



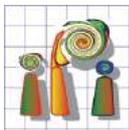
Institut für Photogrammetrie und Geoinformationen  
Bachelorarbeit

# Untersuchung der Eignung einer Handykamera für die dreidimensionale Objektrekonstruktion

*Autor:* Mathis Eckhoff  
mathis.eckhoff@ewetel.net  
2861330

*Prüfer:* Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen  
Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke

*Eingereicht am:* 08.01.2015



## Bachelorarbeit

### Thema: Untersuchung der Eignung einer Handykamera für die dreidimensionale Objektrekonstruktion

#### Aufgabenstellung für Herrn Mathis Eckhoff

Die geometrische Objektrekonstruktion innerhalb der Photogrammetrie basiert auf der Verknüpfung von mehreren Einzelbildern aus unterschiedlichen Aufnahmerichtungen (Mehrbildtriangulation). Als Kamera für die Einzelbildaufnahme kommen hochauflösende stabile digitale Spiegelreflexkameras zum Einsatz. Heute können für die Aufnahme auch moderne Handykameras genutzt werden, wenn die Abbildungsqualität der Geräte ausreichend und die Kamerageometrie stabil genug ist.

Im Rahmen dieser Arbeit soll am Beispiel der Nikolaikapelle in Hannover gezeigt werden, dass die Erstellung eines texturierten 3D-Oberflächenmodells mit einer Handykamera möglich ist.

Eine Genauigkeitsabschätzung soll in Abhängigkeit von der gewählten Aufnahmeanordnung Angaben zur erreichbaren Punktgenauigkeit in X,Y,Z - Richtung liefern. Abschließend ist das generierte 3D-Modell mit einem existierenden Referenzmodell zu vergleichen und zu bewerten.

Ausgabetermin: 19.08.2014

Abgabetermin: 19.02.2015

Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen

Fakultät für Bauingenieurwesen  
und Geodäsie

Institut für Photogrammetrie  
und GeoInformation  
Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Heipke

Dr.-Ing. Manfred Wiggenhagen  
Tel. +49 511 762-3304  
Fax +49 511 762-2483  
E-Mail: wiggenhagen  
@ipi.uni-hannover.de

19.08.2014

Besucheradresse:  
Nienburger Straße 1  
30167 Hannover  
www.ipi.uni-hannover.de

Zentrale:  
Tel. +49 511 762 0

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ich erkläre weiterhin, dass die vorliegende Arbeit noch nicht im Rahmen eines anderen Prüfungsverfahrens eingereicht wurde.

Hannover, den 08.01.2015

Mathis Eckhoff

---

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	iv
Abbildungsverzeichnis	vi
Abkürzungsverzeichnis	vii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Ziel der Arbeit . . . . .	1
1.3 Gliederung der Arbeit . . . . .	2
<b>2 Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Mehrbildaufnahme . . . . .	3
2.2 Innere Orientierung . . . . .	4
2.3 Epipolargeometrie . . . . .	5
2.4 Kreuzkorrelation . . . . .	6
2.5 SIFT-Operator . . . . .	7
2.6 Modellkoordinatensystem . . . . .	8
2.7 Relative Orientierung . . . . .	9
2.8 Objektkoordinatensystem . . . . .	11
2.9 Äußere Orientierung . . . . .	12
2.10 Mehrbildtriangulation . . . . .	13
2.11 Delauney-Triangulation . . . . .	15
2.12 Verwendete Handykamera . . . . .	16
2.13 Genauigkeitsabschätzung . . . . .	16
<b>3 Arbeitsablauf</b>	<b>17</b>
3.1 Bildaufnahme . . . . .	17
3.2 Erstellung des 3D-Modells . . . . .	18
3.2.1 Ausrichtung der Fotos . . . . .	18
3.2.2 Erzeugung der dichten Punktwolke . . . . .	19
3.2.3 Erzeugung der Gitter . . . . .	20
3.2.4 Bearbeitung der Geometrie . . . . .	21
3.2.5 Erzeugung der Textur . . . . .	22
<b>4 Ergebnisse</b>	<b>23</b>
4.1 Referenzmodell . . . . .	23
4.2 Maßstab . . . . .	23
4.3 Vergleich der 3D-Modelle . . . . .	25
4.3.1 ICP-Algorithmus . . . . .	26
4.3.2 Berechnung der Distanz . . . . .	27
4.3.3 Beurteilung des Vergleichs . . . . .	28
<b>5 Zusammenfassung</b>	<b>30</b>

5.1	Fazit . . . . .	30
5.2	Ausblick . . . . .	31
	<b>Quellenangaben</b>	<b>32</b>
	<b>Anhang</b>	<b>33</b>

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Mehrbildaufnahme, [Luhmann, 2010, S. 134]	3
2.2	Innere Orientierung, [Luhmann, 2010, S. 144]	4
2.3	Epipolargeometrie, [Luhmann, 2010, S. 274]	5
2.4	Modellkoordinatensystem, [Luhmann, 2010, S. 26]	8
2.5	Relative Orientierung, [Luhmann, 2010, S. 277]	10
2.6	Objektkoordinatensystem, [Luhmann, 2010, S. 26]	11
2.7	Äußere Orientierung, [Luhmann, 2010, S. 237]	12
2.8	Mehrbildtriangulation, [Luhmann, 2010, S. 302]	14
2.9	Delauney-Triangulation - Kreiskriterium nicht erfüllt (links), Kreiskriterium erfüllt (rechts) [Meier, 2011, S. 179]	15
3.1	Arbeitsablauf zur Erstellung des texturierten 3D-Modells [Eigene Darstellung]	17
3.2	Parametereingabe „Fotos ausrichten“	18
3.3	links: Punktwolke nach Ausrichtung der Fotos rechts: Zoomausschnitt (rotes Rechteck)	19
3.4	Parametereingabe „Dichte Punktwolke erzeugen“	19
3.5	links: Punktwolke nach Erzeugung der dichten Punktwolke rechts: Zoomausschnitt (rotes Rechteck)	20
3.6	Parametereingabe „Gitter erzeugen“	20
3.7	links: Punktwolke nach Erzeugung der Gitter rechts: Zoomausschnitt (rotes Rechteck)	21
3.8	Auswahl der zu löschenden Bereiche	21
3.9	Parametereingabe „Textur erzeugen“	22
3.10	links: Punktwolke nach Erzeugung der Textur rechts: Zoomausschnitt (rotes Rechteck)	22
4.1	3D-Modell mit Markierungen	24
4.2	Referenzmodell mit Markierungen	24
4.3	Maßstabsabweichungen: links: berechnetes Modell rechts: Referenzmodell	25
4.4	Verknüpfung der Punktwolken	26
4.5	Berechnung der Distanz zwischen den beiden Punktwolken	27
4.6	Histogramm der absoluten Distanzen zwischen der Referenzpunktwolke und der neuen Punktwolke	28
A.1	Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von vorne	33
A.2	Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von rechts	33
A.3	Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von hinten	34
A.4	Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von links	34
A.5	Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von oben	35
A.6	Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von oben links	35
A.7	Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von oben rechts	36
A.8	Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von oben vorne	36

## Abkürzungsverzeichnis

**ICP** *Iterative Closet Point*

**SIFT** *Scale Invariant Feature Transform*

# 1 Einleitung

In der klassischen Photogrammetrie werden bisher nur Bilder aus hochauflösenden Digitalkameras oder Spiegelreflexkameras eingesetzt, um 3D-Modelle zu rekonstruieren. Neben der Kameravielfalt gibt es eine Reihe verschiedener kostenfreie und kommerzielle Programme, die für die Objektrekonstruktionen genutzt werden können.

## 1.1 Motivation

Der Trend in der heutigen Zeit geht zu sogenannten „Alleskönnern“. Der Verbraucher möchte ein Gerät haben mit dem er alle Freizeitaktivitäten und den Arbeitsalltag meistern kann. Das beste Beispiel hierfür sind Smartphones. Diese vereinen eine Vielzahl von Geräten, wie zum Beispiel: Mobiltelefon, persönlicher Informationsverwalter, Datenspeicher, MP3-Player, Navigationsgerät, Spielkonsole und auch die Kamera. Heutzutage besitzt etwa jeder zweite Bundesbürger ein Smartphone [Statista, 2014] und vermutlich wird dieser Anteil in den nächsten Jahren weiter steigen. Jedermann hat sein Smartphone immer dabei, ob in der Freizeit oder im Arbeitsalltag, eine herkömmliche Kamera jedoch nicht. Im folgenden wird der Begriff Handykamera im Sinne von Smartphonekamera verwendet.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Das Ziel der Arbeit besteht darin, herauszufinden, ob eine Handykamera für die dreidimensionale Objektrekonstruktion geeignet ist. Hierfür soll aus den Bildern einer Handykamera mit der Software „PhotoScan“ von Argisoft ein 3D-Modell erstellt werden. Dafür sollen zuerst die Bilder zueinander orientiert werden, um aus diesen eine 3D-Punktwolke zu berechnen. Auf deren Basis soll abschließend ein texturiertes, visuell ansprechendes 3D-Modell erzeugt werden. Im Anschluss an die Objektrekonstruktion soll die 3D-Punktwolke mit der eines Referenzmodells, welches mit einer Digitalkamera aufgenommen wurde, verglichen werden. Hierfür wird die Software CloudCompare eingesetzt. Das zu rekonstruierende Objekt ist die Nikolaikapelle zwischen Klagesmarkt und Steintor in Hannover.

### 1.3 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Bachelorarbeit gliedert sich in drei Abschnitte. Der erste Abschnitt behandelt die Grundlagen, die für eine photogrammetrische Auswertung benötigt werden. Zunächst wird hier auf die Mehrbildaufnahme eingegangen, danach auf photogrammetrische Grundlagen, Interest-Operatoren und die Mehrbildtriangulation. Am Ende wird eine Methode der Dreiecksvermaschung beschrieben und eine Genauigkeitsabschätzung durchgeführt.

Der zweite Abschnitt bildet den Hauptteil der Arbeit. Hier wird der Arbeitsablauf für die Erstellung des 3D-Modells beschrieben. Beginnend bei der Bildaufnahme, über die Erstellung der Punktwolke, bis zur Erzeugung der Textur.

Im dritten Abschnitt wird kurz auf das Referenzmodell und die Erstellung eines Maßstabes eingegangen. Danach folgt der Vergleich des erstellten Modells mit dem Referenzmodell. Am Ende wird die Bachelorarbeit zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf die photogrammetrischen Grundlagen eingegangen, um den Ablauf von der Bildaufnahme über die Bildorientierung bis zur Berechnung der 3D-Punktwolke zu verstehen. Danach werden die Dreiecksvermaschung und die verwendete Handykamera erläutert. Schließlich wird eine Genauigkeitsabschätzung durchgeführt.

### 2.1 Mehrbildaufnahme

Am Anfang des Prozesses steht die *Mehrbildaufnahme*, die den Standardfall in der Nahbereichsphotogrammetrie bildet. Diese unterliegt bezüglich Aufnahmeort und -richtung der Kamera keiner Einschränkung. Jeder Objektpunkt  $P$  muss in mindestens zwei Bildern, die von unterschiedlichen Aufnahmepunkten aus entstanden sind, enthalten sein. Grundsätzlich kann das Objekt mit beliebig vielen Bildern aufgenommen werden [s. Abb. 2.1], die im Objektraum im Idealfall einen Schnittwinkel von ca.  $90^\circ$  der Strahlenbündel haben. [Luhmann, 2010, S. 133f]

Zur Bestimmung der Objektkoordinate wird das Verfahren der *Mehrbildtriangulation* [vgl. Kap. 2.10] angewendet. Damit eine gleiche Objektgenauigkeit in allen Koordinatenrichtungen erreicht werden kann, müssen pro Objektpunkt Bildstrahlen in mindestens drei bis vier Bildern vorhanden sein. Außerdem sollten die Bildstrahlen eine gute Schnittgeometrie (bis zu  $90^\circ$ ) besitzen.

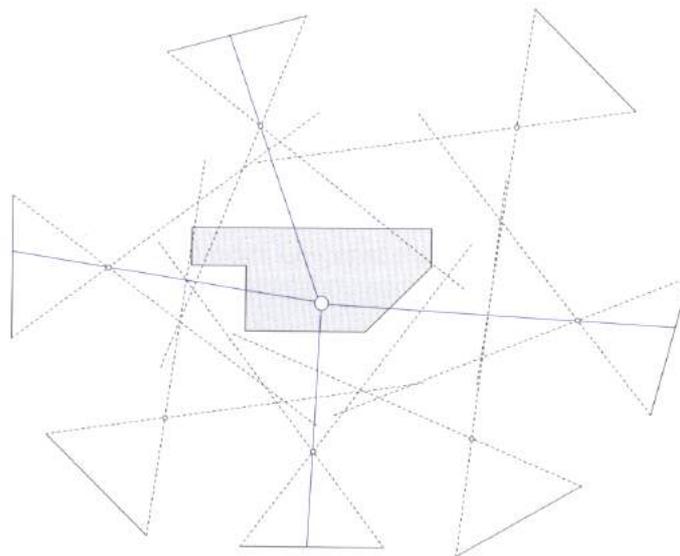


Abbildung 2.1: Mehrbildaufnahme, [Luhmann, 2010, S. 134]

Nach der Mehrbildaufnahme kann mit der Auswertung begonnen werden. Dafür werden verschiedene Parameter benötigt, wie zum Beispiel die innere Orientierung.



## 2.3 Epipolargeometrie

Die *Epipolargeometrie* stellt die Beziehung zwischen zwei Kamerabildern und einem Objektpunkt dar. Als Epipolarebene wird die Ebene bezeichnet, welche durch die Abbildungsstrahlen  $\mathbf{r}'$  und  $\mathbf{r}''$  vom jeweiligen Projektionszentrum zum Objektpunkt und der Basis  $\mathbf{b}$ , der Vektor zwischen den Projektionszentren, aufgespannt wird [s. Abb. 2.3]. Beide Bildebenen werden durch diese Ebene in den Schnittgeraden  $k'$  und  $k''$  geschnitten. Im Falle konvergenter Aufnahmen (wie in dieser Bachelorarbeit) verlaufen diese Schnittgeraden, auch Epipolarlinien genannt, schräg durch das Bild.

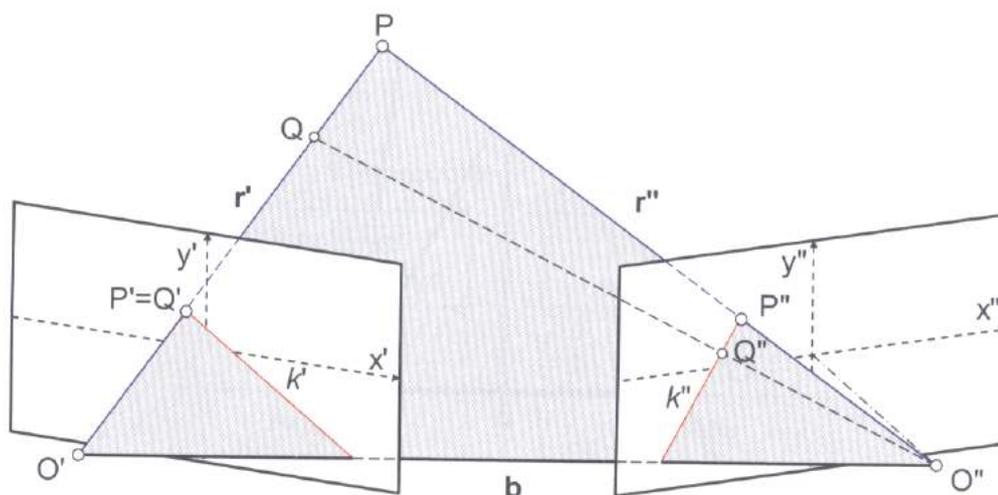


Abbildung 2.3: Epipolargeometrie, [Luhmann, 2010, S. 274]

Der Vorteil der Epipolargeometrie liegt darin, dass sich bei korrektem Strahlenschnitt ein zu  $P'$  identischer Bildpunkt  $P''$  in der Epipolarebene und somit auch auf der Epipolargeraden befinden muss. Dadurch wird der Suchraum zum Auffinden identischer Punkte erheblich kleiner [Luhmann, 2010, S. 273f].

Die Lage einer gesuchten Epipolarebene kann bei bekannten Orientierungsparametern mit Hilfe der Abbildungsgleichung

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_O + m * \mathbf{R} * \mathbf{x}'$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_O \\ Y_O \\ Z_O \end{bmatrix} + m * R * \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}$$

berechnet werden.

wobei:	$\mathbf{X}$	=	Objektpunkt
	$\mathbf{X}_0$	=	Lage Projektionszentrum
	$m$	=	Maßstab
	$\mathbf{R}$	=	Rotationsmatrix
	$\mathbf{x}'$	=	Bildvektor.

Zum Auffinden und Zuordnen der identischen Punkte existieren flächenbasierte und merkmalsbasierte Verfahren.

## 2.4 Kreuzkorrelation

Die *Kreuzkorrelation* ist ein flächenbasiertes Verfahren, in dem ein Ähnlichkeitsmaß zwischen einer Mustermatrix und einer Suchmatrix bestimmt wird. Es wird benutzt, um identische Punkte in zwei Bildern zu finden. Die Suchmatrix ist meist mit Hilfe der Epipolargeometrie bestimmt worden. In der Mustermatrix befindet sich der Punkt mit seiner Nachbarschaft, der im zweiten Bild gefunden werden soll. Zum Finden des homologen Punktes läuft die Mustermatrix über die gesamte Suchmatrix und berechnet für jeden Pixel einen Kreuzkorrelationskoeffizienten. Dieser wird mit Hilfe der Grau- bzw. Farbwerte des Pixels und seiner Nachbarschaft bestimmt. Befindet sich in der resultierenden Koeffizientenmatrix ein Maximum, so ist dieses wahrscheinlich der gesuchte Punkt.

Das Problem bei diesem Verfahren ist, dass mehrere als geeignet angenommene Punkte in der resultierenden Matrix auftreten können, oder dass das Maximum zu klein ist. Außerdem ist die Kreuzkorrelation nicht robust gegenüber rotierten oder maßstäblich unterschiedlichen Bildern. Deswegen wird heutzutage statt der Kreuzkorrelation der SIFT-Operator angewendet[Albertz, 2009].

## 2.5 SIFT-Operator

Der *Scale Invariant Feature Transform* (SIFT)-Operator ist ein merkmalsbasierter Interest-Operator, der zur Extraktion markanter Bildstellen, die für eine Bildverknüpfung geeignet sind, entwickelt wurde. Geeignete homologe Punkte sind solche, die ein einzigartiges Grauwertmuster in ihrer Umgebung aufweisen und mit einer hohen Wahrscheinlichkeit im korrespondierenden Bild vorkommen. Dieses Verfahren wird eingesetzt, um homologe Punkte zu detektieren, die für die relative Orientierung von Bildern eingesetzt werden. Dafür wird in jeder Stufe einer Bildpyramide eine Kantenextraktion durchgeführt. Daraus erstellt der Operator ein Histogramm der Gradientenrichtung und leitet dann einen 128-dimensionalen Merkmalsvektor ab. Die Merkmale beziehen sich hierbei auf die Hauptgradientenrichtung und die Bildpyramidenstufe mit der stärksten Unterscheidbarkeit. Deshalb ist der Operator weitgehend rotations- und maßstabsinvariant. Auf Grund dessen eignet sich der SIFT-Operator auch zur Zuordnung von Bildern, welche sich in Maßstab, Rotation und Perspektive unterscheiden [Lowe, 1999, S. 1150ff]. Nach der Detektion homologer Punkte können die Bilder zueinander orientiert werden. Dies geschieht zunächst in einem Modellkoordinatensystem.

## 2.6 Modellkoordinatensystem

„Das *Modellkoordinatensystem*  $(xyz)$  [s. Abb. 2.4] ist ein räumliches kartesisches Koordinatensystem, in dem die relative Lage und Ausrichtung zweier oder mehrerer Bilder festgelegt wird“ [Luhmann, 2010, S. 25]. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt gebräuchlich in einem Projektionszentrum.

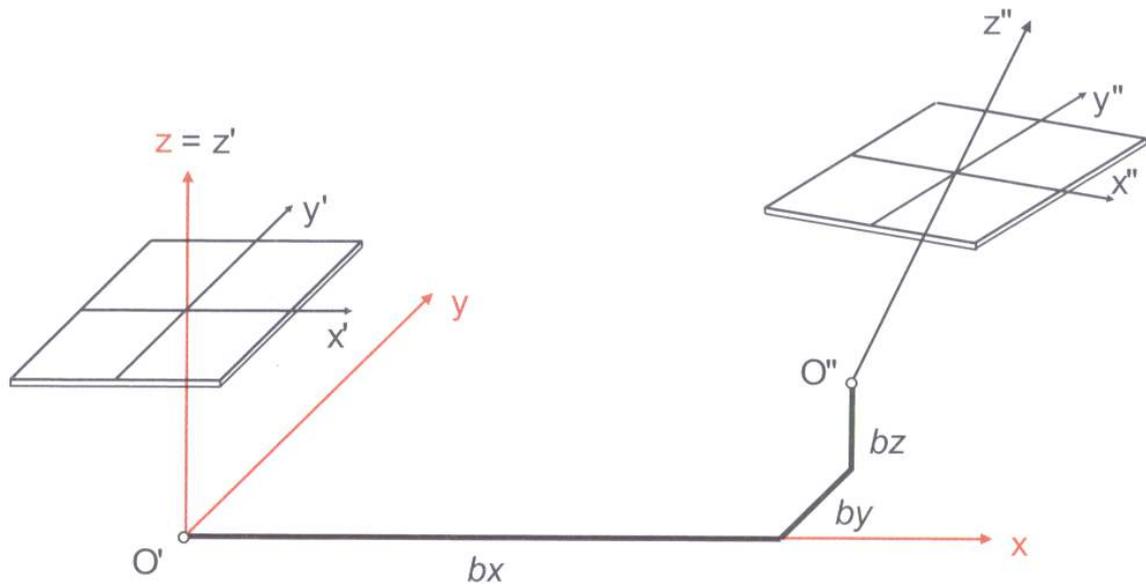


Abbildung 2.4: Modellkoordinatensystem, [Luhmann, 2010, S. 26]

In einem solchen Modellkoordinatensystem kann die relative Orientierung beschrieben werden.

## 2.7 Relative Orientierung

Unter der *relativen Orientierung* eines Bildpaares wird die räumliche Lage zweier Bilder zueinander verstanden, bezogen auf ein gemeinsames Modellkoordinatensystem. Für die Parametrisierung der relativen Orientierung gibt es zwei Möglichkeiten, wobei hier nur auf das gebräuchlichere Verfahren, die Methode der unabhängigen Bilder, eingegangen wird.

Hierbei wird die Basis  $\mathbf{b}$  so gewählt, dass sie in Richtung der x-Achse des Modellkoordinatensystems verläuft [s. Abb. 2.5]. Damit lauten die Parameter der äußeren Orientierung im Modellkoordinatensystem:

$$\begin{array}{cccccc} x_1 = 0 & y_1 = 0 & z_1 = 0 & x_2 = bx & y_2 = 0 & z_2 = 0 \\ \omega_1 & \varphi_1 & \kappa_1 & \omega_2 = 0 & \varphi_2 & \kappa_2 \end{array}$$

Die Bestimmungselemente sind dadurch fünf unabhängige Drehwinkel,  $\omega_1, \varphi_1, \kappa_1$  und  $\varphi_2, \kappa_2$ , wobei sich  $\omega_1$  und  $\omega_2$  tauschen lassen. Der Maßstab kann frei gewählt werden, z.B. durch  $bx = 1$ .

Die Berechnung der relativen Orientierung setzt voraus, dass ein Objektpunkt und die beiden Projektionszentren  $O'$  und  $O''$  in einer Ebene liegen (Koplanaritätsbedingung). In dieser Epipolarebene liegen damit auch die Bildpunkte  $P'$  und  $P''$ . Nur wenn sich die Raumstrahlen  $\mathbf{r}'$  und  $\mathbf{r}''$  streng im Objektpunkt schneiden, die Lage der Bildpunkte und die Orientierungsparameter beider Bilder fehlerfrei vorliegen, ist die Koplanaritätsbedingung erfüllt. Dadurch lässt sich aus einem Paar identischer Punkte eine Gleichung ableiten. Auf Grund dessen werden für die fünf Orientierungsparameter mindestens fünf identische Bildpunktpaare mit bekannten Bildkoordinaten benötigt [Luhmann, 2010, S. 275ff].

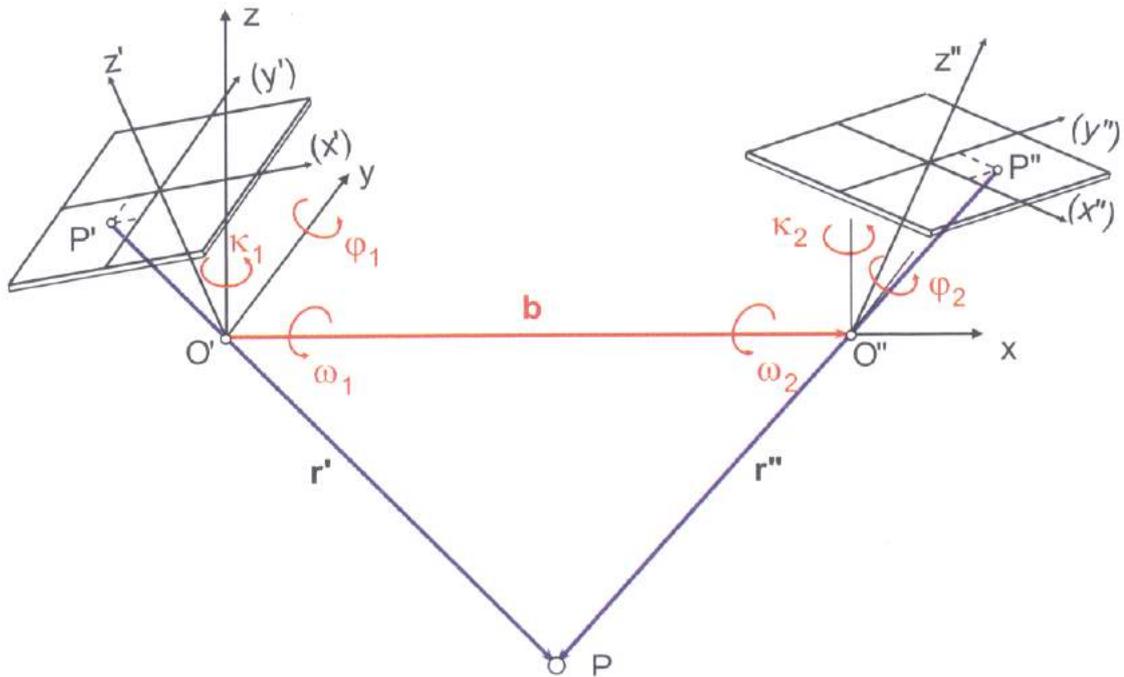


Abbildung 2.5: Relative Orientierung, [Luhmann, 2010, S. 277]

Im Anschluss an die relative Orientierung der Bilder zueinander, kann mit der Mehrbildtriangulation eine 3D-Punktwolke berechnet werden. Für die Ausgleichung werden allerdings noch die äußeren Orientierungen der Bilder, die in einem Objektkoordinatensystem liegen, benötigt.

## 2.8 Objektkoordinatensystem

Das *Objektkoordinatensystem* ( $XYZ$ ) ist ein übergeordnetes, räumliches, kartesisches Koordinatensystem, welches durch Passpunkte des Objekts festgelegt ist. Ein Beispiel hierfür kann ein Haus sein [s. Abb. 2.6], indem eine untere Hausecke als Ursprung gesetzt wird. Abgehend nach oben befindet sich die Z-Achse; und die zwei Hausseiten, die sich im Ursprung treffen, sind die X und Y-Achse. Zusätzlich kann noch ein Maßstab, zur Kontrolle auch mehrere, im Koordinatensystem definiert werden [Luhmann, 2010, S. 26]. Ein Maßstab ist hierbei die Distanz zwischen zwei Punkten am Objekt, die auf unterschiedliche Art und Weise ermittelt werden kann, zum Beispiel mit einem Maßband. Objektpunkte, zwischen denen die Distanz ermittelt wird, sind häufig markante Punkte wie Hausecken.

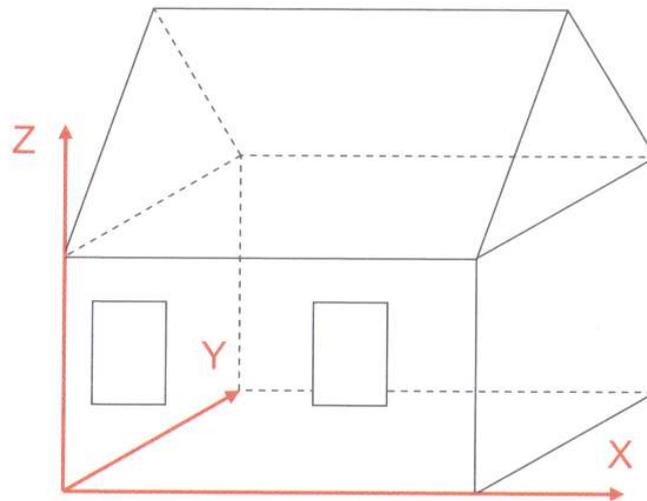


Abbildung 2.6: Objektkoordinatensystem, [Luhmann, 2010, S. 26]

## 2.9 Äußere Orientierung

Die *äußere Orientierung* beschreibt die Lage und Ausrichtung des räumlichen Bildkoordinatensystems im übergeordneten Objektkoordinatensystem [vgl. Kap. 2.8]. Sie wird durch sechs Parameter [s. Abb. 2.7] dargestellt:  $\omega_1$ ,  $\varphi_1$ ,  $\kappa_1$  (Drehwinkel um Koordinatenachse),  $X_O$ ,  $Y_O$  und  $Z_O$  (Objektkoordinaten des Projektionszentrums)[Luhmann, 2010, S. 236].

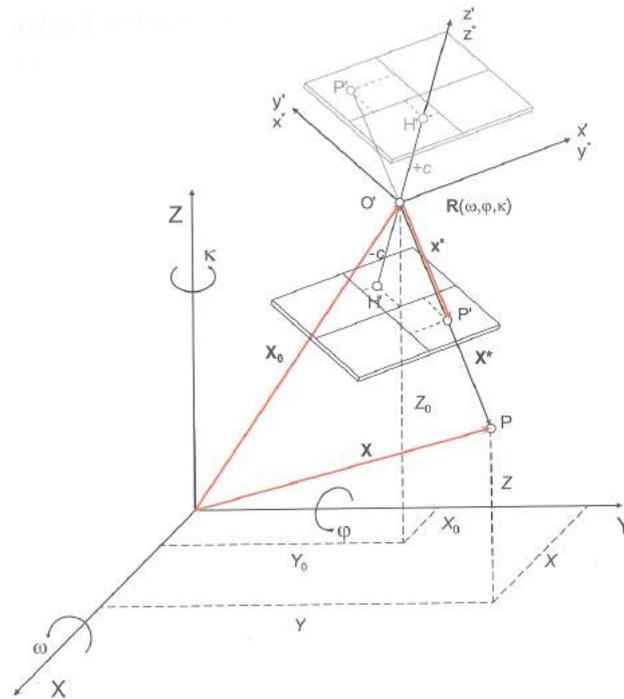


Abbildung 2.7: Äußere Orientierung, [Luhmann, 2010, S. 237]

Nachdem nun alle Orientierungen näherungsweise bekannt sind und auch für Objektpunkte Näherungskordinaten vorhanden sind, kann mit der Mehrbildtriangulation begonnen werden.

## 2.10 Mehrbildtriangulation

Die *Mehrbildtriangulation* (Bündelblockausgleichung) dient zur „simultanen rechnerischen Einpassung beliebig vieler im Raum angeordneter Bilder (Strahlenbündel) unter Berücksichtigung photogrammetrisch gemessener Bildpunkte und geodätischer Beobachtungen“ [Luhmann, 2010, S. 301]. Dabei werden die Bilder über identische Punkte, bei denen die Koplanaritätsbedingung erfüllt sein muss, zu einem Gesamtmodell verknüpft [s. Abb. 2.8]. Hier kann das Objekt vollständig zu einem dreidimensionalen Modell rekonstruiert werden [Luhmann, 2010, S. 301].

In dieser Ausgleichung werden mittels eines überbestimmten Gleichungssystems die 3D-Objektkoordinaten und Orientierungsparameter (innere und äußere Orientierung) inklusive deren zugehörigen statistischen Angaben zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit bestimmt. Damit diese Ausgleichung durchgeführt werden kann, werden für alle Unbekannten (3D-Objektkoordinaten und Orientierungsparameter) Näherungswerte benötigt. Diese können automatisch mittels kombiniertem Vorwärts- und Rückwärtseinschneiden berechnet werden [Luhmann, 2010, S. 328]. Hier wird zunächst ein Bildpaar als Startmodell festgelegt und dessen relative Orientierung berechnet. Danach wird jedes weitere Bild, welches mindestens drei homologe Punkte besitzt, durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt in das vorhandene Modell eingebunden und neue Objektpunkte mit einem räumlichen Vorwärtsschnitt bestimmt. Anschließend kann der Rückwärtsschnitt noch einmal berechnet werden, um die äußere Orientierung zu verbessern. Dies geschieht iterativ, bis alle Bilder in den Bildverband integriert worden sind. Nachdem alle Bilder orientiert wurden, erfolgt mit Hilfe der im Modell- und Objektkoordinatensystem vorhandenen Passpunkte eine abschließende äußere Orientierung. Damit liegen für die 3D-Objektkoordinaten und Orientierungen Näherungswerte vor [Luhmann, 2010, S. 331].

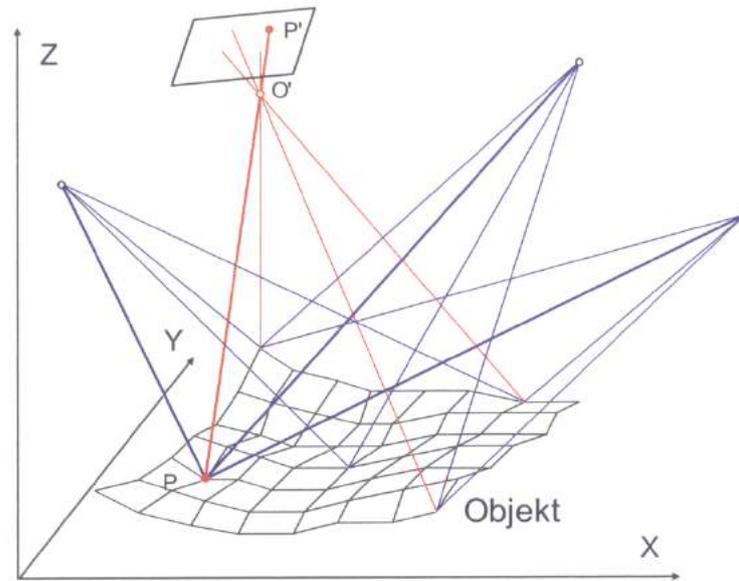


Abbildung 2.8: Mehrbildtriangulation, [Luhmann, 2010, S. 302]

Da jetzt ein 3D-Modell vorhanden ist, können die einzelnen Punkte miteinander vermascht werden. Dadurch entsteht ein Dreiecksnetz.

## 2.11 Delauney-Triangulation

Die *Delauney-Triangulation* ist ein Verfahren, mit Hilfe dessen aus einer Menge von Punkten (Punktwolke) ein Dreiecksnetz erstellt wird. Hierbei werden die Dreiecke so gesucht, dass der kleinste aller Winkel möglichst groß ist und somit alle Seiten nach Möglichkeit gleich lang sind. Sie werden mit Hilfe des Kreiskriteriums konstruiert. Das bedeutet, dass sich im Umkreis des Dreiecks kein weiterer Punkt befinden darf [s. Abb. 2.9] [Meier, 2011, S. 180].

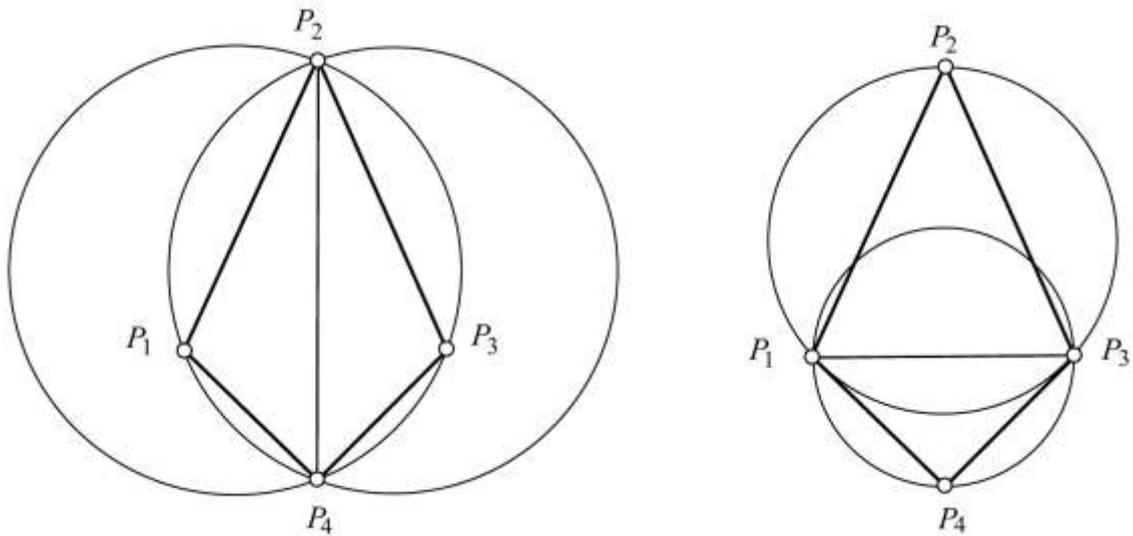


Abbildung 2.9: Delauney-Triangulation - Kreiskriterium nicht erfüllt (links),  
Kreiskriterium erfüllt (rechts) [Meier, 2011, S. 179]

## 2.12 Verwendete Handykamera

Das verwendete Smartphone ist von der Firma Sony Ericsson mit der Bezeichnung „XPERIA neo“. Die verbaute Kamera hat den Namen MT15i und eine maximale Pixelanzahl von 8,1 Megapixel [Sony Mobile Communications, 2011]. Die Kamera nimmt Bilder mit einer maximalen Bildgröße von  $3264 \times 2448$  Pixel (Format 4:3) auf. Zusätzlich können die Einstellungen der Kamera verändert werden. Die Bilder für dieses 3D-Modell wurden im Format 16:9 mit einer Bildgröße von  $3264 \times 1836$  Pixel aufgenommen.

## 2.13 Genauigkeitsabschätzung

Um die 3D-Punktgenauigkeit des erstellten 3D-Modells abschätzen zu können, ist die Kenntnis der technischen Größen vom eingebauten CMOS-Sensor (Exmos R IMX-179) in der Kamera [Sony, o. J.], die der aufgenommenen Bilder und die Kenntnis über die Aufnahmekonfiguration erforderlich. Es werden die Entfernung zum Objekt, die Entfernung zwischen zwei Projektionszentren (Basis), die Kammerkonstante der verwendeten Kamera, die Pixelgröße auf dem Sensor und die Pixelmessgenauigkeit benötigt. Die folgende Berechnung wird für die schlechteste geometrische Konfiguration veranschaulicht. Das bedeutet, dass die kleinste Basis und die größte Entfernung zum Objekt in die Berechnung mit einfließen. Damit gelten folgende Werte:

$Y$	$= 8 \text{ m}$	Entfernung zum Objekt
$B$	$= 0,5 \text{ m}$	Basis
$c$	$= 4,1 \text{ mm}$	Kammerkonstante
$pel$	$= 1,4 \text{ } \mu\text{m}$	Pixelgröße
$p$	$= 1,2$	manuelle Pixelmessgenauigkeit

Mit den Werten kann die Punktgenauigkeit rechtwinklig  $\sigma_{xy}$  und in Richtung  $\sigma_z$  des Bildstrahls berechnet werden.

$$\sigma_{xy} = \frac{Y}{c} * pel * p = 3,28 \text{ mm} \quad (2.1)$$

$$\sigma_z = \frac{Y}{B} * \sigma_{xy} = 52,45 \text{ mm} \quad (2.2)$$

### 3 Arbeitsablauf

In diesem Kapitel wird der Arbeitsablauf zur Erstellung des texturierten 3D-Modells beschrieben. Im Folgenden ist eine Übersicht über den Ablauf kurz dargestellt.

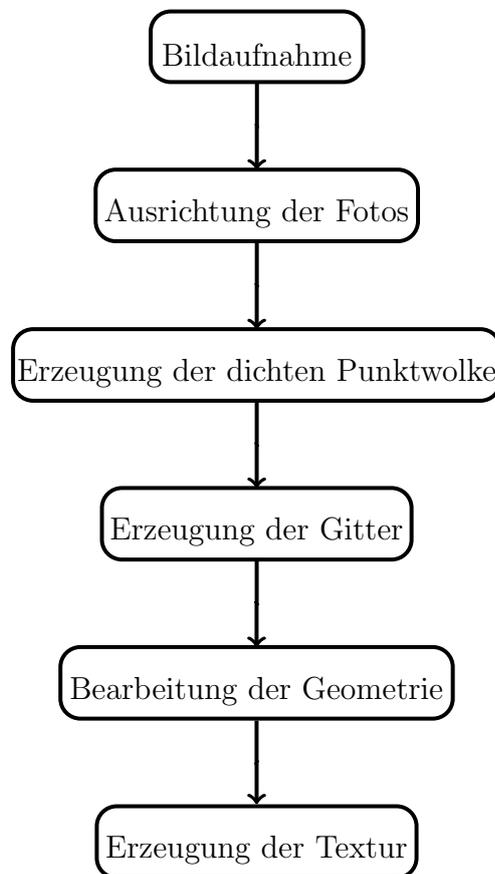


Abbildung 3.1: Arbeitsablauf zur Erstellung des texturierten 3D-Modells  
[Eigene Darstellung]

#### 3.1 Bildaufnahme

Für die Aufnahme der Bilder mit der Handykamera ist ein bewölkter Tag ausgesucht worden, damit keine Schlagschatten die Bildverarbeitung beeinflussen. Außerdem ist darauf geachtet worden, dass jeder Bereich der Nikolaikapelle in mindestens zwei Bildern vorhanden ist und dass jedes Bild von einem anderen Standpunkt aus aufgenommen wird, damit die Basis für die Berechnung der relativen Orientierung [vgl. Kap. 2.7] vorhanden ist. Unter den Voraussetzungen sind insgesamt 66 Bilder [s. Anhang] aufgenommen worden, mit denen die folgende Auswertung durchgeführt wird.

## 3.2 Erstellung des 3D-Modells

Nach der Bildaufnahme beginnt die 3D-Modell-Erstellung. Hierfür wird die Software PhotoScan Professional Edition (Version 1.0.4 in 64 Bit) von Agisoft benutzt. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die einzelnen Schritte der Software eingegangen. Die verwendeten Parameter sind Empfehlungen aus dem hauseigenem Tutorial von Agisoft.

### 3.2.1 Ausrichtung der Fotos

An dieser Stelle berechnet PhotoScan die relative Orientierung [vgl. Kap. 2.7] für jedes Bild und erstellt eine dünne Punktwolke [s. Abb. 3.3] [Agisoft, 2014, S. 9]. Bevor dies geschieht, müssen die Fotos in das Projekt geladen werden.

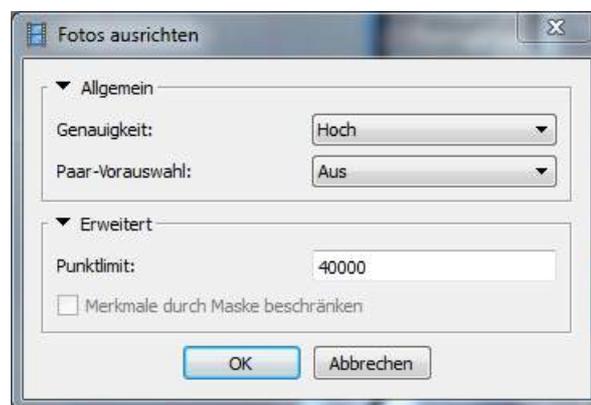


Abbildung 3.2: Parametereingabe „Fotos ausrichten“

Danach wird direkt mit der Ausrichtung der Fotos begonnen, wofür noch einige Parameter eingestellt werden [s. Abb. 3.2]. Zum einen die Genauigkeit, die hier auf „Hoch“ gestellt wurde, da dadurch der Suchbereich auf der Epipolarlinie [vgl. Kap. 2.3] kleiner wird und somit weniger falsche Zuordnungen entstehen. Zum Anderen wurde die Paar-Vorauswahl auf Grund einer schnelleren Verarbeitung der größeren Anzahl an Fotos deaktiviert und ein Punktlimit für jedes Bild von 40.000 eingestellt. Zum Finden dieser Punkte wird der SIFT-Operator [vgl. Kap. 2.5] eingesetzt.

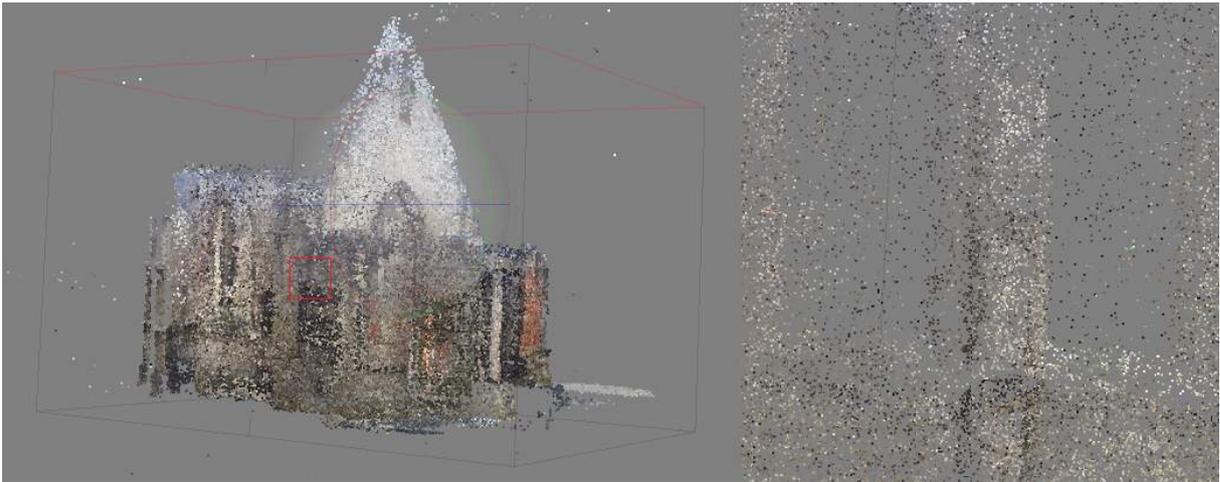


Abbildung 3.3: links: Punktwolke nach Ausrichtung der Fotos  
rechts: Zoomausschnitt (rotes Rechteck)

Nach dem Ausrichten der Fotos wird die Begrenzungsbox dem Objekt angeglichen. Diese Box wird automatisch erzeugt und PhotoScan befasst sich in den nächsten Rekonstruktionsschritten ausschließlich mit der Punktwolke innerhalb dieser Box.

### 3.2.2 Erzeugung der dichten Punktwolke

Auf Grundlage der berechneten Kamerapositionen erzeugt die Software, mit Hilfe der Mehrbildtriangulation [vgl. Kap. 2.10], detaillierte Informationen für jede Kameraposition und kombiniert diese zu einer einzigen dichten Punktwolke [s. Abb. 3.5].



Abbildung 3.4: Parametereingabe „Dichte Punktwolke erzeugen“

Die Parameter für die Berechnung sind die Qualität und die Tiefenfilterung [s. Abb. 3.4]. Eine höhere Qualitätsauswahl hat nur eine dichtere Punktwolke, jedoch keine genaueren Punkte zur Folge. Darüber hinaus würde die Berechnung mit einer höheren Qualität sehr viel länger dauern und mehr Rechenressourcen verbrauchen. Auf Grund dessen wird eine mittlere Qualität als ausreichend erachtet. Der Tiefenfilter wird auf „Aggressiv“ gestellt, da dadurch der Suchraum auf der Epipolarlinie kleiner wird und Ausreißer aussortiert

werden. Ein milderer Tiefenfilter ist ideal für kleine Details und komplexe Szenen. Jedoch werden bei dieser Untersuchung keine kleinen Details benötigt, was den Einsatz eines mildereren Tiefenfiltern überflüssig macht.



Abbildung 3.5: links: Punktwolke nach Erzeugung der dichten Punktwolke  
rechts: Zoomausschnitt (rotes Rechteck)

### 3.2.3 Erzeugung der Gitter

Nach Konstruktion der dichten Punktwolke wird das polygonisierte Gittermodell [s. Abb. 3.7], basierend auf der Punktwolke, mit Hilfe der Delauney-Triangulation [vgl. Kap. 2.11] erstellt.

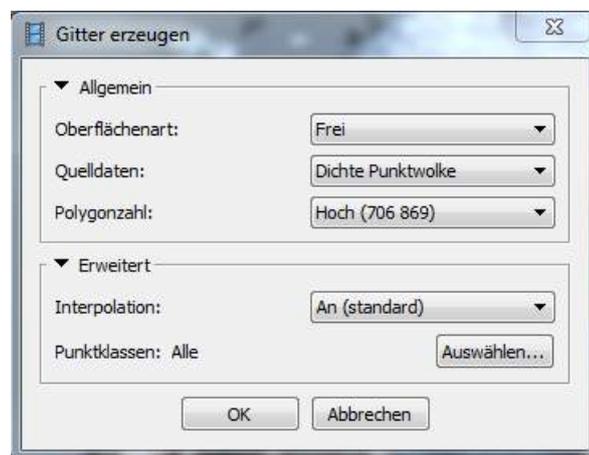


Abbildung 3.6: Parametereingabe „Gitter erzeugen“

Die Parameter für die Berechnung werden so gewählt, dass die zuvor berechnete dichte Punktwolke als Datengrundlage dient. Ferner wird eine freie Oberflächenart eingestellt, da diese Einstellung für geschlossene Objekte wie Statuen, Gebäude, etc. geeignet ist.

Zusätzlich soll eine hohe Polygonzahl herauskommen und die Interpolation erlaubt sein [s. Abb. 3.6].



Abbildung 3.7: links: Punktwolke nach Erzeugung der Gitter  
rechts: Zoomausschnitt (rotes Rechteck)

### 3.2.4 Bearbeitung der Geometrie

Zur Datenreduzierung und um unwichtige Bereiche oder Fehlzuordnungen zu löschen, ist es notwendig, die Geometrie zu bearbeiten. Dafür werden nicht zusammenhängende Bereiche mit Hilfe einer sukzessiven Auswahl rot markiert und dann gelöscht [s. Abb. 3.8].

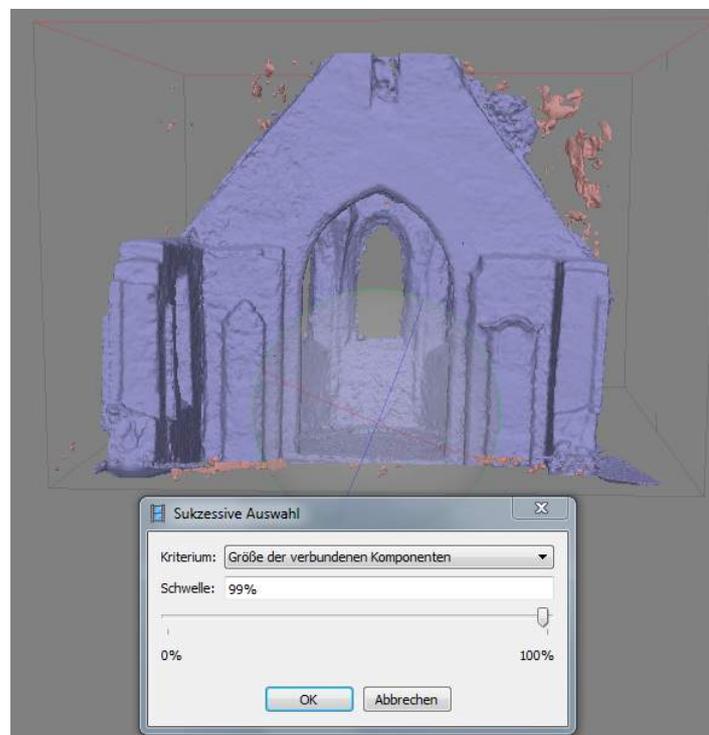


Abbildung 3.8: Auswahl der zu löschenden Bereiche

### 3.2.5 Erzeugung der Textur

Der letzte Schritt in der 3D-Modell-Erstellung ist die Erzeugung der Textur. Die Textur wird pixelweise aus den aufgenommenen Bildern extrahiert und auf die jeweilige Stelle im 3D-Modell projiziert [s. Abb. 3.10].



Abbildung 3.9: Parametereingabe „Textur erzeugen“

Für diesen Zweck wird der Abbildungsmodus auf „Allgemein“ gestellt, der Überlagerungsmodus auf „Mosaik“ und die Texturgröße/-anzahl auf  $4069 \times 1$ . Außerdem wird die Farbkorrektur deaktiviert, da in den Bildern keine extremen Helligkeitsunterschiede vorhanden sind [s. Abb. 3.9].

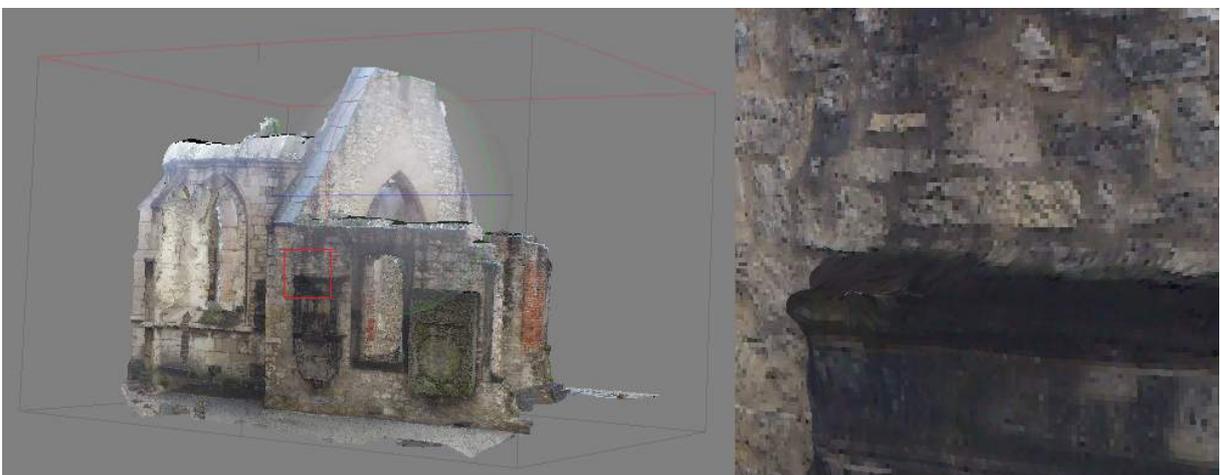


Abbildung 3.10: links: Punktwolke nach Erzeugung der Textur  
rechts: Zoomausschnitt (rotes Rechteck)

## 4 Ergebnisse

Nachdem alle Schritte vollzogen worden sind, liegt das 3D-Modell im Modellkoordinatensystem vor. Um ein Vergleich mit einem Referenzmodell vollziehen zu können, müssen beide Modelle im gleichen Koordinatensystem liegen.

### 4.1 Referenzmodell

Das Referenzmodell wurde mit Bildern der Digitalkamera „Panasonic Lumix DMC-TZ5“ erstellt. Der eingebaute CCD-Sensor hat eine Größe von  $6,2 \times 4,6$  mm und eine Pixelgröße von  $1,6 \mu\text{m}$ . Die Bilder liegen in der Auflösung  $3.456 \times 2.592$  Pixel vor. Die Kammerkonstante der Kamera beträgt  $4,7$  mm. Die 3D-Punktgenauigkeit dieses Modells wird äquivalent zu den Formeln 2.1 und 2.2 berechnet.

$Y$	$= 4 m$	Entfernung zum Objekt
$B$	$= 0,5 m$	Basis
$c$	$= 4,7 mm$	Kammerkonstante
$p_{el}$	$= 1,6 \mu m$	Pixelgröße
$p$	$= 1,2$	manuelle Pixelmessgenauigkeit

$$\sigma_{xy} = 1,63 mm$$

$$\sigma_z = 13,07 mm$$

### 4.2 Maßstab

Damit die Modelle denselben Maßstab aufweisen, wurden verschiedene Strecken am Objekt gemessen und manuell auf die 3D-Objekte übertragen. Die Strecken wurden mit einem Zollstock gemessen. Damit ein Maßstab festgelegt werden kann, müssen in PhotoScan Markierungen gesetzt werden [s. Abb. 4.1 und 4.2], zwischen denen der Maßstab gelegt werden soll. Insgesamt wurden 4 Maßstäbe eingefügt und zusätzlich eine Ecke des Objektes als Nullpunkt des Koordinatensystems gesetzt. Die Markierungen werden mit der Computermaus in den Bildern gesetzt. PhotoScan berechnet in allen anderen Bildern, in denen der 3D-Objektpunkt vorkommt, die zuvor gesetzte Markierung. Dies hat den Vorteil, dass die Markierung in den anderen Bildern kontrolliert werden kann, um dann eventuell die Position zu verbessern.

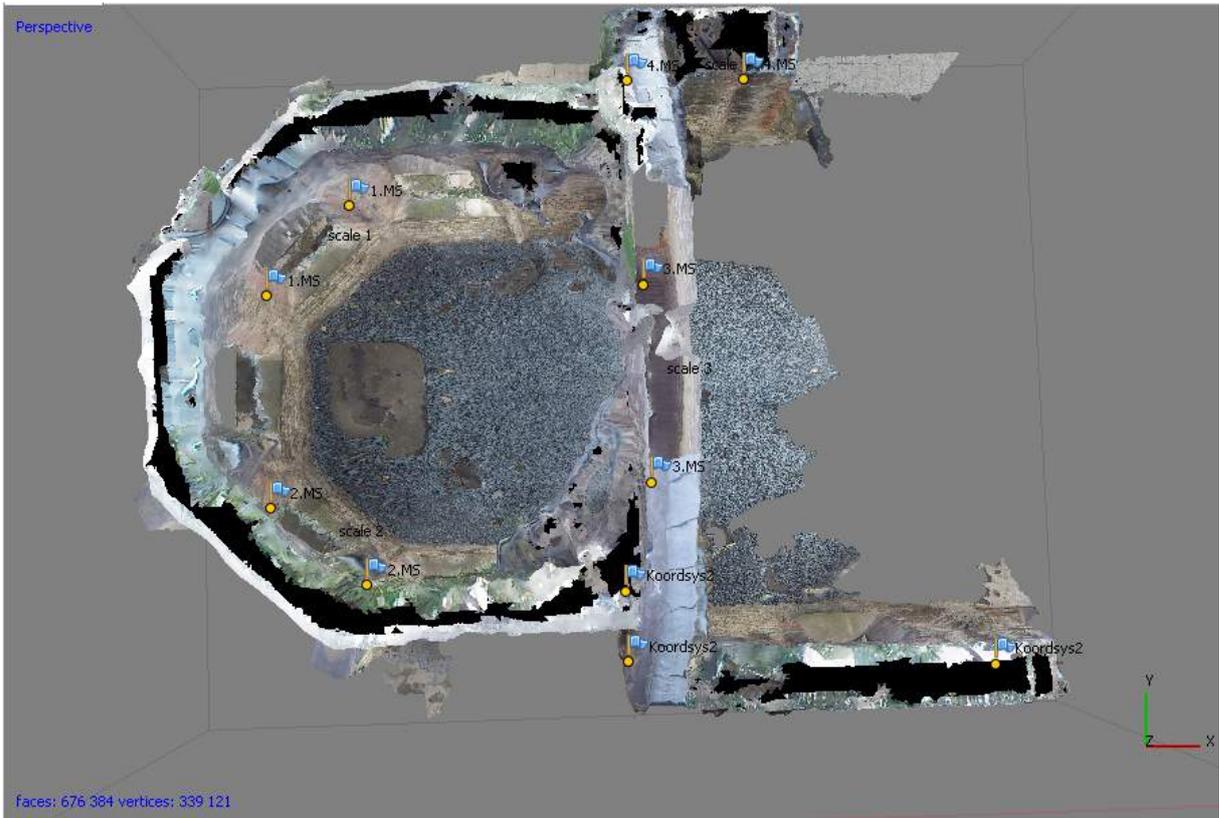


Abbildung 4.1: 3D-Modell mit Markierungen

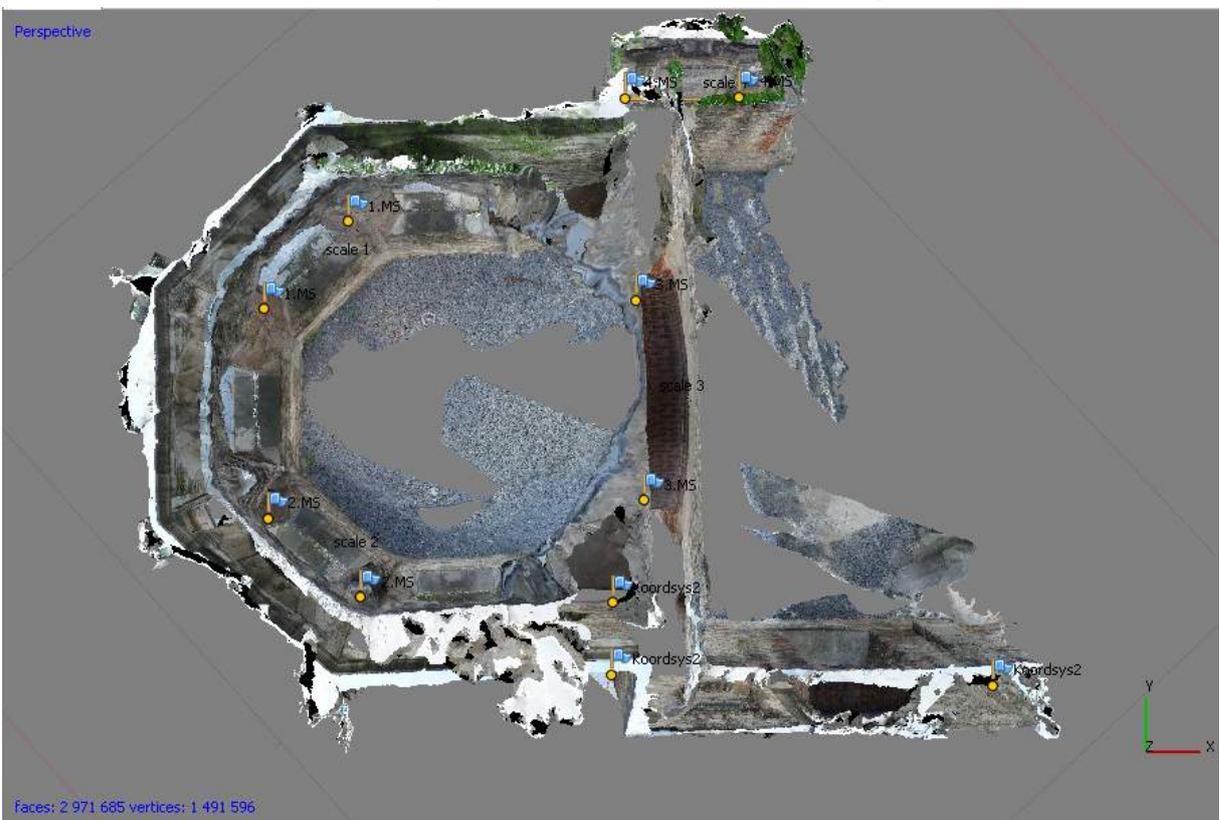


Abbildung 4.2: Referenzmodell mit Markierungen

Damit beide Modelle im gleichen Koordinatensystem mit gleichem Maßstab liegen, werden dieselbe Ecke als Nullpunkt und dieselben Mauerseiten als X- und Y-Achse definiert. Dies sind die drei Markierungen „Koordsys2“ im unteren Bereich der Abbildungen 4.1 und 4.2. Für den gleichen Maßstab werden die gleichen Strecken in die Modelle übernommen. Nach der Eingabe der Werte, gleicht PhotoScan diese aus und gibt den ermittelten Fehler aus (s. Abb 4.3). In diesem Fall unterscheiden sich die Maßstäbe nur um wenige Millimeter und die Markierungen des Koordinatensystems um zwei Zentimeter. Die Unterschiede sind auf die manuelle Erstellung der Markierungen zurückzuführen.

Markierungen	X (m)	Y (m)	Z (m)	Fehler (m)
<input checked="" type="checkbox"/> Koordsys2	0.000000	0.000000	0.000000	0.037005
<input checked="" type="checkbox"/> Koordsys2	0.000000	1.260000	0.000000	0.036524
<input checked="" type="checkbox"/> Koordsys2	6.280000	0.000000	0.000000	0.006853
<b>Gesamtfehler</b>				<b>0.030278</b>

Markierungen	X (m)	Y (m)	Z (m)	Fehler (m)
<input checked="" type="checkbox"/> Koordsys2	0.000000	0.000000	0.000000	0.010871
<input checked="" type="checkbox"/> Koordsys2	0.000000	1.260000	0.000000	0.011308
<input checked="" type="checkbox"/> Koordsys2	6.280000	0.000000	1.000000	0.001789
<b>Gesamtfehler</b>				<b>0.009115</b>

Maßstabsbalken	Entfernung (m)	Fehler (m)
<input checked="" type="checkbox"/> scale 1	2.055000	0.020208
<input checked="" type="checkbox"/> scale 2	2.065000	0.018192
<input checked="" type="checkbox"/> scale 3	3.450000	0.016715
<input checked="" type="checkbox"/> scale 4	1.925000	0.031622
<b>Gesamtfehler</b>		<b>0.022465</b>

Maßstabsbalken	Entfernung (m)	Fehler (m)
<input checked="" type="checkbox"/> scale 1	2.055000	-0.013644
<input checked="" type="checkbox"/> scale 2	2.065000	-0.023629
<input checked="" type="checkbox"/> scale 3	3.450000	0.044558
<input checked="" type="checkbox"/> scale 4	1.925000	-0.009465
<b>Gesamtfehler</b>		<b>0.026549</b>

Abbildung 4.3: Maßstabsabweichungen: links: berechnetes Modell  
rechts: Referenzmodell

Nachdem nun beide 3D-Modelle im gleichen Koordinatensystem mit dem gleichen Maßstab liegen, können sie miteinander verglichen werden.

### 4.3 Vergleich der 3D-Modelle

Für den Vergleich der beiden Modelle wird die Software CloudCompare (Version 2.5.1 in 32 Bit) benutzt. Dafür werden die beiden Punktwolken mit Hilfe des *Iterative Closet Point* (ICP) Algorithmus aneinander angepasst. Hierfür ist es notwendig, dass die beiden Punktwolken vorab bereits aneinander angepasst worden sind, da die Funktion keine willkürlich positionierten und orientierten Punktwolken anpassen kann [DGM, o. J., S. 40f].

### 4.3.1 ICP-Algorithmus

Mit dem ICP-Algorithmus können zwei Punktwolken, in denen keine Passpunkte vorhanden sind, miteinander verknüpft werden. Es werden Transformationsparameter (drei Rotationen und drei Translationen) berechnet, die benötigt werden, um eine neue Punktwolke  $PW'$  an eine vorhandene Punktwolke  $PW$  anzupassen. Hierfür wird der Abstand von jedem Punkt aus  $PW'$  zu jedem Punkt aus  $PW$  berechnet. Der Punkt aus  $PW'$  mit dem geringstem Abstand zu einem Punkt aus  $PW$  wird als korrespondierender Punkt deklariert. Für jeden Punkt aus der vorhandenen Punktwolke wird diese Berechnung wiederholt, damit es für jeden Punkt aus  $PW$  einen korrespondierenden Punkt aus der neuen Punktwolke gibt. Diese Punktpaare weisen den minimalsten Abstand auf. Die beiden Punktwolken werden iterativ durch die Transformation aneinander angenähert. Dies geschieht so lange, bis keine signifikante Bewegung der Punktwolke  $PW'$  vorhanden ist [s. Abb. 4.4][Besl, 1992]. In diesem Fall liegt der Wert für eine signifikante Bewegung der Punktwolke bei  $1\mu m$ .

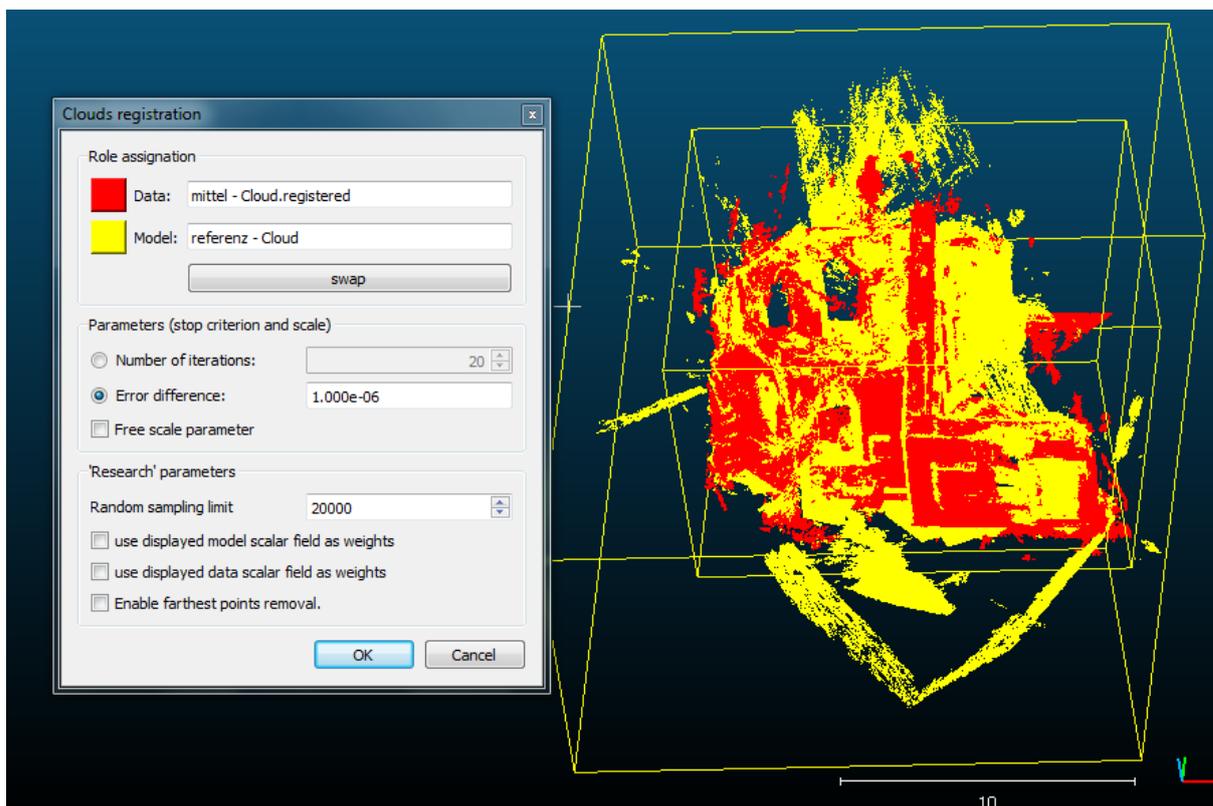


Abbildung 4.4: Verknüpfung der Punktwolken

### 4.3.2 Berechnung der Distanz

Nachdem die beiden Punktwolken aneinander angepasst worden sind, kann die Distanz zwischen ihnen berechnet werden. Hierfür werden die Referenzpunktwolke und die neue Punktwolke ausgewählt und eine erste approximative Distanz berechnet [s. Abb. 4.5]. In den „Approx. results“ sind die Näherungswerte für die minimale Distanz, maximale Distanz, mittlere Distanz, Standardabweichung und den maximalen relativen Fehler angegeben. Die maximale Distanz liegt hier bei 2.33 m. Der Grund hierfür liegt in den nicht zu 100 % übereinstimmenden Punktwolken. Wie in Abb. 4.2 (oben rechts) zu sehen, fehlt der Referenzpunktwolke ein Stück, welches aber in Abb. 4.1 vorhanden ist. Die Punkte in diesem Bereich haben dementsprechend eine große Distanz zur Referenzpunktwolke [s. Abb. 4.5, rotes Rechteck].

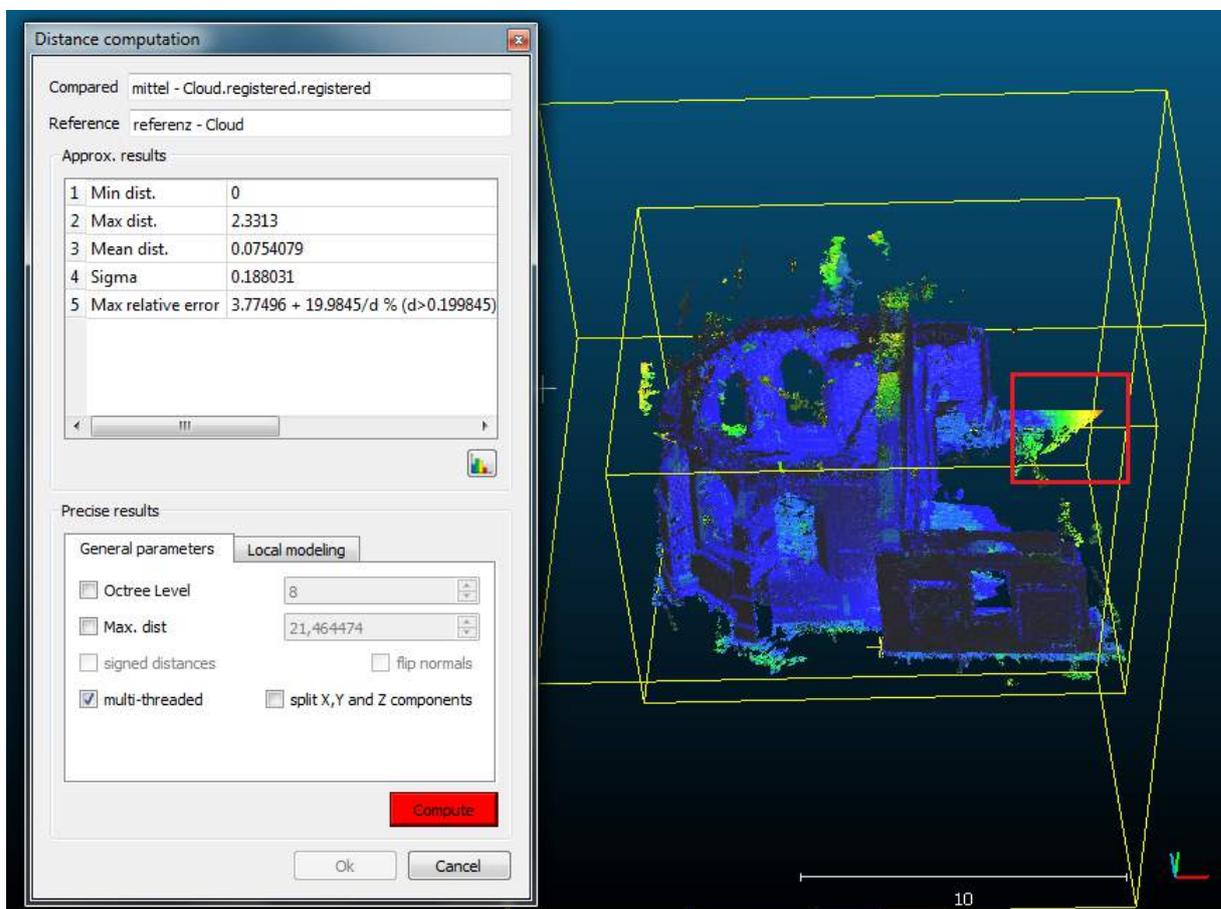


Abbildung 4.5: Berechnung der Distanz zwischen den beiden Punktwolken

Das Resultat dieser Berechnung ist eine neue, eingefärbte Punktwolke, die auf der neu berechneten Punktwolke basiert. Dargestellt sind die Distanzen zum nächsten Punkt der Referenzpunktwolke für jeden Punkt der neuen Punktwolke. Je roter Punkt, desto größer ist die Distanz.

### 4.3.3 Beurteilung des Vergleichs

Wie im Histogramm [s. Abb. 4.6 oben] zu sehen, weisen ca. 57,7 % der Punkte eine Distanz von bis zu 5,4 cm zu ihrem nächsten Nachbarn auf. Diese Punkte liegen meist auf den homologen Flächen der Kapelle. Da die Punktgenauigkeit in Richtung der Bildstrahlen laut Formel 2.2 bei 5,2 cm liegt, sind dies Punkte, die innerhalb dieser Genauigkeit liegen. Ungefähr 7,8 % der Punkte sind mehr als 12,5 cm von ihrem nächsten Nachbarn entfernt [s. Abb. 4.6 unten]. Dies sind jedoch meist Punkte, die in der Referenzpunktswolke nicht vorhanden und somit auch nicht vergleichbar sind. Somit sind ca. 34,5 % der Punkte nicht gut genug berechnet worden.

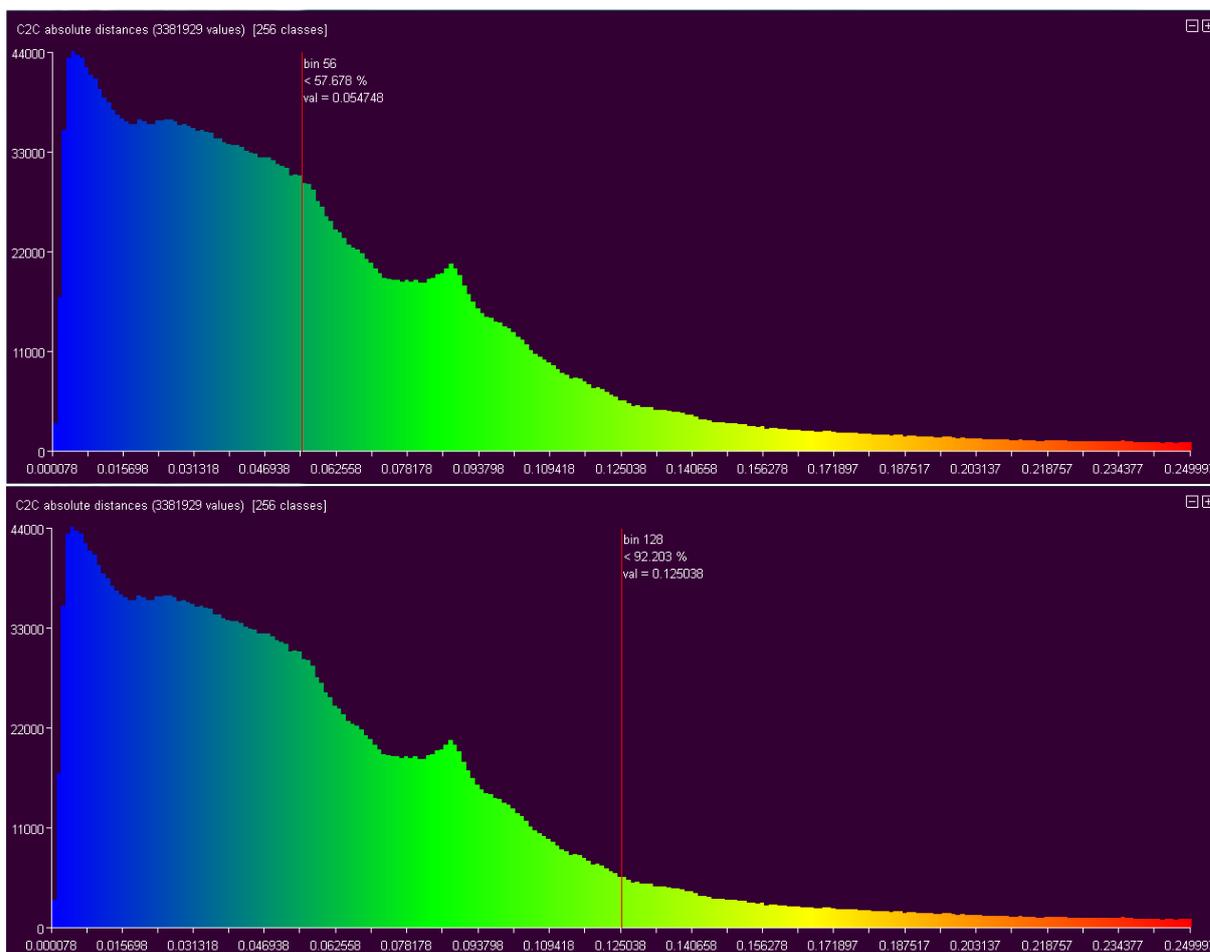


Abbildung 4.6: Histogramm der absoluten Distanzen zwischen der Referenzpunktswolke und der neuen Punktswolke

In den Abbildungen A.1 bis A.8 ist zu sehen, dass die größeren Abweichungen (5,5 cm bis 12,5 cm, grün) in unterschiedlichen Flächen auftreten. Zum einen auf großen homogenen Flächen wie in Abb. A.1 (links oben), zum Anderen auf Ecken und Vorsprüngen, wie in Abb. A.3 zu sehen. Diese Bereiche liegen, wie in Abb. A.2 und A.4 zu sehen, jedoch

auch innerhalb der Punktgenauigkeit. Auf Grund dessen ist kein systematischer Fehler zu erkennen. Im Innenbereich der Kapelle sind zum Großteil Punkte zu finden, die unterhalb der Punktgenauigkeit liegen. Dies ist auf die kürzere Entfernung des Projektionszentrums zum Objekt zu erklären.

## 5 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, die Eignung einer Handykamera für die 3D-Objektrekonstruktion zu untersuchen. Hierfür wurde aus den Bildern einer Handykamera ein texturiertes 3D-Modell erstellt und mit einem bestehenden Modell verglichen.

Die Erstellung des Modells war ohne Probleme möglich. In allen Arbeitsschritten wurden die Erwartungen eingehalten. Im Vergleich mit dem Referenzmodell wurden keine nennenswerten Unterschiede festgestellt, mit der Ausnahme, dass die Textur des Referenzmodells beim Zoomen visuell ansprechender ist. Dennoch können beim erstellten 3D-Modell auch kleinere Details, wie Zwischenräume im Mauerwerk [s. Abb. 3.10], erkannt werden. Auch sind keine großen Helligkeitsunterschiede im Modell festzustellen. Schwierigkeiten gab es beim Setzen der Markierungen, da dies manuell geschehen musste. Eine mögliche Optimierung wäre das Anbringen von Markierungen am Objekt, um diese anschließend mit aufzunehmen. Somit wäre das manuelle Setzen von Markierungen sehr viel einfacher. Da die 3D-Punktgenauigkeit bei 5,2 cm liegt, wurde dies allerdings nicht für nötig erachtet.

Im Vergleich zum Referenzmodell liegen ca.  $\frac{2}{3}$  aller Punkte innerhalb der 3D-Punktgenauigkeit, oder sind im Referenzmodell nicht enthalten. Das hat zur Folge, dass  $\frac{1}{3}$  der Punkte nicht in der Genauigkeit liegen und mehr als 5,4 cm vom nächsten Punkt entfernt sind.

### 5.1 Fazit

Die Untersuchung hat gezeigt, dass es möglich ist, texturierte 3D-Modelle aus den Bildern einer Handykamera zu erstellen. Dafür müssen alle erforderlichen Maßnahmen, wie der geeignete Abstand zum Objekt und eine möglichst große Basis, getroffen werden. Im Vergleich zu dem Referenzmodell weist das neue Modell keine nennenswerte Mehranzahl von Fehlzuordnungen auf. Daraus kann geschlossen werden, dass die Kamerageometrie stabil genug und die Abbildungsqualität ausreichend ist.

Zusätzlich wurde untersucht, wie genau das erstellte Modell im Vergleich zum Referenzmodell ist. Hier kam heraus, dass etwa  $\frac{1}{3}$  der Punkte höher als die berechnete 3D-Punktgenauigkeit liegen. Der Großteil dieser Punkte liegt an Ecken und Kanten, entgegen der Erwartungen gehörten aber auch Punkte auf homologen Flächen dazu.

Abschließend kann gesagt werden, dass es ein gutes Ergebnis geworden ist, da ein visuell ansprechendes 3D-Modell entstanden ist. Die 3D-Punktgenauigkeit ist zum Großteil eingehalten worden, könnte aber durch günstigere Aufnahmeconfigurationen optimiert werden.

## 5.2 Ausblick

Da es möglich ist, aus den Bildern einer Handykamera ein 3D-Modell zu erstellen, könnte untersucht werden, inwiefern sich die neuen Handymodelle hinsichtlich eines Referenzmodells eignen.

Da die Auswertung mit der Software PhotoScan durchgeführt worden ist, wäre es sicherlich interessant zu erfahren, ob sich auch eine andere Software für die Modellerstellung eignet, um diese mit den Ergebnissen dieser Arbeit zu vergleichen. Zu nennen wären hier Open Source Programme wie Visual sfm, Bundler oder Auto Cad 123D. Angesichts der rasanten technologischen Entwicklung ist davon auszugehen, dass sich Handykameras in Zukunft immer mehr für die 3D-Objektrekonstruktion eignen werden und evtl. das herkömmliche Equipment ersetzen könnten. Es ist davon auszugehen, dass nicht nur die Qualität und Stabilität der Bilder besser wird, sondern auch die Rechenleistung der Handys. Ein zusätzlicher nicht zu unterschätzender Vorteil ist, dass das Handy in die Hosentasche passt und generell immer mitgeführt wird. Auf Grund dieser Tatsachen könnte die Zukunft der Nahbereichsphotogrammetrie das Handy mit Kamera und integrierter 3D-Objektrekonstruktionsanwendung werden.

## Quellenangaben

- [Agisoft, 2014] , Agisoft LLC, *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.0*, 2014
- [Albertz, 2009] Albertz, J.; Wiggenhagen, M., *Taschenbuch zur Photogrammetrie und Fernerkundung*, Wichmann, 2009
- [Besl, 1992] , Besl, P.; McKay, N. *A Method for Registration of 3-D Shapes*, Trans. PAMI, Vol.14, No.2, 1992.
- [DGM, o. J.] , DGM; AB; RM, *Cloud Compare - User's Manual for version 2.1*
- [Lowe, 1999] Lowe, D. G., *Object recognition from local scale-invariant features*, International Conference on Computer Vision, Korfu, Griechenland, 1999
- [Luhmann, 2010] Luhmann, T., *Nahbereichsphotogrammetrie.*, Wichmann, 2010.
- [MediaNord, o. J.] , MediaNord, *Panasonic Lumix DMC-TZ5 Datenblatt*, [http://www.digitalkamera.de/Kamera/Panasonic/Lumix\\_DMC-TZ5.aspx](http://www.digitalkamera.de/Kamera/Panasonic/Lumix_DMC-TZ5.aspx), letzter Zugriff: 12.12.2014
- [Meier, 2011] Meier, S.; Borowski, A., *Geometrie stochastischer Signale.*, Walter de Gruyter, 2011
- [Sony, o. J.] , Sony, *Product Brief - IMX179* [http://www.sony.net/Products/SC-HP/IS/sensor1/img/products/ProductBrief\\_IMX179\\_20140910.pdf](http://www.sony.net/Products/SC-HP/IS/sensor1/img/products/ProductBrief_IMX179_20140910.pdf), letzter Zugriff: 10.12.2014
- [Sony Mobile Communications, 2011] , Sony Mobile Communications, *Xperia™ neo - Technische Daten*, <http://www.sonymobile.com/de/products/phones/xperia-neo/specifications/>, 2011, letzter Zugriff: 10.12.2014
- [Statista, 2014] , Statista, *Anzahl der Smartphone-Nutzer in Deutschland in den Jahren 2009 bis 2014*, <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/198959/umfrage/anzahl-der-smartphonenuutzer-in-deutschland-seit-2010/>, 2014, letzter Zugriff: 17.12.2014

## Anhang

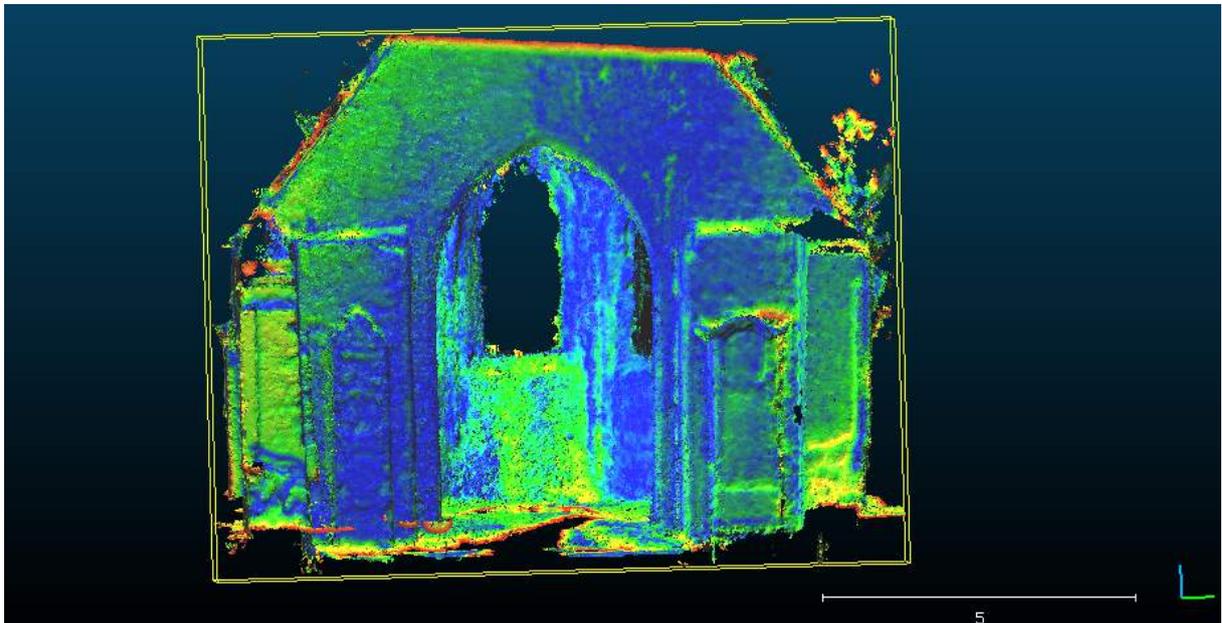


Abbildung A.1: Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von vorne

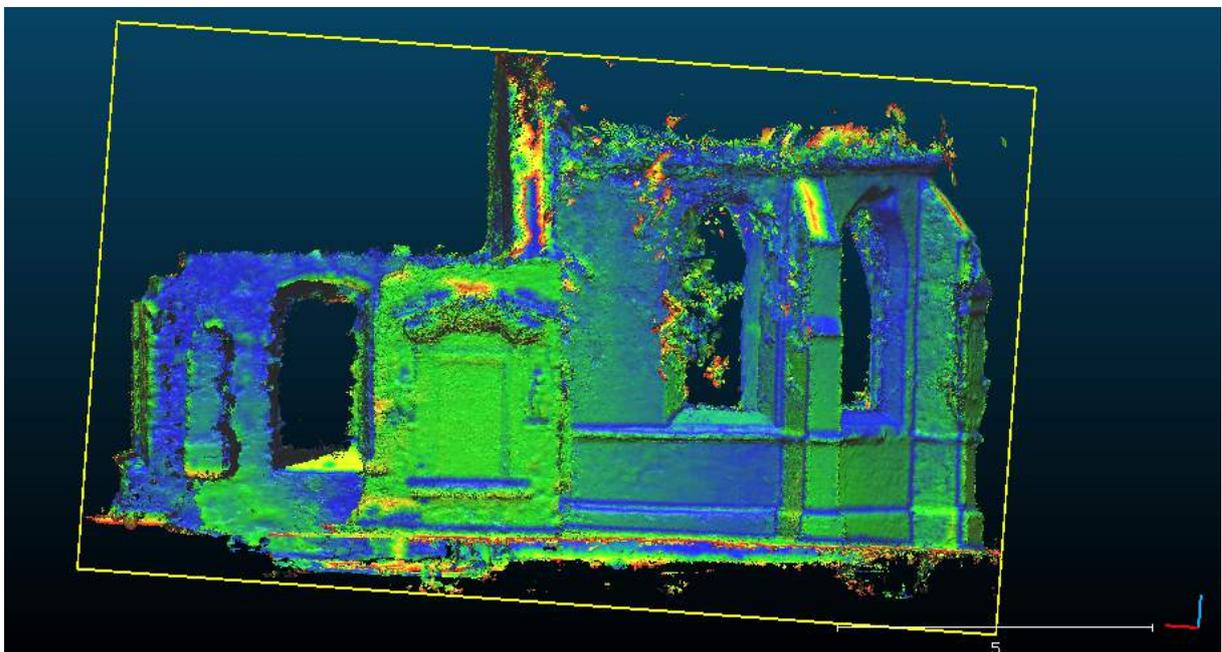


Abbildung A.2: Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von rechts

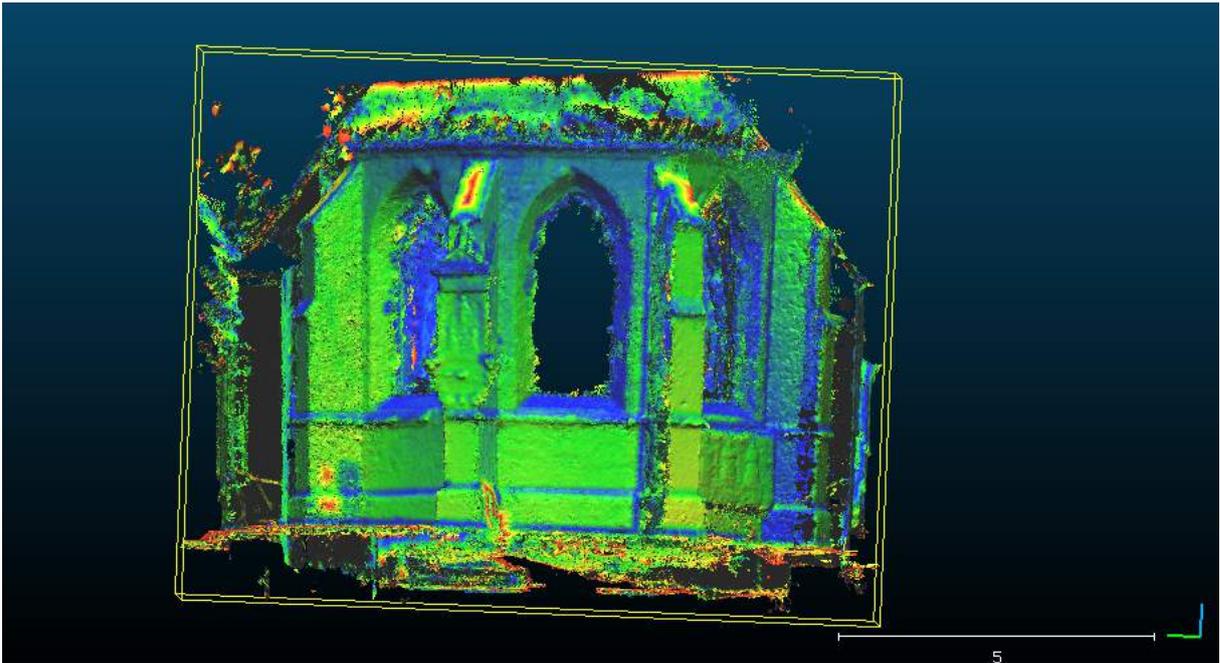


Abbildung A.3: Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von hinten

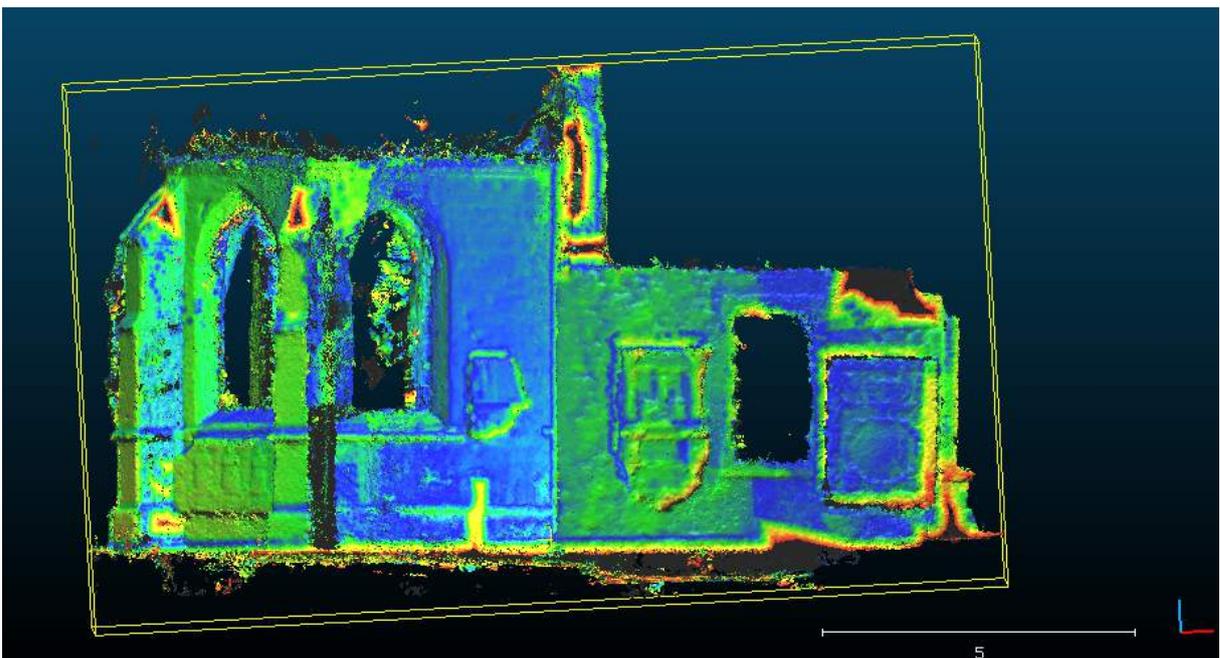


Abbildung A.4: Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von links

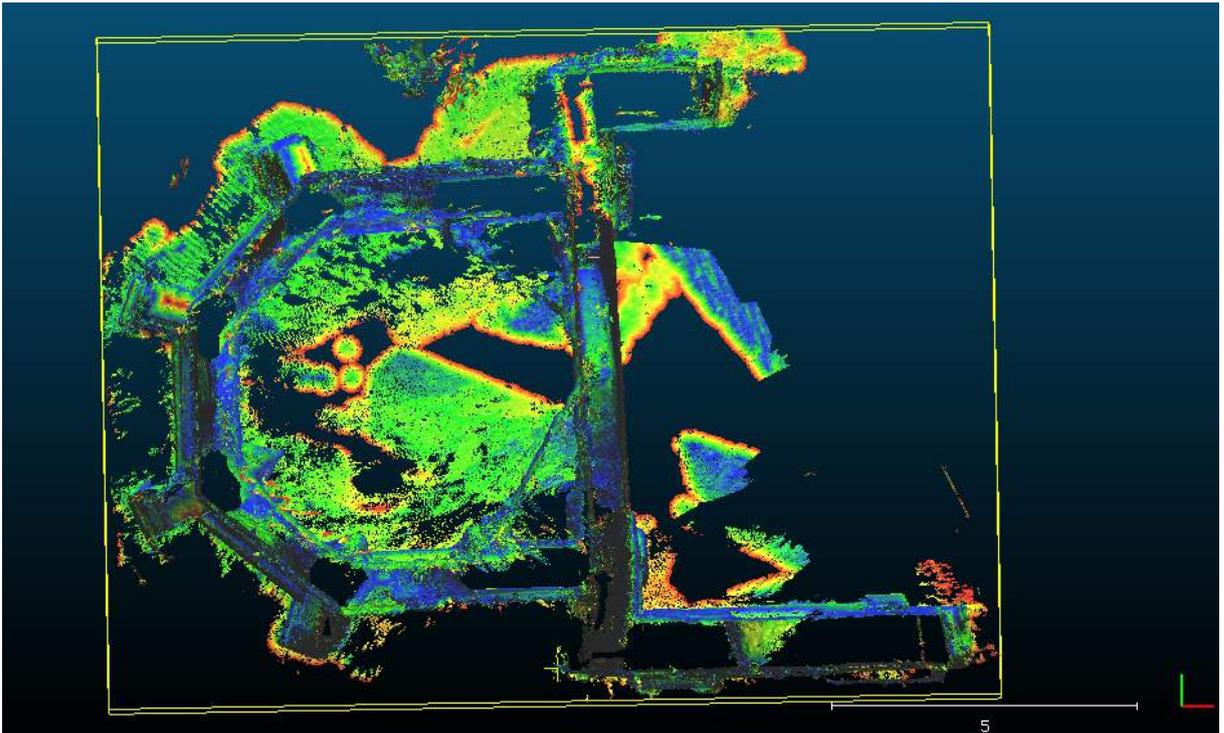


Abbildung A.5: Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von oben

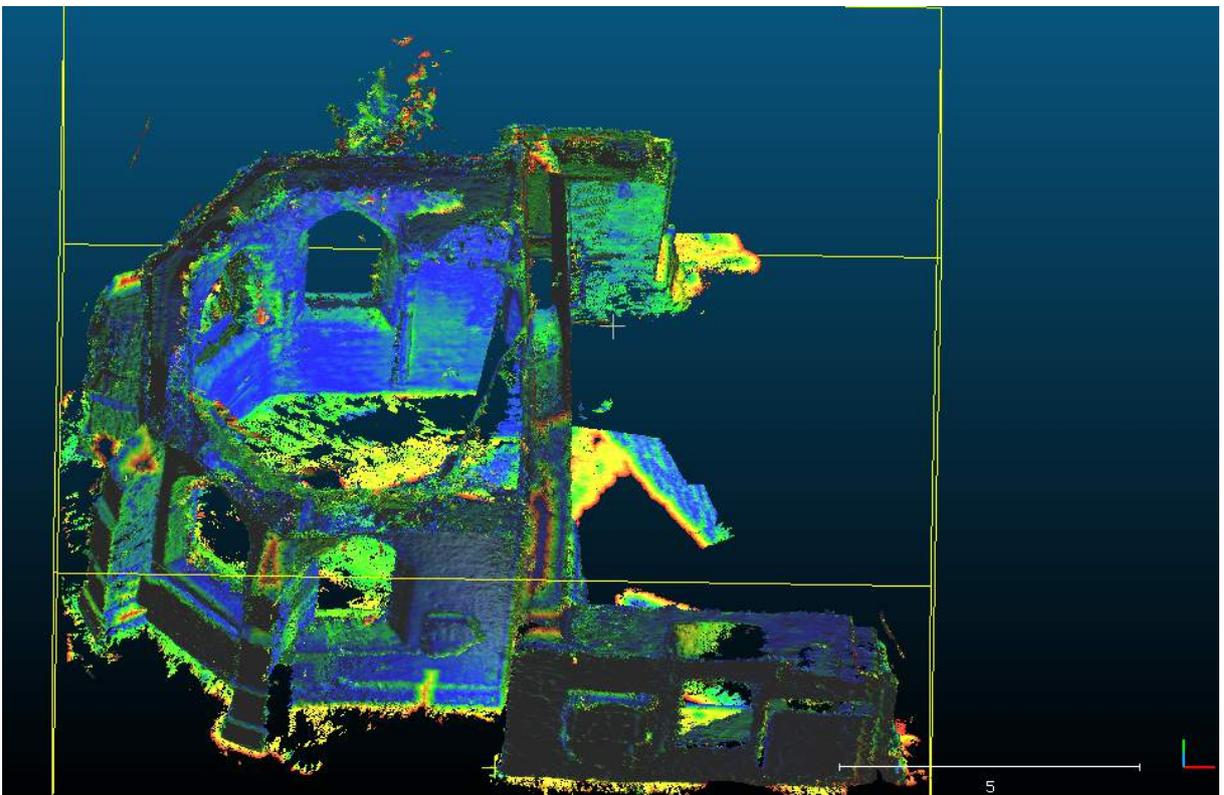


Abbildung A.6: Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von oben links

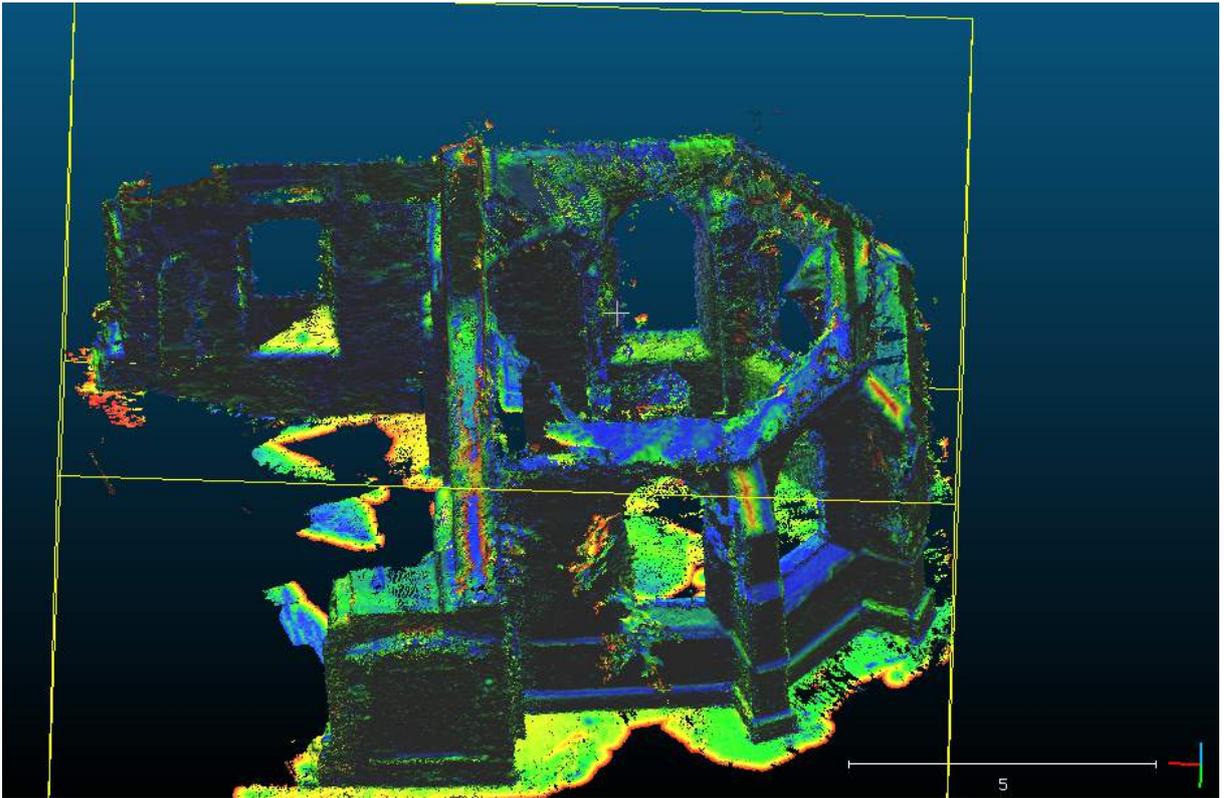


Abbildung A.7: Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von oben rechts

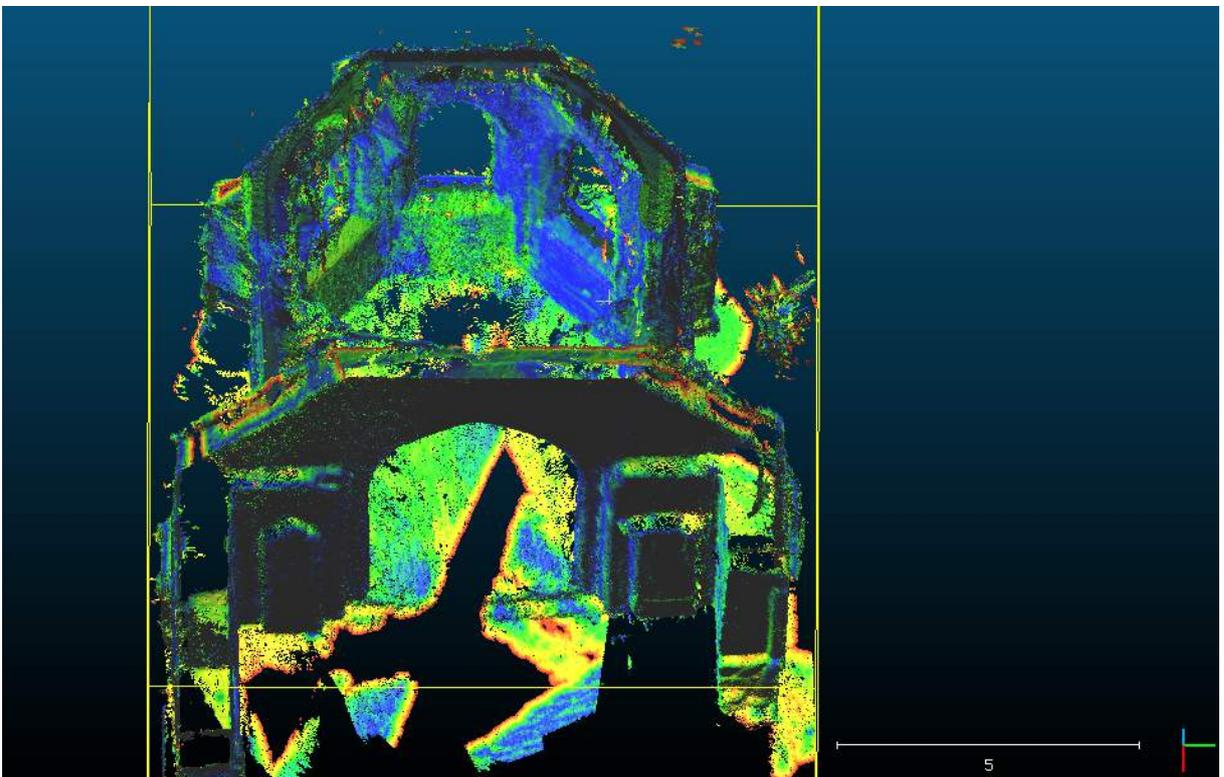


Abbildung A.8: Vergleich der beiden Punktwolken, Ansicht von oben vorne