



BEUTH HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BERLIN  
University of Applied Sciences

Fachbereich III Bauwesen und Geoinformation

## Bachelorarbeit

Im Studiengang Geoinformation-Y

Schwerpunkt Geodäsie



von

Marcel Pergande

Dokumentation von Holzfunden am Oymağaaç Höyük

durch 3D-Modellierung

Abgabedatum: 08.08.2019

1. Betreuer: Prof. Dipl.-Ing. Michael Breuer
2. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Werner Stempfhuber



## Vorwort

Mein Interesse für das Projekt am Oymağaaç Höyük wurde im Oktober 2017 durch eine Mail von Herrn Prof. Dipl.-Ing. Michael Breuer geweckt. In dieser fragte er nach Interessenten für die Teilnahme an der Grabungskampagne im Sommer 2018. Ziel dabei soll die photogrammetrische und vermessungstechnische Dokumentation von Grabungsfunden sein. Des Weiteren biete sich die Auswertung der praktischen Arbeiten für eine Abschlussarbeit an. Da ich seit jeher ein Interesse für Geschichte hege und den Bereich der Photogrammetrie im Verlauf meines Studiums als sehr interessant empfand und mir gut vorstellen konnte meine Abschlussarbeit in diesem Teilbereich der Geodäsie zu schreiben und meine Kenntnisse in diesem Fachgebiet zu vertiefen meldete ich mich zur Teilnahme an der Grabungskampagne.

Es folgte im Vorlauf der Reise eine Vorbereitungsphase in der verschiedene Teilaspekte der durchzuführenden Arbeiten vor Ort ausprobiert und geübt wurden. Die Reise selbst fand zwischen dem 20.08.2018 und dem 30.08.2018 zusammen mit meiner Kommilitonin Hasret Cakmak und den beiden Mitarbeitern des Labors für Photogrammetrie Monika Lehmann und Marko Koch statt.

Die Bearbeitungszeit der Bachelorarbeit beträgt drei Monate. Da diese Zeit für die Erstellung aller 3D-Modelle nicht ausreicht wird mit der Auswertung bereits vor Beginn dieser drei Monate begonnen.

Ich möchte Monika Lehmann, Marko Koch und Hasret Cakmak danken, die mich bei der Erhebung der Daten dieses Projektes tatkräftig unterstützt haben und mir auch in der Folge jederzeit bei Fragen mit Rat und Tat zur Seite standen. Auch Herrn Vigerske gilt ein besonderer Dank für die Einführung in das Programm 3ds Max, das zur Erstellung des Orthobildplans verwendet wurde.

Ich möchte auch dem Grabungsleiter Rainer Czichon sowie Dirk Mielke für die nette Aufnahme im Grabungshaus in Oymağaaç danken. Ein weiterer Dank geht an Prof. Dr. Jörg Klinger, den Leiter des Projektes in Oymağaaç.

Ein letzter Dank geht an Herrn Michael Breuer für die Betreuung der Bachelorarbeit.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Verortung des Projekts und historischer Hintergrund.....	2
2	Theoretische Aspekte der Mehrbildphotogrammetrie.....	5
2.1	Beziehung zwischen Bild und Objektpunkt.....	6
2.2	SfM-Prozesskette.....	8
2.2.1	Merkmalsextraktion, Interest Punkte.....	9
2.2.2	Passpunkte.....	11
2.2.3	Bündelblockausgleichung.....	12
2.3	Dichte Punktwolke.....	13
2.4	Dreiecksvermaschung.....	15
2.5	Texturierung.....	15
2.6	Fotografie.....	16
3	Aufnahme der Holzfragmente.....	17
3.1	Beschreibung der Aufnahmeobjekte.....	18
3.2	Vorbereitung in der Hochschule.....	19
3.3	Vorbereitung vor Ort.....	21
3.4	Verwendete Kameras.....	25
3.5	Durchführung der Aufnahme.....	26
3.6	Kontrolle.....	29
4	Photogrammetrische Auswertung der Holzfragmente.....	29
4.1	Verwendete Hardware.....	29
4.2	Workflow:.....	30
4.2.1	Einspielen der Bilder.....	31
4.2.2	Passpunktsuche.....	32
4.2.3	Bildorientierung.....	33
4.2.4	Einführen der Scale Bars.....	35
4.2.5	Suche nach natürlichen Passpunkten.....	36
4.2.6	Zusammenfügen der Chunks.....	37
4.2.7	Berechnung der dichten Punktwolke.....	37
4.2.8	Berechnung der Vermaschung.....	39
4.2.9	Berechnung der Textur.....	40
4.3	Rechendauer.....	42
4.4	Problemfälle.....	42

4.4.1	Probleme bei der Bildorientierung.....	43
4.4.2	Probleme bei der Texturierung .....	46
4.4.3	Probleme bei der Vermaschung .....	46
4.4.4	Probleme mit bei der Aufnahme bewegten Objekte .....	48
4.4.5	Probleme bei den natürlichen Passpunkten .....	49
5	Genauigkeitsauswertung.....	49
6	Erzeugung der Datenprodukte .....	53
6.1	Orthobildplan im Maßstab 1:10 .....	53
6.1.1	Probleme .....	55
6.2	Bereitstellung der 3D-Modelle und Erstellung von 3D-PDFs .....	55
7	Schlussbetrachtung .....	56
7.1	Zukunftsaussichten.....	57
7.2	Hinweis .....	57
	Literaturverzeichnis.....	58
	Anhang .....	61



# 1 Einleitung

Die Hethiter waren im zweiten Jahrtausend v. Chr. eine vorherrschende Weltmacht, die im Raum Syriens, des Libanons und auch der Türkei ansässig war. 2007 beginnt am Oymağaaç Höyük, nahe der Stadt Vezirköprü in der Provinz Samsun in der Türkei, unter der Leitung von Grabungsleiter Prof. Dr. Rainer Czichon von der Universität Uşak und Projektleiter Prof. Dr. Jörg Klinger von der Freien Universität Berlin die Ausgrabung einer Tempelanlage. In deren Verlauf wird ein Tunnel, der unter die Erde führt und einen großen Fundus an verschiedenen Holzfragmenten beherbergt, entdeckt. Unter anderem werden unter den Holzstücken Bruchstücke einer Leiter gefunden, deren Aufnahme und Auswertung das Thema dieser Bachelorarbeit bilden wird.

Ansprechpartner für die Ausgrabung am Oymağaaç Höyük und Projektpartner:

- **Prof. Dr. Rainer M. Czichon (Grabungsleiter)**

Tel.: +49 (0)178 1538116

Email: rczichon@zedat.fu-berlin.de

Anschrift:

Freie Universität Berlin

Fachbereich Geschichts- und Kulturwissenschaften

Institut für Altorientalistik

Hüttenweg 7

14195 Berlin

- **Prof. Dr. Jörg Klinger (Projektleiter)**

Tel. +49 30 838 52758

Email: j.klinger@fu-berlin.de

Anschrift:

Freie Universität Berlin

Fachbereich Geschichts- und Kulturwissenschaften

Institut für Altorientalistik

Fabeckstr. 23-25

Raum 0.1083

14195 Berlin

- **Priv.-Doz. Dr. Dirk Paul Mielke**

Tel. +49 30 838 72585

Email: dirk.mielke@fu-berlin.de

Anschrift:

Freie Universität Berlin

Fachbereich Geschichts- und Kulturwissenschaften

Institut für Altorientalistik

Fabeckstr. 23-25

Raum 0.1058

14195 Berlin

In dieser Bachelorarbeit wird die Dokumentation der im Tunnel am Oymağaaç Höyük gefundenen Holzfragmente der Holzleiter beschrieben. Zu Beginn wird ein kurzer Überblick über die Verortung und den geschichtlichen Kontexts des Projektes gegeben. Im weiteren Verlauf wird zunächst auf die theoretischen Aspekte der Photogrammetrie und Fotografie eingegangen, welche für die Aufnahme der Holzobjekte sowie deren Auswertung erforderlich sind. Anschließend werden die in der Beuth-Hochschule für Technik Berlin getroffenen Maßnahmen zur Vorbereitung erläutert. Die Beschreibung der Aufnahme beinhaltet die vor Ort getroffenen Vorbereitungen sowie den Ablauf der Durchführung der Aufnahmen im Grabungshaus in Oymağaaç. Es folgt die Beschreibung der Auswertung mit der Software Agisoft Metashape und eine Erläuterung der dabei aufgetretenen Probleme. Nach einer Analyse der erreichten Genauigkeit und einer Beschreibung der Erstellung der geforderten Datenprodukte, einem Orthobildplan im Maßstab 1:10, wie auch texturierter dreiecksvermaschter 3D-Modelle in zwei Auflösungsstufen, die einen 3D-Druck im Maßstab 1:1 ermöglichen sollen, wird die Arbeit durch ein Schlussfazit und einen Ausblick auf zukünftige Bearbeitungen abgeschlossen.

## **1.1 Verortung des Projekts und historischer Hintergrund**

Zwischen etwa 1600-1200 v. Chr. wird ein großer Teil der heutigen Türkei und die nördliche Hälfte Syriens sowie zeitweilig Zypern von den Großkönigen der Hethiter regiert. Sie werden von den Pharaonen Ägyptens und den Königen Babylons als gleichrangige Herrscher betrachtet. Es werden sogar Staatsverträge zwischen ihnen geschlossen. Die Hauptstadt des Hethiterreiches, Hattuša, ist im 13. Jh. v. Chr. eine der größten Stadtanlagen der Welt (WILHELM, 2013a). Um 1350 v. Chr. erreicht das Reich seine größte Ausdehnung. Auch der erste Friedensvertrag der Weltgeschichte von 1259 geht auf die Hethiter zurück und wurde mit den Ägyptern geschlossen (ISLER-KERÉNYI, 2002).

Doch das Hethitische Reich gerät im Gegensatz zu dem der Ägypter oder Babylonier mit der Zeit in Vergessenheit. Erst durch die Entdeckung von tausenden Keilschriftkacheln während der Ausgrabung Hattušas ist es möglich die Geschichte der Hethiter grundlegend zu rekonstruieren. Allerdings bleiben weite Teile dieser Kultur im Unklaren (WILHELM, 2013a).



Abb.1: Lage von Nerik (WIKIPEDIA, 2019c)

Neben der Hauptstadt Hattuša werden im 20. Jh. weitere Städte der Hethiter ausgegraben, wie zum Beispiel Arinna (Alaca Höyük) oder möglicherweise Zippalanda (ISLER-KERÉNYI, 2002 u. WIKIPEDIA, 2019d). Allerdings ist die Lage von Zippalanda, wie bei vielen anderen Städten, noch umstritten ist.

Im Jahr 2005/06 wurde im Türkischen Oymağaaç nahe der Stadt Vezirköprü und dem Fluss Kizilirmak in der Provinz Samsun ein archäologischer Survey durchgeführt, nachdem bereits 1972 die hethitische Stadt Nerik dort wissenschaftlich identifiziert worden ist (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT E.V., 2016). Dies stellt die Grundlage der 2007 unter der Leitung von J. Klinger und R. Czichon (FU Berlin) beginnenden Ausgrabungen dar. Im Zuge dieser Ausgrabungen wird ein Tempel gefunden, der mit seinen ihn umgebenen Höfen eine Fläche von etwa 2500 qm einnimmt und durch seine Erwähnung des Königs Schuppiluliuma II. etwa in die 2. Hälfte des 13. Jhs. V. Chr. eingeordnet werden kann (DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT E.V., 2016).

Dass es sich bei der Grabungsstätte am Oymağaaç Höyük tatsächlich um das hethitische Kultzentrum Nerik handelt wird durch mehrere Funde von Tontafelfragmenten bekräftigt. Nerik besteht aus einem Stadtkern von etwa 180 x 200 m. Neben zahlreichen Tonscherben aus der mittleren und späten Bronzezeit wird im Verlauf der Grabungen ein unterirdischer Gang entdeckt (CZICHON, 2006:4). Über die Jahre wird dieser immer weiter ausgegraben bis 2017 an seinem Ende eine mit Wasser gefüllte unterirdische Quellkammer gefunden wird. In dieser finden sich eine große Anzahl Nasshölzer, die das Grabungsteam hinsichtlich der Untersuchung und Lagerung vor große Probleme stellt.



Abb.2: Luftbild der Ausgrabung Sep. 2008

Unter den Nasshölzern befindet sich auch die etwa 50cm breite Leiter mit zwei Stufen, um die sich die praktische Arbeit der Bachelorarbeit dreht. Die Leiter befindet sich zum Zeitpunkt ihres Fundes an der letzten Stufe des steinernen Treppengangs des Tunnels, die in das Becken der Quellkammer führt. Ursprünglich ist es denkbar, dass die Leiter noch länger gewesen ist und eine dritte Stufe gehabt haben könnte. Dieser obere Teil der Leiter ist jedoch so weit verrottet, dass sich dies nicht vollends belegen lässt. Die Leiter besteht aus 8cm dicken Kiefernholmen und die 4cm dicken Sprossen aus Eichenholz.

Die Verbindung der Sprossen wird durch Zapflöcher in den Holmen, durch welche die Sprossen soweit durchgesteckt werden können, dass sie auf der anderen Seite herausragen, ermöglicht. An einem Holzstück ist dieses Zapfloch gut zu erkennen (vgl. Abb. 3) (CZICHON & MIELKE, 2019:83).



Abb. 3: Leiterholm mit Zapfloch für eine Sprosse

Die Dokumentation der gefundenen Hölzer ist zwingend notwendig, da keine Möglichkeit besteht die Hölzer bei einer geeigneten Institution zu lagern. Die Lagerung findet augenblicklich in einer Zisterne in Oymağaaç sowie in der Quellkammer des Tunnels statt (CZICHON & MIELKE, 2019:82).

## 2 Theoretische Aspekte der Mehrbildphotogrammetrie

Die Photogrammetrie umfasst im Allgemeinen Methoden, bei denen aus einem oder mehreren Bildern durch Bildmessungen sowohl Lage, als auch Form eines Objektes berührungslos bestimmt werden. Verfahren der Photogrammetrie können also überall eingesetzt werden, wo ein Objekt fotografisch erfasst werden kann. Das Ziel einer photogrammetrischen Messung ist es das Objekt dreidimensional zu rekonstruieren (LUHMANN, 2010:2).

Grundlage der Messverfahren der Photogrammetrie ist das mathematische Modell der Zentralperspektive. Das Objekt wird in Lage und Form über die Rekonstruktion von Strahlenbündeln berechnet. Dabei legt jeder Bildpunkt  $P'$  mit dem Projektionszentrum  $O'$  eine Raumrichtung zum Objektpunkt  $P$  fest (vgl. Abb. 4). Sind die innere (Abbildungsgeometrie) und äußere Orientierung (Lage) der Kamera bekannt, dann ist es möglich jeden Bildstrahl absolut im dreidimensionalen Raum zu beschreiben (LUHMANN, 2010:7).

Um einen Objektpunkt dreidimensional zu bestimmen benötigt es den Schnitt zweier homologer (korrespondierender) und räumlich verschiedener Bildstrahlen. In der Stereophotogrammetrie werden dazu lediglich zwei Fotos genutzt. In der Mehrbildphotogrammetrie, welche in dieser Bachelorarbeit angewendet wird, kann hingegen eine unbegrenzte Anzahl an Bildern genutzt werden (LUHMANN, 2010:7 f.).

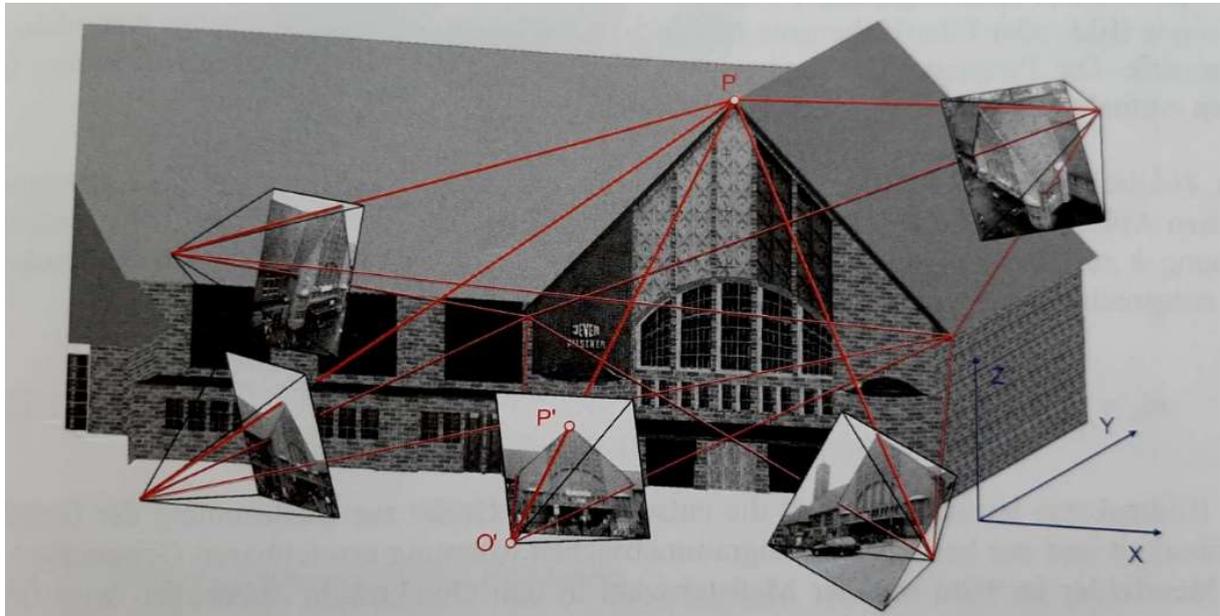


Abb. 4: Photogrammetrisches Messprinzip (LUHMANN, 2010:7)

Zu den durch photogrammetrische Auswerteverfahren gewonnenen Daten gehören beispielsweise Eckpunktkoordinaten eines Gebäudes und damit einhergehend die Länge und Breite des Bauwerks oder aber Oberflächenmodelle für Erdmassenermittlungen und 3D-Modelle mit realitätsnahen Oberflächentexturen, die beispielsweise durch einen 3D-Drucker gedruckt werden können (WITTE & SPARLA, 2015:339).

## 2.1 Beziehung zwischen Bild und Objektpunkt

Erzeugt man mit einer Kamera ein Bild, bildet man ein dreidimensionales Objekt, beschrieben durch das mathematische Gesetz der Zentralperspektive, in der zweidimensionalen Ebene des Sensors ab. Die aufgenommenen Objektpunkte  $P_i$  sind als Bildpunkte  $P'_i$  im Foto abgebildet. Verbindet man die beiden Punkte und verlängert diese Gerade, geht sie durch das Projektionszentrum O (vgl. Abb. 5) (WITTE & SPARLA, 2015:341).

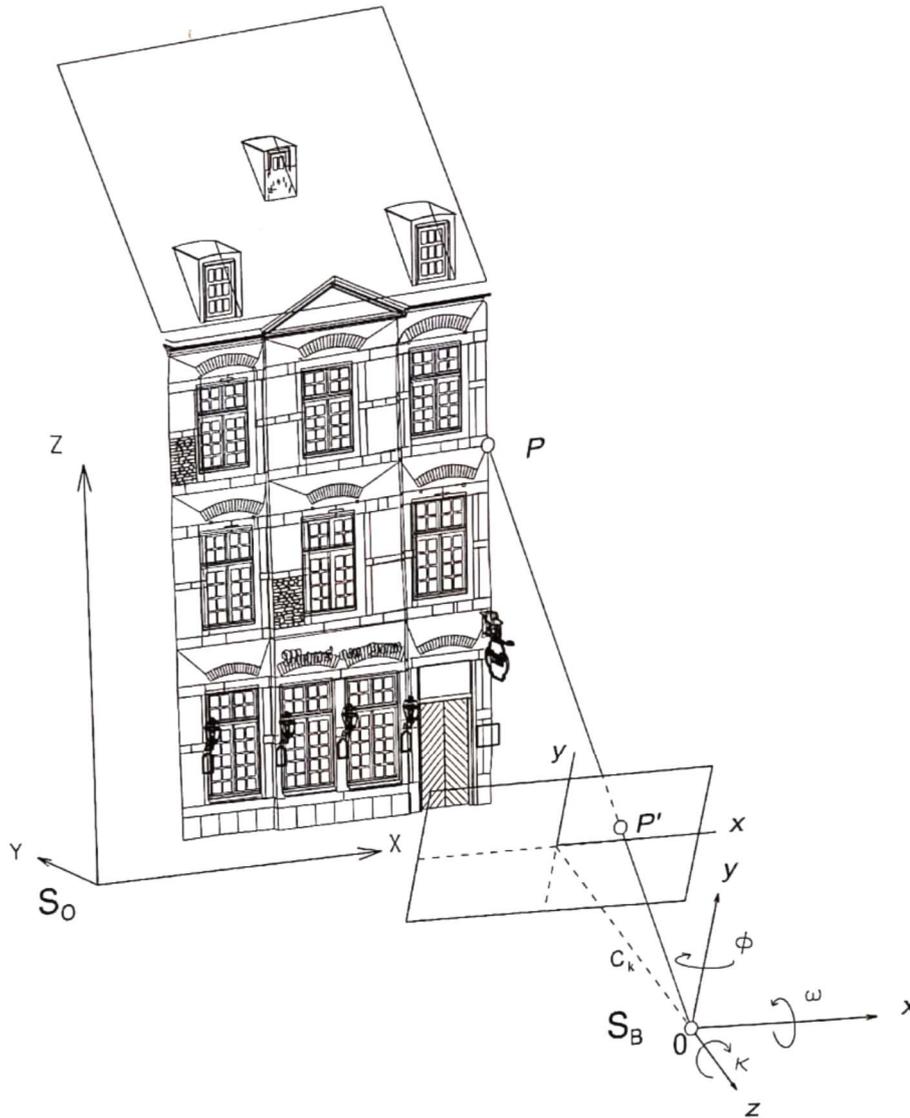


Abb.5: Bezug zwischen Bildebene und Objektebene (WITTE & SPARLA, 2015:342)

Wichtig für die Beziehung zwischen Bild- und Objektpunkt sind zwei Koordinatensysteme. Das Objektkoordinatensystem  $S_0$ , das meist lokal definiert wird und der Koordinierung der Objektpunkte  $P_i$  durch Koordinaten  $(X_i, Y_i, Z_i)$  dient. Das zweite System ist das Bildkoordinatensystem  $S_B$ . Der Koordinatenursprung entspricht dem Projektionszentrum  $O$ . Die  $x$ - $y$ -Ebene der Bildpunkte  $P'_i$  entspricht der Bildebene und liegt parallel zur  $x$ - $y$ -Ebene des Bildkoordinatensystems. Der senkrechte Abstand zwischen Bildebene und Projektionszentrum wird als Kamerakonstante  $c_k$  bezeichnet und kann in Näherung mit der Brennweite des genutzten Objektivs gleichgesetzt werden. Die Bildpunkte  $P'_i$  werden durch die Koordinaten  $(x_i, y_i, -c_k)$  beschrieben. Der Zusammenhang zwischen dem Objektkoordinatensystem und dem Bildkoordinatensystem wird über die Kollinearitätsgleichung (vgl. Abb. 11) hergestellt (WITTE & SPARLA, 2015:342 f.).

Kollinear bedeutet hierbei, dass zum Aufnahmezeitpunkt die Punkte  $P_i$ ,  $P'_i$  und  $O$  auf einer Geraden liegen.

Neben den Objekt- und Bildkoordinaten spielen auch die Koordinaten des Projektionszentrums ( $X_o, Y_o, Z_o$ ) und die Drehwinkel ( $\omega, \varphi, \kappa$ ) eine Rolle. Diese sechs Parameter bilden die äußere Orientierung oder anders gesagt die Position und Drehung der Kamera gegenüber dem Objektkoordinatensystem zum Aufnahmezeitpunkt. Die Bestimmung der äußeren Orientierung wird auch als Bildorientierung bezeichnet.

Die Kameradaten ( $c_k, x_h, y_h, dx, dy$ ) gehören zu den Parametern der inneren Orientierung. Die innere Orientierung einer Kamera wird in einem Projekt mit mehreren Aufnahmen als konstant gesehen. Sie kann im Vorfeld der Aufnahme beispielsweise in einem Labor oder mit Hilfe eines Testfeldes kalibriert werden (WITTE & SPARLA, 2018:343). Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung der inneren Orientierung einer Kamera ist die Durchführung einer Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung.

## **2.2 SfM-Prozesskette**

Wo früher in der Mehrbildphotogrammetrie punktweise Auswerteverfahren zum Zuge kamen wird heute an dessen Stelle die flächenhafte Methode für unregelmäßige Objektflächen verwendet. Dieses Verfahren heißt Structure from Motion (Struktur durch Bewegung) (POMASKA, 2016:121).

In digitalen Bildern wird nach flächenhaften Merkmalen gesucht. Anhand dieser erfolgt die Berechnung der Rekonstruktion der Aufnahmesituation (Elemente der inneren Orientierung, der äußeren Orientierung und Orientierungspunkte) vollautomatisch. Bei dieser Rechentheorie spielt es keine Rolle, ob sich das Objekt oder die Kamera bewegt.

Zur Prozesskette zählen zunächst die Merkmalsextraktion (feature detection), die Zuordnung korrespondierender Punkte (matching) und die Bündelblockausgleichung, welche allerdings nur eine dünne Punktwolke liefert. Diese bildet die Grundlage für die Berechnung dichter Punktwolken sowie der Oberflächenvermaschung (Dreiecksvermaschung) und der Texturberechnung. Diese können dann weiter für beispielsweise den 3D-Druck oder digitale Orthobildpläne verarbeitet werden (POMASKA, 2016:123).

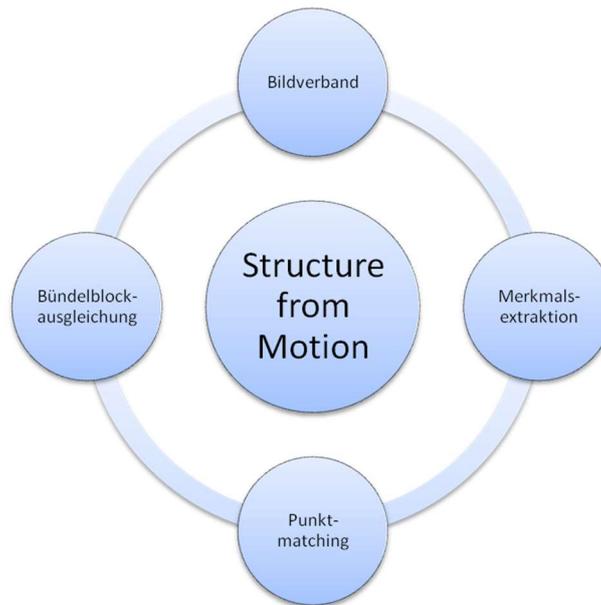


Abb. 6: Komponenten der SfM-Prozesskette

### 2.2.1 Merkmalsextraktion, Interest Operatoren

Um eine Aufnahmesituation rekonstruieren zu können benötigt es zunächst die Bildkoordinaten korrespondierender (homologer) Punkte. Diese Verknüpfungs- oder Orientierungspunkte werden heute in einem automatischen Verfahren über lokale Merkmale in den Bildern gesucht (feature detection, key point detection). In der klassischen Bildauswertung geschieht dies über manuell gemessene und zugeordnete markante Punkte in den Bildern. Die lokalen Merkmale eines Bildes werden anschließend den identischen lokalen Merkmalen in den anderen Bildern zugeordnet (matching) (POMASKA, 2016:123).

Interest Operatoren sind Algorithmen zur Extraktion von markanten Punkten in einer Aufnahme, die als mögliche Punkte für eine Bild-zu-Bild-Zuordnung in Frage kommen. Um diese Punkte zu finden werden Grauwertmuster gesucht, die in einem begrenzten Bereich einmalig und in einem korrespondierenden Bild ähnlich abgebildet werden. Hierzu wird für jeden Bildpunkt eine Kenngröße (Interest-Wert) berechnet, der für die Merkmalszuordnung genutzt wird. Ziel ist es homologe Punkte zu finden, mit denen der Bildverband orientiert werden kann. Kriterien für markante Zuordnungskandidaten nach Luhmann (2010:455) sind:

- „Deutlichkeit (lokale Einzigartigkeit, Unterscheidbarkeit vom Hintergrund),
- Invarianz (gegenüber geometrischen und radiometrischen Verzerrungen, z.B. Rotationen, Skalierungen),
- Robustheit (Unempfindlichkeit gegenüber Rauschen),
- Seltenheit (globale Einzigartigkeit, Unterscheidbarkeit zu anderen Kandidaten),
- Interpretierbarkeit (Interest Werte sind zur weiteren (höheren) Bildanalyse geeignet).“

Luhmann nennt verschiedene Interest Operatoren, wie zum Beispiel den Förstner Operator, SUSAN Operator, FAST Operator und SIFT-OPERATOR, die alle mit unterschiedlichen Herangehensweisen nach Interest Punkten suchen.

Durch den Interest Operator erhält man eine Liste vom Bildpunkten mit deren Koordinaten und Interest-Werten aus den beteiligten Bildern. Durch eine Korrespondenzanalyse wird aus dieser Liste eine Schnittmenge korrespondierender Punkte ermittelt. Dabei spielen die Aufnahmeconfiguration, die Struktur des Objektes und die zur Verfügung stehenden Informationen über Näherungswerte und Orientierungsparameter eine entscheidende Rolle. Bei verschieden konvergenten Bildern, wie in der Aufgabe dieser Bachelorarbeit, ist eine Zuordnung über Kanten am besten geeignet. Werden wie bei den Aufnahmen dieser Bachelorarbeit Zielmarken verwendet kann die Zuordnung vereinfacht werden. Der korrespondierende Suchbereich im benachbarten Bild kann für beliebige Bildpunkte auf die Epipolarlinie beschränkt werden (LUHMANN, 2010:461).

Hierzu wird die Zuordnung des Bildpaares  $B_1$  und  $B_2$  untersucht. Der korrespondierende Punkt  $P''$  zu  $P'$  liegt in einem kleinen Bereich entlang der Kernlinie (Epipolarlinie)  $k''$ . Die Größe des zu untersuchenden Raums um  $K''$  hängt von den Orientierungsparametern der Bildmessung von  $P'$  sowie der maximalen Tiefenausdehnung  $\Delta Z$  ab (vgl. Abb. 7) (LUHMANN, 2010:463).

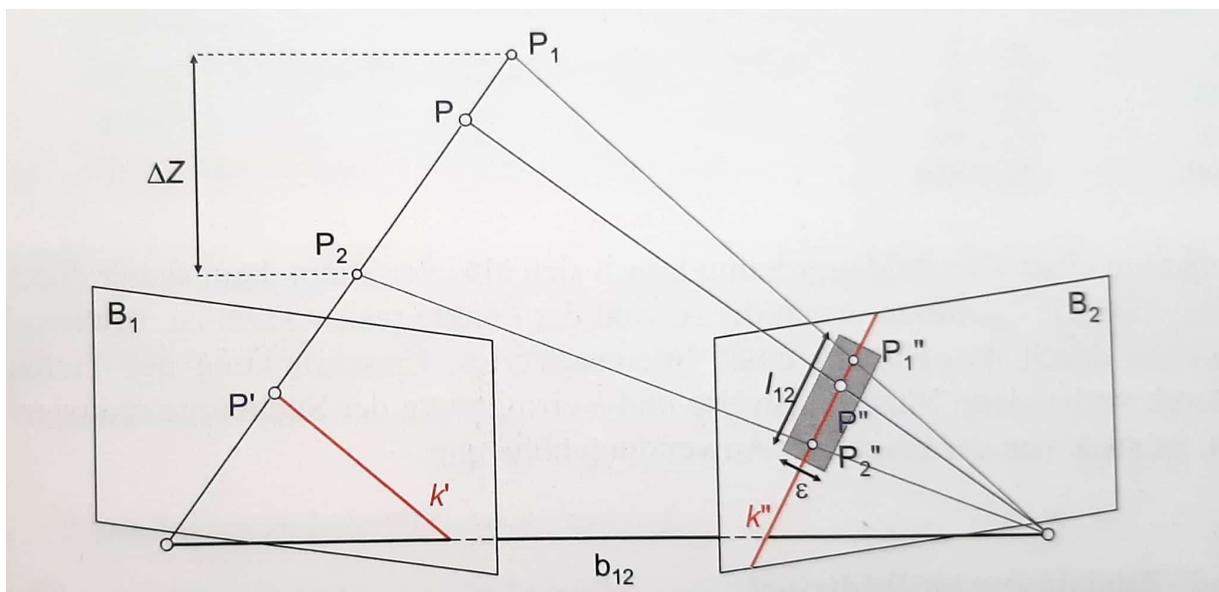


Abb. 7: Zuordnung mit Epipolarlinien im Bildpaar (LUHMANN, 2010:463)

### 2.2.1.1 SIFT-Algorithmus

Zu den Standardverfahren der Merkmalerkennungsalgorithmen gehört der SIFT-Algorithmus (Scale Invariant Feature Transform). In dieser Methode wird eine Aufnahme in Merkmalsvektoren, die eine Invarianz gegenüber Translation, Skalierung, Rotation und

Belichtungsinvarianz besitzen, dargestellt. Besonders die Belichtungsinvarianz ist für das Projekt dieser Bachelorarbeit von Bedeutung, da im Verlauf der Aufnahme keine durchgehend einheitliche Beleuchtung der Aufnahmeobjekte gewährleistet werden konnte. Der SIFT-Algorithmus beschreibt jeden Punkt durch den Punkt selbst, seine Position sowie die Drehung und den Maßstab. Zusätzlich erfolgt die Beschreibung des Merkmals anhand von 128 Werten (POMASKA, 2016:124).

Weitere Merkmalerkennungsalgorithmen sind beispielsweise der Speeded up Robust Features (SURF) oder der Features from accelerated Segment Test (FAST). Viele solcher Operatoren zeichnen sich durch Invarianz in Hinsicht auf den Maßstab und die Rotation aus (WITTE & SPARLA, 2015:393).

### 2.2.2 Passpunkte

Passpunkte dienen in erster Linie dazu relativ orientierte Bilder in ein übergeordnetes Koordinatensystem zu überführen und sie somit absolut zu orientieren. Relativ orientierte Bilder können in der Lage, Orientierung und im Maßstab beliebig angeordnet sein. Mit der absoluten Orientierung sind all diese Parameter fest. Als Passpunkte werden Objektpunkte bezeichnet, für die im Objektkoordinatensystem Koordinaten bekannt sind. Für die Aufnahme der Holzfragmente werden hierzu Passpunktmarken verwendet. Das übergeordnete Koordinatensystem ist hierbei lokal und dient lediglich dazu die 3D-Modelle mit einem Maßstab zu versehen. Um ein übergeordnetes Koordinatensystem oder einen Maßstab in die 3D-Modelle einzuführen ist eine Mindestanzahl von drei Passpunkten notwendig. Zusätzlich sollen sie zur Unterstützung bei der Orientierung des Bildverbandes im Programm Agisoft Metashape dienen. Die Software kann die von ihr selbst ausgegebenen Passpunktmarken automatisch erkennen (LUHMANN, 2010:289).



Abb. 8: Passpunktmarke 1 aus Agisoft Metashape

Bei der Anordnung der Passpunkte ist wichtig, dass sie gut und in ausreichender Anzahl in den Aufnahmen zu erkennen sind. Zusätzlich soll gewährleistet sein, dass sie gut in den Aufnahmen zu identifizieren sind (WITTE & SPARLA 2015:360). Um einen Maßstab in das übergeordnete Koordinatensystem einzuführen müssen die Strecken zwischen den Passpunkten bekannt sein.



Abb. 9: Passpunktanordnung für ein Holzfragment in Oymağaaç

### 2.2.3 Bündelblockausgleichung

Auf die Merkmalsextraktion folgt die Bündelblockausgleichung. Bei der Bündelblockausgleichung werden beliebig viele im Raum angeordnete Bilder (Strahlenbündel) rechnerisch eingepasst. Hierzu werden in den einzelnen Bildern korrespondierende Punkte ermittelt und zu einem Modell zusammengefügt. Dieses Modell bildet eine vollständige Rekonstruktion des aufgenommenen Objekts in einer dünnen Punktwolke. Bei der Bündelblockausgleichung werden alle gemessenen und alle unbekannt Parameter eines Bildverbandes so berechnet und optimiert, dass sich die homologen Strahlen an den Objektpunkten zu einem bestmöglichen Schnitt gebracht werden (vgl. Abb. 10) (LUHMANN, 2010:301 f.; WITTE & SPARLA, 2015:373).

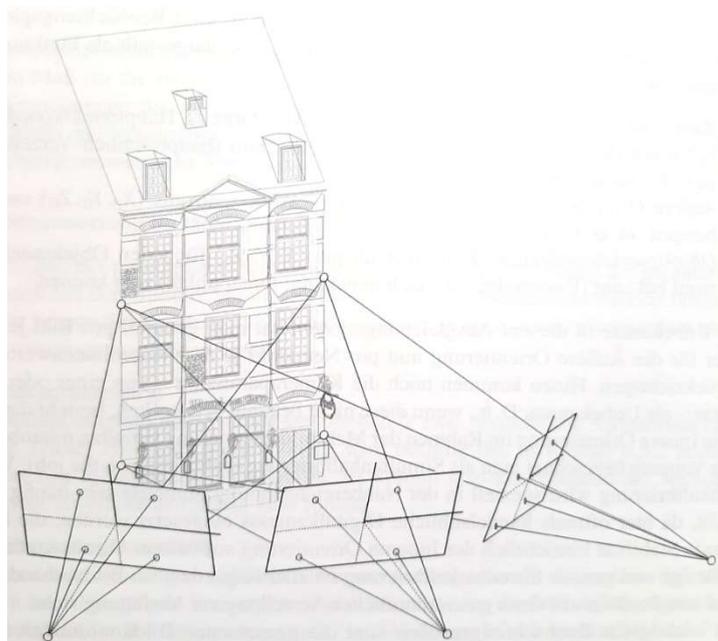


Abb. 10: Mehrbildorientierung (WITTE & SPARLA, 2015:373)

Im Zuge der Bündelblockausgleichung werden die Parameter der äußeren Orientierung der Bilder und die Koordinaten der Verknüpfungspunkte im Objektkoordinatensystem bestimmt. Grundlage des Verfahrens ist das mathematische Modell der Zentralperspektive. Bei der Bündelblockausgleichung werden Bildkoordinaten als Beobachtungen genutzt (ALBERTZ & WIGGENHAGEN, 2009:259). Bildkoordinaten können sowohl Neupunkte, als auch koordinatenmäßig bekannte Passpunkte sein, die der Verknüpfung der Bilder untereinander dienen (WITTE & SPARLA, 2015:374). Die Strahlenbündel zwischen den Projektionszentren der Bilder zu den Bildpunkten werden anhand der Kollinearitätsgleichungen berechnet (vgl. Abb. 11) (ALBERTZ & WIGGENHAGEN, 2009:259).

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

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

$X_0, Y_0, Z_0$ :	Koordinaten des Projektionszentrums $O$ (= Aufnahmeort) in $S_O$
$r_{ij}$ :	Komponenten der Rotationsmatrix $R$ , die von den drei unabhängigen Drehwinkeln $\omega$ , $\varphi$ und $\kappa$ abhängen Gl. (9.2)
$c_k$ :	Kamerakonstante
$x_h, y_h$ :	Koordinaten des Bildhauptpunktes $H$ in $S_B$
$dx, dy$ :	Bildfehler

Abb. 11: Kollinearitätsgleichung mit Erklärung der Parameter (WITTE & SPARLA, 2015:343)

Die Simultankalibrierung (Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung) wird häufig in der Nahbereichsphotogrammetrie eingesetzt, da hier handelsübliche Digitalkameras verwendet werden. Dabei wird neben der äußeren Orientierung auch die innere Orientierung der Kameras durch die Bündelblockausgleichung mitbestimmt (WITTE & SPARLA, 2015:374).

Das Ergebnis der Bündelblockausgleichung sind die ausgeglichenen 3D-Koordinaten der Objektpunkte. Zusätzlich erhält man die äußere sowie in einer Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung auch die innere Orientierung (LUHMANN, 2010:306).

## 2.3 Dichte Punktwolke

Nachdem das Verfahren Structure from Motion lediglich eine dünne Punktwolke liefert, besteht der nächste Schritt zumeist darin eine dichte Punktwolke zu berechnen.

Bildbasierte dichte Punktwolken werden durch das sogenannte *Dense Image Matching* berechnet. Hierbei besteht die Aufgabe darin innerhalb des orientierten Bildverbandes möglichst viele miteinander korrespondierende Punkte zu finden. Aus diesen werden dann anschließend durch die Berechnung eines Vorwärtsschnitts dreidimensionale Objektpunkte

berechnet. Das Ergebnis ist eine dichte Punktwolke, die die Objektoberfläche annähernd lückenlos darstellt (WITTE & SPARLA, 2015:395).

Die 3D-Punktbestimmung basiert auf dem Verfahren der Triangulation. Hierbei werden jeweils zwei Bilder von zwei verschiedenen Standorten aus dem Bildverband genutzt. Beide Bilder bilden den Objektpunkt  $P$  als  $P'$  bzw.  $P''$  ab. Die Punkte  $P$ ,  $P'$  ( $P''$ ) und das Projektionszentrum  $O'$  ( $O''$ ) liegen dabei auf einer Linie (vgl. Kapitel 2.1). Da die innere und äußere Orientierung mit der Bündelblockausgleichung bekannt sind, können anhand der Bildkoordinaten von  $P'$  und  $P''$  die räumlichen Bildstrahlen mit Hilfe der Kollinearitätsgleichung (vgl. Abb. 11) rekonstruiert werden. Im räumlichen Dreieck zwischen den Punkten  $P$ ,  $O'$  und  $O''$  (vgl. Abb. 12) können nun mit Hilfe eines Vorwärtsschnitts der räumlichen Bildstrahlen die Koordinaten des Punktes  $P$  berechnet werden (WITTE & SPARLA, 2015:352 f.).

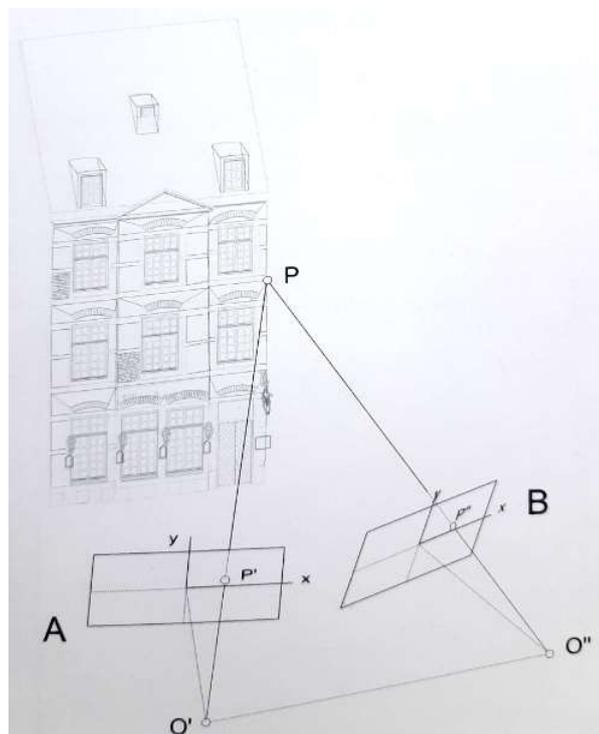


Abb. 12: Prinzip der photogrammetrischen Punktbestimmung (3D-Triangulation) (WITTE & SPARLA, 2015:353)

## 2.4 Dreiecksvermaschung

Für die Erzeugung von digitalen Oberflächenmodellen (DOM) oder auch die Erstellung von 3D-Modellen von Objekten ist es notwendig Punktwolken zu vermaschen, um deren Oberflächenverlauf annähernd beschreiben zu können.

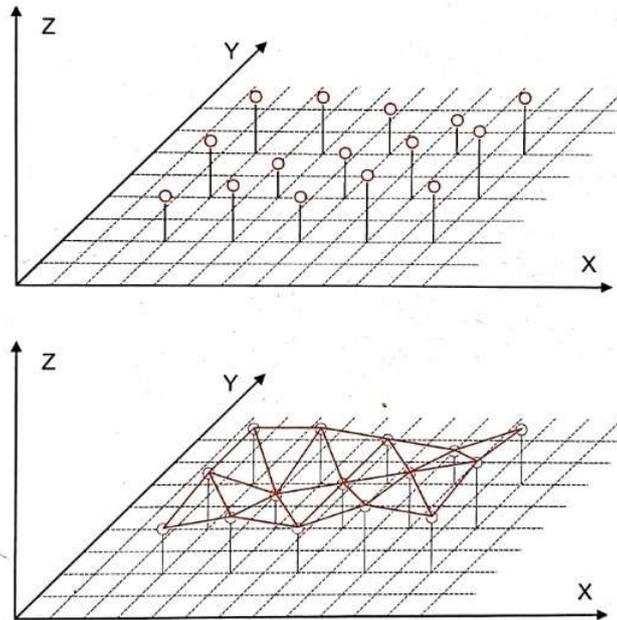


Abb. 13: Dreiecksvermaschung eines Punkthaufens (LUHMANN, 2010:75)

Die Dreiecksvermaschung ist die einfachste Form der Flächenbildung von Punktwolken. Hierbei werden jeweils 3 benachbarte Punkte verbunden und bilden so ein Dreieck. Für die Dreiecksvermaschung gibt es verschiedene Verfahren, wie beispielsweise die Delaunay-Triangulation. Nach Delaunay werden immer die drei am nächsten aneinander liegenden Punkte miteinander verbunden. Wichtig ist dabei, dass der Kreis, der die drei Punkte einschließt keine weiteren Punkte der Punktwolke enthalten darf. Das Ergebnis einer Dreiecksvermaschung ist ein Polyeder, welches in der weiteren Bearbeitung texturiert werden kann. Ein Vorteil der Dreiecksvermaschung gegenüber mehreckigen Polygonen ist, dass sich Punkte innerhalb einer Dreiecksmasche leicht interpolieren lassen (LUHMANN, 2010:75).

## 2.5 Texturierung

Als Textur wird die Struktur oder das Muster einer Oberfläche eines Objektes bezeichnet. Durch sie erhalten Objekte ihr realistisches Aussehen. Im einfachsten Fall wird die Texturierung über Projektion einer Aufnahme auf die Oberfläche des Objekts realisiert. (LUHMANN, 2010:431 f.) Hierbei werden den dreidimensionalen Maschen des gerechneten Modells des Objekts zweidimensionale Ausschnitte aus den Bildern zugeordnet (LEHMANN

& BREUER, 2019:12). Nach einer ebenen Entzerrung werden in den Bildern entsprechende Ausschnitte festgelegt, die der Texturierung des Modells dienen.

Bei einer 2D-Texturprojektion werden die Eckpunkte eines Bildausschnittes durch affine, bilineare oder projektive Transformation auf das Objekt gerechnet. Für die 3D-Texturprojektion wird der Bezug zwischen den originalen Messfoto und Modell durch die photogrammetrischen Abbildungsgleichungen (Kollinearitätsgleichungen; vgl. Abb. 11) hergestellt. Die Übertragung des Texturbildes auf das Modell geschieht über eine Interpolation (LUHMANN, 2010:433).

## 2.6 Fotografie

Da für die Berechnung der digitalen 3D-Modelle Aufnahmen mit Kameras gemacht werden müssen wird auch auf die Theorie der Fotografie eingegangen. Diese lässt sich am besten anhand des Belichtungsdreiecks erläutern (vgl. Abb. 14). Das Belichtungsdreieck beschreibt den Zusammenhang zwischen der Belichtungszeit, dem ISO-Wert und der Blende. Diese drei Parameter haben Einfluss auf Verwackelungsgefahr, Bildrauschen und Schärfentiefebereich.

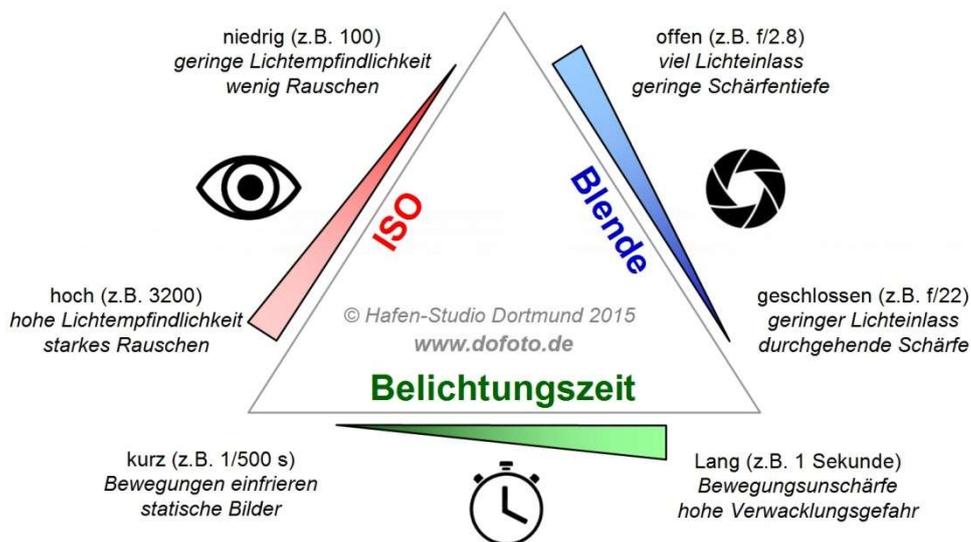


Abb. 14: Das Belichtungsdreieck (verändert nach KLECKER)

Die Belichtungszeit reguliert die Dauer des Lichteinfalls. Umso höher die Belichtungszeit, umso länger fällt Licht durch das Objektiv auf den Sensor ein. Umso länger Licht auf den Sensor fällt, umso heller wird das Bild. Jedoch geht mit einer hohen Belichtungszeit auch die Gefahr einher, dass die Kamera oder das Objekt bewegt wird und somit das Bild unscharf wird (CAPOBUSSI, 2001:99 ff.).

Der ISO-Wert ermöglicht die Lichtempfindlichkeit des Sensors einzustellen. Er ist anhand einer ISO-Skala durch Werte wie 100, 200, 400 usw. standardisiert. Jeder Schritt der Zahlenreihe verdoppelt die Lichtempfindlichkeit entsprechend einer Blenden- oder Zeitstufe. Dies ermöglicht auch in Umgebungen mit wenig Licht gute Aufnahmen zu machen. Ein Nachteil ist, dass mit zunehmendem ISO-Wert das Bildrauschen ansteigt. Bei guten, modernen Kameras ist dieser Effekt jedoch zu vernachlässigen, da die photogrammetrische Auswertung der Aufnahmen nicht negativ beeinflusst wird (WITTE & SPARLA, 2015:352).

Die Blendenöffnung wird mit Hilfe einer Blendenzahl angegeben. Umso weiter die Blende geöffnet ist, umso mehr Licht kann in kurzer Zeit auf den Sensor fallen. Also verringert sich die Belichtungszeit. Mit einer weit geöffneten Blende geht jedoch ein geringerer Schärfentiefebereich einher (CAPOBUSSI, 2001:101).

### 3 Aufnahme der Holzfragmente

Im folgenden Abschnitt wird die Aufnahme der Holzobjekte im Grabungshaus in Oymağaç beschrieben. In zehn Tagen zwischen dem 20.08.2018 und dem 30.08.2018 wurden insgesamt 25 Holzfragmente aufgenommen, von denen 18 zur Holzleiter gehören, die Thema dieser Bachelorarbeit ist. Zunächst werden die Aufnahmeobjekte beschrieben. Es werden Angaben zur verwendeten Hardware und zu den Vorbereitungen gemacht und abschließend der Ablauf der Aufnahme beschrieben.



Abb. 15: Aufnahme der Holzfragmente

### 3.1 Beschreibung der Aufnahmeobjekte

Die aufzunehmenden Holzfragmente bestehen aus insgesamt 18 Teilen. Darunter vier größere, längliche Holzteile, die einmal die Holme der Leiter darstellten und zwischen 50 und 90 cm lang und ca. 8cm dick sind. Der Rest der Fragmente sind zumeist deutlich kleinere Stücke, wie auseinandergebrochene Sprossen der Leiter sowie aus den Holmen herausgebrochene Stücke. Die Besonderheit der Objekte liegt darin, dass sie permanent feucht gehalten werden müssen, da laut Auskunft der Archäologen ansonsten ein Schrumpfprozess des Holzes eintritt. Gerade an den Bruchkanten weisen die Holzstücke viele Details auf, die photogrammetrisch dokumentiert werden müssen. Zwei der Holme weisen zudem ein Loch, in dem wahrscheinlich eine Sprosse steckte bzw. in dem noch immer ein Teil einer Sprosse steckt, auf. Da die Hölzer nirgendwo eingespannt oder ohne weiteres aufgestellt werden können werden für die Aufnahme der großen und kleinen Stücke verschiedene Aufnahmekonzepte entwickelt, die in den folgenden Abschnitten näher erläutert werden.



Abb. 16: Holz mit Loch



Abb. 17: Holz mit Sprosse



Abb. 18: Beispiel für kleines Holz

### 3.2 Vorbereitung in der Hochschule

Vor der Aufnahme Holzfragmente im Grabungshaus in Oymağaaç müssen einige Vorbereitungen getroffen werden. Es wird sich mit den Aufnahmesystemen, der Nikon D810 und D850 vertraut gemacht. Da das Holz permanent in Wasser gelagert wird und auch während der Aufnahme permanent feucht gehalten werden muss, wird auch dies vorher simuliert, um die Reflektionseigenschaften kennenzulernen. Außerdem wurde zur Vorbereitung die Lichtsituation simuliert. Um vor Ort eine optimale Lichtsituation schaffen zu können, wird im Labor für Photogrammetrie der Beuth Hochschule für Technik getestet, wie ein kleiner Raum optimal ausgeleuchtet wird, sodass möglichst wenig Lichtreflektion auf dem nassen Holz entsteht. Schnell wird deutlich, dass die Belichtung des Raumes über eine Deckenlampe oder Ähnliches nicht möglich ist, da zu starke Reflektionen auf dem Holz zu Stande kommen. Für die Beleuchtung werden mehrere Baustrahler genutzt, die an die Decke des Raumes strahlen. Ein Stativ ist bei der Aufnahme notwendig, da der Raum durch die am Boden stehenden Baustrahler nicht sehr hell ausgeleuchtet wird, wodurch sich eine lange Belichtungszeit ergibt.

Da das Holz flach auf einer Seite liegt und nicht frei stehen kann muss es in zwei Sessions aufgenommen werden, wobei es in der zweiten Session um 180 Grad gedreht werden muss. Diese zwei Aufnahmeseiten müssen in der Auswertung bzw. 3D-Modellierung zusammengefügt werden. Die Wahl des Objektivs fällt auf ein 50mm-Objektiv, da ein 20mm-Objektiv einen zu weiten Aufnahmewinkel aufweist. Zur Bestimmung des benötigten Aufnahmeabstandes ist der Schärfentiefebereich wichtig. Hierbei muss beachtet werden, dass die meisten Objekte länglich sind. Das bedeutet, dass ein großer Schärfentiefebereich benötigt wird. Bei kleineren Objekten kann man näher heran gehen, als bei größeren. Bei der Bestimmung des Aufnahmeabstandes geht gleichzeitig eine Berechnung der Pixelgröße am Objekt einher. Diese spielt unter anderem für die gewählte Größe der Passpunkte eine Rolle, da der innere Kreis der Passpunkte mindestens 10 Pixel groß sein muss, damit die Software diese automatisch erkennen kann. Gleichzeitig, darf der innere Kreis aber auch nicht zu groß sein, da die Software dann wiederum Schwierigkeiten bei der Erkennung bekommt.

Schon in den Übungen in der Beuth-Hochschule zeigt sich, dass die Aufnahme mit sich ändernden Kamerastandpunkten sehr zeitaufwendig ist. Die Lösung bildet ein Drehteller, auf dem das Holz positioniert wird. Zwischen den Aufnahmen wird der Teller leicht gedreht. Die Kameraposition ist statisch. Für die Bildorientierung in der Auswertesoftware muss der Drehteller mit gemustertem Material, wie Kork oder Holz versehen werden.

Die Auswertung der Aufnahmen mit Agisoft Metashape gehört ebenfalls zu den Vorbereitungen in der Beuth-Hochschule. Der komplette Ablauf von der Bildorientierung hin zum texturierten 3D-Modell wird durchgeführt.

Die letzte vorbereitende Maßnahme auf die Reise nach Oymağaaç ist die Zusammenstellung der benötigten Materialien. Für die Reise werden folgende Gegenstände mitgenommen:

- 4 Kameras (2 x Nikon D850 und 2x Nikon D810) + Zubehör
- 4 Kamerastative + Kugelköpfe
- Laptop
- Halbmilimeterlineal
- Baustrahler
- Andere kleinere Materialien

### 3.3 Vorbereitung vor Ort

In Oymağaaç werden zunächst die Holzfragmente und die Räumlichkeit, in der die Aufnahme dieser stattfinden wird, besichtigt. Das Grabungshaus ist eine alte Schule. Die Aufnahmen werden in einem ehemaligen Klassenzimmer gemacht. Auffällig ist der sehr instabile Boden, der aus Holzdielen besteht und sich bei Bewegungen von Personen im Raum merklich bewegt. Vor Ort wird sich für zwei Aufnahmekonstellationen entschieden. Die kleineren Holzstücke werden auf einem Drehteller aufgenommen. Dieser muss allerdings entsprechend präpariert werden, damit für die Bildorientierung mit Metashape ausreichend Verknüpfungspunkte gefunden werden. Hierzu werden, wie schon in der Vorbereitung, Korkplatten fest auf den Drehteller geklebt. Zunächst werden die Holzstücke ohne Befestigung auf den Korkplatten auf dem Drehteller platziert. Später wird eine Konstruktion aus Plastikhüllen, Klammern und Styropor gebaut. Diese wird vor allem für die länglichen Fragmente verwendet, die in das Styropor gesteckt werden. Auf die Konstruktion werden Passpunktmarken geklebt.



Abb. 19: Aufbau der Drehtelleraufnahmen



Abb. 20: Konstruktionsaufbau mit Passpunkten

Für die größeren Holzstücke wird eine Methode entwickelt, bei der auf einem Tisch mehrere Kabelleisten parallel im Abstand der Breite einer vor Ort vorhandenen Kunststoffkiste mit Nägeln befestigt wird. Da eine der Kunststoffkisten zu kurz ist, um eines der großen Hölzer darauf zu legen, werden zwei dieser Kisten mit Hilfe von Spanngurten aneinander gebunden und eine Art „Schlitten“ gebaut. Die Spanngurte dienen gleichzeitig, dazu den Schlitten durch

die Führung zu ziehen. Die Grundidee dabei ist, dass jeweils eine Kamera auf beiden Seiten des Tisches im gleichen Abstand zum Objekt aufgestellt wird und der „Schlitten“ vorsichtig in kurzen Schritten zwischen den Aufnahmen bewegt wird (vgl. Abb. 21). Für die Unterlage auf dem Schlitten werden verschiedene Möglichkeiten, wie zum Beispiel schwarzer Stoff und wiederum Kork getestet. Der Kork stellt sich dabei als beste Lösung heraus. Die Passpunktmarken werden auf Stahlleisten um das Holz herum verteilt. Bei mehreren der Holme der Leiter werden Styroporpyramiden ausgeschnitten und am Holz so platziert, dass es beim Ziehen an den Spanngurten nicht bewegt wird.

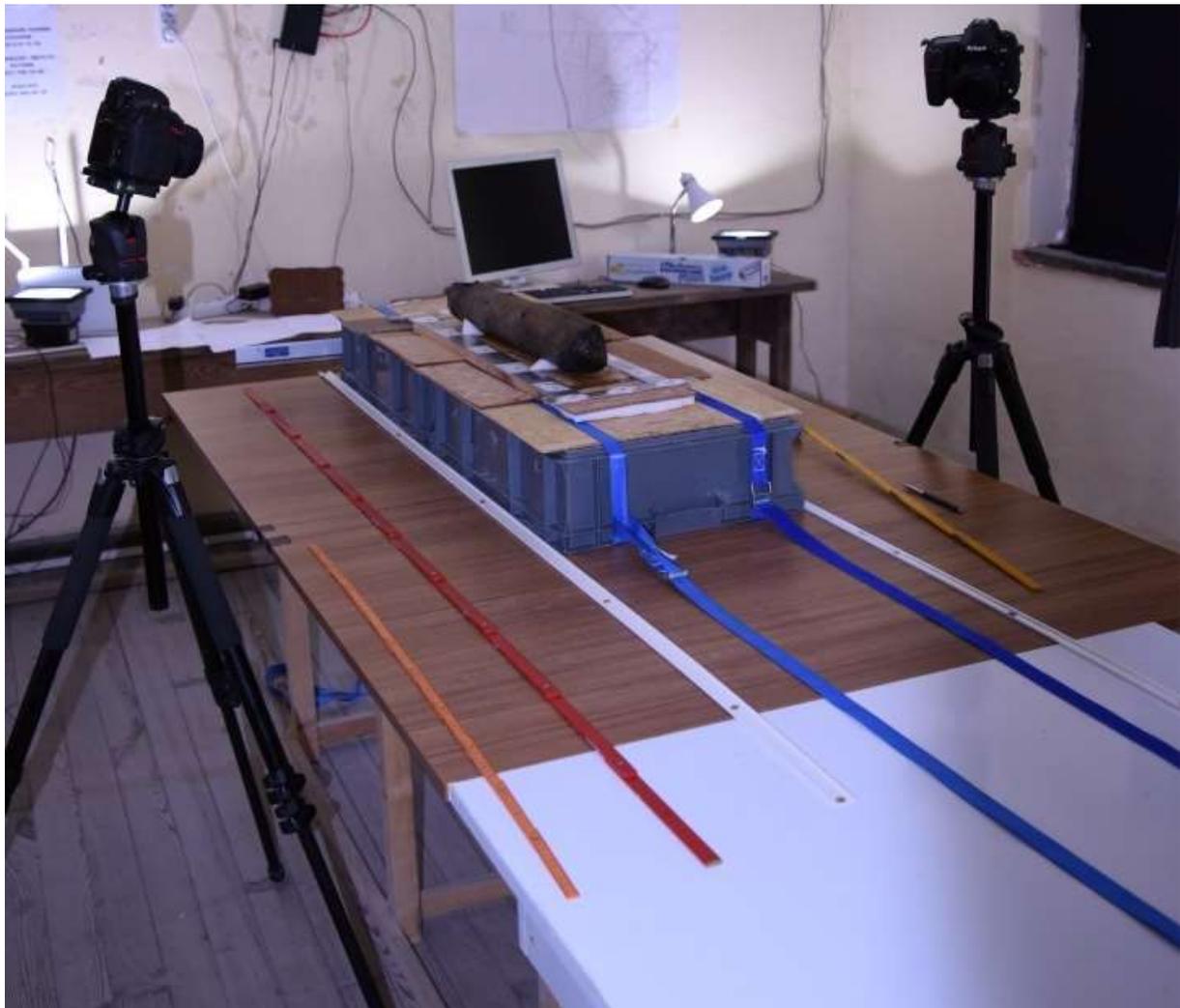


Abb. 21: Aufnahmeaufbau mit Beleuchtung im Hintergrund, 2 Kameras und „Schlitten“

Ein weiterer Schritt der Vorbereitung ist das Anfertigen der Maßstäbe. Hierfür werden mit Agisoft Metashape ausgegebene Passpunkte (*Tools – Markers – Print Markers*) auf zuvor in der Beuth-Hochschule angefertigten Stahllatten mit Hilfe von doppelseitigen Fotoklebecken aufgeklebt (vgl. Abb. 22). Die Passpunkte werden vor Ort mit Agisoft Metashape erstellt und gedruckt. Bevor sie aufgeklebt werden, werden sie laminiert, um sie vor Nässe zu schützen.

Mit Hilfe eines Halbmillimeterlineals und einer Lupe werden die Abstände zwischen allen Punkten auf der Stahlplatte bestimmt (vgl. Abb. 23).



Abb. 22: Passpunktmaßstäbe mit aufgeklebten, laminierten Passpunktmarken

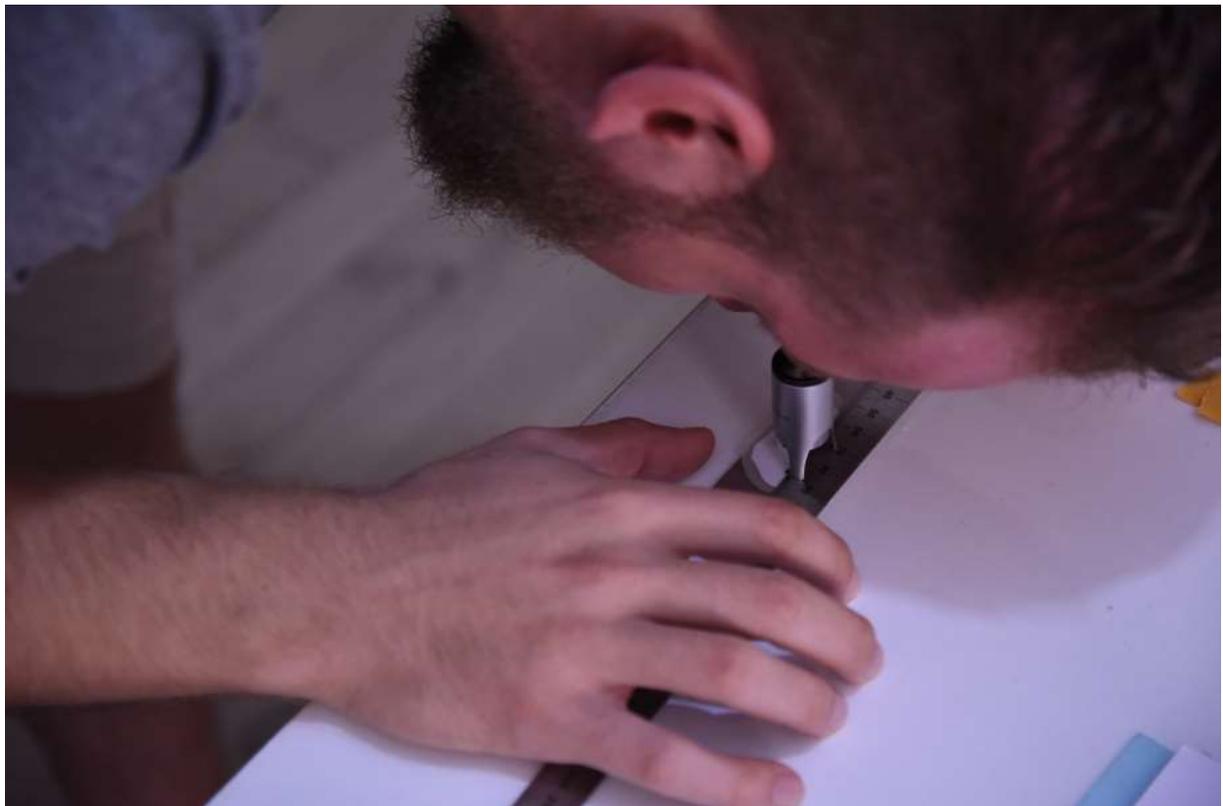


Abb. 23: Messen der Passpunktstrecken

In der Vorbereitung wird sich auch mit der Belichtung der aufzunehmenden Objekte beschäftigt. Da sich durch die wandernde Sonne das Licht im Raum verändert werden alle Fenster mit Stofftüchern abgehängt. Die Belichtung findet über 6 Baustrahler statt, die zur Decke des Raumes hin ausgerichtet werden. Je nach Aufnahmesituation wird die Belichtung

leicht angepasst. Dies ist notwendig, da es aufgrund der Nässe des Holzes ansonsten zu Reflektionen kommen kann.

Bevor mit der Aufnahme begonnen werden kann, werden die passenden Kameraeinstellungen vorgenommen. Bei großem Schärfentiefebereich wird gleichzeitig die Blende klein sowie die Belichtungszeit groß (vgl. Kapitel 2.6). Da die Holzfragmente zum Teil sehr lang sind, muss der Schärfentiefebereich sehr groß werden. Die Belichtungszeit erhöht sich dadurch merklich. Der Schärfentiefebereich wird mit Hilfe der App *SchärfeTiefeRechner* von Detlef Vagt berechnet.



Abb. 24: Screenshot der App *SchärfeTiefeRechner* von Detlef Vagt

Zur Verringerung der Lichtreflektion auf den Holzfragmenten werden auf die Objektive Polfilter aufgesetzt, durch die das Licht gefiltert werden kann. Der ISO-Wert kann bei den Kameras höher eingestellt werden, da diese sehr leistungsfähige Sensoren besitzen, wodurch Rauschen kein Problem darstellt. Er wird für die meisten Bilder zwischen 200 und 800 eingestellt. Als Aufnahmemodus für die Kameras wird der Modus Apertur eingestellt. In diesem Modus kann die Blendenöffnung manuell eingestellt werden, wobei die optimale Belichtungszeit automatisch von der Kamera berechnet wird.

### 3.4 Verwendete Kameras

Für die Aufnahme der Holzfragmente in Oymağaaç werden vier Kameras verwendet. Zwei Kameras des Modells Nikon D810 und zwei Kameras des Modells Nikon D850. Diese Kameras werden gewählt, da sie die laut Auskunft der Mitarbeiter des Labors für Photogrammetrie die Aufnahmesysteme mit den besten Sensoren des Labors sind. Für die Aufnahmen der Leiterholme werden von Beginn an die D850 verwendet, während für die kleineren Fragmente die D810 zum Einsatz kommt. Nach Abschluss der Aufnahmen der größeren Holzfragmente werden die D850 auch für die kleineren Holzobjekte verwendet.



Abb. 25: Nikon D850 (NIKON, 2019b)

Vier Kameras sind notwendig, damit vor Ort alle vier Teilnehmer der Messung gleichzeitig arbeiten können und eine möglichst optimale Ausnutzung der Zeit möglich ist. Vor Ort wird sich dazu entschieden, dass lediglich Herr Koch, Frau Cakmak und Herr Pergande Fotos aufnehmen, während Frau Lehmann bereits eine grobe Kontrolle der Bildverbände durchführt.

Aufnahmesystem	Sensortyp	Sensorgroße	Auflösung in Pixel	Pixelgröße in $\mu\text{m}$
Nikon D810	CMOS-Sensor	35,9 x 24,0 mm	7360 x 4912	4,9
Nikon D850	CMOS-Sensor	35,9 x 24,0 mm	8256 x 5504	4,3

Tabelle 1: Verwendete Kameras (NIKON, 2019a & NIKON, 2019b)

Für die Aufnahmen werden 50mm Objektive verwendet. Hierzu wird sich nach mehreren Testläufen im Labor für Photogrammetrie entschieden (vgl. Kapitel 3.2), da ein 20mm Objektiv einen zu großen Aufnahmewinkel für die Größe der Objekte besitzt. Objektive mit größerer Brennweite besitzen wiederum einen zu geringen Aufnahmewinkel.

### 3.5 Durchführung der Aufnahme

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben werden für die Aufnahmen der größeren Hölzer zwei Nikon D850 Kameras auf gleicher Höhe links und rechts vom Schlitten aufgebaut. Hierbei sind die Kameras 55-90 cm vom Objekt entfernt (vgl. Abb. 21). Dabei ergibt sich aus dem Strahlensatz mit den bekannten Größen Kamerakonstante ( $c$ ), Objektabstand ( $a$ ) und physikalische Pixelgröße des Sensors ( $d'$ ) (vgl. Kapitel 3.4) ein Pixelgrößenbereich am Objekt von:

$$d = \frac{d'}{c} * a = \frac{4,3\mu m}{50mm} * 55cm \approx 0,047mm$$

$$d = \frac{d'}{c} * a = \frac{4,3\mu m}{50mm} * 90cm \approx 0,077mm$$

Der Abstand der Kamera zum Holz wird bei den Aufnahmen mittels Zollstock ermittelt. Um einen Überlappungsbereich von ca. 75% zu erreichen wird das Objekt in Zehn-Zentimeter-Schritten mit Hilfe der Spanngurte jeweils nach jeder Aufnahme in der Schiene weitergezogen. Nach Witte & Sparla ist ein Überlappungsbereich von 60-70% anzustreben (WITTE & SPARLA, 2015:359). Die Gesamtbreite des Bildes ergibt sich aus der Pixelgröße \* der Anzahl der Pixel des Sensors in der Breite. Das ergibt etwa eine Bildbreite von 38,8 – 63,6cm. 10cm entsprechen dabei etwa 15-25% der Breite, was zu einer Bildüberlappung von 75-85% führt. Auch die Zug-Distanz wurde mittels eines Zollstocks überprüft. Dieser Vorgang wird in zwei bis drei verschiedenen Aufnahmehöhen, je nach Detailliertheit des Objekts, mit einer Kamerahöhe von 1,2m, 1,4m und 1,6m wiederholt (vgl. Abb. 26).

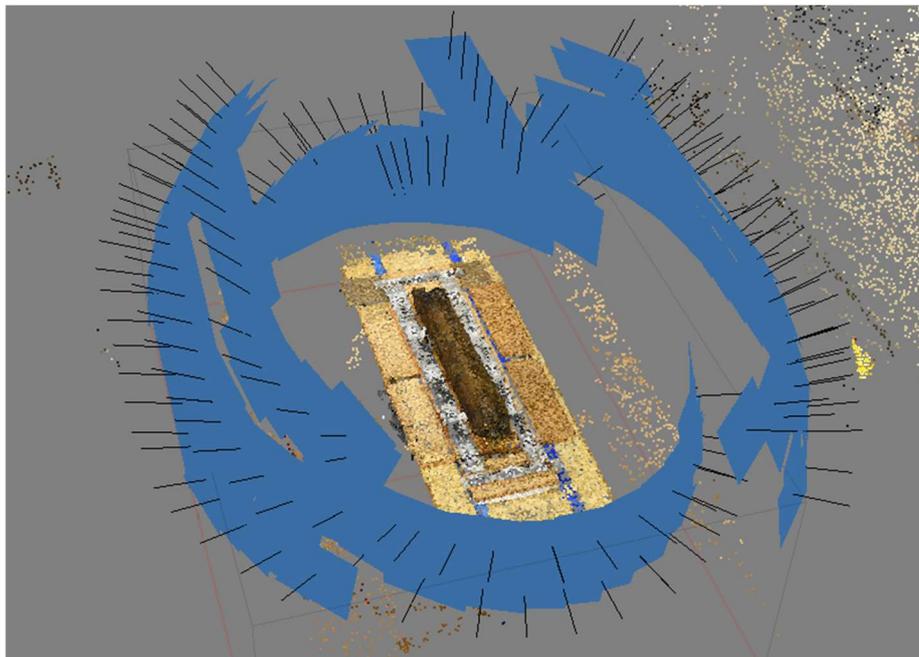


Abb. 26: Aufnahmekonfiguration für den „Schlitten“

Da wie bereits erwähnt der Boden im Raum sehr instabil ist, wird an den Kameras ein Auslösetimer von fünf Sekunden eingestellt. So soll vermieden werden, dass sich jemand während der langen Belichtungszeit von bis zu 30 Sekunden durch den Raum bewegt und dadurch ein Verwackeln der Bilder verursacht. Bei detailreicheren Holzstücken wird ein Stativ mit einer D850 nach den Aufnahmen von der Seite zusätzlich auf dem Tisch aufgebaut, damit Aufnahmen im Abstand von 90cm von oben gemacht werden können. Hierbei wird das gleiche Prozedere verwendet, wie für die Aufnahmen von der Seite. Die Kamera steht still und das Objekt wird mit dem Schlitten in Zehn-Zentimeter-Schritten gezogen. Bei sehr detailreicheren Bereichen des Holzes wird die Ziehweite auf fünf Zentimeter gesenkt um mehr Bilder dieser Abschnitte zu haben.



Abb. 27: Aufnahme der Stirnseiten

Die Stirnseiten der langen Holzstücke werden im Abstand von 65cm aufgenommen (vgl. Abb. 27). Hierbei wird jedoch die Kamera statt des Holzes bewegt, da eine Bewegung des Holzes nicht sinnvoll ist und schwer zu handhaben wäre. Nachdem Aufnahmen von der Seite, von Oben und an den Stirnseiten gemacht sind wird das Holzstück um 180 Grad gedreht und der Vorgang wiederholt.



### 3.6 Kontrolle

Nachdem ein Objekt aufgenommen ist, wird es vor Ort an einem leistungsstarken Laptop erstmals kontrolliert. Hierzu werden die Bilder mit Hilfe des Programms Agisoft Metashape orientiert, um garantieren zu können, dass genügend Fotos vom jeweiligen Holzstück vorhanden sind und es ausreichend mit Aufnahmen abgedeckt ist. Die endgültige Auswertung erfolgt in der Beuth-Hochschule für Technik im Labor für Photogrammetrie (vgl. Kapitel 4).

PC Art	Grafikkarte	Prozessortyp	Betriebssystem	Arbeitsspeicher
Dell Precision M6700	NVIDIA Quadro K3000M u. Intel® HD Graphics 4000	Intel® Core™ i7-3740QM CPU 2.70GHz, 4 Kerne	Windows 7	32.0 GB

Tabelle 2: Daten zum Laptop für die Auswertung vor Ort

## 4 Photogrammetrische Auswertung der Holzfragmente

Für die Auswertung der Aufnahmen der Holzfragmente wird das Programm Agisoft Metashape der Firma Agisoft LLC aus Sankt Petersburg verwendet. Das Programm wird von Agisoft LLC sowohl in einer Standard, als auch in einer Professional Edition angeboten. Für die Auswertung wird die Professional Edition in der Version 1.5. genutzt. Mittlerweile hat sich das Programm als Standardprogramm für die Auswertung von photogrammetrischen Aufnahmen durchgesetzt.

Agisoft LLC bietet mit Agisoft Metashape ein leistungsstarkes Programm im Bereich der VSfM (Visual Structure from Motion), welches auch erweiterte Funktionen im Bereich der Oberflächenmodellierung mitbringt. Dazu gehören unter anderem die Berechnung von Vermaschungen und Texturierungen, die für die Auswertung der Aufnahmen der Fragmente gefordert sind. Sehr vorteilhaft für die Auswertung ist auch der schrittweise Arbeitsablauf (Workflow), der im Programm annähernd vorgegeben ist. Des Weiteren stehen Werkzeuge für die Maskierung von Bildern, die Editierung von Punktwolken oder die Oberflächengenerierung zur Verfügung. Die Ausgabe von 3D-PDFs oder Orthophotos werden ebenfalls ermöglicht. (POMASKA, 2016:146).

### 4.1 Verwendete Hardware

Die Berechnung der 3D-Modelle mit der Software Agisoft Metashape findet zunächst auf einem Dell Precision-Tower 5810 im Labor für Photogrammetrie an der Beuth Hochschule für Technik Berlin statt. Diese sind mit Intel E5-Prozessor und 32 GB Arbeitsspeicher bereits gut ausgestattet. Nachdem das Labor für Photogrammetrie im Februar 2019 neue Computer

von Schneider-Digital mit deutlich leistungstärkeren Prozessoren erwirbt erfolgt die weitere Berechnung mit den neuen PCs. Der Unterschied zwischen beiden Computern wird in der deutlichen Verringerung der Rechenzeit sichtbar (vgl. Kapitel 4.3).

PC Art	Grafikkarte	Prozessortyp	Betriebssystem	Arbeitsspeicher
Dell Precision-Tower 5810	NVIDIA Quadro K4200 u. PCI GDIHOOK5	Intel® Xeon® CPU E5-1660 v3 3GHz, 8 Kerne	Windows 7	32.0 GB
Schneider-Digital Workstation PULSARON Level 9.0 Single CPU	Radeon™ Pro WX 9100	AMD Ryzen Threadripper 1950X 16-Core Prozessor 3.40 GHZ	Windows 10	64.0 GB

Tabelle 3: Technische Daten der verwendeten Computer

Zusätzlich zu den Computern wird bei der Auswertung eine Bildschirmkombination aus dem 3D PluraView Stereomonitor und einem Standard-Bildschirm genutzt. Der Stereobildschirm wird unter anderem für die nachfolgend in Kapitel 4.2.8 erwähnte Bereinigung der dichten Punktwolke verwendet, da Ausreißer in der dreidimensionalen Ansicht besser erkannt werden können.

## 4.2 Workflow:

Der Workflow (vgl. Abb. 29) wird in Agisoft Metashape durch das Programm schon annähernd vorgegeben und es ist kaum möglich von diesem abzuweichen. Er folgt dem Verfahren Structure from Motion (vgl. Kapitel 2.2).

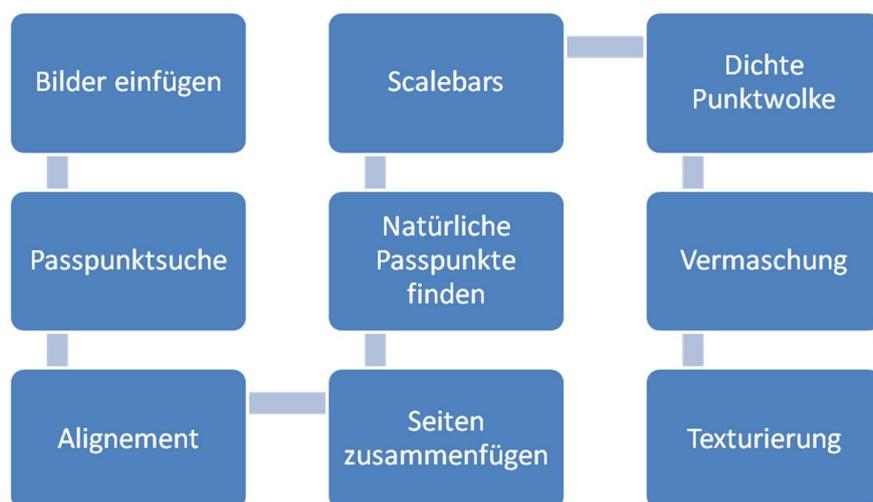


Abb. 29: Workflow in Agisoft Metashape

Zunächst werden die Bilder in das Programm eingeladen, die Passpunkte automatisch identifiziert und der Bildverband zueinander orientiert. Dieser Prozess endet in einer leichten Punktwolke. Diese wird dann über *Scalebars* optimiert. Es folgt die Messung natürlicher Passpunkte in Ober- und Unterseite eines Objekts. Über diese werden die beiden Seiten zueinander orientiert und es wird eine dichte Punktwolke berechnet. Nachdem diese von Ausreißern bereinigt ist folgt die Vermaschung der Punktwolke mit einer anschließenden Texturierung des Objekts.



Abb. 30: Bildreihe vom Alignment zur Textur

#### 4.2.1 Einspielen der Bilder

Zunächst werden die Bilder via Kartenlesegerät auf den PC überspielt und in eine geeignete Ordnerstruktur sortiert. In diesem Fall werden die Bilder in Hauptordner für die einzelnen Aufnahmeobjekte mit Unterordnern für die einzelnen Seiten und Fokussierungen erstellt.

In Agisoft Metashape werden die Bilder über den Toolbar Button *Workflow – Add Photos* hinzugefügt. Hierzu werden die Bilder aus einem Ordner im sich öffnenden Fenster ausgewählt. Sinnvoll ist das Einspielen nach den jeweiligen Fokussierungen und direkt nach dem Einspielen des jeweiligen Fokus eine *Camera Group* des jeweiligen Fokus über *Tools – Camera Calibration...* zu erstellen und erst danach die nächste Fokussierung einzuspielen. Dies ist laut Agisoft LLC für die korrekte Verarbeitung in Metashape notwendig. Bei den einzelnen *Camera Groups* ist es wichtig, dass der Mindestabstand zwischen Kamerazentren und Objekt vernachlässigbar ist (AGISOFT LLC, 2019:16 f.).

Sind die Bilder eingespielt lässt sich die Bildqualität anhand der *Image Quality* teilweise beurteilen. Die *Image Quality* ist ein Wert, um den User bei der Beurteilung schlecht fokussierter Bilder zu unterstützen, da schlecht fokussierte Bilder eine Auswirkung auf die Qualität bzw. das Ergebnis der Bildorientierung (Alignment) haben können. Bei einem Wert von unter 0,5 ist es empfehlenswert das Bild für die nachfolgende Bearbeitung des Projekts zu deaktivieren, sofern das Objekt noch ausreichend abgedeckt ist (AGISOFT LLC, 2019:22). Die *Image Quality* kann durch einen Rechtsklick und Auswahl *Estimate Image Quality* im

Kontextmenü für zuvor ausgewählte Bilder bestimmt werden. Da bei den Aufnahmen der Hölzer jedoch häufig ein Großteil des Objektes und Bildes außerhalb des Schärfentiefebereiches liegt ist die Beurteilung nach diesem Wert eher hinfällig, da dieser aufgrund der großen Unschärfe in den Bildern häufig schlecht ausfällt. Dennoch wird dieser Wert bestimmt und die Bilder mit sehr geringer *Image Quality* besonders begutachtet, um gegebenenfalls verwackelte Bilder ausfindig zu machen.

#### 4.2.2 Passpunktsuche

Der nächste Schritt ist die automatische Passpunktsuche des Programms. Hierzu wird der Menüpunkt *Tools – Markers – Detect Markers* ausgewählt. Im sich öffnenden Fenster müssen die Parameter für die verwendeten Marker angegeben werden. Für die Aufnahme der Leiterstücke werden 12-Bit-Marker verwendet. Die Passpunktsuche in Metashape erkennt die Passpunkte in den Bildern automatisch und misst diese im entsprechenden Referenzbild (vgl. Abb. 31) (AGISOFT LLC, 2019:72).



Abb. 31: Aufnahme eines Holzfragmentes mit erkannten Passpunktmarkern

Nach der automatischen Passpunkterkennung ist es ratsam die erkannten Passpunkte zu überprüfen. Oftmals kommt es vor, dass Passpunkte falsch erkannt werden oder der Algorithmus falsche Passpunkte in Strukturen findet (vgl. Abb. 32). Diese sind zu entfernen, da sonst die Qualität der Bildorientierung verschlechtert wird. Es kommt auch vor, dass ein Passpunkt, der verwendet wird, in einzelnen Bildern verwechselt wird, wenn Teile der Marke überlagert werden.



Abb. 32: Falsch erkannter Passpunkt auf der Korkunterlage

### 4.2.3 Bildorientierung

Nachdem die Passpunkte erkannt sind, folgt die Bildorientierung (Alignment). Das Alignment wird über den Menüpunkt *Workflow – Align Photos* gestartet. Es öffnet sich ein Dialogfenster in dem verschiedene Einstellungen für die Bildorientierung vorgenommen werden können (vgl. Abb. 33). Die Einstellung der Genauigkeit (*Accuracy*) regelt, ob die Bildorientierung mit den Originalbildern (*Highest*) oder mit skalierten Bildern durchgeführt wird. Bei jeder Verringerung der Einstellung werden die Bilder um den Faktor 4 herunterskaliert. Die Einstellung *Generic preselection* ermöglicht eine Beschleunigung des Orientierungsvorgangs, da hierbei anhand skalierten Bilder eine Vorauswahl sinnvoller Bildpaare getroffen wird. Das *Key point limit* ist die maximale Anzahl möglicher Verknüpfungspunkte, die aus jedem Bild extrahiert werden. Das *Tie point limit* gibt die maximale Anzahl der Verknüpfungspunkte für jedes Bild an. Die Einstellung 0 bewirkt, dass es kein Limit für Verknüpfungspunkte gibt. Durch die Option *Adaptive camera model fitting* fließen die zur Verfügung stehenden Kameraparameter in die Berechnung ein (AGISOFT LLC, 2019:23 f.).

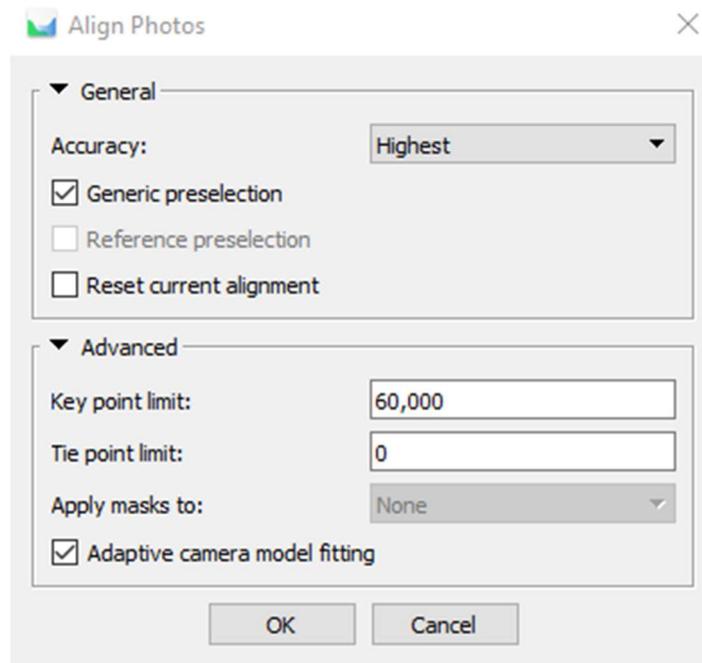


Abb. 33: Einstellung für die Bildorientierung

Mit einem Klick auf *OK* beginnt die Berechnung der Bildorientierung. Hierbei sucht Metashape nach identischen Punkten in den Bildern. Anhand dieser wird eine Bündelblockausgleichung gerechnet (vgl. Kapitel 2.2.3). Als Ergebnis erhält man eine Punktwolke mit geringer Dichte und die Kamerapositionen aller orientierten Aufnahmen (vgl. Abb. 34) (AGISOFT LLC, 2019:V). Diese Punktwolke findet in der weiteren Bearbeitung keine Verwendung.

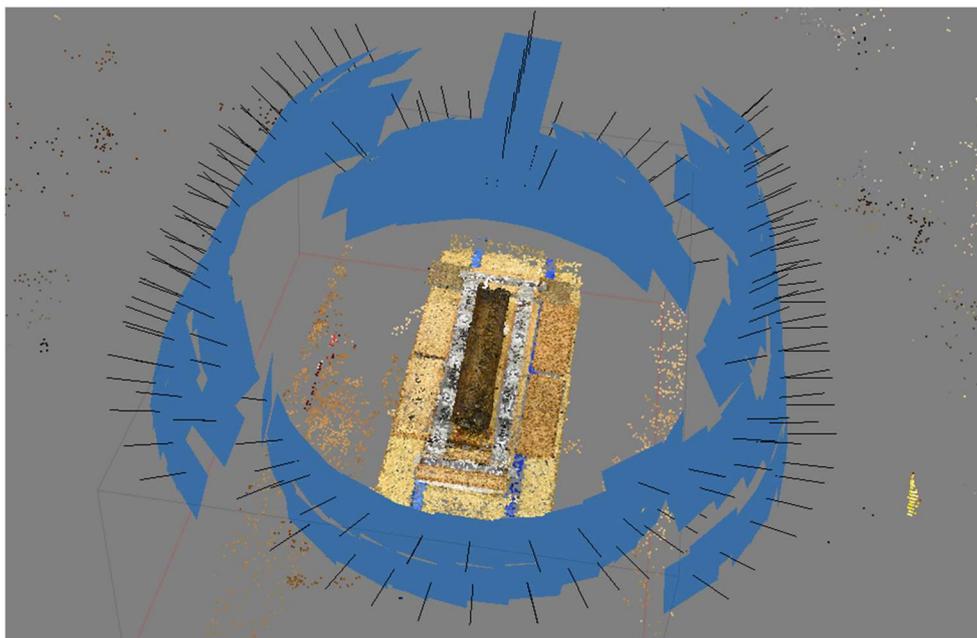


Abb. 34: Orientierter Bildverband mit leichter Punktwolke

Ist die Bildorientierung berechnet werden die Positionen der Kameras visuell beurteilt. Ist bei der Orientierung ein Fehler unterlaufen wird das schnell deutlich, da entweder in der dünnen Punktwolke deutlich erkennbare Fehler auftreten (vgl. Abb. 35) oder aber die Position einer Kamera deutlich aus einem Ring von Kamerapositionen heraussticht. Ist es nicht sicher, ob eine einzelne Aufnahme richtig orientiert ist, kann diese ausgewählt werden und durch Rechtsklick und Auswahl des Punktes „Look through“ überprüft werden, ob die Ausrichtung korrekt ist, da hierbei durch die Aufnahme auf das Objekt geschaut wird.

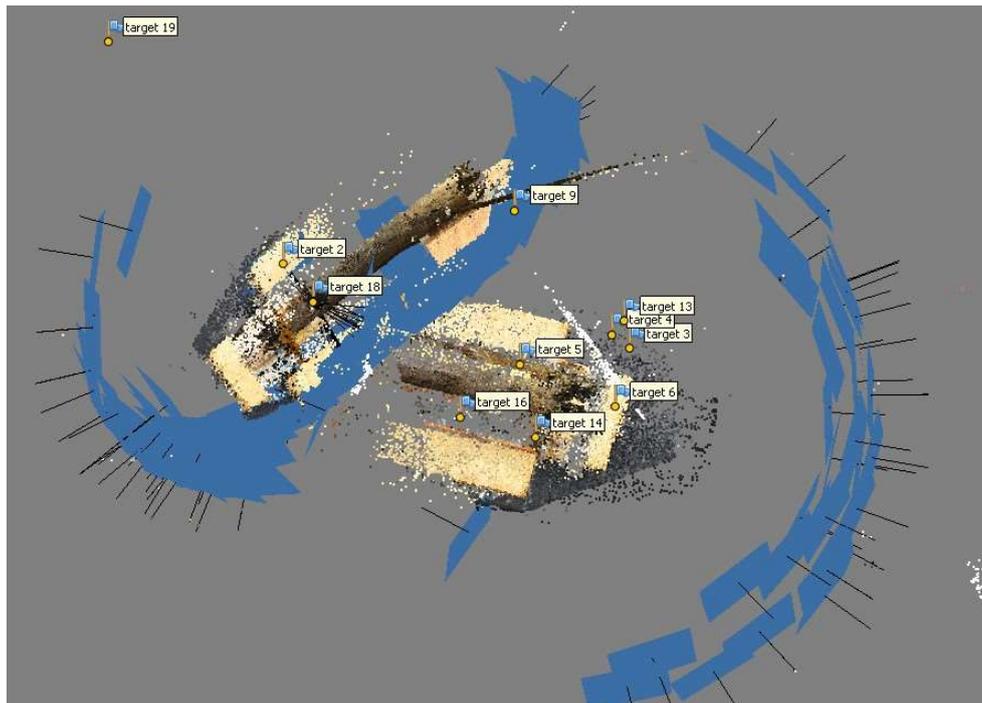


Abb. 35: Fehlerhafte Bildorientierung mit zueinander verdrehten Punktwolken

#### 4.2.4 Einführen der Scale Bars

Sind alle Bilder richtig orientiert werden die gemessenen Strecken zwischen den einzelnen Passpunkten eingefügt. Hierzu werden jeweils zwei Passpunkte ausgewählt und über einen Rechtsklick und die Auswahl *Create Scale Bar* im Kontextmenü eine *Scale Bar* erstellt. Durch einen Doppelklick in das Feld *Distance* der entsprechenden *Scale bar* kann die gemessene Distanz eingegeben werden. Im Feld *Accuracy* wird die Genauigkeit der gemessenen Strecke eingetragen. Im Feld *Error* wird der Georeferenzierungsfehler angezeigt. Sind alle *Scale Bars* erstellt und die Distanzen zwischen Punkten eingetragen, können über die Schaltfläche *Optimize*  verschiedene Parameter der Bildorientierung optimiert werden. Hierzu gehören die Brennweite ( $f$ ), die Bildhauptpunktkoordinaten ( $c_x$ ,  $c_y$ ), die Transformationskoeffizienten ( $b_1$ ,  $b_2$ ), die radialen Verzerrungskoeffizienten ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ ) und die tangentialen Verzerrungskoeffizienten ( $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ) (AGISOFT LLC, 2019:11). Welche Parameter korrigiert werden können gibt das Programm selbst vor.

Mit der Optimierung werden die Georeferenzierungsfehler anhand des nun eingefügten Maßstabs aktualisiert und die Kamerapositionen des Bildverbandes angepasst. Der Fehler sollte nach der Optimierung nicht wesentlich größer als die zuvor eingetragenen Messgenauigkeiten sein. Ist das doch der Fall, kann es an den in Kapitel 4.2.2 erläuterten Grund oder einer schlechten Bildorientierung liegen.

Scale Bars	Error (m)	Scale Bars	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> target 121_target 122	-0.016761	<input checked="" type="checkbox"/> target 121_target 122	-0.000060
<input checked="" type="checkbox"/> target 121_target 123	-0.023217	<input checked="" type="checkbox"/> target 121_target 123	-0.000062
<input checked="" type="checkbox"/> target 121_target 124	-0.017490	<input checked="" type="checkbox"/> target 121_target 124	0.000081
<input checked="" type="checkbox"/> target 122_target 123	-0.017227	<input checked="" type="checkbox"/> target 122_target 123	0.000024
<input checked="" type="checkbox"/> target 122_target 124	-0.024775	<input checked="" type="checkbox"/> target 122_target 124	0.000003
<input checked="" type="checkbox"/> target 123_target 124	-0.016252	<input checked="" type="checkbox"/> target 123_target 124	0.000032
<b>Total Error</b>		<b>Total Error</b>	
Control scale bars	0.019581	Control scale bars	0.000051
Check scale bars		Check scale bars	

Abb. 36: Georeferenzierungsfehler eines Bildverbandes vor und nach der Optimierung

#### 4.2.5 Suche nach natürlichen Passpunkten

Um die zwei Seiten eines Objektes zusammenfügen zu können, müssen die Seiten als eigene Chunks in einem Projekt vorhanden sein. Hierzu müssen die zusätzlichen Chunks in ein Projekt über *File – Append* eingefügt werden. Sind alle Chunks in einem Projekt werden natürliche Passpunkte auf dem jeweiligen Stück Holz gesucht. Diese müssen auf beiden Seiten des Objektes, vorhanden sein und den gleichen Namen besitzen. Die Passpunkte müssen in den Bildern händisch gemessen werden. Für die Orientierung der Chunks untereinander werden mindestens drei Passpunkte benötigt. Mehr sind aber besser, um die Genauigkeit zu verbessern und grobe Fehler zu vermeiden. Als Passpunkte werden meist kleine Kalkflecken oder im Holz steckende Steinchen genutzt. Bei der Auswahl wird darauf geachtet, dass die Punkte über das gesamte Objekt gut verteilt liegen (vgl. Abb. 37).

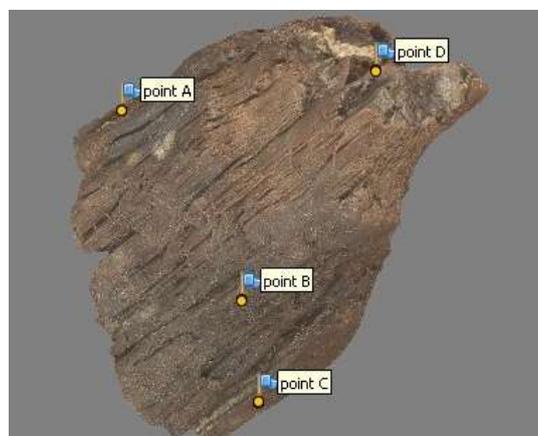


Abb. 37: Verteilung der natürlichen Passpunkte

Sind alle Passpunkte in den Bildern gemessen, kann deren Genauigkeit über einen Rechtsklick auf den jeweiligen Passpunkt und die Auswahl *Show Info* im Kontextmenü überprüft werden. Im Dialogfenster wird eine relative Genauigkeit zum Mittelwert in allen Bildern angegeben, in dem der Punkt gemessen wird sowie eine totale Genauigkeit.

#### 4.2.6 Zusammenfügen der Chunks

Um die verschiedenen Chunks zusammenzufügen muss zunächst eine Orientierung berechnet werden. Diese erfolgt über das Menü *Workflow – Align Chunks*. Im sich öffnenden Fenster werden die zusammenzuführenden Chunks ausgewählt und anschließend noch ein Haken in die jeweilige Methode gewählt (vgl. Abb. 38). Für dieses Projekt wird die Methode *Marker based* verwendet, um die natürlichen Passpunkte (vgl. Kapitel 4.2.5) zu nutzen.

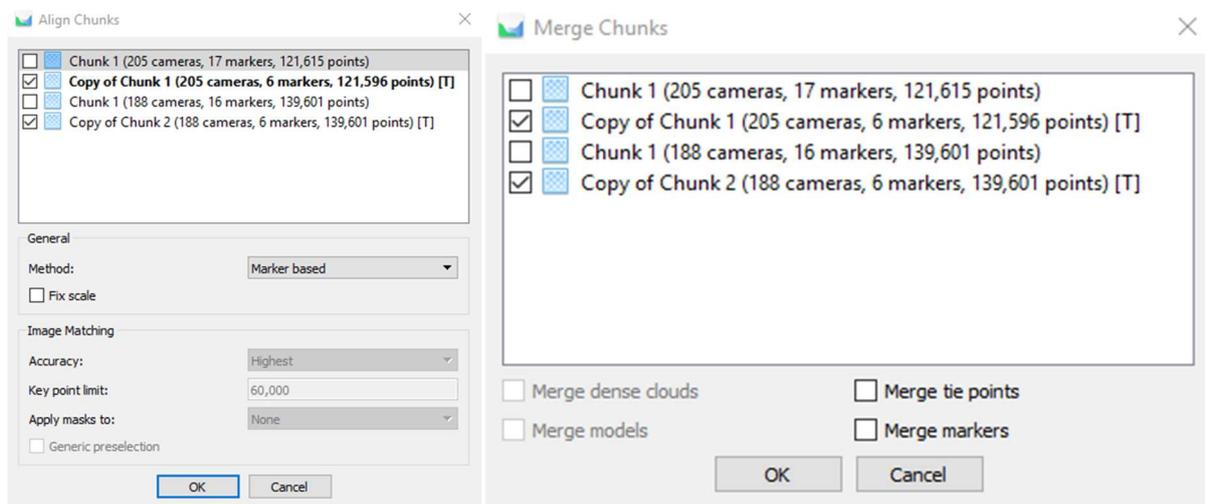


Abb. 38: Auswahlfenster für das Alignen und Mergen von Chunks

Sind die einzelnen Chunks zueinander ausgerichtet können sie zusammengefügt werden. Über das Menü *Workflow – Merge Chunks* öffnet sich ein Fenster, in dem die zusammenzufügenden Chunks gewählt werden. Die gewählten Chunks werden zusammengefügt und als neuer Chunk (*Merged Chunk*) im Projekt angezeigt. Zu den genauen Hintergrundabläufen für das Alignment und Mergen von Chunks macht Agisoft keine Angaben.

#### 4.2.7 Berechnung der dichten Punktwolke

Nachdem die zwei Chunks eines Holzfragmentes zusammengefügt worden sind, folgt die Berechnung der dichten Punktwolke (*Dense Cloud*). Zunächst wird der Begrenzungsrahmen (*Bounding Box*) an das Objekt angepasst. Hierzu werden die Werkzeuge *Resize Region* , *Move Region*  und *Rotate Region*  genutzt. Der Begrenzungsrahmen umfasst anfänglich alle Punkte der dünnen Punktwolke, die bei der Bildorientierung entstanden sind. Also auch alle Punkte, die abseits des Aufnahmegegenstands entstanden sind. Die Anpassung des

Begrenzungsrahmens erfolgt, um nicht zu viele Details abseits des Holzfragments zu berechnen und somit die Rechenzeit nicht unnötig zu verlängern.

Das Berechnen der dichten Punktwolke wird über *Workflow – Build Dense Cloud* gestartet. Metashape berechnet in diesem Schritt anhand der in der Bildorientierung bestimmten Kamerapositionen Tiefeninformationen für alle Bilder, die zu einer dichten Punktwolke zusammengerechnet werden sollen. Laut eigenen Angaben von Metashape besitzen die dichten Punktwolken mindestens die gleiche Dichte, wie LIDAR Punktwolken. Die dichte Punktwolke ist Voraussetzung für die Berechnung von Vermaschungen und Digitalen Höhenmodellen (AGISOFT LLC, 2019:25).

Wird der Menüpunkt *Build dense cloud* gestartet öffnet sich ein Fenster mit Einstellungen. Hier kann die Qualität der Punktwolke eingestellt werden. Die Einstellung *Highest* bedeutet eine Verarbeitung der Originalfotos. Alle niedrigeren Einstellungsstufen bedeuten eine Verkleinerung der Bildgröße den Faktor vier pro Stufe. Des Weiteren wird die Art des Filtermodus um Ausreißer in der Berechnung der Punkte zu eliminieren festgelegt. Hierbei kann zwischen *Aggressive*, *Mild* und *Moderate* gewählt werden. Zusätzlich zu dieser Einstellung kann angehakt werden, ob Punktfarben berechnet werden sollen (AGISOFT LLC, 2019:25 f.).

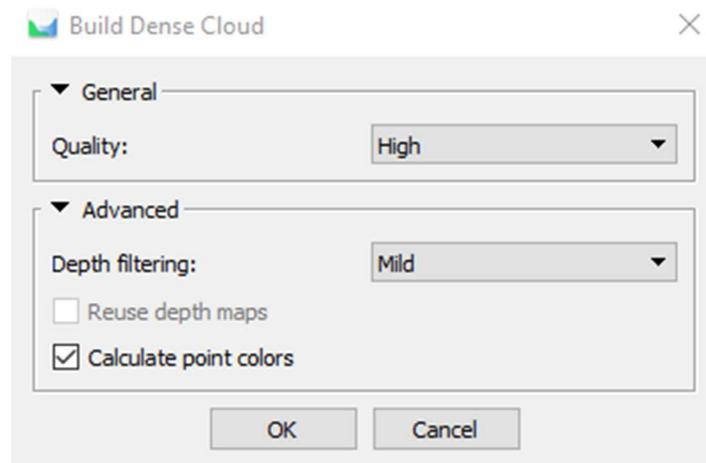


Abb. 39: Einstellung für die dichte Punktwolke

Für die Berechnung der dichten Punktwolke wird die Qualitätsstufe *high* gewählt, da die Berechnung einer Punktwolke mit der Einstellung *highest* schon bei kleineren Holzfragmenten eine Berechnungszeit von mehreren Tagen bedeutet hätte. Als Filtermodus wird *Mild* gewählt, da dieser laut Agisoft LLC am besten geeignet ist, wenn es wichtige kleine Details am Objekt gibt und damit für die Oberflächenstruktur wichtige Punkte nicht als Ausreißer rausgefiltert werden (AGISOFT LLC, 2019:26). Die Berechnung der Punktfarbe wird angehakt.

#### 4.2.8 Berechnung der Vermaschung

Bevor der nächste Schritt, die Vermaschung der Punktwolke, erfolgen kann muss zunächst die dichte Punktwolke von nicht vom Algorithmus erfassten Ausreißern und überflüssigen, nicht aus dem Begrenzungsrahmen ausgeschlossenen Punkten bereinigt werden. Hierzu wird das Auswahltool von Metashape genutzt. Es besitzt die Optionen *rectangle selection* , *circle selection*  und *free-form selection* . Am besten ist die *free-form selection* geeignet, da man nicht durch Geometrien eingeschränkt ist, sondern die zu löschenden Punkte frei umfahren kann. Sind die Punkte mit dem Tool erfasst werden sie durch Drücken der *Entfernen-Taste* gelöscht.



Abb. 40: Dichte Punktwolke mit Ausreißern und umliegenden Styropor

Ist die Punktwolke bereinigt wird zunächst der Begrenzungsrahmen überprüft, damit kein Teil des Objekts versehentlich abgeschnitten wird. Anschließend kann die Vermaschung über *Workflow – Build mesh* gestartet werden. Zunächst öffnet sich ein Fenster in dem Einstellungen zum Oberflächentyp des Modells, den Quelldaten, die verwendet werden sollen, der Qualität, der Flächenanzahl, der Art der Interpolation und anderen Parametern gemacht werden können.

Für den Oberflächentyp stehen *Arbitrary* und *Height field* zur Verfügung. Hier wird sich für *Arbitrary* entschieden, da *height field* für die Vermaschung digitaler Höhenmodelle vorgesehen ist. Als Quelldaten wird die dichte Punktwolke (*dense cloud*) gewählt. Die Flächenanzahl (*face count*) lässt sich auf *High*, *Medium* oder *Low* einstellen. Hierbei wird bereits die endgültige Anzahl an Polygonen angezeigt. Um eine maximale Anzahl von Flächen zu erhalten wird *High* gewählt, um eine bestmögliche Oberfläche zu erhalten. Für die Einstellungen der Interpolationsart stehen *Disabled*, *Enabled (default)*, *Extrapolated* zur

Verfügung. Die Default-Einstellung *Enabled* bildet für die Vermaschung der Holzfragmente die beste Lösung, da Löcher einem geringen Umkreis um Punkte der dichten Punktwolke automatisch durch Interpolation geschlossen werden und somit ein manuelles Schließen vermieden werden kann (AGISOFT LLC, 2019:27 f.). Zum genauen Ablauf und dem verwendeten Rechenverfahren zur Berechnung der Vermaschung macht Agisoft LLC keine weiteren Angaben.

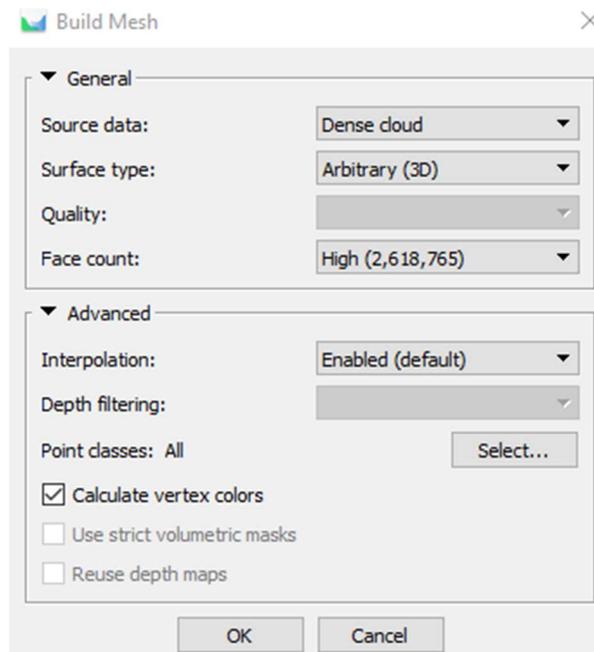


Abb. 41: Einstellungen für die Punktwolkenvermaschung

#### 4.2.9 Berechnung der Textur

Nachdem die Vermaschung berechnet ist kann das Model texturiert werden. Hierbei werden, wie in Kapitel 2.2.6 erläutert, zweidimensionale Bildausschnitte auf die dreidimensionalen Dreiecksmaschen projiziert.



Abb. 42: Texturiertes Modell

Über *Workflow – Build Texture* wird die Texturierung gestartet. Es öffnet sich ein Einstellungsfenster, in dem der *Mapping mode*, der *Blending mode* und die *Texture size/count* gewählt werden können. Als *Mapping mode* wird *Generic* gewählt, was dazu führt, dass das Programm versucht eine möglichst gleichmäßige Textur zu berechnen. Für den *Blending mode* wird die Einstellung *Mosaic* gewählt. Diese Einstellung bewirkt, dass Metashape die Texturierung einen zweistufigen Ansatz nutzt. Die Bildüberlappungen werden mit Niederfrequenzkomponenten bestimmt während die für die Bilddetails zuständige Hochfrequenzkomponente aus einem Bild entnommen wird, das die Szene mit guter Auflösung abbildet. *Texture size/count* bestimmt die Breite und Höhe des Texturatlas in Pixel. Der *count* gibt an in wie viele Dateien die Texturen exportiert werden. Mehrere Dateien ermöglichen es die Textur in höherer Auflösung zu speichern (AGISOFT LLC, 2019:30 f.).

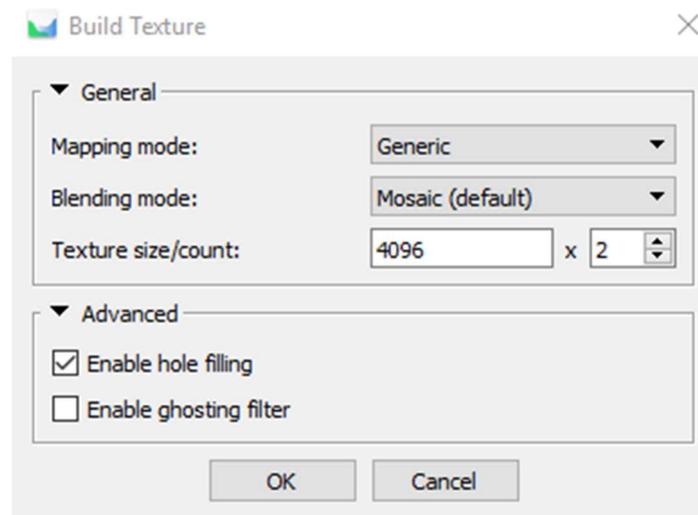


Abb. 43: Einstellungen für die Texturierung

### 4.3 Rechendauer

Name	Alignment Seite 1 [h]	Alignment Seite 2 [h]	Dichte Punktwolke	Vermaschung	Texturierung
7986_68_6_1	0:16:16	0:07:50	16:51:00	0:10:06	0:11:16
7986_68_6_1_1	0:25:20	0:30:41	01:21:00	0:02:44	0:02:03
7986_68_6_2	1:06:08	1:01:32	00:40:56	0:00:41	0:01:54
7986_68_6_3	0:05:57	0:07:35	01:35:03	0:13:59	0:05:55
7986_68_6_3_1	0:05:05	0:14:42	00:15:30	0:01:00	0:01:43
7986_68_6_3_2	0:08:57	0:03:50	01:21:16	0:01:54	0:02:07
7986_68_6_4	1:24:08	0:22:18	13:00:00	0:13:47	0:06:16
7986_68_6_5	0:12:19	0:12:25	07:26:26	0:17:16	0:08:09
7986_68_6_5_1	0:10:59	0:10:16	00:23:33	0:01:06	0:01:29
7986_68_6_6	0:05:10	0:04:33	04:42:35	0:01:48	0:02:05
7986_68_6_7	0:56:17	1:11:07	08:29:00	0:01:23	0:01:51
7986_68_6_8	0:09:11	0:18:52	30:02:00	0:04:09	0:03:12
7986_68_6_9	0:36:15	0:08:42	01:39:46	0:01:14	0:01:50
7986_68_6_10	0:14:42	0:02:45	00:52:58	0:00:55	0:05:22
7986_68_6_11	0:01:40	0:01:03	00:14:35	0:01:23	0:02:06
7986_68_6_12	0:59:31	1:02:36	00:29:31	0:00:28	0:01:30
7986_68_6_13	0:14:51	0:14:51	00:09:01	0:00:33	0:01:19
7986_68_6_18	0:30:52	0:29:55	00:13:27	0:00:39	0:01:24
Gesamt:	7:43:38	6:25:33	89:47:37	1:16:05	1:01:31
Gesamtrechenzeit					106:14:24

Tabelle 4: Rechenzeiten

Die Rechendauer für die komplette Berechnung eines texturierten 3D-Modells bewegt sich zwischen 0:21h und 17:35h. Einen großen Einfluss hat die Anzahl der Aufnahmen eines Modells. Umso höher die Anzahl der Aufnahmen, umso höher die Rechendauer, da mehr Bilder in die Berechnung einfließen. Ein weiterer Einfluss auf die Rechendauer ist der verwendete Computer. Wird der Dell Precision-Tower 5810 verwendet, ist die Rechendauer aufgrund des langsamer getakteten Prozessors deutlich höher (vergleiche Kapitel 4.1). Das lässt sich gut an Modell 7986\_68\_6\_4 erkennen. Der Bildverband der einen Seite wird auf dem Dell Precision-Tower 5810 bei einer Rechenzeit von 1:24:08 h orientiert. Die Bilder der zweiten Seite werden bei annähernd gleicher Anzahl der Aufnahmen auf dem Schneider-Digital Workstation PULSARON Level 9.0 Single CPU in nur 22:18min orientiert.

### 4.4 Problemfälle

Im Verlauf der Aufnahme und vorwiegend während der Auswertung mit Agisoft Metashape kam es zu einigen Schwierigkeiten. Bei der Betrachtung dieser Probleme wird sich lediglich auf ausgewählte größere Probleme beschränkt, da die Betrachtung jedes einzelnen kleineren Problems den Rahmen dieser Bachelorarbeit überschreiten würde.

#### 4.4.1 Probleme bei der Bildorientierung

Der grundlegende Baustein für alle weiteren Arbeitsschritte in Agisoft Metashape ist die Bildorientierung (Alignment). Hierbei kommt es häufig zum Problem, dass der gesamte Bildverband oder auch nur einzelne Bilder falsch orientiert werden. Das ist häufig darauf zurückzuführen, dass viele Verknüpfungspunkte im Hintergrund des Objekts gefunden werden. Normalerweise ist das erwünscht, allerdings führt es im Fall dieser Bachelorarbeit zu falsch orientierten Bildern, da das Objekt bewegt wurde, während der Hintergrund der Aufnahme sich nicht verändert hat (vgl. Abb. 44).

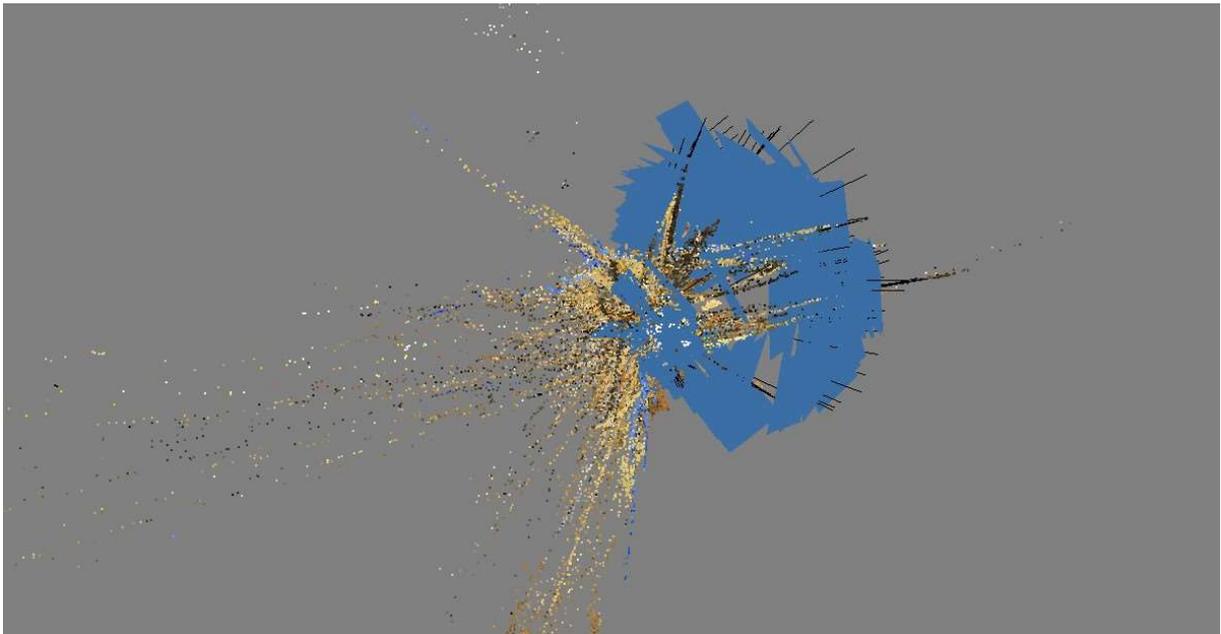


Abb. 44: Fehlerhaftes Alignment durch Verknüpfungspunkte im Hintergrund des Objektes

Die Lösung dieses Problems besteht darin den Hintergrund in einzelnen Bildern über die Auswahltools *rectangle selection* , *circle selection*  und *free-form selection*  entsprechende Bereiche auszuwählen und über *Rechtsklick – Add Selection* auszumaskieren. Für das Alignment kann in der Auswahlmaske (vgl. Kapitel 4.2.3, Abb. 33) unter dem Punkt *Apply masks to – Tie Points* eingestellt werden, wodurch die Masken in der Bildorientierung für die Berechnung der Verknüpfungspunkte nicht mehr verwendet werden.



Abb. 45: Aufnahme mit ausmaskiertem Hintergrund

Ein weiterer Grund für einen fehlerhaft orientierten Bildverband sind falsch identifizierte Passpunkte. Die in Kapitel 4.2.2 beschriebene Passpunktsuche mit Agisoft Metashape liefert zum Teil falsche Passpunkte (vgl. Abb. 46) oder vertauscht diese in seltenen Fällen. Um das zu vermeiden muss nach der Passpunktsuche in jedem Bild überprüft werden, ob die Passpunkte richtig gemessen worden sind. Falsche Passpunkte lassen sich schnell daran erkennen, dass die Punktnummer dieses Passpunktes nicht zu den für dieses Objekt verwendeten Passpunkten zählt. Falsch gesetzte oder vertauschte Passpunkte müssen korrigiert werden. Falsche Passpunkte werden gelöscht.



Abb. 46: Fehlerhaft gemessener Passpunkt auf dem Spanngurt

Gerade bei den Detailaufnahmen der größeren Holzfragmente (7986\_86\_6\_1, 7986\_86\_6\_3, 7986\_86\_6\_4, 7986\_86\_6\_5) kommt es dazu, dass die Fotos aufgrund fehlender Verknüpfungspunkte nicht orientiert werden können. Das Fehlen bzw. die geringe Anzahl von Verknüpfungspunkte kann verschiedene Ursachen haben. Zum einen werden diese Bilder aus anderen Aufnahmewinkeln und mit unterschiedlicher Beleuchtung aufgenommen. Durch die zum Rest der Bilder unterschiedliche Beleuchtung ist es für den Algorithmus schwierig Verknüpfungspunkte zu finden. Die Passpunktmarken sind auf diesen Bildern häufig auch nicht abgebildet. Die Folge daraus ist, dass es in der dichten Punktwolke bereichsweise zu „Verwaschungen“ kommt (vgl. Abb. 47). Dies ist jedoch nicht mit absoluter Wahrscheinlichkeit anzunehmen. Der Lösungsansatz die Texturierbilder über natürliche Passpunkte, die auf dem Holz gemessen werden, zu orientieren bleibt erfolglos.

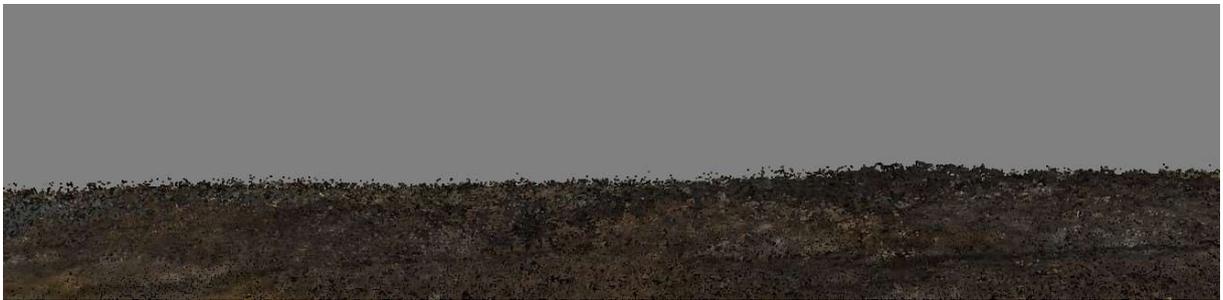


Abb. 47: Punktwolke mit „verwaschener“ Oberfläche



Abb. 48: Punktwolke mit sauberer Oberfläche

#### 4.4.2 Probleme bei der Texturierung

Im Zuge der Texturierung der Holzfragmente, die durch Styropor gestützt werden, kommt es mehrfach dazu, dass die Bereiche, die auf den Bildern durch Styropor überlagert werden, weiß texturiert werden. Um das zu vermeiden müssen für die Texturierung möglichst alle Bilder, wie in Kapitel 4.4.1 beschrieben, ausmaskiert werden. Durch die Maskierungen werden die ausmaskierten Bereiche der Bilder nicht für die Texturierung verwendet.



Abb. 49: Modell mit weiß texturierten Bereichen    Abb. 50: Modell nach der Ausmaskierung der Bilder

#### 4.4.3 Probleme bei der Vermaschung

Bei den Holzfragmenten 7986\_86\_6\_8 und 7986\_86\_6\_9 kommt es bei der Berechnung der Vermaschung dazu, dass Polygone in Bereiche interpoliert werden, in denen keine Punkte und keine Oberfläche vorhanden sind. Grund dafür ist die genutzte Einstellung *Enabled (default)* für die Interpolation. Eine Lösung dieses Problems ist die Nutzung der Interpolationseinstellung *Disabled*. Davon wird jedoch abgesehen, da in dieser Einstellung jeder einzelne Punkt, der nicht auf der Objektoberfläche liegt mitvermascht wird. Gerade der Bereich, in dem das Problem auftritt liegen jedoch so viele Streupunkte, die nicht gelöscht werden können, dass davon abgesehen wird.

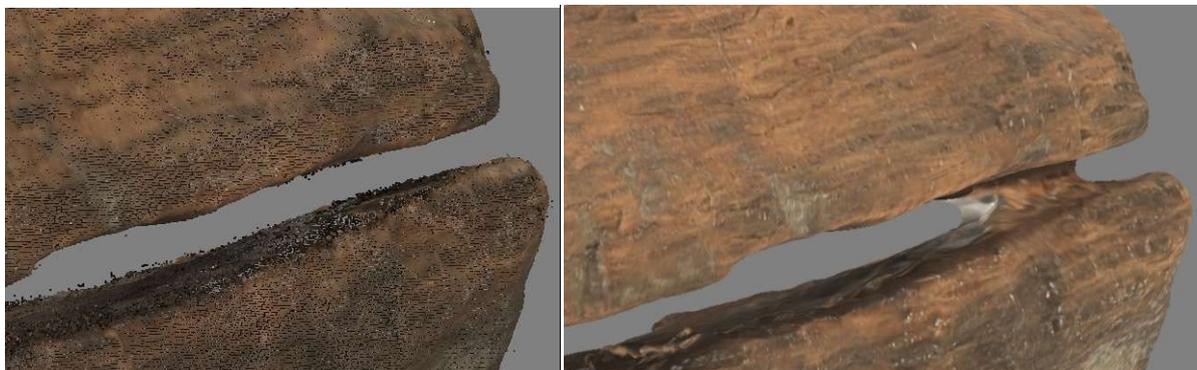


Abb. 51: Dichte Punktwolke von 7986\_68\_6\_9

Abb. 52: Vermaschtes und texturiertes Modell 7986\_68\_6\_9

Eine weitere Möglichkeit besteht darin die fälschlicherweise berechneten Polygone zu löschen und bei der Texturierung die *hole filling* Option zu nutzen. Allerdings sind für diese Bereiche (kleine Spalte im Holz) nicht genügend Bilder vorhanden, sodass die Löcher der gelöschten Polygone bestehen bleiben (vgl. Abb. 53). Die fehlerhaft zugemaschten Bereiche betragen bei 7986\_86\_6\_8 lediglich etwa sechs Millimeter in der Längsrichtung, ca. fünf Millimeter in der Breite und zwei Millimeter in der Höhe. Bei Fragment 7986\_86\_6\_9 ist der fälschlicherweise zugemaschte Bereich ca. sechs Millimeter in Längsrichtung, ca. zwei Millimeter in der Breite und ein Millimeter in der Höhe des Modells groß. Da diese Bereiche ohne starkes Heranzoomen an das Objekt nicht auszumachen sind werden die Modelle so belassen.



Abb. 53: Gescheiterter Versuch den Bereich der gelöschten Dreiecksmaschen zu texturieren

#### 4.4.4 Probleme mit bei der Aufnahme bewegten Objekte

Im Verlauf der Auswertung der Holzstücke 7986\_86\_6\_5 und 7986\_86\_6\_11 wird ein nicht korrigierbarer Fehler festgestellt. Beide Holzstücken sind vermutlich bei der Aufnahme bewegt worden. Sie weisen in der dichten Punktwolke deutliche Sprünge auf. Grund dafür kann bei 7986\_68\_6\_5 die Schlittenkonstruktion sein. Wird ruckartig an den Spanngurten gezogen, kann das Holz sich leicht bewegen und anschließend nicht mehr exakt an gleicher Stelle liegen.



Abb. 54: Ausschnitt der dichten Punktwolke von 7986\_68\_6\_11 mit Doppelung durch Objektbewegung

Eine Lösung des Problems ist das Ausmachen des Zeitpunktes (Bildes) an dem das Holz bewegt worden ist. Dies ist jedoch sehr zeitaufwendig. Ist das Bild gefunden können alle nachfolgenden Bilder getrennt vom Rest orientiert werden und anschließend, wie in Kapitel 4.2.5 und 4.2.6 mit dem Rest zusammengefügt werden. Die bessere und vor allem unkompliziertere Lösung ist jedoch die Neuaufnahme des Objektes. Im Falle von 7986\_68\_6\_11 können die Bilder von Herrn Koch aus dem Jahr 2017 verwendet werden und ein 3D-Modell mit Vermaschung und Texturierung erstellt werden.

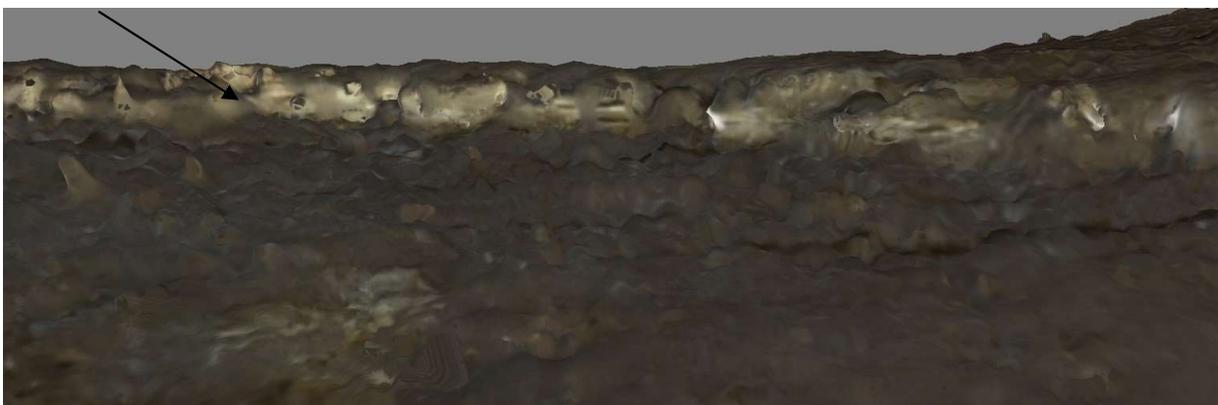


Abb. 55: Ausschnitt des texturierten Modells 7986\_68\_6\_5 mit Versprung im Modell

#### 4.4.5 Probleme bei den natürlichen Passpunkten

Bei der Suche der natürlichen Passpunkte (vgl. Kapitel 4.2.5) liegt die Problematik darin, dass das Holz zwischen der Aufnahme der Ober- und Unterseite neu mit Wasser besprüht wird. Daraufhin kommt es in der Auswertung dazu, dass es durch den unterschiedlichen Nässegrad des Holzes schwer ist natürliche Passpunkte auf der Oberfläche auszumachen, was diesen Prozess sehr stark in die Länge zieht (vgl. Abb. 56 und 57). Jedoch können für alle Objekte ausreichend natürliche Passpunkte gefunden werden, sodass die orientierten Aufnahmen von Ober- und Unterseite miteinander verknüpft werden können.



Abb. 56: Oberseite des Objekts (nass)

Abb. 57: Unterseite des Modells (trocken)

## 5 Genauigkeitsauswertung

Die erreichte Genauigkeit lässt sich nach verschiedenen Kriterien beurteilen. Im Vordergrund steht die in der Aufgabenstellung anzustrebende Genauigkeit für eine spätere Anfertigung eines 3D-Drucks im Maßstab 1:1. Die verschiedenen Einflussfaktoren für die Genauigkeit sind die gemessenen Distanzen zwischen den Passpunktmarken, die Genauigkeit des Alignments, die erreichte Punktdichte, und die Genauigkeit innerhalb der Punktwolke.

Die Distanzen auf den Maßstabsleisten dienen der Skalierung der Objekte. Über sie wird ein Maßstab in die Objekte eingeführt und anhand dieses Maßstabs die Bildorientierung optimiert (vgl. Kapitel 4.2.4). Die Maßstäbe werden mit einem Halbmillimeterlineal ermittelt. In Agisoft Metashape liegen die Fehler dieser Strecken in den orientierten Bildverbänden zwischen 0,013mm und 1,1mm. Im Mittel beträgt der Fehler der Maßstabsleisten 0,27mm (vgl. Tabelle 5). Auffallend ist, dass die Fehler bei den größeren Holzfragmenten (7986\_68\_6\_1, 7986\_68\_6\_3, 7986\_68\_6\_4 und 7986\_68\_6\_5) größer sind, als bei fast allen kleineren Holzfragmenten. Möglicherweise ist das darauf zurückzuführen, dass für diese Objekte mehr Bilder nötig sind, um eine höhere Genauigkeit in der Bildorientierung zu erzielen. Zusätzlich sind die großen Holzstücke nicht so gut belichtet, wie die kleineren.

Die Genauigkeit des Alignments hängt neben den Scale Bars auch am Überlappungsgrad der benachbarten Bilder. Diese liegt, wie im Kapitel 3.5 erläutert zwischen 75% und 85% und somit über der laut Witte & Sparla anzustrebenden Überlappung von 60-70% (2015:359) und ist somit mehr als ausreichend.

Die erreichte Punktdichte in den dichten Punktwolken der 3D-Modelle liegt zwischen 57 und 439 und im Mittel bei 116,6 Punkten pro  $\text{mm}^2$  (vgl. Tabelle 5). Schließt man den positiven Ausreißer von 439 Punkten pro  $\text{mm}^2$  aus dem Mittel aus, liegt das Mittel bei 104,5 Punkten pro  $\text{mm}^2$ . Hierbei fällt auf, dass die kleineren Holzobjekte eine höhere Punktdichte aufweisen, als die Leiterholme. Das hängt damit zusammen, dass für die kleineren Holzstücke im Verhältnis zur Größe deutlich mehr Bilder gemacht worden sind.

Der Reprojection error bildet den durchschnittlichen Abstand zwischen dem rekonstruierten 3D-Punkt und seinen Abbildungen in den Bildern. Er wird für jeden Verknüpfungspunkt in allen Bildern berechnet in dem er abgebildet ist (AGISOFT LLC, 2019:51). Für die berechneten 3D-Modelle liegt er zwischen 0,399 und 4,12 Pixeln bzw. 0,025mm und 0,25mm (vgl. Tabelle 5). Im Durchschnitt ergibt sich ein Reprojektion error von 1,272 Pixel bzw. 0,066mm am Objekt.

Die Pixelgröße am Objekt wurde im Vorneherein mit 0,047mm und 0,083mm berechnet. Die tatsächliche Pixelgröße im Objekt beträgt zwischen 0,0355 und 0,0662mm (vgl. Tabelle 5). Diese Differenz ist auf Messungenauigkeiten mit dem Zollstock zurückzuführen, da dieser frei in der Luft angehalten werden musste.

Die übergeordnete Frage ist, ob die erreichten Genauigkeiten für einen 1:1 3D-Druck ausreichen. Die Antwort auf diese Frage lässt sich nicht eindeutig beantworten. Laut Herrn Breuer benötigt es für eine originalgetreue Kopie des Objektes eine Punktdichte im Nanometerbereich. Diese ist bei weitem nicht gegeben. Im Mittel beträgt die Dichte 104,5 Punkte pro  $\text{mm}^2$ . Das entspricht gerade einmal einer Dichte von 10-10 Punkten pro  $\text{nm}^2$ . Um eine Dichte im Nanometerbereich zu erreichen werden also deutlich mehr Bilder sowie eine dichte Punktwolke mit der Auflösung Highest benötigt. Diese Auflösung bietet auch eine genauere Oberflächendarstellung durch die dichtere Dreiecksvermaschung. Dies ist jedoch nicht realisierbar, da für diese Auflösung pro Holzfragment ein deutlich längerer Zeitraum für die Aufnahme und Rechner mit einer höheren Leistungskapazität benötigt werden. Es ist nicht abschätzbar wie viele Bilder für eine solche Auflösung benötigt werden. Zudem ist eine solche Auflösung in einem Zeitraum von zehn Tagen für die Aufnahme nicht zu schaffen. Der genutzte PC von Schneider Digital mit einem 16-Kern-Prozessor und 64GB Arbeitsspeicher stieß bei der Berechnung der dichten Punktwolke Objekte in der Auflösung Highest an seine Grenzen, sodass die Berechnung dieser mehrere Tage benötigt. Bei den größeren

Holzfragmenten ist die Berechnung sogar aufgrund einer Überlastung des Arbeitsspeichers abgebrochen worden, weswegen sich für die Auflösungsstufe High entschieden worden ist.

Ob eine solche Punktauflösung vor Ort in Oymağaaç erreichbar ist kann nicht endgültig geklärt werden. Allerdings sprechen sowohl die Tatsache, dass das Holz permanent feucht gehalten muss, als auch die damit resultierenden Lichtverhältnisse zur Vermeidung von Reflektionen auf dem Holz gegen eine Realisierbarkeit.

Es stellt sich jedoch die Frage, ob eine solche Genauigkeit in der Auflösung der Punktwolke für einen 3D-Druck im Maßstab 1:1 überhaupt notwendig ist und welchen Verwendungszweck die 3D-Modelle anschließend haben. Eine Auflösung von einem Punkt pro  $\text{nm}^2$  ist für das menschliche Auge nicht mehr erfassbar. Auch ein Fehler im Bereich von 0,5mm, was der Messgenauigkeit der Maßstäbe entspricht, ist nur schwer ausfindig zu machen. Diese würden also in einem 3D-Druck im Maßstab 1:1 nicht weiter ins Gewicht fallen.

Soll das Modell lediglich für visuelle Zwecke genutzt werden kann von einer Auflösung der dichten Punktwolke im Nanometerbereich ebenfalls Abstand genommen werden, da viele Ungenauigkeiten an der Oberfläche und in der Darstellung kleiner Details durch die Texturierung des Objektes kaschiert werden. Zusätzlich benötigt es entsprechende Hardware, um sich ein texturiertes 3D-Modell überhaupt anzeigen lassen zu können. Im Zuge dieser Bachelorarbeit wird bereits die erreichte Auflösung heruntergerechnet, da es ansonsten zu Problemen mit der Anzeige kommen kann.

Die Notwendigkeit einer so hohen Genauigkeit muss mit Grabungs- und Projektleiter geklärt werden, da mit ihr ein erheblicher Mehraufwand erforderlich ist. Der benötigte Zeitaufwand für die Erstellung und der benötigte Speicherplatz für ein solches Modell übersteigen zudem wahrscheinlich die Kapazitäten des Labors für Photogrammetrie in der Beuth-Hochschule.

Name	Bildanzahl	Scale Bar-Fehler [m] Mittelwert beider Seiten	Punktanzahl dichte Punktwolke	Auflösung [mm/Pixel]	Punktdichte [Punkte/mm <sup>2</sup> ]	Reprojection Error [Pixel]	Pixelgröße am Objekt [mm/Pixel]	Dreiecksanzahl
7986_68_6_1	393	0,000627	13.093.828	0,1250	63,7	3,190	0,0626	2.618.764
7986_68_6_1_1	153	0,000418	3.439.473	0,0477	439	2,600	0,0477	687.894
7986_68_6_2	184	0,000040	830.424	0,0962	108	1,220	0,0481	180.000
7986_68_6_3	277	0,001184	18.356.004	0,1320	57	0,992	0,0662	3.670.207
7986_68_6_3_1	122	0,000043	1.315.513	0,0884	128	1,220	0,0442	263.102
7986_68_6_3_2	192	0,000035	2.427.951	0,1150	75,9	0,659	0,0574	485.590
7986_68_6_4	444	0,000993	18.042.910	0,1160	74	1,920	0,0581	3.608.582
7986_68_6_5	371	0,000543	23.218.170	0,1260	62,8	4,120	0,0631	4.645.944
7986_68_6_5_1	151	0,000013	1.391.806	0,1090	84,6	0,534	0,0544	278.360
7986_68_6_6	171	0,000068	2.233.959	0,1280	61,3	0,399	0,0639	446.790
7986_68_6_7	188	0,000054	1.468.028	0,0977	105	0,508	0,0488	293.604
7986_68_6_8	275	0,000044	5.160.180	0,1110	81,6	0,515	0,0553	1.032.036
7986_68_6_9	245	0,000052	1.573.555	0,1090	83,5	0,671	0,0547	314.710
7986_68_6_10	159	0,000025	1.197.859	0,0967	107	0,628	0,0483	239.570
7986_68_6_11	89	0,000038	1.681.487	0,0775	166	0,786	0,0388	336.296
7986_68_6_12	208	0,000608	577.718	0,0709	199	1,910	0,0355	180.000
7986_68_6_13	142	0,000051	686.493	0,0968	107	0,520	0,0484	180.000
7986_68_6_18	153	0,000051	781.528	0,1020	95,7	0,497	0,0511	180.000
Mittelwert	218	0,000271	5.415.383	0,1025	116,6	1,272	0,0526	1.091.192

Tabelle 5: Genauigkeiten aus Agisoft Metashape

## 6 Erzeugung der Datenprodukte

Die Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit fordert die Erzeugung bestimmter Datenprodukte. Dazu gehören ein Orthobildplan der Holzfragmente im Maßstab 1:10 sowie vermaschte und texturierte 3D-Punktwolken für die Weiterverarbeitung. Die Erstellung dieser Produkte wird im folgenden Abschnitt erläutert.

### 6.1 Orthobildplan im Maßstab 1:10

Für die Erstellung eines Orthobildplans der die gesamte, zusammengesetzte Leiter zeigt wird ein weiteres Programm hinzugezogen, da es in Agisoft Metashape nicht möglich ist mehrere verschiedene 3D-Modelle zueinander auszurichten.

3ds Max von Autodesk ist ein Programm, das unter anderem zur Erstellung von digitalen, dreidimensionalen Spielwelten genutzt werden kann (AUTODESK, 2019). Da 3ds Max die Möglichkeit bietet verschiedene Dateiformate, wie zum Beispiel .obj-Dateien, einzulesen eignet es sich gut, um die einzelnen Fragmente der Holzleiter untereinander anzuordnen. Die als .obj-Dateien eingelesenen 3D-Modelle lassen sich dann frei in einem lokalen Koordinatensystem verschieben und drehen.

Um die 3D-Modelle in 3ds Max einlesen zu können müssen zunächst .obj-Dateien der texturierten 3D-Modelle mit Agisoft Metashape erstellt werden. Dies ist über die Schaltfläche *File – Export – Export Model* möglich. Im sich öffnenden Fenster werden ein Dateiname und das Format *.obj* gewählt. Diese Datei kann anschließend einfach per Drag&Drop in 3ds Max eingefügt werden. Um die Modelle besser verschieben und drehen zu können sollte der Bezugspunkt des jeweiligen Modells in sein Zentrum gelegt werden (*Objekt auswählen – Reiter Hierarchie – affect pivot only – center to object*). Für die Anordnung stehen in 3ds Max verschiedene Ansichten, wie eine Draufsicht, eine perspektivische Ansicht oder Seiten sowie Front und Rückansicht zur Verfügung (vgl. Abb. 58).

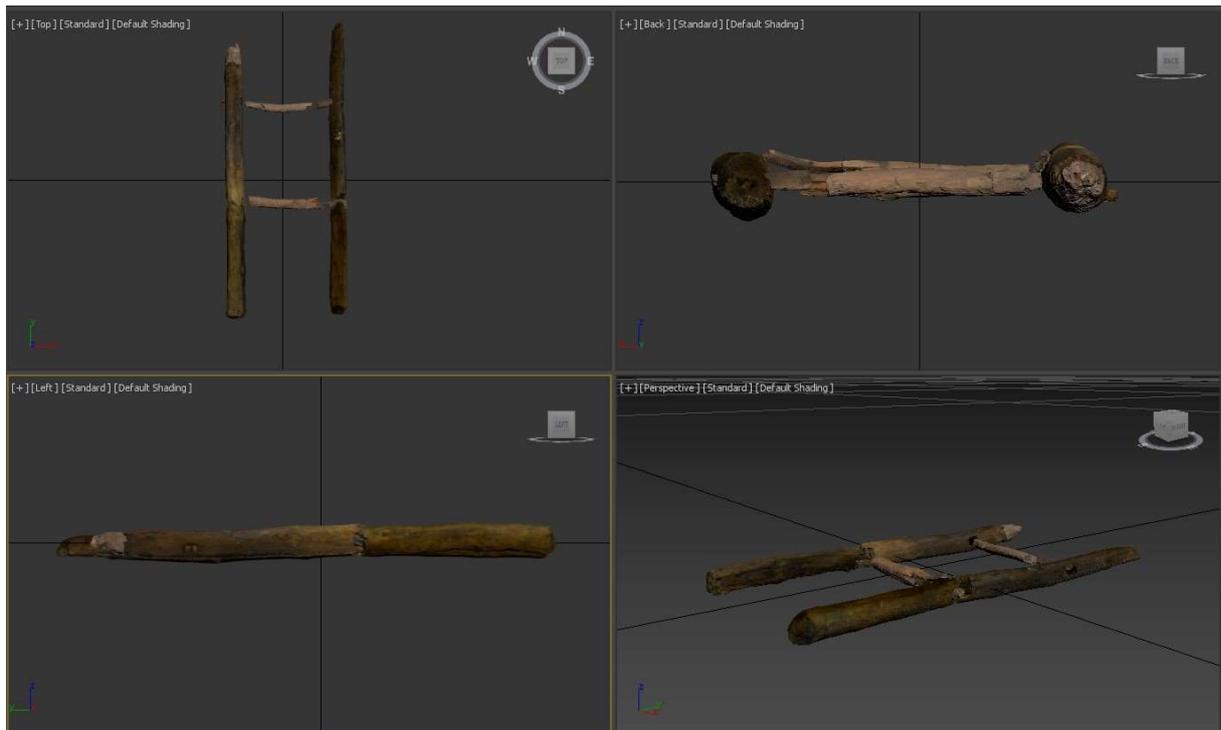


Abb. 58: Verschiedene Ansichten in 3ds Max

Über die Schaltflächen  und  können die Objekte beliebig verschoben und gedreht werden. Für die Anordnung der einzelnen Fragmente werden Dokumentarfotos von Herrn Marko Koch (Mitarbeiter des Labors für Photogrammetrie) aus dem Jahr 2017 hinzugezogen (vgl. Abb. 59). Anhand dieser wird zunächst eine Skizze erstellt. Dann werden die Modelle händisch angeordnet. Da es keine Maße oder sonstige Hilfsmittel und Vorgaben für die Anordnung der Holzstücke gibt erfolgt diese frei nach Empfinden des Verfassers.



Abb. 59: Dokumentationsfotos der Holzleiter aus 2017 von Herrn Koch

Sind alle 3D-Modelle angeordnet wird über den Button *Render Setup*  unter anderem die Größe und Ansicht des gerenderten Modells angegeben. Für das Orthobild werden die Draufsicht und eine Größe von 14000 x 32768 Pixeln gewählt, was der Maximalgröße in der Höhe entspricht. Die Breite kann auf Grund des Seitenverhältnisses der Leiter kleiner

gewählt werden. Das gerenderte Modell wird als .tif gespeichert und in Adobe Photoshop geöffnet.

Für die Weiterverarbeitung in Photoshop muss zunächst die Größe eines Pixels berechnet werden. Hierzu wird das Tiff eines gerenderten Modells eines Leiterfragments mit denselben Einstellungen, wie das Gesamtkonstrukt, geöffnet und das Bild über Auswahl des Hintergrunds mittels *Zauberstabwerkzeug* und *Auswahl – Auswahl umkehren* und *Auswahl – freistellen* auf die genaue Größe des Holzfragments zugeschnitten. Über die Schaltfläche *Bild – Bildgröße* wird die genaue Bildgröße in Pixeln angegeben. Die Größe des Holzfragments kann in 3ds Max gemessen werden. Über die Formel

$$\frac{\text{Pixelanzahl}}{\text{Objektlänge}} = \text{Pixelgröße}$$

wird die Pixelgröße berechnet. Anschließend wird das Tiff mit den angeordneten Leiterfragmenten in Photoshop geöffnet und die von Photoshop errechnete Bildgröße (*Bild – Bildgröße*) durch die anhand der Pixelgröße errechnete Gesamtgröße des Bildes ersetzt. Für den Maßstab 1:10 wird diese Größe durch zehn geteilt und die Bildauflösung auf 300 DPI eingestellt.

Für den Orthobildplan wird ein neues Projekt mit der Bildgröße einer A4-Seite und 300 DPI Bildauflösung erstellt. Hier wird das skalierte Orthobild der Holzleiter eingefügt. Anschließend wird ein Maßstab sowie eine Überschrift und Beschriftung des Plans eingefügt.

Da das Texturierte Modell im Plan sehr dunkel wirkt wird es mit Hilfe des Tools für die Tonwertkorrektur aufgehellt. Die Ausgabe erfolgt über *Datei – Speichern unter* als PDF oder Tiff-Datei.

### **6.1.1 Probleme**

Ein Problem bei der Anordnung der Fragmente in 3ds Max ist, dass nicht alle Stücke anhand der Bilder angeordnet werden können. Die Stücke 7986\_68\_6\_3\_1, 7986\_68\_6\_13 und 7986\_68\_6\_18 sind auf den Dokumentationsfotos nicht auffindbar und daher ist es nicht möglich diese anzuordnen.

## **6.2 Bereitstellung der 3D-Modelle und Erstellung von 3D-PDFs**

Um die vermaschten und texturierten 3D-Modelle für die Weiterverarbeitung, beispielsweise für einen 3D-Druck, zur Verfügung zu stellen müssen sie in einem schnittstellenfreundlichen Datei-Format mit Agisoft Metashape ausgegeben werden. Es wird sich für das Polygon File Format entschieden. In diesem Format können neben der

Geometrie des Objekts auch andere Daten, wie Kanten oder Farbwerte gespeichert werden (HECKNER & WIRTH, 2014:10). Es kann im ASCII oder Binärformat abgespeichert und in vielen Programmen, wie zum Beispiel Cloud Compare geöffnet werden.

Die Ausgabe erfolgt über die Schaltfläche *File – Export – Export Model*. Im sich öffnenden Fenster kann das gewünschte Dateiformat, in diesem Fall *.ply*, angegeben werden. Die Datei kann anschließend mit einem Programm geöffnet und angesehen werden.

Mit leistungsschwächeren Computern, als denen im Labor für Photogrammetrie zur Verfügung stehenden, kommt es schnell zu Problemen, wenn man sich texturierte 3D-Modelle mit mehreren Millionen Punkten als ansehen möchte. Die Hardware ist häufig für eine so große Anzahl an Punkten und Vermaschungselementen nicht ausgelegt. Die Anleitung zu Agisoft Metashape empfiehlt in diesem Fall eine Anzahl von 100.000 – 200.000 Polygonen in der Vermaschung (AGISOFT LLC, 2019). Die Software besitzt ein Tool, um die Anzahl der Polygone der Vermaschung automatisch zu reduzieren. Über *Tools – Mesh – Decimate Mesh* kann eine genaue Anzahl der gewünschten Dreiecke angegeben werden. Es wird sich für 100.000 Polygone entschieden, damit auch einfachere Laptops, wie sie zum Teil im Grabungshaus in Oymağaaç verwendet werden, die texturierten 3D-Modelle ohne Probleme öffnen können.

Das Modell mit reduzierter Vermaschung wird identisch zum hochaufgelösten Modell ausgegeben. Zusätzlich wird ein 3D-PDF des reduzierten Modells für die einfache Betrachtung ausgegeben. Für die Ausgabe muss hierzu für den Export das Format *PDF* eingestellt werden.

## **7 Schlussbetrachtung**

In den drei Monaten der Bearbeitung konnten viele Erfahrungen im Bereich der praktischen Anwendung und Auswertung der Photogrammetrie sammeln können. Der Umgang mit der Auswertesoftware Agisoft Metashape konnte weitreichend vertieft werden. Gerade im Zuge der Auswertung wird auch einiges an Verbesserungsbedarf deutlich, für den bei zukünftigen Aufnahmen in Oymağaaç eine Lösung gefunden werden muss. Vor allem was die Aufnahmen der Holzfragmente angeht. Bei den Aufnahmen sollte vermehrt darauf geachtet werden, dass das Holz gleichmäßig ausgeleuchtet wird. Das Holz sollte bei Aufnahmen der Ober- und Unterseite den gleichen Nässegrad aufweisen, um somit zu ermöglichen mehr Passpunkte mit weniger Zeitaufwand zu finden. Des Weiteren ist die Notwendigkeit gegeben, dass ein Hintergrund für die Aufnahmen gefunden wird, auf dem Agisoft Metashape nur sehr wenig oder gar keinen Verknüpfungspunkte im Zuge der Bildorientierung findet. Das erspart die Ausmaskierung von tausenden Bildern.

Bei den Texturbildern muss darauf geachtet werden, dass ein noch größerer Überlappungsbereich, auch zu Bildern der normalen Aufnahmekonfiguration entsteht. Die zweite Möglichkeit ist es auf diesen Bilder mehr Passpunktmarken abzubilden.

Um zukünftig Bewegung der Objekte während der Aufnahmen zu vermeiden sollte das Holz bei Wiederverwendung eines „Schlittens“ noch stabiler darauf platziert und gegen Bewegung gesichert werden.

## **7.1 Zukunftsaussichten**

Für die weitere Bearbeitung der 3D-Modelle bieten sich verschiedene Möglichkeiten an. Sofern von der Finanzierung ein Mäzen gefunden wird würde eine Rekonstruktion der fehlenden Leiterstücke sinnvoll erscheinen. Ist die Leiter vollständig rekonstruiert könnte ein 3D-Druck eine Ausstellung in Museen ermöglichen, die aufgrund der Tatsache, dass die Holzstücke permanent feucht gehalten werden müssen so nicht möglich oder sehr schwer zu realisieren ist.

Ein zweiter Aspekt ist das Einfügen der dreidimensionalen Leiter in das 3D-Vision-Modell des Tunnels in Oymağaaç, was im Zuge der langen Nacht der Wissenschaften 2019 bereits in der Beuth-Hochschule für Technik Berlin der Öffentlichkeit präsentiert wurde. Die Leiter könnte so an ihrem Fundort in der untersten Kammer des Tunnels eingefügt werden.

Generell ermöglichen die 3D-Modelle eine Betrachtung des Holzes außerhalb der Türkei und vor allem auch ohne es aus der Lagerung im Tunnel oder der Zisterne herausholen zu müssen. Eine genaue Analyse der Strukturen oder möglicher Bearbeitungsspuren wird weiterhin nur vor Ort mit den Original-Hölzern möglich sein.

## **7.2 Hinweis**

Die wichtigsten Datenprodukte werden gemeinsam mit dem Text der Bachelorarbeit auf einem Stick abgegeben. Alle weiteren Daten sind auf dem Server im Labor für Photogrammetrie unter dem Pfad Y:/Bachelor\_SS19/Bachelorarbeit\_Pergande abgelegt.

## Literaturverzeichnis

AGISOFT LLC (Hrsg.) (2019): Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.5. – Online in Internet: [https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_1\\_5\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf) [Stand: 2019-08-03].

ALBERTZ, JÖRG & WIGGENHAGEN, MANFRED (2009): Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung. – 5. Auflage, Berlin, Hannover.

AUTODESK (Hrsg.) (2019): 3ds Max – Software für Modellierung und Rendering in 3D für Designvisualisierungen, Games und Animationen.- Online in Internet: [https://www.autodesk.de/products/3ds-max/overview?mktvar002=716537&gclid=EAAlQobChMlod6NoMjS4wIVyud3Ch3x4g1ZEAAYASAAEgI6g\\_D\\_BwE](https://www.autodesk.de/products/3ds-max/overview?mktvar002=716537&gclid=EAAlQobChMlod6NoMjS4wIVyud3Ch3x4g1ZEAAYASAAEgI6g_D_BwE) [Stand: 2019-07-26].

CAPOBUSSI, MAURIZIO (2001): Fotografieren – traditionell und digital. – Klagenfurth.

CZICHON, RAINER MARIA (2006): Die hethitische Kultur im mittleren Schwarzmeergebiet – unter besonderer Berücksichtigung der Umgebung von Vezirköprü. – Online in Internet: <http://www.nerik.de/downloads/Oymaagac%20-%20CDOG%206%20-%20Die%20Hethitische%20Kultur%20im%20mittleren%20Schwarzmeergebiet%20.pdf> [Stand: 2019-07-31], Berlin, Würzburg.

CZICHON, RAINER MARIA & MIELKE, DIRK PAUL (2019): Nassholzfunde aus der unterirdischen Quellkammer. – In: Archäologische Forschungen am Oymağaaç Höyük/Nerik 2016-2018, 157 – 162, unveröffentlicht.

DEUTSCHE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT E.V. (Hrsg.) (2016): Oymağaaç Höyük/Nerik. Online in Internet: [https://www.dfg.de/dfg\\_magazin/talks\\_vortraege\\_ausstellungen/ausstellungen/vorderasien/hethitische\\_kultur/index.html](https://www.dfg.de/dfg_magazin/talks_vortraege_ausstellungen/ausstellungen/vorderasien/hethitische_kultur/index.html) [Stand: 2019-08-01].

HECKNER, HEIKO & WIRTH, MARCO (2014): Vergleich von Dateiformaten für 3D-Modelle. – Online in Internet: [http://cedifa.de/wp-content/uploads/2014/05/07\\_3D-Modell-Formate.pdf](http://cedifa.de/wp-content/uploads/2014/05/07_3D-Modell-Formate.pdf) [Stand: 2019-08-05].

ISLER-KERÉNYI, CORNELIA (2002): Das Volk der tausend Götter. – Online in Internet: <https://www.nzz.ch/article7Y76F-1.376210> [Stand: 2019-08-02].

KRAUS, KARL (2000a): Photogrammetrie – Topographische Informationssysteme. – Bd. 1, Wien.

KRAUS, KARL (2000b): Photogrammetrie – Topographische Informationssysteme. – Bd. 2, Wien.

KRAUS, KARL (2000c): Photogrammetrie – Topographische Informationssysteme. – Bd. 3, Wien.

LEHMANN, MONIKA & BREUER, MICHAEL (2019): 3D-Objektmodellierung mittels Mehrbildphotogrammetrie. – unveröffentlicht, Berlin.

LUHMANN, THOMAS (2010): Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen. – 3. Auflage, Berlin, Offenbach.

LUHMANN, THOMAS & SCHUHMACHER, CHRISTINA (Hrsg.) (2018): Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018. – Berlin, Offenbach.

MOCHNER, MATTHIAS (2002): Die Hethiter – eine antike Großmacht wird rekonstruiert. – Online in Internet: <https://www.spektrum.de/magazin/die-hethiter-eine-antike-grossmacht-wird-rekonstruiert/828464> [Stand: 2019-07-19].

NIKON (Hrsg.) (2019a): D810. – Online in Internet: [https://www.nikon.de/de\\_DE/product/digital-cameras/slr/professional/d810#tech\\_specs](https://www.nikon.de/de_DE/product/digital-cameras/slr/professional/d810#tech_specs) [Stand: 2019-08-01].

NIKON (Hrsg.) (2019b): D850. – Online in Internet: [https://www.nikon.de/de\\_DE/product/digital-cameras/slr/professional/d850#techspecs](https://www.nikon.de/de_DE/product/digital-cameras/slr/professional/d850#techspecs) [Stand: 2019-08-01].

POMASKA, GÜNTER (2016): Bildbasierte 3D-Modellierung – Vom digitalen Bild bis zum 3D-Druck. – Berlin, Offenbach.

UNBEKANNT (2019): Ausgrabungen auf dem Oymağaaç Höyük. – Online in Internet: <http://nerik.de/> [Stand: 2019-07-19].

WIKIPEDIA (Hrsg.) (2019a): Hethiter. – Online in Internet: <https://de.wikipedia.org/wiki/Hethiter> [Stand: 2019-07-19].

WIKIPEDIA (Hrsg.) (2019b): Hethitische historische Geographie. – Online in Internet: [https://de.wikipedia.org/wiki/Hethitische\\_historische\\_Geographie](https://de.wikipedia.org/wiki/Hethitische_historische_Geographie) [Stand: 2019-07-19].

WIKIPEDIA (Hrsg.) (2019c): Nerik. – Online in Internet: <https://de.wikipedia.org/wiki/Nerik> [Stand: 2019-07-19].

WIKIPEDIA (Hrsg.) (2019d): Zippalanda. – Online in Internet:  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Zippalanda> [Stand: 2019-08-02].

WILHELM, GERNOT (2013a): Abriss der hethitischen Geschichte. – Online in Internet:  
<https://www.hethport.uni-wuerzburg.de/HPM/hpm.php?p=hetgesch> [Stand: 2019-07-19].

WILHELM, GERNOT (2013b): Die Wiederentdeckung der Hethiter. – Online in Internet:  
<https://www.hethport.uni-wuerzburg.de/HPM/hpm.php?p=anfhet> [Stand: 2019-07-19].

WITTE, BERTOLD & SPARLA, PETER (2015): Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. – 8. Auflage, Aachen, Berlin, Offenbach.

ZICK, MICHAEL (2002): Hethiter – Die vergessene Weltmacht. – Online in Internet:  
<https://www.wissenschaft.de/allgemein/hethiter-die-vergessene-weltmacht/> [Stand: 2019-07-19].

# Anhang

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Lage von Nerik.....	3
Abb.2: Luftbild der Ausgrabung Sep. 2008.....	4
UNBEKANNT (2008): Luftbild der Ausgrabung, September 2008. – Online in Internet: <a href="http://www.nerik.de/ausgrabung/loci/">http://www.nerik.de/ausgrabung/loci/</a> [Stand 2019-07-29].	
Abb. 3: Leiterholm mit Zapfloch für eine Sprosse.....	5
Abb. 4: Photogrammetrisches Messprinzip.....	6
Abb. 5: Bezug zwischen Bildebene und Objektebene.....	7
Abb. 6: Komponenten der Sfm-Prozesskette.....	9
Abb. 7: Zuordnung mit Epipolarlinien im Bildpaar.....	10
Abb. 8: Passpunktmarke 1 aus Agisoft Metashape.....	11
Abb. 9: Passpunktanordnung für ein Holzfragment in Oymağaaç.....	12
Abb. 10: Mehrbildorientierung.....	12
Abb. 11: Kollinearitätsgleichung mit Erklärung derParameter.....	13
Abb. 12: Prinzip der photogrammetrischen Punktbestimmung (3D-Triangulation).....	14
Abb. 13: Dreiecksvermaschung eines Punkthaufens.....	15
Abb. 14: Das Belichtungsdreieck (verändert nach KLECKER).....	16
KLECKER, ROLAND (2015): Das Belichtungsdreieck. – Online in Internet: <a href="https://dofoto.de/belichtungsdreieck/">https://dofoto.de/belichtungsdreieck/</a> [Stand: 2019-07-30].	
Abb. 15: Aufnahme der Holzfragmente.....	17
Abb. 16: Holz mit Loch.....	18
Abb. 17: Holz mit Sprosse.....	18
Abb. 18: Beispiel für kleines Holz.....	18
Abb. 19: Aufbau der Drehtelleraufnahmen.....	21

Abb. 20: Konstruktionsaufbau mit Passpunkten.....	21
Abb. 21: Aufnahmeaufbau mit Beleuchtung im Hintergrund, 2 Kameras und „Schlitten“.....	22
Abb. 22: Passpunktmaßstäbe mit aufgeklebten, laminierten Passpunktmarken.....	23
Abb. 23: Messen der Passpunktstrecken.....	23
Abb. 24: Screenshot der App <i>SchärfenTiefeRechner</i> von Detlef Vagt.....	24
Abb. 25: Nikon D850.....	25
Abb. 26: Aufnahmekonfiguration für den „Schlitten“ .....	26
Abb. 27: Aufnahme der Stirnseiten.....	27
Abb. 28: Aufnahmekonfiguration für kleinere Holzstücke auf dem Drehteller.....	28
Abb. 29: Workflow in Agisoft Metashape.....	30
Abb. 30: Bildreihe vom Alignment zur Textur.....	31
Abb. 31: Aufnahme eines Holzfragmentes mit erkannten Passpunktmarken.....	32
Abb. 32: Falsch erkannter Passpunkt auf der Korkunterlage.....	33
Abb. 33: Einstellung für die Bildorientierung.....	34
Abb. 34: Orientierter Bildverband mit leichter Punktwolke.....	34
Abb. 35: Fehlerhafte Bildorientierung mit zueinander verdrehten Punktwolken.....	35
Abb. 36: Georeferenzierungsfehler eines Bildverbandes vor und nach der Optimierung.....	36
Abb. 37: Verteilung der natürlichen Passpunkte.....	36
Abb. 38: Auswahlfenster für das Alignen und Mergen von Chunks.....	37
Abb. 39: Einstellung für die dichte Punktwolke.....	38
Abb. 40: Dichte Punktwolke mit Ausreißern und umliegenden Styropor.....	39
Abb. 41: Einstellung für die Punktwolkenvermaschung.....	40
Abb. 42: Texturiertes Modell.....	40
Abb. 43: Einstellungen für die Texturierung.....	41
Abb. 44: Fehlerhaftes Alignment durch Verknüpfungspunkte im Hintergrund.....	43
Abb. 45: Aufnahme mit ausmaskiertem Hintergrund.....	44

Abb. 46: Fehlerhaft gemessener Passpunkt auf dem Spanngurt.....	44
Abb. 47: Punktwolke mit „verwaschener“ Oberfläche.....	45
Abb. 48: Punktwolke mit sauberer Oberfläche.....	45
Abb. 49: Modell mit weiß texturierten Bereichen.....	46
Abb. 50: Modell nach der Ausmaskierung der Bilder.....	46
Abb. 51: Dichte Punktwolke von 7986_68_6_9.....	46
Abb. 52: Vermaschtes und texturiertes Modell 7986_68_6_9.....	46
Abb. 53: gescheiterter Versuch den Bereich der gelöschten Dreiecksmaschen zu texturieren.....	47
Abb. 54: Ausschnitt der dichten Punktwolke von 7986_68_6_11 mit Doppelung durch Objektbewegung.....	48
Abb. 55: Ausschnitt des texturierten Modells 7986_68_6_5 mit Versprung im Modell.....	48
Abb. 56: Oberseite des Objekts (nass).....	49
Abb. 57: Unterseite des Modells (trocken).....	49
Abb. 58: Verschiedene Ansichten in 3ds Max.....	54
Abb. 59: Dokumentationsfotos der Holzleiter aus 2017 von Herrn Koch.....	54

## **Tabellverzeichnis**

Tabelle 1: Verwendete Kameras.....	25
Tabelle 2: Daten zum Laptop für die Auswertung vor Ort.....	29
Tabelle 3: Technische Daten der verwendeten Computer.....	30
Tabelle 4: Rechenzeiten.....	42
Tabelle 5: Genauigkeiten aus Agisoft Metashape.....	52

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre, dass ich meine Bachelorarbeit „Dokumentation von Holzfunden am Oymağaaç Höyük durch 3D-Modellierung“ eigenständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe und dass ich alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe. Die Bachelorarbeit hat bisher in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Berlin, den 08.08.2019

Marcel Pergande



BEUTH HOCHSCHULE  
FÜR TECHNIK  
BERLIN  
University of Applied Sciences

Prof. Dipl.-Ing. M. Breuer  
Photogrammetrie und  
Fernerkundung  
Haus Bauwesen, Zi. 157  
Luxemburger Straße 10  
Tel. (030) 4504 - 5144  
Fax (030) 4504 - 665144  
breuer@beuth-hochschule.de

7.5.2019

- Aufgabenstellung zur Bachelorarbeit für Herrn MARCEL PERGANDE (855198) zum Thema

### **Dokumentation von Holzfunden am Oymaağaç Höyük durch 3D-Modellierung**

Studiengang: Bachelor Geoinformation

#### **Hintergrund**

Bei der Freilegung eines unterirdischen Ganges auf der archäologischen Grabung am Oymaağaç Höyük (Türkei) wurden in einem vermutlich als Quellkammer genutzten Raum verschiedene Hölzer gefunden. Einige davon wurden als Fragmente einer Leiter identifiziert. Die Hölzer, die mit hoher Wahrscheinlichkeit aus der Frühzeit stammen, waren bei ihrem Auffinden mit Wasser bedeckt. Wenn die Hölzer mit Sauerstoff in Kontakt kommen, beginnen natürliche Zersetzungsprozesse. Dokumentation und Konservierung der Hölzer sind daher zwei wichtige Aufgaben, die mit unterschiedlichen Herausforderungen verbunden sind.

Das Labor für Photogrammetrie der Beuth Hochschule für Technik Berlin arbeitet mit dem Archäologen Prof. Dr. KLINGER von der Freien Universität Berlin zusammen, der am Institut für Altorientalistik die Kultur der Hethiter erforscht und die archäologischen Grabungen am Oymaağaç Höyük in der Türkei seit Jahren leitet. Im August 2018 erfolgte die photogrammetrische Aufnahme verschiedener Hölzer am Oymaağaç Höyük.

#### **Ziel**

Ziel der Arbeit ist die Auswertung der bei der photogrammetrischen Aufnahme erhobenen Daten. Als Grundlage für Forschungen zur Rekonstruktion soll ein Orthobildplan im Maßstab 1:10 erstellt werden, der die Fragmente einer Leiter zeigt. Darüber hinaus sollen texturierte dreiecksvermaschte 3D-Modelle der Leiterfragmente in zwei unterschiedlichen Auflösungsstufen bereitgestellt werden. In der höchsten Auflösungsstufe soll die 3D-Geometrie der Objekte bezüglich der vorhandenen Bilddaten bestmöglich erfasst werden. Hierbei ist eine Genauigkeit anzustreben, die das spätere Anfertigen von 1:1 Kopien der



Hölzer durch 3D-Druck ermöglicht<sup>1</sup>. Eine reduzierte Auflösungsstufe soll eine Generalisierung der Objektgeometrie sein, um so ein schnelles Betrachten der Objekte in einem 3D-Viewer (z.B. als 3D-PDF) zu ermöglichen.

Insgesamt sind folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:

1. Kurze Beschreibung des Aufnahmegegenstands
2. Zusammenstellung relevanter Fachliteratur
3. Beschreibung der photogrammetrischen Aufnahmeplanung und Durchführung
4. Photogrammetrische Auswertung der aufgenommenen Bilddaten
5. Dokumentation der erreichten Genauigkeit
6. Erstellung der geforderten Datenprodukte
7. Kritische Schlussbetrachtung

Bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung ist darauf zu achten, dass die Vorgehensweise eingehend erläutert, alle getroffenen Entscheidungen gut begründet und die Ergebnisse übersichtlich zusammengestellt werden. Dazu gehört auch, dass aufgetretene technische Probleme sachlich dokumentiert werden. Wichtig ist darüber hinaus, dass die erzielten Ergebnisse anhand nachvollziehbarer Kriterien evaluiert und kritisch bewertet werden.

Abzugeben ist der beschreibende Text in 2-facher Ausfertigung, sowie alle Unterlagen und Ergebnisse in digitaler Form. Dazu gehört auch ein ausführliches Register der gespeicherten Daten. Ein zusätzliches Exemplar der Arbeit sowie Kopien sämtlicher erzeugter Datenprodukte sind an Prof. Dr. KLINGER zu reichen. Zur öffentlichen Präsentation der Arbeit ist ein Poster mit den wichtigsten Ergebnissen anzufertigen.

Die Bearbeitungszeit beträgt 3 Monate.

Prof. Dipl.-Ing. MICHAEL BREUER

---

<sup>1</sup> Die praktische Ausführung der 3D-Drucke ist nicht mehr Bestandteil dieser Bachelorarbeit.

# Orthobildplan



Maßstab 1:10

0 10 20 30 40 50 cm



BEUTH HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BERLIN

University of Applied Sciences

Orthobildplan einer Holzleiter im Maßstab 1:10

Bachelorarbeit von Marcel Pergande

im Studiengang Geoinformation-Y

Thema: Dokumentation von Holzfinden am Oymaagac Höyük durch 3D-Modellierung

Betreuer: Prof. Dipl.-Ing. Michael Breuer

Erstelldatum: 25.07.2019