürlich auch der Preis, denn oftmals ist es nicht möglich auf teure Photogrammetriesoftware zurückzugreifen, da das nötige Budget nicht vorhanden ist, deshalb bietet diese Arbeit auch einen praktischen Softwarevergleich und beleuchtet die Unterschiede und Ergebnisse der professionellen Softwareanwendungen im Vergleich zu einem frei verfügbaren Photogrammetrieprogramm.

## 1.1 Ziele der Arbeit

Das Ziel ist es, herauszufinden, ob es mit allen gewählten Softwarelösungen möglich ist, hochwertige und realitätsgtreue 3D Objekte zu erstellen. Zudem soll erkennbar werden, welche der drei verwendeten Softwarelösungen die ähnlichsten bzw. realistischsten Ergebnisse liefert und ob die Modelle der Freeware im Vergleich zu den Endprodukten der „High-End“ Softwarelösungen bedeutend schlechter ausfallen. Welche Objekte sich im Grunde für die Photogrammetrie eignen, wird ebenfalls in dieser Arbeit diskutiert, genauso wie die Probleme, zu denen es während der Erstellung kommen kann. Auch die Schwierigkeiten, die grundsätzliche alle Photogrammetrieprogramme betreffen, werden aufgezeigt.

## 1.2 Struktur der Arbeit

Bevor sich der Hauptteil der Arbeit mit dem praktischen Softwarevergleich beschäftigt, wird zunächst in Kapitel 2 erläutert, was Photogrammetrie eigentlich ist und welche Anwendungsgebiete es dafür gibt. Auch ein geschichtlicher Verlauf wird hier in groben Zügen gegeben. Im kurzen Kapitel 3 *Equipment und Software*, wird auf das Setup bei der Aufnahme eingegangen, sowie die optimale Hardware und weitere Software, die nützlich sein kann, aufgezeigt.

Aufbauend auf Kapitel 3 wird in Kapitel 4 *Der Photogrammetrische Workflow* beschrieben. Hier werden zu verwendende Einstellungen der Kamera für die richtige Bildaufnahme erklärt, die Möglichkeit mit dem Skalierungsfaktor zu arbeiten vorgestellt und der grundsätzliche Verarbeitungsablauf der Programme für die 3D Rekonstruktion beschrieben.

Im anschließenden Kapitel 5 folgt der praktische Teil mit dem Softwarevergleich. Zuvor werden die verwendeten Kameras sowie die Konfiguration des Computers, auf dem die Erstellung stattfand, beschrieben. Danach folgt die Auswahl der Photogrammetrieprogramme, mit näheren Hintergrundinformationen zu den einzelnen Softwarelösungen, bevor es schließlich um die korrekte Aufnahme der Bilder geht. Der Prozess des Capturings wird im Detail beleuchtet und auch die Vermessung, mit der in einem späteren Kapitel unter anderem die Genauigkeit der reproduzierten 3D Modelle überprüft wird, wird dargestellt. Einige Referenzbilder, um die zu reproduzierenden Objekte besser nachzuvollziehen, sind abgebildet, bevor das Processing der Modelle aufgenommen wird. Im folgenden Unterkapitel werden zunächst die Feinheiten der Bildaufbereitung belegt, ehe der Programmaufbau und die jeweiligen Einstellungsmöglichkeiten

## 1 Einleitung

der verschiedenen Photogrammetrieprogramme genauestens vorgestellt werden. Das Kapitel *Praktischer Teil Softwarevergleich* endet mit dem Aufbereiten der Modelle und der korrekten Verwendung des Skalierungsfaktors um die 3D Objekte auf Realgröße zu bringen.

Das nächste große Kapitel, Auswertung der 3D Modelle, befasst sich mit der Untersuchung der generierten 3D Assets. Diese werden sehr sorgfältig unter die Lupe genommen um etwaige Fehler und Probleme feststellen zu können. Die Processing Times für die Erstellung der Modelle werden hier aufgelistet, die visuellen Auffälligkeiten beschrieben und mit Screenshots der Modelle aufbereitet.

Im Kapitel 7 wird der Aufbau sowie die Ergebnisse der Expertenbefragung aufgelistet. Mittels einem Online-Modell-Viewer wurden die Modelle Sachkundigen präsentiert und um ihre Meinung bezüglich der Qualität und anderen Faktoren gebeten.

Kapitel 8 beinhaltet die genaue Aufschlüsselung der verschiedenen Objektmessungen und im Kapitel 9 werden die einzelnen Processing Times der Programme gegenübergestellt, um sie besser vergleichen zu können. Die Ergebnisse der Expertenbefragung wird zusammenfassend dargestellt und die Vermessungsgenauigkeit wird mit Hilfe von statistischen Berechnungen behandelt und visuell aufbereitet.

## 2 Was ist Photogrammetrie?

Die Photogrammetrie (Bildmesskunst, Bildmessung) beschäftigt sich im Wesentlichen mit der Aufgabe, aus den in photographischen Aufnahmen (Photogrammen, Messbildern) festgelegten Zentralprojektionen eines räumlichen Gebildes bestimmte orthogonale Projektionen desselben, insbesondere Grund- und Aufriss, oder auch nur einzelne Abmessungen des Gebildes zu ermitteln. (Hugershoff, 1930, S. 1)

Dadurch finden photogrammetrische Verfahren in vielen Gebieten Anwendung, in denen ein Messobjekt abgebildet und ausgewertet werden kann. Hauptziel dabei ist die exakte Rekonstruktion des Objektes im 3D Raum, also dem digitalen Äquivalent der Wirklichkeit, abgeleitet von den realen geometrischen Koordinaten. Dafür werden Bilder herangezogen, aus denen die benötigten Informationen zur Erstellung des 3D Modells abgeleitet werden können.

Jedoch geht bei dem Versuch ein 3D Objekt in einem zweidimensionalen Bild abzubilden stets Information verloren. Bereiche die auf der Rückseite des Objektes liegen, also primär nicht sichtbar sind, können aus diesem Bild nicht nachgebildet werden. Auch führt ein schlechtes Kontrastverhältnis oder eine zu geringere Auflösung dazu, dass jene Bereiche schlecht bis gar nicht nachgebildet werden können. Auch Abbildungsfehler, die zum Beispiel durch die Linsenverkrümmungen der Objektive entstehen, können sich negativ auf das Endergebnis auswirken.

Bei der Bilddurchnahme an sich sind viele Faktoren, wie Lichtquellen, Oberflächenbeschaffenheit des Objektes, und Sensor und Technik der Aufnahmekamera ausschlaggebend. Weitere Elemente wie die Weiterverarbeitung und der Rekonstruktionsprozess führen dann bis zum finalen Modell.

Um sogenannten Objektpunkte zu erhalten, werden die aufgenommenen Bilder mittels Bildinterpretations-, und -messungsverfahren analysiert. Hier werden Helligkeit- und Farbverteilung im Bild den Objektpunkten zugeordnet.

## 2 Was ist Photogrammetrie?

---

Vereinfacht ausgedrückt werden also mit einem Aufnahmesystem idealerweise eine Vielzahl von Bildern von einem Messobjekt erstellt, die wiederum mittels einem Messsystem untersucht werden um Objektpunkte zu erhalten, die über Rekonstruktionsalgorithmen eine Nachbildung des realen Objektes ermöglichen.

### 2.1 Arten der Photogrammetrie

Die Kunst der Photogrammetrie wird in verschiedene Bereiche gegliedert. Ein Teilgebiet davon ist die Nahbereichsphotogrammetrie, mit der sich auch diese Arbeit beschäftigt. Sie findet vor allem in Bereichen wie der industriellen Messtechnik, Medizin, Bildverarbeitung, VFX (= Visual Effects) in der Filmindustrie sowie Spielentwicklung Verwendung und ist natürlich auch mit der Mathematik und Physik eng verknüpft.

Traditionsbedingt ist die Nahbereichsphotogrammetrie auch bei der geodätischen Messtechnik (= Landvermessung) angesiedelt, trägt aber auch schon seit ihrer Existenz einen wichtigen Beitrag für die Architektur und Denkmalpflege bei. Auch erfreut sie sich in der Industrie, für zum Beispiel die Qualitätssicherung von Fertigungsabläufen, immer größerer Beliebtheit.

Der Einsatzschwerpunkt der Nahbereichsphotogrammetrie liegt bei Objektgrößen von 1 - 20m bei schwankender Genauigkeit für den jeweiligen Anwendungsfall. So wird in der Industrie von Genauigkeiten bis unter 0,1mm und in der Architektur von Genauigkeiten im cm-Bereich gesprochen. (Luhmann, 2018, S. 26)

Da Photogrammetrie zu den berührungslosen 3D Messverfahren zählt, hat Licht einen hohen Stellenwert, jedoch wäre eine Messung mit Mikro- bzw. Ultraschallwellen auch möglich.

Photogrammetrie kann vielfältig eingeteilt werden. So in etwa nach Aufnahmeort und -entfernung. Hier spricht man unter anderem von Weltraumphotogrammetrie, terrestrischer Photogrammetrie, Nahbereichsphotogrammetrie oder auch Unterwasserphotogrammetrie.

Durch die Anzahl der aufgenommenen Bilder kann man zwischen Einbild, Stereo- und Mehrbildphotogrammetrie (Bündeltriangulation) unterscheiden.

Panoramaphotogrammetrie oder auch die digitale Photogrammetrie sind Beispiele für die Eingliederung nach Aufnahme- und Auswertmethode.

## 2 Was ist Photogrammetrie?

---

Natürlich kann man auch nach Anwendungsgebieten, wie der Architektur, Industrie oder auch Forensik unterteilen. (Luhmann, 2018, S. 28)

### 2.2 Anwendungsbereiche

Im Gegensatz zu der Satellitenbildanwendung wird bei der Nahbereichsphotogrammetrie mit weitaus geringeren Aufnahmeentfernungen und anderen Aufnahmekonzepten gearbeitet. Hier liegen die Aufnahmeentfernungen zwischen wenigen Zentimetern und einigen hundert Metern.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Verwendung von Photogrammetrie Sinn macht, wenn das zu messende Objekt schwer zugänglich beziehungsweise nicht stabil ist, dessen Form aber trotzdem aufgezeichnet werden muss. Auch erleichtert es im Nachhinein andere oder weitere Objektbereiche auswerten zu können, da eine Archivierung der aufgenommenen Daten möglich ist. Ist es notwendig Ergebnisse in Echtzeit zu erhalten, ist Photogrammetrie genauso sinnvoll, als wenn das zu vermessende Objekt sehr klein ist. Auch kann ein direkter Kontakt mit dem Objekt nicht gewünscht sein, da dessen Oberflächenbeschaffenheit dadurch verändert werden würde oder gar die Umgebung stören könnte.

Die Anwendungsgebiete in der Nahbereichsphotogrammetrie erstrecken sich somit über den Automobil-, Maschinen- und Schiffsbau. Hier wird damit vor allem eine Form- und Maßkontrolle durchgeführt, Crash Versuche aufgenommen oder auch Roboter kalibriert und gesteuert.

In der Luft- und Raumfahrtindustrie findet Photogrammetrie Verwendung in der Vermessung von Parabolantennen, bei der Ausrichtung und Überprüfung von Vorrichtungen und sogar bei Weltraumsimulationen.

Wie zu erwarten ist die Architektur und Denkmalpflege ein weiteres Hauptanwendungsgebiet. Hier reicht die Verwendung von baugeschichtlichen Dokumentationen, Rekonstruktion zerstörter Bauwerke, Fassadenaufmaße bis hin zu der Kartierung von Ausgrabungsstätten.

Auch bei Windkraftanlagen, im Bergbau, für Rohrleitungs- und Tunnelaufnahmen oder auch bei der Straßen- und Schienenvermessung wird im Ingenieurbau Photogrammetrie verwendet.

In der Medizin werden Zähne vermessen, Wirbelsäulendeformationen festgestellt, Studien über die Bewegung und Ergonomie durchgeführt und bei

## 2 Was ist Photogrammetrie?

---

Operationen wird Photogrammetrie zur bildgestützte Navigation in Echtzeit verwendet.

Selbst für die Dokumentation von Verkehrsunfällen und die Rekonstruktion von Tatorten wird in der Forensik auf Photogrammetrie gesetzt.

Die Naturwissenschaften mit dem Wachstum von Kristallen und Pflanzen sowie der Gletscher- und Hangvermessung sei hier ebenso genannt wie die Verwendung in der Animation und Filmindustrie, die im kommenden Abschnitt genauer beleuchtet wird. (Luhmann, 2018, S. 38)

### 2.2.1 Anfänge der Photogrammetrie in der Unterhaltungsindustrie

Photogrammetrie findet auch immer wieder Anwendung in diversen Filmen und Spielen. So ist der berühmte Bullet Time Effekt, bekannt aus dem Film *Matrix*, nichts anderes als ein photogrammetrischer Spezialeffekt. Hier entsteht der Eindruck einer Kamerafahrt um ein augenscheinlich eingefrorenes Objekt. Im Fall *Matrix* ist das der Hauptdarsteller Keanu Reeves, um den sich die Kamera bewegt, während er den Kugeln ausweicht. Hierfür wurden einfach mehrere Kameras kreisförmig um den Hauptdarsteller angeordnet um durch eine Aneinanderreihung der Einzelbilder dieser Kameras den optischen Eindruck einer Kamerabewegung zu erzeugen. (Silberman, 2003)

David Fincher, der Regisseur von *Fight Club*, verwendete Photogrammetrie um unter anderem die Gasexplosion des Herdes filmisch umsetzen zu können. Dadurch konnte das französische VFX Studio *BUF* eine Szene erstellen, in der sich die Kamera sehr nahe um den Gasherd bewegt und sich kurz vor der Explosion wieder schnell vom Herd entfernt. Der Übergang von dem tatsächlichen Set zum 3D generierten Gegenstück verläuft für die Zuseher nahtlos, und passiert während der Explosion. (Failes, 2016)

Auch bei *Godzilla* (1998) wurden die Gebäude von Manhattan im Nachhinein rekonstruiert, um jedes Gebäude dann so in die Szene setzen zu können, damit die 3D Varianten mit der Parallaxe der echten Gebäude übereinstimmen. Der Aufwand wurde betrieben um die interaktiven Effekte, wie zum Beispiel die Spiegelung des Hubschraubers, realitätsgerecht auf der Oberfläche der Hochhäuser wiedergeben zu können. (Nedomansky, 2019)

Abgesehen für die Erstellung einzelner Assets wurde Photogrammetrie das erste Mal in einem sehr großen Umfang im Jahr 2013 in der Spieleindustrie verwendet. In dem Adventure Computerspiel des polnischen Entwicklungsstudios The Astronaut, *The Vanishing of Ethan Carter*, wurde ein Großteil der

## 2 Was ist Photogrammetrie?

---

Spieleumgebung mit der Unterstützung von Photogrammetrie erstellt um einen bis dato unbekannten Realismus erzielen zu können (Poznanski, 2014)

### 2.3 Abbildungsmodell

Beim photogrammetrischen Messprinzip handelt es sich um ein dreidimensionales Messverfahren, das auf einer zentralprojektiven Abbildung als mathematisches Modell basiert. Mittels der Rekonstruktion von Strahlenbündeln wird hier Aussehen und Lage im Raum des Messobjektes berechnet.

Jeder Bildstrahl dieser Strahlenbündel kann eindeutig im 3D-Raum festgelegt werden, unter der Voraussetzung, dass die reale Abbildungsgeometrie der Kamera (innere Orientierung) und die Lage des Aufnahmesystems im Raum (äußere Orientierung) bekannt ist.

Durch die Kreuzung von mindestens zwei solcher räumlich verschiedenen Bildstrahlen lässt sich ein Objektpunkt dreidimensional festhalten. Daraus ergibt sich die Stereophotogrammetrie, da man zumindest zwei Bildaufnahmen benötigt. Bei der Mehrbildphotogrammetrie gibt es theoretisch keine Beschränkung der verwendeten Bildanzahl.

Die zuvor erwähnte innere Orientierung beschreibt das geometrische Kameramodell. Bezieht man sich auf das Modell der Lochkamera ist somit der bedeutendste Referenzpunkt das Projektionszentrum. Alle Bildstrahlen verlaufen durch dieses geradlinig.

Jedoch unterscheidet sich eine handelsübliche Kamera in vielen Faktoren von dem Modell der Lochkamera. Durch die Verwendung eines Objektivs, eine nicht im rechten Winkel zur optischen Achse stehende Sensorfläche oder auch Unebenheiten der Sensorfläche kommt es unwillkürlich zu Abbildungsfehler, da man aus diesen Gründen von der idealen Abbildungsgeometrie abweicht. (Luhmann, 2018, S. 30)

Da aber in vielen handelsüblichen Kameras meist CCD- oder CMOS Flächensensoren verwendet werden und diese über ein gleichbleibende und rekonstruierbare Zeilen- und Spaltenanordnung besitzen, was wiederum ein festes Bildkoordinatensystem definiert, wird vorausgesetzt, dass „der Bezug des abgespeicherten digitalen Bildes zum Sensor bzw. zum Objektiv über den Zeitraum zwischen Kalibrierung und Messung konstant bleibt.“ (Wiedemann, 2004, S. 110)

## 2 Was ist Photogrammetrie?

---

Bei der äußereren Orientierung wird die absolute Lage der Kamera in einem übergeordneten Koordinatensystem definiert. Dies geschieht mit den Translations- und Rotationskoordinaten mit dem Projektionszentrum als gemeinsamer Referenz. Durch die Bildmessung bekannter Objektpunkte werden indirekt diese Parameter beschrieben.

Wie (Luhmann, 2018, S. 30) darlegt, entspricht jeder gemessene Bildpunkt einer räumlichen Richtungsmessung vom Projektionszentrum zum Objektpunkt. Auf diesem Strahl liegen nun Objektpunkte die alle zum selben Bildpunkt führen, jedoch ist die Länge des Strahles unbekannt. Erst durch den Schnitt mit zumindest einem weiteren Strahl aus einem anderen Strahlenbündel kann der Objektpunkt genau auf dem Strahl und somit auch im 3D Raum platziert werden.

Verwendet man nun eine Vielzahl an Bildern werden dadurch aus jedem Bild Strahlenbündel in den Raum geschossen, die durch den bereits erwähnten Schnitt mit den anderen Strahlen ein dichtes Netz bilden. Durch die Bündeltriangulation werden nun die Bilder im Raum ausgerichtet und die jeweiligen Objektpunkte im 3D Raum fixiert.

## 2.4 Geschichte der Photogrammetrie

Schon einige Jahre nachdem die Erfindung der Fotografie durch Joseph Nicéphore Niépce, Louis Jacques Mandé Daguerre und andere in den Jahren zwischen 1826 und 1840 stattgefunden ging, wird bereits vom französischen Offizier Aimé Laussedat sowie dem deutschen Architekten Albrecht Meydenbauer unabhängig voneinander Photogrammetrie verwendet.

*Die Photogrammetrie* als tatsächlicher Begriff wird das erste Mal 1867 im *Wochenblatt des Architekturvereins zu Berlin* als Titel eines anonym veröffentlichten Beitrages verwendet. („Die Photogrammetrie“, 1867)

Laussedat wird im Grunde als Erfinder der photogrammetrischen Messtechnik anerkannt. 1849 startete er schon Versuche mit einigen Bildern des Hôpital des Invalides in Paris. Danach verbesserte er das Verfahren um topografische Pläne von Geländeabschnitten für militärische Zwecke anzufertigen.

Der Deutsche Meydenbauer hingegen entwickelte eigene Aufnahmekameras mit Bildformaten von bis zu 40 x 40 cm um das Handaufmaß (= klassische, ausschließlich händische Technik für die Bauaufnahme) bei der Fassadenvermessung zu ersetzen. (Donath, 2009, S. 47)

## 2 Was ist Photogrammetrie?

Für den Staat Preußen legte er in den Jahren 1885 bis 1905 ein Archiv mit bedeutenden, architektonischen Baudenkmälern an, dass um die 16 000 Messbilder enthielt. Teile davon sind bis heute erhalten. (Luhmann, 2018, S. 40)

Wesentlich vorangetrieben wurde die Photogrammetrie durch Carl Pulfrich, der die Stereophotogrammetrie mit seinem selbstgebauten Stereokomparator im Jahre 1901 einführt. Eduard von Orel machte sich dieses Wissen zu Nutze und entwickelte den Stereoautograf, mit dessen Hilfe es erstmalig möglich war, eine kontinuierliche Auswertung von Grundriss sowie Höhenlinien durchzuführen. (Kraus, 2004, S. 3)

Die Zeit zwischen den beiden Weltkriegen verschafft der Entwicklung photogrammetrischer Stereoauswertegeräte erneut einen Aufschwung. Es werden instrumentell aufwändige Systeme mit optischer Projektion oder auch mechanische Raumlenker erfunden. Letztere finden Anwendung bei der Erstellung von Karten und Plänen von Luftbildern in den Maßstäben 1:1000 bis 1:25 000. (Prager & Kasper, 1961, S. 77) Auch wird zeitgleich an Geräte, deren Aufgabe die Bildentzerrung für die Erstellung von Bildkarten ist, gearbeitet.

Als Aufnahmetechnik werden Messkammern bis zum Ende der siebziger Jahre für die Nahbereichsphotogrammetrie verwendet. Anfangs werden hier nur Glasplatten als Trägermaterial für die Fotoemulsion (= dünne, lichtempfindliche Schicht) verwendet, mit deren Hilfe ohne großen mechanischen Aufwand eine plane Bildfläche umgesetzt werden konnte. Diese Glasplatten wurden dann langsam durch Film als Emulsionsträger ab den fünfziger Jahren abgelöst. Spezielle mechanische Messkammern wurden dabei mit einer *mechanischen Filmverebnung* ausgestattet.

Als dann auch der Siegeszug der elektronischen Rechner in den Fünfzigern startete, begann die Phase der analytischen Photogrammetrie, die sich auf die zunehmende Verwendung von Modell- und Bündelausgleichungsprogramme auswirkte. Durch deren Gebrauch konnte die Aufnahme beliebig angeordneter Bildverbände sowie die simultane Berechnung der Kalibrierungsdaten der beteiligten Aufnahmekameras umgesetzt werden. (Luhmann, 2018, S. 42)

Der nächste große Schritt fand dann in den achtziger Jahren statt, als man das bis dahin verwendete Prinzip der Messkammer langsam durch modifizierte, Fotosystemkameras ersetzte. Diese verfügten über eine integrierte Glasgitterplatte, auch *Réseau* genannt, die den Einsatz dieser Kameras für Photogrammetrie erst möglich gemacht hat. Bald danach stieg die Nutzung von optoelektronischen Bildsensoren und die stetige Weiterentwicklung der Rechnertechnologien ermöglichte die Verarbeitung digitalisierter Bilder. Vor allem

## 2 Was ist Photogrammetrie?

die automatische Messung und Erkennung von Bildpunkten und der Bezug zu Objektmuster für die Berechnung von Oberflächen wurde somit möglich. Ab diesem Zeitpunkt wird von digitaler Photogrammetrie gesprochen. (Luhmann, 2018, S. 44)

Die Signale von Standard-Videokameras wurden verwendet um erste komplett digitale Anwendungen umzusetzen. Die analogen Bildsignale, die eine Auflösung von 780 x 580 Pixel aufwiesen wurden in Echtzeit digitalisiert und ausgewertet. Hier spricht man von Realtime-Photogrammetrie beziehungsweise Videogrammetrie.

Da die geringe Auflösung dieser Videokameras jedoch die Benutzung in vielen Bereichen einschränkte, wurden Scanning-Kameras entwickelt, die auf eine hochauflösende Aufnahme von Objekten ausgelegt waren und bis zu 6000 x 4500 Pixel erfassen konnten.

Ab den neunziger Jahren kamen Digitalkameras auf den Markt, die eine höhere Auflösung bieten und sofort ein digitales hochauflösendes Bild direkt in der Kamera speichern konnten. Diese Kameras führten in der Industrie zu einer verstärkten Anwendung der photogrammetrischen Messtechnik.

Langsam kommen auch einfach zu bedienbare, sowie kostengünstige Softwarepakete auf den Markt, die eine 3D Rekonstruktion und Erstellung der 3D Objekte aus Digitalbildern erlauben, ohne detaillierte Kenntnisse der Photogrammetrie und deren mathematischen Hintergrund zu kennen.

Des Weiteren erblicken ab dem Jahr 2010 einige Softwarelösungen, die auf dem Structure-from-Motion Verfahren basieren, das Licht der Welt. Dieses Verfahren kann selbstständig eine Vielzahl von Bildern kalibrieren, orientieren und weiterführend auch die dichten Punktwolken generieren. (Luhmann, 2018, S. 46) Auch die in dieser Arbeit verwendeten Photogrammetrieprogramme verwenden dieses Verfahren.

## 3 Equipment und Software

Heutzutage werden bis auf einige Ausnahme Digitalkameras für die photogrammetrische Bildaufnahme herangezogen. In Verbindung mit der digitalen Bildauswertung und Analyse ist dadurch ein geschlossener digitaler Ablauf möglich. Alle Arbeitsschritte können somit auch direkt, ohne zeitlicher und räumlicher Verschiebung durchgeführt werden.

Hier wird noch zwischen Offline- und Online-Photogrammetriesystemen unterschieden. Bei der Offline Variante wird mit einer Kamera aufgenommen, und das Ergebnis wird erst nach der Bildauswertung ersichtlich. Bei der Online Variante finden mindestens zwei synchrone Kameras Anwendung, welche das Messergebnis sofort liefern.

Die Automation der einzelnen Rechenvorgänge sowie der geringe, zeitliche Aufwand begünstigen die Verwendung von Photogrammetrie in Bereichen, die direkte Entscheidungen verlangen. Diese digitalen Systeme finden in der Fertigungsmesstechnik sowie der Medizin Verwendung, da hier durch die Bildauswertung der Photogrammetrie mit dem Messobjekt oder der Umgebung interagiert werden kann. (Luhmann, 2018, S. 32)

### 3.1 Kamera

#### 3.1.1 Auswahl der Kamera

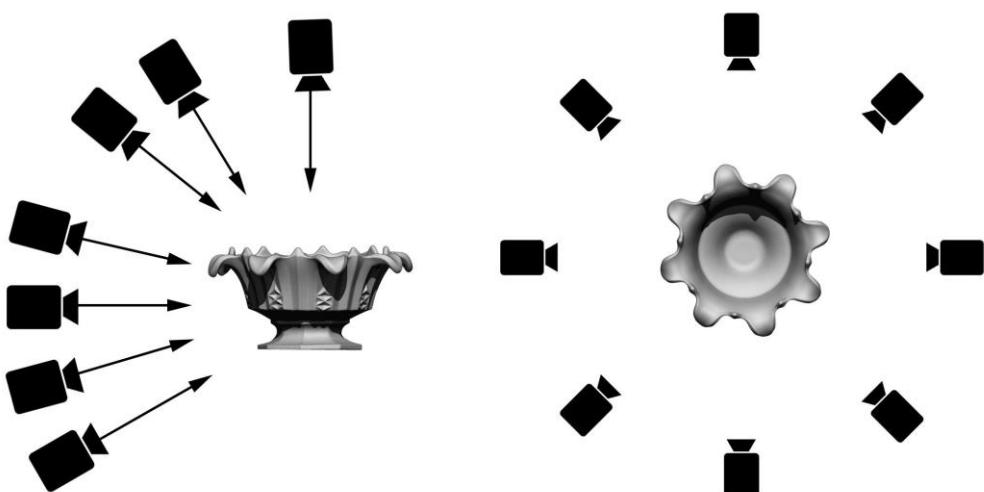
Im Vergleich zu einst, kann heute prinzipiell jede Kamera für Photogrammetrie verwendet werden. Smartphonekameras sind möglich, jedoch wird empfohlen, zumindest mit einer Digitalkamera zu arbeiten, um eine möglichst hohe Auflösung und eine scharfe Abbildung zu erzielen – hier werden oft Vollformat Kameras verwendet, da sie zumeist eine bessere Bildqualität bei geringerem Rauschen und höhere Lowlight Performance bewerkstelligen.

### 3 Equipment und Software

---

#### 3.1.2 Capture Setup

Wie in Abbildung 1 gut zu erkennen ist, werden alle möglichen Winkel auf das Objekt abgedeckt, um die diversen Feinheiten bestmöglich einzufangen. Diese Kamerawinkel werden daraufhin rund um das Objekt wiederholt. Am besten geht man hier wie folgt vor: Zuerst wählt man einen Winkel, zum Beispiel die Top Ansicht und geht dann im Kreis um das Objekt. Nach einer vollständigen Umrundung verringert man den Winkel und wiederholt das Ganze, bis man am Ende den untersten Kamerawinkel erreicht. Diese Vorgehensweise garantiert ein Abdecken aller Bereiche des Objektes. Zusätzlich sollte man darauf achten, dass sich mindestens 1/3 des Bildausschnittes vom vorigen Bild im darauffolgenden Bild wiederfinden. Das garantiert, dass die Software später auch alle benötigten Punkte wiederfindet, um die Bilder untereinander matchen zu können.



*Abbildung 1. („3D Scanning Reflective Objects With Photogrammetry“, 2016)  
Beispiel eines Positionsverlaufes der Kamera rund um ein Objekt*

## 3.2 Hardware

Um die aufgenommen Bilder zu verwerten wird ein durchschnittliches bis sehr leistungsstarkes Computersystem verwendet, abhängig von dem gewählten Modell. Werden kleine Objekte versucht nachzubilden reicht oft ein Homesetup aus, jedoch können hier schnell Prozessorleistung, RAM und Grafikkarte zum Flaschenhals werden, sollte man versuchen z.B. mittels Flugaufnahmen größere Landmassen oder Ähnliches in 3D erstellen zu wollen. Im Fall von dem

### 3 Equipment und Software

---

Photogrammetrieprogramm RealityCapture wird zumindest eine Computer Konfiguration mit 16GB RAM, eine Grafikkarte mit mindestens 1024 CUDA Cores (= Compute Unified Device Architecture; dadurch werden Programmteile durch den Grafikprozessor bearbeitet) und ein Prozessor mit mindestens 4 Kernen empfohlen. („OS and hardware requirements“, 2018)

Des Weiteren ist anzumerken, dass die im Verlauf des im Processingvorganges erstellten Caches und die fertigen High Poly Modelle sehr schnell einen großen Teil der Festplatte belegen können. Das ist durchaus nicht zu unterschätzen, vor allem, wenn man mit einer Vielzahl an Daten arbeitet, ist es sinnvoll diese auf eigene Festplatten mit einer schnellen Datenübertragung auszulagern.

## 3.3 Software

Hier gibt's es wieder projektbedingt diverse Anforderungen. Legt man auf eine akkurate Bildwiedergabe Wert, ist es ratsam einen Color Checker neben dem Modell zu platzieren. Mit dessen Hilfe können die einzelnen Fotos bevor sie zum 3D Modell weiterverarbeitet werden in einem Programm wie Adobe Lightroom oder auch Photoshop farbkorrigiert werden. Ansonsten wird natürlich die Photogrammetriesoftware der eigenen Wahl verwendet. Hier hat jeder seine speziellen Programmvorlieben und vieles kann auch nur mit einer Software umgesetzt werden. Um jedoch die vielfältigen Lösungen aufzuzeigen, werden nachfolgend einige Beispiele genannt.

Um das erstellte Modell dann weiterzuverarbeiten, verwendet man eine geeignete 3D Software wie Autodesk Maya<sup>1</sup>, 3dsMax<sup>2</sup> oder Blender<sup>3</sup>. Sieht man sich nun die Texturen an, finden hier auch Programme wie Substance Designer<sup>4</sup>, Knald<sup>5</sup> oder Xnormal<sup>6</sup> Verwendung um die Texturen zu baken.

---

1 <https://www.autodesk.com/products/maya/overview>

2 <https://www.autodesk.com/products/3ds-max/overview>

3 <https://www.blender.org/>

4 <https://www.allegorithmic.com/products/substance-designer>

5 <https://www.knaldtech.com/>

6 <https://xnormal.net/>

## 4 Der Photogrammetrische Workflow

Üblicherweise wird der Ablauf in zwei Hauptbereiche unterteilt, die Bildaufnahme und die Bildverarbeitung. In der Bildaufnahme geht es darum das Objekt bestmöglich abzubilden, während der Hauptaugenmerk der Bildverarbeitung in der bestmöglichen Nachbildung des Meshes und einer akkurate Texturerstellung besteht.

### 4.1 Bildaufnahme oder Capturing

Wie bereits bekannt, ist es notwendig, eine Vielzahl von Bildern des zu reproduzierenden Objektes zu erstellen. Ob nun ein kleines Objekt digital nachgebildet wird, oder ob es sich um Gegenstände handelt, die nicht bewegt werden können, hat dabei durchaus Einfluss auf die Vorgehensweise. So ist es möglich ein Studiosetup zu verwenden, in dem es natürlich einfach ist, die Lichtsituation anzupassen und zu kontrollieren. Auch kann hier die Verwendung eines Drehtellers äußerst hilfreich sein, da die Kamera dadurch unbewegt auf einem Stativ verweilen kann. Das erweist sich nicht nur als Vereinfachung des Capturesetups, sondern schlägt sich auch in der benötigten Aufnahmezeit nieder.

Bei Gebäuden oder größeren, statischen Objekten ist das nicht der Fall. Hier ist es notwendig die Kamera selbst um das Objekt zu bewegen. Sei es nun im Studio oder nicht, essentiell bei der Aufnahme der einzelnen Bilder ist stets eine ausreichende Überlappung (mind. 60%) der einzelnen Bildinhalte.

Natürlich hat auch die Beschaffenheit des Objektes Einfluss auf den Photogrammetrieprozess. So sind unter anderem Oberflächen die einen hohen Reflexionsgrad, wie metallische Objekt oder nasse Oberflächen, genauso ungeeignet wie durchsichtige Objekte, also Gläser oder Fenster. Auch sich bewegende Objekte, wie Blätter im Wind, sind äußerst unbrauchbar. Die Photogrammetriesoftware kann bei solchen Objekten (fast) keine Punkte

## 4 Der Photogrammetrische Workflow

---

zwischen den einzelnen Bildaufnahmen matchen, siehe dazu den durchgeführten Test in Abbildung 2.



*Abbildung 2. Oben die tatsächliche Chromkugel mit der 3D Rekonstruktion und unten der Glasschwan, der beweist, dass Glas auch nicht geeignet ist.*

Sollte es unbedingt notwendig sein, solch reflektierende oder durchsichtige Objekte zu verwenden, gibt es die Option diese mit einem speziellen Matt Spray zu behandeln, dadurch bekommt das Objekt im Grunde eine neue Textur, die die Reflexionen verhindert, jedoch ist es dann nicht mehr möglich, die originale Textur dieses Objektes zu verwenden, da das Matt Spray dieses ja überdeckt.

Auch große, gleichfarbige Flächen bereiten den Softwaren Probleme, da es ihnen hier nicht gelingt zwischen den einzelnen Pixel zu unterscheiden, da diese alle dieselbe Farbe aufweisen.

Um dem Problem entgegenzuwirken kann man auf den einfarbigen Flächen mittels Stifte, Sprays oder ähnlichem, ein Muster malen, siehe Abbildung 3. Das unterstützt die Software zwar bei der Erstellung der Point Clouds, jedoch hilft dieses Vorgehen nur bei der Mesh Erstellung, da man dieses Muster logischerweise dann auch auf der Textur wiederfindet.



*Abbildung 3. Mikaela Holmes zeigt unter anderem in ihrer 3D Scanning Class, (Holmes, 2017), wie man Objekte mit geringen Oberflächendetails vorbereitet.*

Manche Objekte eignen sich zwar für Photogrammetrie, sind jedoch aufgrund ihres simplen Aufbaus schneller und vor allem kostensparender mittels 3D Modeling herzustellen. So hat es zum Beispiel wenig Sinn, eine Kaffeetasse verwenden zu wollen, da die Rekonstruktion über Photogrammetrie bei weitem länger dauern würde als das Erstellen über einen Polygonzyylinder.

## 4.2 Kameraeinstellungen

Unterm Strich zeigt sich, dass scharfe Bilder, die weder über- noch unterbelichtet sind, die besten Ergebnisse liefern.

Gehen also Bildbereiche im Dunklen verloren, können daraus genauso wenig die erforderlichen Punkte für die Rekonstruktion festgelegt werden, als wenn die Bereiche überstrahlen. Deshalb ist auch eine hohe Blendenzahl bei der Aufnahme der Fotos essentiell, da bei einer Blende von z.B. f/2.8 bereits Bereiche des Objektes außerhalb des Fokus liegen können. Für den Außenbereich wird mindestens eine Blende 8 empfohlen und eine Belichtungszeit von 1/160, um ein scharfes Bild zu erhalten.

Der ISO Wert sollte auf 100 oder niedriger gestellt sein um das Rauschen in den dunklen Bereichen zu minimieren. (Lachambre, Lagarde, & Jover, 2017, S. 22)

### 4.2.1 Capturevorgang

Sich im Vorhinein darüber Gedanken zu machen, für was das Objekt später verwendet wird, hat auch Einfluss auf den Capturevorgang. Benötigt man eine höhere Auflösung der Textur, so muss man auch näher an das Objekt um die Feinheiten auch wirklich einzufangen. Als Richtwert hat sich bei einer

## 4 Der Photogrammetrische Workflow

---

gewünschten Texturgröße von 4096 x 4096 Pixel und einer Objektgröße, wie sie bei dem Objekt der Burg im praktischen Teil vorzufinden ist, ein Abstand von ein bis zwei Metern zum Objekt bewährt.

Wie im Online Kurs *PHG 101 – Photogrammetry Pipeline, Volume 1: Outdoor Photography to Finish* von (Skonicki, 2018) beschrieben, soll man für eine Rundumansicht eines Objektes zwischen den einzelnen Seitwärtsschritten einen Winkel von 10 Grad einhalten. Kombiniert mit der Aufnahme aus verschiedenen Höhen und Winkel (Unter- und Aufsicht) ergibt sich ein korkenzieherartiges Aufnahmemuster der einzelnen Kameraplatzierungen. Diese Bilder sollte man noch mit Detailaufnahmen von schwerzugänglichen Bereichen ergänzen, da diese meist auch vergessen werden, jedoch im Rekonstruktionsschritt einen wichtigen Beitrag leisten und das gesamte Modell aufwerten können.

Tatsächlich lässt sich aber dieses ideale Aufnahmemuster in der Wirklichkeit oft schwer umsetzen. So kann auch es passieren, dass ein nicht ganz so perfektes Aufnahmemuster, wie in Abbildung 4 ersichtlich, entsteht, obwohl man der Meinung ist, während dem Capturevorgang alles berücksichtigt zu haben. Leider sieht man das erst später, es sei dann, man benutzt ein Online Photogrammetrie System, wie in Kapitel 2 beschrieben. Auch ein erstes Alignment der Fotos, nach dem Shooting ist eine Möglichkeit. Somit kann man gegebenenfalls noch reagieren und zusätzlich einige Fotos von vernachlässigten Bereichen anfertigen.

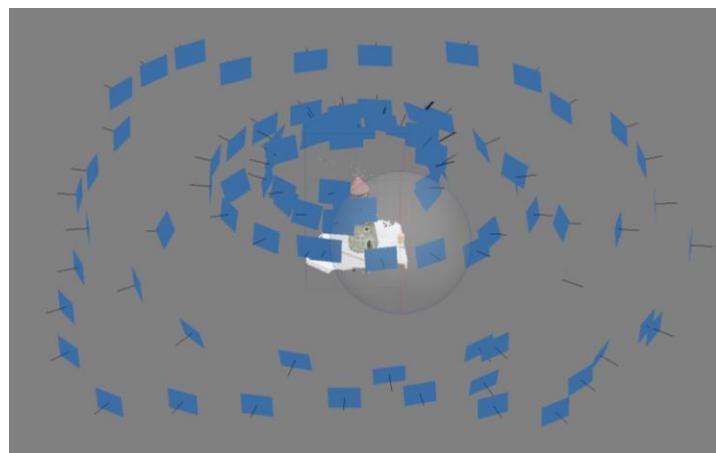


Abbildung 4. Kameraausrichtung in Agisoft Metashape

Sollte eine Überprüfung der Bildausrichtung in der Software nicht möglich sein, wird laut Lachambre (2017, S. 28) dazu geraten, mittels einer Videoaufnahme per z.B. GoPro das Objekt zusätzlich abzufilmeln, und das Aufnahmemuster der Kamera nachzuahmen. Mittels der Extraktion einzelner Frames können somit auch Bereiche, die vergessen worden sind, in die Rekonstruktion miteinfließen.

## 4 Der Photogrammetrische Workflow

---

Auch kann man durch die kleineren Maße der GoPro schwer zugängliche Bereiche besser ablichten, zu denen man selbst mit einer handlichen Digitalkamera schwer Zugang hat.

Da außerhalb des Studios keine geregelten Lichtverhältnisse vorherrschen, ist zu erwähnen, dass eine direkte Sonneneinstrahlung auf das Objekt unbedingt zu vermeiden ist, da diese harten Schatten und überstrahlten Bereiche dann später auf der Textur zu sehen wären. Abgesehen davon ist somit eine Lichtsetzung im Nachhinein im 3D Programm äußerst problematisch, da es hier zu doppelten Schattenwürfen auf dem Objekt kommen würde.

Laut Lachambre (2017, S. 21) wird auch von der Verwendung eines Statives im Außenbereich abgeraten, da die Lichtverhältnisse sich zu schnell ändern können, und hier die Priorität bei der schnellen Durchführung des Shootings liegt.

An dieser Stelle ist erwähnenswert, dass es von Unity zwar ein eigens dafür ausgerichtetes *Delighting Tool*<sup>7</sup> gibt, dass ermöglicht den Lichteinfluss im Nachhinein zu minimieren oder gar aus der Textur komplett zu extrahieren, jedoch kann man sich durch das Beachten dieses Hinweises einiges an Arbeit ersparen. Es ist also ratsam die Aufnahme der Bilder so zu timen, dass eine möglichst diffuse Lichtsituation (Bewölkung) vorherrscht.

Jedoch sind auch andere Wetterverhältnisse wie Regen oder gar Schnee nicht sinnvoll, da sie die Oberfläche des Objektes beeinflussen, durch die Nässe werden Reflexionen begünstigt und der liegenbleibende Schnee ändert zusätzlich auch noch die Form und somit auch die Mesh-Geometrie des Objektes.

### 4.2.2 Skalierungsfaktor

Sollte die exakte Größe, sprich der Real Life Scale, bei der späteren Verwendung des erstellten Objektes von Bedeutung sein, ist es vorteilhaft, ein Objekt, dessen Maße bereits bekannt sind, in der Szene zu verwenden, abzubilden und auch in der Photogrammetriesoftware weiterhin zu belassen.

Im praktischen Teil dieser Arbeit werden dafür z.B. Holzquader, deren Maße bekannt sind, verwendet.

---

<sup>7</sup> <https://github.com/Unity-Technologies/DeLightingTool>

## 4 Der Photogrammetrische Workflow

---

Um den Skalierungsfaktor zu bestimmen, notiert man sich die Länge des Objektes und vergleicht sie dann im späteren 3D Modell.

$$\text{Skalierungsfaktor in Meter} = \frac{\text{Reale Distanz in Meter}}{\text{Distanz im 3D Raum in Meter}}$$

Der soeben berechnete Skalierungsfaktor wird nun im 3D Programm auf das Objekt für alle drei Achsen angewandt, um es auf Real World Scale zu bringen.

Im praktischen Teil der Arbeit, im Kapitel 5.6.1, wird nochmals auf den Skalierungsfaktor mittels einem Beispiel eingegangen.

## 4.3 Processing

Der zweite große Schritt im Photogrammetrie Workflow besteht in der Auswertung der einzelnen Bilder. Hierfür werden die Fotos in die jeweilige Softwarelösung importiert. Es folgt das Ausrichten der Bilder (Alignment) und die verschiedenen Processingschritte, die schlussendlich bei der Erstellung des 3D Meshes ihr Ende finden. Die Farbinhalte der Bilder kann dann entweder in den Vertex Farben des Meshes über die Funktion *Colorize* oder in einer Bilddatei ausgegeben werden, die als Textur bezeichnet wird.

Die Softwarelösungen generieren zumeist jedoch ein sehr detailreiches Mesh, welches oft viel zu viele Polygone enthält. Das kommt natürlich auf den Verwendungszweck an, jedoch werden die erhaltenen 3D Objekte häufig in einem Programm wie Autodesk Maya minimiert, z.B. mit dem *Reduce* Befehl. Aber auch eine Neuinterpretation des Meshes mit dem *ZRemesher* von Zbrush<sup>8</sup> ist eine oft verwendete Möglichkeit um seine Polygonanzahl für die weitere Verwendung zu verkleinern.

Durch diese Vorgänge gehen natürlich feine Details verloren. Um dies zu verhindern können *Normal Maps* verwendet werden. Diese Maps beinhalten die detailreichen Informationen des High Poly Meshes und werden dann als weitere Textur verwendet, um bei einem Low Poly Mesh desselben Objektes diese feinen Strukturen während dem Rendervorgang zu erzeugen.

### 4.3.1 3D Rekonstruktion

In diesem Abschnitt wird die generelle Abfolge der einzelnen Verarbeitungsschritte der jeweiligen Softwares beschrieben. Einzelne

---

<sup>8</sup> <http://pixologic.com/>

## 4 Der Photogrammetrische Workflow

---

Softwaresettings werden in Kapitel 5.5.2 Programmaufbau und Settings besprochen.

Jede Software beginnt mit der *Feature Detection*. Hier untersucht das Programm die Bilder nach erkennbaren Oberflächenmerkmalen. Dafür werden die Fotos auf Pixelebene miteinander verglichen.

Danach erfolgt die sogenannte *Bündeltriangulation*. Bei dieser photogrammetrischen Methode handelt es sich um eine Mehrbilddauswertung, die 3D Koordinaten von korrespondierenden Punkten, die auf mehreren Fotos gleichzeitig identifiziert werden können, ermittelt. (Luhmann, 2018, S. 340)

Die Bündeltriangulation macht sich die leicht veränderten Kamerapositionen zu nutzen, die sich bei der Aufnahme der verwendeten Bilder ergeben, da sich die Distanzen der abgebildeten Objekte scheinbar zueinander verändern. Auch stereoskopisches Sehen, also das Prinzip auf dem das Sehen an sich beruht, basiert auf dieses Prinzip. Eine Vielzahl dieser gemeinsamen Punkte lassen sich durch Bilderkennungsmethoden automatisch ermitteln und bilden daher die Grundlage für die *Structur from Motion* Methode (SfM).

„Das Ergebnis von Struktur from Motion ist eine 3D Punktwolke, im Englischen Point Cloud genannt, der zusätzlich ein Farbwert zugeordnet ist.“ (Lieberwirth & Bussilliat, 2017, 04:46-05:50)

Danach berechnet die Software anhand der im vorigen Schritt erkannten Features die Kamerapositionen im Raum. In diesem Abschnitt wird die sogenannte *dünne Punktwolke* erstellt.

Im nächsten Schritt wird die dichte Punktwolke erstellt. Die Farbinformationen aus den Bildern können auch in dieser Punktwolke abgespeichert werden.

Nun kann durch die Verbindung der einzelnen Punkte der dichten Punktwolke das Mesh generiert werden. Zuerst ergibt sich durch diesen Rechenschritt eine relativ raue Oberfläche des 3D Modells. Das wird mit diversen Filtern behoben.

Die Texturierung der Punktwolke fällt schon in den Bereich des Post Processing, die abhängig von der jeweiligen Zielsetzung abläuft.

# 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

In diesem Kapitel wird das Hauptaugenmerk auf die praktische Durchführung des Softwarevergleiches gelegt und erläutert, warum welche Softwarelösung genommen wurde und weshalb die Wahl auf diese Objekte gefallen ist. Des Weiteren wird ein Einblick in die einzelnen Softwaresettings gewährt. Ein kurzer Blick auf Autodesk Maya um die Objekte auf ihre tatsächliche Größe zu bringen schließt das Kapitel ab. Doch zuvor wird noch auf die verwendeten Kameras eingegangen.

## 5.1 Auswahl der Kameras

Für die Aufnahme der Bilder wurden Kameras herangezogen, die im Umfeld des Autors verfügbar waren. So wurde eine Sony A7SII und eine Canon 5D Mark III verwendet.

### 5.1.1 Sony A7SII

Bei der Sony A7SII handelt es sich um eine spiegellose Vollformatkamera mit einem 35mm CMOS Sensor, der sich durch eine hohe Empfindlichkeit und großen Dynamikumfang auszeichnet. Die Kamera schießt Fotos mit einer Auflösung von 12,2 Megapixel. Als Objektiv wurde ein Vario-Tessar® T\* FE 24–70 mm F4 ZA OSS der Marke ZEISS verwendet. Selbstverständlich wurde während dem Capturevorgang die Brennweite NICHT verändert, da dadurch das Endergebnis bei der 3D Rekonstruktion in negativer Weise beeinflusst werden kann. Die Truhe und der Leiterwagen wurden mit dieser Kamera abgebildet.



Abbildung 5. Sony A7SII



Abbildung 6. FE 24–70 mm F4

### 5.1.2 Canon 5D Mark III

Die 5D von Canon ist eine Vollformat Spiegelreflex Kamera, löst die Bilder mit 22,3 Megapixel auf und verwendet ebenso einen CMOS Sensor. Das Canon EF 100mm/1:2,8 USM Objektiv wurde mit der Mark III verwendet. Die Mark III wurde für die Fotos der Burg und der Steine herangezogen.



Abbildung 7. Canon 5D Mark III



Abbildung 8 Canon EF 100mm F2,8

## 5.2 Computer Konfiguration

Die Photogrammetrieprogramme wurden auf dem Privatcomputer des Autors ausgeführt, dessen Konfiguration der unteren Tabelle zu entnehmen ist.

*Tabelle 1. Systemspezifikation*

<b>Prozessor</b>	<b>Intel Core i7-5820k (6 Kern Prozessor)</b> <b>auf 3,6GHz übertaktet</b>
<b>Ram</b>	<b>32GB</b>
<b>Grafikkarte</b>	<b>Asus ROG Strix GeForce GTX1080Ti</b> <b>11GB GDDR5X Speicher</b>
<b>Betriebssystem</b>	<b>Windows 10, Built 1809</b>

## 5.3 Auswahl der Software

Wie bereits erwähnt, gibt es eine Vielzahl an möglichen Optionen. Da sich sehr viele Tutorials auf Photoscan/Metashape beziehen, hat sich dieses Programm quasi bereits als Standard definiert. Auch trat immer mehr RealityCapture ins Rampenlicht und so fiel die Wahl auf diese zwei Optionen. Um einen Gegenpol zu diesen kostenpflichtigen Lösungen aufzuzeigen, wurde Meshroom herangezogen. Es repräsentiert den Open Source Bereich und ist noch relativ neu am Markt, da die Erstveröffentlichung erst am 09.08.2018 stattfand.

### 5.3.1 Agisoft Metashape<sup>9</sup>

Die Softwarelösung aus dem Hause Agisoft war früher unter dem Namen Photoscan bekannt und fand unter anderem Verwendung bei dem Playstation 4 Spiel *Star Wars Battlefront* und Filmen wie *Edge of Tomorrow* und *Mad Max: Fury Road*. (Hall, 2016) (Failes, 2014) (Failes, 2015).

Es gibt zwei Edition von Metashape, die Standard- und die Professional Edition, die sich durch unterschiedliche Features unterscheiden. Prinzipiell war der Funktionsumfang der Standard Edition für diese Arbeit ausreichend, sowohl auch eine Testversion verfügbar war. Die Standard Edition kostet \$ 179, die Professional Edition schlägt sich mit \$ 3.499 zu Buche.

---

9 <https://www.agisoft.com/>

Erwähnenswert ist auch, dass Metashape das einzige Programm in diesem Vergleich ist, dass auch AMD Grafikkarten verwenden kann, alle anderen bestehen auf die Verwendung von NVIDIA Grafikkarten, anderenfalls verweigern die Programme ihren Dienst.

### 5.3.2 RealityCapture<sup>10</sup>

Diese Softwarelösung erfreut sich immer größerer Beliebtheit, da sie gute Resultate bei schneller Processingzeit liefern soll. So verwendet auch Guilherme Rambelli, ein 3D Artist beim Computerspiel-Entwicklungsunternehmen DICE<sup>11</sup>, in dem *The Gnomon Workshop* mit dem Titel „Creating Assets for games using photogrammetry“ RealityCapture als die Software seiner Wahl. (Rambelli, 2018)

Auch fand RealityCapture bereits in Filmen wie *Ghost in the Shell* Verwendung, hier wurden damit Hologramme von Personen, die als große Einblendungen in der Stadtlandschaft zu sehen sind, erstellt. (Hellard, 2017)

RealityCapture bietet auch eine Testversion, die jedoch den Export der Meshes nicht ermöglicht. Die Auswahl der Lizenzen ist um ein einiges größer als bei Metashape. Hier wird auch zwischen On- und Offline Varianten sowie Lizenzen mit Commandline Interface Support unterschieden. Die Preise reichen hier von € 99 für drei Monate mit Onlinezwang bis hin zu € 15.000 für eine unbefristete Lizenz ohne Onlinezwang, die jedoch kein Batch Rendering ermöglicht. Dafür muss man auf ein Abo Modell zurückgreifen, das jährlich € 7.500 kostet.

### 5.3.3 Meshroom<sup>12</sup>

Meshroom basiert auf dem Photogrammetrie Framework von AliceVision, dass unter anderem die 3D Rekonstruktions- und Kamera Tracking Algorithmen beinhaltet. Auf dieses Framework wird nun Meshroom als ein GUI gesetzt, dass den ansonsten nur über Kommandozeile ausführbaren Photogrammetrie Workflow des Frameworks erheblich erleichtert. Die Befehle müssen nun nicht mehr per Hand als Code eingegeben werden, sondern können nun auch von Anwendern ausgeführt werden, denen das Verwenden von Befehlen per Codeingabe zu abstrakt oder kompliziert ist. Meshroom ist wie bereits erwähnt Open Source und somit auch die kostenlose Softwarelösung in dieser Arbeit.

---

10 <https://www.capturingreality.com/>

11 <https://www.dice.se/>

12 <https://alicevision.github.io/>

## 5.4 Aufnahme der Bilder

### 5.4.1 Shooting

Die Aufnahme der Bilder wurden an einem bewölkten Tag in einem Garten vorgenommen. Da wie bereits erwähnt direkte Sonneneinstrahlung unerwünscht ist, sich die Sonne jedoch dazu entschieden hat ab und zu doch durch die Wolken zu kommen, wurde der Standort so gewählt, dass keine direkte Sonnenstrahlung auf die Objekte traf.

Um das Fotografieren zu erleichtern, wurden die Objekte auf einem Tisch positioniert, siehe Abbildung 9, der mit einem weißen Tuch abgedeckt wurde. Des Weiteren wurden zwei Referenzobjekte, in diesem Fall Holzquader, deren Maße genau bekannt sind, auf dem Tisch neben dem eigentlichen Objekt platziert. Diese Referenzobjekte dienen später dazu, die 3D generierten Assets auf „World Scale“ zu bringen, da die 3D Assets in unterschiedlichen Größen generiert wurden. Näheres dazu im Kapitel 5.6, Aufbereitung der Modelle in Autodesk Maya.



Abbildung 9. Leiterwagen mit Referenzquader aus Holz auf dem Shootingtisch

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---

Die Fotos wurden, wie in Kapitel 3.1.2, Capture Setup bereits beschrieben, nach einem 360° Aufnahmemuster aufgenommen und somit versucht alle möglichen Winkel abzudecken.

### 5.4.2 Vermessung

Nachdem die Fotos erstellt wurden, fand gleich danach die Vermessung des Objektes statt. Hier wurden markante Längen des jeweiligen Objektes vermessen, wie in Abbildung 10 bis Abbildung 12 ersichtlich.



Abbildung 10. Vermessung des Tores  
der Burg



Abbildung 11. Länge der Strebe des  
Leiterwagens



Abbildung 12. Die Höhe eines Steines beim vierten Objekt

Jeder Messvorgang wurde fotografisch festgehalten um die spätere Überprüfung der gemessenen Werte auch im 3D Programm korrekt nachvollziehen zu können. Die jeweiligen Messungen wurden nebenbei per Hand notiert und danach zur leichteren Übersicht und Weiterverarbeitung in ein Excel Dokument übertragen.

### 5.4.3 Referenzbilder

In diesem Abschnitt werden einige Bilder der Modelle gezeigt, um einen Eindruck der realen Objekte erhalten zu können und um die später aufgezeigten Unterschiede, bei der einzelnen Betrachtung der erhaltenen 3D Modelle, im Kapitel 6, Auswertung der 3D Modelle, nachvollziehen zu können. Alle der unten gezeigten Referenzbilder und weitere wurden den Teilnehmern der Expertenbefragung zur Verfügung gestellt.

#### 5.4.3.1 Burg

Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen Aufnahmen des gewählten ersten Objektes, einer Burg.



Abbildung 13. Frontale Burgansicht



Abbildung 14. Burg, seitlich



*Abbildung 15. Detailansicht des Balkons*

Die obere Abbildung 15 zeigt eine Detailaufnahme des Balkons mit den abgebröckelten Bereichen und der interessanten Textur, die bestmöglich wiedergegeben werden soll.

#### 5.4.3.2 Leiterwagen

In Abbildung 16 wird das zweite Objekt, der Leiterwagen, gezeigt. Vom Aufbau her ist er durch die vielen Verstrebungen eventuell schwerer für die Photogrammetrieprogramme zu berechnen, da durch den Aufbau des Leiterwagens auch offene Bereiche zwischen den Streben bestehen und dadurch wiederum die dahinterliegenden Streben der anderen Seite sichtbar sind.

In der Ansicht von oben (Abbildung 17) sieht man die Bodenplatte sowie den dahinter liegenden Referenzquader, der für den späteren Skalierungsfaktor ausschlaggebend ist. Eine Detailaufnahme des rechten Vorderrades wird Abbildung 18 dargestellt.

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---



*Abbildung 16. Seitenansicht des Leiterwagens*



*Abbildung 17. Topansicht des Leiterwagens*



*Abbildung 18. Detailansicht des rechten Vorderrades*

### 5.4.3.3 Truhe

Als drittes Objekt wurde eine mehr oder weniger einfach aufgebaute Truhe ausgewählt, siehe dazu Abbildung 19 bis Abbildung 21. Einzig der Verschluss, der Henkel und die rückseitig liegenden Scharniere sind hier aufwändiger

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---

gearbeitet. Jedoch könnte sich die leichte Spiegelung des Himmels an der Oberseite der Truhe für die Softwarelösungen als problematisch erweisen.



*Abbildung 19. Seitenansicht der Truhe*

*Abbildung 20. Ansicht von oben auf die Truhe*



*Abbildung 21. frontaler Blick auf die Truhe*

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---

### 5.4.3.4 Steine

Die Steine repräsentieren wieder ein ideales Objekt zur Photogrammetrieanwendung. Sie weisen sehr viel Struktur in der Textur und Form auf, wie in den unteren Abbildung 22 bis Abbildung 24 deutlich wird.



*Abbildung 22. Blick von oben auf die aufgeschichteten Steine*



*Abbildung 23. Detailansicht der Steine, seitlich*



*Abbildung 24. Frontalansicht der verwendeten Steinkonstruktion*

## 5.5 Processing der Modelle

Im vorigen Schritt wurden die benötigten Fotos der verschiedenen Modelle aufgenommen, bevor diese nun in die jeweiligen Photogrammetrie Programme geladen werden, um nach der Berechnung die erstellten 3D Abbilder zu erhalten, werden die Fotos noch in Lightroom importiert. Danach werden die einzelnen Softwares genauer betrachtet und auf ihre Eigenheiten und die gewählten Einstellungen eingegangen und weitere Optionen zur Verbesserung des Endergebnisses aufgezeigt.

### 5.5.1 Bildaufbereitung

Nach der Aufnahme der Referenzfotos ist der Zeitpunkt gekommen um die RAW Dateien in TIFF Dateien abzuspeichern. Einige Programme können auch RAW Dateien importieren, jedoch ist man mit TIFF bzw. auch PNG auf der sicheren Seite und diese zwei Formate verwenden auch keine Kompression, und somit bleibt der komplette Bildinhalt erhalten. Da in RAW aufgenommen wurde, können vor dem Bildexport auch Tonwertkorrekturen, um Bildbereiche aufzuhellen/abzudunkeln, oder noch wichtiger, Objektivkorrekturen durchgeführt werden. Siehe dazu Abbildung 25 und Abbildung 26.

Lightroom bezieht automatisch aus den Metadaten das richtige Profil für das verwendete Objektiv und wie in Kapitel 4 des Videoworkshops „Creating Assets for Games using Photogrammetry“ (Rambelli, 2018) erläutert, wird der Verzerrungsregler auf 0 gesetzt, um die Verzerrungskorrektur wieder aufzuheben. Der Vignettierungsregler wird auf 100 belassen, um etwaige Vignetten der Bilder zu entfernen. Wie in Abbildung 27 zu sehen, wird das Auswahlkästchen für die Entfernung der Chromatischen Aberration angewählt, um die bekannten Verzerrungen der Farbabweichung ebenfalls verschwinden zu lassen.

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

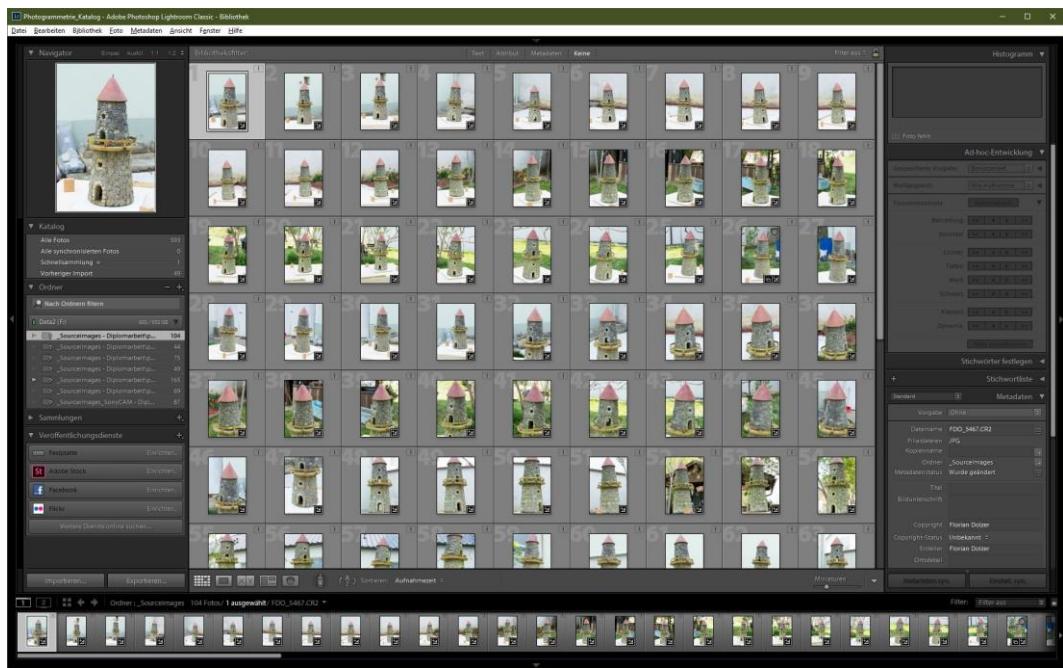


Abbildung 25. Adobe Lightroom mit den importieren RWs



Abbildung 26. Tonwertkorrektur

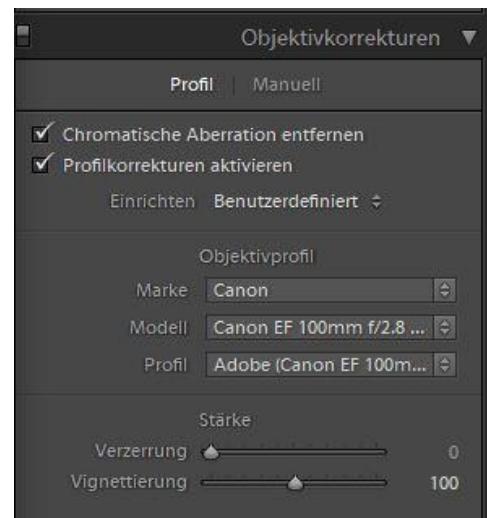


Abbildung 27. Objektivkorrektur

Die eingestellten Parameter können mittels einem Befehl auf alle anderen Bilder übertragen, bevor schlussendlich alle überarbeiteten Bilder für die Weiterverwendung exportiert werden.

### 5.5.2 Programmaufbau und Settings

Bevor nun die Einstellungen genau betrachtet werden ist anzumerken, dass auf Grund einer Möglichkeit alle Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, prinzipiell in allen Programmen mit den Normal Presets gearbeitet wurde, jedoch die Meshdichte der Agisoft Modelle manuell festgelegt werden musste, da das Normal Preset ein bei Weitem nicht so dichtes Mesh im Vergleich zu RealityCapture oder Meshroom lieferte.

Leider kam es nach den ersten erstellten Modellen zu Problemen in Form eines Abbruches ohne Fehlermeldung in Meshroom, daher musste dementsprechend die Auflösung der verwendeten Bilder für alle Objekte um die Hälfte reduziert werden, da ansonsten im späteren Photogrammetrie Workflow der RAM Speicher zu einhundert Prozent ausgelastet war. Aus diesem Grund wurde in Lightroom die Auflösung halbiert, aber weiterhin das verlustfreie Bildformat TIFF beibehalten.

#### 5.5.2.1 Agisoft Metashape

Die Benutzeroberfläche gestaltet sich relativ einfach und selbsterklärend (Abbildung 28). Es müssen lediglich die einzelnen Schritte im *Workflow* Menü durchgeführt werden um ein Modell zu generieren. Die Bilder oder Ordner werden in den aktuellen *Chunk* (= Datenblock) importiert und können dann schon ausgerichtet (aligned) werden.

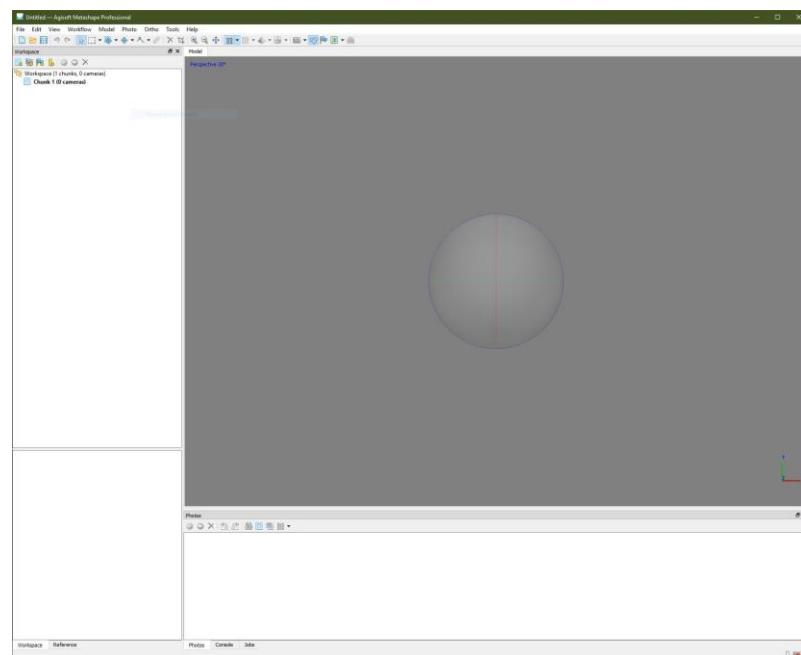


Abbildung 28. Interface von Metashape

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---

Beim Alignment können noch die Presets der Genauigkeit und wenn gewünscht das *key point* und *tie point* Limit gesetzt werden (Abbildung 29). Ersteres gibt die maximale Anzahl an Referenzpunkten, die pro Bild gesucht werden, an, während das tie point Limit die Obergrenze für übereinstimmende Punkte pro Bild festlegt. (*Agisoft Metashape User Manual—Professional Edition, Version 1.5, 2019, S. 23*)

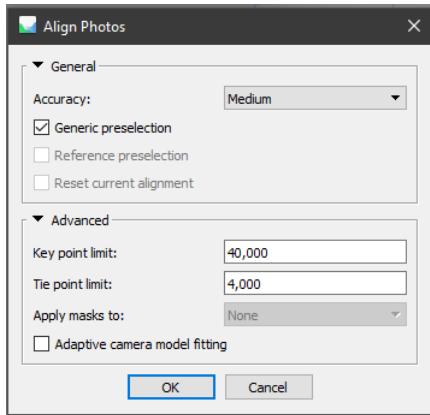


Abbildung 29. Verwendete Alignment Settings

Property	Value
<b>Tie Points</b>	
Points	40,762 of 108,874
Point colors	3 bands, uint16
Key points	No
Average tie point multiplicity	3.48488
<b>Alignment parameters</b>	
Accuracy	Medium
Generic preselection	Yes
Key point limit	40,000
Tie point limit	4,000
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	1 minutes 53 se...
Alignment time	58 seconds

Abbildung 30. Zusammenfassung des Alignments

Sollten beim ersten Durchgang einige Fotos nicht zugeordnet werden können, kann ein neuer Versuch dazu führen, dass restliche Bilder im Raum angeordnet werden können. In der linken, unteren Ecke des Programmes werden die gewählten Parameter gespeichert und am Ende kann dort auch die benötigte Zeit abgelesen werden, siehe Abbildung 30.

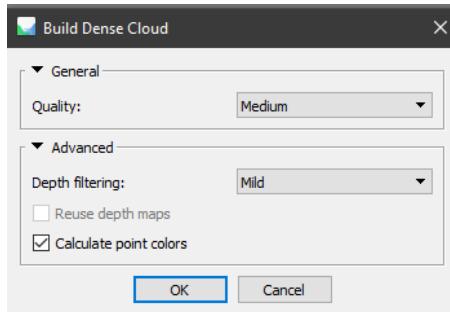
Nachdem die Bilder ausgerichtet wurden, wird im nächsten Schritt eine dichte Punktwolke erstellt (*Build Dense Cloud*). Hier gibt es wieder die Möglichkeit mit Presets zu arbeiten. Als sinnvoll ist aber zuvor noch eine Festlegung des Rekonstruktionsbereiches anzusehen. Mittels der Funktion *Resize Region* kann die Bounding Box angepasst werden, um andere Bereiche von der Verarbeitung auszuschließen, was wiederum die Berechnungszeit beschleunigt.

Die Presetoptionen der Qualität, siehe Abbildung 31, haben Einfluss auf eine detailliertere Erstellung der Punktwolke, jedoch wird die Bearbeitungszeit dieses Schrittes durch die höheren Settings auch verlängert. *Ultra High Quality* bedeutet, dass die volle Auflösung der Fotos verwendet wird, jede Option darunter skaliert die Bildgröße um den Faktor 4 herunter. (*Agisoft Metashape User Manual—Professional Edition, Version 1.5, 2019, S. 25*)

In Abbildung 32 ist das Ergebnis der erstellten Point Cloud abgebildet. Gleichzeitig wird hier der zuvor erwähnte Rekonstruktionsbereich angezeigt.

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---



Das *Depth filtering* entfernt Ausreißer; für feine Details wird ein *Mild* Filtering empfohlen. Für Luftaufnahmen z.B. wird meist *aggressive* als Filterpreset gewählt, da hier oft keine bedeutungsvollen, kleinen Details in den Ausgangsfotos vorhanden sind.

Abbildung 31. Einstellungen für die dichte Punktfolke

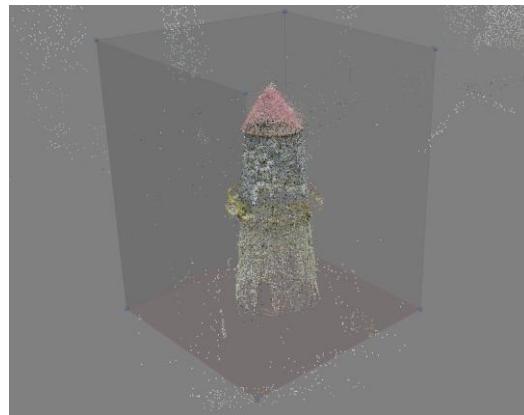


Abbildung 32. Dense Point Cloud des Burg Models mit aktiver Bounding Box

Für die Erstellung des Meshes wird die zuvor erstellte Dense Cloud als Quelle verwendet. Als *Surface type* wird *Arbitrary* verwendet, die zweite Option wäre hier *Height field*, das für Luftaufnahmen verwendet wird, und größere Datensätze erlaubt. Der *Face Count* kann per Preset, dann steht die zu erwartende Anzahl in Klammer, oder manuell angegeben werden.

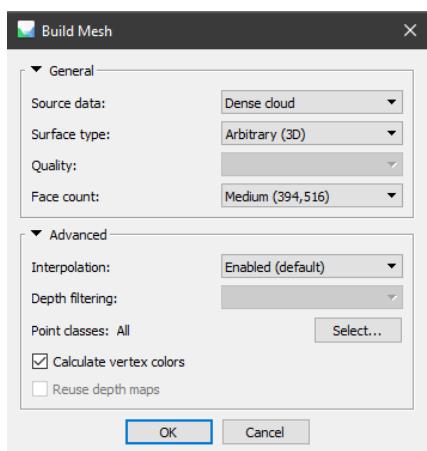


Abbildung 33. Mesh Settings

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---

Wenn die Berechnung abgeschlossen ist, wird das Model bereits in Metashape angezeigt. Jedoch fehlt noch der Schritt des Texturierens, dessen Einstellungen in Abbildung 34 zu sehen sind. Hier können diverse Mapping Methoden ausgewählt werden, *Generic* ist für *Arbitrary* Geometrie ausgelegt, die Texturgröße wurde hier, wie in den anderen zwei Programmen, auf eine 4k Textur beschränkt.

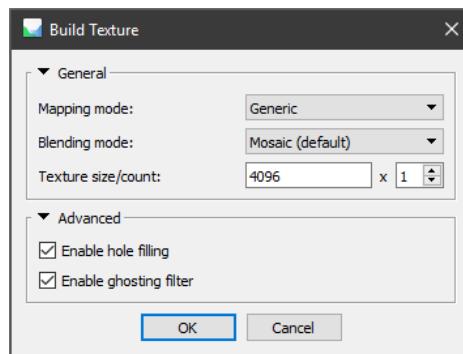


Abbildung 34. Textur Settings

Nachdem die Textur erstellt wurde, kann das fertige Model nun über die Exportfunktion abgespeichert werden.

### 5.5.2.2 RealityCapture

RealityCapture erweist sich zu Beginn gefühlt etwas unübersichtlicher, was das Interface betrifft. Es gibt drei Hauptbereiche, *Workflow*, *Alignment* und *Reconstruction*, siehe Abbildung 35.

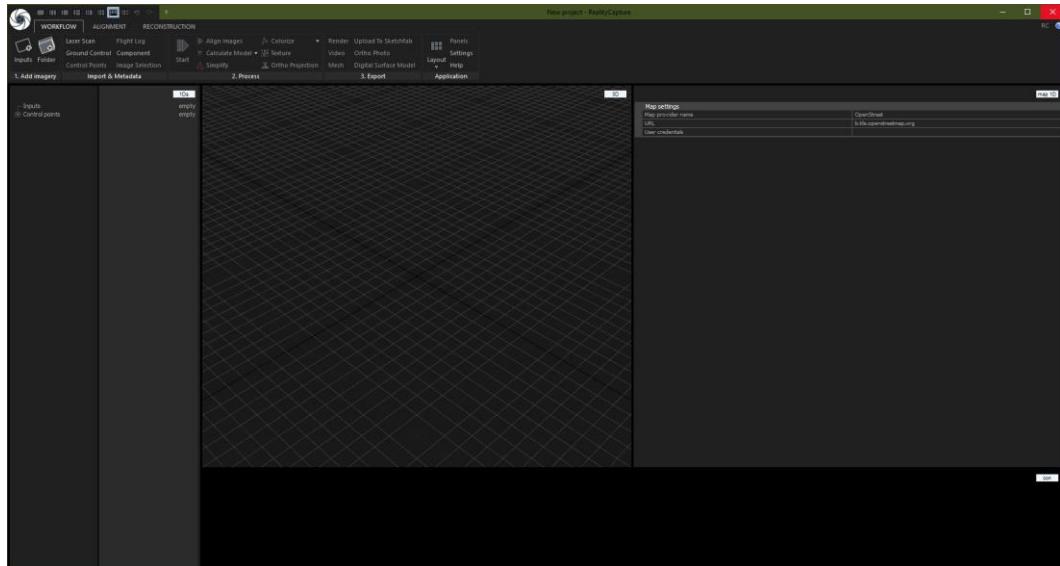


Abbildung 35. Interface RealityCapture

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---

In der oberen Menüleiste lässt sich die Anzahl der Bereiche teilen, diese können dann wie gewünscht über die kleinen grauen Buttons auf *1D/2D/3D* oder auch *conf* oder *help* umgeschaltet werden. Was den Workflow betrifft, startet man auch hier mit dem Import der gewünschten Bilder unter *Add imagery*. RealityCapture bietet die Option alle Schritte einzeln auszuführen oder mit dem *Start* Button in der *Workflow* Registerkarte, den ganzen Ablauf bis hin zur fertigen Textur hintereinander abzuwickeln. Egal wie man vorgeht, die gewünschten Einstellungen sind im Vorhinein zu treffen. Dazu muss man jedoch jeweils in die *Alignment* bzw. *Reconstruction* Registerkarten wechseln und dort den passenden *Settings* Button suchen.

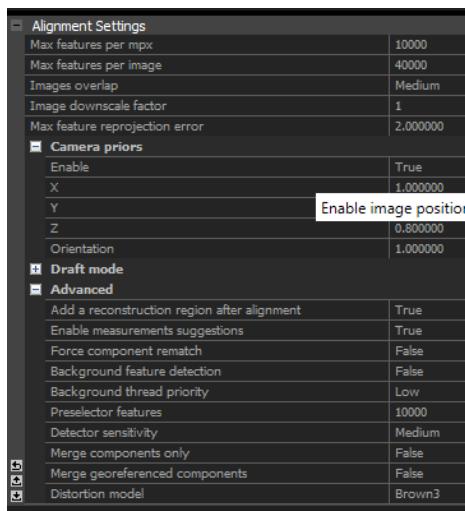


Abbildung 36. Alignment Einstellungen

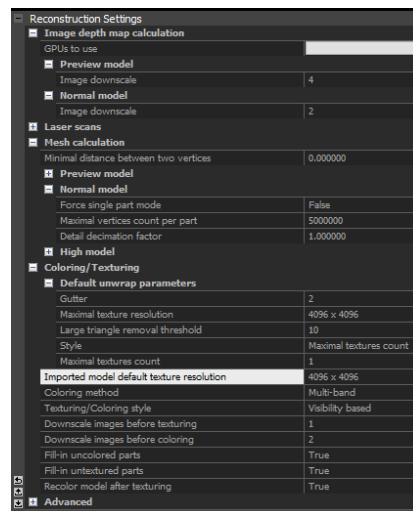


Abbildung 37. Reconstruction Settings

Wie schon in Abbildung 36 zu erkennen ist, bietet RealityCapture im Vergleich zu Agisoft Metashape viel mehr Einstellungsmöglichkeiten. Wie bereits erwähnt wurden auch die Parameter so gewählt, um das erhaltene Ergebnis, mit den anderen Programmen vergleichen zu können. So wurde auch hier maximal *40 000 features per image* gewählt. In den *Reconstruction Settings*, Abbildung 37, wurde wieder die Texturgröße auf 4k angepasst, alles weitere wurde auf dem Normal Preset Standard belassen. Auch RealityCapture bietet unter anderem die Möglichkeit den Rekonstruktionsbereich festzulegen.

Im Info Bereich, der in Abbildung 38 zu sehen ist, findet man alles Wissenswerte zum aktuellen Modell. Von der Anzahl der *tie points* der jeweiligen Bilder, bis hin zu der Face Anzahl der einzelnen Model Parts, die sich im Rekonstruktionsraum befinden und sich in diesem Fall zum Burgmodell zusammenfügen. Um die Informationen anzuzeigen, muss die Ansicht aber auf *1Ds* umgeschaltet werden, da einem sonst nur ein Thumbnail der Fotos angezeigt wird.

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

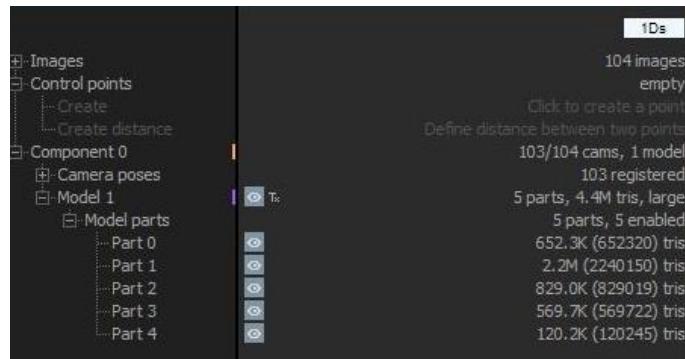


Abbildung 38. Info Bereich

Abbildung 39 zeigt das berechnete Modell der Burg als Point Cloud. Es werden die markierten Kamerapositionen dargestellt und auch der anpassbare Rekonstruktionsbereich wird als Quader um die Burg visualisiert.

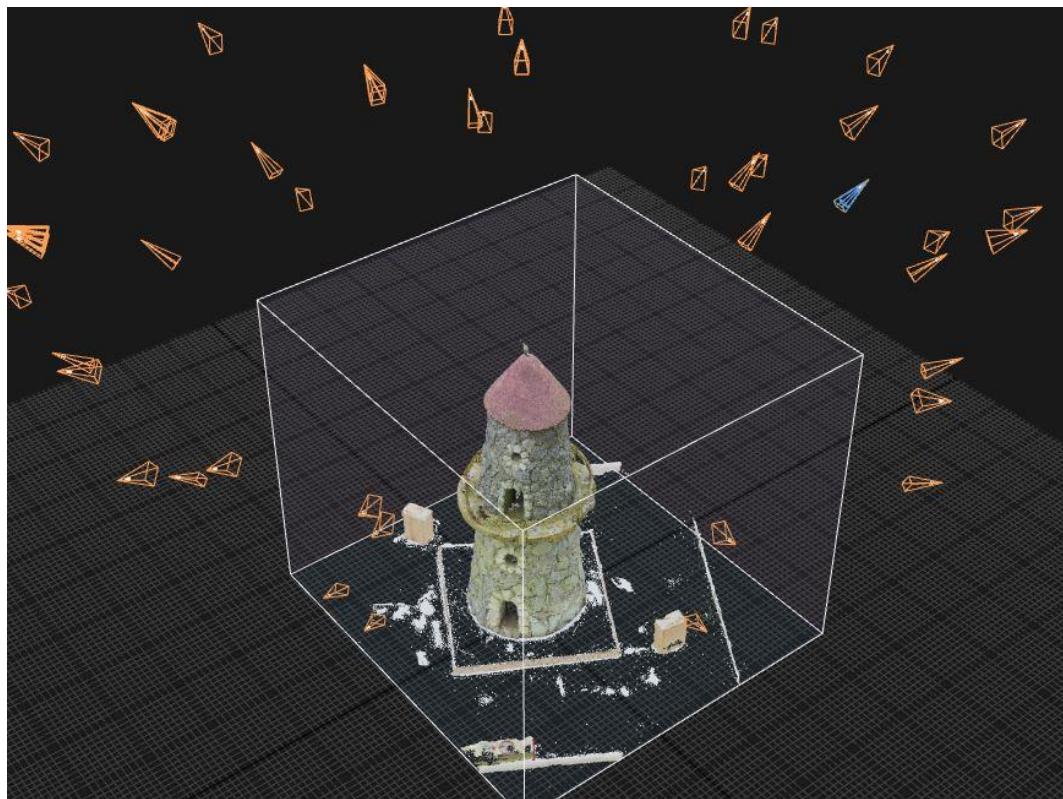


Abbildung 39. Berechnete Scene in RealityCapture

RealityCapture würde noch viele weiter Optionen bieten, so in etwa der integrierte *Simplify* Befehl, mit dem man das Mesh auf eine bestimmte Anzahl reduzieren könnte. Auch die Funktion *Check Topology* ist hilfreich, da sie das Model nach doppelten Vertices/Edges und Löchern untersucht. Sollten hier

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---

Defekte festgestellt werden, kann man mit dem *Clean Model* Befehl versuchen diese Probleme in der Topologie zu beheben. Diese Möglichkeiten sind hier nur aufgelistet, und wurden nicht durchgeführt, da die Modelle selbst für die in Kapitel 6 folgende Auswertung nicht weiter aufbereitet wurden.

Für den späteren Vergleich hat sich die Möglichkeit des *Report Exports* als hilfreich erwiesen. Hier wird eine Zusammenfassung oder auch detaillierte Auflistung der Objektparameter (Berechnungszeiten, Faceanzahl etc.) per PDF exportiert.

Das fertige Modell kann selbstverständlich auch in RealityCapture mittels dem *Export* Befehl im *Workflow* Register aus dem Programm herausgespielt werden.

### 5.5.2.3 *Meshroom*

Im Vergleich zu den vorigen zwei Programmen ist diese Benutzeroberfläche hier am spärlichsten aufgebaut, wie in Abbildung 40 ersichtlich. Es finden sich hier keine Menüleiste oder Icons. Das liegt wahrscheinlich auch daran, dass die Benutzeroberfläche erst seit Mitte 2018 verfügbar ist, da zuvor alles per Kommandozeile dem AliceVision Framework übergeben wurde.

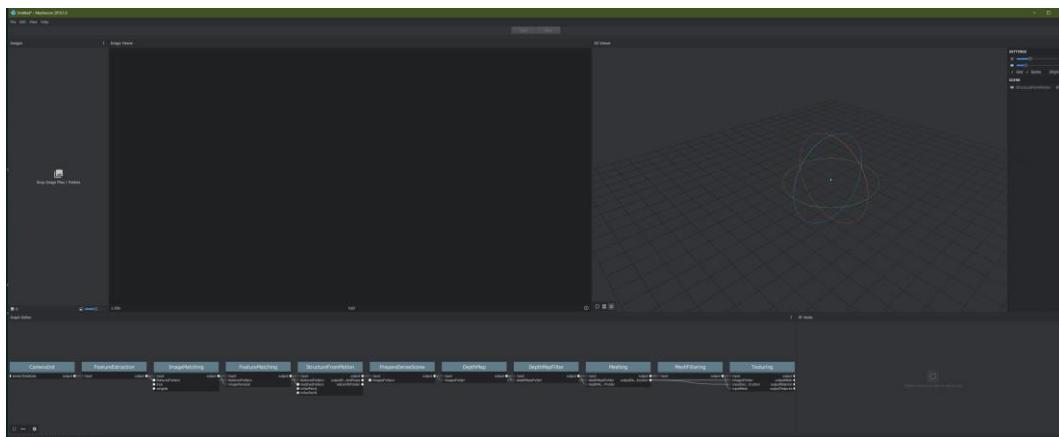


Abbildung 40. Meshroom Benutzeroberfläche

Was noch im Vergleich zu den anderen Softwarelösungen auffällt: Meshroom ist nodeartig aufgebaut, d.h. jeder Berechnungsschritt wird zentral im *Graph Editor* als eigener Knotenpunkt dargestellt. Durch Anwählen des entsprechenden Nodes, werden die dazugehörigen Einstellungsmöglichkeiten in der rechten, unteren Ecke des Programmes angezeigt, siehe Abbildung 41.

Für den Import müssen die Bilder per Drag and Drop, das ist die einzige Möglichkeit, ins Programm geladen werden.

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---

Danach kann man entweder jeden einzelnen Node per Rechtsklick darauf unter *Compute* starten, oder man setzt alle gewünschten Settings, in den jeweiligen Nodes, und lässt alle auf einmal über den zentrierten Start Button oben durchrechnen.

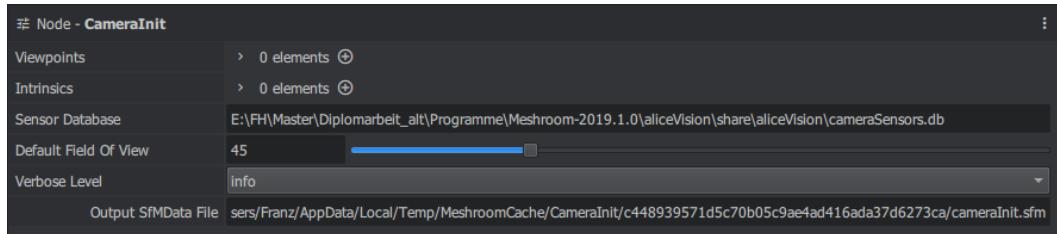


Abbildung 41. Beispiel der Nodesettings

Bevor man mit dem Ablauf beginnt, sollte man das Projekt speichern, da die Ergebnisse sonst nur im *TEMP* Folder des Benutzers gespeichert wird und somit auch verloren gehen kann. Durch das Speichern des Projektes wird auch ein *MeshroomCache* Folder mit den einzelnen Unterordnern der jeweiligen Berechnungsschritte erstellt, wie in Abbildung 42 ersichtlich.

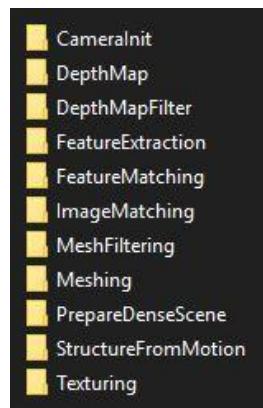


Abbildung 42. Meshroom Cache Ordner

Die jeweiligen Caches werden in den entsprechenden Unterordnern abgelegt, und vom darauffolgenden Node als Ausgangsbasis verwendet. So greift z.B. der *FeatureExtraction* Node, wie in Abbildung 43 zu sehen, auf den Output vom *CameraInit* Node zu. Auch zu sehen ist die Verwendung des *Normal* Presets um einen späteren Vergleich der Resultate bewerkstelligen zu können.

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

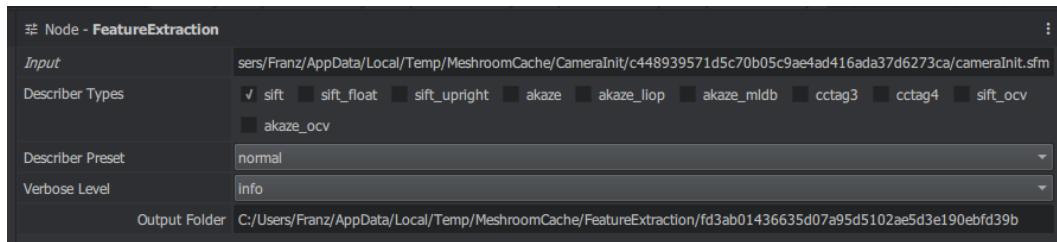


Abbildung 43. Feature Extraction Einstellungen

Einige wichtige Settings findet man vor allem in den *FeatureExtraction*, *FeatureMatching* und *StructurefromMotion* Nodes.

So wird hier standardmäßig der *Descriptor Type sift* verwendet. Sift steht für *scale invariant feature transform*. Es handelt sich hierbei um einen Algorithmus, der Merkmale in einem Bild extrahiert, die invariant (unveränderlich im Bezug auf Rotation, Translation und Skalierung) in einem zweiten Bild sind. („MeshroomManual-v0.4.4“, 2019, S. 37)

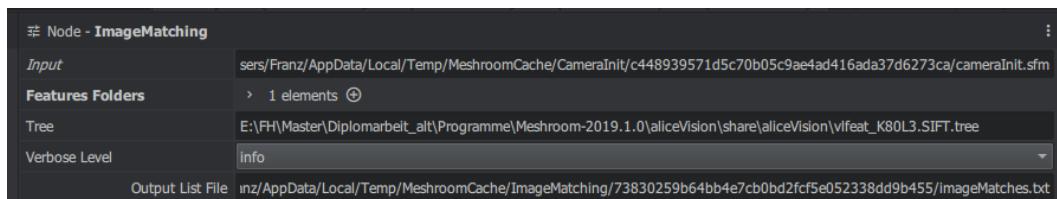


Abbildung 44. Image Matching Settings

Im Image Matching Node werden, vereinfacht ausgedrückt, Bilder gesucht, die dieselben Bildbereiche darstellen. Dafür werden *image retrieval techniques* verwendet, „which share some content without the cost of resolving all features matches in details.“ Eine der häufigsten Methoden ist der *vocabulary tree*, indem alle extrahierten Features übergeben werden. Dieser sortiert und klassifiziert diese und jeder *feature descriptor* wird in einem *leaf* abgelegt, welchem ein Index zugewiesen wird. Der *descriptor* wird dann durch alle benutzten *leaves* beschrieben. Nun können verschiedene Bilder auf übereinstimmenden Bildinhalt überprüft werden, indem nur diese Descriptoren miteinander verglichen werden. („MeshroomManual-v0.4.4“, 2019, S. 39).

Im nächsten Node (Abbildung 45) werden die fotometrischen Übereinstimmungen zwischen den Bildern mittels *features descriptors* gesucht. Für alle möglichen Features im ersten Bild wird eine Liste von Möglichkeiten des zweiten Bildes angelegt. Hier wird angenommen, dass es nur eine passende Übereinstimmung geben kann. Deswegen werden für jedes Feature vom ersten Bild, die zwei am besten passenden Descriptoren des zweiten Bildes

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---

herangezogen und ein relativer Grenzwert ermittelt. Diese Annahme eliminiert zwar Features von sich wiederholenden Strukturen, hat sich aber bereits laut (Lowe, 2004, S. 12–16) als beständiges Kriterium etabliert. Dadurch erhält man eine Liste von Features der Merkmalsübereinstimmung, die nur auf photometrischen Kriterien basiert. Dieser Vorgang besitzt einen Brute Force Ansatz, da es sehr rechenintensiv ist die zwei naheliegendsten Deskriptoren des zweiten Bildes für jedes Feature des ersten Bildes zu finden. Jedoch gibt es viele optimierte Algorithmen, so wie zum Beispiel den oft verwendeten *Approximate Nearest Neighbor* Algorithmus.

„Then, we use the features positions in the images to make a geometric filtering by using epipolar geometry in an outlier detection framework called RANSAC (RANdom SAmple Consensus). We randomly select a small set of feature correspondences and compute the fundamental (or essential) matrix, then we check the number of features that validates this model and iterate through the RANSAC framework.“

(„MeshroomManual-v0.4.4“, 2019, S. 36)

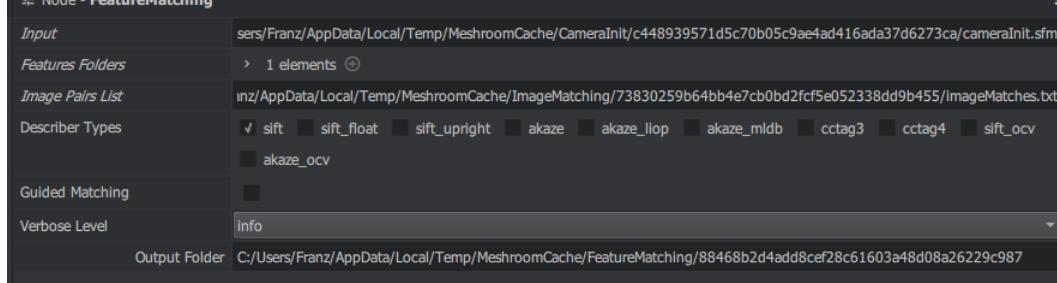


Abbildung 45. Feature Matching Settings

Im darauffolgenden Node, Structure from Motion, (Abbildung 46) werden die einzelnen Schritte für die Erstellung der dichten Punktwolke durchgeführt. Ziel dieses Schrittes ist es, den geometrischen Zusammenhang aller Beobachtungen der verwendeten Bilder zu verstehen und dadurch die 3D Punkte samt Position und Orientierung im Raum abzuleiten. Zu Beginn werden die übereinstimmenden Merkmale der Bildpaare in Spuren zusammengefasst. Hier bildet jede Spur einen Raumpunkt ab, der von mehreren Kameras aus ersichtlich ist. In diesem Abschnitt finden sich noch viele Ausreißer. Während dem Zusammenführen der Matches werden jedoch unzusammenhängende Spuren entfernt.

Danach sucht ein inkrementeller Algorithmus nach dem besten Ausgangsbildpaar. Dieses Bildpaar sollte die maximale Anzahl an

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---

übereinstimmenden Merkmalen aufweisen, da davon auch die Qualität der endgültigen Rekonstruktion abhängt.

Wurden die Ausgangsbilder festgelegt wird eine *fundamental matrix* von diesen beiden Bildern berechnet, mit der Annahme, dass die erste der Ursprung des Koordinatensystems ist. Da nun die genaue Platzierung der ersten beiden Kameras bekannt ist, können die entsprechenden 2D Features in 3D Punkte mittels Triangulation abgeleitet werden.

Des Weiteren werden nun alle Bilder, die genügend Assoziationen mit den Features, die bereits im 3D Raum rekonstruiert wurden, selektiert. Dieser Algorithmus wird als *best views selection* bezeichnet. Eine Resektion jeglicher neuen Kameras wird basierend auf diesen 2D-3D Assoziationen durchgeführt.

Danach werden noch mit Hilfe einer Bündelblockausgleichung alle Ergebnisse verfeinert. Beobachtungen mit hohem Projektionsfehler oder unzureichendem Abbildungswinkel werden anschließend ausgefiltert.

Da nun neue Punkte trianguliert wurden, werden auch weitere Möglichkeiten für eine *best views selection* generiert. Dieser Vorgang wiederholt sich nun, es werden immer weitere Kameras hinzugefügt, deren 2D Punkte in 3D Punkte trianguliert werden, und es werden ungültige 3D Punkte entfernt bis keine weiteren neuen Kameraansichten mehr gefunden werden können.  
("MeshroomManual-v0.4.4", 2019, S. 37)

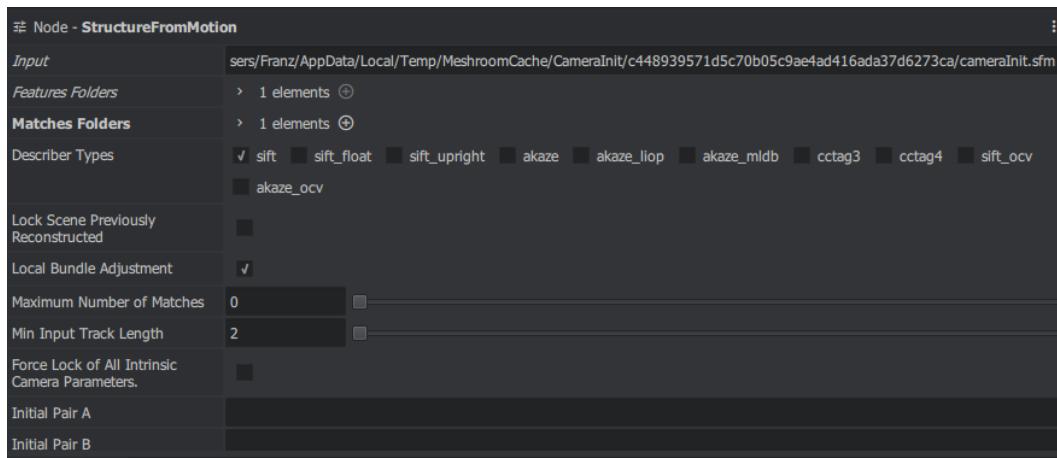


Abbildung 46. Settings des Structure from Motion Nodes

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

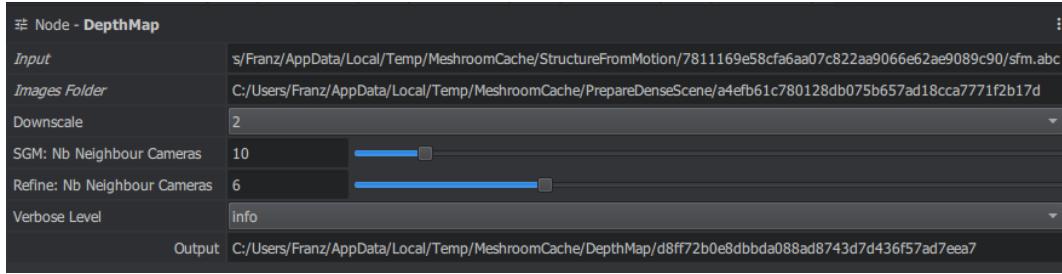


Abbildung 47. Depth Map Settings

Nach dem Structure from Motion Node folgt die Erstellung der Depth Maps. Um den Tiefenwert (depth value) jedes Pixels auswerten zu können, gibt es viele Ansätze, wie zum Beispiel Block Matching, oder Semi-Global Matching (SGM). In Meshroom wird die SGM-Methode verwendet. Für jede Depth Map wird ein Bild als EXR File angelegt. Dieser Schritt dauert am längsten in der Meshroom Pipeline, kann jedoch in den Einstellungen aufgeteilt werden, indem man verschiedene Kameras gruppiert und von unterschiedlichen Computern berechnen lässt (Abbildung 47).

Ziel des Meshing Schrittes ist es, ein dichtes, geometrisches Abbild der Szene zu erhalten. Hierfür werden die zuvor erstellen Depth Maps herangezogen, zusammengefasst und eine Delaunay-Triangulierung angewendet, um ein Gitternetz zu erhalten. Einige Filterungsprozesse entfernen danach überschüssige Polygone und lokale Artefakte. Mit den Reglern *Max Input Points* bzw. *Max Points*, siehe Abbildung 48, können die maximalen Punkte, die für die Generierung des Meshes verwendet werden, festgelegt werden, beziehungsweise die maximale Anzahl an Vertices im fertigen 3D-Modell auf das gewünschte Maximum gesetzt werden.

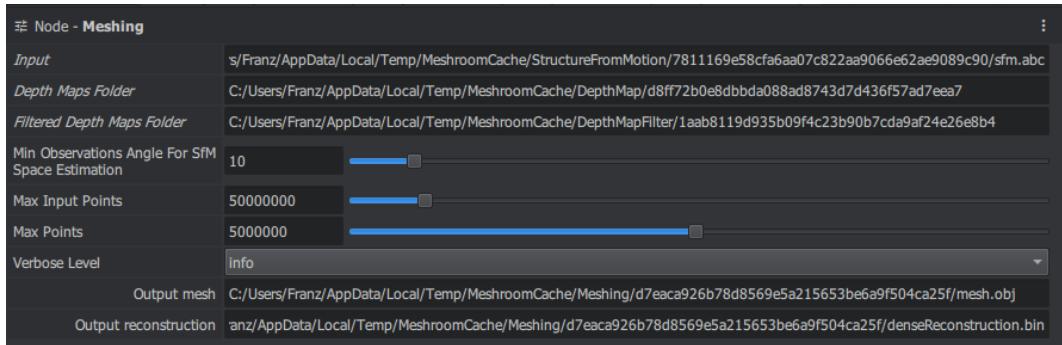


Abbildung 48. Meshing Node

Im letzten Schritt der Photogrammetrie Pipeline wird das zuvor generierte Mesh mit einer Textur versorgt. Sollte das Mesh über kein UV Layout verfügen wird

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---

eines im Zuge dieses Schrittes erstellt. Um den Texturraum so klein wie möglich zu halten, verwendet Meshroom ein Basic UV Mapping. Für jedes Triangle wird die sichtbare Information der dazugehörigen Vertices benutzt, um die Texturkandidaten zu erhalten. Jene Kameras, die einen schlechten Winkel zur jeweiligen Oberfläche aufweisen, werden herausgefiltert. So bleiben die zur Oberfläche parallel liegenden Blickwinkel (Kameras) übrig, von denen dann schlussendlich die durchschnittlichen Pixelwerte gemittelt werden. In den Node Einstellungen, siehe Abbildung 49, können noch Parameter wie der gewünschte Dateityp der Textur, das automatische Füllen von entstandenen Löchern oder auch die Textur Größe, wie hier 4096 x 4096 Pixel festgelegt werden.

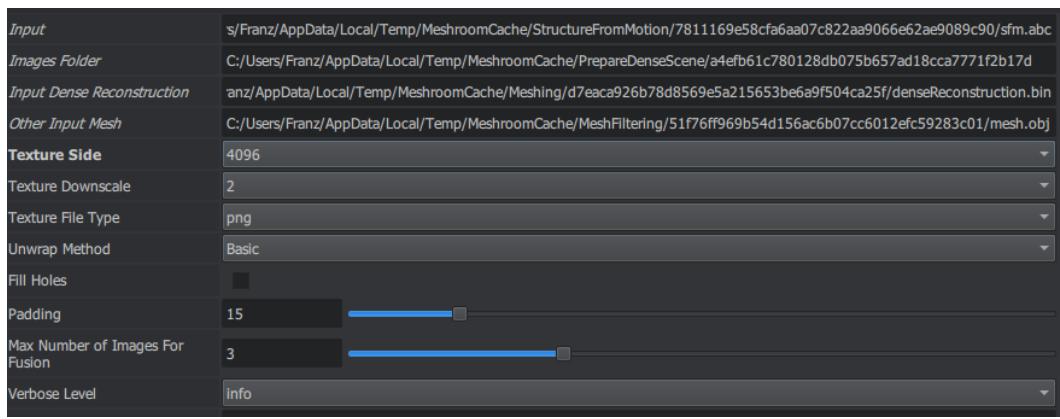


Abbildung 49. Texture Node Einstellungen mit der Festlegung auf 4k

## 5.6 Aufbereitung der Modelle in Autodesk Maya

Da nun alle 3D Assets in den verschiedenen Photogrammetrie Softwaren erstellt wurden, sind sie noch vor dem Upload für die Expertenbefragung bzw. für die eigentliche Überprüfung der akkurate Reproduktion in Autodesk Maya auf Real World Scale gebracht worden und etwaige Artefakte, die sich abseits des Hauptobjektes befanden, wurden zur besseren Präsentation ebenso entfernt.

### 5.6.1 Real World Scale

Um die Objekte auf den sogenannten Real World Scale zu bringen, war es erforderlich den Skalierungsfaktor, der bereits in Kapitel 4.2.2 behandelt wurde, zu berechnen.

Um die ganzen Messungen leichter durchführen zu können wurde ein kleines Tool zur Hilfe herangezogen. Es trägt den Namen Measure Tools v2.1<sup>13</sup> von Klaudio Ladavac. Es erweitert Maya's eigenes Distance Tool; das Messen der Distanzen ist um einiges einfacher und schneller, es können alle Achsen einzeln gesperrt werden, somit misst man zum Beispiel tatsächlich nur in der Y-Achse. Ein einfaches Selektieren zweier Vertices reicht schon um mit einem Klick auf den Button des freischwebenden Interfaces, siehe Abbildung 50, die Messung zu vollziehen. Hierfür werden dann an der Position der Vertices Locator erstellt, die wiederum an die zuvor ausgewählten Vertices gebunden sein können. Das hat den Vorteil, dass die Messwerte im 3D Programm dann mitskalieren, sollte man die Größe des Objektes im Nachhinein ändern.

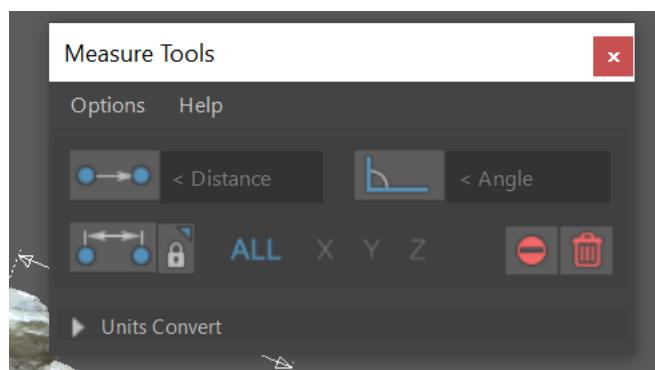


Abbildung 50. Measure Tool Box

---

<sup>13</sup> <https://gumroad.com/l/OjHDF>

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---

Die verwendeten Referenzobjekte (Holzquader) hatten eine exakte Länge von 8,8cm. Am Beispiel der Burg in Meshroom ergab sich jedoch eine Distanzmessung von 0,126. In Abbildung 51, wurde die Distanz auf zwei Dezimal gerundet, dennoch wurde bei den Skalierungswerten mit drei Dezimalstellen gearbeitet.

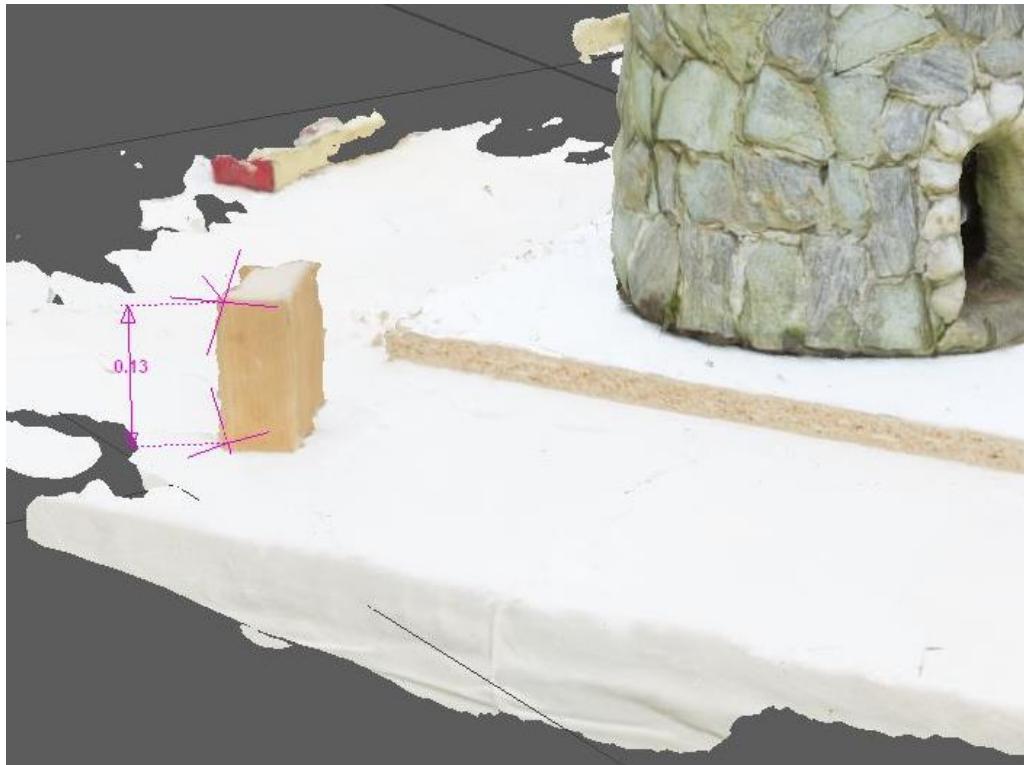


Abbildung 51. Höhe des Holzquaders in Maya (gerundet)

Da nun die reale Länge und die gemessene Länge im 3D Raum bekannt sind, wird in die bereits erwähnte Formel eingesetzt.

$$\frac{\text{Reale Distanz in Meter}}{\text{Distanz im 3D Raum in Meter}} = \text{Skalierungsfaktor in Meter}$$

$$\frac{0,088}{0,0013} = 67,692$$

Das heißt, dass das 3D Modell um den Wert 67,692 in allen drei Achsen skaliert werden muss (Abbildung 52), um auf die tatsächliche Größe, die die Burg auch in der Wirklichkeit hat, zu gelangen.

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---

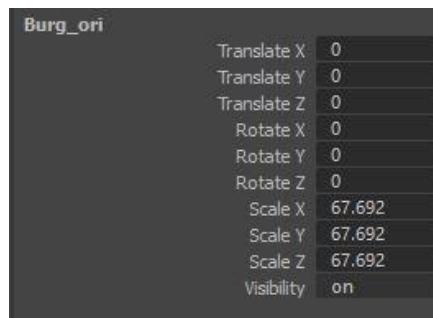


Abbildung 52. Channel Box der Burg mit dem eingetragenen Skalierungsfaktor

Trägt man dieses Zahl nun bei Scale X/Y/Z in der Channel Box in Maya ein, so kann man das Ergebnis sofort überprüfen, da durch das vorhin angesprochene Measure Tool Constraints gesetzt wurden, die die erstellten Locator mitskalieren und die angezeigte Distanz danach 8,8cm anzeigt, siehe Abbildung 53 unten.



Abbildung 53. Höhe des Quaders nach der Skalierung

Dieser Vorgang wurde nun für alle erstellten 3D Objekte durchgeführt und anschließend die jeweiligen Messwerte der verschiedenen Längen mit den Ergebnissen im 3D Raum verglichen. Siehe dazu Abbildung 54 bis Abbildung 56, die verdeutlichen sollen, wie die Messpunkte bei den unterschiedlichen Modellen ausgewählt wurden. Ein Augenmerk wurde hier auf die Verteilung der Messstrecken über das gesamte Objekt gelegt, um eine generelle Abweichung von den realen Maßen besser erkennen zu können.

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

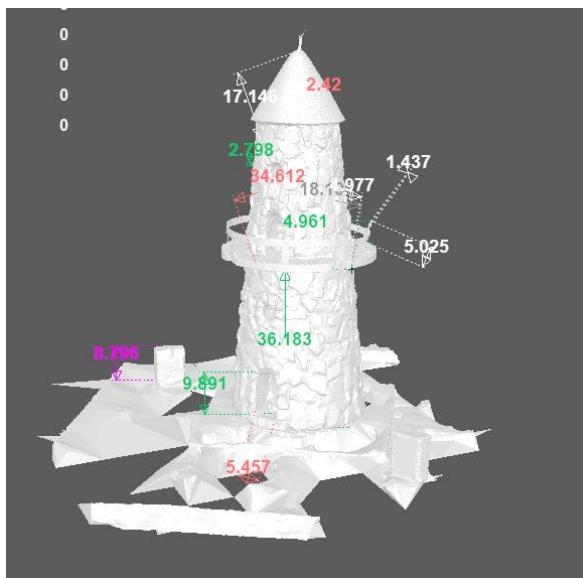


Abbildung 54. alle Messungen der Burg, die durch RealityCapture generiert wurde

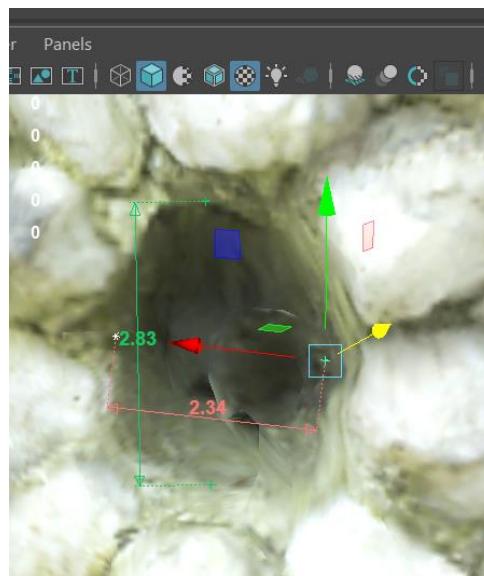


Abbildung 55. Closeup des Burgfensters mit Messpunkten

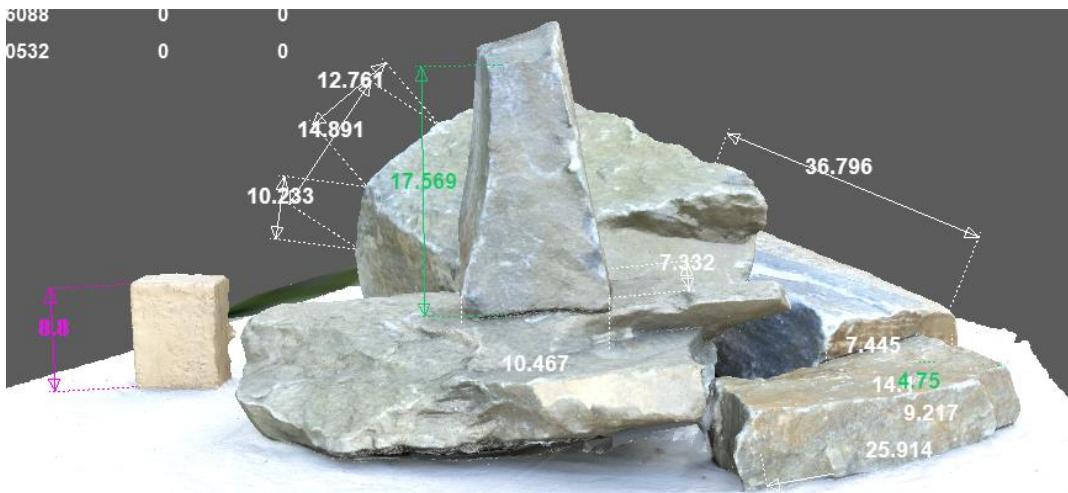


Abbildung 56. Alle getätigten Messungen des auf Real World skalierten Steine 3D Assets

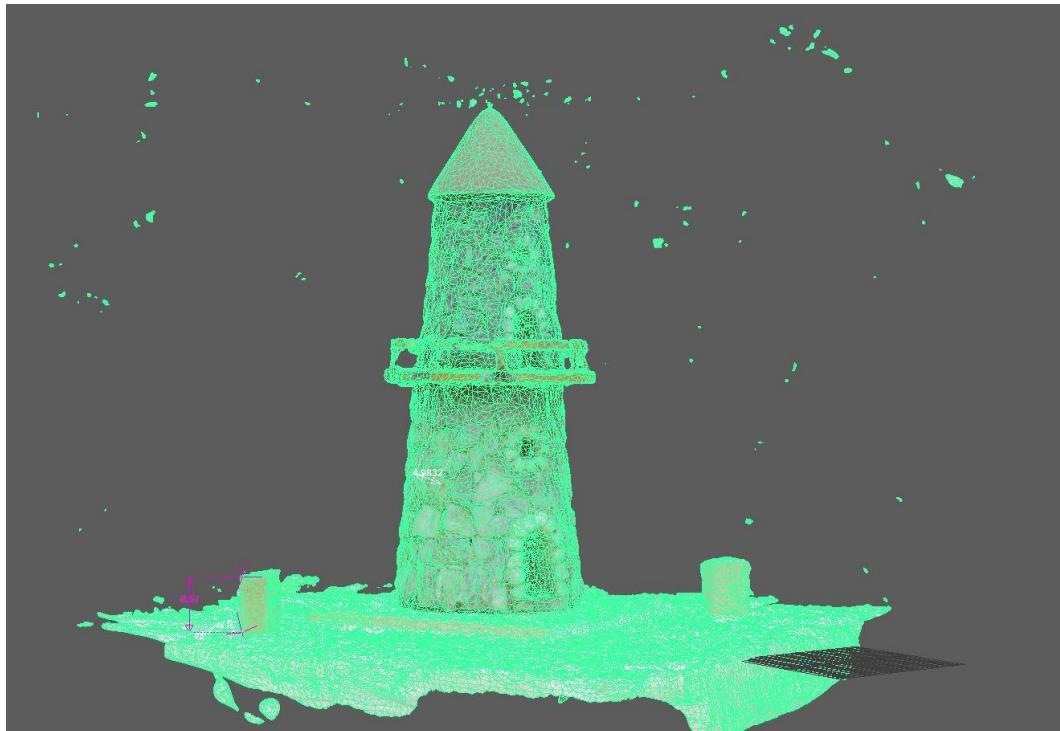
Die erhaltenen Werte und Differenzen zum realen Objekt der jeweiligen Modelle, werden im Kapitel 8 genau aufgelistet und verglichen. Die Expertenbefragung wurde zeitgleich mit der eigenständigen Auswertung der Ergebnisse durchgeführt.

Bevor jedoch die Onlineumfrage erstellt werden konnte, wurden sämtliche auf Real World Scale gebrachten Modelle noch in Autodesk Maya gesäubert. Artefakte, wie in Abbildung 57 zu erkennen, wurden rund um das Objekt entfernt,

## 5 Praktischer Teil Softwarevergleich

---

um den Umfrageteilnehmern wirklich nur das Zielobjekt unterbreiten zu können. Dafür wurden die Faces mittels dem Selection Tool in Maya ausgewählt und gelöscht. Eine Veränderung des Assets in Form einer Retopo (= Remake Topologie; sprich Meshveränderung) beziehungsweise einer Dezimierung der Polygonanzahl wurde nicht durchgeführt, da diese logischerweise den Aufbau des Meshes extrem verändern würden und somit jeglicher Vergleich zwischen den einzelnen Modellen nicht möglich wäre.



*Abbildung 57. Rund um die Burg sind schwelende Teilchen zu erkennen sogenannte Artefakte. Diese, sowie das erkennbare Tuch und die Referenzquader wurden von den Modellen entfernt.*

Nachdem alle Objekte nun von jeglichen Artefakten, Groundplanes und Referenzobjekten gesäubert wurden, konnten die Modelle auf Sketchfab<sup>14</sup> hochgeladen werden, um sie in die Onlineumfrage einbinden zu können.

---

<sup>14</sup> <https://sketchfab.com/>

# 6 Auswertung der 3D Modelle

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Betrachtung der benötigten Processing Time, also die Zeit die es benötigt hat um die einzelnen 3D Modelle zu generieren. Auch werden die 3D Assets auf visuelle Auffälligkeiten hin untersucht.

Die verwendeten Softwareeinstellungen wurden bereits in Kapitel 5.5.2 erläutert und werden an dieser Stelle nicht weiter behandelt.

Da es bei der Messauswertung sinnvoller ist, die erhaltenen Abmessungen der erstellten Objekte direkt gegenüberzustellen, wird diese im Kapitel 8 Vermessungsgenauigkeit separat behandelt und bei den einzelnen Objekten ausgespart. Der Vollständigkeit halber, finden sich alle erhaltenen Abmessungswerte sowie die Links zu den generierten Objekten auf Sketchfab im Anhang.

Sämtliche verwendeten Quellbilder, die generierten 3D Modelle sowie die dazugehörigen Texturen sind unter anderem auf der beigelegten DVD einsehbar.

## 6.1 Burg

### 6.1.1 Agisoft Metashape

Generell ist bei Metashape anzumerken, dass immer ein zweites Alignment der Fotos, dass manuell gestartet werden musste, sich als äußerst sinnvoll erwies, da das erste Alignment oft eine sehr geringe Übereinstimmung brachte.

Für die Burg wurden 104 verfügbare Fotos in Metashape importiert.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

### 6.1.1.1 Processing Time

Tabelle 2. Berechnungszeiten der Burg in Metashape

<b>erstes Alignment</b>	41/104 Fotos	
<b>zweites Alignment</b>	99/104 Fotos	
<b>Matching time</b>	00:00:14	
<b>Alignment time</b>	00:00:43	
<b>Depth Map</b>	00:01:09	
<b>Dense Cloud</b>	00:01:57	
<b>Build Mesh</b>	4 400 000 Faces	00:01:40
<b>Build Texture</b>	UV Mapping Time	00:00:58
	Blending Time	00:02:07
<b>Total</b>		<b>00:08:48</b>
<b>.OBJ File</b>	14MB	
<b>Textur</b>	71MB	

Wie aus Tabelle 2 ersichtlich, konnten im ersten Alignment Vorgang nur 41 der 104 Fotos zugeordnet werden. Da sich das natürlich als zu wenig erweisen würde, wurde sofort ein zweites Alignment durchgeführt. Dadurch konnten immerhin 99 der 104 Fotos beziehungsweise Kamerablickwinkel korrekt im 3D Raum angeordnet werden. Die einzelnen Zeiten wurden direkt aus dem Programm übernommen, da sie dort in einer Übersicht aufgelistet werden. Schlussendlich wurde ein Modell mit 4 400 000 Faces in einer Gesamtzeit von 08:48min generiert.

### 6.1.1.2 Visuelle Auffälligkeiten

Auf den ersten Blick wirkt das erhaltene Ergebnis von Agisoft Metashape eigentlich recht passabel, wie in Abbildung 58 zu sehen. Würde man das Asset im Hintergrund benutzen wollen, wäre das durchaus möglich. Nähert man sich aber der Burg und da vor allem dem Geländer, stellt man fest das dieses lückenhaft reproduziert wurde. In Abbildung 59 und Abbildung 60 werden die angesprochenen Lücken gut sichtbar.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---



Abbildung 58. Frontalansicht der Burg von Metashape

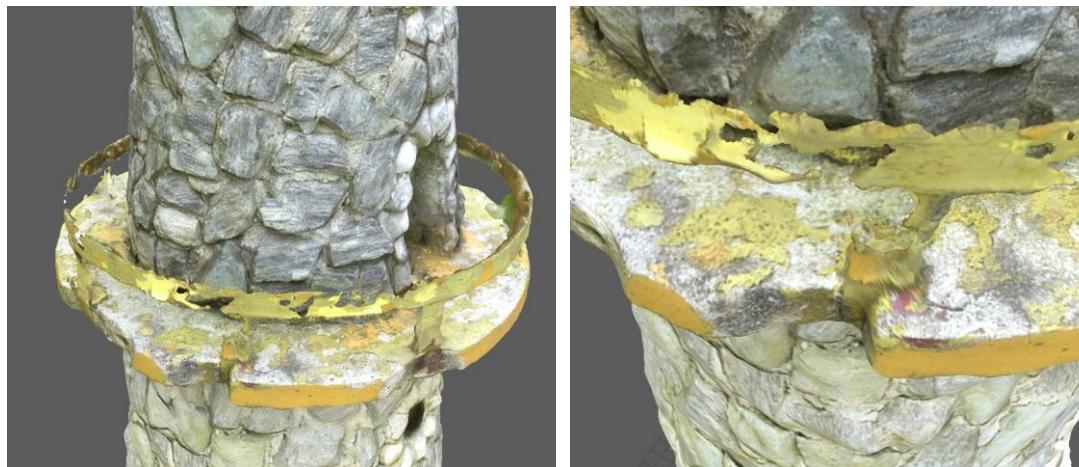


Abbildung 59. Geländer der Burg

Abbildung 60. Detailansicht des Geländers

Des Weiteren finden sich Schwächen bei der Textur, so gibt es unscharfe beziehungsweise verschwommene Stellen auf dem Balkon, der Turmspitze (Abbildung 63) und sogar seitlich an der Felswand (Abbildung 62). Jedoch sieht man in Abbildung 61 auch die passend aufgelöste Textur, hier wurde die abblätternde Farbe sehr gut wiedergegeben.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---



Abbildung 61. Verschmierter Bereich am Geländer



Abbildung 62. Felswand

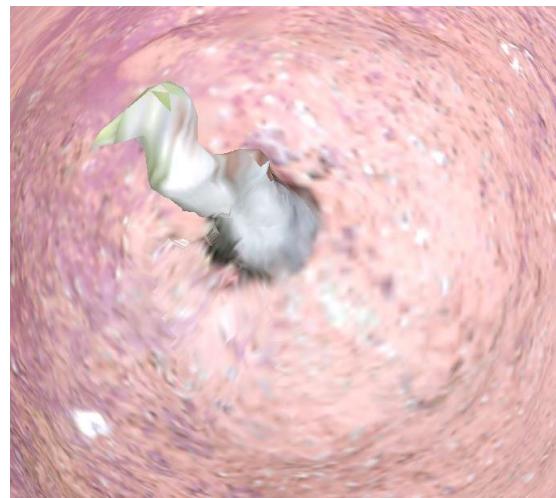


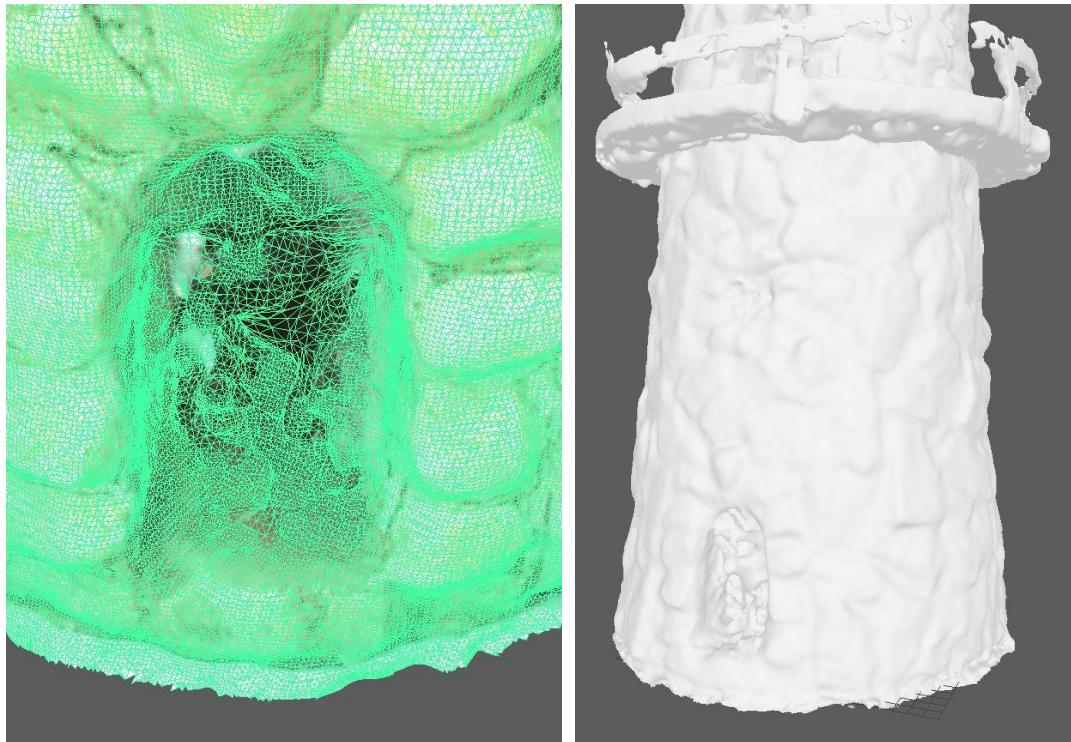
Abbildung 63. Turmspitze

Das Mesh wurde sehr dicht erstellt, wie man in Abbildung 64 gut erkennen kann, hier gibt es natürlich Potential für Nachbearbeitung, da man mit einer Meshreduktion noch einiges herausholen könnte, ohne die Grundform der Burg stark zu verändern. Leider sieht man hier auch, dass direkt im Haupteingang die Reproduktion nicht sehr sauber durchgeführt wurde. Es finden sich hier verdrehte

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

Polygonansammlungen, die auf beiden Seiten händisch entfernt werden müssten, damit es sich hierbei tatsächlich auch um einen Durchgang handelt. Abbildung 65 zeigt die untexturierte Burg. Gut zu erkennen ist hier der leicht gewölbte Aufbau des Burgkörpers, der auf die steinerne Verarbeitung zurückzuführen ist. Auch der gemauerte Rundbogen um den Eingang wurde gut vom Original übernommen. Jedoch finden sich auch auf der Unterseite des Balkons Ausbuchtungen, die so auf der Burg nicht wiederzufinden sind.

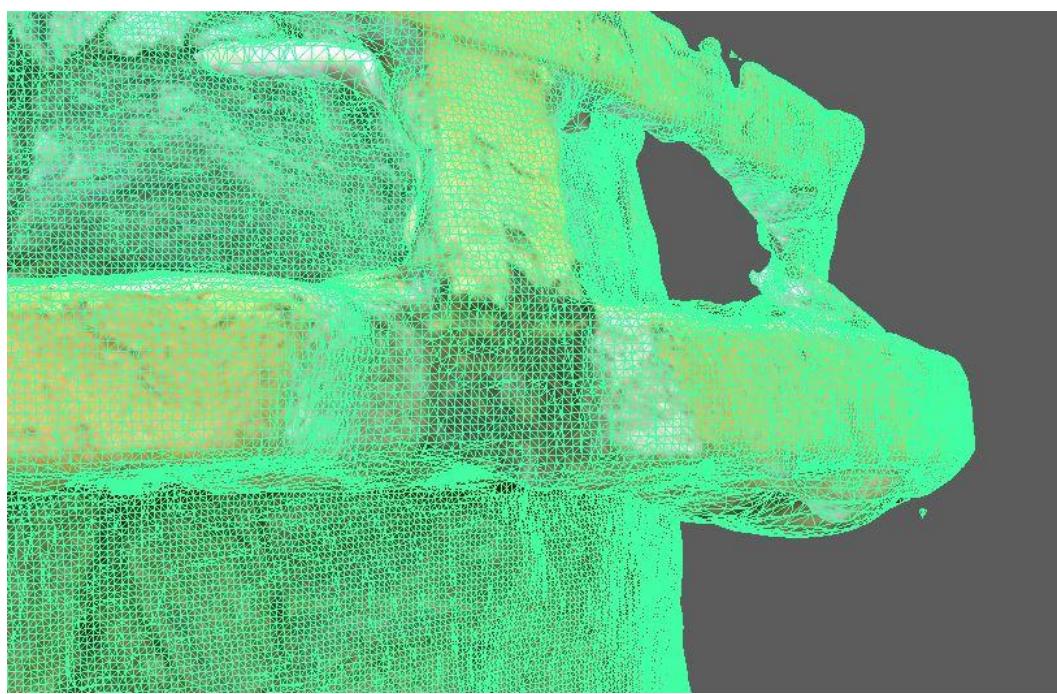


*Abbildung 64. Meshansicht in Autodesk Maya*

*Abbildung 65. untexturiertes Modell*

In Abbildung 66 sieht man die erwähnte Ausbuchtung des Balkons, die in Richtung des Bodens gehen, obwohl die Unterseite relativ eben ist. Auch ein kleines schwebendes Artefakt auf der rechten Seite des Balkons zu sehen.

## 6 Auswertung der 3D Modelle



*Abbildung 66. Detailansicht Geländer, seitlich*

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

### 6.1.2 RealityCapture

Im Gegensatz zu Agisoft Metashape ist es bei RealityCapture nicht nötig ein weiteres Alignment durchzuführen, da bereits beim ersten Durchgang eine hohe Übereinstimmung erzielt wird. Versuchsweise wurde dennoch ein weiteres Alignment ausgeführt, jedoch brachte dies keine weiteren Matches. Leider können die Processing Times nicht direkt im Programm ausgelesen werden, jedoch findet sich eine Export Funktion in dem ein Bericht über das Modell als PDF angelegt werden kann. Darin findet sich eine Aufschlüsselung der gesamten Berechnungsdauer und weitere Information die das Asset betreffen.

#### 6.1.2.1 Processing Time

*Tabelle 3. Berechnungszeiten der Burg in RealityCapture*

<b>Alignment</b>	103/104 Fotos	
<b>Alignment time</b>	00:00:33	
<b>Depth Map</b>	00:01:44	
<b>Build Mesh</b>	4 411 456 Faces	00:02:28
<b>Post Processing</b>		00:00:30
<b>Coloring Time</b>		00:00:00
<b>Build Texture</b>	Unwrapping Time	00:00:08
	Texturing Time	00:00:51
<b>Total</b>		<b>00:06:14</b>
<b>.OBJ File</b>	483MB	
<b>Textur</b>	26MB	

In Tabelle 3 ist bereits zu erkennen, dass das erhaltenen OBJ File im Vergleich zur Burg von Agisoft Metashape fast acht Mal größer ist, obwohl es gerade einmal 11 456 Polygone mehr aufweist. Die Berechnung hat 06:14min gedauert und die Textur mit 26MB ist vergleichsweise gering ausgefallen.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

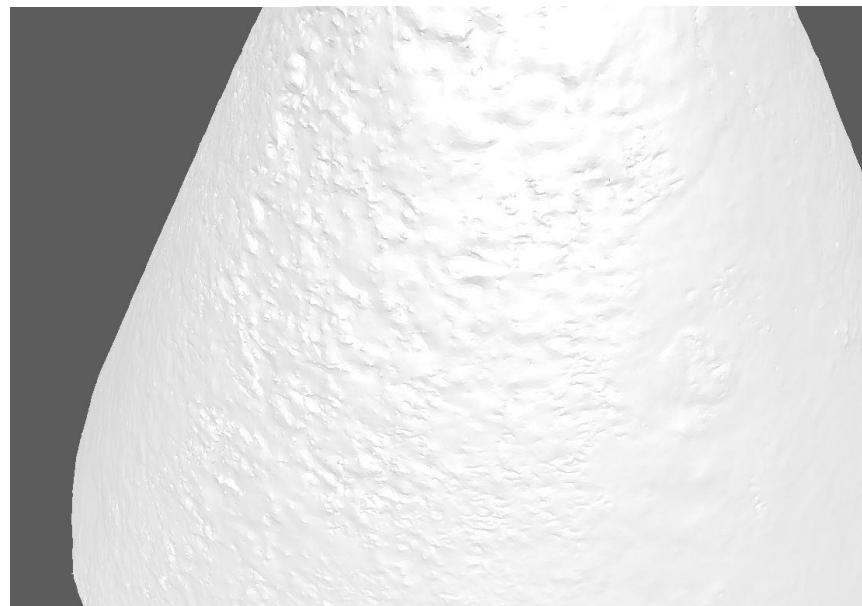
---

### 6.1.2.2 Visuelle Auffälligkeiten



Das erstellte 3D Modell von RealityCapture, siehe Abbildung 67 ist wohl eine der detailreichsten Ergebnisse dieser Arbeit. Nicht nur die Steher am Balkon wurden zur Gänze generiert, auch die dichte Meshherstellung mit den feinen Unterteilungen der tatsächlichen, rauen Oberfläche, sowie die detaillierte Textur (Abbildung 68) fallen sofort auf. Abbildung 69 verdeutlicht die komplette, lückenlose Umsetzung der Brüstung. Im Gegensatz zu zum Beispiel Agisoft Metashape, das hier eindeutige Lücken produzierte. Jedoch hatte auch RealityCapture in diesem Bereich Probleme, da der Boden des Balkons ein Loch aufweist, wie in Abbildung 70 zu sehen.

*Abbildung 67. Frontalansicht der Burg*



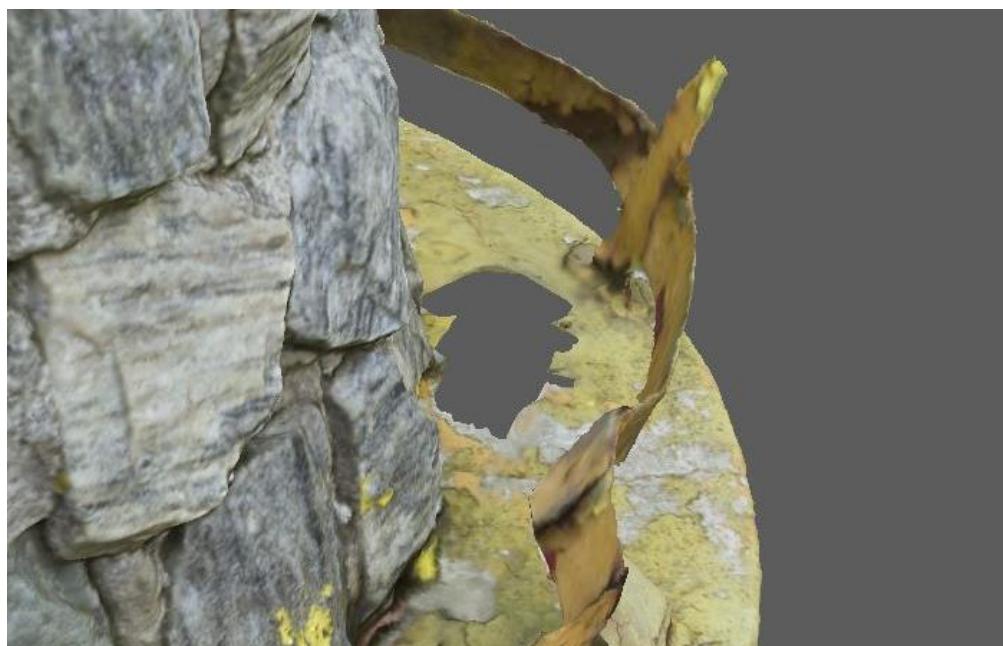
*Abbildung 68. Detailreiche, rauere Oberfläche*

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---



*Abbildung 69. Detailansicht des Balkons des von RealityCapture erstellten Modells, mit nicht komplett rekonstruiertem Durchgang*



*Abbildung 70. Detailansicht; Loch im Boden des Balkons.*

In Abbildung 71 sieht man die schön umgesetzte, abblätternde Farbe in der Textur, auch der überstehende Teil des Stehers, auf der rechten Seite zu sehen, wurde im Gegensatz zu Meshroom im 3D Asset abgebildet.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---



*Abbildung 71. Detailansicht der Textur*

Leider hatte auch RealityCapture Probleme den Haupteingang als offenen Durchgang zu reproduzieren, wie in der unteren Abbildung 72 dargestellt wird.



*Abbildung 72 Durch Polygone verschlossener Haupteingang der Burg*

Das Mesh wurde äußerst dicht generiert, für die meisten Anwendungen jedoch zu detailreich, siehe Abbildung 73, da eine so komplexe Auflösung auf Geometrieebene nicht notwendig wäre.

Begutachtet man die Unterseite des Balkons, findet man auch hier wieder einige Ausreißer in Form von Artefakten, hier hatte RealityCapture bei der Rekonstruktion eindeutig Probleme und hat versucht die Geometrie zu schließen (Abbildung 74).

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---



Abbildung 73. extrem dicht erstelltes Mesh



Abbildung 74. Probleme an der Unterseite des Balkons

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

### 6.1.3 Meshroom

Leider bot Meshroom keine Möglichkeit alle Zeitspannen der einzelnen Nodes aus dem programminternen Log auszulesen. Aus diesem Grund wurde eine Website mit Atomuhr aufgerufen, beide Fenster nebeneinander platziert und eine Bildschirmaufnahme gestartet, siehe Abbildung 75. So war nach der ganzen Photogrammetrie Workflow von Meshroom auf dem Video ersichtlich, wann genau die einzelnen Nodes abgeschlossen und der nächste Ablauf startete. Die Bildschirmaufnahme wurde dann in Adobe Premiere Pro importiert um die zeitlichen Abläufe zwischen den Nodes auf die Sekunde genau bestimmen zu können.

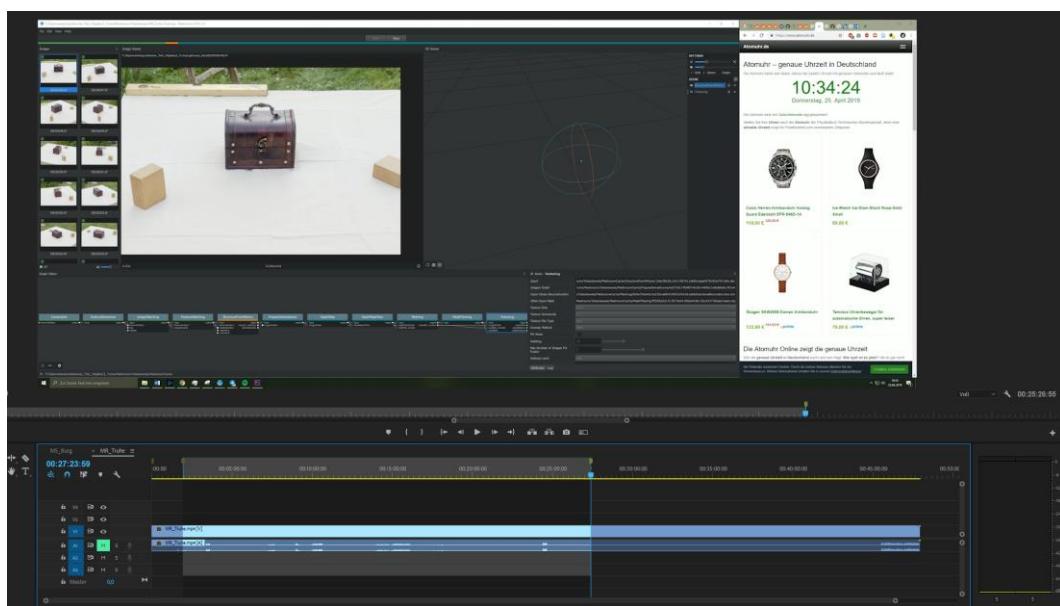


Abbildung 75. Premiere Pro mit der importieren Bildschirmaufnahme

Auch anzumerken ist, dass es notwendig war, die Unwrap Methode von Basic auf LSCM (= Least Squares Conformal Map) im Texturing Node von Meshroom umzustellen und das Downscaling von 2 auf 1 zu setzen, um die Auflösung der Textur zu verbessern. („MeshroomManual-v0.4.4“, 2019, S. 48)

Ohne diese vorgenommenen Einstellungen wurden mehrere einzelne 4k Texturen anstelle einer einzigen generiert.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

### 6.1.3.1 Processing Time

Tabelle 4. Berechnungszeiten der Burg in Meshroom

<b>Alignment</b>	104/104 Fotos	
<b>CameralInit</b>	00:00:02	
<b>FeatureExtraction</b>	00:01:19	
<b>ImageMatching</b>	00:00:02	
<b>FeatureMatching</b>	00:08:28	
<b>StructureFromMotion</b>	00:07:08	
<b>PrepareDenseScene</b>	00:00:36	
<b>DepthMap</b>	00:21:34	
<b>DepthMapFilter</b>	00:04:14	
<b>Meshing</b>	1 355 105 Faces	00:06:33
<b>MeshFiltering</b>		00:00:13
<b>Texturing</b>		00:11:25
<b>Total</b>		<b>01:01:34</b>
<b>.OBJ File</b>	95MB	
<b>Textur</b>	24MB	

Wie in Tabelle 4 bereits auf den ersten Blick zu erkennen ist, braucht die Open Source Software Meshroom ganze 52 Minuten um das Burgmodell mit rund 1 355 000 Polygone zu erstellen. Das ist bedeutend länger als die anderen beiden Programme benötigten. Es konnten hier alle importierten Fotos aligned werden, die Objektdatei kommt auf 95MB, die Textur hingegen auf 24MB.

### 6.1.3.2 Visuelle Auffälligkeiten

Bei dem von Meshroom erstelltem 3D Asset der Burg (Abbildung 76) merkt man sofort, dass zumindest im oberen Bereich teilweise die Öffnungen als solche erkannt, und deswegen auch als offene Bereiche im Modell erzeugt wurden, wie in Abbildung 77 gut zu erkennen ist. Jedoch bleibt auch der Haupteingang, in Abbildung 78, durch eine grobe Polygonumsetzung verschlossen.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---



*Abbildung 76. Untexturierte Frontalansicht der Burg von Meshroom*



*Abbildung 77. Detailansicht Balkon*

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---



Abbildung 78. verschlossener Haupteingang

Auch die feine Oberfläche, siehe Abbildung 79, wurde bestens von Meshroom übernommen. Auch auffällig ist, dass das Photogrammetrieprogramm mit einer variablen Meshdichte arbeitet. Abgesehen von den unerwünschten Einbuchtungen, wird in Abbildung 80 ersichtlich, dass der Balkon eine gröbere Auflösung als die restliche Burg aufweist. Das macht bei planen Ebenen durchaus Sinn, jedoch findet sich diese Auflösung auf dem Geländer wieder, was vor allem auf der Rückseite der Brüstung zu unschönen Bereichen führt (Abbildung 81).

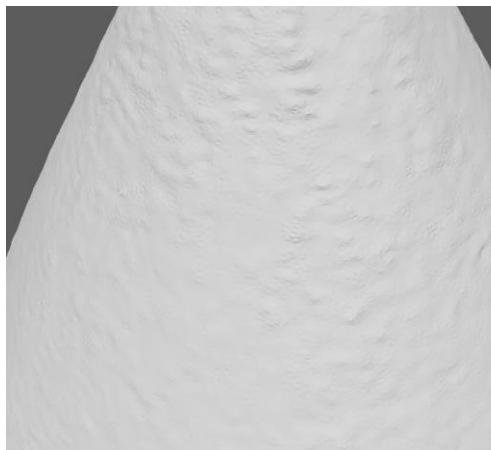


Abbildung 79.  
Oberflächenbeschaffenheit des  
Daches

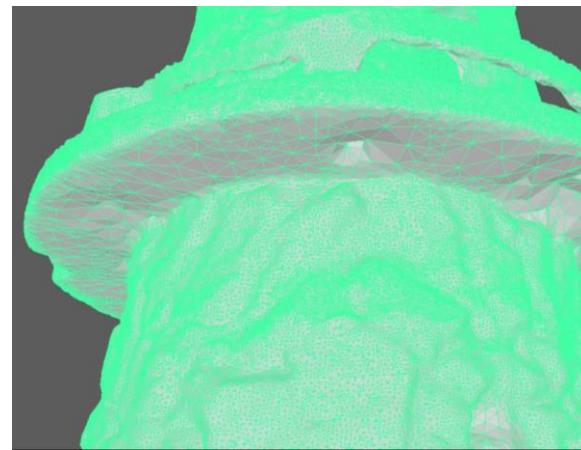
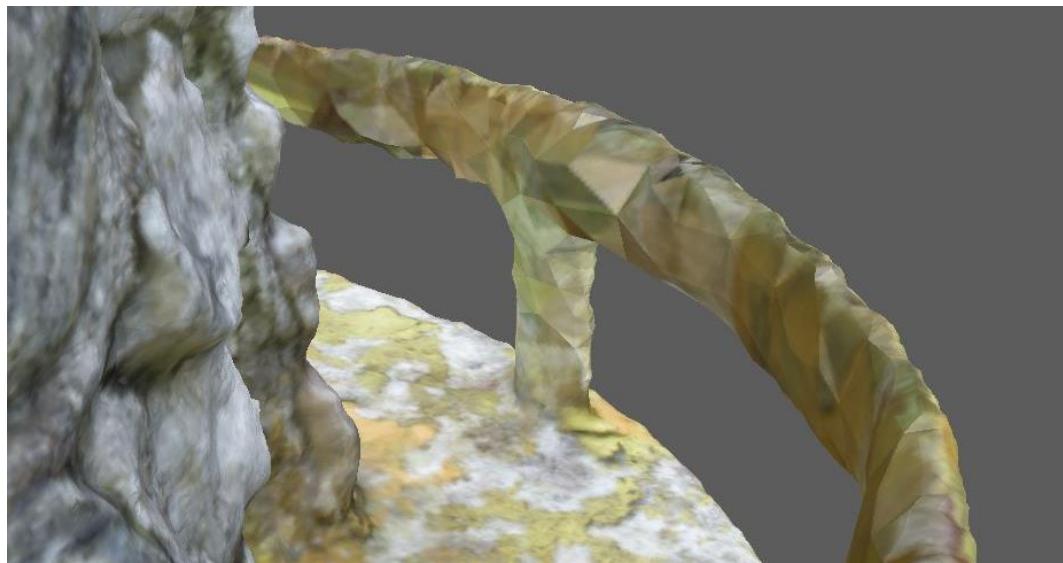


Abbildung 80. variable Meshdichte

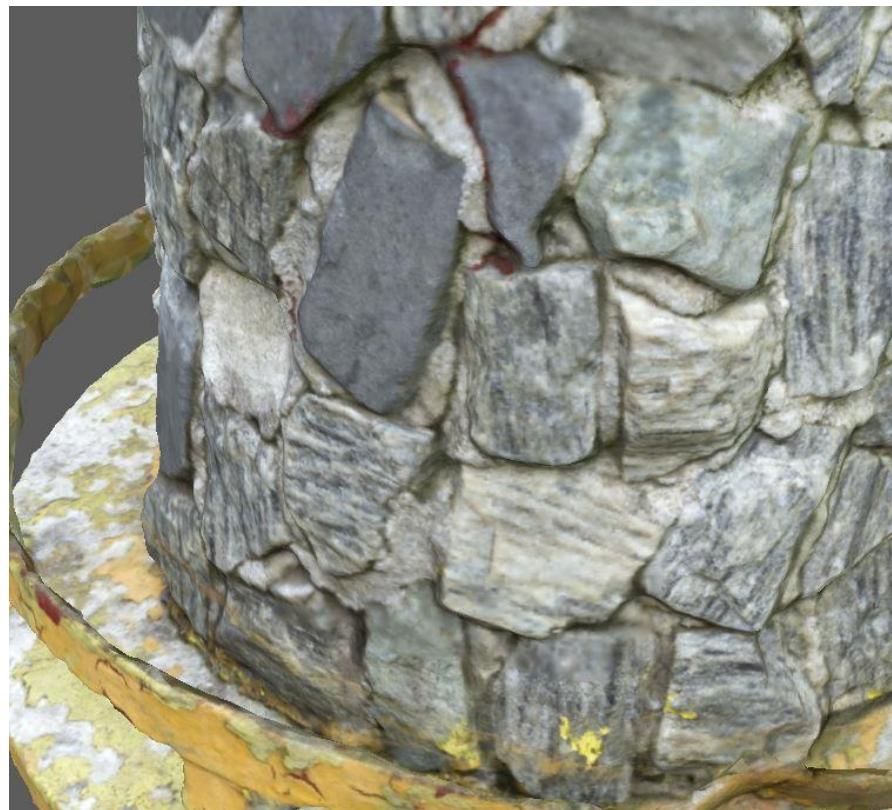
## 6 Auswertung der 3D Modelle

---



*Abbildung 81. Detailansicht; zu geringe Auflösung des Geländers*

Die Textur ist bis auf einige Bereiche durchaus als scharf zu bezeichnen. Jedoch schmälern diese unscharfen Bereiche, wie der Stein im oberen rechten Eck in Abbildung 82, den Gesamteindruck.



*Abbildung 82. variierender Texturschärfe (heller Stein, rechts oben)*

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

Auch Meshroom bleibt von dem bereits bekannten Problem auf der Unterseite des Balkons nicht verschont. Hier finden sich, wie bei den anderen zwei Softwarelösungen unschöne Artefakte, die einer Nachbearbeitung bedürfen würden (Abbildung 83).

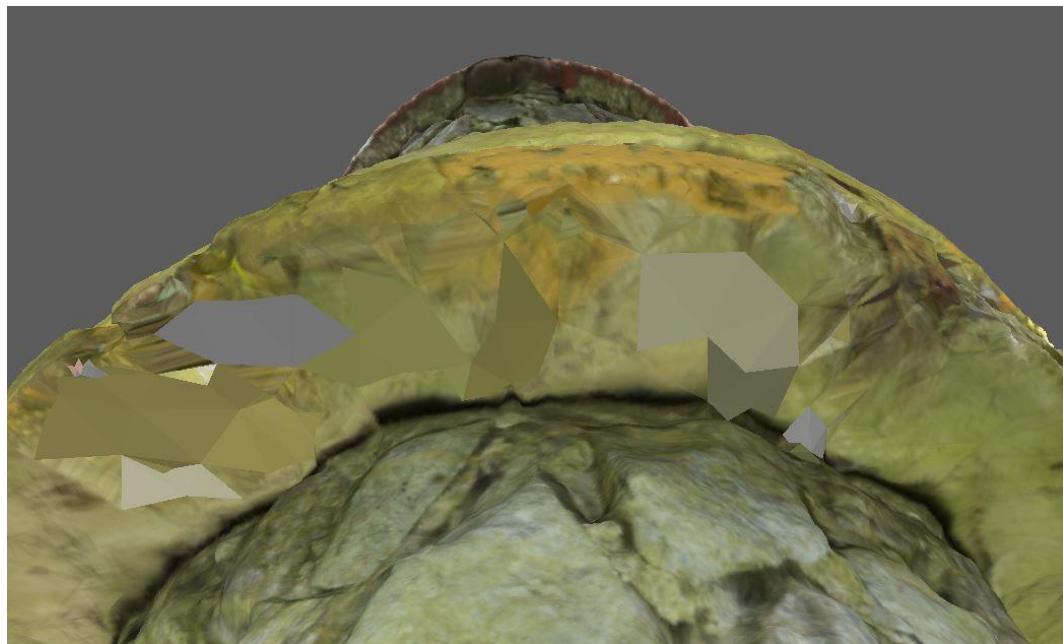


Abbildung 83. Artefakte und deformierte Bereiche an der Unterseite des Balkons

## 6.2 Leiterwagen

### 6.2.1 Agisoft Metashape

Der Leiterwagen konnte von Metashape nicht in voller Auflösung verarbeitet werden, da bei der Erstellung der Depth Maps mit der Fehlermeldung *Not enough memory* abgebrochen wurde, aus diesem Grund wurden wie bereits erwähnt die Auflösungen für die Bilder alle Modelle halbiert.

#### 6.2.1.1 Processing Time

Tabelle 5. Berechnungszeiten des Leiterwagens in Metashape

<b>erstes Alignment</b>	73/165 Fotos	
<b>zweites Alignment</b>	142/165 Fotos	
<b>Matching time</b>	00:00:16	
<b>Alignment time</b>	00:00:28	
<b>Depth Map</b>	00:00:08	
<b>Dense Cloud</b>	00:00:10	
<b>Build Mesh</b>	2 500 000 Faces	00:00:58
<b>Build Texture</b>	UV Mapping Time	00:01:37
	Blending Time	00:04:20
<b>Total</b>		<b>00:07:57</b>
<b>.OBJ File</b>	32MB	
<b>Textur</b>	75MB	

Nach dem zweiten Alignment waren hier 142 von 165 Bildern verwendet worden und ein Mesh mit 2 500 000 Faces wurde in knapp 8 Minuten erstellt. (Tabelle 5)

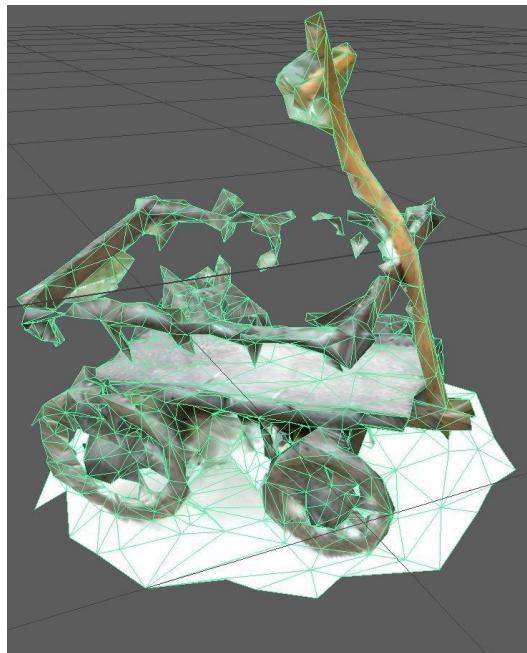
#### 6.2.1.2 Visuelle Auffälligkeiten

Die Analyse der Auffälligkeiten des Leiterwagens ist schnell abgeschlossen. Dieser wurde im Grunde mehr als unzureichend nachgebildet. Das Mesh ist für solch ein Objekt viel zu grob ausgefallen, siehe Abbildung 84. Abgesehen davon ist eine Vielzahl an Details verloren gegangen. Die Seitenstreben des Leiterwagens fanden ihren Weg nicht ins 3D Endprodukt, auch gibt es viele

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

Verschmierungen, teilweise sogar mit dem weit dahinterliegenden Grashintergrund, wie es oben am Handgriff, in Abbildung 85 zu sehen ist.



*Abbildung 84. Auflösung des Meshes des Leiterwagens*



*Abbildung 85. unzureichende Reproduktion*

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

### 6.2.2 RealityCapture

#### 6.2.2.1 Processing Time

*Tabelle 6. Berechnungszeiten des Leiterwagens in RealityCapture*

<b>Alignment</b>	110/165 Fotos	
<b>Alignment time</b>		00:01:18
<b>Depth Map</b>		00:01:17
<b>Build Mesh</b>	1 680 858 Faces	00:01:40
<b>Post Processing</b>		00:00:15
<b>Coloring Time</b>		00:00:00
<b>Build Texture</b>	Unwrapping Time	00:00:03
	Texturing Time	00:00:53
<b>Total</b>		<b>00:05:26</b>
<b>.OBJ File</b>	179MB	
<b>Textur</b>	20MB	

Beim Leiterwagen, siehe Tabelle 6, konnte RealityCapture lediglich 110 von den 165 aufgenommen Fotos korrekt zuordnen, dennoch wurden 1 680 858 Faces verwendet um in circa 5,5 Minuten das 179MB große File zu erstellen.

#### 6.2.2.2 Visuelle Auffälligkeiten

Nicht ganz unerwartet liefert RealityCapture das beste Ergebnis des Leiterwagenmodells, das in Abbildung 86 dargestellt wird. Jedoch ist auch dieses weit davon entfernt, um als akzeptabel durchzugehen.

## 6 Auswertung der 3D Modelle



*Abbildung 86. Leiterwagen von RealityCapture erstellt*

RealityCapture liefert auch hier wieder ein sehr dichtes Mesh, siehe dazu Abbildung 87. Jedoch ist das ganze Modell von Artefakten geprägt, vergleicht man zum Beispiel die Räder in Abbildung 88 und Abbildung 89, sieht man weiße Polygone, die zwischen den Speichen des Rades erstellt wurden.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

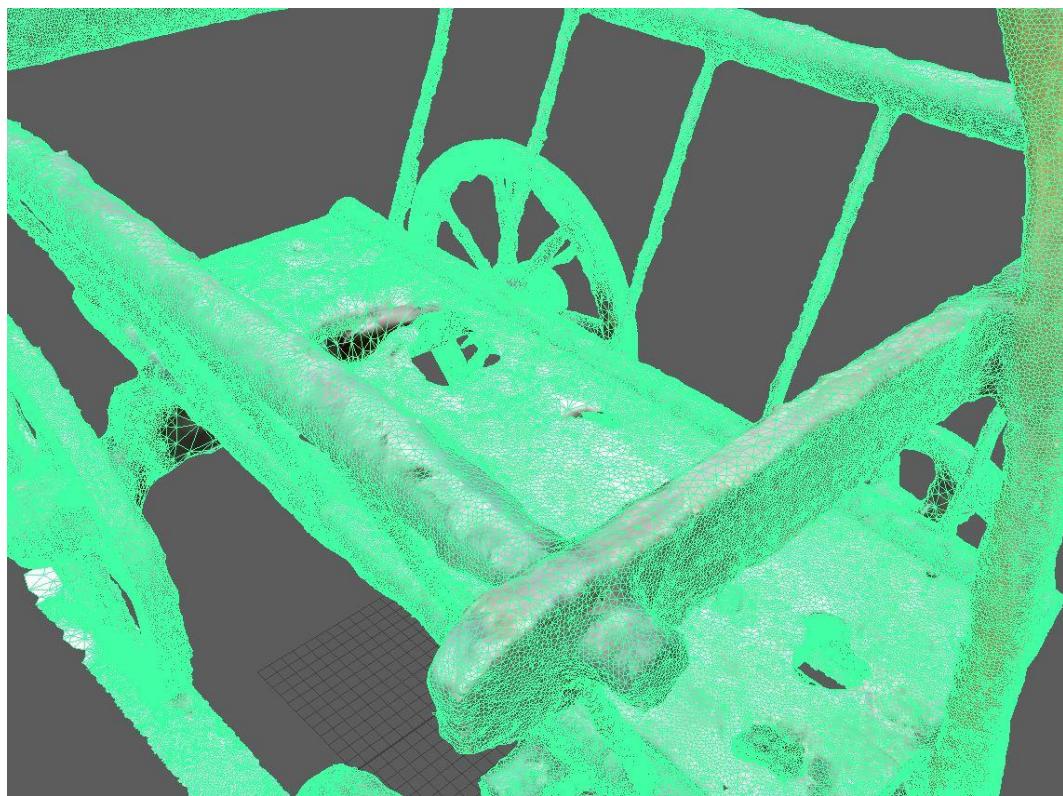


Abbildung 87. Mesh des Leiterwagens



Abbildung 88. Hinterrad mit weißen Polygonartefakten

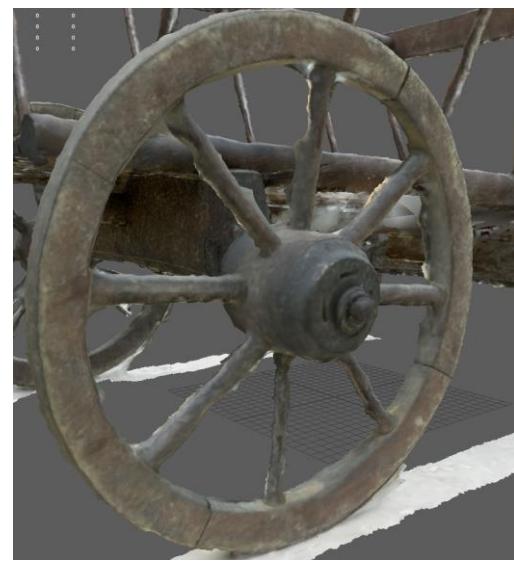


Abbildung 89. Bessere Umsetzung des Vorderrades

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

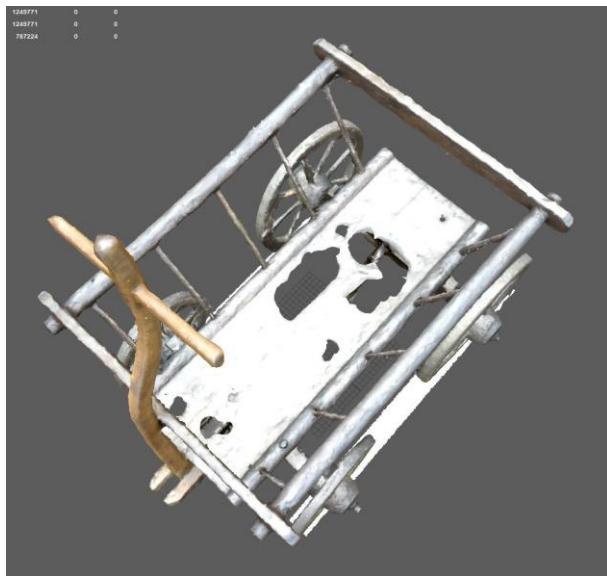


Abbildung 90. Topansicht des Leiterwagens

Auch wurden viele Löcher im Boden des Leiterwagens erstellt (Abbildung 90), die zwar schnell behoben werden können, jedoch finden sich in diesen Bereichen auch keine vorhandene Textur.



Abbildung 91. Seitenansicht des Leiterwagens

In Abbildung 91 sieht man die grobe Umsetzung der einzelnen Bereiche, daher wäre es auch sinnvoller das Modell komplett selbstständig in Maya zu erstellen und für so ein Objekt nicht auf Photogrammetrie zurückzugreifen. Da der Leiterwagen ja auch hauptsächlich aus *Polygon Primitives* zu modellieren wäre,

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

ist der Aufwand der Photogrammetrie und Nachbearbeitung des Modelles bei weitem höher einzuschätzen im Vergleich zur Modellierung.

### 6.2.3 Meshroom

#### 6.2.3.1 Processing Time

Tabelle 7. Berechnungszeiten des Leiterwagens in Meshroom

<b>Alignment</b>	161/165 Fotos	
<b>CameralInit</b>		00:01:00
<b>FeatureExtraction</b>		00:05:44
<b>ImageMatching</b>		00:00:01
<b>FeatureMatching</b>		05:05:18
<b>StructureFromMotion</b>		00:05:14
<b>PrepareDenseScene</b>		00:00:30
<b>DepthMap</b>		00:19:26
<b>DepthMapFilter</b>		00:03:16
<b>Meshing</b>	589 394 Faces	00:04:00
<b>MeshFiltering</b>		00:04:00
<b>Texturing</b>		00:05:20
<b>Total</b>		<b>05:53:49</b>
<b>.OBJ File</b>	42MB	
<b>Textur</b>	26MB	

Der Leiterwagen stellt sich auch für Meshroom als schwerstes, reproduzierbares Objekt heraus. Es mussten hier sogar bereits während der *FeatureExtraction* die Parameter angepasst werden. So wurde zusätzlich zu *sift* noch die Variable *akaze* angehakt und der Describer Preset wurde von *normal* auf *high* gesetzt, wie in („MeshroomManual-v0.4.4“, 2019, S. 48) beschrieben, da ansonsten die Berechnung des Nodes einfach vom Programm selbst gecancelt wird. Das hat jedoch auch eine enorme Auswirkung auf die Berechnungsdauer. So verstreichen über fünf Stunden für die Berechnung des FeatureMatching Nodes, siehe Tabelle 7.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

Der Parameter `akaze` wurde demnach auch zusätzlich für die Nodes `FeatureMatching` und `StructureFromMotion` angewählt.

Nach insgesamt 5 Stunden und 53 Minuten beendete Meshroom den Photogrammetrie Workflow mit einem 42MB großen Objektfile und einer Textur von 26MB.

### 6.2.3.2 Visuelle Auffälligkeiten

Der von Meshroom erstellte Leiterwagen ist im Grunde unbrauchbar. Hier wurden sogar die seitlichen Streben einfach nicht rekonstruiert, wie in Abbildung 92 zu sehen. Die Seitenansicht in Abbildung 93 zeigt auch eine äußerst grobe Umsetzung und fehlerhafte Textur, darüber kann auch ein vergleichsweise dichtes Mesh nicht hinwegtrösten.



Abbildung 92. Leiterwagen  
in Meshroom erstellt



Abbildung 93. Seitenansicht

## 6.3 Truhe

### 6.3.1 Agisoft Metashape

#### 6.3.1.1 Processing Time

Tabelle 8. Berechnungszeiten der Truhe in Metashape

<b>erstes Alignment</b>	38/87 Fotos
<b>zweites Alignment</b>	87/87 Fotos
<b>Matching time</b>	00:00:11
<b>Alignment time</b>	00:00:17
<b>Depth Map</b>	00:00:32
<b>Dense Cloud</b>	00:01:22
<b>Build Mesh</b>	1 804 599 Faces
<b>Build Texture</b>	UV Mapping Time
	Blending Time
<b>Total</b>	<b>00:05:10</b>
<b>.OBJ File</b>	20MB
<b>Textur</b>	60MB

Das Modell der Truhe wurde in 5 Minuten und 10 Sekunden mit 1 804 599 Polygonen und einer Größe von 20MB erstellt, wie in Tabelle 8 oben ersichtlich. Die Textur kam dabei auf 60MB.

#### 6.3.1.2 Visuelle Auffälligkeiten

Die Truhe dürfte für ein Objekt im Hintergrund einer Spielszene etc. ausreichen, obwohl man auch hier etwas Nachbearbeiten müsste. So fehlt zum einen ein Teil des Griffes auf der linken Seite, zum anderen ist die Textur teilweise unscharf, wie in Abbildung 94 und Abbildung 95 zu sehen. Diese Unschärfe ist womöglich auch auf eine Reflexion von Licht zurückzuführen, da die Truhe doch eine etwas glänzende Oberfläche hat. In Abbildung 96 erkennt man eine Reflexion in der sonst schwarzen *Rinne*, diese wirkt hier eindeutig ausgewaschener und heller.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---



Abbildung 94. 3D Modell der Truhe von Metashape

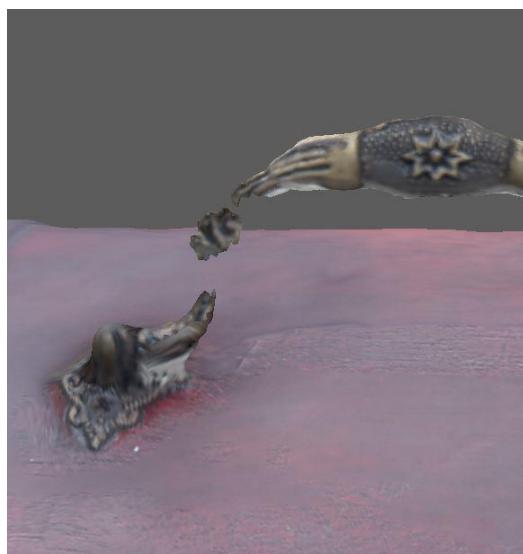


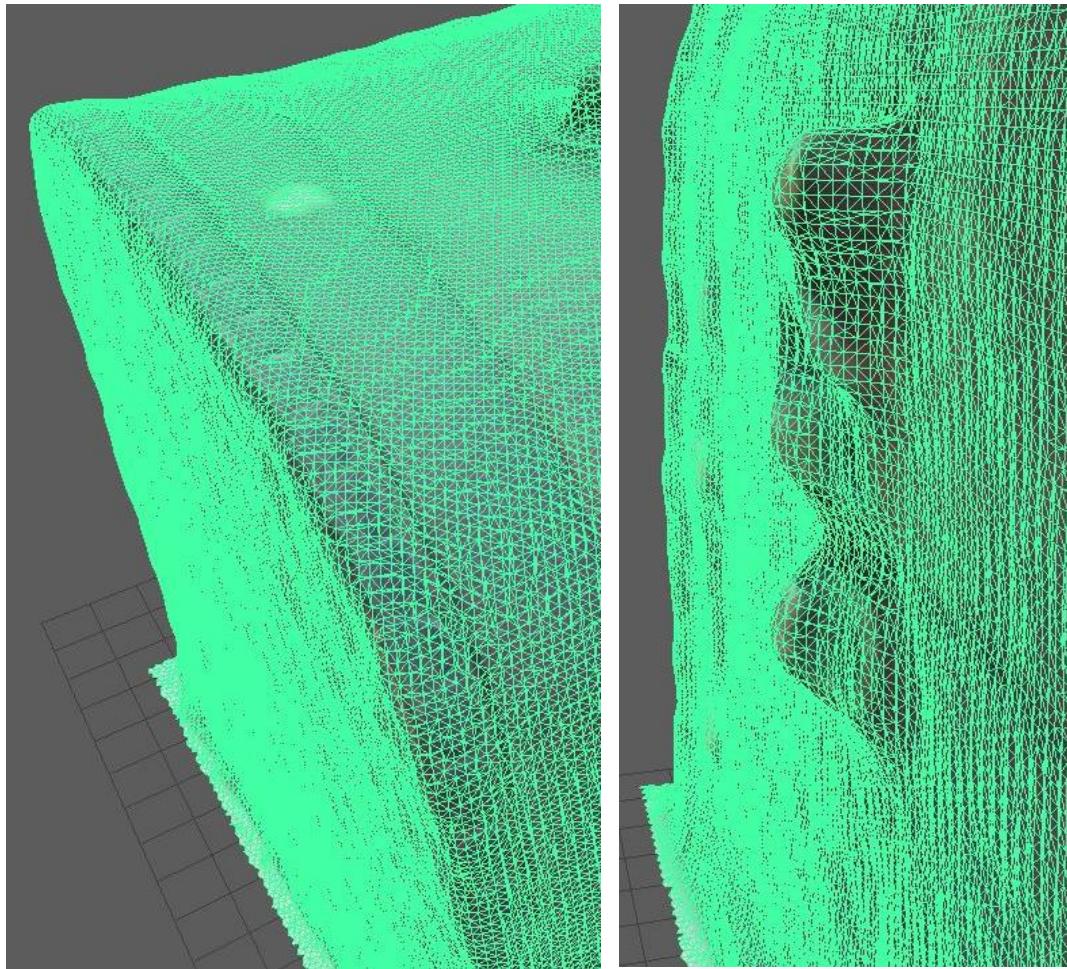
Abbildung 95. Detailansicht Griff



Abbildung 96. Unscharfe Textur

Das Mesh wurde wieder äußerst feinmaschig generiert, wie in der unteren Abbildung 97 deutlich zu sehen ist. Jedoch zeigt die Abbildung 98 daneben, dass das nicht ausreicht, um die Truhenschnalle korrekt wiederzugeben, diese verbindet sich mit dem restlichen Truhenkörper.

## 6 Auswertung der 3D Modelle



*Abbildung 97. Meshansicht der Truhe*

*Abbildung 98. Truhenschnalle,  
Detailansicht*

Auf der Hinterseite der Truhe in Abbildung 99 wird sichtbar, dass es auch hier Probleme mit der Schärfe gibt, vor allem was die Scharniere betrifft. Diese sind eindeutig zu unscharf und stören den Gesamteindruck, da sie auf der Rückseite doch sehr prägnant erscheinen.

Sieht man sich die Seite der Truhe an, wurde hier im Gegensatz zu der Oberseite die Holztextur sehr gut und ohne jegliche negative Einflüsse erfasst. (Abbildung 100). Die meisten, wenn nicht sogar alle Bilder dieser Seite, weisen daher keine Reflexionen etc. auf, die sich negativ auf diesen Teilbereich der Textur auswirken könnten.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---



Abbildung 99. Rückansicht der Truhe

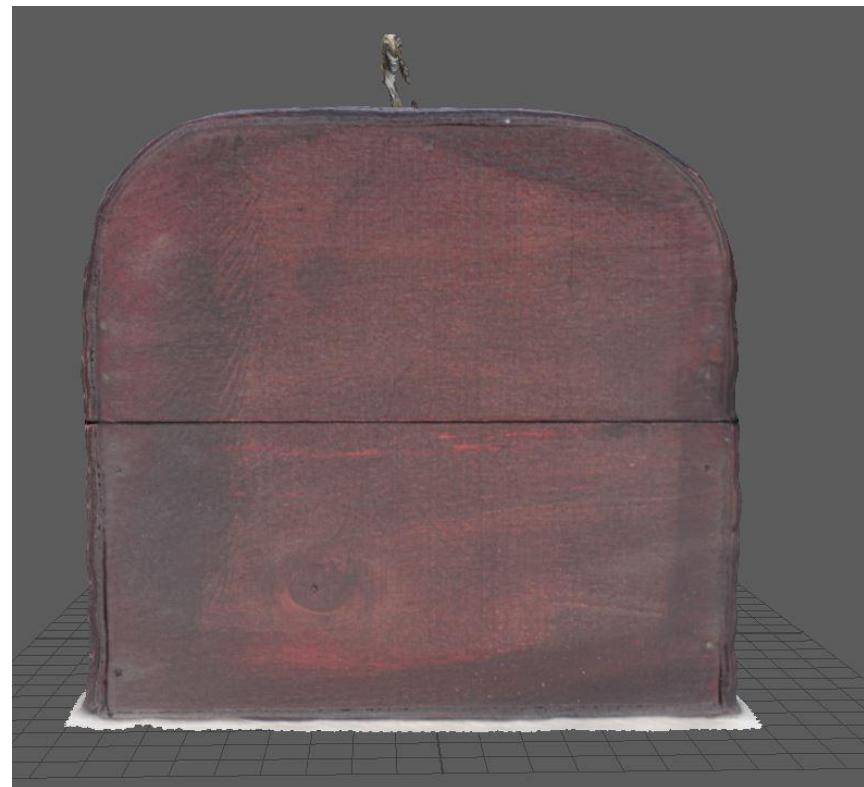


Abbildung 100. Seitenansicht der Truhe

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

### 6.3.2 RealityCapture

#### 6.3.2.1 Processing Time

Tabelle 9. Berechnungszeiten der Truhe in RealityCapture

<b>Alignment</b>	71/87 Fotos	
<b>Alignment time</b>		00:00:14
<b>Depth Map</b>		00:00:40
<b>Build Mesh</b>	1 680 858 Faces	00:00:50
<b>Post Processing</b>		00:00:09
<b>Coloring Time</b>		00:00:03
<b>Build Texture</b>	Unwrapping Time	00:00:02
	Texturing Time	00:00:41
<b>Total</b>		<b>00:02:39</b>
<b>.OBJ File</b>	159MB	
<b>Textur</b>	13MB	

RealityCapture hat gerade mal 2:39min benötigt (Tabelle 9) um das Modell der Truhe mit 71 von 78 Fotos zu generieren, das ist doppelt so schnell wie Agisoft Metashape für das selbe Modell benötigte. Die Textur hingegen nimmt nur 13MB in Anspruch, da verbraucht Metashape hingegen 60MB.

#### 6.3.2.2 Visuelle Auffälligkeiten

In Abbildung 101 bemerkt man sofort den weißen Bereich am Henkel der Truhe. Hier war es RealityCapture nicht möglich, zwischen Griff und Hintergrund, also dem weißen Boden zu unterscheiden, was das weiße Artefakt erklärt. (Abbildung 102)

Auch bei der Truhe zeichnet sich RealityCapture wieder durch ein sehr dichtes Mesh aus, siehe dazu Abbildung 103.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

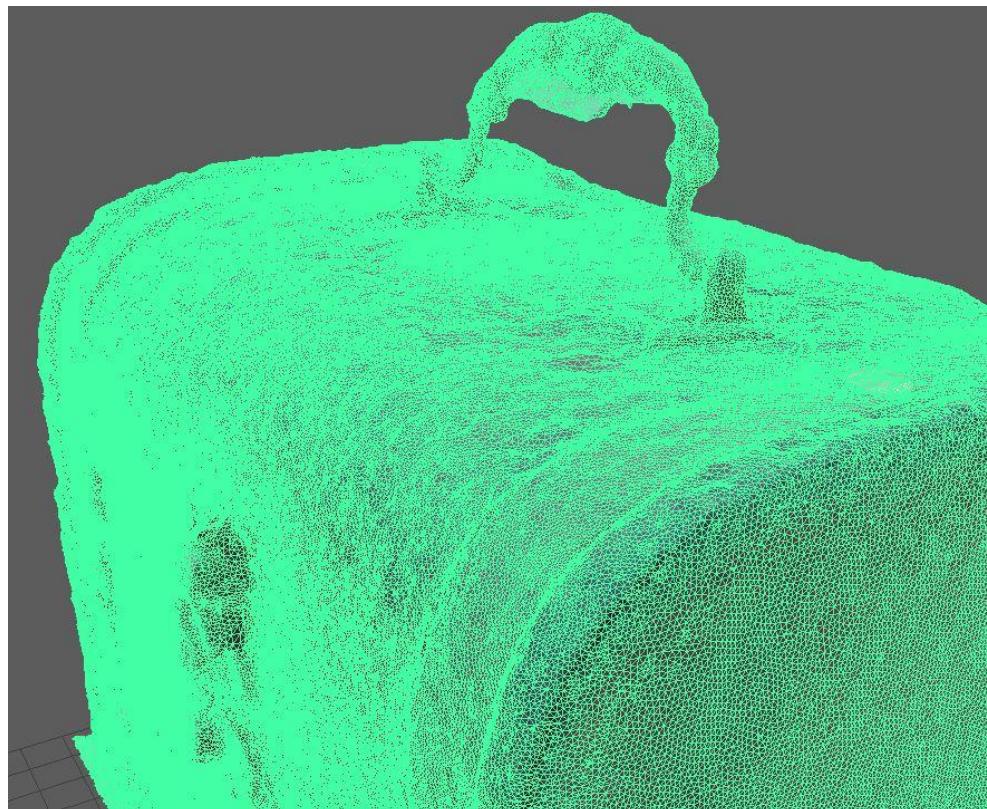
---



*Abbildung 101. 3D Modell der Truhe von RealityCapture*



*Abbildung 102. Detailansicht des Henkels*



*Abbildung 103. sehr dichtes Mesh der Truhe*

Grundsätzlich wurde die Textur der Truhe gut umgesetzt, siehe Abbildung 104 und Abbildung 105, jedoch mangelt es auch hier an bestimmten Bereichen an Schärfe. Besonders bei Nahaufnahmen, wie in Abbildung 106 bei den Nieten, sieht man, dass diese durchaus verwaschen sind. Auch die Scharniere an der Rückseite könnten deutlicher ausgeprägt sein.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---



Abbildung 104. Rückseite der Truhe von RealityCapture



Abbildung 105. Seitenansicht der Truhe



Abbildung 106. fehlende Schärfe bei den Nieten

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

### 6.3.3 Meshroom

#### 6.3.3.1 Processing Time

Tabelle 10. Berechnungszeiten der Truhe in Meshroom

<b>Alignment</b>	85/87 Fotos	
<b>Cameralinit</b>	00:00:01	
<b>FeatureExtraction</b>	00:01:55	
<b>ImageMatching</b>	00:00:01	
<b>FeatureMatching</b>	00:25:27	
<b>StructureFromMotion</b>	00:02:35	
<b>PrepareDenseScene</b>	00:00:18	
<b>DepthMap</b>	00:11:09	
<b>DepthMapFilter</b>	00:01:52	
<b>Meshing</b>	479 765 Faces	00:03:39
<b>MeshFiltering</b>		00:00:05
<b>Texturing</b>		00:04:16
<b>Total</b>		<b>00:51:18</b>
<b>.OBJ File</b>	34MB	
<b>Textur</b>	14MB	

Wie in Tabelle 10 ersichtlich, benötigte Meshroom rund 51 Minuten um aus 85 von insgesamt 87 verfügbaren Fotos eine 34MB große Objektdatei, die ein 3D Abbild der Truhe mit rund 480 000 Faces enthält, zu erzeugen.

#### 6.3.3.2 Visuelle Auffälligkeiten

Meshroom liefert hier ein eher unterdurchschnittliches Exemplar ab (Abbildung 107). Vor allem die eingedellten Bereiche auf der Oberseite, die neben dem dichten Meshaufbau in der Abbildung 108 zu sehen sind, dürfen hier gar nicht passieren und sind vermutlich auf Reflexionen der leicht spiegelnden Oberfläche zurückzuführen.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---



Abbildung 107. 3D Ansicht der Truhe von Meshroom

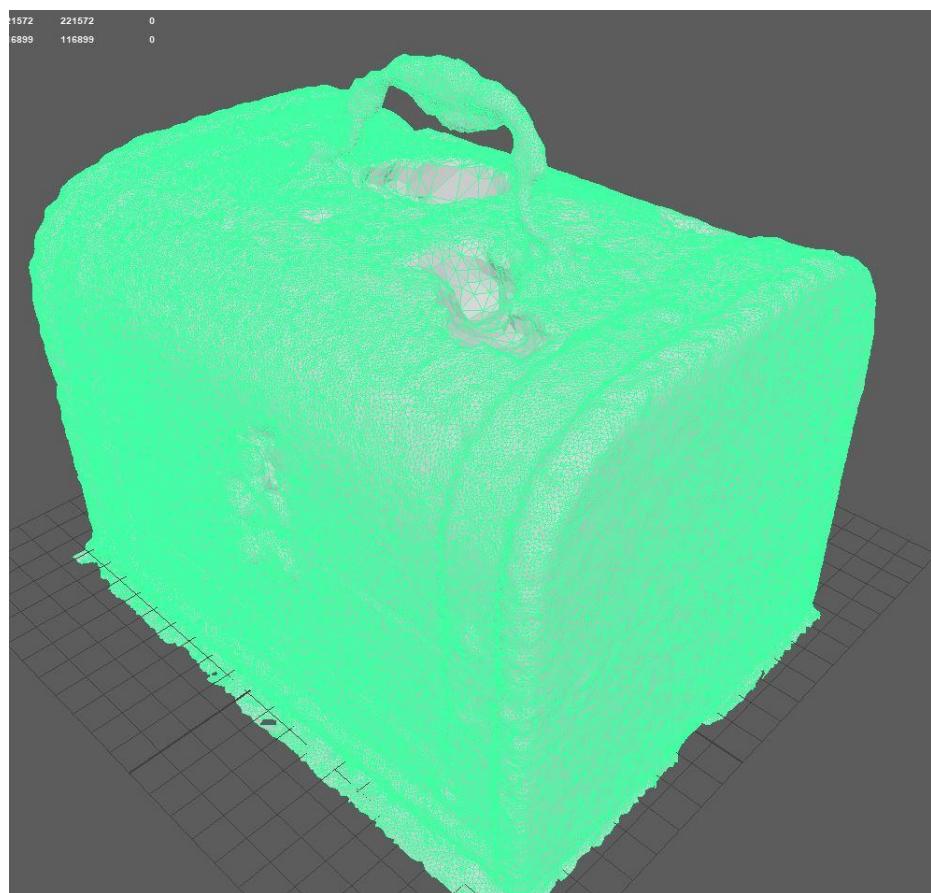


Abbildung 108. Meshansicht; eingedellte Bereiche auf der Oberseite

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---



Abbildung 109. Rückansicht der Truhe

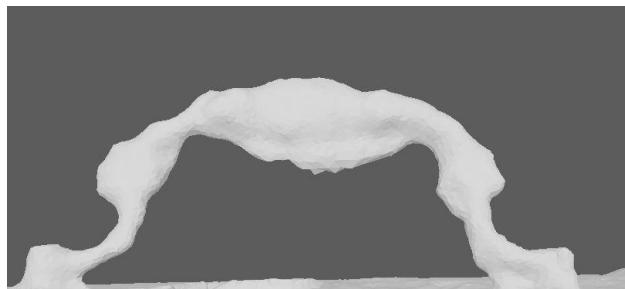


Abbildung 110. Detailansicht Henkel

Auch die Geometrie des Henkels, wie in der obigen Abbildung 110 zu sehen, ist sehr kantig umgesetzt worden. Die Schnalle, siehe Abbildung 111 rechts, wurde gut herausgearbeitet, jedoch wurde die kleine Öffnung zwischen Truhe und Schnalle nicht reproduziert.

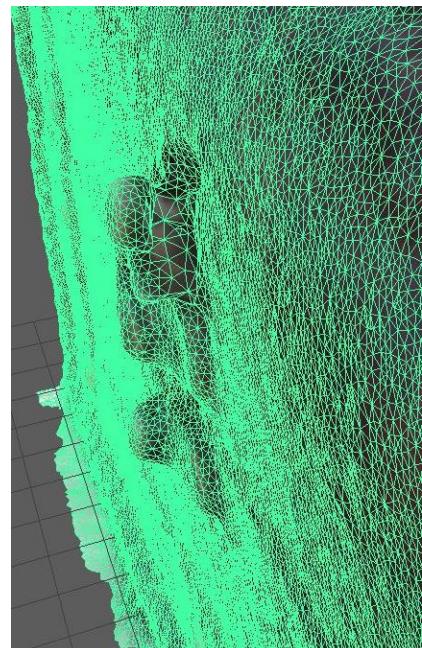


Abbildung 111. Detailansicht  
Mesh; Schnalle

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

Der Blick von oben auf die Truhe, Abbildung 112, verdeutlicht nochmals die Probleme an der Oberseite. Hier sieht man auch das die Textur in Mitleidenschaft gezogen wurde, da diese Flecken nicht auf dem Original zu sehen sind.



Abbildung 112. Topansicht der Truhe

## 6.4 Steine

### 6.4.1 Agisoft Metashape

#### 6.4.1.1 Processing Time

Tabelle 11. Berechnungszeiten der Steine in Metashape

<b>erstes Alignment</b>	59/75 Fotos
<b>zweites Alignment</b>	75/75 Fotos
Matching time	00:00:19
Alignment time	00:01:00
 <b>Depth Map</b>	00:01:33
Dense Cloud	00:02:13
 <b>Build Mesh</b>	3 500 000 Faces
	00:01:21
 <b>Build Texture</b>	UV Mapping Time
	00:00:41
	Blending Time
	00:00:57
 <b>Total</b>	<b>00:08:04</b>
 <b>.OBJ File</b>	13MB
<b>Textur</b>	78MB

Ungefähr acht Minuten hat Metashape benötigt um das fertige 3D Asset der Steine mit 3 500 000 Faces herzustellen. Das OBJ File nimmt 13MB Speicherplatz, die Textur 78MB in Anspruch.

#### 6.4.1.2 Visuelle Auffälligkeiten

Auch bei den Steinen gibt es hier und da einige Bereiche, die einer Anmerkung bedürfen, wobei das Modell im Grunde doch sehr gut von Agisoft Metashape erstellt wurde. Der erste Eindruck ist durchwegs ein positiver, wie Abbildung 113 beweist.

In Abbildung 114 sieht man, dass der Übergang zwischen zwei einzelnen Steinen nicht komplett abgetrennt wurde und die Grenze dazwischen leicht verschwimmt. Der bewusst freigelassene Zwischenraum beim Aufschlichten der Steine weist auch ein Problem auf, dass aber zu erwarten war, da es hier sehr schwierig war, mit der Kamera nah genug ans Objekt zu kommen, um die

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

benötigten Winkel auf alle Oberflächen zu bekommen, die eine schöne Rekonstruktion ermöglicht hätten. Daher sieht man in Abbildung 115 einige unschöne Artefakte beziehungsweise eine *matschige* Polygonausführung des Programmes.



Abbildung 113. Gesamtansicht des Steinobjektes



Abbildung 114. Detailansicht Steine

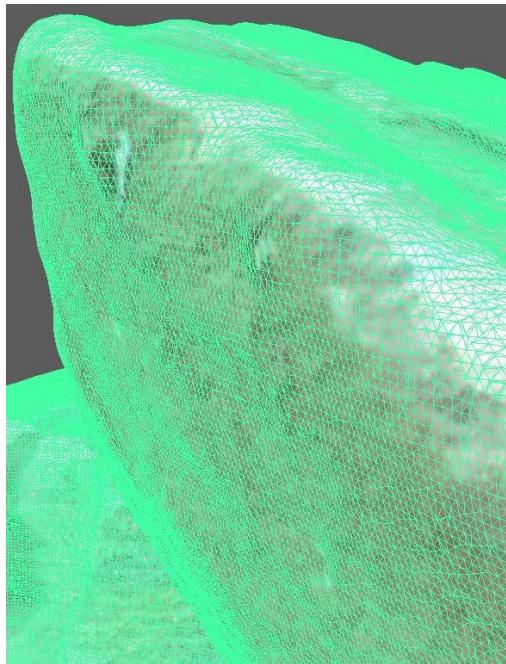


Abbildung 115. matschige Auflösung

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

Das Mesh (Abbildung 116) wurde, wie bereits von Metashape gewohnt, sehr dicht aufgelöst und die Textur ist zum Großteil sehr scharf abgebildet worden, siehe dazu Abbildung 117. Lediglich ein kleiner Abschnitt in Abbildung 118, weist einen verwischten Texturbereich auf.



*Abbildung 116. dichtes Mesh der Steine*



*Abbildung 117. scharfe Steintextur*



*Abbildung 118. unscharfe Vermischung der Textur*

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

Auch die Unterseite des Steinmodells, Abbildung 119, zeigt viele Artefakte und Bereiche, die sich zwischen dem Boden (weiß) und dem Steinhaufen befinden. Das ist auch auf fehlende Kamerawinkel zurückzuführen, da es aus Platzgründen einfach nicht möglich war diese Bereiche besser abzulichten.



*Abbildung 119. Unterseite des Steinmodells*

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

### 6.4.2 RealityCapture

#### 6.4.2.1 Processing Time

*Tabelle 12. Berechnungszeiten der Steine in RealityCapture*

<b>Alignment</b>	75/75 Fotos	
<b>Alignment time</b>		00:00:06
<b>Depth Map</b>		00:01:24
<b>Build Mesh</b>	2 926 088 Faces	00:02:06
<b>Post Processing</b>		00:00:20
<b>Coloring Time</b>		00:00:08
<b>Build Texture</b>	Unwrapping Time	00:00:06
	Texturing Time	00:00:59
<b>Total</b>		<b>00:05:09</b>
<b>.OBJ File</b>	314MB	
<b>Textur</b>	9MB	

Im Gegensatz zu Agisoft Metashape hat RealityCapture mit einem perfekten Alignment das 3D Modell der Steine um circa 3 Minuten schneller erstellt, wie ein Vergleich von Tabelle 11 und Tabelle 12 zeigt. Die Dateigröße beläuft sich hier auf 314MB bei einer Polygonanzahl von um die 2 900 000. Die Textur kommt auch hier wieder mit sehr wenig Speicherplatz aus, nur 9MB werden benötigt.

#### 6.4.2.2 Visuelle Auffälligkeiten

Das 3D Asset der Steine wurde von RealityCapture visuell äußerst genau reproduziert (Abbildung 120). Lediglich die schwer zugänglichen Bereiche zwischen den Steinen, an denen es nicht möglich war, entsprechende Kamerawinkel für die Fotos zu setzen, beinhalten Artefaktbereiche, wie unten in Abbildung 121 und Abbildung 122 dargestellt wird.

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---



Abbildung 120. 3D Modell der Steine von RealityCapture

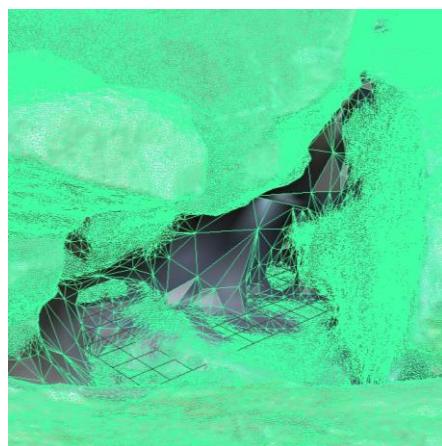


Abbildung 121. Meshansicht mit Artefakte



Abbildung 122. Artefakte im engen Bereich zwischen den Steinen

## 6 Auswertung der 3D Modelle



*Abbildung 123 Detailansicht der Textur eines Steines*

Das Mesh wurde softwaretypisch wieder sehr dicht angelegt und der Großteil der Textur verfügt über ausreichend Schärfe, siehe Abbildung 123. Jedoch schleichen sich auch hier teilweise Verwischungen ein, wie in Abbildung 124 zu sehen.



*Abbildung 124. Unscharfe Steinkante*

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

### 6.4.3 Meshroom

#### 6.4.3.1 Processing Time

Tabelle 13. Berechnungszeiten der Steine in Meshroom

<b>Alignment</b>	75/75 Fotos	
<b>Cameralinit</b>	00:01:00	
<b>FeatureExtraction</b>	00:00:49	
<b>ImageMatching</b>	00:01:00	
<b>FeatureMatching</b>	00:04:11	
<b>StructureFromMotion</b>	00:07:20	
<b>PrepareDenseScene</b>	00:00:24	
<b>DepthMap</b>	00:15:34	
<b>DepthMapFilter</b>	00:03:03	
<b>Meshing</b>	1 227 383 Faces	00:06:02
<b>MeshFiltering</b>	00:00:14	
<b>Texturing</b>	00:09:34	
<b>Total</b>		<b>00:49:11</b>
<b>.OBJ File</b>	87MB	
<b>Textur</b>	16MB	

Für das letzte Objekt, die Steine, hat es insgesamt rund 49 Minuten gedauert bis der Photogrammetrie Prozess in Meshroom abgeschlossen war. Hierfür konnten alle 75 Fotos im 3D Raum angeordnet werden, wie Tabelle 13 beweist. Das Modell wurde circa 1 200 000 Polygone zusammengestellt. 87MB hat das OBJ File, 16MB die Textur.

#### 6.4.3.2 Visuelle Auffälligkeiten

Das 3D Asset der Steine in Abbildung 125 überzeugt auf den ersten Blick. Ganz perfekt ist das Abbild jedoch auch nicht. Es weist dieselben Probleme wie die anderen Objekte auf, da auch hier mit den gleichen Kameraperspektiven gearbeitet wurde. So sind die engen Bereiche und die Unterseite der Steine grob

## 6 Auswertung der 3D Modelle

---

aufgelöst, beziehungsweise finden sich hier einige Bereiche mit Artefakten, wie in Abbildung 126 und Abbildung 127 zu sehen ist.

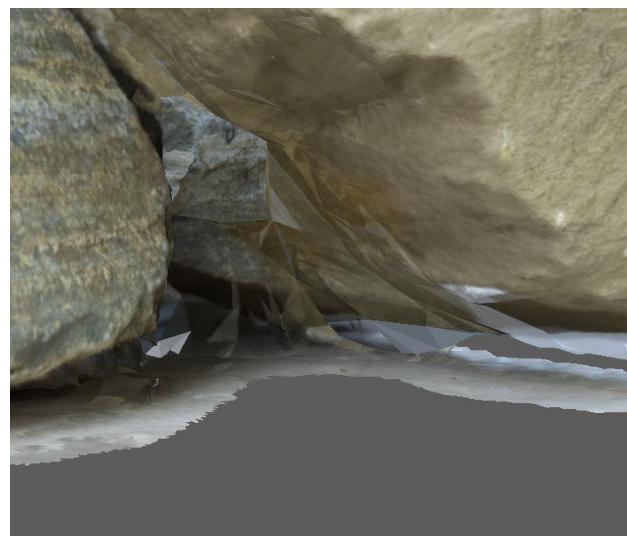


*Abbildung 125. 3D Modell der Steine von Meshroom erstellt*



*Abbildung 126. offener Bereich in der Mitte des Steinhaufens mit grober Mesh Auflösung*

## 6 Auswertung der 3D Modelle



*Abbildung 127. Unterseite der Steine mit Artefakte*

Auch bei diesem Modell findet man bei näherer Betrachtung Bereiche, an denen die Schärfe etwas nachlässt, wie in der unteren Abbildung 128 ersichtlich.



*Abbildung 128. fehlende Schärfe an der Oberseite des Steines*

# 7 Expertenbefragung

Um die erhaltenen Ergebnisse und deren Qualität besser bewerten zu können, wurde mit Hilfe der Plattform Umfrageonline<sup>15</sup> ein Fragebogen erstellt. Diese Umfrage wurde dann Experten auf dem Gebiet vorgelegt. Als Experten gelten hier Personen, die in Ihrem beruflichen Alltag mit der Materie zu tun haben, also sich mit Photogrammetrie bzw. 3D Modeling und Postproduktion beschäftigen.

## 7.1 Aufbau der Befragung

Die erstellten 3D Assets wurden auf die Website Sketchfab hochgeladen, da hier die 3D Modelle mittels dem 3D Viewer von Sketchfab direkt in die Umfrage eingebettet werden können. Das ermöglicht den Teilnehmern sich sofort von der Qualität des Objektes, dessen Mesh, Textur und dem automatisch generierten UV-Layout ein Bild machen zu können. Die Objekte können hier nämlich, wie in einer gängigen Software zur Computeranimation und Modellierung, wie Autodesk Maya oder Blender, bewegt werden. Somit kann der Experte mit der „virtuellen Kamera“ sehr nahe ans Modell heranzoomen und es von allen Winkeln genau unter die Lupe nehmen. Auch das Mesh kann separat im integrierten Model Inspector betrachtet werden, genauso wie die Textur beziehungsweise die UVs.

Natürlich wurden zur Beurteilung auch Referenzbilder mittels einem Link zu einem Google Photos Album bereitgestellt.

Abbildung 129 zeigt den erwähnten 3D Viewer in einer Detailansicht und im Anhang wird der Onlinefragebogen in seiner Gänze abgebildet.

---

15 <https://www.umfrageonline.com/>

## 7 Expertenbefragung

---

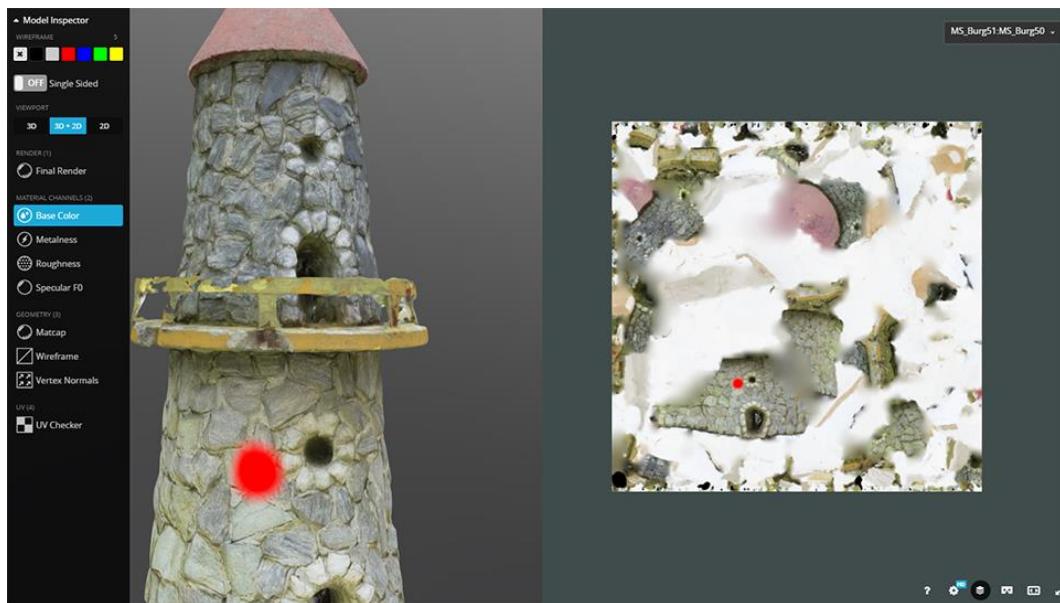


Abbildung 129. Der 3D Viewer von Sketchfab in gesplitteter Ansicht; links das Modell, rechts die Textur, der rote Punkt hilft hierbei den korrekten Abschnitt auch auf der Textur daneben zu finden.

Dem Experten werden im Onlinefragebogen Fragen zu den einzelnen Modellen unterbreitet und um seine persönliche Einschätzung bezüglicher der jeweiligen Mesh- und Texturqualität, dem UV-Layout und die programmtechnische Umsetzung im Vergleich zum realen Abbild, gebeten. Dies erfolgt in Form einer Single Choice Auswahloption für jeden zuvor erwähnten Parameter. Des Weiteren wird mit einer offenen Textbox die Möglichkeiten gegeben, Anmerkungen zum jeweiligen Objekt zu hinterlassen. Am Ende jedes Modellabschnittes wird der Teilnehmer gebeten sich für jeweils eines der drei Modelle zu entscheiden.

Selbstverständlich ist während der Umfrage nicht ersichtlich, welches Modell mit welcher Softwarelösung generiert wurde um diverse Präferenzen und Verfälschungen des Ergebnisses zu vermeiden. Hierzu wurden die einzelnen Modelle nur durchnummieriert. Am Ende der Umfrage findet sich noch die Möglichkeit herauszufinden welches Modell von welcher Software erstellt wurde sowie eine gruppierte Übersicht aller erstellten 3D Objekte, sollte der Teilnehmer sie nochmals sehen wollen.

Die komplette Umfrage ist im Anhang dieser Arbeit der Vollständigkeit halber angeführt.

## 7.2 Befragungsergebnisse im Detail

Durch die Befragung sollte zum einen die Forschungsfrage „Welche Software erzielt die ähnlichsten bzw. realistischsten Ergebnisse im Vergleich zur Echtaufnahme?“ geklärt werden, zum anderen soll auch festgestellt werden womit die Programme grundsätzlich ihre Schwierigkeit haben.

Im folgenden Abschnitt wird auf die erhaltenen Antworten und Ergebnisse der Expertenumfrage eingegangen, da jedoch von den elf teilgenommenen Experten lediglich sechs die Umfrage beendet haben, werden auch nur jene Datensätze verwendet, die eine abgeschlossene Umfrage beinhalten.

Den Teilnehmern war es nicht ersichtlich welches Objekt in welcher Software erstellt wurde, und gaben ihre Antworten daher wirklich nur in Bezug auf die Qualität des abgefragten Parameters.

Eine zusammenfassende Gegenüberstellung der Expertenbewertungen findet sich in Kapitel 9.2.

### 7.2.1 Burg

#### 7.2.1.1 Agisoft Metashape

Für die erste Burg, aus Metashape, ergaben sich daher die folgenden Beobachtungen. Die Meshqualität wurde eher als ausreichend empfunden, im Gegensatz dazu kam die Textur etwas besser bei den Befragten an, siehe dazu die untere Abbildung 130. Die Hälfte der Teilnehmer fand das Texturergebnis befriedigend und das generierte UV-Layout wurde von den Experten gleichmäßig zwischen gut und ausreichend bewertet. Der letzte Faktor der Tabelle, die Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt, wurde von drei Teilnehmern als befriedigend, von den restlichen drei nur als ausreichend empfunden.

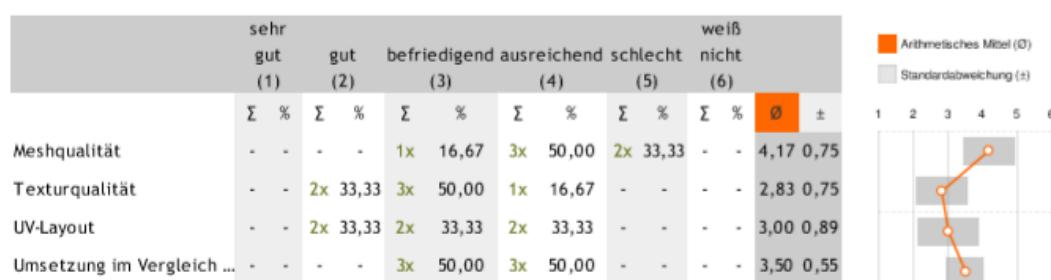


Abbildung 130. Faktorenbewertung der in Metashape erstellten Burg

## 7 Expertenbefragung

---

In dem optionalen Anmerkungsfeld wurde von zwei Experten darauf hingewiesen, dass das Mesh kaputt wirkt bzw. die UVs einen sauberen Eindruck hinterlassen, jedoch nicht praktisch angeordnet wurden.

### 7.2.1.2 *RealityCapture*

Die Umsetzung des Meshes der Burg von RealityCapture wurde durchschnittlich mit einem Gut beurteilt, die Textur sogar besser, der Großteil war mit der Qualität hier entweder sehr oder gut zufrieden. Die UVs wurden von drei Teilnehmern als gut angesehen, jedoch fanden die anderen drei, dass diese eher ausreichend bis schlecht erstellt wurden. Der Gesamteindruck des 3D Assets pendelt sich hier um den Wert gut ein, wie in Abbildung 131 zu sehen.

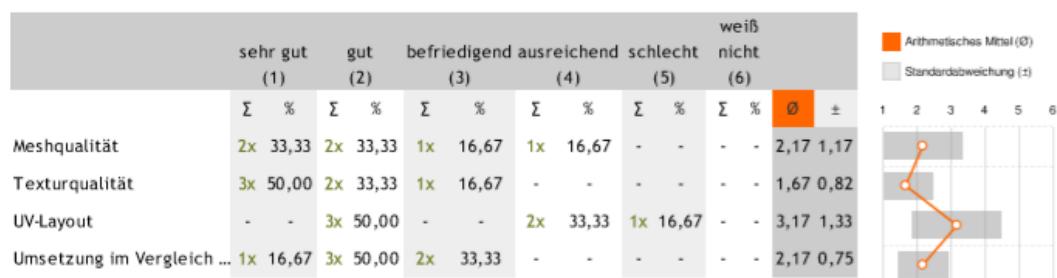


Abbildung 131. Faktorenbewertung der in RealityCapture erstellten Burg

Ein Experte merkte an, dass keine Öffnungen von der Software als solche erkannt wurden, jedoch verfügt das Modell über reichlich Details, die im Gegensatz zu den beiden anderen Burgmodellen nicht so weichgezeichnet abgebildet wurden.

### 7.2.1.3 *Meshroom*

Die Qualität des Meshes, des von Meshroom erstellte Burgmodell, dessen Auswertung in Abbildung 132 abgebildet ist, wurde von den Teilnehmern um den Wert gut gewertet. Die Texturqualität wurde im arithmetischen Mittel mit befriedigend beurteilt. Mit dem UV Layout sind die Teilnehmer überwiegend unzufrieden, da drei von ihnen diese als schlecht empfunden haben. Der Gesamteindruck dieses Modells wurde durchschnittlich mit 2,67 bewertet.

## 7 Expertenbefragung

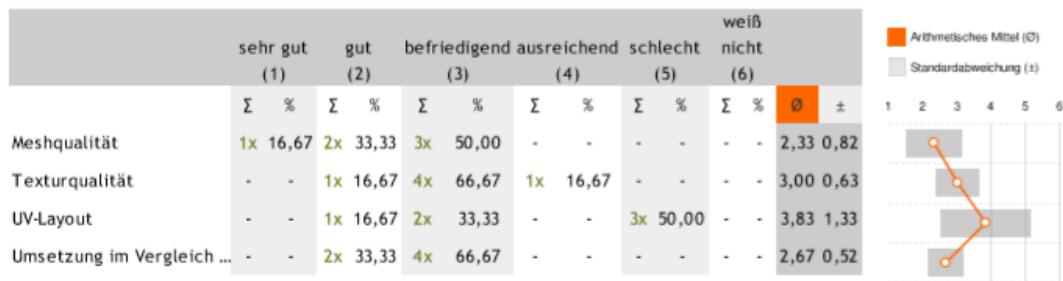


Abbildung 132. Faktorenbewertung der in Meshroom erstellten Burg

Die weichgespülte Oberfläche sowie diverse Lücken beim Durchgang wurden von einem Teilnehmer angemerkt, der dieses Modell auch als zweitbestes Ergebnis betitelte.

Bei der abschließenden Frage für welches Burgmodell sich die Experten entscheiden würde, bevorzugten fünf das Modell von RealityCapture, einer würde mit dem von Meshroom erstellten Burgmodell arbeiten wollen.

### 7.2.2 Leiterwagen

#### 7.2.2.1 Agisoft Metashape

Da der Leiterwagen in Metashape absolut ungenügend rekonstruiert wurde, überrascht das Ergebnis dieses Abschnittes in keiner Weise. Alle Teilnehmer haben die Mesh- und Texturqualität, sowie die Umsetzung zum realen Objekt mit der Note 5 beurteilt, siehe dazu Abbildung 133. Lediglich das UV-Layout wurde positiver bewertet. Ein Experte merkte an, dass dieses Modell, trotzdem es die schlechteste Rekonstruktion aufweist, das beste UV-Layout besitzt.

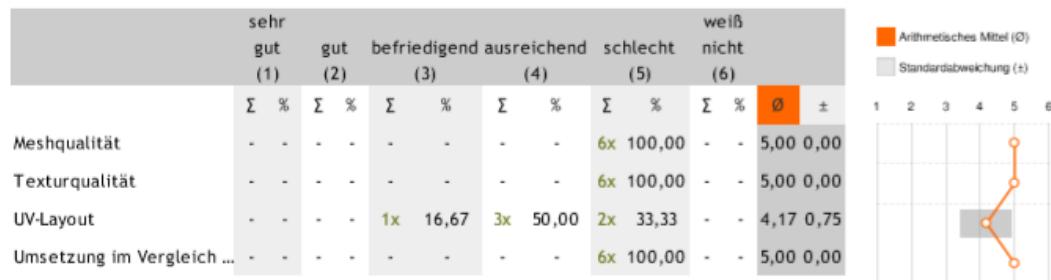


Abbildung 133. Faktorenbewertung des in Metashape erstellten Leiterwagens

#### 7.2.2.2 RealityCapture

Das 3D Modell, dass RealityCapture generierte wurde positive als jenes der zwei anderen Programme bewertet. So schnitt die Meshqualität mit einem Mittelwert

## 7 Expertenbefragung

von 2,5 ab. Die Texturqualität war für die Hälfte der Experten als befriedigend zu bezeichnen. Das UV-Layout hingegen wurde von den meisten als ausreichend empfunden. Die Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt betrifft, bewerteten die Umfrageteilnehmer im Durchschnitt mit einem Befriedigend (Abbildung 134).

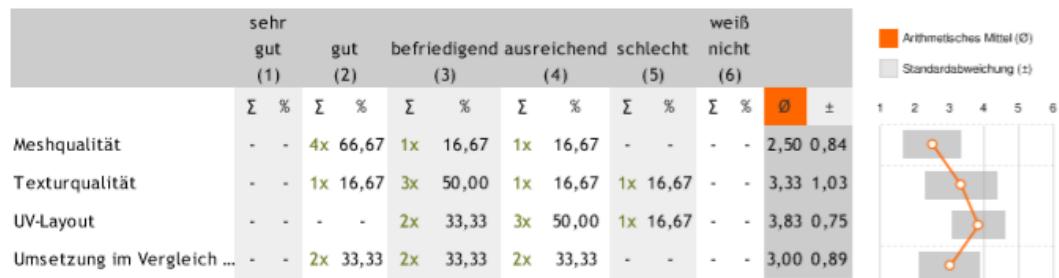


Abbildung 134. Faktorenbewertung des in RealityCapture erstellten Leiterwagens

### 7.2.2.3 Meshroom

Auch Meshroom lieferte im Grunde ein sehr schlechtes Abbild des Leiterwagenmodells. Die Qualität des Meshes wurde von 5 Teilnehmern als schlecht empfunden, genauso wie die Umsetzung des Objektes. Lediglich die Texturqualität schnitt vergleichsweise etwas besser ab, ist jedoch auch als ausreichend zu bezeichnen, wie in Abbildung 135 verdeutlicht wird.

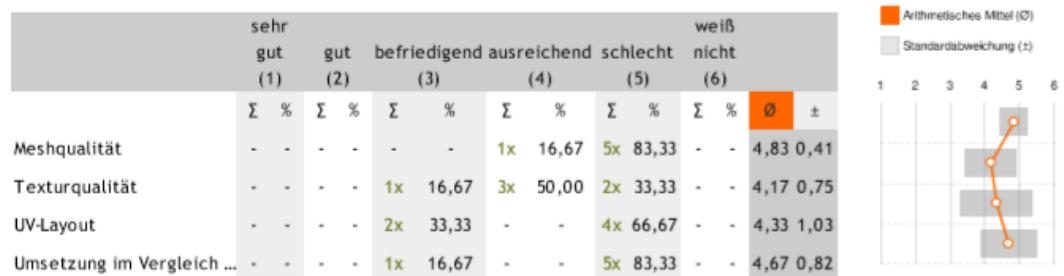


Abbildung 135. Faktorenbewertung des in Meshroom erstellten Leiterwagens

Wie ein Experte am Ende anmerkte, ist es bei einem Modell mit dermaßen einfach aufgebauter Geometrie sinnvoller, dieses per Hand zu modellieren, anstatt Photogrammetrie zu verwenden, oder mit einem dieser erstellten Modelle weiterzuarbeiten.

Wenig überraschend entschieden sich alle Teilnehmer für das von RealityCapture erstellte Modell des Leiterwagens am Ende dieses Abschnittes.

## 7 Expertenbefragung

---

### 7.2.3 Truhe

#### 7.2.3.1 Agisoft Metashape

Wie in Abbildung 136 zu sehen, wurde im Großen und Ganzen die von Metashape erstellte Truhe bei allen Faktoren eher zwischen befriedigend und ausreichend bewertet. Lediglich ein Teilnehmer benotete das Mesh und das UV-Layout mit einem Gut. Je die Hälfte der Experten beurteilten das Ergebnis des 3D Modelles im Vergleich zum realen Objekt mit befriedigend beziehungsweise ausreichend.

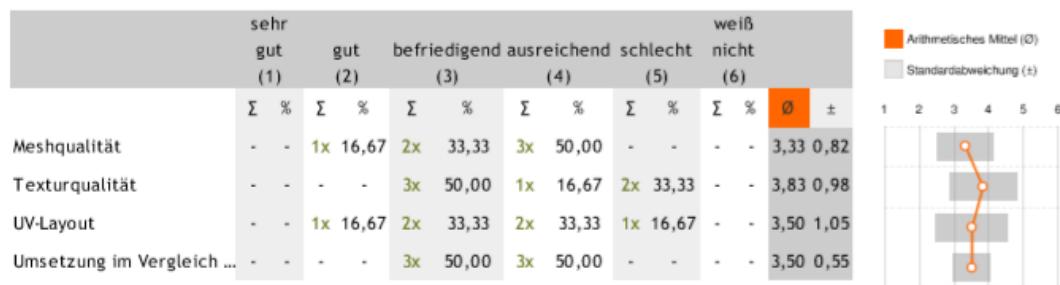


Abbildung 136. Faktorenbewertung der in Metashape erstellten Truhe

Ein Befragter gab in der optionalen Antwortbox an, dass die erste Software (Agisoft Metashape) wie immer das beste UV-Layout erstellte; die Löcher im Mesh, vor allem im Griff, nicht existieren dürfen, jedoch auch die Dellen am Deckel bei diesem Objekt am wenigstens ausgeprägt sind. Auch ein Mangel an fehlender Schärfe an den Scharnieren mindern den Gesamteindruck.

#### 7.2.3.2 RealityCapture

Drei Teilnehmer vergaben die Note Gut für die Qualität des Meshes beim 3D Modell von RealityCapture. Mehr als die Hälfte sah die Texturqualität als befriedigend an. Das UV-Layout konnte hingegen zwei Experten nicht überzeugen, diese vergaben die schlechteste Note für dieses Kriterium. Dennoch bewerteten vier die Umsetzung des Modelles mit einem Befriedigend, die verbleibenden zwei Experten befanden den Gesamteindruck als gut, wie in Abbildung 137 dargestellt wird.

## 7 Expertenbefragung

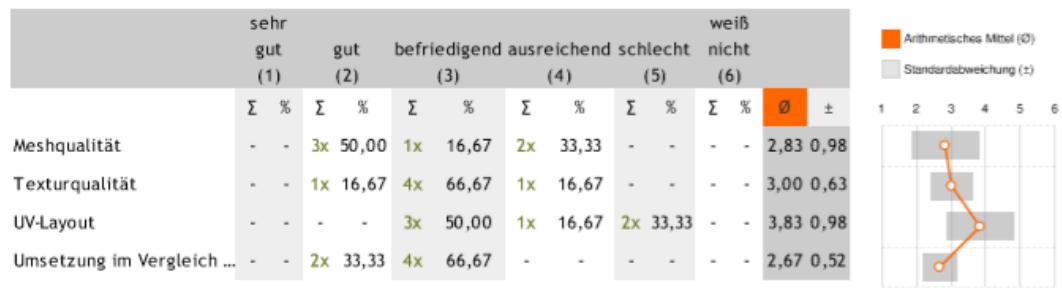


Abbildung 137. Faktorenbewertung der in RealityCapture erstellten Truhe

In der Anmerkung eines Experten war von einer möglichen falschen Specular Map oder Ähnlichem die Rede. Die Texturen überzeugten ihn bei keinem der drei Objekte, nur die Base Color wurde für ihn in RealityCapture besser umgesetzt.

### 7.2.3.3 Meshroom

Meshroom konnte die Experten bei diesem Modell nicht wirklich überzeugen, wie in der unteren Abbildung 138 ersichtlich. Die Meshqualität pendelte sich hier im Durchschnitt bei einem Ausreichend ein. Auch das UV-Layout wurde von vier Teilnehmern mit schlecht beurteilt.

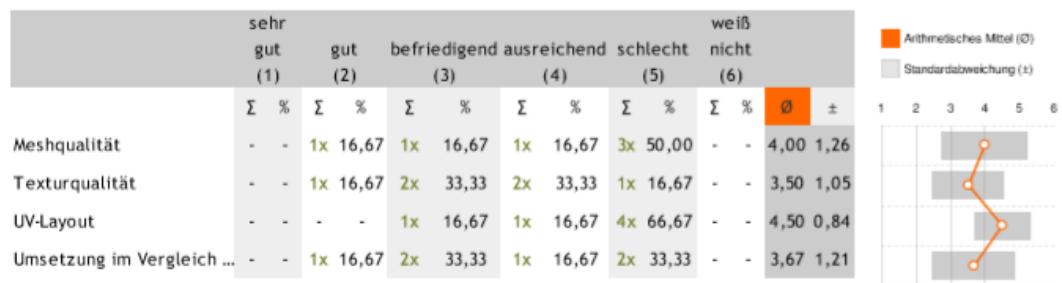


Abbildung 138. Faktorenbewertung der in Meshroom erstellten Truhe

Für einen Experten war der schlecht umgesetzte Deckel der Truhe, sowie die fehlenden Details die K.o.-Kriterien.

Drei Umfrageteilnehmer würden es bevorzugen mit dem von RealityCapture erstellten Truhenmodell weiter zu arbeiten, zwei entschieden sich für Metashape und einer präferierte die von Meshroom erstellte Truhe.

## 7 Expertenbefragung

### 7.2.4 Steine

#### 7.2.4.1 Agisoft Metashape

Die Meshqualität der Steine, die Agisoft Metashape generierte, wurden von vier Experten mit einem Gut bewertet, ebenso das UV-Layout, wie Abbildung 139 verdeutlicht. Bei der Umsetzung vergaben je drei ein Befriedigend beziehungsweise Ausreichend. Auffallend ist, dass alle abgefragte Faktoren einen Notendurchschnitt von 2,5 erhielten.

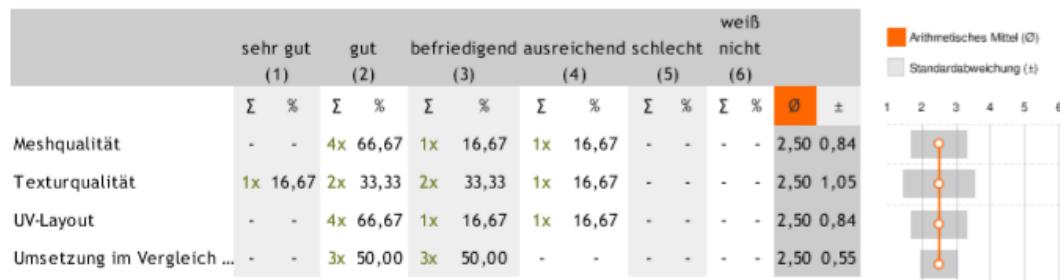


Abbildung 139. Faktorenbewertung der in Metashape erstellten Steine

Ein Teilnehmer bemängelte die fehlenden harten Konturen.

#### 7.2.4.2 RealityCapture

Abbildung 140 zeigt die Bewertung des zweiten Assets der Steine. Drei Teilnehmer evaluierten das Mesh mit einem Sehr gut, zwei mit Gut und der verbleibende Experte mit einem Befriedigend. Die Texturqualität konnte nur einen vollständig überzeugen, der Großteil fand diese jedoch gut. Die Generierung des UV-Layout fand dann auch weniger Begeisterung. Drei Teilnehmer bewerteten es mit ausreichend, die restlichen drei verteilten ihre Stimme auf Gut, Befriedigend und sogar Schlecht. Die Umsetzung des Gesamtmodells im Vergleich zum realen Objekt wurde von fünf Experten als gut empfunden, der andere beurteilten sie mit einem Sehr gut.

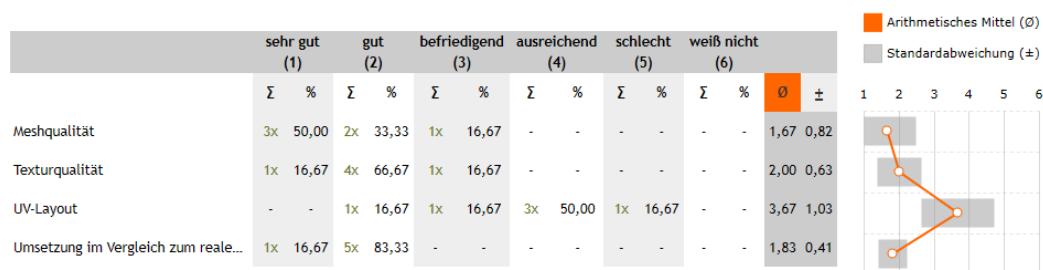


Abbildung 140. Faktorenbewertung der in RealityCapture erstellten Steine

## 7 Expertenbefragung

---

Bei der schriftlichen Anmerkung wurde darauf hingewiesen, dass dieses Modell die besten Details aufweist und sich auch die gewollten Einbuchtungen im 3D Asset wiederfinden.

### 7.2.4.3 Meshroom

Vier Experten vergaben für die Meshqualität des von Meshroom erstellten 3D Assets ein Gut, zwei ein Befriedigend. Bei der Texturqualität vergab einer ein Sehr gut, zwei ein Gut und die verbleibenden drei Experten ein Befriedigend. Das UV-Layout wurde, wie in den Modellen zuvor, vom Großteil eher schlecht beziehungsweise ausreichend bewertet (Abbildung 141). Zwei Teilnehmer konnten dem UV-Layout doch noch etwas abgewinnen und evaluierten es mit einem Gut. Die Umsetzung wurde insgesamt von vier Experten mit der Note 2 und von zwei mit einer 3 benotet.

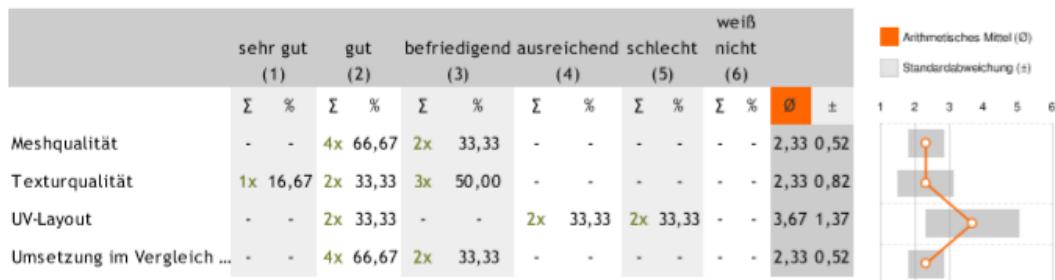


Abbildung 141. Faktorenbewertung der in Meshroom erstellten Steine

Am Ende des Teiles entschieden sich fünf der Experten für das Steinmodell von RealityCapture, einer bevorzugte das 3D Asset, dass Meshroom generierte.

# 8 Vermessungsgenauigkeit

Nachfolgend werden die Abweichungsdifferenzen der unterschiedlichen Programme gegenübergestellt und miteinander verglichen, um jene Modelle zu finden, die die größte Übereinstimmung in Bezug auf die Abbildungsgenauigkeit mit dem tatsächlichen Objekt aufweisen. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Vermessung mit einem handelsüblichen Rollbandmaß durchgeführt wurde und sich dadurch auch natürliche Schwankungsbreiten in der Höhe von 1mm ergeben können. Da des Weiteren auch in Autodesk Maya vermessen wurde, und es unmöglich ist, exakt an derselben Stelle, wie in der Realität zu messen, wird auch hier eine mögliche Abweichung von 1mm angenommen. Dadurch ergibt sich eine mögliche Gesamtschwankungsbreite von 2mm, die durch beide Messungen im schlimmsten Fall auftreten können.

Die verwendete Abkürzung *n.r.* steht in den Tabellen für nicht rekonstruiert.

## 8.1.1 Burg

Vergleicht man die erhaltenen Distanzen im 3D Raum der verschiedenen Burgen, stellt sich heraus, dass Meshroom die geringste durchschnittliche Abweichung, mit einem Wert von 1,8mm zu der realen Burg, aufweist. Jedoch gilt es hier zu berücksichtigen, dass weder Metashape, noch Meshroom die Steher auf dem Balkon reproduzieren konnten, und daher jeweils um drei Messwerte weniger aufweisen, siehe dazu Tabelle 14. Präferiert man die beste Rekonstruktion aller Details, so geht hier RealityCapture als Sieger hervor, da alle realen Abmessungen auch im späteren 3D Asset wiederzufinden waren.

*Tabelle 14. Abweichungsdifferenzen der Programme beim Burgmodell*

Beschreibung	Realmaße	Abweichungsdifferenz in cm		
		Metashape	RealityCapture	Meshroom
Höhe Eingang vorne	10	0,05	-0,11	0,24
Breite Eingang vorne	5,6	-0,1	-0,15	-0,3
Breite kaputter Steher	1,8	n.r.	-0,36	n.r.
Höhe kaputter Steher	4,8	n.r.	0,16	n.r.

## 8 Vermessungsgenauigkeit

im Lot				
<b>Länge kaputter Steher (schräg)</b>	5,2	n.r.	-0,18	n.r.
<b>Länge Dachschräge</b>	16,3	0,66	0,84	0,33
<b>Breite Fenster hinten</b>	2,4	-0,06	0,02	0,07
<b>Höhe Fenster hinten</b>	2,8	0,03	-0,01	0,1
<b>Tiefe des Balkons</b>	5	-0,06	-0,02	-0,06
<b>Höhe der Burg bis Balkon</b>	34,6	1,52	1,58	0,5
<b>Balkon Durchmesser (durch Tür gemessen)</b>	32,5	1,77	2,11	0,58
<b>Durchschnittliche Abweichung</b>		<b>0,46</b>	<b>0,35</b>	<b>0,18</b>

### 8.1.2 Leiterwagen

Da die Rekonstruktion des Leiterwagens bei Agisoft Metashape und Meshroom im Grunde kläglich gescheitert ist, wird hier nur der Vollständigkeit halber die Tabelle 15 angeführt, in der man erkennen kann, dass RealityCapture zumindest alle gemessenen Distanzen auch im 3D Raum rekonstruieren konnte. Meshroom liegt mit dem Wert 6,4mm nur um 0,1mm hinter RealityCapture, jedoch konnten auch hier sechs Distanzen mangels einer Rekonstruktion nicht überprüft werden. Somit hat RealityCapture die genaueste Umsetzung dieses Modells bewerkstelligt, wenn auch das Modell an sich, weit von einer brauchbaren Umsetzung entfernt ist.

Tabelle 15. Abweichungsdifferenzen der Programme beim Leiterwagenmodell

Beschreibung	Realmaße	Abweichungsdifferenz in cm		
		Metashape	RealityCapture	Meshroom
<b>Breite der Deichsel</b>	6,1	n.r.	0,04	0,22
<b>Breite des vorderen Querbalkens</b>	47,5	n.r.	0,55	2,03
<b>Länge der Ladefläche (rechts)</b>	60,1	n.r.	2,4	n.r.
<b>Länge des Radabstandes hinten</b>	30,3	n.r.	1,05	1,4
<b>Länge der linken Mittelsprosse</b>	19	n.r.	0,3	n.r.
<b>Breite des Handgriffes</b>	22,4	n.r.	0,08	0,2
<b>Höhe des Handgriffes</b>	8,2	n.r.	-0,08	0,1
<b>Länge rechte, hintere</b>	8,5	n.r.	0,09	n.r.

## 8 Vermessungsgenauigkeit

<b>Radsprosse (11 Uhr)</b>				
<b>Länge der rechten Seitenwandstrebe</b>	53	n.r.	1,7	n.r.
<b>Höhe über Boden hinten</b>	42,6	n.r.	1,5	n.r.
<b>Länge Radsprosse vorne links (07 Uhr)</b>	5	n.r.	-0,12	n.r.
<b>Breite Rad vorne links</b>	1,7	n.r.	-0,003	-0,01
<b>Durchschnittliche Abweichung</b>		keine Werte	<b>0,63</b>	<b>0,64</b>

### 8.1.3 Truhe

Da sich die Truhe als relatives simples Objekt erweist, war es nicht einfach viele Messungen von Distanzen zu erhalten. Die Werte konnten jedoch alle überprüft werden und auch hier beweist RealityCapture eine hohe Genauigkeit mit gerade einmal einer durchschnittlichen Abweichung von 1,1mm. Knapp dahinter Meshroom, wie Tabelle 16 verdeutlicht. Agisoft Metashape weicht hier um ein Vielfaches vom realen Objekt ab und kommt auf durchschnittlich 7,6mm.

*Tabelle 16. Abweichungsdifferenzen der Programme beim Truhenmodell*

<b>Beschreibung</b>	<b>Realmaße</b>	<b>Abweichungsdifferenz in cm</b>		
		<b>Metashape</b>	<b>RealityCapture</b>	<b>Meshroom</b>
<b>Länge der gesamten Truhe</b>	19	1,43	0,4	0,3
<b>Breite der Schnalle</b>	2,8	0,2	-0,71	-0,02
<b>Länge von Spitze zu Spitze (bei den Ornamenten oben am Griff)</b>	8,5	0,8	0,36	0,3
<b>Breite der Truhe unten links</b>	14,2	0,6	-0,03	-0,04
<b>Länge von Schnalle zu Schnalle</b>	11,6	1,1	0,43	0,2
<b>Höhe der Truhe</b>	13,3	0,4	0,22	-0,04
<b>Durchschnittliche Abweichung</b>		<b>0,76</b>	<b>0,11</b>	<b>0,12</b>

#### 8.1.4 Steine

Damit der Leser die Abmessungen des Steinmodells besser nachvollziehen kann, wurden die Steine nummeriert und der Rückseite des vierten Steines die Buchstaben A bis B zugewiesen, wie in Abbildung 142 und Abbildung 143 dargestellt wird.

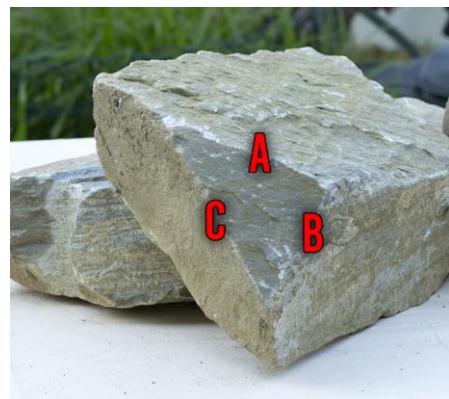


Abbildung 142. Nummerierung der Steine für die Vermessung

Abbildung 143. Seitenbenennung des vierten Steines

Bei diesem Modell stellt sich Meshroom eindeutig als akkurateste Software heraus, da die Berechnung der durchschnittlichen Abweichung gerade mal eine Differenz von 0,1mm zum realen Abbild ergibt. Tabelle 17 zeigt, dass RealityCapture auf eine Abweichung von 2,4mm kommt und Agisoft Metashape nimmt auch hier wieder den letzten Platz ein, mit einem abweichenden Wert von 3,2mm.

## 8 Vermessungsgenauigkeit

*Tabelle 17. Abweichungsdifferenzen der Programme beim Steinmodell*

Beschreibung	Realmaße	Abweichungsdifferenz in cm		
		Metashape	RealityCapture	Meshroom
<b>Länge Stein 1</b>	25,4	0,41	0,51	0,07
<b>Breite Stein 1</b>	9	0,2	0,21	-0,02
<b>Höhe Stein 1</b>	4,8	-0,1	-0,05	-0,16
<b>Länge Stein 3</b>	7,4	0,35	-0,07	-0,1
<b>Breite Stein 3</b>	10,4	-0,02	0,06	-0,37
<b>Höhe Stein 3</b>	17,4	0,36	0,16	0,28
<b>Seite A Stein 4</b>	12,6	0,2	0,16	0
<b>Seite B Stein 4</b>	10,1	0,21	0,13	-0,11
<b>Seite C Stein 4</b>	14,7	0,2	0,19	0,17
<b>Länge Stein 5</b>	35,5	1,64	1,29	0,2
<b>Breite Stein 5</b>	14	0,47	0,4	0,24
<b>Höhe Stein 5</b>	7,5	-0,04	-0,055	-0,023
<b>Durchschnittliche Abweichung</b>		<b>0,32</b>	<b>0,24</b>	<b>0,01</b>

## 9 Analyseergebnisse und Vergleich der Programme

Um etwaige Übereinstimmungen beziehungsweise Differenzen zwischen den gewählten Photogrammetrieprogrammen festzustellen, beschäftigt sich dieses Kapitel mit der Auswertung der erhaltenen Messdaten und vergleicht die 3D Distanzen mit den tatsächlichen Abmessungen der Modelle. Um diese Messgenauigkeit zu begutachtet, werden gegen Ende dieses Kapitel statistische Methoden herangezogen.

Zuvor werden die Berechnungszeiten miteinander verglichen und die erhaltenen Ergebnisse der Expertenbefragung aus Kapitel 7 aufgelistet.

Die Auswertung der Modelle in Kapitel 6, wird an dieser Stelle nicht in die Bewertung der drei Photogrammetrieprogramme einfließen, da sie die Meinung des Autors widerspielt. Jedoch war dieses Kapitel unverzichtbar, da es die aufgetretenen Problembereiche bei den einzelnen 3D Modellen beleuchtet.

### 9.1 Ergebnisse der Processing Times

*In der unten abgebildeten*

Tabelle 18 werden die benötigten Berechnungszeiten der einzelnen Objekte für jedes Programm aufgelistet. Hier wird nun schnell ersichtlich, dass RealityCapture immer am schnellsten die 3D Assets generieren konnte. Knapp dahinter Agisoft Metashape und das Schlusslicht bei der Geschwindigkeit nimmt somit die Open Source Alternative Meshroom ein, die jedes Mal um ein Vielfaches länger für die Erstellung der 3D Objekte benötigt.

## 9 Analyseergebnisse und Vergleich der Programme

---

*Tabelle 18. Übersicht der Berechnungszeiten der Programme und der Objekte*

Objekt	Metashape	RealityCapture	Meshroom
<b>Burg</b>	00:08:48	00:06:14	01:01:34
<b>Leiterwagen</b>	00:07:57	00:05:26	05:53:49
<b>Truhe</b>	00:05:10	00:02:39	00:51:18
<b>Steine</b>	00:08:04	00:05:09	00:49:11
<b>Durchschnittliche Berechnungszeit</b>	<b>00:07:30</b>	<b>00:04:52</b>	<b>02:08:58</b>

Die Dauer der Berechnung ergibt sich hier aus der Größe und Komplexität des zu reproduzierenden Objektes. So ist zum Beispiel RealityCapture bei der Generierung des Burgmodells fast zehn Mal schneller als Meshroom. Wenn man nur auf die Geschwindigkeit der Objekterstellung achtet, spricht das klar für die Nutzung von RealityCapture.

## 9.2 Ergebnisse der Expertenbefragung

In diesem Abschnitt folgt eine Gegenüberstellung der Kriterien, die zuvor im Kapitel 7.2 der Expertenbefragung evaluiert wurden, um die Benotung der einzelnen Modelle besser nachvollziehen zu können und somit eine Reihung der Programme anhand der Präferenzen der Experten zu ermöglichen.

*Tabelle 19. Kriterienbewertung der Experten für das Burgmodell*

	Noten im Durchschnitt		
	Metashape	RealityCapture	Meshroom
<b>Meshqualität</b>	4,17	2,17	2,33
<b>Texturqualität</b>	2,83	1,67	3
<b>UV-Layout</b>	3	3,17	3,83
<b>Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt</b>	3,5	2,17	2,67

## 9 Analyseergebnisse und Vergleich der Programme

*Tabelle 20. Kriterienbewertung der Experten für das Leiterwagenmodell*

	Noten im Durchschnitt		
	Metashape	RealityCapture	Meshroom
<b>Meshqualität</b>	5	2,5	4,83
<b>Texturqualität</b>	5	3,33	4,17
<b>UV-Layout</b>	4,17	3,83	4,33
<b>Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt</b>	5	3	4,67

*Tabelle 21. Kriterienbewertung der Experten für das Truhenmodell*

	Noten im Durchschnitt		
	Metashape	RealityCapture	Meshroom
<b>Meshqualität</b>	3,33	2,83	4
<b>Texturqualität</b>	3,83	3	3,5
<b>UV-Layout</b>	3,5	3,83	4,5
<b>Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt</b>	3,5	2,67	3,67

*Tabelle 22. Kriterienbewertung der Experten für das Steinemodell*

	Noten im Durchschnitt		
	Metashape	RealityCapture	Meshroom
<b>Meshqualität</b>	2,5	1,67	2,33
<b>Texturqualität</b>	2,5	2	2,33
<b>UV-Layout</b>	2,5	3,67	3,67
<b>Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt</b>	2,5	1,83	2,33

Betrachtet man die durchschnittliche Notenvergabe der Experten für die jeweiligen 3D Modelle in der Tabelle 19 bis Tabelle 22, wird schnell ersichtlich, dass für die Experten den Ergebnissen von RealityCapture im Grunde jenen Modellen von Metashape und Meshroom der Vorzug gegeben wird.

Somit würde die Mehrheit der Experten RealityCapture auf Platz 1 sehen. Überraschenderweise nimmt Meshroom den zweiten Platz ein, und liefert für die Umfrageteilnehmer bessere Ergebnisse, als Agisoft Metashape. Beachtet man nun, dass Agisoft Metashape schon lange auf den Markt ist und Metashape in dieser Form erst ein paar Monate verfügbar, kann man die Open Source

Alternative Meshroom getrost verwenden und weiterempfehlen, wenn man gewillt ist, sich mit der Software verstört auseinanderzusetzen, da der nodebasierte Workflow und die teilweise noch spärliche Dokumentation Probleme bereiten könnten.

### 9.3 Ergebnisse der Vermessungsgenauigkeit

Für die Analyse der Messdifferenzen kamen sowohl Methoden der Deskriptivstatistik (z.B. Grafiken oder Maßzahlen) und der Inferenzstatistik (z.B. T-Test) zur Anwendung. (Raab-Steiner & Benesch, 2012, S. 15–17) Die Auswertung erfolgt mit Hilfe der Programmiersprache R und die Codes für die jeweiligen Berechnungen werden jeweils unterhalb in Listing 1 – Listing 3 beschrieben.

Der nachfolgende Box-Plot in Abbildung 144 soll zunächst einen Überblick über die Verteilung der gemessenen Messfehler je analysiertem Photogrammetrieprogramm geben. Ein Box-Plot visualisiert robuste Streuungs- und Lagemaße. Der dicke Markierungsstrich innerhalb der Boxen zeigt die jeweilige Lage des Medians. Bei der Ober- und Unterkante der Boxen handelt es sich um das 25%- und 75%-Quantil, sodass innerhalb der Box jeweils 50 % der Beobachtungen liegen. Die *Antennen* an den beiden Enden der Boxen reichen bis zu den jeweiligen Minimum- und Maximalwerten. (Field, Miles, & Field, 2013, S. 257–263)

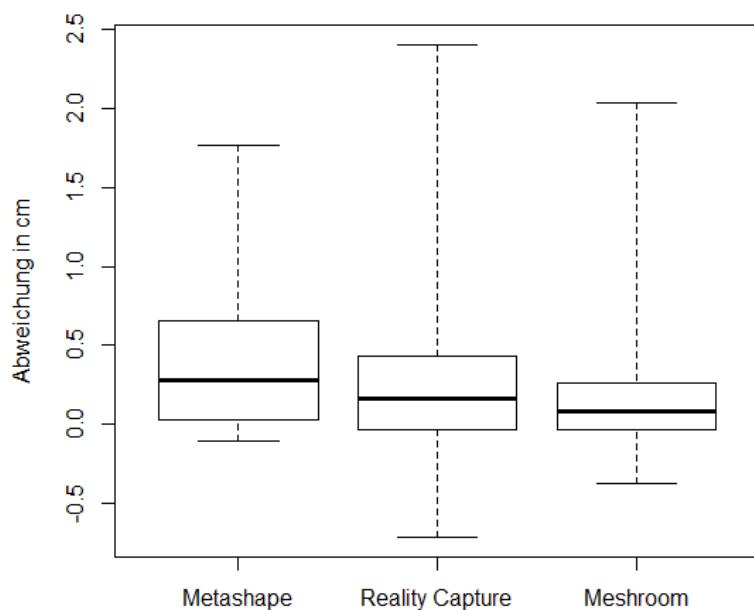


Abbildung 144. Vergleich der Programme mittels Box-Plots

## 9 Analyseergebnisse und Vergleich der Programme

---

### *Listing 1. Code für die Erstellung der Box-Plots in R*

```
mess_dt = Datentabelle, die die Vermessungsdifferenzen beinhaltet
boxplot(mess_dt[Kennzahl == "Differenz",c("Metashape", "RealityCapture", "Meshroom")],
        main="Vergleich der Programme anhand von Box-Plots", ylab="Abweichung in cm", range
        = 0)
```

Wie der obige Box-Plot zeigt, weicht der Median von Meshroom am geringsten von 0 ab, zudem ist die Spannweite des oberen und unteren Quantils am geringsten, demzufolge liegen 50 % der Messdifferenzen mit Abweichungen zwischen ca. 0 und 0,25 cm sehr nahe am Median-Messfehler.

Die größte Abweichung gemäß des Median wurde bei Metashape gemessen, auch der Interquartilsabstand ist am größten. Die Ausreißer nach oben und unten sind hingegen am geringsten ausgeprägt. Die meisten Ausreißer der Messfehler wurden bei RealityCapture festgestellt.

Im Allgemeinen kann auf Basis der Verteilungsanalyse anhand des Box-Plots festgehalten werden, dass die Photogrammetrieprogramme die tatsächlichen Realmaße – bzw. die Maße der einzelnen Details der analysierten Objekte – tendenziell überschätzen. Dies zeigt sich daran, dass zum einen der Median bei allen Programmen größer 0 ist und zum anderen streuen die Messfehler deutlich stärker nach oben.

In der unten angeführten Tabelle 23 werden wesentliche Kenngrößen zur Beurteilung der Messgenauigkeit aufgelistet, um die drei Softwarelösungen miteinander vergleichen zu können. Da es sich bei den Messwerten um verhältnisskalierte Daten handelt, wird im Folgenden anstelle des Medians der Mittelwert für die Analyse herangezogen. (Raab-Steiner & Benesch, 2012, S. 31)

Zur Beurteilung, welches Programm am präzisesten gemessen hat, ist der Mittelwert gemeinsam mit der Standardabweichung zu berücksichtigen. In Bezug auf die Fragestellung, welches Programm die besten Messresultate erzielt hat, darf die Relevanz der Standardabweichung nicht vernachlässigt werden. Würde nämlich ein Photogrammetrieprogramm eine Standardabweichung von 0 erzielen, so wäre der Messfehler konstant und könnte somit durch eine simple Addition einer Konstante korrigiert werden.

## 9 Analyseergebnisse und Vergleich der Programme

---

Tabelle 23. Kenngrößen zur Beurteilung der Messgenauigkeit

Programm	Mittelwert	Mittelwert absoluter Messfehler	Standard- abweichung	Spannweite des 95%- Konfidenz- intervalls	Stichproben- größe
<b>Agisoft Metashape</b>	0,47	0,50	0,57	0,44	26
<b>RealityCapture</b>	0,37	0,46	0,67	0,42	41
<b>AliceVision Meshroom</b>	0,19	0,27	0,46	0,32	32

Eine Berücksichtigung des arithmetischen Mittelwerts könnte jedoch auch zu Fehlinterpretationen führen, da sich positive und negative Messfehler bei Berechnung des Mittelwerts gegenseitig ausgleichen würden. Dieses Problem kann umgangen werden, indem der Mittelwert auf Basis von *Absolutwerten der gemessenen Messfehler* berechnet wird (siehe Spalte „Mittelwert absoluter Messfehler“ in Tabelle 23).

Die Open Source Software Meshroom weist die geringste mittlere Messdifferenz, sowie, gemessen anhand der Standardabweichung, die geringste Variabilität der Messfehler auf. Auch der *Mittelwert absoluter Messfehler* ist deutlich am niedrigsten.

RealityCapture hingegen kommt zwar auf eine geringere mittlere Messdifferenz im Vergleich zu Agisoft Metashape, allerdings ist die Schwankungsbreite etwas höher.

Die Standardabweichungen erscheinen für alle Programme mit Werten zwischen von 0,46 und 0,67 als relativ hoch

Zudem ist die Variabilität der Mittelwerte von Interesse. Hierzu wurde für alle drei Programme das 95 % Konfidenzintervall des Mittelwerts berechnet, welche von nachfolgender Abbildung 145 veranschaulicht werden (die Spannweiten des 95%-Konfidenzintervalls der Mittelwerte je Tool können obiger Tabelle entnommen werden). Das 95%-Konfidenzintervall ist derart definiert, dass die Berechnung von Konfidenzintervallen auf Basis von Zufallsstichproben aus der Grundgesamtheit in 95 % der Fälle den wahren Parameter umschließen werden,

## 9 Analyseergebnisse und Vergleich der Programme

---

wobei eine Normalverteilung hier implizit angenommen wird. (Field et al., 2013, S. 113–117)

Wie Field (2013, S. 117) erläutert, berechnet sich das 95%-Konfidenzintervall wie folgt:

Obergrenze des 95%-Konfidenzintervalls:  $Mittelwert + (1,96 * Standardfehler)$

Untergrenze des 95%-Konfidenzintervalls:  $Mittelwert - (1,96 * Standardfehler)$

Hierbei berechnet sich der Standardfehler anhand folgender Formel:

Standardfehler: 
$$\frac{\text{Standardabweichung}}{\sqrt{\text{Stichprobengröße}}}$$

Der Standardfehler steht damit in direktem Zusammenhang mit der Stichprobengröße.

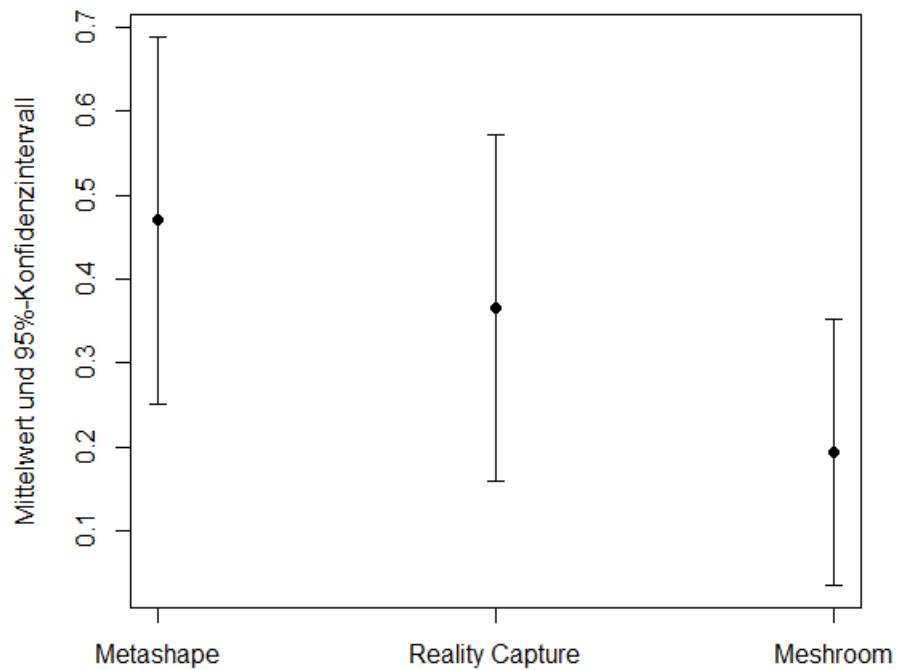


Abbildung 145. Fehlerbalkendiagramm der verwendeten Softwarelösungen

## 9 Analyseergebnisse und Vergleich der Programme

---

### *Listing 2. R-Code für die Erstellung des Fehlerbalkendiagrammes*

```
SE_func <- function(x) sqrt(var(x, na.rm=TRUE) / sum(!is.na(x), na.rm = TRUE)) * 1.96
plot_dt <- data.table("means_val" = apply(mess_dt[,4:6,with = F],2, function(x) mean(x, na.rm=T)))
plot_dt$SE_val <- apply(mess_dt[,4:6,with = F],2, function(x) SE_func(x))
plot_dt[,upper_bound := means_val + SE_val]
plot_dt[,lower_bound := means_val - SE_val]

x <- c(1, 2, 3)
plot(x, plot_dt$means_val,xaxt="n",
      ylim=range(c(plot_dt$lower_bound, plot_dt$upper_bound)),
      #axis(side=1, at=c(1:3)),
      pch=19, xlab="Photogrammetrieprogramme", ylab="Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall",
      main="Fehlerbalken-Diagramm"
)
axis(1, at=1:3 , labels= c("Metashape", "RealityCapture", "Meshroom"))
arrows(x, plot_dt$lower_bound, x, plot_dt$upper_bound, length=0.05, angle=90, code=3)
```

Gemäß der obigen Abbildung 145 besitzt Meshroom die geringste Mittelwert-Variabilität. Im Gegensatz zur Darstellung der Standardabweichung ist das Konfidenzintervall von RealityCapture nun etwas geringer als jenes von Metashape. Insgesamt zeigt sich ein ähnliches Bild wie zuvor, was zu erwarten war, da das Konfidenzintervall auf der Standardabweichung aufsetzt. Dass RealityCapture in Bezug auf die Variabilität nun im Vergleich zu Metashape etwas besser abschneidet, ist auf die etwas höhere Stichprobengröße zurückzuführen.

Um eine Aussage treffen zu können, ob es statistisch signifikante Unterschiede hinsichtlich der Vermessungsqualität der drei Programme gibt, wurde auf inferenzstatistische Prüfprozeduren zurückgegriffen. (Raab-Steiner & Benesch, 2012, S. 15–18) Es wurden jeweils sowohl parametrische als auch nichtparametrische Testverfahren angewandt. Parametrische Testverfahren weisen eine höhere Güte auf, sofern dessen umfangreichere Testvoraussetzungen – normalverteilte Daten, Varianzhomogenität etc. – erfüllt sind. (Field et al., 2013, S. 292–294)

Nichtparametrische Testverfahren sind robust und stellen eine Alternative dar, wenn die Voraussetzungen für die Anwendung von parametrischen Testverfahren nicht erfüllt sind. (Field et al., 2013, S. 1001)

Dass jeweils parametrische und nichtparametrische Testverfahren angewandt wurden stellt eine Vereinfachung dar. Da beide Verfahren zu denselben

## 9 Analyseergebnisse und Vergleich der Programme

---

statistischen Schlussfolgerungen kamen, wurde auf das Prüfen der Testvoraussetzungen – z.B. Varianzhomogenität – verzichtet.

Zur Beurteilung, ob ein statistisch signifikantes Testergebnis vorliegt, wird in wissenschaftlichen Publikationen häufig ein Signifikanzniveau – auch Irrtumswahrscheinlichkeit genannt – von 0,05 herangezogen. (Kähler, 2008, S. 252)

Auch in dieser Arbeit wurde ein Signifikanzniveau von 0,05 definiert. Liefert damit ein Testverfahren eine Signifikanz „p“ kleiner 0,05, so wird das Testresultat als signifikant beurteilt und sohin die Nullhypothese verworfen.

Um zu eruieren, welches Programm vergleichsweise am genauesten bzw. ungenauesten misst, wurden die drei Programme unter Zuhilfenahme des T-Tests sowie Mann-Whitney-U-Tests paarweise miteinander verglichen. Der T-Test ist das geeignete Testverfahren, um Mittelwerte zweier Testgruppen zu vergleichen. (Field et al., 2013, S. 588–590)

Zusätzlich kam auch dessen nichtparametrisches Gegenstück, der Mann-Whitney-U-Tests, zur Anwendung. (Field et al., 2013, S. 1002)

Die statistischen Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle 24 dargestellt; die Legende zu den Abkürzungen findet sich direkt unter der Tabelle.

*Tabelle 24. Ergebnisse der T-Tests und U-Tests*

Paarweiser Vergleich	T-Test-Ergebnis	U-Test-Ergebnis
<b>Meshroom vs. Metashape</b>	$t = -2,05$ ; $df = 56$ ; $p = 0,045$	$U = 284,5$ ; $p = 0,040$
<b>Meshroom vs. RealityCapture</b>	$t = -1,24$ , $df = 71$ , $p = 0,219$	$U = 591$ , $p = 0,473$
<b>Metashape vs. Reality</b>	$t = 0,66$ , $df = 65$ , $p = 0,514$	$U = 630,5$ , $p = 0,2119$

**t = Wert der Teststatistik des T-Tests**

**df = Freiheitsgrade**

**p = Signifikanzwert**

**U = Wert der Teststatistik des U-Tests**

---

## 9 Analyseergebnisse und Vergleich der Programme

---

### *Listing 3. Code für die T-Tests bzw. U-Tests*

```
t.test(MessDiff ~ Tool, data = mess_dt[Tool %in% c("Meshroom", "Metashape")], var.equal = TRUE)
t.test(MessDiff ~ Tool, data = mess_dt[Tool %in% c("Meshroom", "RealityCapture")], var.equal = TRUE)
t.test(MessDiff ~ Tool, data = mess_dt[Tool %in% c("Metashape", "RealityCapture")], var.equal = TRUE)
wilcox.test(MessDiff ~ Tool, data = mess_dt[Tool %in% c("Meshroom", "Metashape")], alternative = "two.sided")
wilcox.test(MessDiff ~ Tool, data = mess_dt[Tool %in% c("Meshroom", "RealityCapture")], alternative = "two.sided")
wilcox.test(MessDiff ~ Tool, data = mess_dt[Tool %in% c("Metashape", "RealityCapture")], alternative = "two.sided")
```

Gemäß dem zweiseitigen T-Test ist die Differenz der Messdifferenzen zwischen Meshroom und Metashape als signifikant zu beurteilen. Der Unterschied zwischen Meshroom und RealityCapture sowie insbesondere zwischen Metashape und RealityCapture sind hingegen nicht signifikant.

Demzufolge kann geschlussfolgert werden, dass die Vermessungsgenauigkeit von Meshroom signifikant besser ist als jene von Metashape, während gemäß den statistischen Ergebnissen bei allen übrigen paarweisen Gegenüberstellungen die Nullhypothese, welche keine Unterschiede zwischen den Programmen bzw. identische Mittelwerte annimmt, nicht verworfen werden kann.

Würde man nun Mittelwert und Standardabweichung heranziehen, so würde AliceVision Meshroom die genauesten 3D Objekte im Bezug zu der Realität abliefern.

Allerdings hat der T- und U-Test gezeigt, dass die Unterschiede teilweise nicht signifikant sind. Vor diesem Hintergrund ist eine dezidierte Schlussfolgerung, welches Programm am genauesten bzw. ungenauesten misst, nur mit Vorsicht zu treffen. Nichtsdestotrotz lassen die Mittelwerte und Standardabweichungen eine Tendenz erkennen. Aufgrund des signifikanten Ergebnisses des Vergleiches von Meshroom und Metashape, wäre Meshroom dem Programm Metashape in Hinblick auf die Vermessungsgenauigkeit vorzuziehen.

## 10 Fazit

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden drei Photogrammetrieprogramme miteinander verglichen, um herauszufinden, ob diese ähnliche beziehungsweise gleichwertige Ergebnisse liefern, oder ob die kostenlose Alternative Meshroom im Gegensatz zu den professionellen Programmen Agisoft Metashape oder RealityCapture bei weitem schlechtere Modelle erzeugt.

Dazu wurden in den drei Softwarelösungen jeweils vier Modell erstellt, diese Experten zur Bewertung vorgelegt, eine eigenständige Beurteilung der visuellen Auffälligkeiten durchgeführt, sowie die Vermessungsgenauigkeit und Processing Times als Kriterien herangezogen.

Prinzipiell ist festzuhalten, dass die Gesamtqualität der generierten Modelle im Auge des Betrachters liegt. Viele bevorzugen hier eine detaillierte Umsetzung des Meshes, anderen wiederum ist die Textur etwas wichtiger, jedoch hat auch die gewünschte Weiterverwendung des Objektes Einfluss auf die Entscheidung.

Durch die Durchführung des praktischen Teiles und dessen Auswertung in Kapitel 6 konnte bewiesen werden, dass die Programme ihre Probleme mit Verdeckungen, Spiegelungen, Unschärfe, Über- bzw. Unterbelichtung sowie harten Schatten haben. Das wird durch die bildliche Dokumentation der visuellen Auffälligkeiten in dieser Arbeit bestätigt. Hier kam es hauptsächlich zur Bildung von Artefakten, da auf Grund schwer zugänglicher Bereiche nicht genügend Fotos von allen Winkeln auf die betreffenden Abschnitte erstellt werden konnte, wie es z.B. bei dem eng aneinander liegenden Steinmodell der Fall war. Auch die unscharfen Texturpassagen sind zum Teil auf fehlende Schärfe bei den Ausgangsbildern zurückzuführen.

Das sich transparentes Material und hochreflektierende Oberflächen wie Chrom nicht eignen, wurde in einem kurzen Versuch in Kapitel 4.1 verifiziert und spätestens beim Modell der Truhe erneut aufgezeigt, da die leicht glänzende Oberfläche zu Einbuchtungen des Deckels führte, sowie auch Probleme bei der Textur auslöste, da hier bestimmte Bereiche durch die Reflexion heller wiedergegeben wurden.

## 10 Fazit

---

An dieser Stelle ist auch anzumerken, dass die Programme grundsätzlich auch Probleme mit der sinnvollen Erstellung eines UV-Layouts haben, wie auch von den Experten in Ihren Bewertungen festgehalten. Sollte man die Texturen im Nachhinein noch bearbeiten wollen, wird einem auch eine Überarbeitung und Neuerstellung des UV-Layouts bei keinem der getesteten Programme erspart bleiben.

In der Expertenbefragung ließ sich eine klare Tendenz für die von RealityCapture erstellten Objekte erkennen, da hier zumindest stets mehr als die Hälfte der Teilnehmer sich für die von diesem Programm erstellten 3D Assets entschied. Wie schon erwähnt finden hier auch die Ergebnisse von Meshroom im Gegensatz zu den Modellen von Agisoft Metashape großen Anklang. Dies lässt eine Verifizierung der Annahme, dass professionelle Programme grundsätzlich bessere, detaillierte Ergebnisse liefern als Freeware nicht wirklich zu, dafür schnitten die erstellten Modelle von Meshroom in den Augen der Experten zu gut ab.

Lässt man nun die Ergebnisse der Processing Times einfließen, sprechen diese erneut für die Verwendung von RealityCapture, da es durchschnittlich um mehr als 2,5 Minuten schneller als Metashape die Modelle generierte. Meshroom arbeitet hier offensichtlich noch lange nicht so optimiert, da die Berechnungszeit der einzelnen Modelle jeweils mindestens 50 Minuten in Anspruch nahm. Dadurch konnte die Annahme verifiziert werden, dass die professionellen Programme hinsichtlich des Rechenaufwandes optimierter arbeiten.

Die Ergebnisse der Vermessungsgenauigkeit im Kapitel 9.3 lassen über den Mittelwert und die Standardabweichung die Tendenz vermuten, dass erstaunlicherweise die Open Source Software Meshroom die ähnlichste bzw. realistischste Reproduktion im Bezug auf das reale Objekt vollzog.

Unterm Strich lässt sich also durchaus behaupten, dass es möglich ist mit gratis Software wie Meshroom Ergebnisse zu generieren, die mit teurer High-End Software konkurrieren können, auch wenn man aktuell noch einige Abstriche in Kauf nehmen muss, die sich unter anderem auch in der langen Processing Time manifestieren.

Die professionellen Photogrammetrie Agisoft Metashape und RealityCapture bieten natürlich eine Vielzahl von tiefgehenden Optionen, die den teilweise hohen Kauf- bzw. Abopreis rechtfertigen. Diese Einstellungsmöglichkeiten sind jedoch weitgehend sehr speziell und ein Großteil der Benutzer dürfte mit den Möglichkeiten, die die Standardversionen bzw. sogar Meshroom anbieten, zufrieden sein.

## 10 Fazit

---

Abschließend ist zu sagen, dass alle Programme ihre Vor- und Nachteile besitzen, für die Industrie jedoch die Geschwindigkeit, ganz nach dem Motto Zeit ist Geld, eine der Prioritäten ist. Aus diesem Grund und wegen der zahlreichen, erweiterten Einstellungen wird den kostenpflichtigen Photogrammetrieprogrammen, abgesehen von etwaigen wirtschaftlichen Gründen, wohl der Vorzug gegeben.

## 10.1 Ausblick

Abgesehen von den laufenden Entwicklungen, die die Prozessoren- und Grafikkartenindustrie mit sich bringen, und die sich positiv auf die Berechnungszeit und Genauigkeit der zu erstellenden 3D Objekte auswirkt, wird es spannend zu verfolgen sein, wie sich Open Source Software wie Meshroom weiterentwickelt. Dass die Firma AliceVision auf dem richtigen Weg ist, zeigt diese Diplomarbeit bereits. Es ist nur die Frage, ob sie sich gegen die großen Giganten zu beweisen weiß, und ihr Produkt und speziell die Algorithmen optimieren wird.

# Literaturverzeichnis

- 3D Scanning Reflective Objects With Photogrammetry. (2016, November 2). Abgerufen 6. Mai 2019, von 3D Scan Store website: <https://www.3dscanstore.com/blog/3d-scanning-reflective-objects>
- Agisoft Metashape User Manual—Professional Edition, Version 1.5.* (2019).
- Die Photogrammetrie. (1867). *Wochenblatt des Architektenvereins zu Berlin*, (49), 471–42.
- Donath, D. (2009). *Bauaufnahme und Planung im Bestand: Grundlagen -- Verfahren -- Darstellung -- Beispiele*. Abgerufen von <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9236-2>
- Failes, I. (2014, Juni 10). Live. Die. Repeat the effects. Abgerufen 2. Mai 2019, von Fxguide website: <https://www.fxguide.com/featured/live-die-repeat-the-effects/>
- Failes, I. (2015, Mai 29). A graphic tale: The visual effects of Mad Max: Fury Road. Abgerufen 2. Mai 2019, von Fxguide website: <https://www.fxguide.com/featured/a-graphic-tale-the-visual-effects-of-mad-max-fury-road/>
- Failes, I. (2016, Juli 20). 6 Special Effects You Never Noticed in Movies. Abgerufen 9. September 2019, von Thrillist website: <https://www.thrillist.com/entertainment/nation/special-effects-movies-fight-club-wolf-of-wall-street-back-to-the-future>
- Field, A., Miles, J., & Field, Z. (2013). *Discovering statistics using R* (Reprint). Los Angeles, Calif.: Sage.
- Hall, C. (2016, März 17). To ship Star Wars Battlefront, developers had to build their own AT-AT foot. Abgerufen 2. Mai 2019, von Polygon website: <https://www.polygon.com/2016/3/17/11251930/star-wars-battlefront-gdc-photogrammetry-at-at-foot>
- Hellard, P. (2017, April 26). MPC's visual feast for Ghost in the Shell. Abgerufen 2. Mai 2019, von Fxphd website: <https://www.fxphd.com/blog/mpc-ghost-in-the-shell/>

Holmes, M. (2017, April 26). Shooting for Photogrammetry. Abgerufen 6. Mai 2019, von Instructables website: <https://www.instructables.com/class/3D-Scanning-Class/>

Hugershoff, R. (1930). *Photogrammetrie und Luftbildwesen*. Wien: J. Springer.

Kähler, W.-M. (2008). *Statistische Datenanalyse: Verfahren verstehen und mit SPSS gekonnt einsetzen* (5., verb.erw. Aufl). Wiesbaden: Vieweg.

Kraus, K. (2004). *Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen* (7., vollst. bearb. und erw. Aufl). Berlin: de Gruyter.

Lachambre, S., Lagarde, S., & Jover, C. (2017). *Unity Photogrammetry Workflow*. Abgerufen von [https://unity3d.com/files/solutions/photogrammetry/Unity-Photogrammetry-Workflow\\_2017-07\\_v2.pdf](https://unity3d.com/files/solutions/photogrammetry/Unity-Photogrammetry-Workflow_2017-07_v2.pdf)

Lieberwirth, U., & Bussiliat, J. (2017). *Structure from Motion in der Archaeologie—Ein Lehrfilm* [DVD-Video/MP4]. Abgerufen von <https://doi.org/10.5446/35260>

Lowe, D. G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 1–28. <https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>

Luhmann, T. (2018). *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen - Methoden - Beispiele* (4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Berlin Offenbach: Wichmann.

MeshroomManual-v0.4.4. (2019). Abgerufen 9. Mai 2019, von Google Docs website: [https://docs.google.com/document/d/17HYtYS1tvx053k3\\_nO6Z2GnP2R3cXMIGMN-1W1e3kJE/edit?usp=sharing&usp=embed\\_facebook](https://docs.google.com/document/d/17HYtYS1tvx053k3_nO6Z2GnP2R3cXMIGMN-1W1e3kJE/edit?usp=sharing&usp=embed_facebook)

Nedomansky, V. (2019). The Ultimate History of CGI in Film | VashiVisuals. Abgerufen 9. September 2019, von <https://vashivisuals.com/the-ultimate-history-of-cgi-movies/>

OS and hardware requirements. (2018). Abgerufen 6. Mai 2019, von RealityCapture Support website: <http://support.capturingreality.com/hc/en-us/articles/115001524071-OS-and-hardware-requirements>

Poznanski, A. (2014, März 25). Visual Revolution of The Vanishing of Ethan Carter. Abgerufen 9. September 2019, von The Astronauts website: <http://www.theastronauts.com/2014/03/visual-revolution-vanishing-ethan-carter/>

Prager, S., & Kasper, H. (1961). *Das deutsche Luftbildwesen / Die Technik des Luftbildwesens*. Abgerufen von <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-322-96146-4>

Raab-Steiner, E., & Benesch, M. (2012). *Der Fragebogen: Von der Forschungsidee zur SPSS-Auswertung* (3., aktualisierte und überarb. Aufl.). Wien: Facultas-Verl.

Rambelli, G. (2018). *Creating Assets for Games using Photogrammetry* [The Gnomon Workshop]. Abgerufen von <https://www.thegnomonworkshop.com/tutorials/creating-assets-for-games-using-photogrammetry>

Silberman, S. (2003, Mai 1). MATRIX2. *Wired*. Abgerufen von <https://www.wired.com/2003/05/matrix2/>

Skonicki, M. (2018, Mai 19). PHG 101- Photogrammetry Pipeline. Abgerufen 4. Mai 2019, von <https://www.cgcircuit.com/course/phg-101--photogrammetry-pipeline>

Wiedemann, A. (2004). *Handbuch Bauwerksvermessung: Geodäsie, Photogrammetrie, Laserscanning*. Abgerufen von <http://link.springer.com/openurl?genre=book&isbn=978-3-0348-9615-3>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. („3D Scanning Reflective Objects With Photogrammetry“, 2016) Beispiel eines Positionsverlaufes der Kamera rund um ein Objekt.....	13
Abbildung 2. Oben die tatsächliche Chromkugel mit der 3D Rekonstruktion und unten der Glasschwan, der beweist, dass Glas auch nicht geeignet ist. ....	16
Abbildung 3. Mikaela Holmes zeigt unter anderem in ihrer 3D Scanning Class, (Holmes, 2017), wie man Objekte mit geringen Oberflächendetails vorbereitet. ....	17
Abbildung 4. Kameraausrichtung in Agisoft Metashape .....	18
Abbildung 5. Sony A7SII .....	23
Abbildung 6. FE 24–70 mm F4 .....	23
Abbildung 7. Canon 5D Mark III .....	23
Abbildung 8 Canon EF 100mm F2,8.....	23
Abbildung 9. Leiterwagen mit Referenzquader aus Holz auf dem Shootingtisch	26
Abbildung 10. Vermessung des Tores der Burg.....	27
Abbildung 11. Länge der Strebe des Leiterwagens.....	27
Abbildung 12. Die Höhe eines Steines beim vierten Objekt .....	27
Abbildung 13. Frontale Burgansicht .....	28
Abbildung 14. Burg, seitlich .....	28
Abbildung 15. Detailansicht des Balkons .....	29
Abbildung 16. Seitenansicht des Leiterwagens.....	30
Abbildung 17. Topansicht des Leiterwagens.....	30
Abbildung 18. Detailansicht des rechten Vorderrades.....	30
Abbildung 19. Seitenansicht der Truhe .....	31
Abbildung 20. Ansicht von oben auf die Truhe.....	31
Abbildung 21. frontaler Blick auf die Truhe.....	31

Abbildung 22. Blick von oben auf die aufgeschichteten Steine.....	32
Abbildung 23. Detailansicht der Steine, seitlich.....	32
Abbildung 24. Frontalansicht der verwendeten Steinkonstruktion .....	32
Abbildung 25. Adobe Lightroom mit den importieren RAWs.....	34
Abbildung 26. Tonwertkorrektur .....	34
Abbildung 27. Objektivkorrektur .....	34
Abbildung 28. Interface von Metashape .....	35
Abbildung 29. Verwendete Alignment Settings .....	36
Abbildung 30. Zusammenfassung des Alignments.....	36
Abbildung 31. Einstellungen für die dichte Punktfolke .....	37
Abbildung 32. Dense Point Cloud des Burg Models mit aktiver Bounding Box ...	37
Abbildung 33. Mesh Settings .....	37
Abbildung 34. Textur Settings.....	38
Abbildung 35. Interface RealityCapture.....	38
Abbildung 36. Alignment Einstellungen.....	39
Abbildung 37. Reconstruction Settings .....	39
Abbildung 38. Info Bereich.....	40
Abbildung 39. Berechnete Scene in RealityCapture.....	40
Abbildung 40. Meshroom Benutzeroberfläche .....	41
Abbildung 41. Beispiel der Nodesettings.....	42
Abbildung 42. Meshroom Cache Ordner.....	42
Abbildung 43. Feature Extraction Einstellungen.....	43
Abbildung 44. Image Matching Settings.....	43
Abbildung 45. Feature Matching Settings .....	44
Abbildung 46. Settings des Structure from Motion Nodes .....	45
Abbildung 47. Depth Map Settings.....	46
Abbildung 48. Meshing Node .....	46

Abbildung 49. Texture Node Einstellungen mit der Festlegung auf 4k .....	47
Abbildung 50. Measure Tool Box .....	48
Abbildung 51. Höhe des Holzquaders in Maya (gerundet) .....	49
Abbildung 52. Channel Box der Burg mit dem eingetragenen Skalierungsfaktor	50
Abbildung 53. Höhe des Quaders nach der Skalierung.....	50
Abbildung 54. alle Messungen der Burg, die durch RealityCapture generiert wurde.....	51
Abbildung 55. Closeup des Burgfensters mit Messpunkten .....	51
Abbildung 56. Alle getätigten Messungen des auf Real World skalierten Steine 3D Assets .....	51
Abbildung 57. Rund um die Burg sind schwebende Teilchen zu erkennen sogenannte Artefakte. Diese, sowie das erkennbare Tuch und die Referenzquader wurden von den Modellen entfernt.....	52
Abbildung 58. Frontalansicht der Burg von Metashape.....	55
Abbildung 59. Geländer der Burg.....	55
Abbildung 60. Detailansicht des Geländers.....	55
Abbildung 61. Verschmierter Bereich am Geländer .....	56
Abbildung 62. Felswand.....	56
Abbildung 63. Turmspitze .....	56
Abbildung 64. Meshansicht in Autodesk Maya.....	57
Abbildung 65. untexturiertes Modell.....	57
Abbildung 66. Detailansicht Geländer, seitlich .....	58
Abbildung 67. Frontalansicht der Burg .....	60
Abbildung 68. Detailreiche, raue Oberfläche.....	60
Abbildung 69. Detailansicht des Balkons des von RealityCapture erstellten Modells, mit nicht komplett rekonstruiertem Durchgang .....	61
Abbildung 70. Detailansicht; Loch im Boden des Balkons.....	61
Abbildung 71. Detailansicht der Textur .....	62
Abbildung 72 Durch Polygone verschlossener Haupteingang der Burg .....	62

Abbildung 73. extrem dicht erstelltes Mesh.....	63
Abbildung 74. Probleme an der Unterseite des Balkons .....	63
Abbildung 75. Premiere Pro mit der importieren Bildschirmaufnahme.....	64
Abbildung 76. Untexturierte Frontalansicht der Burg von Meshroom.....	66
Abbildung 77. Detailansicht Balkon.....	66
Abbildung 78. verschlossener Haupteingang .....	67
Abbildung 79. Oberflächenbeschaffenheit des Daches .....	67
Abbildung 80. variable Meshdichte .....	67
Abbildung 81. Detailansicht; zu geringe Auflösung des Geländers .....	68
Abbildung 82. variierender Texturschärfe (heller Stein, rechts oben) .....	68
Abbildung 83. Artefakte und deformierte Bereiche an der Unterseite des Balkons .....	69
Abbildung 84. Auflösung des Meshes des Leiterwagens .....	71
Abbildung 85. unzureichende Reproduktion.....	71
Abbildung 86. Leiterwagen von RealityCapture erstellt .....	73
Abbildung 87. Mesh des Leiterwagens .....	74
Abbildung 88. Hinterrad mit weißen Polygonartefakten.....	74
Abbildung 89. Bessere Umsetzung des Vorderrades.....	74
Abbildung 90. Topansicht des Leiterwagens.....	75
Abbildung 91. Seitenansicht des Leiterwagens.....	75
Abbildung 92. Leiterwagen in Meshroom erstellt.....	77
Abbildung 93. Seitenansicht .....	77
Abbildung 94. 3D Modell der Truhe von Metashape .....	79
Abbildung 95. Detailansicht Griff.....	79
Abbildung 96. Unscharfe Textur.....	79
Abbildung 97. Meshansicht der Truhe.....	80
Abbildung 98. Truhenschnalle, Detailansicht .....	80
Abbildung 99. Rückansicht der Truhe .....	81

Abbildung 100. Seitenansicht der Truhe .....	81
Abbildung 101. 3D Modell der Truhe von RealityCapture.....	83
Abbildung 102. Detailansicht des Henkels .....	83
Abbildung 103. sehr dichtes Mesh der Truhe.....	83
Abbildung 104. Rückseite der Truhe von RealityCapture .....	84
Abbildung 105. Seitenansicht der Truhe .....	84
Abbildung 106. fehlende Schärfe bei den Nieten .....	84
Abbildung 107. 3D Ansicht der Truhe von Meshroom .....	86
Abbildung 108. Meshansicht; eingedellte Bereiche auf der Oberseite.....	86
Abbildung 109. Rückansicht der Truhe .....	87
Abbildung 110. Detailansicht Henkel.....	87
Abbildung 111. Detailansicht Mesh; Schnalle .....	87
Abbildung 112. Topansicht der Truhe .....	88
Abbildung 113. Gesamtansicht des Steinobjektes .....	90
Abbildung 114. Detailansicht Steine.....	90
Abbildung 115. matschige Auflösung .....	90
Abbildung 116. dichtes Mesh der Steine .....	91
Abbildung 117. scharfe Steintextur .....	91
Abbildung 118. unscharfe Vermischung der Textur.....	91
Abbildung 119. Unterseite des Steinmodell.....	92
Abbildung 120. 3D Modell der Steine von RealityCapture.....	94
Abbildung 121. Meshansicht mit Artefakte .....	94
Abbildung 122. Artefakte im engen Bereich zwischen den Steinen .....	94
Abbildung 123 Detailansicht der Textur eines Steines .....	95
Abbildung 124. Unscharfe Steinkante .....	95
Abbildung 125. 3D Modell der Steine von Meshroom erstellt .....	97
Abbildung 126. offener Bereiche in der Mitte des Steinhaufens mit grober Mesh Auflösung .....	97

Abbildung 127. Unterseite der Steine mit Artefakte .....	98
Abbildung 128. fehlende Schärfe an der Oberseite des Steines .....	98
Abbildung 129. Der 3D Viewer von Sketchfab in gesplitteter Ansicht; links das Modell, rechts die Textur, der rote Punkt hilft hierbei den korrekten Abschnitt auch auf der Textur daneben zu finden.....	100
Abbildung 130. Faktorenbewertung der in Metashape erstellten Burg .....	101
Abbildung 131. Faktorenbewertung der in RealityCapture erstellten Burg .....	102
Abbildung 132. Faktorenbewertung der in Meshroom erstellten Burg .....	103
Abbildung 133. Faktorenbewertung des in Metashape erstellten Leiterwagens	103
Abbildung 134. Faktorenbewertung des in RealityCapture erstellten Leiterwagens .....	104
Abbildung 135. Faktorenbewertung des in Meshroom erstellten Leiterwagens	104
Abbildung 136. Faktorenbewertung der in Metashape erstellten Truhe.....	105
Abbildung 137. Faktorenbewertung der in RealityCapture erstellten Truhe.....	106
Abbildung 138. Faktorenbewertung der in Meshroom erstellten Truhe .....	106
Abbildung 139. Faktorenbewertung der in Metashape erstellten Steine .....	107
Abbildung 140. Faktorenbewertung der in RealityCapture erstellten Steine .....	107
Abbildung 141. Faktorenbewertung der in Meshroom erstellten Steine.....	108
Abbildung 142. Nummerierung der Steine für die Vermessung.....	112
Abbildung 143. Seitenbenennung des vierten Steines .....	112
Abbildung 144. Vergleich der Programme mittels Box-Plots .....	117
Abbildung 145. Fehlerbalkendiagramm der verwendeten Softwarelösungen ...	120

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Systemspezifikation.....	24
Tabelle 2. Berechnungszeiten der Burg in Metashape.....	54
Tabelle 3. Berechnungszeiten der Burg in RealityCapture .....	59
Tabelle 4. Berechnungszeiten der Burg in Meshroom.....	65
Tabelle 5. Berechnungszeiten des Leiterwagens in Metashape.....	70
Tabelle 6. Berechnungszeiten des Leiterwagens in RealityCapture .....	72
Tabelle 7. Berechnungszeiten des Leiterwagens in Meshroom.....	76
Tabelle 8. Berechnungszeiten der Truhe in Metashape .....	78
Tabelle 9. Berechnungszeiten der Truhe in RealityCapture .....	82
Tabelle 10. Berechnungszeiten der Truhe in Meshroom .....	85
Tabelle 11. Berechnungszeiten der Steine in Metashape .....	89
Tabelle 12. Berechnungszeiten der Steine in RealityCapture.....	93
Tabelle 13. Berechnungszeiten der Steine in Meshroom .....	96
Tabelle 19. Abweichungsdifferenzen der Programme beim Burgmodell .....	109
Tabelle 20. Abweichungsdifferenzen der Programme beim Leiterwagenmodell .....	110
Tabelle 21. Abweichungsdifferenzen der Programme beim Truhenmodell.....	111
Tabelle 22. Abweichungsdifferenzen der Programme beim Steinmodell.....	113
Tabelle 14. Übersicht der Berechnungszeiten der Programme und der Objekte .....	115
Tabelle 15. Kriterienbewertung der Experten für das Burgmodell .....	115
Tabelle 16. Kriterienbewertung der Experten für das Leiterwagenmodell.....	116
Tabelle 17. Kriterienbewertung der Experten für das Truhenmodell.....	116
Tabelle 18. Kriterienbewertung der Experten für das Steinmodell.....	116

Tabelle 23. Kenngrößen zur Beurteilung der Messgenauigkeit ..... 119

Tabelle 24. Ergebnisse der T-Tests und U-Tests ..... 122

# **Listingverzeichnis**

Listing 1. Code für die Erstellung der Box-Plots in R .....	118
Listing 2. R-Code für die Erstellung des Fehlerbalkendiagrammes .....	121
Listing 3. Code für die T-Tests bzw. U-Tests .....	123

# Anhang

## A. Gemessene Distanzen

### Burg

Beschreibung	Realmaße in cm	Gemessen in Autodesk Maya in cm		
		Metashape	RealityCapture	Meshroom
Höhe Eingang vorne	10	10,05	9,89	10,24
Breite Eingang vorne	5,6	5,5	5,45	5,3
Breite kaputter Steher	1,8	n.r.	1,44	n.r.
Höhe kaputter Steher im Lot	4,8	n.r.	4,96	n.r.
Länge kaputter Steher (schräg)	5,2	n.r.	5,02	n.r.
Länge Dachschräge	16,3	16,96	17,14	16,63
Breite Fenster hinten	2,4	2,34	2,42	2,47
Höhe Fenster hinten	2,8	2,83	2,79	2,9
Tiefe des Balkons	5	4,94	4,98	4,94
Höhe der Burg bis Balkon	34,6	36,12	36,18	35,1
Balkon Durchmesser (durch Tür gemessen)	32,5	34,27	34,61	33,08

## Leiterwagen

Beschreibung	Realmaße in cm	Gemessen in Autodesk Maya in cm		
		Metashape	RealityCapture	Meshroom
Breite der Deichsel	6,1		6,14	6,323
Breite des vorderen Querbalkens	47,5		48,05	49,525
Länge der Ladefläche (rechts)	60,1		62,5	n.r.
Länge des Radabstandes hinten	30,3		31,35	31,7
Länge der linken Mittelsprosse	19	Modell zu schlecht	19,3	n.r.
Breite des Handgriffes	22,4		22,48	22,6
Höhe des Handgriffes	8,2		8,12	8,21
Länge rechte, hintere Radsprosse (11 Uhr)	8,5		8,59	n.r.
Länge der rechten Seitenwandstrebe	53		54,7	n.r.
Höhe über Boden hinten	42,6		44,1	n.r.
Länge Radsprosse vorne links (07 Uhr)	5		4,88	n.r.
Breite Rad vorne links	1,7		1,70	1,689

## Truhe

Beschreibung	Realmaße in cm	Gemessen in Autodesk Maya in cm		
		Metashape	RealityCapture	Meshroom
Länge der gesamten Truhe	19	20,43	19,4	19,3
Breite der Schnalle	2,8	3	2,09	2,78
Länge von Spitze zu Spitze (bei den Ornamenten oben am Griff)	8,5	9,3	8,86	8,8
Breite der Truhe unten links	14,2	14,8	14,17	14,16
Länge von Schnalle zu Schnalle	11,6	12,7	12,03	11,8
Höhe der Truhe	13,3	13,7	13,52	13,26

## Steine

Beschreibung	Realmaß in cm	Gemessen in Autodesk Maya in cm		
		Metashape	RealityCapture	Meshroom
<b>Länge Stein 1</b>	25,4	25,81	25,91	25,47
<b>Breite Stein 1</b>	9	9,2	9,21	8,98
<b>Höhe Stein 1</b>	4,8	4,7	4,75	4,64
<b>Länge Stein 3</b>	7,4	7,75	7,33	7,3
<b>Breite Stein 3</b>	10,4	10,38	10,46	10,03
<b>Höhe Stein 3</b>	17,4	17,76	17,56	17,68
<b>Seite A Stein 4</b>	12,6	12,8	12,76	12,6
<b>Seite B Stein 4</b>	10,1	10,31	10,23	9,99
<b>Seite C Stein 4</b>	14,7	14,9	14,89	14,87
<b>Länge Stein 5</b>	35,5	37,14	36,79	35,7
<b>Breite Stein 5</b>	14	14,47	14,4	14,24
<b>Höhe Stein 5</b>	7,5	7,46	7,45	7,48

## B. Links zu den Modellen auf Sketchfab

Modell	Link
<b>Burg Metashape</b>	<a href="https://skfb.ly/6NnLC">https://skfb.ly/6NnLC</a>
<b>Burg RealityCapture</b>	<a href="https://skfb.ly/6NoVv">https://skfb.ly/6NoVv</a>
<b>Burg Meshroom</b>	<a href="https://skfb.ly/6NoVA">https://skfb.ly/6NoVA</a>
<b>Leiterwagen Metashape</b>	<a href="https://skfb.ly/6NoVY">https://skfb.ly/6NoVY</a>
<b>Leiterwagen RealityCapture</b>	<a href="https://skfb.ly/6NoVC">https://skfb.ly/6NoVC</a>
<b>Leiterwagen Meshroom</b>	<a href="https://skfb.ly/6NoVD">https://skfb.ly/6NoVD</a>
<b>Truhe Metashape</b>	<a href="https://skfb.ly/6NoVE">https://skfb.ly/6NoVE</a>
<b>Truhe RealityCapture</b>	<a href="https://skfb.ly/6NoVF">https://skfb.ly/6NoVF</a>
<b>Truhe Meshroom</b>	<a href="https://skfb.ly/6NoVG">https://skfb.ly/6NoVG</a>
<b>Steine Metashape</b>	<a href="https://skfb.ly/6NoVH">https://skfb.ly/6NoVH</a>
<b>Steine RealityCapture</b>	<a href="https://skfb.ly/6NoVJ">https://skfb.ly/6NoVJ</a>
<b>Steine Meshroom</b>	<a href="https://skfb.ly/6NoVK">https://skfb.ly/6NoVK</a>

## C. Aufbau der Umfrage

Expertenbefragung - Softwarevergleich Photogrammetrie 0 %

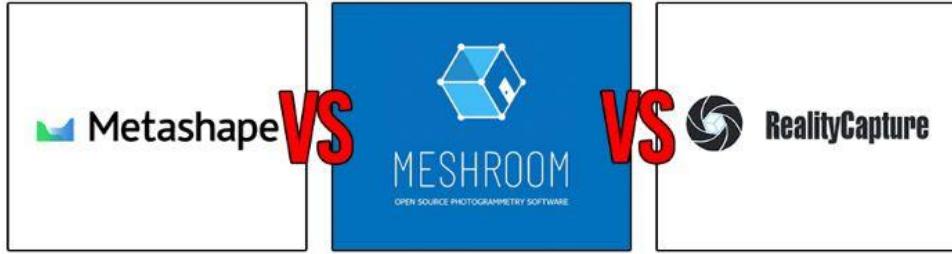
# MASTERARBEIT

# EXPERTENBEFRAGUNG

---

## PHOTOGRAMMETRIE - SOFTWAREVERGLEICH

---



Metashape **VS** MESHROOM **VS** RealityCapture

Hallo und vielen Dank, dass Sie sich bereit erklären bei dieser Umfrage teilzunehmen.

Der Fragebogen ist an Personen gerichtet, die sich mit der Materie auskennen bzw. mit solchen Assets in Ihrem Beruf zu tun haben und hat eine Länge von ca. 15min.

Es werden Ihnen Fragen zu vier unterschiedlichen Assets gestellt, die in drei verschiedenen Programmen, Metashape von Agisoft, RealityCapture von CapturingReality und Meshroom von Alicevision, generiert wurden.

Es werden je 6 Referenzbilder der Objekte über Google Photos zur Verfügung gestellt, einen Link dazu finden Sie je kurz vor dem ersten Objekt.  
Die Objekte sind über den 3D Viewer von Sketchfab in den Fragebogen eingebunden, um Ihnen die Möglichkeit zu geben, die Assets genau betrachten zu können.  
Die 3D-Objekte wurden mit den jeweiligen Standard/Normal Presets der Programme erstellt um die Ergebnisse besser vergleichen zu können.  
Die Texturgröße wurde hierbei für alle auf 4K festgelegt und die UVs automatisch erstellt.

Die hölzernen "Referenzquader" wurden aus den Objekten entfernt, jedoch sind sie noch in der Textur erkennbar.  
Auch etwaige Artefakte und Partikel, die neben dem gewünschten Zielobjekt generiert wurden, sind in Autodesk Maya gesäubert worden. Das Mesh des 3D-Objektes wurde NICHT verändert/reduziert, auch die Texturen wurden NICHT nachbearbeitet.

Ihre Daten werden anonymisiert, vertraulich behandelt und ausschließlich zur Auswertung der Umfrage und in der Masterarbeit verwendet. Mit Ihrer Teilnahme an der Umfrage stimmen Sie zu, dass die gesammelten Daten im Rahmen meiner Diplomarbeit verwendet werden dürfen.

Mit freundlichen Grüßen  
Franz Bischof

Weiter  
(Text ändern)

Expertenbefragung - Softwarevergleich Photogrammetrie 11%

Um an dieser Umfrage teilnehmen zu können, müssen Sie bestätigen, dass Sie eine einschlägige Berufserfahrung vorweisen können und somit in dem Gebiet 3D Modeling, Postproduktion bzw. Photogrammetrie als Experte anzusehen sind.

Trifft das auf Sie zu? \*

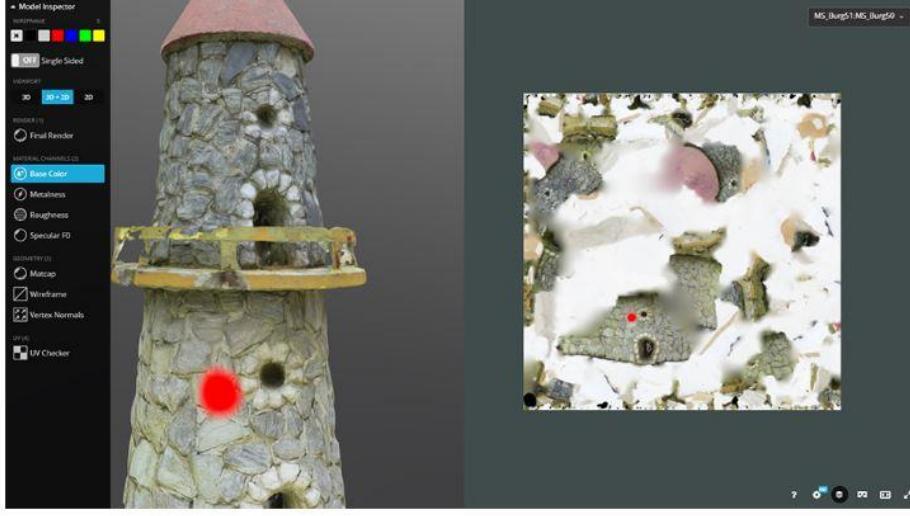
ja

nein

[Zurück](#) [Weiter](#)  
(Text ändern)

Expertenbefragung - Softwarevergleich Photogrammetrie 22%

Information zum Umgang mit dem 3D-Viewer von Sketchfab



linke Maustaste - Click & Drag für Rotation  
rechte Maustaste - Click & Drag für Position  
Mausrad - Zoom

ALT + linke Maustaste - Click & Drag für Lichtpositionierung

Taste i bzw. Button rechts unten - Inspector, hier können das Wireframe, die Textur (Base Color) und die UVs im linken Menübereich ausgewählt werden.  
-> z.B. über 3D+2D View und Base Color Selektion

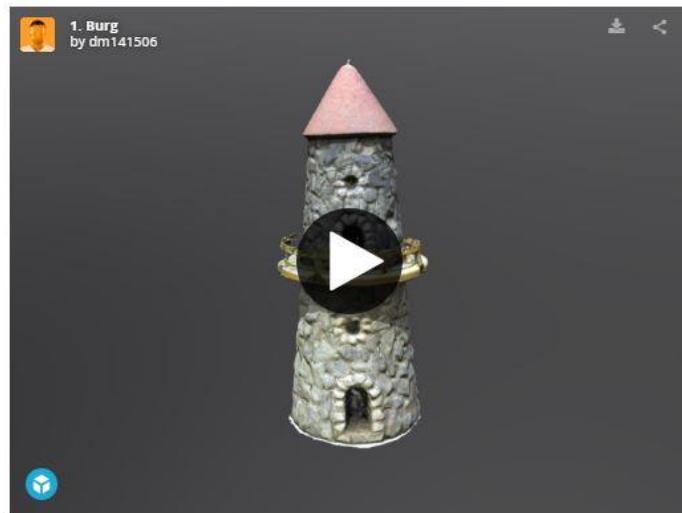
P.S.: Sollte es Probleme mit dem embedded Viewer geben, versuchen Sie es bitte direkt auf Sketchfab, indem Sie im jeweiligen Modell links unten den blauen Sketchfab Button anwählen.

[Zurück](#) [Weiter](#)  
(Text ändern)

Modell 1 - Burg

Bitte sehen Sie sich jedes der drei Modelle genau an und beantworten Sie die Fragen unterhalb.

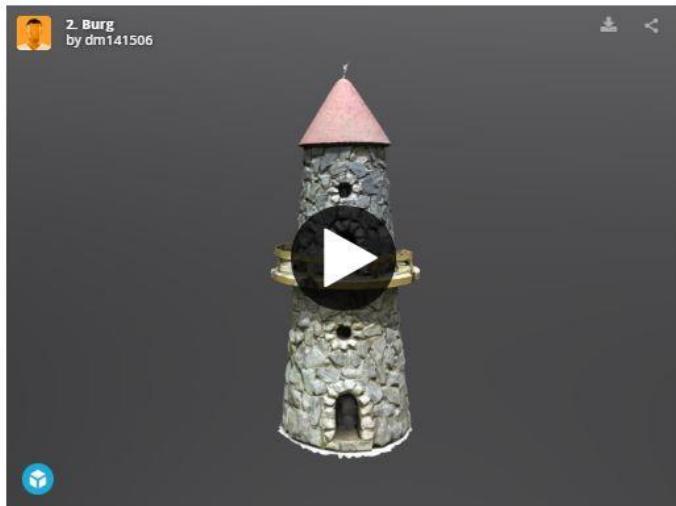
Um zu den Referenzbildern der Burg auf Google Photos zu gelangen, klicken Sie bitte [hier](#).



Bitte bewerten Sie folgende Faktoren der ersten Burg: \*

	sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	schlecht	weiß nicht
Meshqualität	<input type="radio"/>					
Texturqualität	<input type="radio"/>					
UV-Layout	<input type="radio"/>					
Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt	<input type="radio"/>					

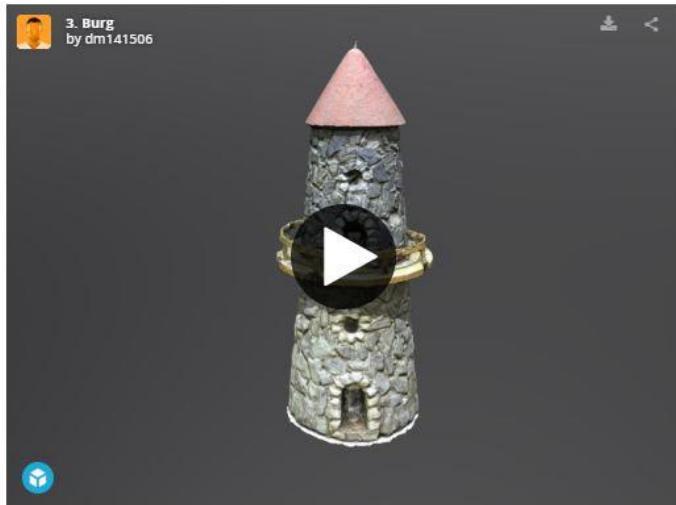
Haben Sie Anmerkungen zum Objekt? Falls Nein, bitte überspringen.



Bitte bewerten Sie folgende Faktoren der zweiten Burg: \*

	sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	schlecht	weiß nicht
Meshqualität	<input type="radio"/>					
Texturqualität	<input type="radio"/>					
UV-Layout	<input type="radio"/>					
Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt	<input type="radio"/>					

Haben Sie Anmerkungen zum Objekt? Falls Nein, bitte überspringen.



Bitte bewerten Sie folgende Faktoren der dritten Burg: \*

	sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	schlecht	weiß nicht
Meshqualität	<input type="radio"/>					
Texturqualität	<input type="radio"/>					
UV-Layout	<input type="radio"/>					
Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt	<input type="radio"/>					

Haben Sie Anmerkungen zum Objekt? Falls Nein, bitte überspringen.

Welche Version der Burg würden Sie verwenden, wenn Sie sich entscheiden müssten? \*

- 1. Burg
- 2. Burg
- 3. Burg

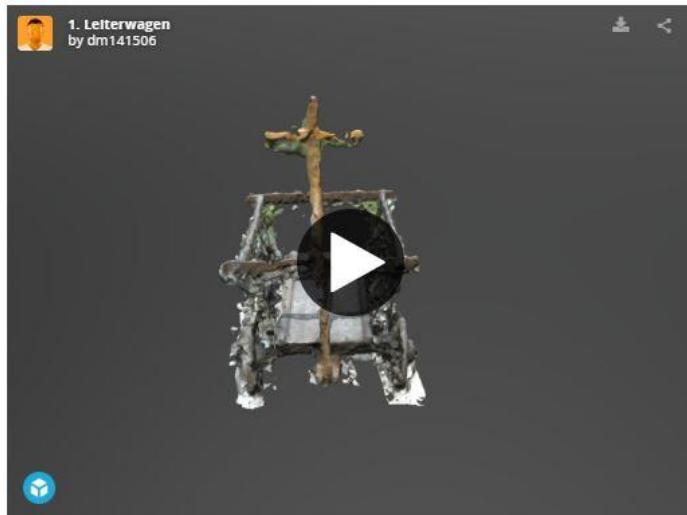
[Zurück](#) [Weiter](#)

(Text ändern)

Modell 2 - Leiterwagen

Bitte sehen Sie sich jedes der drei Modelle genau an und beantworten Sie die Fragen unterhalb.

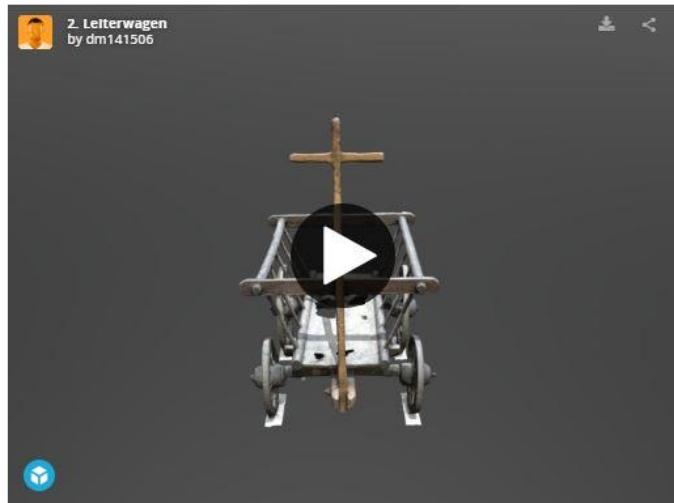
Um zu den Referenzbildern des Leiterwagens auf Google Photos zu gelangen, klicken Sie bitte [hier](#).



Bitte bewerten Sie folgende Faktoren des ersten Leiterwagens: \*

	sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	schlecht	weiß nicht
Meshqualität	<input type="radio"/>					
Texturqualität	<input type="radio"/>					
UV-Layout	<input type="radio"/>					
Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt	<input type="radio"/>					

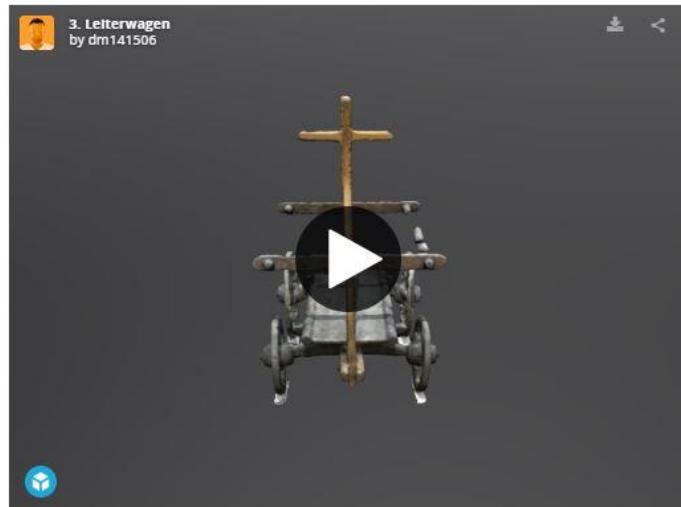
Haben Sie Anmerkungen zum Objekt? Falls Nein, bitte überspringen.



Bitte bewerten Sie folgende Faktoren des zweiten Leiterwagens: \*

	sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	schlecht	weiß nicht
Meshqualität	<input type="radio"/>					
Texturqualität	<input type="radio"/>					
UV-Layout	<input type="radio"/>					
Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt	<input type="radio"/>					

Haben Sie Anmerkungen zum Objekt? Falls Nein, bitte überspringen.



Bitte bewerten Sie folgende Faktoren des dritten Leiterwagens: \*

	sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	schlecht	weiß nicht
Meshqualität	<input type="radio"/>					
Texturqualität	<input type="radio"/>					
UV-Layout	<input type="radio"/>					
Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt	<input type="radio"/>					

Haben Sie Anmerkungen zum Objekt? Falls Nein, bitte überspringen.

Welche Version des Leiterwagens würden Sie verwenden, wenn Sie sich entscheiden müssten? \*

- 1. Leiterwagen
- 2. Leiterwagen
- 3. Leiterwagen

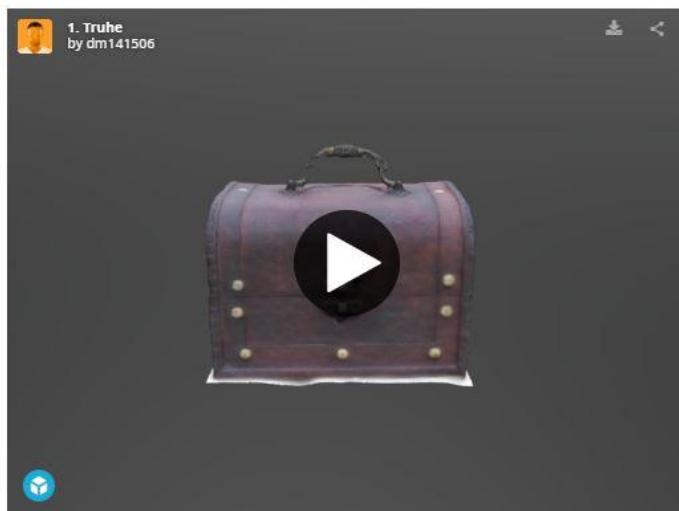
[Zurück](#) [Weiter](#)

(Text ändern)

Modell 3 - Truhe

Bitte sehen Sie sich jedes der drei Modelle genau an und beantworten Sie die Fragen unterhalb.

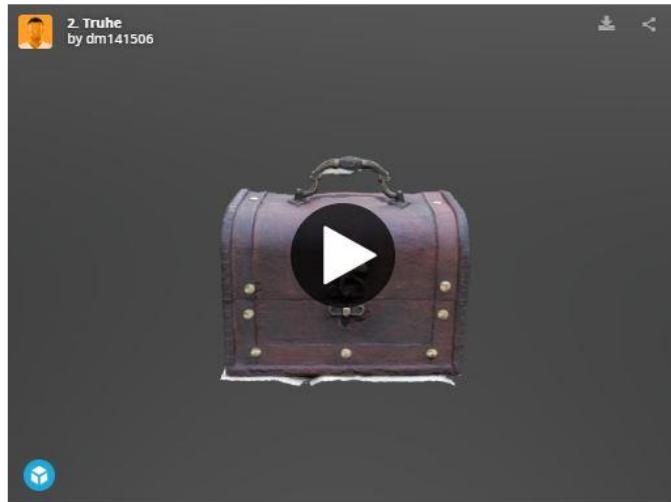
Um zu den Referenzbildern der Truhe auf Google Photos zu gelangen, klicken Sie bitte [hier](#).



Bitte bewerten Sie folgende Faktoren der ersten Truhe: \*

	sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	schlecht	weiß nicht
Meshqualität	<input type="radio"/>					
Texturqualität	<input type="radio"/>					
UV-Layout	<input type="radio"/>					
Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt	<input type="radio"/>					

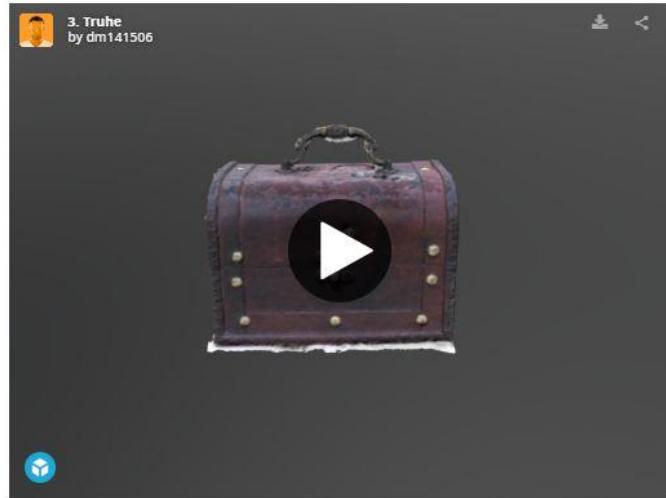
Haben Sie Anmerkungen zum Objekt? Falls Nein, bitte überspringen.



Bitte bewerten Sie folgende Faktoren der zweiten Truhe: \*

	sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	schlecht	weiß nicht
Meshqualität	<input type="radio"/>					
Texturqualität	<input type="radio"/>					
UV-Layout	<input type="radio"/>					
Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt	<input type="radio"/>					

Haben Sie Anmerkungen zum Objekt? Falls Nein, bitte überspringen.



Bitte bewerten Sie folgende Faktoren der dritten Truhe: \*

	sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	schlecht	weiß nicht
Meshqualität	<input type="radio"/>					
Texturqualität	<input type="radio"/>					
UV-Layout	<input type="radio"/>					
Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt	<input type="radio"/>					

Haben Sie Anmerkungen zum Objekt? Falls Nein, bitte überspringen.

Welche Version der Truhe würden Sie verwenden, wenn Sie sich entscheiden müssten? \*

- 1. Truhe
- 2. Truhe
- 3. Truhe

[Zurück](#) [Weiter](#)  
(Text ändern)

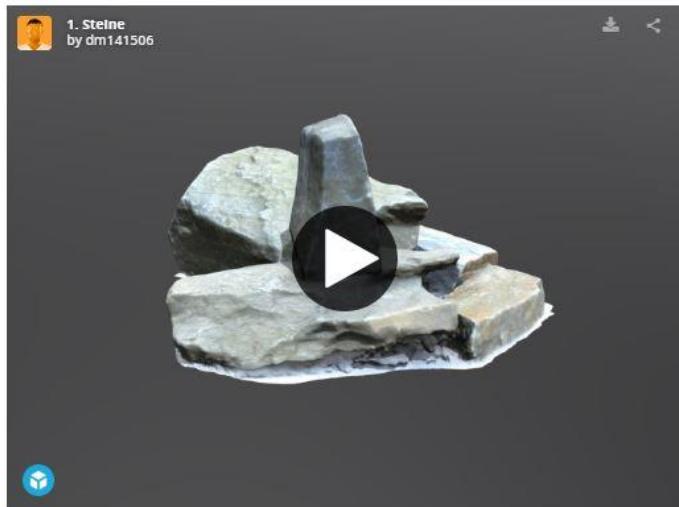
## Expertenbefragung - Softwarevergleich Photogrammetrie

67 %

### Modell 4 - Steine

Bitte sehen Sie sich jedes der drei Modelle genau an und beantworten Sie die Fragen unterhalb.

Um zu den Referenzbildern der Steine auf Google Photos zu gelangen, klicken Sie bitte [hier](#).



Bitte bewerten Sie folgende Faktoren der ersten Steine: \*

	sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	schlecht	weiß nicht
Meshqualität	<input type="radio"/>					
Texturqualität	<input type="radio"/>					
UV-Layout	<input type="radio"/>					
Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt	<input type="radio"/>					

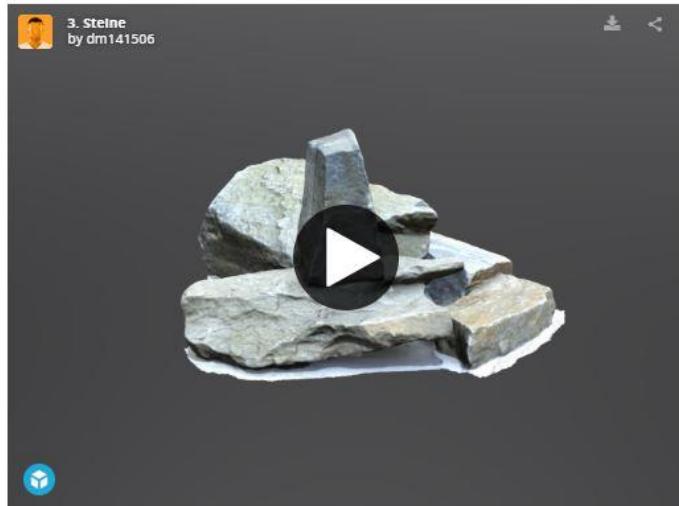
Haben Sie Anmerkungen zum Objekt? Falls Nein, bitte überspringen.



Bitte bewerten Sie folgende Faktoren der zweiten Steine: \*

	sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	schlecht	weiß nicht
Meshqualität	<input type="radio"/>					
Texturqualität	<input type="radio"/>					
UV-Layout	<input type="radio"/>					
Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt	<input type="radio"/>					

Haben Sie Anmerkungen zum Objekt? Falls Nein, bitte überspringen.



Bitte bewerten Sie folgende Faktoren der dritten Steine: \*

	sehr gut	gut	befriedigend	ausreichend	schlecht	weiß nicht
Meshqualität	<input type="radio"/>					
Texturqualität	<input type="radio"/>					
UV-Layout	<input type="radio"/>					
Umsetzung im Vergleich zum realen Objekt	<input type="radio"/>					

Haben Sie Anmerkungen zum Objekt? Falls Nein, bitte überspringen.

Welche Version der Steine würden Sie verwenden, wenn Sie sich entscheiden müssten? \*

- 1. Steine
- 2. Steine
- 3. Steine

[Zurück](#) [Weiter](#)

(Text ändern)

**MATERARBEIT**  
**EXPERTEBEFRAGUNG**  
**PHOTOGRAMMETRIE - SOFTWAREVERGLEICH**  
**FERTIG DANKE!**

Vielen herzlichen Dank für Ihre Teilnahme an dieser Expertenbefragung.

Ich hoffe, auch Sie haben dadurch interessante Einblicke erhalten.

Wollen Sie wissen, welche Objekte in welchem Programm erstellt wurden?

- ja
- nein

[Zurück](#) [Weiter](#)

(Text ändern)

Teilnahme fortsetzen »

## Expertenbefragung - Softwarevergleich Photogrammetrie

89 %

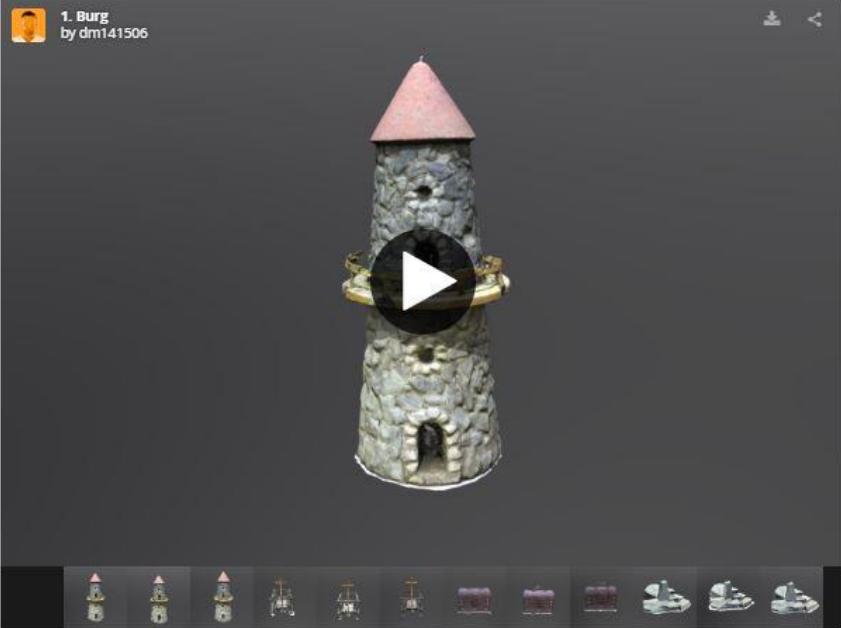
### Programmübersicht



Die Reihenfolge der jeweiligen 3D Objekte war immer gleich.

1. Metashape
2. Reality Capture
3. Meshroom

Falls jetzt gewünscht, hier nochmal alle Objekte im Überblick:



Eventuell noch eine letzte Anmerkung?