

Universität Stuttgart

bachelorarbeit am ifp

Jakob Schmidt

Photogrammetrische Rekonstruktion
historischer Krippenfiguren



Betreuer: Dr.-Ing. Michael Cramer

Prüfer: apl. Prof. Dr.-Ing. Norbert Haala

Inhaltsverzeichnis

Eigenständigkeitserklärung	IV
1. Einleitung.....	1
2. Grundlagen der Nahbereichs-Photogrammetrie	3
2.1. Allgemeine Vorgehensweise in PhotoScan	3
2.1.1. Merkmalsextraktion und Merkmalszuordnung.....	4
2.1.2. Bündelblockausgleichung.....	5
2.2. Funktionsweise des Streifenprojektors	8
3. Aufnahmekonzeption	10
3.1. Begriffserklärung	10
3.2. Ablauf der Datenauswertung	11
3.3. Fotografische Erfassung.....	12
3.3.1. Erster Bildverband mit bewegter Kamera.....	12
3.4. Zweiter Bildverband mit stationärer Kamera	12
3.4.1. Aufnahme der Figur mit einem Streifenprojektor	16
4. Verwendete Kameras, Hard- und Software	17
4.1. Kamerasysteme	17
4.2. Verwendete Software.....	18
4.2.1. PhotoScan.....	18
4.2.2. ReCap 360.....	19
4.3. Verwendete Hardware	20
5. Visuelle Auswertung und Beurteilung der Daten.....	22
5.1. Visuelle Beurteilung der mit PhotoScan rekonstruierten Punktwolken des Kopfes....	23
5.1.1. Vergleich bewegte und stationäre Kamera.....	23
5.1.2. Unterschiedliche Kameras.....	24
5.1.3. Aufnahmekonfigurationen mit der Nikon D800E stationär	25

5.1.4.	Rekonstruktion der Punktwolken aus einzelnen Ringen	26
5.2.	Visuelle Beurteilung der mit ReCap 360 rekonstruierten Punktwolken	29
5.2.1.	Betrachtung der Streifenprojektoraufnahmen	31
5.3.	Visuelle Beurteilung der Hände	32
5.3.1.	Mit PhotoScan rekonstruierte dichte Punktwolken.....	33
5.3.2.	Mit ReCap 360 rekonstruierte dichte Punktwolken.....	34
5.4.	Betrachtung des Bildhintergrunds.....	35
5.5.	Texturrekonstruktion.....	36
5.6.	Wahl der Referenzpunktwolken	37
6.	Quantitativer Vergleich der Punktwolken.....	39
6.1.	Größe der Punktwolken und Anzahl der Verknüpfungspunkte	39
6.1.1.	Anzahl der Verknüpfungspunkte.....	40
6.1.2.	Größe der dichten Punktwolken	41
6.2.	Verwendung der Streifenprojektoraufnahme als Referenzpunktwolke	42
6.3.	Vergleich der dichten Punktwolken mit gewählten Referenzpunktwolken.....	43
6.3.1.	Distanzen zu den Referenzpunktwolken bei mittlerer Berechnungsqualität	47
6.3.2.	Distanzen mit bewegter Kamera zu den Referenzpunktwolken.....	48
6.3.3.	Distanzen zu Referenzpunktwolken mit hoher Berechnungsqualität	49
6.3.4.	Vergleich mit den Streifenprojektoraufnahmen	50
6.4.	Quantitative Ergebnisse der Rekonstruktionen mit PhotoScan und ReCap 360	52
7.	3D-Druck der photogrammetrischen Rekonstruktion	53
7.1.	Voraussetzungen an die vermaschte Punktwolke.....	53
7.2.	Materialien und Druckverfahren	55
7.2.1.	Selektives Laser Sintern	55
7.2.2.	Pulverklebeverfahren	56
7.2.3.	Düsenmelz-Verfahren	57

7.2.4. Photopolymer-Verfahren	57
7.2.5. Metallgussverfahren	58
7.3. Beurteilung der Druckgenauigkeit und der Materialeigenschaften.....	58
7.4. Webservice und Druckkosten.....	60
7.5. Zusammenfassung 3D-Druck.....	63
8. Fazit	65
Literaturverzeichnis.....	67
Abbildungsverzeichnis.....	70
Tabellenverzeichnis	73
Anhang.....	74

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig verfasst habe.

Ich versichere, dass ich keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommenen Aussagen als solche gekennzeichnet habe, und dass die eingereichte Arbeit weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens gewesen ist. Des Weiteren versichere ich, dass das elektronische Exemplar mit den anderen Exemplaren übereinstimmt.

Jakob Schmidt

1. Einleitung

Die Photogrammetrie wird heutzutage zur Vermessung und dreidimensionalen Erfassung von Objekten aller Art verwendet.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der 3D-Rekonstruktion von historischen Krippenfiguren. Diese Krippenfiguren besitzen fein geschnitzte Köpfe, Hände und Füße aus Holz. Der Rest der Figuren ist nur grob gearbeitet, wird jedoch von teils prächtigen Gewändern bedeckt.

Da jede dieser Krippenfiguren ein handgefertigtes Einzelstück ist, soll geklärt werden, mit welchem Aufwand und in welcher Qualität diese mittels Photogrammetrie als 3D-Modell erfasst werden können. Die gesammelten Daten können anschließend zum Beispiel digital archiviert werden. Auch eine Replikation dieser Krippenfiguren mittels 3D-Druck ist denkbar.

Die hier verwendete Krippe wurde vom Künstler Walter Ohlhäuser geschaffen. Seine Krippen stehen an verschiedenen Standorten in ganz Baden-Württemberg. Die Figuren entstanden zwischen 1945 und 1974.

Für diese Arbeit wurden nur Figuren einer einzigen Krippe verwendet. Diese befindet sich im Besitz der Katholischen Kirchengemeinde Heilig Geist in Stuttgart-Ost. Hier wurde die Krippe im Zweiten Weltkrieg in der Nacht vom 19. zum 20. Oktober 1944 bei einem Bombenangriff zusammen mit der Kirche zerstört. Nach dem Neubau der Kirche im Jahr 1947 wurde beim Bildhauer Walter Ohlhäuser eine neue Krippe in Auftrag gegeben. Dieser fertigte 20 Figuren mit einer Größe von bis zu 50 cm. Außerdem konzipierte der Künstler auch den Stall der Krippe. Dieser wurde zum Großteil von zwei Gemeindemitgliedern gefertigt. Er ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Durch den relativ hohen Zeitaufwand, den das Fotografieren der Krippenfiguren in unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen darstellt, richtet diese Arbeit ihren Fokus insbesondere auf die Figur des Joseph. Abbildung 1 zeigt einen Teil der Krippenfiguren mit der Figur des Josef in der Mitte in gelb-grünen Gewand.

Die Standorte der Krippen sind großräumig verteilt. Daher soll geklärt werden, ob die fotografische Erfassung der Figuren auch von Laien in ausreichender Qualität durchgeführt werden kann. Zum Beispiel könnten die jeweiligen Betreuer der Krippen diese Arbeit erledigen. Anschließend können die Bilder zentral gesammelt und prozessiert werden. In diesem Zusammenhang soll geklärt werden, welche technischen Voraussetzungen für eine sinnvolle Rekonstruktion der Krippenfiguren notwendig sind, beziehungsweise welche Ausrüstung für die

Fotografie der Figur benötigt wird. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird eine Arbeitsanweisung erstellt, welche die fotografische Erfassung der Figuren erläutert. Diese Anweisung findet sich im Anhang 4.

Zudem soll die Möglichkeit eines 3D-Drucks der erfassten Daten in Hinblick auf technische Machbarkeit, Kosten und Originaltreue geprüft werden.



Abbildung 1: Krippenfiguren der Gemeinde Heilig Geist (Quelle: Privat Michael Cramer)

Diese Arbeit beschäftigt sich in den ersten Kapiteln mit der Erfassung von Bildern der Krippenfiguren und einer photogrammetrischen Rekonstruktion dieser.

Im Anschluss wird die Qualität der generierten dichten Punktwolken des Josefs geprüft. Dies geschieht mittels visueller Sichtung der vermaschten Punktwolken zur Einschätzung der Vollständigkeit und der Originaltreue. Da keine exakte Punktwolke der Figur zur Verfügung steht, wird mittels Distanzen zu gewählten Referenzpunktwolken ein quantitativer Vergleich der Punktwolken durchgeführt. Abschließend wird geprüft, ob die dichten Punktwolken als vermaschte Punktwolken druckbar sind. Dies geschieht nach einer Optimierung durch das Hochladen eines der besten 3D-Modelle auf einer Internetseite eines 3D-Druckdienstleisters, der die Druckbarkeit prüft. Zusätzlich werden hierfür die Angaben zu Druckmaterialien und Druckmethoden zweier 3D-Druckdienstleister betrachtet.

2. Grundlagen der Nahbereichs-Photogrammetrie

An dieser Stelle soll auf die mathematischen Grundlagen einer photogrammetrischen Rekonstruktion eingegangen werden. Dies wird speziell am Beispiel von Agisoft PhotoScan erläutert. Außerdem wird kurz auf die Funktionsweise eines Streifenprojektors eingegangen.

2.1. Allgemeine Vorgehensweise in PhotoScan

Die Algorithmen, die in PhotoScan und Recap 360 verwendet werden, sind nicht bekannt.

Es existiert ein Forenbeitrag des Agisoft Mitarbeiters Dmitry Semyonov vom 03.05.2011 im Forum von Agisoft (Semyonov, 2011), in dem angesprochen wird, wie der Verarbeitungsprozess der Eingabebilder abläuft.

Da sich die dichte Rekonstruktion der Oberfläche seit diesem Forenbeitrag geändert hat, wird dieser Schritt anhand eines weiteren Beitrags des Agisoft Mitarbeiters Alexey Pasumansky vom 02.07.2012 (Pasumansky, 2012) und des Änderungsprotokolls von PhotoScan, unter Version 0.8.2 build 958 erläutert (Agisoft, 2015), angepasst.

Dieser soll hier sinngemäß wiedergegeben werden:

1. *Merkmalszuordnung auf allen Fotos*

PhotoScan sucht nach Punkten/Merkmalen auf den Fotos, die unter variierenden Betrachtungswinkeln und Beleuchtungen stabil sind. Für jeden Punkt wird ein Deskriptor erzeugt, der auf der lokalen Nachbarschaft basiert. Diese werden später verwendet, um korrespondierende Punkte auf mehreren Fotos zu finden. Dieses Verfahren ist der Herangehensweise nach SIFT sehr ähnlich, verwendet jedoch andere Algorithmen, die eine höhere Ausrichtungsqualität liefern.

2. *Bestimmung der Parameter der äußeren und inneren Orientierung der Kameras*

PhotoScan benutzt einen rechenintensiven Algorithmus, um die Näherungswerte für Kamerapositionen zu erhalten. Diese werden anschließend in einem Bündelausgleichungs-Algorithmus verwendet.

3. *Dichte Oberflächenrekonstruktion*

Dieser Schritt wird mit dichter Stereo-Rekonstruktion durchgeführt.

4. *Texturierung*

PhotoScan parametrisiert die Oberfläche, die nach Möglichkeit in kleinere Teilstücke geschnitten wird. Anschließend wird aus einem Verschnitt der Fotos ein Texturatlas generiert.

2.1.1. Merkmalsextraktion und Merkmalszuordnung

Es soll erläutert werden, wie die Rekonstruktion der Krippenfiguren grundsätzlich funktioniert. Zuerst werden auf den Fotos Verknüpfungspunkte gesucht. Hierfür müssen auf den Bildern identische Punkte gefunden werden.

In der Regel werden die Bilder zuerst vorverarbeitet. Zum Beispiel wird der Kontrast der einzelnen Bilder angepasst. Außerdem werden die Bilder geglättet und eine Rauschunterdrückung durchgeführt.

Der erste Schritt, um Verknüpfungspunkte zu finden, ist die Merkmalsextraktion. Es werden Bildmerkmale auf jedem einzelnen Bild gesucht, wie zum Beispiel Kanten oder Punktmuster. Hierfür werden Kanten- und Interest-Operatoren angewandt. Anschließend wird versucht diese Merkmale in der merkmalsbasierten Zuordnung auf den Bildern zu identifizieren.

Mit verschiedenen flächenbasierten Zuordnungsverfahren wird die Zuordnung verfeinert. Hier kommen zum Beispiel Korrelations- und Kleinste-Quadrate-Lösungen zum Einsatz. Die verschiedenen merkmalsgestützten Zuordnungsverfahren beschreibt Luhmann in "Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen" Kapitel 5.5.2 (Luhmann, 2000, S. 419).

Ein Verfahren, das häufig in Softwarelösungen zur Beschreibung von Bildmerkmalen Anwendung findet, ist SIFT (Scale invariant feature transform). Dieses ähnelt den in PhotoScan genutzten Algorithmen.

Ein SIFT-Merkmal wird bestimmt, indem in einem 16 x 16 Pixel großen Feld, um ein Merkmal herum, der Gradient mit Richtung und Betrag berechnet wird. Auf Basis der Gauß'schen Pyramide wird die Gewichtung von innen nach außen reduziert. Anschließend wird ein Deskriptor generiert, indem dieses Feld in vier, jeweils 4 x 4 Pixel große, Unterregionen geteilt wird. Dieser Deskriptor wird aus dem Histogramm der Orientierung der gewichteten Gradienten gebildet.

Die SIFT-Merkmale können über die euklidische Distanz zwischen den Merkmalsvektoren einander zugeordnet werden.

Da im oben genannten Forenbeitrag von Merkmalen gesprochen wird, die unter variierenden Blickwinkeln stabil sind, kann von einem Merkmal ausgegangen werden, das ASIFT ähnelt. Bei ASIFT (Affine scale invariant feature transform) wird ein Deskriptor gebildet, der das jeweilige Merkmal unter unterschiedlichen Perspektiven beschreibt.

Für weiterführende Informationen zu SIFT-Merkmalen wird hier auf die Vorlesung "Automatische Punktübertragung und relative Orientierung" des Masters Geodäsie und Geoinformatik der Universität Stuttgart, Modul Computer Vision (Haala, Automatische Punktübertragung und relative Orientierung, 2014) und "Computer Vision: Algorithms and Applications" Kapitel 4.1 (Szeliski, 2010, S. 207), verwiesen.

2.1.2. Bündelblockausgleichung

Die Näherungswerte für die Bündelblockausgleichung werden in der Regel mit Hilfe des Structure-from-Motion Algorithmus bestimmt. Bei diesem wird zuerst die Analyse der SIFT-Punkte verwendet. Mit Hilfe der SIFT-Merkmale lassen sich die einzelnen Bilder verknüpfen. Aus einem Stereobildpaar lässt sich dann durch Bestimmung der Fundamental- bzw. Essentialmatrix die Geometrie der Szene definieren. Anschließend wird die Position weiterer Standpunkte aus den so bekannten Punkten berechnet. Zusätzlich werden mit jedem neuen Aufnahmestandpunkt alle Punktkoordinaten, die von diesem zu sehen sind, neu berechnet. Dadurch können die bereits bekannten Punkte verbessert werden. Dies geschieht so oft, bis alle Aufnahmestandpunkte bekannt sind und entsprechend die berechneten Punkte auf dem Objekt so weit möglich verbessert sind.

Für die Berechnung der Parameter der inneren und äußeren Orientierung und die Position der Bilder wird in PhotoScan die Bündeltriangulation verwendet. Mit ihrer Hilfe können gleichzeitig beliebig viele Bilder im Raum rechnerisch eingepasst werden. Hierfür werden die photogrammetrisch gemessenen Bildpunkte verwendet. Innerhalb des Gesamtmodells werden die einzelnen Bilder unter Zuhilfenahme identischer Punkte verknüpft.

Die Bündeltriangulation hat zur Bedingung, dass sich alle korrespondierenden Bildstrahlen genau im jeweiligen Objektpunkt schneiden. Sie stellt eine verallgemeinerte Form des

räumlichen Rückwärtsschnitts dar, bei der Unbekannte für mehrere Bilder und die Objektpunkte hinzukommen.

Sowohl die Objektkoordinaten, als auch Parameter der inneren und äußeren Orientierung der Bilder können mit Hilfe eines überbestimmten Ausgleichungsverfahrens bestimmt werden.

Die Bündeltriangulation ist sehr vielseitig in Bezug auf die unterschiedlichsten Problemstellungen der Nahbereichsphotogrammetrie. Falls vorhanden, können ebenfalls zusätzliche Informationen benutzt werden wie zum Beispiel bekannte Punkte oder Strecken. Mit Hilfe dieser können zum Beispiel der Maßstab und die Lage des Objekts im jeweiligen Objektkoordinatensystem bestimmt werden. In der Bündeltriangulation werden die automatisch bestimmten Bildkoordinaten als Eingangsparameter genutzt. Das funktionale Modell der Ausgleichung muss linearisiert werden. Hierfür werden Näherungswerte der Unbekannten benötigt. Diese werden mit iterativen Berechnungsverfahren bestimmt.

Die spärliche Punktwolke ist das Ergebnis der Bündelausgleichung. Sie besteht aus den 3D-Koordinaten der Objektpunkte, welche aus den automatisch bestimmten Bildkoordinaten errechnet wurden. Das wichtigste Ergebnis der Bündeltriangulation sind die Parameter für die äußere Orientierung aller Bilder. Diese werden in der weiteren Auswertung für die Generierung der dichten Punktwolke mithilfe des räumlichen Vorwärtsschnitts benötigt. Die Parameter der inneren Orientierung werden zur Kalibrierung der Fotokameras innerhalb der Ausgleichung ermittelt. Die Kollinearitätsgleichung ist die Basis der Bündelausgleichung. Mit ihr können die beobachteten Messgrößen als Funktion der unbekannt Parameter ausgedrückt werden. Sie dienen nach der Linearisierung nach den Näherungswerten für die Ausgleichung nach kleinsten Quadraten als Verbesserungsgleichungen. Die Bestimmung der Werte für die innere und äußere Orientierung innerhalb der Bündeltriangulation wird als Selbstkalibrierung der Kameras bezeichnet.

Kollinearitätsgleichung für jeden Punkt i in jedem Bild j :

$$x_{ij} + v_{x_{ij}} = -c_j \cdot \frac{a_{11j} \cdot (X_i - X_{0j}) + a_{21j} \cdot (Y_i - Y_{0j}) + a_{31j} \cdot (Z_i - Z_{0j})}{a_{13j} \cdot (X_i - X_{0j}) + a_{23j} \cdot (Y_i - Y_{0j}) + a_{33j} \cdot (Z_i - Z_{0j})}$$

$$y_{ij} + v_{y_{ij}} = -c_j \cdot \frac{a_{12j} \cdot (X_i - X_{0j}) + a_{22j} \cdot (Y_i - Y_{0j}) + a_{32j} \cdot (Z_i - Z_{0j})}{a_{13j} \cdot (X_i - X_{0j}) + a_{23j} \cdot (Y_i - Y_{0j}) + a_{33j} \cdot (Z_i - Z_{0j})}$$

mit

$\mathbf{X}(X_i, Y_i, Z_i)$ Geländekoordinaten

$\mathbf{x}(x_{ij} - x_{0j}, y_{ij} - y_{0j})$ um Bildhauptpunkt $H'_j(x_{0j}, y_{0j})$ reduzierte Bildkoordinaten

$\mathbf{X}_0(X_{0j}, Y_{0j}, Z_{0j})$ Projektionszentrum

c_j Kammerkonstante

$R(a_{11}, \dots, a_{33}) = R_3(\kappa)R_2(\phi)R_1(\omega)$ Drehmatrix

Linearisierte Verbesserungsgleichungen:

$$x + v_x = f(\omega, \phi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0, X_i, Y_i, Z_i)$$

$$x_{ij} + v_{x_{ij}} = f_x^0 + \left(\frac{\partial f}{\partial \omega}\right)^0 \cdot d\omega_j + \left(\frac{\partial f}{\partial \phi}\right)^0 \cdot d\phi_j + \left(\frac{\partial f}{\partial \kappa}\right)^0 \cdot d\kappa_j + \left(\frac{\partial f}{\partial X_0}\right)^0 dX_{0j} + \left(\frac{\partial f}{\partial Y_0}\right)^0 dY_{0j}$$

$$+ \left(\frac{\partial f}{\partial Z_0}\right)^0 \cdot dZ_0^j + \left(\frac{\partial f}{\partial X}\right)^0 dX_i + \left(\frac{\partial f}{\partial Y}\right)^0 \cdot dY_i + \left(\frac{\partial f}{\partial Z}\right)^0 dZ_i$$

$$y_{ij} + v_{y_{ij}} = f_y^0 + \left(\frac{\partial f}{\partial \omega}\right)^0 \cdot d\omega_j + \dots$$

Zur Berechnung der dichten Punktwolke werden in einem weiteren Schritt ausgehend von der zuvor bestimmten äußeren Orientierung weitere identische Punkte auf den Bildern gesucht. Die Koordinaten dieser Punkte können anschließend mit Hilfe eines Vorwärtsschnitts berechnet werden.

Abbildung 2 zeigt das Grundprinzip der Berechnung des Punktes P im Stereofall bei bekannter innerer und äußerer Orientierung und somit auch bekannter Basis B.

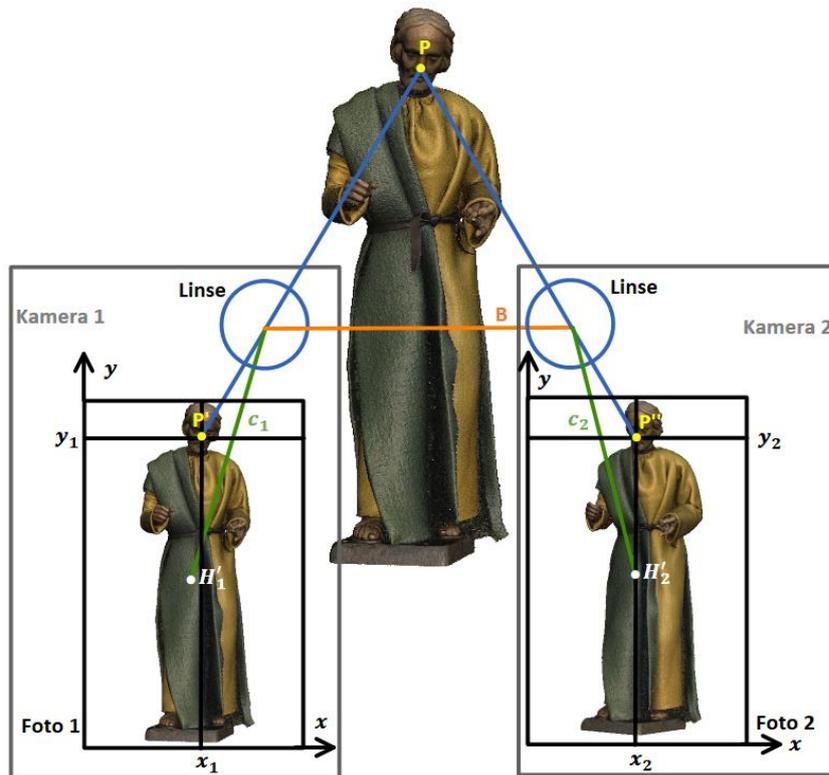


Abbildung 2: Punktberechnung im Stereofall bei bekannter äußerer und innerer Orientierung

2.2. Funktionsweise des Streifenprojektors

Der Streifenprojektor wird zur Erfassung einer vermaschten Punktwolke verwendet, die als Vergleichsergebnis zu den photogrammetrisch erfassten Punktwolken dient. Die Erfassung mittels Streifenprojektor ist nicht Hauptbestandteil dieser Arbeit. Daher soll die Funktionsweise hier nur kurz erläutert werden.

Der verwendete Streifenprojektor arbeitet nach dem codierten Lichtschnittverfahren. Ein Projektor erzeugt eine bestimmte Anzahl n grau-codierter Streifenmuster. Quer zur Streifenrichtung entstehen somit 2^n unterschiedliche Projektionsrichtungen, die durch ein n -stelliges Code-Wort unterschieden werden können.

Eine CCD-Kamera erfasst das deformierte Streifenmuster auf dem Objekt. Die Bilder dieser Kamera werden binärisiert. Jeder Grauwert auf der Sensoroberfläche enthält somit die Projektionsrichtung x_p als Bitwert. Für die Erfassung werden sowohl vertikale als auch horizontale Streifenrichtungen benötigt. Das feinste Streifenmuster definiert die erfassbare Pixelgröße auf einem Messobjekt. Das Funktionsprinzip des codierten Lichtschnittverfahrens ist in Abbildung 3 veranschaulicht.

Die Orientierungsparameter der Kamera und des Projektors müssen bekannt sein, um die dreidimensionalen Objektkoordinaten ähnlich einer Stereobilderfassung zu berechnen.

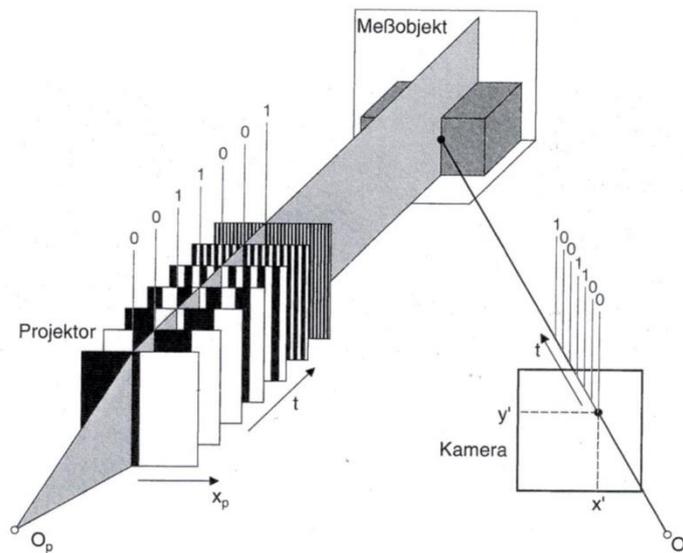


Abbildung 3: Codierte Lichtschnittverfahren (nach STAHS & WAHL 1990) (Quelle: Luhmann, 2000, S. 469)

3. Aufnahmekonzeption

Die Krippenfiguren werden photogrammetrisch erfasst. In diesem Kapitel werden die verwendeten Aufnahmekonfigurationen und die Auswertungsschritte erläutert. Außerdem wird auf die dreidimensionale Erfassung mittels Streifenprojektor eingegangen.

3.1. Begriffserklärung

In Zusammenhang mit der fotografischen Erfassung der Krippenfigur und der Auswertung der Punktwolken werden in dieser Arbeit verschiedene Begriffe benutzt:

Als "Ring" oder "Aufnahmering" wird eine Folge von Fotos bezeichnet, welche die Krippenfigur in einer Ebene kreisförmig umgibt. Die Distanz zwischen Kamera und Figur bleibt innerhalb des Rings so konstant wie möglich. Die Krippenfigur und die Kamera befinden sich während der Aufnahmen für einen Ring jeweils auf der gleichen Höhe. Der Ring, den die Bilder bilden, liegt parallel zum Boden und besteht aus einer regelmäßigen Abfolge von Fotos, welche die Figur von allen Seiten abbilden.

Die Bezeichnung "stationäre Kamera" oder "stationäre Aufnahme" wird verwendet, um die Erfassung der Figur zu beschreiben, bei der die Kamera während der Aufnahmen für einen Ring an der gleichen Stelle steht. Um die Figur aus allen Richtungen abzubilden, wird die Figur um die vertikale Achse gedreht. Für jeden Aufnahmering wird die Kamera mit Stativ umgestellt und steht in unterschiedlichen Abständen zur Figur und auf unterschiedlichen Höhen.

Der Begriff "bewegte Kamera" bezeichnet die Erfassungsvariante, bei der die Kamera für jedes einzelne Bild bewegt wird. Die Figur steht unbewegt während der gesamten Erfassung an einer Stelle. Innerhalb jedes Aufnahmerings befindet sich die Kamera auf der gleichen Höhe. Die Kamera wird für die Fotografien mit Stativ aufgestellt. Für einzelne Aufnahmeringe wird das Stativ jeweils auf einer anderen Höhe eingestellt und die Kamera neu ausgerichtet.

3.2. Ablauf der Datenauswertung

Die Krippenfiguren werden mittels Photogrammetrie und eines Streifenprojektor erfasst. In dieser Arbeit wird nur auf die Figur des Josef direkt eingegangen. Um die Genauigkeit der mit unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen erzeugten Punktwolken zu prüfen, ist es am zuverlässigsten, die Distanzen zu einem genau bekannten, digitalen, dreidimensionalen Modell der Figur zu berechnen und die Ergebnisse der einzelnen Punktwolken zu vergleichen. Für diese Bachelorarbeit stand kein solches Modell zur Verfügung. Die Aufnahmen mit dem Streifenprojektor sollten genauer als die photogrammetrisch erzeugten Punktwolken sein. Da diese Aussage nicht gesichert ist, muss sie zuerst geprüft werden. Daher werden verschiedene Punktwolken als Referenzpunktwolke bestimmt, die durch eine visuelle Prüfung auf Vollständigkeit und Originaltreue als qualitativ beste Ergebnisse gewertet werden können. Mit diesen Referenzpunktwolken werden alle photogrammetrisch und mit dem Streifenprojektor erfassten Punktwolken quantitativ mittels Distanzen in CloudCompare verglichen. Als Hauptkriterium wird die mittlere Distanz angesehen. Für diesen Vergleich wird nur der Kopf der Figur verwendet. Dieser wurde mit CloudCompare bei jeder Punktwolke abgeschnitten. Der Rest der Figur findet hier keine Verwendung. Denn die Kleidung besteht aus Stoff und bedeckt fast den gesamten Körper. Dieser Stoff ist nicht starr und könnte sich zwischen zwei Fotos bewegen. Diese Bewegung verschlechtert die Qualität der Rekonstruktion. Solche Einflüsse sollen vermieden werden.

Aus den Werten der mittleren Distanzen der Punktwolken zu den Referenzpunktwolken wird in Kombination mit den Ergebnissen der Prüfung der Vollständigkeit und Originaltreue die Genauigkeit der unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen eingeschätzt. Die mittleren Distanzen der Punktwolken aus den Streifenprojektoraufnahmen zu den Referenzpunktwolken sind das Hauptkriterium, um zu entscheiden, ob die Streifenprojektoraufnahme auch als Referenzpunktwolke gewertet werden kann. Bestätigt sich die hohe Qualität der Punktwolke aus der Streifenprojektoraufnahme, wird auch diese mit allen Punktwolken aus unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen verglichen.

Abschließend ist es möglich, mit einer Kombination aus Originaltreue, Vollständigkeit und quantitativer Genauigkeit die qualitativ beste Punktwolke zu bestimmen.

3.3. Fotografische Erfassung

Die fotografische Erfassung der Krippenfiguren soll möglichst genau, vollständig und idealerweise zeitsparend durchgeführt werden. Diese Vorgaben haben den Entscheidungsprozess über die Aufnahmeconfiguration maßgeblich bestimmt. Die gesamte Aufnahmeconfiguration wurde so gewählt, dass die Verwendung verschiedener Variationen der Konfiguration in der Auswertung möglich ist.

3.3.1. Erster Bildverband mit bewegter Kamera

Für den ersten Bildverband wurden daher mehrere horizontale Aufnahmeringe der Figur erzeugt, um eine vollständige Erfassung der Figur zu gewährleisten. Von einer Figur wurden mindestens zwei vollformatige Ringe mit Fotos in 5°-Schritten aufgenommen. Dadurch ist die Wahl von Bildern mit unterschiedlichen Winkelabständen in der Verarbeitung möglich. Die Bilder innerhalb dieser Ringe sind im Vergleich zu Bildern in anderen Ringen gekippt und bilden die Figur von schräg unten und schräg oben ab. Zusätzlich wurden einige Bilder von oben gemacht, um eine vollständige Erfassung und eine gute Verknüpfung der Bilder zu gewährleisten.

Um diese Aufnahmeconfiguration umzusetzen, wurde die Figur auf eine Unterlage gestellt, die möglichst viele einzigartige Merkmale bot. Diese sollten bei der Verarbeitung, neben markanten Merkmalen auf der Figur, als Verknüpfungspunkte dienen. Hierfür wurde eine Zeitung verwendet. Für eine spätere Skalierung wurde ein Meterstab im Rechteck um den Sockel der Figur auf die Zeitung gelegt. Um qualitativ möglichst hochwertige Fotos zu erhalten, wurde ein Stativ für die Aufnahmen benutzt.

3.4. Zweiter Bildverband mit stationärer Kamera

Beim ersten Bildverband stellte sich eine konsequente Einhaltung der Bildfrequenz als schwierig heraus. Die Aufnahmen waren zeitaufwändig, da für jedes Bild das Stativ bewegt und die Kamera neu fokussiert werden musste. Auch die Beleuchtung der Figur machte Probleme, da diese vor Ort in einem Konferenzraum fotografiert wurde. Hier musste mit den gegebenen Mitteln

der Deckenbeleuchtung und des Tageslichts einer Fensterfront gearbeitet werden. Zwei Fotolampen schafften nur bedingt Abhilfe, da eine indirekte, gleichmäßige Beleuchtung sich auch mit diesen als schwierig herausstellte. Eine direkte Beleuchtung sollte vermieden werden, da durch diese eine hohe Gefahr besteht, dass durch Reflexionen und Schattenwurf beziehungsweise über- oder unterbelichtete Bereiche auf der Figur, Bildinformationen verloren gehen. Das Gegenlicht der Fenster bereitete besonders bei den einfacheren Kameramodellen Probleme, da es eine gleichmäßige Belichtung nahezu unmöglich machte. Dementsprechend wurde das Tageslicht mit einem Vorhang abgeschwächt.

Um eine schnelle Aufnahmemethode zu testen, wurden auch ein Bildverband mit einer einfachen und günstigsten Kamera, frei Hand fotografiert.

Die oben genannten Probleme, die beim ersten Bildverband auftraten, führten dazu, dass die grundlegende Aufnahmekonfiguration noch einmal überdacht werden musste und warf die Frage auf, ob es nicht ein praktischeres Aufnahmeverfahren gibt. Die Vorgabe, dass auch Laien die Aufnahmen durchführen können sollten, schränkte die Wahl der Mittel jedoch stark ein.

Es kam die Überlegung auf, ob man nicht die Figur drehen könnte, statt die Kamera zu bewegen. Auf diese Weise ist es möglich, die Beleuchtung der Figur bei jedem Bild relativ konstant zu halten. Außerdem würde es eine Zeitersparnis geben, wenn die Kamera mit Stativ nicht bewegt werden muss. Des Weiteren könnte der Winkel zwischen den Bildern konstant eingehalten werden. Daher wurde die Idee geprüft, die Figur auf einen Drehteller zu stellen, den man definiert um bestimmte Winkel drehen kann. Da jedoch nicht davon auszugehen ist, dass ein motorisierter Drehteller mit Schrittmotor für die Aufnahmen zur Verfügung steht, wurde eine kugelgelagerte Käseplatte aus Holz in Betracht gezogen. Für den Fall, dass auf der Figur nicht genügend Verknüpfungspunkte gefunden werden können, ist es auf diese Weise möglich, Merkmale am Drehteller zu befestigen, die sich mit der Figur mitdrehen und sich somit relativ zur Figur nicht bewegen. Nach kurzen Tests stellte sich heraus, dass die Struktur des Holzes selbst sehr gute Ergebnisse für die Punktverknüpfung liefert. Also wurde an der Unterseite des Drehtellers eine selbstentworfene Skala mit Grad-Teilung für die Drehung um definierte Winkel befestigt. Zudem wurden vier Skalen mit Zentimeter-Teilungen auf der Platte befestigt, um die Figur später skalieren zu können.

Um die markanten Punkte auf dem Hintergrund zu minimieren, vor dem die Figur fotografiert wurde, wurde ein schwarzes Tuch hinter und unter der Figur ausgebreitet. Bei der Erfassung wurde ein Bild vom Aufnahmehintergrund zu jeder Kameraeinstellung aufgenommen, soweit

dies möglich war ohne die Figur zwischen den einzelnen Ringen zu bewegen. Dies ermöglicht eine automatische Maskierung bei der späteren Verarbeitung.

Für den zweiten Bildverband mit stationärer Kamera wurden von der Joseph Krippenfigur sechs Ringe aufgenommen. Innerhalb dieser Ringe wurde all 5° ein Bild gemacht. Zuerst wurde die Kamera auf die Figur ausgerichtet. Danach wurde die Figur weggenommen, um den Hintergrund mit derselben Einstellung wie die Figur aufzunehmen. Anschließend wurden zwei vollformatige Ringe der Figur aufgenommen. Zwischen diese wurden die Höhe der Kamera und die Distanz zur Figur verändert. Somit änderte sich auch der Winkel, unter dem die Figur fotografiert wurde. Die Kamera wird an jedem Standpunkt neu auf die Figur ausgerichtet. Zusätzlich wurde die Figur nach dem zweiten Ring wieder weggenommen, um erneut den Hintergrund zu fotografieren. Die weiteren vier aufgenommenen Ringe wurden möglichst großformatig gewählt. Hier wurden nur Teilbereiche der Figur wie der Oberkörper abgelichtet. Die Kamera wurde so nahe wie möglich an die Figur gebracht. Bei dem verwendeten 85 mm Objektiv waren das circa 80 cm Distanz, bei der die Figur noch scharf abgebildet werden kann. Diese Aufnahmen sollen dazu dienen, festzustellen, ob Nahaufnahmen einen positiven Einfluss auf die berechnete dichte Punktwolke haben. Abbildung 4 zeigt die gesamte Aufnahmekonfiguration.

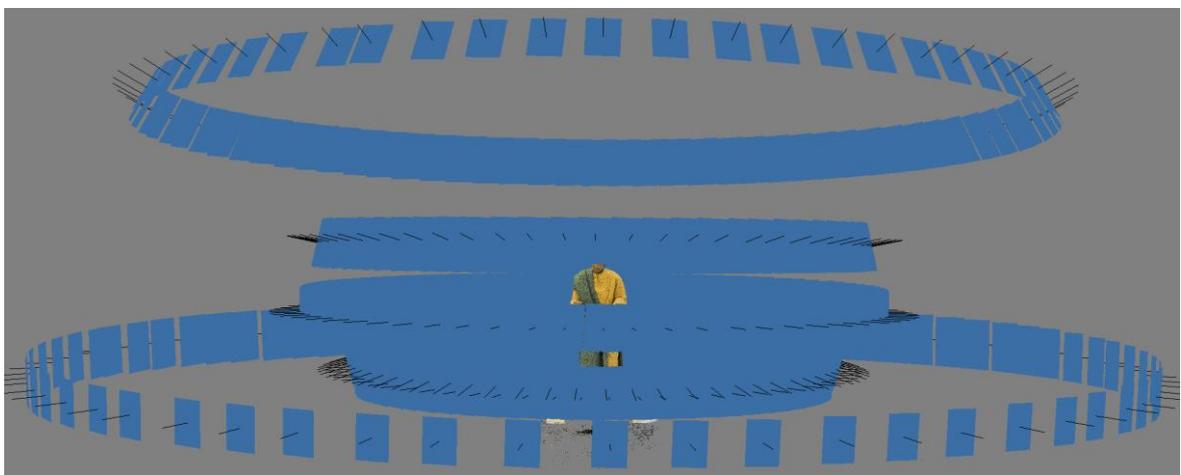


Abbildung 4: Kameraposition bei stationärer Kamera in PhotoScan

Um zu prüfen, ob diese Aufnahmeverfahren funktionieren, wurden im Photolabor des Photogrammetrischen Instituts der Universität Stuttgart Versuchsaufnahmen einer ähnlich großen, komplett aus Holz gefertigten, Figur gemacht. Nach erfolgreicher Auswertung der Daten wurden die Aufnahmen der Krippenfiguren vor Ort im Gemeindehaus der katholischen Gemeinde Heilig Geist in Stuttgart Ost durchgeführt. Abbildung 5 zeigt die Aufnahme der Figur des Josef vor schwarzem Hintergrund.



Abbildung 5: Aufnahme mit Drehteller und stationärer Kamera (Foto: Jakob Schmidt)

Der Zeitaufwand für eine fotografische Erfassung der Figur ist hauptsächlich von der gewünschten Aufnahmekonfiguration und der notwendigen Belichtungszeit abhängig. Fotografiert wurde mit einer Spiegelvorauslösung von 2 Sekunden. Diese Funktion der Kamera soll Auswirkungen der Schwingungen, die durch das Hochklappen des Spiegels verursacht werden, minimieren. Da bei den gegebenen Beleuchtungsverhältnissen ca. 4 bis 8 Sekunden für die Belichtung notwendig waren, benötigte man für ein Foto inklusive Weiterdrehen des Drehtellers ungefähr 15 Sekunden. Für jeden Aufnahmering mit 72 Bildern plus Foto des Aufnahmehintergrundes und Umstellen der Kamera für jeden Ring waren somit mindestens 20 Minuten notwendig. Mit den fotografierten sechs Ringen wurden für die gesamte Erfassung der Figur ca. 2 Stunden benötigt.

Die Auswertung der Punktwolken zeigt, was die Mindestzahl an Fotos in einem Bildverband für eine möglichst genaue und originalgetreue Rekonstruktion ist. Damit lässt sich dann die ungefähr benötigte Zeit für einer Figur näher bestimmen.

3.4.1. Aufnahme der Figur mit einem Streifenprojektor

Da eine Aussage über die Genauigkeit der über Photogrammetrie erhaltenen Daten nur bis zu einem gewissen Grad möglich ist, wurden zusätzlich Aufnahmen mit einem Streifenprojektor gemacht, der sich im Besitz des Photogrammetrischen Institutes befindet. Es war allerdings nicht sicher, wie gut der Streifenprojektor kalibriert ist. Somit konnten die Daten nicht direkt als genaue Referenzmessung benutzt werden und dienten als alternatives Aufnahmeverfahren, um einen zusätzlichen Vergleich zu den Photogrammetrie-Daten zu erhalten. Abbildung 6 zeigt den Messaufbau für die Erfassung der Figur mittels Streifenprojektor. Die Ausgabe der erfassten Oberfläche des Streifenprojektors erfolgt in Form von vermaschten Punktwolken.

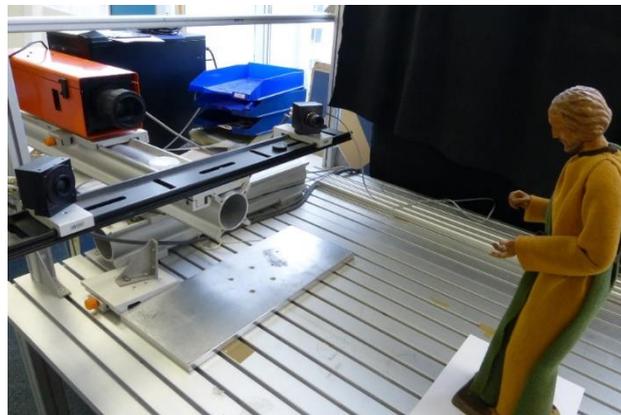


Abbildung 6: Streifenprojektoraufnahme (Foto: Jakob Schmidt)

4. Verwendete Kameras, Hard- und Software

Der Test verschiedener Aufnahmekonfigurationen beinhaltet auch unterschiedliche Kamerasysteme und zwei Auswertungssoftwares. Deren Eigenschaften, Einstellungsmöglichkeiten und Unterschiede werden im Folgenden erklärt.

4.1. Kamerasysteme

Für die Fotografien wurden in erster Linie drei Kamerasysteme verwendet. Eine Nikon D800E, Panasonic Lumix DMC-FZ150 und eine Panasonic Lumix DMC-FS16. Aufgrund der Annahme, dass die Aufnahmen der Krippenfiguren eventuell von Laien durchgeführt werden würden, waren die beiden Panasonic Kameras interessant für die Auswertung. Die Nikon D800E soll als Referenzkamera dienen und ermöglichen, festzustellen, wie zuverlässig die Aufnahmekonfigurationen mit professioneller Ausrüstung funktionieren und wie gut die Qualität der rekonstruierten dichten Punktwolken ist.

Die Nikon D800E ist eine Spiegelreflexkamera mit einem Kleinbild-Sensor. Die einzelnen Pixel des Sensors sind mit einem Pixelpitch von $4,9\ \mu\text{m}$, trotz 36,3 Megapixel relativ groß. Der Pixelpitch ist der Abstand zwischen den Pixelmitten. Deshalb ist der Sensor der D800E lichtempfindlicher als zum Beispiel die $1/2,3''$ Sensoren der einfacheren Kameras, die mit einem Pixelpitch von $1,4\ \mu\text{m}$ oder $1,5\ \mu\text{m}$ eine fast 11-mal kleinere Fläche pro Pixel besitzen. Die D800E liefert damit bei schlechteren Lichtbedingungen besser belichtete Bilder. Diese Kamera sollte mit deutlich besseren Bildern im Vergleich zu den Panasonic Kameras eine zuverlässige Rekonstruktion ermöglichen, da eine gleichmäßige Belichtung der Bilder für die Auswertung von Vorteil ist.

Die D800E und die DMC-FZ150 bieten umfangreiche manuelle Einstellungsmöglichkeiten. Bei der DMC-FS16 sind diese kaum vorhanden. So ist es nicht möglich, die Belichtungsdauer und die Blende einzustellen.

Die Nikkor-Objektive, die mit der D800E verwendet werden, haben Festbrennweiten. Das 85 mm Objektiv hat die beste Lichtstärke aller verwendeten Objektive. Die Optiken der Nikkor-Objektive sind hochwertiger als die Panasonic Zoomobjektive. Daher kann von einer besseren, verzerrungs- und verzeichnungsfreieren Abbildung ausgegangen werden.

Die technischen Daten der verwendeten Kameras und Objektivs finden sich in einer Gegenüberstellung in Tabelle 1.

Tabelle 1: Verwendete Kameras (Quelle: digitalkamera.de, a - c)

Kamera	Nikon D800E		Panasonic DMC-FZ150	Panasonic DMC-FS16
				
Sensor	CMOS		CMOS	CCD
	Kleinbild		1/2,3"	
	36 x 24 mm		6,2 x 4,6 mm	
	Cropfaktor 1,0		Cropfaktor 5,6	
	36,3 Megapixel		12,1 Megapixel	14,1 Megapixel
Objektiv	AF Nikkor	AF-S Nikkor	fest verbaut	
Brennweite (Kleinbildäquivalent)	20 mm	85 mm	25 bis 600 mm	28 bis 112 mm
Lichtstärke	F2,8	F1,8	F2,8 – F8	F3,1 – F5,6

4.2. Verwendete Software

Zur Berechnung der Punktwolken wurde hauptsächlich Agisoft PhotoScan verwendet. In einigen Fällen wurden zum Vergleich Modelle mit Autodesk ReCap 360 berechnet.

Der Vergleich und die Bearbeitung der Punktwolken erfolgten mit CloudCompare und MeshLab.

4.2.1. PhotoScan

Bei der Verwendung von PhotoScan stehen viele Einstellungsmöglichkeiten und Funktionen zur Verfügung, die das Ergebnis der Berechnung der Punktwolken verbessern. Die Berechnung kann von der Kameraausrichtung über die Rekonstruktion der dichten Punktwolke und der Generierung der vermaschten Modelle bis hin zur Erzeugung der Textur Schritt für Schritt erfolgen. Es sind verschiedene Qualitätseinstellungen in allen Berechnungsschritten möglich.

Es existieren verschiedene Funktionen, um den Hintergrund auf den Bildern auszumaskieren und diesen bei der Berechnung der Ausrichtung der Fotos nicht zu berücksichtigen. Außerdem ist es möglich, die Punktwolken jederzeit anhand eines mitfotografierten Maßstabs zu skalieren.

Die Berechnung erfolgt auf einem Desktop Computer. Dies kann jedoch zu Problemen führen, da die Berechnungen sehr leistungsintensiv sind und teilweise mehrere Tage in Anspruch nehmen.

Agisoft PhotoScan gibt es in zwei Versionen, eine Standard und eine Professional Edition. Beide Versionen sind kostenpflichtig. Zur reinen Berechnung der Punktwolken genügt die Standard Edition, hier ist jedoch keine Skalierung der Punktwolken über PhotoScan möglich. Diese wurde für die Berechnung sämtlicher Punktwolken verwendet. Anschließend wurden die Punktwolken mit der Professional Edition skaliert.

Die Ausrichtung der Fotos in PhotoScan wurde mit den Einstellungen aus Abbildung 7 durchgeführt. Die dichten Punktwolken wurden mit unterschiedlichen Qualitätsstufen ohne Tiefenfilterung berechnet. Die Einstellungen für die vermaschten Punktwolken sind ebenfalls in Abbildung 7 abzulesen.

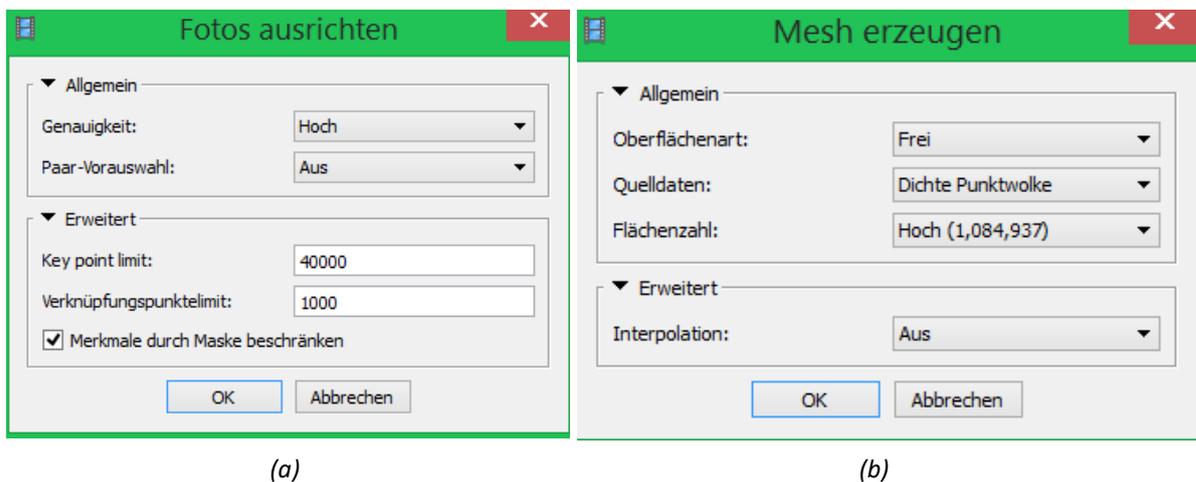


Abbildung 7: Einstellung PhotoScan: Fotoausrichtung (a) und Mesh-Generierung (b)

4.2.2. ReCap 360

Die Berechnung mit Autodesk ReCap 360 ist Cloud basiert. Das heißt, die benötigten Fotos müssen auf die Autodesk Server hochgeladen werden. Anschließend kann ausgewählt werden, mit welcher Qualitätsstufe das Modell berechnet wird und in welchen Formaten die Ausgabe erfolgen soll. Danach wird die Rekonstruktion auf den Servern von Autodesk durchgeführt. Nach der Fertigstellung kann eine vermaschte, texturierte Punktwolke heruntergeladen werden. Allerdings sind die Einstellungsmöglichkeiten sehr eingeschränkt und Autodesk gewährt dem Nutzer keine Möglichkeiten, einzelne Berechnungsschritte zu beeinflussen. Die hier angeführten Modelle wurden mit der Qualitätsstufe Ultra durchgeführt.

Es gibt eine frei verwendbare Version von ReCap 360. In dieser lassen sich jedoch keine Qualitätsstufen wählen. Manche Ausgabeformate stehen hier auch nicht zur Verfügung. Das größte Problem bei dieser Version ist jedoch, dass lediglich 5 GB Onlinespeicher zur Verfügung stehen. Das reicht im Regelfall bei JPEG-Bilddateien für den Bildverband, der für die Rekonstruktion von einer Krippenfigur benötigt wird. Für einen weiteren Verband müssen die Bilder im Cloudspeicher jedoch eventuell gelöscht werden, um neue Bilder hochzuladen. Es dauert je nach Internetleitung sehr lange, die Bilder hochzuladen. Dies schränkt bei Testrekonstruktionen mit unterschiedlichen Bildverbänden sehr ein. Außerdem wurden im Rahmen dieser Bachelorarbeit für einzelne Modelle bis zu 432 Bilder verwendet. Diese Anzahl von Bildern kann in ReCap 360 nicht vollständig genutzt werden.

Bei der verwendeten kostenpflichtigen Lizenz, die Autodesk Studenten als Dreijahreslizenz kostenlos zur Verfügung stellt, stehen 25 GB Cloudspeicher zur Verfügung und es sind alle Funktionen nutzbar. Es ist maximal möglich 250 Bilder für eine Berechnung zu verwenden. Daher ist es bereits aufgrund dieser Einschränkung nicht immer möglich die gleichen Rekonstruktionen mit ReCap 360 und PhotoScan durchzuführen.

Durch den eingeschränkten Einblick in einzelnen Schritte der Berechnung, sind die genaue Analyse des Verarbeitungsprozesses und das Aufdecken eventueller Probleme jedoch stark erschwert.

ReCap 360 generiert vermaschte Punktwolken als Ausgabe. Es ist für den Anwender folglich nicht so vielseitig wie PhotoScan. Denn in PhotoScan besteht der Zugriff auf die spärlichen Punktwolken, die dichten Punktwolken und auf die vermaschten Punktwolken mit und ohne Farbe oder mit Textur.

4.3. Verwendete Hardware

Die Berechnungen mit PhotoScan wurden auf einem Computer mit dem Prozessor Intel Core i7 2600k, der Grafikkarte NVidia GTX970 und 16 GB Arbeitsspeicher durchgeführt. Diese Konfiguration ist leistungsmäßig nicht optimal für die Verarbeitung großer Bildmengen. Insbesondere der Arbeitsspeicher ist etwas knapp bemessen.

Insgesamt wurden aus den 432 Aufnahmen der Joseffigur, die mit der Kamera Nikon D800E stationär erfasst wurden, zwölf Hauptpunktwolken mit mittlerer Berechnungsqualität generiert

und eine noch größere Zahl an Vergleichs- und Versuchspunktwolken. Die Berechnung einer dichten Punktwolke dauerte hier je nach Anzahl der Bilder von der Ausrichtung der Bilder bis zur Generierung der dichten Punktwolke zwischen 1,5 und 30 h.

Mit höheren Berechnungsqualitäten nimmt die benötigte Rechendauer exponentiell zu. So benötigte zum Beispiel ein Ring in sehr hoher Berechnungsqualität über 70 h.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden aus insgesamt über 3000 Bildern unterschiedlicher Kameras und Aufnahmeverfahren von unterschiedlichen Figuren ca. 100 dichte Punktwolken berechnet. Deren Ergebnisse fließen in diese Bachelorarbeit ein.

In ReCap 360 wurden mehrere Modelle berechnet. Da ein Projekt hier in eine Warteschleife geschoben wird, kann es auch hier über 24 h dauern, bis ein Ergebnis vorliegt.

5. Visuelle Auswertung und Beurteilung der Daten

Um die Originaltreue und Genauigkeit der berechneten Daten zu bestimmen, wird eine visuelle Beurteilung der dichten Punktwolken und ein Vergleich der Distanzen zwischen den dichten Punktwolken aus unterschiedlichen Kamera- und Aufnahmekonfigurationen durchgeführt.

Die visuelle Beurteilung der dichten Punktwolken dient dazu, die Vollständigkeit der Erfassung einzuschätzen und einen ersten Eindruck von der Wiedergabequalität der realen Figur zu erhalten. Außerdem wird hiermit eingeschätzt, welche Punktwolken für den folgenden quantitativen Vergleich als Referenzpunktwolken verwendet werden können.

Die Beurteilung stellte sich als schwierig heraus, da die relative Position der Punkte zueinander in der dichten Punktwolke schlecht zu erkennen ist. Daher wurden für diesen Vergleich hauptsächlich aus den dichten Punktwolken berechnete vermaschte Punktwolken verwendet. Die Vermaschung der dichten Punktwolke wurde, wie im Abschnitt 4.2.1 beschrieben, ohne jegliche Interpolation durchgeführt. Dies stellt sicher, dass nur in den Bereichen eine Vermaschung durchgeführt wird, an denen auch ausreichend Punkte der Oberfläche der Figur rekonstruiert wurden.

Der Vergleich soll sich auf die geschnitzten Teile der Figur beschränken, also auf Kopf, Hände und Füße. Vorrangig wird der Kopf der Figur betrachtet.

Als Grundlage dienen hauptsächlich die dichten Punktwolken, die in PhotoScan mit mittlerer Qualität berechnet wurden. Die Berechnung höherer Qualitätsstufen war mit der gegebenen Hardware teilweise nicht möglich. Sie werden jedoch, soweit vorhanden, zum Vergleich hinzugezogen.

Eine visuelle Ersteinschätzung der Streifenprojektoraufnahmen soll einen Eindruck der Originaltreue dieser liefern.

Da die fotografischen Aufnahmen vor einem schwarzen Stoff als Hintergrund durchgeführt wurden, wird geprüft, ob eine weiße Wand als Hintergrund für eine zuverlässige Rekonstruktion ausreichend ist.

Eine kurze Betrachtung der Texturen soll Aufschluss darüber geben, ob diese Texturen die visuelle Qualität der Figuren aufwerten können.

5.1. Visuelle Beurteilung der mit PhotoScan rekonstruierten Punktwolken des Kopfes

Zuerst werden die unterschiedlichen Aufnahmeverfahren mit bewegter und stationärer Kamera verglichen.

Die stationäre Kamera lieferte, wie in Abbildung 8a zu sehen, gleichmäßig verteilte Aufnahmen in jedem Aufnahmering. Bei den Aufnahmen mit bewegter Kamera änderte sich die Distanz zwischen Kamera und Figur teilweise im Dezimeterbereich, da die Krippenfigur auf einem rechteckigen Tisch stand und der Figur die Kamera mit Stativ darum herum bewegt werden musste. Dadurch sind die Fotos etwas ungleichmäßiger verteilt. Eine regelmäßige Bildabdeckung der Figur ist dennoch gegeben.

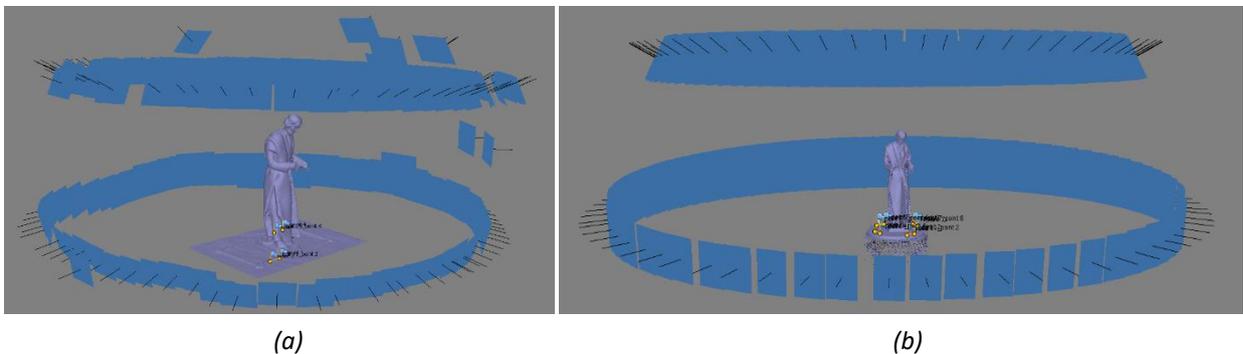


Abbildung 8: Kameraposition bei bewegter Kamera (a) und stationärer Kamera (b)

5.1.1. Vergleich bewegte und stationäre Kamera

Beim direkten Vergleich der Modelle in Abbildung 9 zeigt sich, dass die rekonstruierten vermaschten Punktwolken mit stationärer Kamera deutlich detailreicher sind. Zudem sind Formen schärfer aufgelöst. Dies wird in erster Linie dadurch verursacht, dass die Fotos mit bewegter Kamera größtenteils deutlich schlechter sind, als jene mit stationärer Kamera. Denn das Objekt war nicht gleichmäßig beleuchtet und teilweise etwas unscharf abgebildet. Die schlechtere Bildqualität hat auch zur Folge, dass bei bewegter Kamera deutlich weniger Verknüpfungspunkte auf der Figur gefunden werden konnten. Dies wird im Abschnitt näher betrachtet.

5.1.2. Unterschiedliche Kameras

In einem weiteren Schritt werden die Punktwolken aus den Aufnahmen von unterschiedlichen Kamerasystemen mit bewegter Kamera verglichen.

Die dichte Punktwolke und das Modell, in Abbildung 9 zu sehen, welches die Aufnahmen der Nikon D800E bei mittlerer Berechnungsqualität liefern, zeigen eine gleichmäßige Darstellung der geometrischen Formen der Figur. Die Gesichtszüge sind grob erkennbar, die Details jedoch kaum aufgelöst.

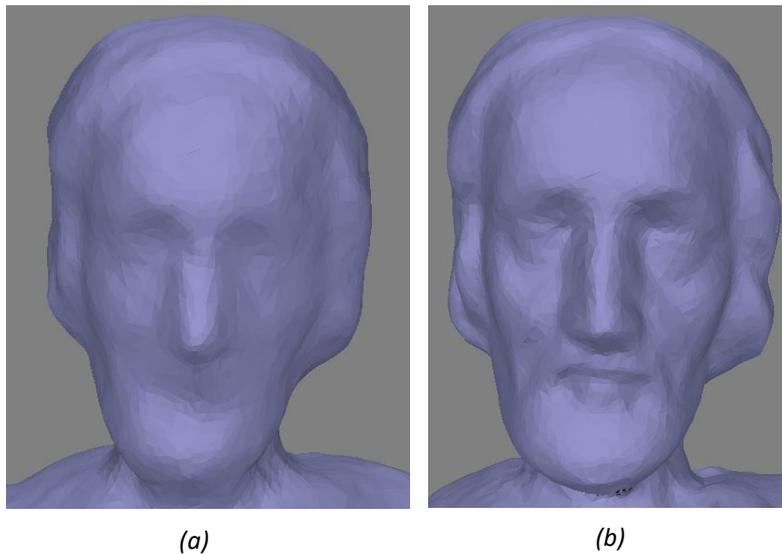


Abbildung 9: Vermaschte Punktwolken generiert mit bewegter (a) und stationärer Kamera (b) mit zwei Ringen bei mittlerer Berechnungsqualität in PhotoScan, Kamera: D800E

Im Modell, welches mit der Panasonic DMC-FS16 frei Hand generiert wurde, in Abbildung 10a dargestellt, sind die Gesichtszüge kaum erkennbar. Die Originaltreue ist stark eingeschränkt.

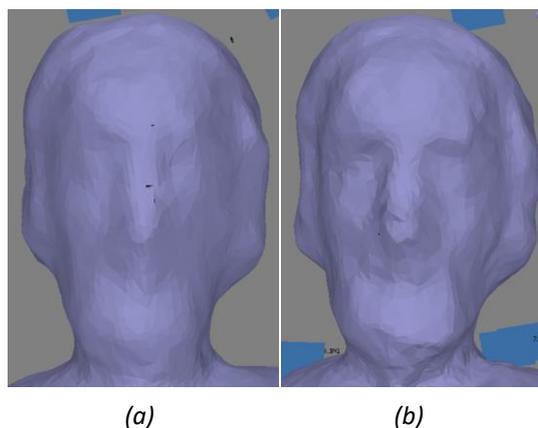


Abbildung 10: Mittlerer Berechnungsqualität in PhotoScan mit Bildern der DMC-FS16 (a) und der DMC-FZ150 (b)

Das Modell der DMC-FZ150 in Abbildung 10b lässt die Gesichtszüge grob erkennen. Es fehlen jedoch jegliche Details.

Bei hoher Berechnungsqualität, in Abbildung 11 dargestellt, werden die Modelle detaillierter. Das Modell der D800E und der DMC-FZ150 profitieren hiervon stark. Bei der D800E sind deutlich mehr Einzelheiten der Gesichtszüge erkennbar. Auch bei der DMC-FZ150 werden diese besser erkennbar. Die DMC-FS16 liefert ein deutlich schlechteres Ergebnis. Hier zeigen sich starke Unregelmäßigkeiten im Gesicht der Figur. Die Gesichtszüge sind grundlegend sichtbar, die Oberfläche und die Details werden aufgrund der Unebenheiten jedoch stark verfälscht.

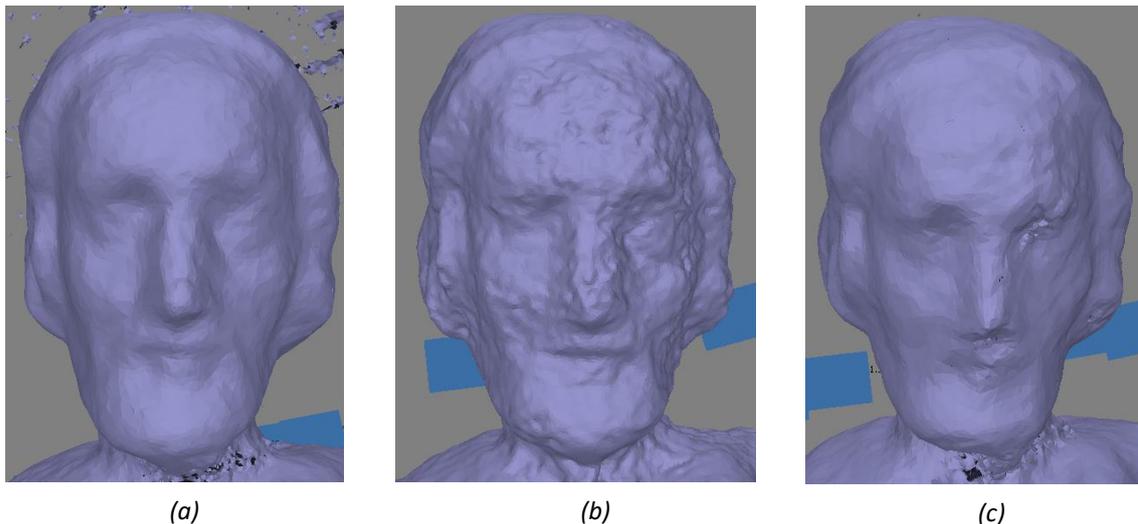


Abbildung 11: Vermaschte Punktwolken bei hoher Berechnungsqualität in PhotoScan mit bewegter Kamera und unterschiedlichen Kamerasystemen. Nikon D800E (a), Panasonic DMC-FS16 (b) und DMC-FZ150 (c)

5.1.3. Aufnahmekonfigurationen mit der Nikon D800E stationär

Da lediglich eine Aufnahmesession mit stationärer Kamera durchgeführt wurde, wurden bei der Auswertung unterschiedliche Konfigurationen aus den sechs aufgenommenen Ringen gewählt. Für diese Konfigurationen wurden die Bildfrequenz und die Anzahl der verwendeten Aufnahmeringe variiert.

Zuerst werden die Modelle betrachtet, die aus allen Ringen generiert wurden. Bei diesen ist das Gesicht der Figur detailliert zu erkennen, auch wenn nicht alle Feinheiten rekonstruiert wurden. Zwischen den Modellen aus Bildern, die alle 5° und alle 10° aufgenommen wurden, lassen sich in Abbildung 12 kaum Unterschiede erkennen. Beim Betrachten der gesamten Figur fallen bei 10° lediglich einige nicht rekonstruierbare Stellen auf, die bei 5° berechnet wurden. Bei 20° sieht man, dass die Oberfläche etwas unebener ist und Details weniger scharf abgebildet werden als bei 5° und 10°. Zudem finden sich im gesamten Modell deutlich mehr Löcher, an denen keine Punkte rekonstruiert werden konnten.

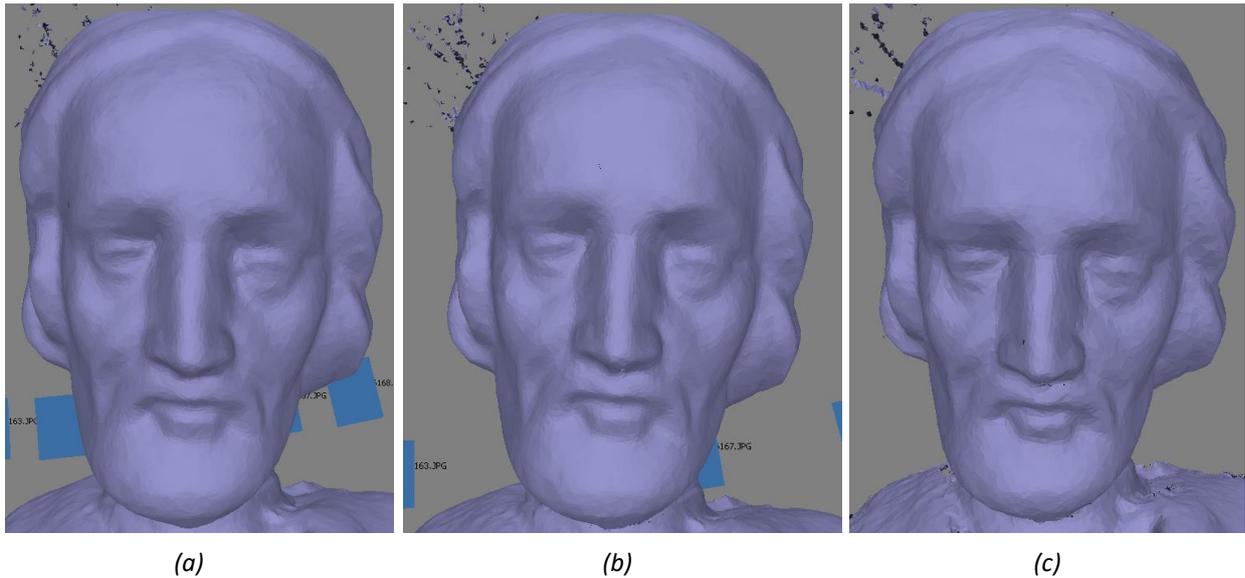


Abbildung 12: Vermaschte Punktwolken mit Winkeln von 5° (a), 10° (b) und 20° (c) zwischen den Bildern und sechs Aufnahmeringen (Fotos: Nikon D800E, Kamera stationär, Berechnungsqualität: mittel)

5.1.4. Rekonstruktion der Punktwolken aus einzelnen Ringen

Aufgrund unzureichender Hardware für eine Rekonstruktion in hoher und sehr hoher Berechnungsqualität wurden die fotografierten Ringe in den ersten Rekonstruktionen einzeln berechnet und anschließend zusammengefügt. Hierbei zeigte sich, dass die Aufnahmemethode mit stationärer Kamera und sich drehender Figur zu Problemen führen kann. Wird für eine einzelne Kameraposition eine Punktwolke rekonstruiert, lassen sich fast immer überdurchschnittlich viele falsche Punkte finden, die aus dem schwarzen Hintergrund generiert wurden. Diese ordnen sich, wie in Abbildung 13 zu sehen, in einem kreisförmigen Ring um die Figur an.



Abbildung 13: Zusammengefügte Punktwolke aus sechs einzeln generierten Punktwolken

Die Maskierung des Hintergrundes, die teilweise schon für die Berechnung der Ausrichtung der Fotos durchgeführt wurde, schaffte hier nur sehr begrenzt Abhilfe. PhotoScan bietet die Möglichkeit, maskierte Punkte abzuschneiden. Hierbei wurden jedoch Teile der Figur abgeschnitten und es entstanden Löcher in der Punktwolke.

Sobald jedoch mehr als ein Aufnahmering zur Berechnung verwendet wurde, ist das Ergebnis in Bezug auf Störpixel deutlich besser. Wie Abbildung 14a und Abbildung 14b zeigen, verschlechtert sich jedoch der Detailreichtum der 3D-Rekonstruktion mit zwei Ringen im Vergleich zu einem Ring. Mit mehr Ringen wird das pro zusätzlichem Ring schärfer und detaillierter rekonstruiert. Allerdings werden die Unterschiede bei mehr als drei Ringen, welche alle das Gesicht der Krippenfigur abdecken, immer geringer.

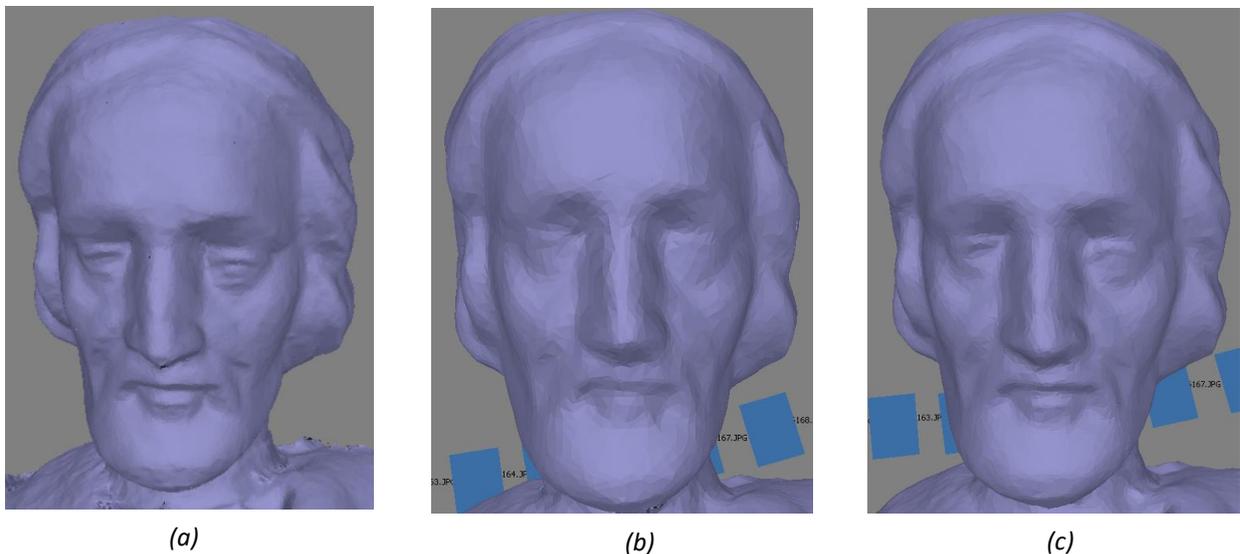


Abbildung 14: Vermaschte Punktwolken mit mittlerer Berechnungsqualität aus unterschiedlich vielen Aufnahmeringen: 1 Ring (a), 2 Ringe (b) und 3 Ringe (c) mit 5° Winkel zwischen den Bildern, Kamera: Nikon D800E

Eine Kombination aus einem Nahaufnahmering und zwei Vollformatringen, Abbildung 14c zeigt noch nicht den Detailreichtum der Nahaufnahme in Abbildung 14a. Das Modell aus allen sechs Ringen im 5° Winkel erreicht ebenfalls nicht den gleichen Detailgrad im Gesicht. Ähnliches zeigt sich auch bei Modellen aus Bildern im 10° Winkel. Beides ist in Abbildung 12 zu sehen.

Allerdings schränkt der Kamerawinkel bei der Verwendung von nur einem Ring die Gesamtabdeckung der Rekonstruktion des Modells ein. Es entstehen an den schlecht einzusehenden Flächen an der Figur viele Löcher in der vermaschten Punktwolke, zu sehen an den Armen, am Rücken und am Hinterkopf in Abbildung 16a. Außerdem zeigen sich in Abbildung 15a bei einem Aufnahmering, mit einem Winkel von 10° zwischen den Bildern, erste Stellen im Gesicht, die nicht rekonstruiert werden konnten.

Die Modelle mit mehreren Ringen zeigen hier deutlich weniger Probleme, so sind zum Beispiel bei 10° Winkelabstand und drei Ringen nur wenige Rekonstruierungslücken in Abbildung 16c zu erkennen. Bei 5° und drei Ringen, Abbildung 16b, finden sich nahezu keine Flächen mehr, die nicht rekonstruiert werden konnten, mit Ausnahme von schwer einsehbaren Stellen wie zum Beispiel Kleidungsfalten oder Bereichen unter den Armen.

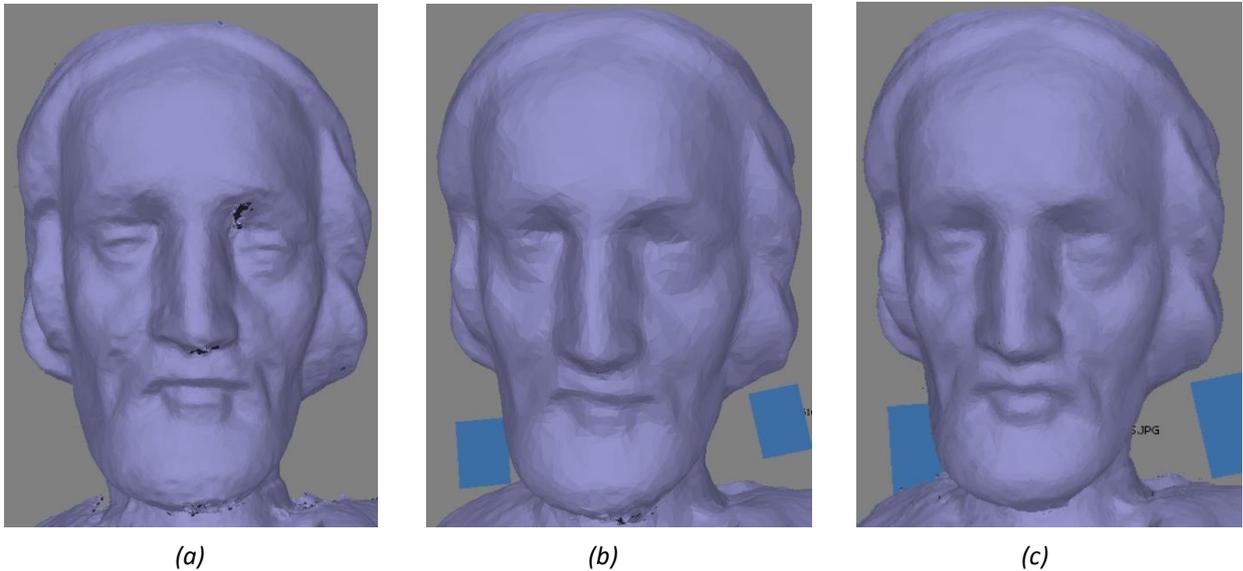


Abbildung 15: Vollständigkeit der Erfassung des Gesichts mit einem Aufnahmering (a), 2 Ringen (b) und 3 Ringen (c) am Beispiel der vermaschten Punktwolken aus Fotos im 10° Winkel, Kamera: Nikon D800E

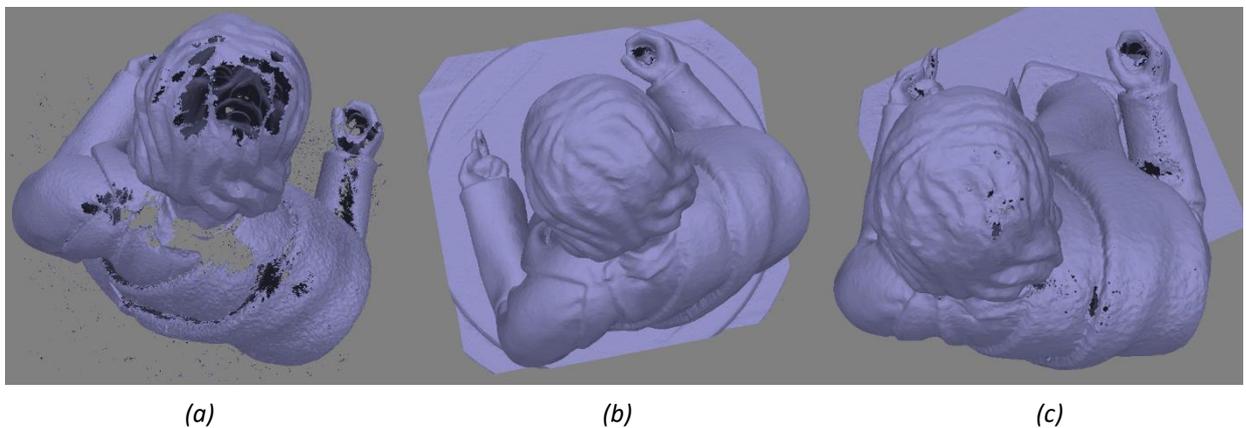


Abbildung 16: Vollständigkeit der Rekonstruktion der gesamten Figur mit unterschiedlich vielen Aufnahmeringen und unterschiedlichen Winkeln zwischen den Bildern: 5° und 1 Ring (a), 5° und 3 Ringe (b) und 10° und 3 Ringe (c)

5.2. Visuelle Beurteilung der mit ReCap 360 rekonstruierten Punktwolken

Als alternative Auswertungssoftware wurde Autodesk ReCap 360 verwendet. Die Ergebnisse sind sehr durchwachsen.

Mit bewegter Kamera schlug die Berechnung eines Modells fehl, welches aus Bildern der Nikon D800E rekonstruiert wurde. Wie in Abbildung 17 zu sehen, wurden zwei Figuren ineinander generiert. Auch mehrere Versuche durch Neuberechnungen ein besseres Ergebnis zu erzielen zeigten keinen Erfolg.



Abbildung 17: Fehlgeschlagene Rekonstruktion in ReCap 360 mit bewegter Kamera, Fotos: Nikon D800E

Die Rekonstruktionen aus den Bildern der DMC-FS16 und DMC-FZ150 funktionierten und sehen ähnlich detailliert aus wie mit PhotoScan. Allerdings scheint die Geometrie des Gesichts der Figur, die aus den Bildern der DMC-FS16 rekonstruiert wurde, nicht korrekt zu sein, es ist zu schmal. Eine Gegenüberstellung der vermaschten Punktwolken aus PhotoScan und ReCap 360 ist in Abbildung 18 zu sehen.

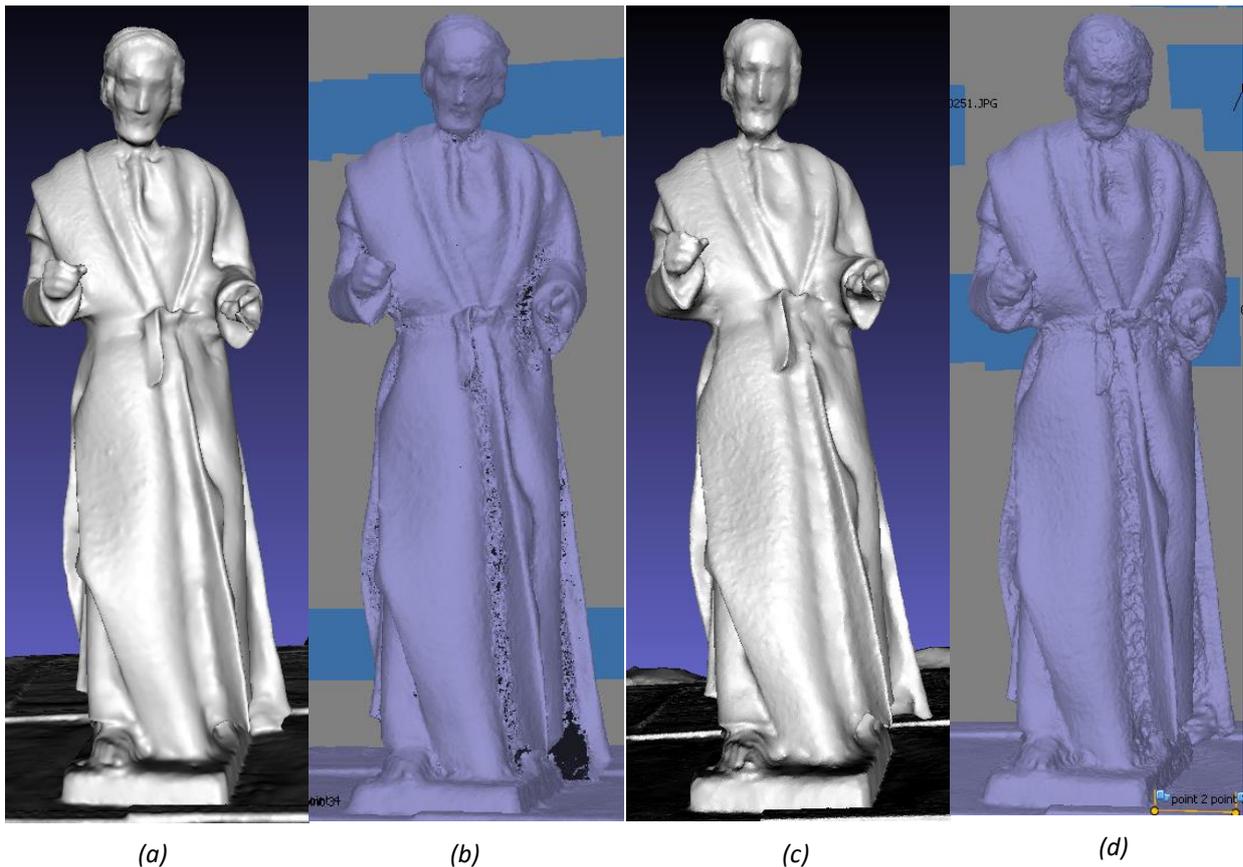


Abbildung 18: Vermaschte Punktwolken mit ReCap 360 (a und c) und mit PhotoScan (b und d) generiert. Bilder DMC-FZ150 (a und b) und DMC-FS16 (c und d)

ReCap 360 lässt maximal die Verwendung von 250 Bildern zu. Daher wurden die 106 Bilder, die neben den zwei vollformatigen Ringen verbleiben, aus den Nahaufnahmen mit größerem Winkel zwischen den einzelnen Fotos gewählt.

Auch mit stationärer Kamera hatte ReCap 360 Probleme, die Figuren zu rekonstruieren. Mit den maximal möglichen 250 Fotos wurde eine vermaschte Punktwolke erzeugt. Diese zeigt, wie in Abbildung 19 zu sehen, am Hinterkopf der Figur einen fehlerhaft rekonstruierten Bereich. Hier wurde mit 5° Abstand zwischen den Fotos ein falsches Objekt aus dem schwarzen Hintergrund rekonstruiert. Der Rest der Figur wurde detailliert, jedoch ebenfalls mit einigen Fehlern, berechnet. Die auffällige dunkle Färbung ist das Ergebnis einer fehlerhaften Texturerzeugung. Bei der Rekonstruktion aus Bildern im 10° Winkel wurde ein Teil des Hinterkopfes doppelt rekonstruiert und versetzt dargestellt. Gleiches gilt für den rechten Arm.

Da ReCap 360 keinerlei Einblick in die Berechnung der vermaschten Punktwolken zulässt, ist es unmöglich, festzustellen, an welchem Punkt des Auswertungsprozesses die Fehler entstehen. Zum Beispiel lässt sich, wie bereits erwähnt, der Hintergrund für die Fotoausrichtung nicht ausmaskieren. Es ist also möglich, dass die Ausrichtung zu großen Teilen fehlschlägt.

Die auftretenden Probleme machen ReCap 360 für eine originalgetreue Rekonstruktion nahezu unbrauchbar.



Abbildung 19: Fehlerhafte vermaschte Punktwolken mit ReCap 360 generiert, Bilder im 5° (a) und im 10° Winkel (b)

5.2.1. Betrachtung der Streifenprojektoraufnahmen

Die vermaschten Punktwolken aus den Aufnahmen des Streifenprojektors sollen als Referenz dienen. Eine visuelle Beurteilung liefert eine Ersteinschätzung der Qualität.

Die vermaschten Punktwolken zeigen eine gute Oberflächendarstellung. Allerdings gibt es Probleme bei der Erfassung der Augen, der Nase und des Mundes. Hier wurden einige Bereiche nicht rekonstruiert. Wie in Abbildung 20 sichtbar, sind die erfassten Flächen jedoch sehr detailliert.

Allerdings kann es bei der Aufnahme mit dieser Methode und dem benutzten Streifenprojektor zur Bildung von leichten Treppenstrukturen auf einigen Oberflächen kommen. Die technischen Voraussetzungen des Streifenprojektors machen es innerhalb einer Aufnahme nur möglich die Figur aus einem Blickwinkel zu erfassen. Das hat zur Folge, dass jeweils nur Teile der Figur erfasst werden können. Die Vollständigkeit der Aufnahme wird durch die Schärfentiefe des

Streifenprojektors noch weiter eingeschränkt. Ein vollständiges Modell mittels Streifenprojektor ist nur möglich, wenn die einzelnen vermaschten Punktwolken aufeinander registriert und zusammengefügt werden. Die Ränder der erfassten Bereiche weisen oft große Fehler auf. Daher müssten alle unregelmäßigen Flächen abgeschnitten werden. Einige Versuche zeigten jedoch, dass eine zusammengefügte vermaschte Punktwolke durch Überlagerungen nicht die notwendige Genauigkeit für eine Referenzpunktwolke besitzt. Daher werden die vermaschten Punktwolken nur einzeln verwendet.

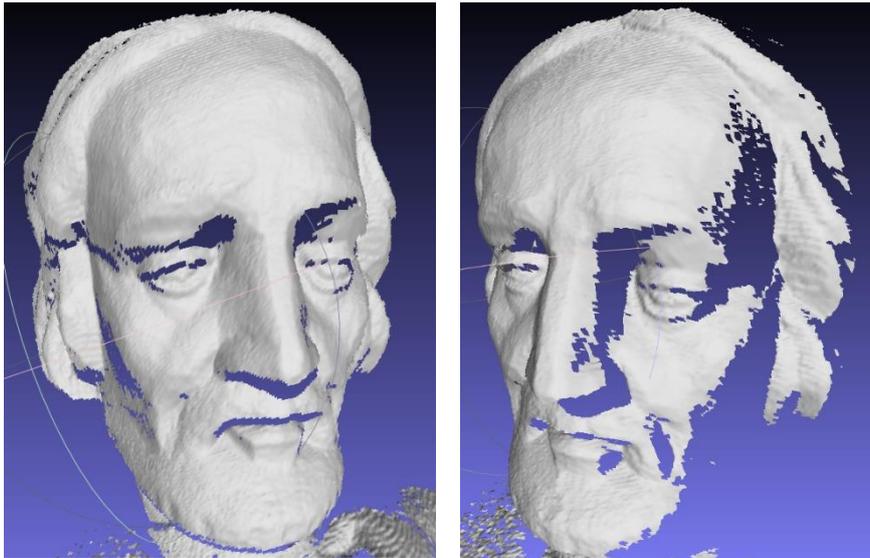


Abbildung 20: Mit einem Streifenprojektor generierte vermaschte Punktwolke des Gesichts der Krippenfigur

5.3. Visuelle Beurteilung der Hände

Da die Originaltreue und Vollständigkeit der Rekonstruktion der Hände der Krippenfigur ein gutes Indiz für die Qualität der Rekonstruktion komplexerer Strukturen darstellt, wird diese zusätzlich visuell betrachtet und beurteilt. Es soll hierbei geprüft werden, ob sich die Einschätzungen der Vollständigkeit und Originaltreue der Hände mit denen des Kopfes der Figur decken.

5.3.1. Mit PhotoScan rekonstruierte dichte Punktwolken

Das vollständigste und visuell beste Ergebnis bei mittlerer Berechnungsqualität liefert die dichte Punktwolke, die mit allen Bildern der Kamera Nikon D800E im 5° Winkel rekonstruiert wurde. Die geometrische Form aller Finger ist gut erfasst. Lediglich die nach unten gerichteten Flächen in Abbildung 21 weisen Rekonstruktionlücken auf.

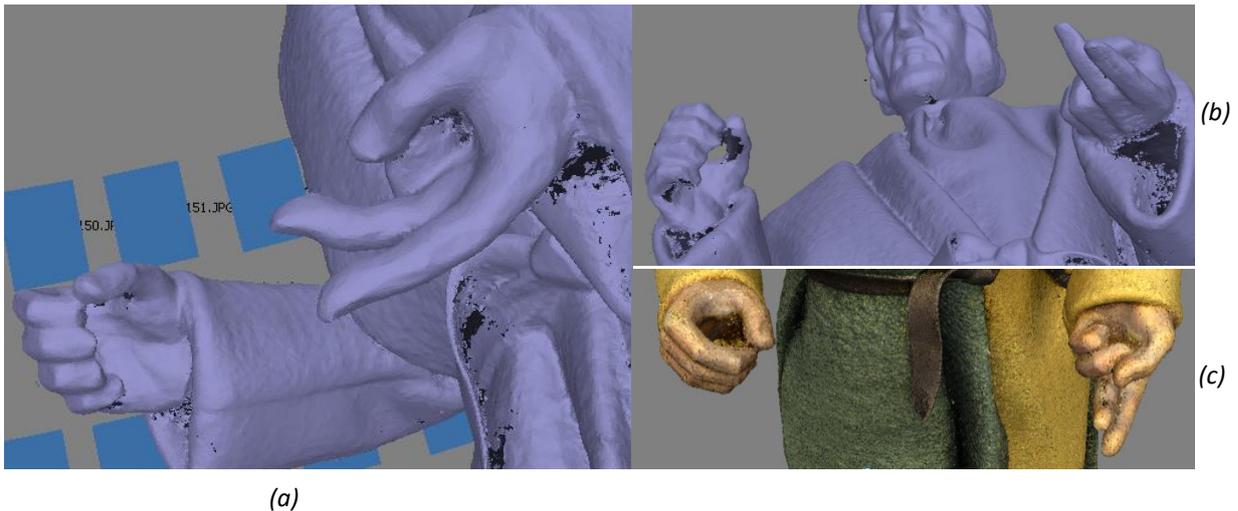


Abbildung 21: Rekonstruktion der Hände aus allen sechs Ringen mit einem Winkel von 5° zwischen den Bildern, vermaschte Punktwolken (a und b) und farbige dichte Punktwolke (c)

Zwei und drei Ringe mit 5° weisen sehr viele nicht rekonstruierte Flächen auf, siehe Abbildung 22a. Die Anzahl und Größe dieser nehmen bei vier Ringen ab, Abbildung 22b.

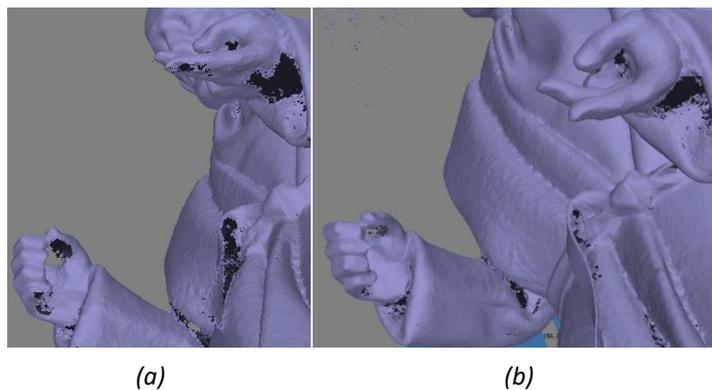


Abbildung 22: Vermaschte Punktwolke an den Händen mit 2 Ringen (a) und 4 Ringen (b) generiert

Werden für die Rekonstruktion alle Bilder im 10° Winkel verwendet, fallen, wie in Abbildung 23a zu sehen, immer mehr Flächen an den Händen auf, die nicht rekonstruiert wurden. Gleiches gilt auf Grund des Aufnahmewinkels auch bei Verwendung eines Rings mit Bildern im 5° Winkel. Mit allen Bildern im 20° Winkel ist die Rekonstruktion der Hände in Abbildung 23b noch unvollständiger.

Die Vollständigkeit der Hände ist durch die Komplexität und Einsehbarkeit der Strukturen eingeschränkt, als dies beim Kopf der Figur zu beobachten ist. Eine originaltreue Gesichtsrekonstruktion weist jedoch auf ein ähnliches Ergebnis bei der Rekonstruktion der Hände hin.

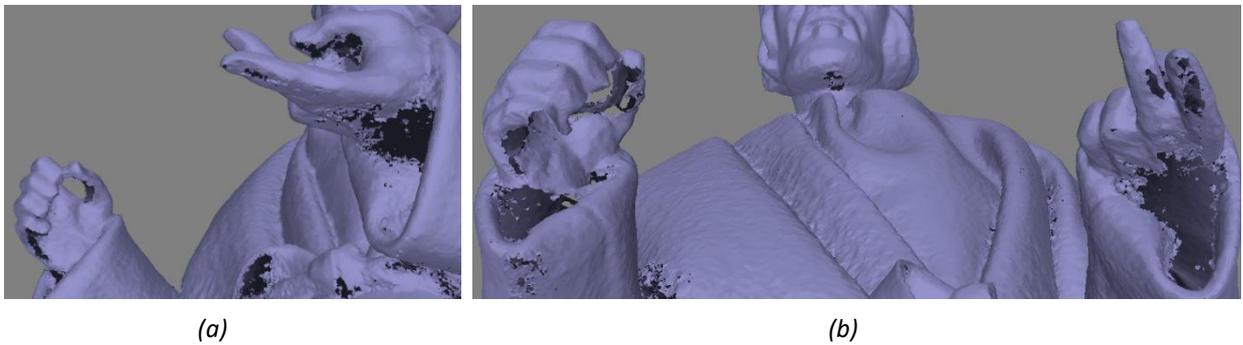


Abbildung 23: Vermaschte Punktwolke der Hände aus 6 Ringen mit Bildern im 10° (a) und 20° Winkel (b)

5.3.2. Mit ReCap 360 rekonstruierte dichte Punktwolken

Bei der Verwendung von ReCap 360 für die Rekonstruktion der Hände gab es Probleme, denn mit der maximal möglichen Anzahl von 250 Bildern wurde die linke Hand nicht korrekt rekonstruiert, siehe Abbildung 24.

Die Verwendung aller Ringe, die mit der D800E stationär aufgenommen wurden und Bilder im 10° Winkel beinhalten, Abbildung 24a, liefert in der Rekonstruktion mit ReCap 360 ein besseres Ergebnis. Die Hände sind vollständig erfasst. Die geometrische Form der einzelnen Finger ist jedoch etwas weniger scharf rekonstruiert als bei den vermaschten Punktwolken aus PhotoScan in Abbildung 21.



Abbildung 24: Vermaschte Punktwolke der Hände mit 5° (250 Fotos) (a) und 10° Winkel zwischen den Bildern (b)

Im Bereich der Hände gab es sowohl bei Verwendung von Bildern im 10° als auch im 5° Winkel doppelt rekonstruierte Stellen an den mit ReCap 360 generierten Modellen.

ReCap 360 generiert eine wasserdichte, vermaschte Punktwolke. Das bedeutet, dass alle Löcher zum Beispiel durch Interpolation geschlossen werden. Dies macht eine Einschätzung der

Vollständigkeit der tatsächlich rekonstruierten dichten Punktwolke nahezu unmöglich. Daher wird hierauf nicht näher eingegangen.

An den Händen zeigt sich eine grundsätzlich gute Originaltreue der Rekonstruktion mit ReCap 360. Die Rekonstruktion ist an vielen Stellen jedoch nicht eindeutig und kann somit für die gesamte Krippenfigur kaum als zufriedenstellend angesehen werden.

5.4. Betrachtung des Bildhintergrunds

Um festzustellen, ob ein schwarzer Hintergrund oder eine generell einfarbige Abdeckung der Wand hinter der aufzunehmenden Figur notwendig ist, standen Aufnahmen einer anderen Krippenfigur zur Verfügung. Diese wurden auf einem weißen Tisch vor einer weißen Wand angefertigt. Die Aufnahmen stammen von einer Nikon D5200 mit einem 35 mm Objektiv und sind ebenfalls mit Hilfe des Drehtellers erzeugt worden. Die Rekonstruktion der Figur funktioniert zuverlässig, siehe Abbildung 25.

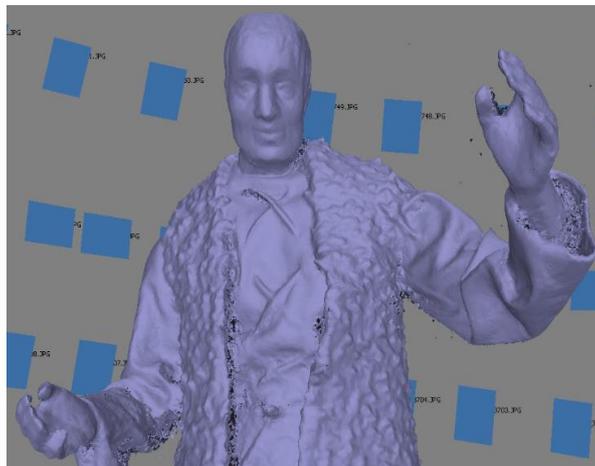


Abbildung 25: Ergebnis einer vermaschten Punktwolke mit einer weißen Wand als Aufnahmehintergrund
Fotos: Nikon D5200, Berechnungsqualität PhotoScan: mittel

Es zeigen sich, wie in Abbildung 26 zu sehen, kaum Qualitätsunterschiede zu einer vergleichbaren Aufnahmekonfiguration vor schwarzem Hintergrund. Ein Einfluss der Hintergrundfarbe auf die Kameraausrichtung oder die Rekonstruktion ist nicht erkennbar. Allerdings ist es von sehr großem Vorteil, wenn der Hintergrund für die Berechnung der Kameraausrichtung ausmaskiert ist. Die ebene, einfarbige Wand ist bei der Ausmaskierung sogar von Vorteil, da sie gleichmäßig beleuchtet ist und die Maskierungsalgorithmen in

PhotoScan besser greifen. Mit einem schwarzen Stofftuch als Hintergrund war die automatische Ausmaskierung weniger vollständig.

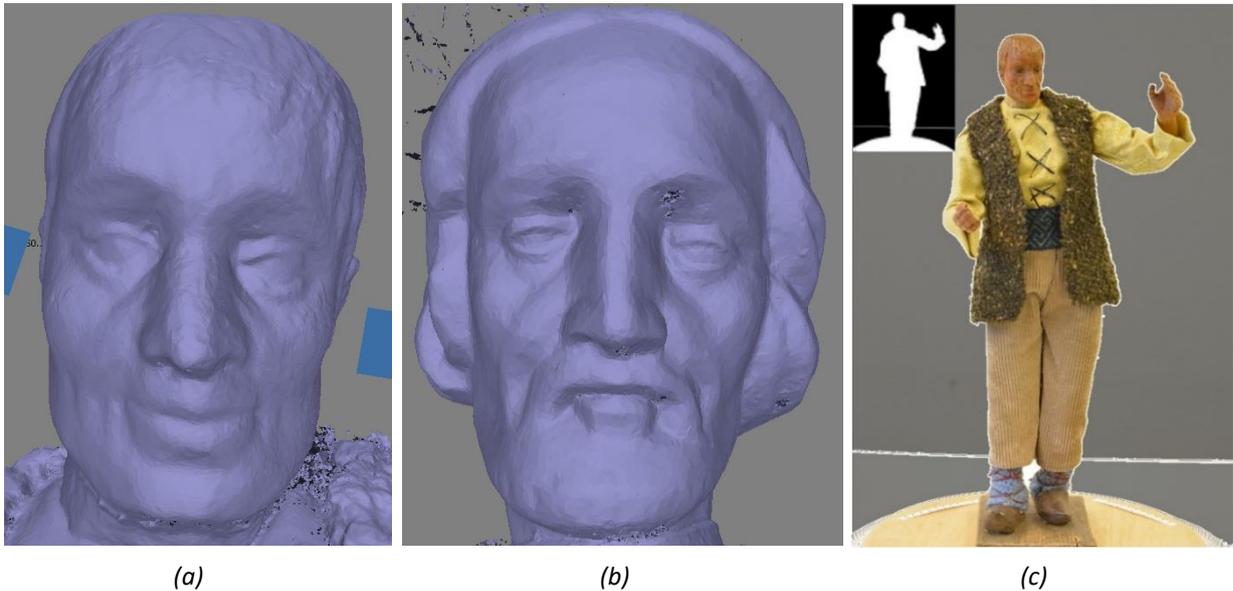


Abbildung 26: Vermaschte Punktwolken mit weißer Wand (a) und schwarzem Stoff (b) als Hintergrund. Figur vor weißer Wand mit maskiertem Hintergrund (c)

5.5. Texturrekonstruktion

Auf die Texturgenerierung soll hier lediglich kurz eingegangen werden, da die geometrische Qualität der Krippenfigur im Vordergrund steht.

Bei stationärer Kamera hatte ReCap 360 wie im Abschnitt 5.2 beschrieben und in Abbildung 19 zu sehen, Probleme mit der Farbgebung. Hier wurde teilweise die Farbe des Hintergrunds mit der Farbe des Objekts vermischt. PhotoScan erzeugte in den meisten Fällen eine farbechte Textur, die sehr realitätsnah wirkt, wie in Abbildung 27b zu sehen. In manchen Bereichen ist die Textur leicht verpixelt. Sie wirkt jedoch originalgetreuer als die etwas verschwommene Farbgebung der farbigen vermaschten Punktwolke, Abbildung 27a. Die gezeigten Ergebnisse haben eine sehr genaue Rekonstruktion zur Grundlage. Ist diese schlechter, wird die Textur pixeliger und die farbige vermaschte Punktwolke verschwommener. Die Aussagen zum optischen Eindruck der Textur sind jedoch auch hier zutreffend.

Es liegt nicht für alle rekonstruierten Punktwolken eine Textur vor. Denn auch die Texturgenerierung in PhotoScan lieferte in manchen Fällen falsche Ergebnisse, Abbildung 27c, oder ließ sich durch Fehlermeldung des Grafiktreibers oder Abstürze des Computers nicht

durchführen. In PhotoScan besteht in diesen Fällen, im Gegensatz zu ReCap 360, jedoch die Möglichkeit, auf die farbige Punktwolke, siehe Abbildung 28b, oder auf die farbige vermaschte Punktwolke auszuweichen. Die Figur wirkt hier etwas weniger originalgetreu, ist jedoch durchweg gut zu erkennen.

Bei ungenau rekonstruierter Punktwolke kann eine Textur über die physikalische Qualität hinwegtäuschen. Denn die Textur fügt optische Details hinzu, die nicht rekonstruiert werden konnten.

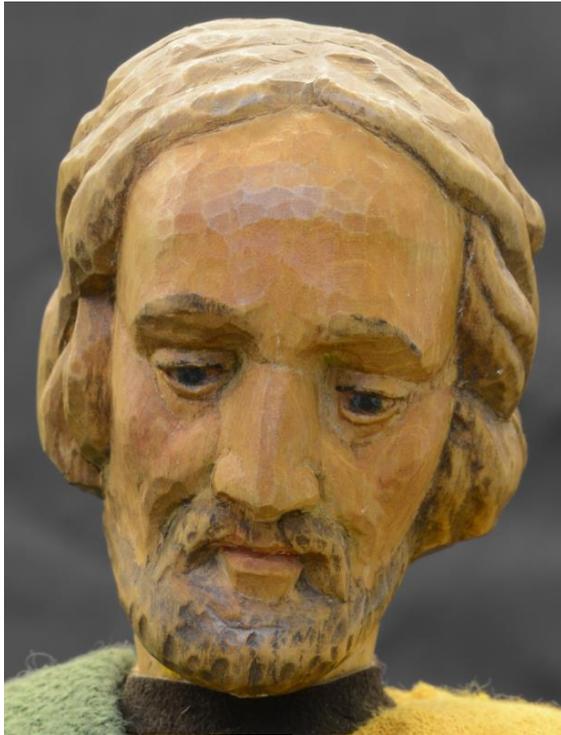


Abbildung 27: Textur in PhotoScan: Farbige vermaschte Punktwolke (a), Texturierte vermaschte Punktwolke (b) und fehlgeschlagene Texturierung (c)

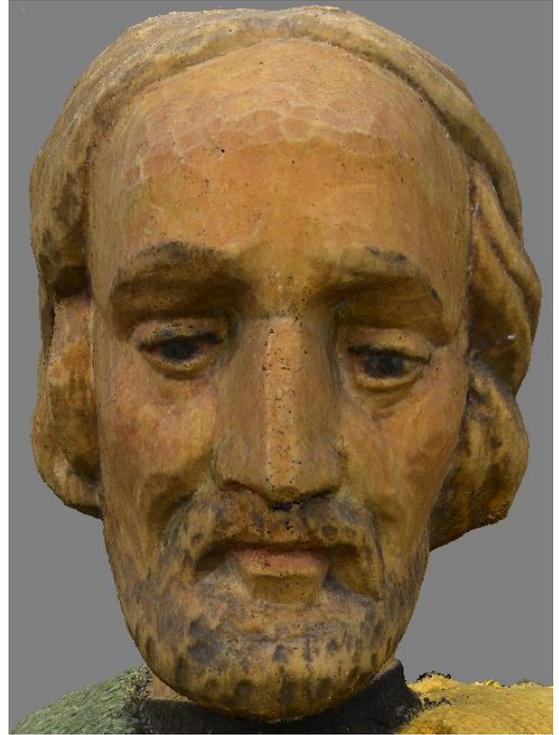
5.6. Wahl der Referenzpunktwolken

Die Punktwolke, welche aus 72 Bildern besteht, die mit der Nikon D800E in einem Ring aufgenommen und in hoher Qualität mit PhotoScan berechnet wurde, kann visuell als originalgetreuestes Ergebnis bezeichnet werden. Sie kommt der realen Krippenfigur am nächsten, siehe Abbildung 28. Daher wird diese als Vergleichsobjekt verwendet, um einen ungefähren Eindruck von der erreichten Genauigkeit der erzeugten Punktwolken zu erhalten.

Für die gesamte Figur und eine vollständige Erfassung dieser lieferte die Verwendung aller sechs Aufnahmeringe das beste Ergebnis.



(a)



(b)

Abbildung 28: Foto des Kopfes der Josef Krippenfigur (a) und farbige Punktwolke aus einem Ring mit 5° Winkel zwischen den Bildern (b)

Daher werden für einen quantitativen Vergleich die Punktwolken als Referenzpunktwolken gewählt, die aus einem Ring mit 5° Winkel zwischen den Bildern mit mittlerer und hoher Berechnungsqualität in PhotoScan rekonstruiert wurden. Zusätzlich werden die Punktwolken als Referenzpunktwolken verwendet, die aus allen sechs Ringen mit 5° Winkel zwischen den Bildern und mittlerer Berechnungsqualität und 10° Winkel zwischen den Fotos und hoher Berechnungsqualität, generiert wurde.

Diese Punktwolken sollen beim folgenden quantitativen Vergleich als Grundlage für eine numerische Genauigkeitsbetrachtung dienen.

6. Quantitativer Vergleich der Punktwolken

Im quantitativen Vergleich werden die Punktwolken aus unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen und Rekonstruktionssoftwarepaketen untereinander numerisch verglichen. Dieser Vergleich dient dazu, die Genauigkeit der Punktwolken einzuschätzen. Zusätzlich werden die Anzahl der gefundenen Verknüpfungspunkte und die Anzahl der Punkte in den berechneten dichten Punktwolken betrachtet, um festzustellen, wie zuverlässig die Erkennung und dreidimensionale Berechnung der identischen Punkte auf den Fotos funktioniert.

6.1. Größe der Punktwolken und Anzahl der Verknüpfungspunkte

Die Anzahl an Verknüpfungspunkten soll an dieser Stelle zur Einschätzung der Qualität der Aufnahmekonfiguration dienen. PhotoScan bietet die Möglichkeit, die markanten Punkte, die pro Bild verwendet werden, zu begrenzen. Dies soll die Ausrichtung der Fotos zuverlässiger machen, indem nur die markanten Punkte gefunden werden. Diese Funktion wurde kurz vor Beginn der Auswertung der Fotos in PhotoScan integriert. Ein späteres Update setzte einen Standardwert für das Verknüpfungspunktlimit. Dies wurde nicht sofort bemerkt. Daher wurden die ersten dichten Punktwolken aus den Bildverbänden mit bewegter Kamera und die ersten Berechnungen mit stationärer Kamera ohne dieses Limit berechnet. Ob diese Einstellung einen Einfluss auf die Genauigkeit der dichten Punktwolken hat, wird im folgenden Abschnitt geprüft. An dieser Stelle kann jedoch gesagt werden, dass diese Einstellung keinen nennenswerten Einfluss auf die Größe der dichten Punktwolke hat.

Tabelle 2: Anzahl Verknüpfungspunkte und Größe der dichten Punktwolke mit bewegter Kamera in PhotoScan

bewegte Kamera, 5° - 10°							
				Qualität PhotoScan			
		Verknüpfungspunkte		mittel	hoch	mittel	hoch
Kamera	Bilder	ohne Limit	Limit 1000	Dichte Punktwolke		Punkte auf Figur	
D800E_20mm	167	287.255	4.727	1,15 Mio.	5,32 Mio.	617.721	2,84 Mio.
DMC-FZ150	197	253.442	8.156	690.700	2,83 Mio.	330.429	1,37 Mio.
DMC-FS16	106	196.027	8.216	911.458	4 Mio.	585.093	2,57 Mio.

Tabelle 3: Anzahl Verknüpfungspunkte und Größe der dichten Punktwolke mit stationärer Kamera, mittlere Berechnungsqualität in PhotoScan (PS)

D800E_85mm Drehteller (stationäre Kamera), 5°, 6 Ringe a 72 Bilder				
Qualität PS	Bildfrequenz	Bilder	Verknüpfungspunkte	Dichte Punktwolke
mittel	5° 1 Ring	72	3.006	5,35 Mio.
	5° 2 Ringe	144	3.951	4,76 Mio.
	5° 3 Ringe	218	5.121	6,61 Mio.
	5° 4 Ringe	288	6.881	8,20 Mio.
	5° 6 Ringe	436	10.268	11,03 Mio.
	10° 1 Ring	36	5.080	4,58 Mio.
	10° 2 Ringe	72	4.680	3,74 Mio.
	10° 3 Ringe	108	5.945	5,85 Mio.
	10° 3 Ringe 2		6.111	5,35 Mio.
	10° 4 Ringe	144	5.637	6,85 Mio.
	10° 4 Ringe 2		6.675	6,75 Mio.
	10° 5 Ringe	180	7.705	7,53 Mio.
	10° 6 Ringe	218	9.225	9,26 Mio.
	20° 6 Ringe	109	12.731	8,20 Mio.

Tabelle 4: Anzahl Verknüpfungspunkte und Größe der dichten Punktwolke mit stationärer Kamera, hohe und sehr hohe Berechnungsqualität in PhotoScan

D800E_85mm Drehteller (stationäre Kamera), 5°, 6 Ringe a 72 Bilder					
			Verknüpfungspunkte		
Qualität PhotoScan	Bildfrequenz	Bilder	mit Limit	ohne Limit	Dichte Punktwolke
sehr hoch	5° 1 Ring	72	3.006	352.724	90,45 Mio.
hoch	5° 1 Ring	72	3.006	352.724	23,03 Mio.
hoch (6 Einzelberechnungen)	5° 6 Ringe	436	-	1,55 Mio.	83 Mio.
hoch	10° 6 Ringe	218	9.225	-	39,37 Mio.
	10° 1 Ring	36	5.080	-	18,54 Mio.
	10° 2 Ringe	72	4.680	-	15,97 Mio.
	10° 3 Ringe	108	5.945	-	25,16 Mio.
	20° 6 Ringe	109	12.731	-	30,83 Mio.

6.1.1. Anzahl der Verknüpfungspunkte

Alle dichten Punktwolken, die mit Verknüpfungspunktlimit berechnet wurden, hatten ein Limit von 1000 Punkten pro Bild. Dies ist die Standardeinstellung von PhotoScan.

Vergleicht man nun die Anzahl an Verknüpfungspunkten aller Berechnungen der Ausrichtung der Fotos mit einem Verknüpfungspunktlimit von 1000 Punkten untereinander, sieht man in Tabelle 2 bis Tabelle 4, dass eine klare Tendenz besteht, die zeigt, dass bei Verwendung von größeren Winkeln zwischen Fotos mehr Verknüpfungspunkte gefunden werden.

Wenn mehr als zwei Bildringe verwendet werden, findet PhotoScan mehr Verknüpfungspunkte mit jedem zusätzlichen Ring. Die Verwendung eines Nahaufnahme-Rings des Oberkörpers liefert mit Bildern im 10° Winkel mehr Verknüpfungspunkte als zwei vollformatige Ringe, die die gesamte Figur abbilden. Da die Auswertung der Nahaufnahmen nur ca. die halbe Oberfläche der Figur abdeckt, ist die Punktdichte ähnlich hoch wie bei Verwendung aller Fotoringe. Die Anzahl an Verknüpfungspunkten, die mit einem Ring im Winkel von 5° generiert wurden, ist etwas geringer. Die 3.000 Punkte die hier gefunden wurden, stellen selbst mit der Annahme, dass sie die halbe Fläche der Figur abdecken, eine deutlich geringere Punktdichte dar, als die Verknüpfungspunkte, die aus allen sechs Ringen bestimmt wurden. Hier sind es über 10.000 Punkte.

An dieser Stelle soll geklärt werden, ob die Einstellung eines Verknüpfungspunktelimits in PhotoScan einen Einfluss auf die Genauigkeit der dichten Punktwolke hat. Hierfür wird die Auswertung eines Rings mit Bildern der D800E im 5° Winkel und mittlerer Berechnungsqualität verwendet. Die dichte Punktwolke, die mit einem Verknüpfungspunktelimit von 1000 Punkten pro Bild erzeugt wurde, zeigt nahezu die gleichen Distanzen zur Streifenprojektoraufnahme wie die Punktwolke ohne Verknüpfungspunktelimit. Die Punktwolken mit und ohne Verknüpfungspunktelimit zeigen untereinander eine Differenz von durchschnittlich unter 0,1 mm. Daher kann davon ausgegangen werden, dass das verwendete Verknüpfungspunktelimit weder auf die Berechnung der Ausrichtung der Fotos noch auf die Generierung der dichten Punktwolke im geprüften Rahmen einen signifikanten Einfluss hat.

6.1.2. Größe der dichten Punktwolken

Die Größe der dichten Punktwolke dient zur weiteren Einschätzung der Kamerakonfigurationen. Der Eindruck der visuellen Betrachtung kann hier bestätigt werden. Allgemein gilt, solange mehr als ein Fotoring für die Berechnung der dichten Punktwolke verwendet wird, nimmt die Anzahl der Punkte mit größerer Anzahl der Fotos pro Ring zu. Allerdings ist die Größe der Punktwolke allgemein nicht proportional zur Anzahl der Bilder. Zum Beispiel werden mit 216 Fotos, die auf drei Ringe mit 5° Winkel zwischen den Bildern verteilt sind, ungefähr ein Drittel weniger Punkte berechnet, als mit der gleichen Anzahl an Fotos, die in sechs Ringe mit 10° zwischen den Fotos angeordnet sind. Die Größe der dichten Punktwolke ist folglich nur proportional zur Anzahl der

Bilder, die pro Ring verwendet wird, und setzt voraus, dass sich die Verteilung der Ringe vertikal nicht verändert.

Die dichten Punktwolken, die mit Bildern im 5° Winkel berechnet wurden, sind ca. 20 % größer als die Punktwolken, die bei jeweils gleicher Position der Aufnahmeeringe mit 20° zwischen den Bildern erzeugt wurden. Mit einem 20° Winkel zwischen den Bildern sind die Punktwolken noch etwas kleiner als mit 10° . Dies deckt sich mit der vorigen Beobachtung, dass die Modelle, die aus den dichten Punktwolken mit Bildern im 5° Winkel generiert wurden, die beste Gesamtabdeckung der Krippenfigur aufweisen.

Die dichte Punktwolke, die aus einem Ring berechnet wurde, ist unter der Annahme, dass sie nur circa die halbe Oberfläche der Figur abdeckt, ähnlich groß, wie die aus allen sechs Ringen. Insgesamt zeigt die Betrachtung der Anzahl der Verknüpfungspunkte und der Größe der dichten Punktwolken, dass bei Verwendung von mehr Ringen Punktwolken mit höherer Punktdichte berechnet werden können. Außerdem lässt sich beobachten, dass die Verwendung von größeren Winkeln zwischen den Bildern in einem Aufnahmeering die Erkennung von mehr Verknüpfungspunkten zur Folge hat.

6.2. Verwendung der Streifenprojektoraufnahme als Referenzpunktwolke

Die Aufnahmen mit dem Streifenprojektor haben vermaschte Punktwolken als Ergebnis. Es ist in CloudCompare bei der Berechnung von Distanzen zwischen einer dichten und einer vermaschten Punktwolke nur möglich, die vermaschte Punktwolke als Referenz zu wählen. Bei der Berechnung wird die Distanz von allen Punkten der zu vergleichenden Punktwolke zum nächsten Punkt der Referenzpunktwolke berechnet. Dies bereitet Probleme, denn wie in Kapitel 5.2.1 beschrieben, sind einzelne Modelle des Streifenprojektors nie vollständig. Hauptsächlich wurde hier das Gesicht der Figur abgebildet. Ist die Referenzpunktwolke deutlich kleiner als die zu vergleichende Punktwolke, werden die Distanzen der Punkte am Hinterkopf der photogrammetrisch erfassten Punktwolke zu Punkten im Gesicht der Figur in der vermaschten Streifenprojektor-Punktwolke berechnet. Dadurch entstehen Distanzen von bis zu 5 cm. Dies ist der horizontale Durchmesser des Kopfes. Ein solches Ergebnis macht eine Auswertung und Beurteilung der Distanzen schwierig.

Aus diesem Grund wurde mit CloudCompare eine Punktwolke aus den vermaschten Punktwolken des Streifenprojektors generiert. Dies ermöglicht, die Distanzen zwischen den Punktwolken aus den Streifenprojektor Aufnahmen zu den Punktwolken aus der photogrammetrischen Rekonstruktion zu berechnen. Die größere photogrammetrisch erzeugte Punktwolke wird hier in CloudCompare wie eine Referenzpunktwolke verwendet. Da hierbei die Distanz von jedem Punkt in der vermaschten Punktwolke des Streifenprojektors zum nächstgelegenen Punkt in der photogrammetrisch erzeugten Punktwolke berechnet wird, tritt das Problem der falsch berechneten Distanzen nicht auf. Alle Punkte am Hinterkopf der photogrammetrischen Punktwolke, die nicht in der Streifenprojektor-Punktwolke vorhanden sind, haben so keinen Einfluss auf die Distanzen.

6.3. Vergleich der dichten Punktwolken mit gewählten Referenzpunktwolken

In diesem quantitativen Vergleich wurden die Distanzen zwischen allen Punktwolken aus unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen und den Referenzpunktwolken bestimmt. Hierfür wurde jede Punktwolke auf die Referenzpunktwolke registriert und skaliert. Die Skalierung wurde bereits in PhotoScan für alle Punktwolken durchgeführt, bei denen der Drehteller mit den Skalen erfasst wurde. Jedoch wurde die Skalierung in CloudCompare auf die Größe der Referenzpunktwolke erneut durchgeführt, um etwaige Abweichungen durch nicht exakt skalierte Punktwolken zu vermeiden.

Die Distanzen wurden jeweils für den gesamten Kopf der Josef Krippenfigur berechnet. Dieser wurde nicht überall vollständig und ohne Ausreißer erfasst. Speziell der Hinterkopf machte bei manchen Aufnahmekonfigurationen Probleme. Der Kopf wurde in CloudCompare für den Vergleich ausgeschnitten. Außerdem wurden extreme Ausreißer und falsch berechnete Punkte entfernt, soweit dies möglich und für einen sinnvollen Vergleich notwendig war. Zum Beispiel wurden die bereits angesprochenen Bereiche am Hinterkopf der Figur in den Punktwolken, die mit ReCap 360 berechnet wurden, entfernt. Bereiche, die nicht optimal rekonstruiert wurden, sind in der Berechnung der mittleren Distanz enthalten. Somit fließen auch unvollständige und fehlerhafte Rekonstruktionen in diesen Vergleich ein. Abbildung 29 zeigt die Auswertung der ermittelten Distanzen in CloudCompare. Aufgrund der Anzahl der dichten Punktwolken in diesem Vergleich ist es nicht möglich, die Histogramme der absoluten Distanzen und die

Verteilung dieser im Gesicht der Figur grafisch darzustellen. Daher werden die mittlere Distanz und die maximale absolute Distanz, welche 30 %, 60 % und 90 % der Punkte abdecken in Tabellenform dargestellt.

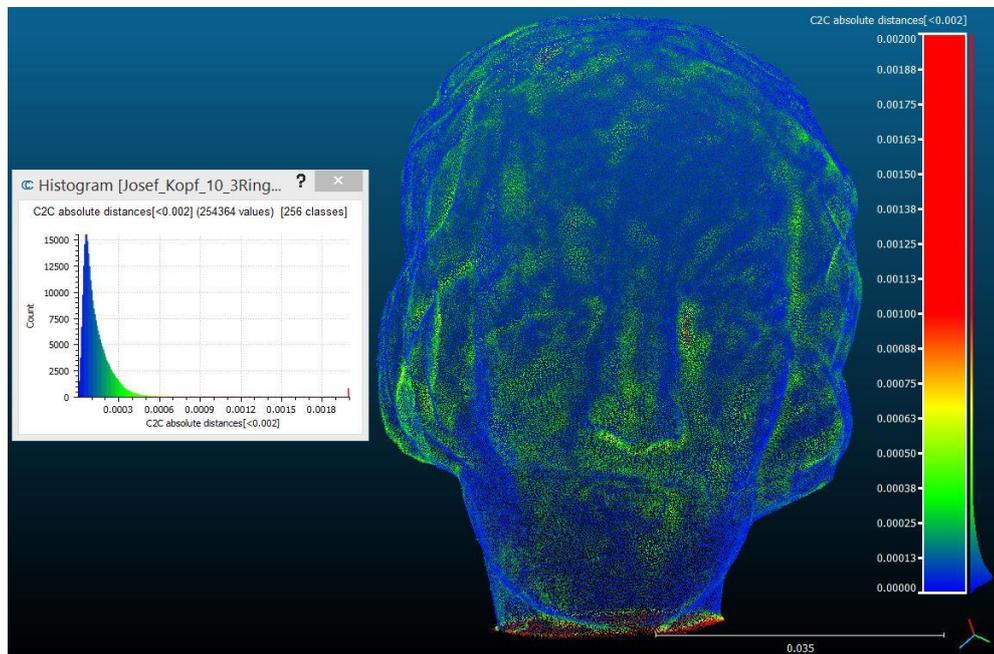


Abbildung 29: Distanz von Punktwolke aus 3 Ringe zu 6 Ringen, je 10° zwischen Bildern in CloudCompare

In Tabelle 5 sind die Distanzen zu den Referenzpunktwolken mit mittlerer Berechnungsqualität dargestellt. Die aufgeführten Punktwolken mit stationärer Kamera sind in PhotoScan in mittlerer Qualität berechnet. Da die visuelle Betrachtung gezeigt hat, dass die Punktwolken mit bewegter Kamera, relativ schlecht rekonstruiert wurden, werden diese in mittlerer und hoher Qualität aufgeführt. Tabelle 5 zeigt einen relevanten Ausschnitt aus Tabelle 8 im Anhang 3. Diese beinhaltet alle Punktwolken auch in hoher Berechnungsqualität. Da diese genauer berechnet wurden, als die Referenzpunktwolken, wird an dieser Stelle auf einen Vergleich dieser verzichtet.

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die Distanzen, welche zu den in hoher Qualität berechneten Referenzpunktwolken gemessen wurden.

Tabelle 5: Distanzen zwischen den dichten Punktwolken aus unterschiedlichen Aufnahmeconfigurationen zu den Referenzpunktwolken, die mit einem und mit sechs Ringen bei mittlerer Berechnungsqualität und 5° Winkel zwischen den Fotos rekonstruiert wurden

				Distanz zur Referenz in [mm]							
				5° 6 Ringe mittel				5° 1 Ring mittel			
PhotoScan:	Ringe	Bilder	Qualität	30 %	60 %	90 %	Mittel	30 %	60 %	90 %	Mittel
D800E 5° stationär	1	72	mittel	0,09	0,13	0,21	0,14	-			
	2	144		0,10	0,14	0,21	0,14	0,10	0,14	0,28	0,18
	3	218		0,10	0,14	0,24	0,16	0,09	0,13	0,22	0,16
	4	280		0,08	0,11	0,15	0,10	0,08	0,12	0,19	0,14
	6	432		-				0,08	0,11	0,17	0,14
D800E 10° stationär	1	36	mittel	0,09	0,12	0,17	0,11	0,07	0,10	0,14	0,10
	2	72		0,09	0,13	0,19	0,12	0,10	0,13	0,24	0,17
	3 (1.)	108		0,09	0,12	0,18	0,12	0,10	0,13	0,22	0,15
	3 (2.)			0,09	0,13	0,20	0,12	0,10	0,13	0,23	0,16
	4 (1.)	144		0,08	0,11	0,15	0,10	0,90	0,12	0,18	0,14
	4 (2.)			0,08	0,11	0,15	0,10	0,08	0,11	0,17	0,13
	5	180		0,09	0,12	0,17	0,12	0,08	0,11	0,17	0,13
6	216	0,08	0,10	0,15	0,10	0,08	0,11	0,17	0,13		
D800E 20° stationär	2+	108	mittel	0,09	0,12	0,17	0,12	0,08	0,11	0,17	0,12
D800E 5° bewegt (bew.)	2+	167	mittel	0,21	0,46	0,94	0,46	0,23	0,47	0,97	0,50
hoch			0,14	0,22	0,44	0,23	0,14	0,25	0,53	0,28	
DMC-FS16 ca. 10° bewegt		106	mittel	0,25	0,53	1,09	0,54	0,26	0,56	1,16	0,58
hoch			0,23	0,50	1,00	0,49	0,24	0,51	1,12	0,56	
DMC-FZ150 ca. 5° bewegt		197	mittel	0,27	0,56	1,22	0,58	0,27	0,60	1,26	0,63
hoch	0,17		0,33	0,73	0,35	0,18	0,35	0,80	0,41		
Streifenprojektor- Aufnahme	-	-	1	0,09	0,13	0,22	0,13	0,09	0,12	0,20	0,12
			8	0,09	0,13	0,22	0,13	0,09	0,12	0,20	0,12
			11	0,10	0,14	0,23	0,14	0,09	0,12	0,20	0,12
ReCap 360:											
D800E 5° stationär	4+	250	-	0,10	0,15	0,26	0,15	0,10	0,13	0,24	0,14
	6	218		0,10	0,14	0,25	0,15	0,10	0,13	0,24	0,14
DMC-FS16 bew.	2+	106	-	0,23	0,49	1,11	0,54	0,24	0,52	1,17	0,59
DMC-FZ150 bew.		197		0,17	0,31	0,68	0,33	0,19	0,35	0,78	0,41

Tabelle 6: Distanzen zwischen den dichten Punktwolken aus unterschiedlichen Aufnahmeconfigurationen zu den Referenzpunktwolken, die in hoher Berechnungsqualität aus einem Ring mit 5° Winkel zwischen den Fotos und aus sechs Ringen mit 10° Winkel rekonstruiert wurden

PhotoScan:	Ringe	Bilder	Qualität	Distanz zur Referenz in [mm]							
				5° 1 Ring hoch				10° 6 Ringe hoch			
				30 %	60 %	90 %	Mittel	30 %	60 %	90 %	Mittel
D800E 5° stationär	1	72	mittel	0,06	0,08	0,15	0,08	0,06	0,08	0,15	0,08
			hoch	-				0,04	0,06	0,09	0,06
			sehr hoch	0,04	0,05	0,08	0,06	0,04	0,06	0,09	0,06
	2	144	mittel	0,08	0,15	0,35	0,19	0,08	0,14	0,31	0,16
	3	218		0,07	0,13	0,28	0,16	0,07	0,12	0,25	0,13
	4	280		0,06	0,11	0,25	0,14	0,06	0,10	0,22	0,11
6	432	0,06		0,10	0,22	0,13	0,06	0,09	0,19	0,10	
D800E 10° stationär	1	36	mittel	0,05	0,07	0,13	0,08	0,05	0,07	0,13	0,08
			hoch	0,04	0,06	0,09	0,06	0,05	0,06	0,09	0,06
	2	72	mittel	0,08	0,16	0,35	0,19	0,07	0,13	0,27	0,14
			hoch	0,05	0,08	0,16	0,11	0,06	0,08	0,13	0,08
	3 (1.)	108	mittel	0,07	0,13	0,28	0,16	0,06	0,11	0,23	0,12
	3 (2.)			0,07	0,13	0,28	0,16	0,07	0,12	0,25	0,13
	3 (1.)	144	hoch	0,06	0,09	0,17	0,11	0,06	0,08	0,14	0,08
	4 (1.)		mittel	0,06	0,09	0,21	0,13	0,06	0,09	0,17	0,10
	4 (2.)			0,06	0,10	0,22	0,13	0,06	0,09	0,19	0,10
	5		180	0,06	0,09	0,19	0,12	0,06	0,08	0,16	0,09
6	216	hoch	0,06	0,09	0,19	0,11	0,06	0,08	0,15	0,08	
			0,05	0,06	0,10	0,08	-				
D800E 20° stationär	6	108	mittel	0,06	0,08	0,16	0,10	0,06	0,08	0,14	0,08
			hoch	0,05	0,07	0,12	0,08	0,04	0,06	0,09	0,06
D800E 5° bewegt	2+	167	mittel	0,23	0,52	1,01	0,49	0,23	0,49	1,02	0,51
			hoch	0,13	0,27	0,58	0,29	0,13	0,27	0,54	0,26
DMC-FS16 ca. 10° bewegt		106	mittel	0,27	0,58	1,14	0,57	0,27	0,57	1,10	0,55
			hoch	0,24	0,53	1,12	0,54	0,23	0,52	1,07	0,51
DMC-FZ150 ca. 5° bewegt		197	mittel	0,27	0,60	1,30	0,61	0,26	0,59	1,22	0,59
			hoch	0,18	0,38	0,84	0,40	0,17	0,37	0,79	0,37
Streifenprojektor- Aufnahme	-	-	1	0,05	0,06	0,10	0,06	0,03	0,07	0,11	0,04
			8	0,04	0,07	0,11	0,06	0,05	0,07	0,11	0,07
			11	0,05	0,07	0,11	0,07	0,05	0,07	0,12	0,07
ReCap 360:											
D800E 5° stationär	4+	250	-	0,06	0,08	0,15	0,09	0,05	0,08	0,16	0,09
	6	218		0,06	0,09	0,15	0,09	0,06	0,08	0,14	0,08
DMC-FS16 bew.	2+	106	-	0,24	0,52	1,19	0,57	0,24	0,53	1,15	0,56
DMC-FZ150 bew.		197		0,17	0,35	0,82	0,38	0,15	0,31	0,72	0,33

6.3.1. Distanzen zu den Referenzpunktwolken bei mittlerer Berechnungsqualität

Die errechneten Distanzen zwischen den Punktwolken bestätigen die Aussage, dass die berechnete Punktwolke genauer wird, je mehr Fotos bzw. Ringe mit Fotos verwendet werden. Allerdings ist in Tabelle 5 auch zu sehen, dass die Unterschiede der einzelnen Aufnahmekonfigurationen in den mittleren Distanzen zur Punktwolke mit 5° , einem Ring und mittlerer Berechnungsqualität, minimal sind. Je mehr Ringe für die Berechnung verwendet werden, desto kleiner werden die Unterschiede in den mittleren Distanzen unterschiedlicher Aufnahmekonfigurationen. Bei einer Bildfrequenz von 10° sind sie mit mehr als 4 Ringen beziehungsweise 144 Bildern kaum noch vorhanden.

Bei hoher Berechnungsqualität des Referenzmodells ist jedoch immer ein Unterschied in der mittleren Abweichung zwischen unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen zu sehen. Dieser wird kontinuierlich kleiner je mehr Aufnahmeringe verwendet werden.

Vergleicht man mit Hilfe der vorhandenen Distanzen die Punktwolken, die mit unterschiedlicher Bildfrequenz berechnet wurden, fallen kaum Unterschiede auf. Es scheint jedoch der Fall zu sein, dass bei niedrigeren Bildfrequenzen die Abweichung zur Referenzpunktwolke aus einem Fotoring mit 5° Bildabstand abnehmen. Dies könnte dadurch verursacht sein, dass die besten geometrischen Bedingungen für die Berechnung der einzelnen Punkte bei einem Winkel von 90° zwischen Bildern auftreten. Die größeren Winkel zwischen Fotos resultieren vermutlich in einer besseren Tiefenpräzision. Da jedoch für die Rekonstruktion von Details und die Gesamtabdeckung mehr Bilder von Vorteil sind, besteht hier eine Diskrepanz. Der subjektive visuelle Eindruck beziehungsweise die vollständige und originalgetreue Erfassung der Figur ist bei kleineren Winkeln zwischen den Fotos besser. Die errechneten Distanzen und damit die Genauigkeit der 3D-Position der Punkte in der dichten Punktwolke sind bei einem größeren Winkel zwischen den Fotos besser.

Betrachtet man die horizontale Verteilung der Ringe in Abbildung 4, kann festgestellt werden, dass diese einen horizontalen Winkel von maximal 45° , mit der spitzen Ecke in der vertikalen Achse der Krippenfigur, einschließen. Die drei der vier Nahaufnahmen, die den Oberkörper der Krippenfigur abdecken, liegen über 10° auf einem gedachten vertikalen Kreis auseinander. Lediglich die unterste Vollformataufnahme hat einen geringeren Winkel zu anderen Aufnahmen. Es ist also durchaus möglich, dass sich auch bei einer gleichmäßigen Verteilung der Ringe die Qualität der Rekonstruktion durch ungünstigere geometrische Bedingungen

verschlechtert, da der Winkel zwischen einzelnen Ringen beim Hinzufügen von mehr Ringen kleiner wird. Diese Theorie lässt sich jedoch mit keiner der hier vorliegenden Aufnahmekonfigurationen weitergehend überprüfen.

Der quantitative Vergleich der Distanzen schließt zwei unterschiedliche Kamerakonfigurationen mit drei Ringen und zwei mit vier Ringen ein. Die Konfigurationen mit vier Ringen sind in Abbildung 30 veranschaulicht. Es gibt keine nennenswerten Unterschiede der Distanzen zwischen den zwei Aufnahmekonfigurationen mit drei Ringen. Gleiches gilt auch für die Konfigurationen mit vier Ringen. Die Wahl der Position der Ringe hat folglich keinen allzu großen Einfluss auf die Genauigkeit der Rekonstruktion. Dies gilt allerdings in erster Linie für die Position der Nahaufnahmen und wurde für die gesamte Konfiguration mit den Vollformatringen nicht ausführlich geprüft, denn von diesen wurden lediglich zwei Ringe aufgenommen. Dies lässt keine Möglichkeit einer alternativen Aufnahmekonfiguration für eine Rekonstruktion, die zwei vollformatige Aufnahmeringe beinhaltet.

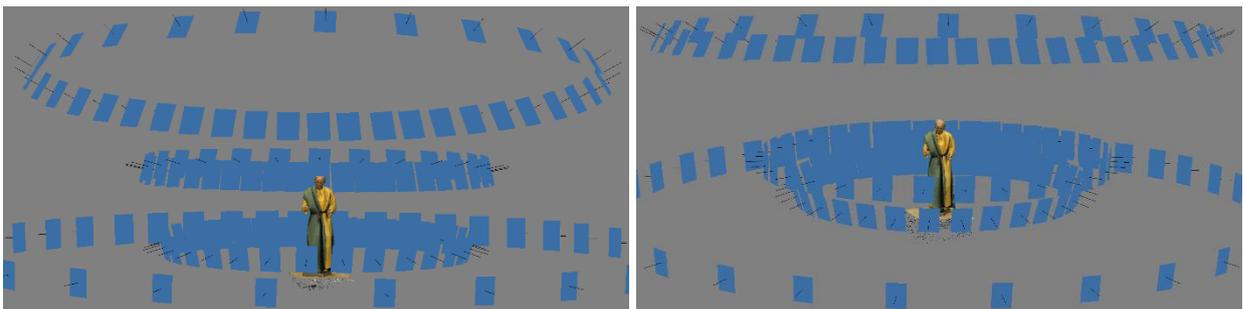


Abbildung 30: Zwei unterschiedliche Aufnahmekonfigurationen mit vier Ringen

6.3.2. Distanzen mit bewegter Kamera zu den Referenzpunktwolken

Wie schon aus der visuellen Betrachtung ersichtlich, sind die aus Bildern mit bewegter Kamera rekonstruierten Punktwolken qualitativ deutlich schlechter als aus Bildern der stationären Kamera. Hier zeigt sich, dass der Einfluss der Bildqualität relativ groß ist. Die Distanzen zu den Referenzpunktwolken sind mit bewegter Kamera deutlich größer als mit stationärer Kamera. Die Nikon D800E liefert hier das einzige Ergebnis das durch eine ausreichende Originaltreue und Genauigkeit für eine vollständige Erfassung der Krippenfigur in Betracht gezogen werden kann. Mit den beiden Panasonic Kameras wurden stark unterschiedliche Ergebnisse erzielt. Die Punktwolke, die in hoher Qualitätseinstellung in PhotoScan aus mit der DMC-FS16 freihändig aufgenommenen Bildern berechnet wurde, ist aufgrund der ungleichmäßigen und unebenen

Oberflächenrekonstruktion qualitativ unzureichend. Dies zeigt sich auch in sehr großen Distanzen zu den Referenzpunktwolken. Die mittels bewegter Aufnahme mit der DMC-FZ150 mit Stativ erzeugte Punktwolke zeigt deutlich bessere Distanzen zu den Referenzpunktwolken. Doch auch hier konnten die Gesichtszüge kaum rekonstruiert werden. Damit ist auch diese Aufnahmekonfiguration für eine vollständige Erfassung der Figur nicht geeignet. Die dichten Punktwolken, die mit bewegter Kamera mit mittlerer Qualität rekonstruiert wurden, zeigen alle so große Distanzen zur Referenz, teilweise über 1 mm, dass sie im Vergleich zu anderen Aufnahmekonfigurationen als unzureichend angesehen werden.

6.3.3. Distanzen zu Referenzpunktwolken mit hoher Berechnungsqualität

Die Distanzen zu den Referenzpunktwolken in Tabelle 6 zeigen einen nicht unerheblichen Einfluss der Berechnungsqualität auf die Genauigkeit der Punktwolken. Die Referenzpunktwolken wurden in hoher Berechnungsqualität aus einem Ring mit 5° Winkel zwischen den Bildern und sechs Ringen mit 10° Abstand zwischen den Bildern, berechnet. Die Distanzen zur Referenz nehmen nicht nur mit zunehmender Anzahl an Aufnahmeringen, sondern auch mit höherer Berechnungsqualität kontinuierlich ab. Mit mehr Aufnahmeringen sind stets Distanzunterschiede festzustellen. Dies deckt sich mit der visuellen Beurteilung. Die Referenzpunktwolken, die mit mittlerer Berechnungsqualität berechnet wurden, sind zu ungenau, um dies numerisch zu zeigen.

Die geringen Distanzen zu den Streifenprojektoraufnahmen verdeutlichen, dass diese Punktwolken nahezu identisch zu originalgereuen, photogrammetrisch erzeugten, Punktwolken sind.

Die Bereiche um die Augen sind bei den Streifenprojektoraufnahmen nur lückenhaft erfasst. Daher fehlt ihnen ein Teil der komplexeren und durch die Augenhöhlen schwerer zu rekonstruierenden Details. Diese Strukturen sind auch photogrammetrisch ungünstiger zu rekonstruieren als der Rest des Kopfes. Bei manchen Aufnahmekonfigurationen verschlechtert sie somit die durchschnittlich gemessenen Distanzen zur Referenzpunktwolke. Die geringen Distanzunterschiede zwischen den kürzesten 30 %, 60 % und 90 % der Distanzen, zeigen jedoch eine sehr gute Übereinstimmung der erfassten Bereiche mit wenigen Ausreißern. Diese Werte bestätigen die Qualität der Streifenprojektoraufnahmen als Referenz.

6.3.4. Vergleich mit den Streifenprojektoraufnahmen

Die bereits beschriebenen Distanzunterschiede zeigen sich in Tabelle 7 etwas deutlicher. Ein besonderes Augenmerk wird hier auf die Punktwolken gelegt, die mit hoher Berechnungsqualität rekonstruiert wurden. Die Distanzen von Punktwolken mit hoher Berechnungsqualität zur Punktwolke des Streifenprojektors halbieren sich im Vergleich zu Punktwolken mit mittlerer Berechnungsqualität. Außerdem verschwinden bei hoher Qualität die Differenzunterschiede zwischen dichten Punktwolken aus Bildern mit Winkelabständen von 5°, 10° und 20°, fast vollständig, solange die restliche Aufnahmekonfiguration identisch ist.

Bei der Punktwolke aus einem Ring mit 5° Winkel zwischen den Bildern sieht man, dass die Distanzen zur Referenzpunktwolke bei sehr hoher Berechnungsqualität noch kleiner ausfallen, als bei hoher Berechnungsqualität. Der erreichte Distanzunterschied ist jedoch deutlich kleiner, als der zwischen mittel und hoch. Außerdem wird der Rechenaufwand bei der Berechnung der Modelle mit steigender Berechnungsqualität exponentiell größer. Daher wurde eine sehr hohe Berechnungsqualität nur in dieser Konfiguration verwendet, um einen Eindruck des Ergebnisses zu erhalten.

Abschließend werden die Distanzen zwischen den Modellen aus ReCap 360 und den dichten Punktwolken aus PhotoScan und aus den Streifenprojektoraufnahmen betrachtet. Um die Berechnung aus den in Kapitel 6.2 genannten Gründen zu vereinfachen, wurden auch aus den mit ReCap 360 berechneten vermaschten Punktwolken mit CloudCompare Punktwolken generiert. Die Distanzen der Punktwolken, die aus den Bildern der Panasonic Kameras DMC-FS16 und DMC-FZ150 rekonstruiert wurden zur Streifenprojektor-Punktwolke sind mit ReCap 360 sehr ähnlich, wie mit PhotoScan in hoher Berechnungsqualität. Bei Betrachtung von 30 % der Punkte liefert ReCap 360 die besseren Ergebnisse. Betrachtet man jedoch 90 % der Punkte, weisen die PhotoScan-Punktwolken geringere Distanzen zur Streifenprojektoraufnahme auf. Das deutet auf eine etwas höhere Präzision der ReCap 360 Modelle hin. Diese beinhalten allerdings deutlich mehr Ausreißer, welche die Genauigkeit des gesamten Modells verschlechtern. Mit PhotoScan in hoher Berechnungsqualität ist die Genauigkeit etwas schlechter, es sind jedoch deutlich weniger Ausreißer vorhanden.

Die Betrachtung der besten 30 %, 60 % und 90 % der Distanzen liefert kaum weitere Ergebnisse. Die Distanzen ähneln sich jedoch stärker, je ungenauer und detailärmer die

Referenzpunktwolke ist. Dies kann bei variierender Qualität der verglichenen Punktwolken als Indiz für die Qualität der Referenzpunktwolke dienen.

Tabelle 7: Distanzen zwischen den dichten Punktwolken aus unterschiedlichen Aufnahmeconfigurationen zu der Referenzpunktwolke, die aus der vermaschten Punktwolke der genauesten Streifenprojektoraufnahme generiert wurde

PhotoScan:	Ringe	Bilder	Qualität	Distanz zur Referenz in [mm]			
				Streifenprojektor			
				30 %	60 %	90 %	Mittel
D800E 5° stationär	1	72	mittel	0,09	0,12	0,20	0,12
			hoch	0,05	0,06	0,10	0,06
			sehr hoch	0,03	0,04	0,08	0,04
	2	144	mittel	0,15	0,22	0,37	0,22
	3	218		0,12	0,18	0,28	0,17
	4	280		0,10	0,15	0,25	0,15
6	432	0,09		0,13	0,22	0,13	
D800E 10° stationär	1	36	mittel	0,09	0,12	0,19	0,11
			hoch	0,05	0,07	0,11	0,06
	2	72	mittel	0,15	0,21	0,34	0,21
			hoch	0,07	0,10	0,17	0,10
	3	108	mittel	0,11	0,16	0,26	0,16
			mittel 2	0,12	0,17	0,27	0,17
			hoch	0,06	0,09	0,14	0,08
	4	144	mittel	0,10	0,14	0,23	0,14
			mittel 2	0,11	0,15	0,23	0,15
	5	180	mittel	0,10	0,14	0,22	0,14
	6	216		0,09	0,13	0,21	0,13
	D800E 20° stationär	6	108	mittel	0,09	0,13	0,20
hoch				0,05	0,07	0,11	0,07
D800E 5° bewegt	2+	167	mittel	0,36	0,52	0,86	0,52
hoch			0,18	0,26	0,49	0,28	
DMC-FS16 ca. 10° bewegt		106	mittel	0,38	0,55	0,97	0,56
			hoch	0,23	0,38	0,72	0,38
DMC-FZ150 ca. 5° bewegt		197	mittel	0,50	0,73	1,24	0,73
			hoch	0,25	0,36	0,68	0,38
ReCap 360:							
D800E 5° stationär	4+	250	-	0,06	0,09	0,14	0,08
	2+	218		0,07	0,09	0,14	0,09
DMC-FS16 bew.	2+	106	-	0,18	0,39	0,8	0,38
DMC-FZ150 bew.		197		0,19	0,37	0,81	0,39

Zieht man einen Vergleich zwischen visueller Originaltreue und den quantitativen Distanzen kann gesagt werden, dass eine durchschnittliche Distanz einer Punktwolke zur Streifenprojektoraufnahme von über 0,2 mm bereits eine sehr detailarme Rekonstruktion darstellt. Bei Durchschnittswerten unter 0,1 mm lassen sich visuell kaum Unterschiede zwischen verglichener und Referenzpunktwolke feststellen. Die Übergänge dazwischen sind fließend. So kann zum Beispiel eine mittlere Distanz von 0,15 mm, die bei der Rekonstruktion einer Punktwolke mit mittlerer Berechnungsqualität aus 108 Bildern, die im 10° Winkel in drei Ringen angeordnet sind, auftritt, als optisch ausreichend angesehen werden. Allerdings können mit bloßem Auge Unterschiede zwischen Punktwolken erkannt werden, die sich in Distanzsritten der mittleren Distanz von 0,01 mm befinden. Hier entscheidet die gewünschte Nutzung der rekonstruierten Punktwolken, in welchem Rahmen ein Ergebnis ausreichend ist. Zusammen mit einer visuellen Sichtung muss hier im Einzelfall geprüft werden, ob die erfasste Krippenfigur lediglich einen guten Eindruck von der visuellen Erscheinung und Geometrie der Figur liefert, oder ob sie als möglichst genaues und originalgetreues Modell dienen kann.

6.4. Quantitative Ergebnisse der Rekonstruktionen mit PhotoScan und ReCap 360

Sowohl PhotoScan, als auch ReCap 360 eignen sich grundsätzlich zur Rekonstruktion von Krippenfiguren. Allerdings liefert PhotoScan zuverlässiger gute Ergebnisse. Außerdem hat ReCap 360 Probleme mit der Rekonstruktion, wenn die Figur gedreht wird und die Kamera stationär bleibt. Daher ist PhotoScan im Rahmen dieser Bachelorarbeit und des hier gewählten Anwendungsgebietes die deutlich bessere Verarbeitungssoftware. PhotoScan ist zudem deutlich vielseitiger, denn es ist möglich, Punktwolken direkt zu generieren und Zwischenschritte wie zum Beispiel die Ausrichtung der Fotos zu betrachten. Hinzu kommen die sehr vielseitigen Einstellungsmöglichkeiten in den unterschiedlichen Berechnungsschritten, die eine individuelle Anpassung an die gestellten Anforderungen bieten.

7. 3D-Druck der photogrammetrischen Rekonstruktion

Für die photogrammetrisch erfassten Punktwolken und Modelle bietet sich ein 3D-Druck an. Daher wird geprüft, in welchem Maße die erhobenen Daten für einen Druck weiterverarbeitet werden müssen. Überdies werden die Materialien und Genauigkeiten, die ein 3D-Druck bietet, geprüft und beurteilt. Aufgrund der Kosten und des Aufwands ist es im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht möglich, eine Figur in unterschiedlichen Materialien zu drucken, und das tatsächliche Ergebnis zu bewerten. Daher geschieht dies hauptsächlich anhand von Software und Informationen, die von 3D-Druckdienstleistern angeboten wird. Das Ergebnis eines privaten Drucks wird in der Zusammenfassung kurz beschrieben.

Für einen 3D-Druck wurden unterschiedliche 3D-Druckservices betrachtet. Darunter waren trinckle, Sculpteo, i.materialise, shapeways und fabberhouse. Aufgrund des angebotenen Services wurden trinckle und Sculpteo verwendet, um die Möglichkeiten eines 3D-Drucks zu bewerten.

Beide Unternehmen bieten die Möglichkeit, Modelle für den 3D-Druck automatisch innerhalb der Software auf den jeweiligen Webseiten zu reparieren. Der Druck kann mit unterschiedlichen Materialien in unterschiedlichen Druckverfahren erfolgen. Dies hat Einfluss auf die Materialeigenschaften und die Kosten.

7.1. Voraussetzungen an die vermaschte Punktwolke

Die vermaschte Punktwolke muss ein wasserdichtes 3D-Modell darstellen. Das bedeutet, dass die Oberfläche bzw. der dreidimensionale Körper geschlossen ist und ein dreidimensionales Volumen definiert.

Da die vermaschten Punktwolken, die für den vorangegangenen visuellen Vergleich verwendet wurden, ohne Interpolation berechnet wurden, haben die Modelle Löcher. Diese Modelle sind nicht optimal, um einen 3D-Druck durchzuführen, da sehr viele Reparaturen notwendig sind. Aus diesem Grund wurden neue Punktwolken des Kopfes in hoher Berechnungsqualität aus Bildverbänden rekonstruiert, mit denen eine qualitativ detaillierte und möglichst vollständige Rekonstruktion möglich ist. Diese wurden anschließend mit eingeschalteter Interpolation vermascht. PhotoScan bietet hier zwei Möglichkeiten: Interpolation und Extrapolation. Bei der

Interpolation werden Löcher im Modell geschlossen, die nicht allzu groß sind. Bei der Extrapolation wird ein wasserdichtes Modell generiert. Wird ein größerer Bereich der Figur als der, der gedruckt werden soll, vermascht, ist die Einstellung "Interpoliert" ausreichend. Denn wenn das Modell anschließend z. B. mit CloudCompare zerteilt wird, müssen die Schnittkanten in jedem Fall geschlossen werden, um ein wasserdichtes Modell zu erhalten. Die Einstellung "Extrapoliert" funktioniert nur, wenn die Vermaschung für die gesamte generierte dichte Punktwolke durchgeführt wird. Da im Regelfall im Rahmen dieser Arbeit eine größere dichte Punktwolke generiert wurde als für den Druck verwendet wird, kommt sie daher nicht zum Einsatz. Soll die gesamte Figur gedruckt werden, ist diese Einstellung interessant. Die Ergebnisse einer solchen Vermaschung müssen jedoch im Einzelfall geprüft werden, da falsch berechnete Punkte hier ebenfalls vermascht werden.

Die für einen 3D-Druck geprüften Objekte sind alle nicht wasserdicht. Wie bereits erwähnt, bietet trinckle die Möglichkeit, diese Modelle automatisch zu reparieren. Da jedoch bezüglich der Qualität der Reparatur etwas bessere Erfahrungen mit Autodesk Meshmixer und Memento gemacht wurden, wurde für die Korrektur Autodesk Meshmixer verwendet.

Aufgrund des Detailreichtums und der Vollständigkeit wird für den 3D-Druck die dichte Punktwolke verwendet, die in hoher Berechnungsqualität aus allen Ringen mit Bildern im 10° Winkel rekonstruiert wurde. Diese wurde in PhotoScan mit eingeschalteter Interpolation vermascht und texturiert.

Die texturierte vermaschte Punktwolke wurde in PhotoScan im PLY-Format exportiert und mit CloudCompare auf die gewünschte Größe zugeschnitten. Anschließend erfolgte die automatische Reparatur mit Meshmixer. Diese Punktwolke war bereits in PhotoScan mit Hilfe der Skalen in der Einheit Meter skaliert worden. Das Modell wurde anschließend in CloudCompare auf Zentimetermaße hochskaliert und so gedreht, dass die Achsen des dreidimensionalen Raums möglichst parallel zu Höhe, Breite und Tiefe des Kopfes liegen. Die Skalierung auf Zentimetermaße ist nicht unbedingt nötig, jedoch ermöglicht trinckle nur die Eingabe der Einheiten [mm] und [cm]. Innerhalb der Software kann dann die Skalierung frei gewählt werden. Es ist also auch möglich, ein Objekt in Metern hochzuladen, auf [cm] einzustellen und um das 100fache zu vergrößern. Sculpteo bietet auch Meter als Maßeinheit. Eine Skalierung erfolgt über die Änderung der Höhe, Breite oder Tiefe.

Zusätzlich wurde das Modell in Meshmixer mit unterschiedlichen Wandstärken ausgehöhlt. Verwendet wurde neben den in Sculpteo automatisch ausgehöhlten Modellen ein Modell mit

einer 4 mm starken Wand. Auf der Unterseite des verwendeten Modells wurden vier Löcher erzeugt. Zwei Löcher sind bei Sculpteo mindestens notwendig, um das überschüssige Material im Hohlraum abzuführen. Ein Beispiel einer ausgehöhlten Büste wird in Abbildung 31 gezeigt.



Abbildung 31: Ausgehöhlte Büste in Meshmixer

7.2. Materialien und Druckverfahren

Die Informationen zu den Eigenschaften der Druckmaterialien und der Druckverfahren stammen aus den Informationsportalen auf den Internetseiten von trinckle und Sculpteo.

Für einen 3D-Druck werden verschiedene Materialien angeboten. Hauptsächlich sind das Kunststoffe, Gips, Alumide und Metalle. In unterschiedlichen Druckverfahren werden verschiedene Kunststoffe verwendet. Die hier betrachteten Druckservices verwenden fünf unterschiedliche Druckverfahren.

7.2.1. Selektives Laser Sintern

Im Verfahren des Selektiven Laser Sinterns (SLS) werden Kunststoffpulver mit Hilfe der Hitze eines Laserstrahls verschmolzen. Eine Schicht Kunststoffpulver wird auf einen Träger aufgebracht. Diese Schicht wird anschließend mit einem Laser als Querschnitt der zu druckenden Figur verschmolzen. Der Träger wird abgesenkt und eine neue Schicht Pulver wird

darauf verteilt. Diese wird wiederum an den relevanten Stellen verschmolzen. Auf diese Weise wird das Modell Schicht für Schicht gefertigt.

Beim selektiven Laser Sintern können drei Materialien verwendet werden. Eines davon ist ein Polyamid-Pulver. Polyamid ist ein Thermoplast, ein Kunststoff, der eine relativ hohe Flexibilität besitzt und damit auch relativ stabil ist. Dadurch, dass das verschmolzene Pulver sehr fein ist, ist auch eine gute Abriebfestigkeit gegeben.

Ein weiteres Material ist ein Gummi, der bei Raumtemperatur elastisch ist. Dieses Thermoplastische Elastomer besitzt eine hohe Flexibilität und Abriebfestigkeit. Es ist jedoch aufgrund fehlender Steifigkeit wenig geeignet für den Druck einer Krippenfigur.

Das dritte Material ist ein sogenanntes Alumide. Der Name ist eine Wortkreation und bezieht sich auf die zwei Materialien aus denen dieser Stoff besteht, nämlich einer Aluminium-Komponente und Polyamid. Das Polyamid ist der Hauptbestandteil, der beim Druck auch verklebt wird. Die Beimischung der Aluminium-Komponente ermöglicht eine höhere Materialstabilität und Hitzebeständigkeit. Alumide sind sehr stabil, besitzen eine etwas schlechtere Flexibilität als Kunststoff und eine ähnliche Abriebfestigkeit.

7.2.2. Pulverklebeverfahren

Für das Pulverklebeverfahren werden Gips- oder Kunststoffpulver mit einer Klebstoffdüse verklebt. Bei diesem Verfahren ist ein farbiger Druck mit Gips möglich, da dem Gips mit dem Klebstoff ein Farbstoff hinzugefügt werden kann. Beim schichtweisen Druck wird die Klebstoffdüse in X- und in Y-Richtung bewegt. Das Druckbett wird nach unten in Y-Richtung bewegt. Nach jeder verklebten Schicht wird eine neue Schicht Pulver auf dem Druckbett aufgebracht. Da das verfestigte Material in seiner Rohform ein Pulver ist, ist es theoretisch sehr einfach möglich, das Modell mit einer bestimmten Wandstärke zu drucken und das überflüssige Material im Anschluss durch zwei Löcher im Modell aus der Form rieseln zu lassen. Das spart Material und wirkt sich somit auf den Preis aus.

Der verwendete Kunststoff ist ein Polymethacrylat (PMMA), das man auch unter dem Namen Acryl kennt. Dieses Acryl oder Acrylglas ist ein glasähnlicher harter Kunststoff, der für den Druck als feinkörniges Pulver verwendet wird. Bei der Verwendung von Gipspulver wird Polynergips verwendet, der auch eine Kunststoff-Komponente enthält. Der verklebte Kunststoff ist etwas stabiler als Gips. Allerdings besitzen beide Materialien keine Flexibilität und kaum

Abriebfestigkeit. Die Materialien haben außerdem die schlechteste Stabilität der hier genannten Druckmaterialien.

Die beiden genannten Verfahren benötigen für den Druck keine Stützstrukturen, da das gedruckte Modell vom umgebenden Pulver getragen wird.

7.2.3. Düsenschmelz-Verfahren

Im Düsenschmelz-Verfahren (FDM) sind Stützstrukturen notwendig da hier das Modell, mit Hilfe einer Düse, Schicht für Schicht aus ABS-Kunststoff gedruckt wird. Die Düse erhitzt einen dünnen Plastikdraht und bringt diesen in gleicher Weise wie beim Pulverklebverfahren den Klebstoff auf das Druckbett auf. Da nur das zu druckende Material aufgebracht wird, gibt es kein umgebendes Material, welches das Modell tragen könnte. Die benötigten Stützstrukturen müssen nach dem Druckprozess entfernt werden. Das Innere der gedruckten Struktur wird mit einer netzartigen Stützstruktur gefüllt um Material und Gewicht zu sparen.

Der Acrylnitril-Butadien-Styrol(ABS)-Kunststoff, der beim Düsenschmelzverfahren verwendet wird, besitzt eine sehr hohe Abriebfestigkeit und Stabilität. Als Kunststoff besitzt er auch eine gewisse Flexibilität.

7.2.4. Photopolymer-Verfahren

Beim Photopolymer-Verfahren (SLA) wird ein flüssiges Kunstharz mithilfe von Licht verfestigt. Dafür kommt entweder ein Laser zum Einsatz oder ein DLP-Chip, ähnlich wie in Projektoren, zum Einsatz. Diese beleuchten das Harz entweder von oben oder durch einen durchsichtigen Boden von unten. Damit wird entsprechend eine Schnittebene des Modells verfestigt. Anschließend wird bei Beleuchtung von oben der Träger, auf dem sich das Modell befindet, nach unten abgesenkt. Bei Beleuchtung von unten wird das Modell nach oben aus der Flüssigkeit gezogen. Auch bei diesem Verfahren sind Stützstrukturen notwendig, die überstehende Teile abstützen. Diese müssen nach dem Druck ebenfalls entfernt werden.

Das Kunstharz, das beim Photopolymer-Verfahren verwendet wird, ist meist durchsichtig. Je nach Anbieter jedoch auch in verschiedenen Farben erhältlich. Kunstharz ist relativ lichtempfindlich und wird unter Lichteinfluss schnell spröde und brüchig. Es besitzt eine eher geringe Stabilität und Abriebfestigkeit. Außerdem ist es kaum flexibel.

7.2.5. Metallgussverfahren

Der Vollständigkeit halber wird hier noch das Metallgussverfahren erwähnt. Bei diesem Verfahren wird im Regelfall zuerst das Modell aus einem wachsartigen Material gedruckt. Dies kann zum Beispiel im Photopolymer-Verfahren geschehen. An dieses Modell werden Einlassstutzen angebracht. Anschließend wird diese Form in ein flüssiges Material getaucht, zum Beispiel Gips, das sich verfestigt und hitzebeständig ist. Die so erhaltene Form wird erhitzt, damit die wachsartige Form schmilzt und durch die Einlassstutzen abläuft. Als nächster Schritt kann die Form durch die Einlassstutzen mit flüssigem Metall gefüllt werden. Nach dem Aushärten wird die Form um das Metall zerschlagen. Dieses Gießverfahren wird als "Verlorene-Form-Guss" bezeichnet. Das Metall, das sich in den Einfüllstutzen befand, muss entfernt werden. Die Form wird anschließend poliert, um eine glatte Oberfläche zu erhalten. Meistens wird mit diesem Verfahren Modelle aus Silber erzeugt. Sculpteo bietet jedoch auch Messing an.

Beim Metallgussverfahren wird zumeist Sterling Silber verwendet. Dies ist naturgemäß sehr stabil und abriebfest. Außerdem ist die Flexibilität gering. Das Messing, das zusätzlich von Sculpteo angeboten wird, besitzt sehr ähnliche Eigenschaften.

7.3. Beurteilung der Druckgenauigkeit und der Materialeigenschaften

Da der Druck grundsätzlich bei jedem Material in Schichten erfolgt, die Materialien und Druckverfahren sich jedoch unterscheiden, besitzen unterschiedliche Kombinationen aus Material und Druckmethoden unterschiedliche Eigenschaften bezüglich Auflösung, Oberflächenart und minimaler Wandstärke.

Sculpteo und trinckle haben unterschiedliche Ansätze, wenn es um die Beurteilung und Angabe der minimalen Dicke und Höhe bzw. Tiefe von Strukturen geht.

Trinckle verwendet einen selbstentwickelten Benchmark. Das ist ein Objekt, welches Strukturen mit variierend großen, halbkugelförmigen und rechteckigen Erhebungen sowie unterschiedlichen Wandstärken und Schlitzbreiten beinhaltet. Dieses Objekt soll dazu dienen, die Genauigkeit des Drucks zu beurteilen und Angaben zu möglichen Strukturmaßen und

Schichtdicken zu liefern. Trinckle gibt die Auflösung der 3D-Druckmethoden und die Genauigkeit auf einer Skala von 1 bis 8 an.

Die minimal möglichen Wandstärken sind bei trinckle und Sculpteo ähnlich. Sie liegen je nach Material zwischen 0,75 mm und 2 mm. Dies betrifft die geschnitzten Körperteile der Figur nicht, da keine dünnen Wandstrukturen vorhanden sind.

Die geschnitzten Teile der Josef-Figur haben keine extrem feinen Strukturen. Aufgrund der wenig komplexen Oberflächenbeschaffenheit der Figur sind die Angaben zu kleinstmöglichen Details nicht sehr relevant. Bezüglich dessen bereitet vermutlich kein Druckverfahren signifikante Probleme.

Interessanter sind die Druckauflösung, die Eigenschaften des Materials und die Druckkosten.

Sculpteo gibt als Druckauflösung die Schichtdicke an und minimal mögliche Details. Trinckle nennt eine Druckauflösung in Millimeter. In wie weit dies lediglich unterschiedliche Arten der Angaben der Druckdienste sind oder auf die verwendeten 3D-Drucker zurück zu führen ist, lässt sich nicht mit Sicherheit sagen. Trinckle gibt Auflösungen von 0,1 mm bis 0,4 mm an.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Aussage getroffen, dass beim Vergleichen von zwei Punktwolken eine durchschnittliche Distanz zwischen diesen von unter 0,1 mm ein Indiz für sehr ähnliche Punktwolken ist. Außerdem deuten durchschnittliche Distanzen von über 0,2 mm auf ein wenig detailliertes Modell hin. Ob sich diese Aussage auf die Druckauflösung übertragen lässt, ist jedoch fragwürdig.

Sculpteo gibt zum Beispiel bei verklebtem Gips an, dass erhabene Strukturen druckbar sind, die 0,4 mm breit sind und 0,4 mm hoch im Vergleich zum umgebenden Material. Bei trinckle findet sich beim gleichen Material eine Druckauflösung von 0,1 mm. Bei diesen Angaben zeigen sich die Probleme, die eine Beurteilung der Druckgenauigkeit erschweren. Es ist kaum möglich, festzustellen, ob das erfasste Modell mit einer Genauigkeit gedruckt werden kann, die der photogrammetrischen Erfassung entspricht. Um darüber eine genaue Aussage zu treffen benötigt man gedruckte Modelle aus den unterschiedlichen Materialien. Die Angaben zur Genauigkeit lassen jedoch vermuten, dass sich die Druckgenauigkeit nicht in dem Maße unterscheidet, um ausschlaggebend für das gewählte Druckmaterial zu sein. Wichtigere Faktoren sind die Materialeigenschaften und die Kosten eines Drucks.

Die Kosten für einen Druck variieren je nach Anbieter und Material. Da Sculpteo bei allen Druckverfahren, bei denen ein Pulver verschmolzen oder verklebt wird, ermöglicht, das Modell automatisch auszuhöhlen, wird hier weniger Material benötigt. Die Wandstärke wird an das

jeweils verwendete Material angepasst, da die Druckmaterialien unterschiedlich robust sind. Bei trinckle funktioniert dies nicht innerhalb der auf der Webseite integrierten Software und muss mit einer geeigneten Software vor dem Hochladen auf die Webseite durchgeführt werden. Als Druckmaterial am Vielseitigsten ist gesinterter Kunststoff. Die Anbieter geben hier etwas niedrigere Werte für Genauigkeit und Detaillevel an als bei anderen Materialien wie zum Beispiel Kunstharz, verklebtem Gips, verklebtem Kunststoff und den Metallen.

Bei Sculpteo gibt es bei gesinterter Kunststoff die Möglichkeit, zwischen zwei Schichtstärken zu wählen, es gibt 60 μm und 100 – 150 μm zur Auswahl. Das Modell kann zudem im Rohzustand oder poliert bestellt werden. Trinckle bietet nur 100 – 150 μm Schichtdicke. Die geringere Schichtdicke erzeugt eine glattere Oberfläche. Sie ist allerdings auch mit etwas höheren Kosten verbunden. Der gesinterter Kunststoff ist eines der günstigsten Materialien und relativ robust.

Das einzige Material, mit dem ein Modell farbig gedruckt werden kann, ist verklebter Gips. Mit diesem können etwas genauere Modelle hergestellt werden. Allerdings sind die Materialeigenschaften nicht ganz optimal, da das Material nicht sehr robust ist und leicht bricht. Außerdem ist die Oberfläche körnig und das Material nicht sehr abriebfest. Sculpteo bietet die Möglichkeit, einen Mattlack aufzubringen, der sich positiv auf die Abriebfestigkeit und Feuchtigkeitsresistenz des Gipses auswirkt.

Alumide sind als Druckmaterial für eine solche Krippenfigur weniger geeignet, da sie lediglich eine höhere Hitzebeständigkeit und Stabilität bieten als normaler Kunststoff. Nachteilig ist jedoch, dass Alumide weniger genau gedruckt werden können und somit für eine Figur lediglich höhere Kosten und kaum Vorteil bringen.

Kunstharz ist das Material, mit dem neben dem Metallguss am genauesten gedruckt werden kann. Es ist ein relativ teures Material, welches durch die hohe Lichtempfindlichkeit je nach Einsatzgebiet in Bezug auf Langlebigkeit durchaus problematisch sein kann. Bei Sculpteo lässt sich die Figur bei Verwendung dieses Materials nicht automatisch aushöhlen. Eine Aushöhlung ist jedoch prinzipiell möglich und wirkt sich positiv auf den Preis aus.

7.4. Webservice und Druckkosten

Sculpteo bietet einen vielseitigeren Webservice mit Aushöhlungsmöglichkeit. Es gibt auch Zusatzoptionen wie das Polieren von Kunststoff und unterschiedlichen Schichtdicken, oder

Mattlack für verklebten Gips. Außerdem erlaubt dieser Anbieter das Hochladen von großen Dateien, die auch als ZIP-Datei gepackt werden können. Eine Texturdatei kann hier je nach verwendetem Dateiformat für das Modell ebenso integriert werden.

Bei Sculpteo können relativ große Dateien hochgeladen werden. Es wird empfohlen, unter 50 MB zu verwenden. Dies ist vorteilhaft für die elektronische Vorverarbeitung der Daten. Es ist jedoch möglich, größere Dateien hochzuladen. Trinckle zum Beispiel erlaubt maximal lediglich 32 MB große Dateien. Eine größere erlaubte Dateigröße der Modelle ist bei Verwendung photogrammetrisch erfasster Modelle von großem Vorteil. Photogrammetrisch kann eine dichte Punktwolke mit einer großen Anzahl an Punkten generiert werden. Je nachdem, wie die vermaschte Punktwolke erzeugt wird, besteht das Modell aus sehr vielen Polygonen. Dies wiederum resultiert in einer großen Dateigröße. Wird das Modell ausgehöhlt, sind weitere Polygone notwendig, die den Innenraum definieren. Dadurch wird die Datei des Modells noch größer. Wenn diese Dateien ohne weitere Vorverarbeitung hinsichtlich der Größe hochgeladen werden können, vereinfacht das den Verarbeitungsprozess für einen 3D-Druck deutlich, da die vermaschten Punktwolken nicht auf weniger Polygone heruntergerechnet werden müssen, denn dies hat auch einen Einfluss auf den Detailgrad des Modells.

Die Preise der Anbieter unterscheiden sich teilweise. Da hier jedoch nur eine grobe Einschätzung geliefert werden soll, was ein 3D-Druck kostet und Sculpteo mehr Druckoptionen bietet, wird für einen Überblick über die Kosten nur Sculpteo verwendet.

Die bereits erwähnte Büste der Krippenfigur wurde hierfür auf der Webseite von Sculpteo hochgeladen. Zuerst werden die vom Anbieter automatisch ausgehöhlten Modelle betrachtet.

Verklebter Gips kostet farbig texturiert ca. 80 €. Die Software von Sculpteo wählt hier automatisch eine Wandstärke von über 4 mm. Die minimale Wandstärke des Materials beträgt 2 mm. Daher wird vermutlich eine dickere Wandstärke gewählt, um eine höhere Stabilität zu gewährleisten. Das Auftragen von Mattlack kostet bei dieser Modellgröße nur unwesentlich mehr. Massiv kostet dieser Druck ca. 140 €.

Mit gesintertem Kunststoff als Druckmaterial wird eine Wandstärke von etwas unter 2 mm verwendet. Da mit Kunststoff eine minimale Wandstärke von 0,8 mm möglich ist, wählt die Software ungefähr die doppelte Wandstärke. Bei rohem Kunststoff kostet ein Druck dieses Modells je nach Farbe zwischen 65 € und 75 €. Eine Politur kostet bei einem Modell dieser Größe ca. 5 € zusätzlich. Das Drucken mit 60 µm statt 100 – 150 µm Schichten ist eine interessanteste

Option für eine glattere Oberfläche. Diese erhöht den Preis um ca. 35 €. Durch das automatische Aushöhlen verringern sich die Kosten für einen Druck im Vergleich zum massiven Modell auf ungefähr ein Drittel des Preises.

Für einen 3D-Druck mit Kunstharz wurde das Modell mit Hilfe von Meshmixer ausgehöhlt. Hierbei wurde eine 4 mm dicke Wand gewählt. Die minimale Wandstärke von Kunstharz ist 2 mm. Einfarbig kostet ein solcher Kunstharzdruck ca. 200 €. Es besteht auch die Möglichkeit eines durchsichtigen Drucks für 310 €. Wird das Modell massiv gedruckt, verdoppeln sich die Kosten.

Das Drucken einzelner Körperteile stellt im Regelfall in Bezug auf die Größe kein Problem dar. Sollte jedoch eine gesamte Krippenfigur gedruckt werden, sind manche Druckverfahren nicht möglich. Die Drucker für die Druckverfahren haben unterschiedlich große Druckräume. Da Druckanbieter nicht die gleichen Drucker verwenden, bestehen hier Unterschiede. Die Krippenfigur ist 50 cm hoch. Der Druck bei Sculpteo mit gesinterterem Kunststoff bei 100 µm Schichtdicke ist das einzige Verfahren, bei dem ein Druck in dieser Größe nicht an seine Grenzen stößt. Der größte Druckraum hat hier Maße von ca. 67 x 56 x 36 cm. Bei 60 µm Schichtdicke steht nur ein Raum von 33 x 18 x 18 cm zur Verfügung, das reicht für ein Körperteil wie den Kopf aus, ist jedoch für die gesamte Figur zu klein. Mit Alumiden als Druckmaterial ist bei Sculpteo ein 50 x 30 x 30 cm großer Druck möglich. Diese Maße sind knapp, sollten jedoch ausreichend sein, um die Figur ohne Sockel zu drucken. Bei trinckle ist ein Druck der gesamten Figur nur aus verklebtem Kunststoff mit maximalen Maßen von 50 x 40 x 30 cm, möglich. Der Druck des Kopfes bzw. der Büste ist bei beiden Anbietern mit allen Kunststoffen möglich, lediglich der Druckraum für den Druck mit Metallen ist hier zu klein.

Ein Modell der gesamten Figur, das im Rahmen dieser Bachelorarbeit mit hoher Qualität berechnet wurde, hat durch eine hohe Punktdichte ohne weitere Reduktion im PLY-Format eine Größe von ca. 400 MB. Es ist nicht ganz trivial eine vermaschte Punktwolke so zu bearbeiten, dass die Datenmenge kleiner wird und der Informationsgehalt nicht leidet. Als ZIP-Datei gepackt wird die Datei auf ca. 140 MB verkleinert. Ein Hochladen bei Sculpteo ist in beiden Fällen möglich. Das einzig mögliche Material für einen 3D-Druck der gesamten Figur ist gesinterter Kunststoff, denn die Figur ist ca. 51 cm hoch. Die Kosten bei automatisch ausgehöhlter Figur, belaufen sich auf ca. 1300 €.

7.5. Zusammenfassung 3D-Druck

Die unterschiedlichen Druckmethoden haben ihre Vor- und Nachteile. Es ist entscheidend, wie das gedruckte Modell verwendet werden soll. Der verklebte Gips ist eine gute Wahl, wenn das Modell mit der erfassten Textur gedruckt werden soll. Ein Modell aus gesintertem Kunststoff bietet die höchste Stabilität. Allerdings kann hier nur einfarbig gedruckt werden. Die genaueste Oberflächenwiedergabe erhält man mit Kunstharz. Dieses Material ist robuster als verklebter Gips. Es ist aufgrund seiner Lichtempfindlichkeit jedoch nicht sehr langlebig und zudem das teuerste Druckverfahren.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde die Büste in Abbildung 31 in Farbe aus Gips privat gedruckt und mit einer Mattlackschicht überzogen.

Da die gedruckten Modelle nicht aus mehreren Materialien zur Verfügung stehen, kann jedoch nicht abschließend beurteilt werden, ob aufgrund des Detailgrads oder der Oberflächenbeschaffenheit andere Druckverfahren zu bevorzugen sind.

Aufgrund der Materialeigenschaften bietet sich der verklebte Gips als Druckmaterial an. Da eine Krippenfigur ein Betrachtungsgegenstand ist, der nicht sonderlich starken physikalischen Krafteinwirkungen unterliegt, sollte die Robustheit des Materials ausreichend sein. Der farbige Druck ermöglicht eine Wiedergabe der Bemalung der Figur und kann einen guten Gesamteindruck der Gesichtszüge liefern. Durch die Einfachheit der Gesichtsformen sind die Genauigkeit und der Detailgrad dieses Druckverfahrens ausreichend. Die Farbe ist nicht ganz originalgetreu und man kann die einzelnen Schichten erkennen. Insgesamt ist die Originaltreue der gedruckten Büste jedoch sehr zufriedenstellend.

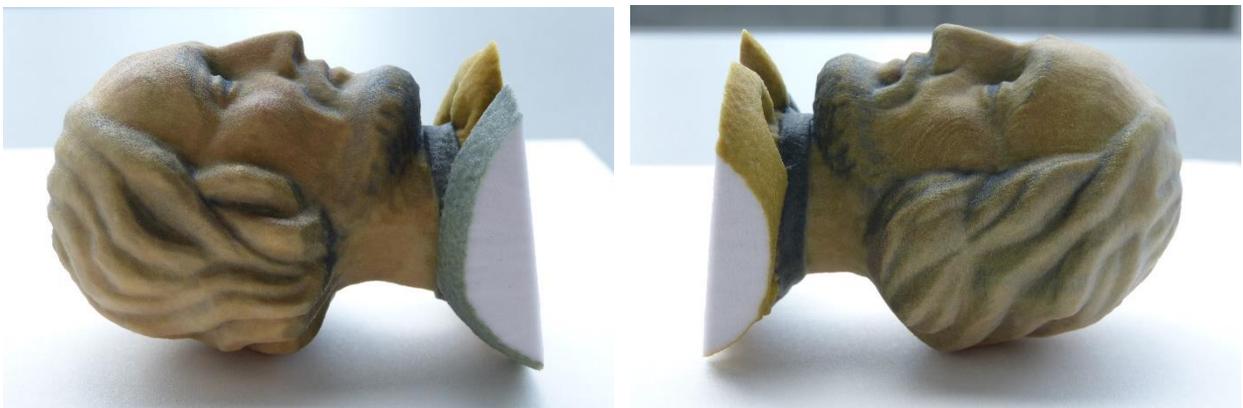


Abbildung 32: Gedruckte Büste aus verklebtem Gips in Farbe mit Mattlackschicht

Der verklebte Kunststoff ist als preiswerteste Druckmethode ebenfalls eine gute Wahl für die Wiedergabe solcher Krippenfiguren. Aufgrund der Größe der Figuren kommt für einen Druck der gesamten Figur nur die Druckmethode mit gesinterem Kunststoff in Frage.

Moderne 3D-Druckverfahren bieten eine gute Möglichkeit, mittels Photogrammetrie dreidimensional erfasste Objekte als physikalisches Modell zu replizieren. Es kann natürlich nicht davon ausgegangen werden, dass ein Druck eine exakte Kopie des Originals darstellt. Bereits die dreidimensionale Rekonstruktion, die für die Erfassung der Figur notwendig ist, kann keine perfekten Ergebnisse liefern. Der 3D-Druck verfälscht das Ergebnis noch weiter.

Die druckbaren Materialien unterscheiden sich stark von Holz als Werkstoff. Holz hat, entsprechend bearbeitet, eine glatte Oberfläche und ist sehr robust. Die in Frage kommenden Druckmaterialien sind Kunststoffe und haben je nach Material unterschiedlich raue Oberflächen.

8. Fazit

Die angeführten Vergleiche haben gezeigt, dass die für die Rekonstruktion notwendige Aufnahmekonfiguration je nach gewünschtem Ergebnis angepasst werden kann. Soll zum Beispiel nur eine bestimmte Fläche der Figur erfasst werden, kann ein einziger Aufnahmering das genaueste Ergebnis liefern. Es muss jedoch mit einer unvollständigen Rekonstruktion der jeweiligen Fläche bedingt durch kleinere Rekonstruktionslöcher gerechnet werden. Für eine vollständige Erfassung der Figur sind mehrere Aufnahmeringe von Vorteil. Die Unterschiede in den aus Bildern in 5° und 10° Schritten rekonstruierten Punktwolken sind minimal. Bei der Rekonstruktion aus Bildern mit einer Bildfrequenz von 20° gehen Gesichtsdetails verloren. Je kleiner die Winkel zwischen den Bildern sind, desto vollständiger und detailreicher ist die Rekonstruktion der Krippenfigur. Allerdings wird mit größerem Winkel die Genauigkeit der Rekonstruktion etwas besser wie zum Beispiel die quantitativen Vergleiche der photogrammetrisch erfassten Punktwolken mit den Punktwolken aus den Streifenprojektoraufnahmen ergeben. Daher empfehlen sich ein Winkel von 10° zwischen den Fotos und mindestens drei Aufnahmeringe für die Rekonstruktion einer Krippenfigur. Dies stellt einen guten Kompromiss zwischen vollständiger Erfassung, geometrischer Genauigkeit und Zeitaufwand dar. Soll eine Figur jedoch absolut vollständig erfasst werden, liefert ein Winkel von 5° zwischen den Fotos das beste Ergebnis und mehr als drei Aufnahmeringe können die Qualität der Punktwolke in Bezug auf die Vollständigkeit noch weiter verbessern.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit erwies sich PhotoScan als die deutlich vielseitigere und zuverlässigere Software, die für eine Rekonstruktion von Krippenfiguren empfohlen werden kann. ReCap 360 konnte nicht die erwünschten Ergebnisse liefern. Die verfügbare Rechenleistung entscheidet bei der Verwendung von PhotoScan maßgeblich über das erreichbare Ergebnis und die für eine Berechnung benötigte Zeit. Denn für eine sehr präzise und detaillierte Rekonstruktion einer Krippenfigur sollte eine hohe bis sehr hohe Berechnungsqualität gewählt werden. Abhängig von der Größe des Bildverbandes wird genügend Arbeitsspeicher für eine Berechnung in dieser Qualität benötigt. Die mittlere Qualitätsstufe dient eher zu einer anschaulichen Dokumentation der Figur.

Bei den Aufnahmen hat sich gezeigt, dass eine gleichmäßige Beleuchtung sehr wichtig für eine detailreiche und vollständige Rekonstruktion ist. Daher erwies es sich von Vorteil, die Kamera stationär aufzustellen und die Figur um die eigene Achse zu drehen. Mit einem einfarbigen

Hintergrund und einem Foto des Aufnahmehintergrundes zu jeder Kameraposition, so dass eine einfache Maskierung ermöglicht wurde, traten mit PhotoScan keine Probleme bei der Berechnung der Kameraausrichtung auf. Die gefundenen Verknüpfungspunkte auf der Figur reichten für die Berechnung der Ausrichtung der Fotos mit mehr als einem Aufnahmering in jeder gewählten Aufnahmekonfiguration aus. Auch mit nur einem Aufnahmering kam es bei gleichmäßiger Bildverteilung zu keinerlei Problemen.

Die Aufnahmen können auch unter nicht optimalen Beleuchtungsbedingungen durchgeführt werden. Semiprofessionelle Kameraausrüstung und grundlegende Fotografiekenntnisse sind jedoch entscheidende Faktoren für eine präzise und vollständige Rekonstruktion der Krippenfiguren. Denn die Bildqualität wirkt sich unmittelbar auf die erreichbare Qualität der rekonstruierten Punktwolke aus.

Der kleinste empfohlene Bildverband für eine vollständige und originalgetreue Erfassung einer Krippenfigur besteht aus drei Aufnahmeringen mit 10° Winkel zwischen den Fotos. Für die fotografische Erfassung einer Figur werden somit ca. 10 Minuten pro Ring und insgesamt 30 Minuten benötigt. Diese Werte beziehen sich auf die Spiegelreflexkamera Nikon D800E. Sie sind kamera- und beleuchtungsabhängig und können zum Beispiel mit kürzeren Belichtungszeiten und anderen Einstellungen kürzer ausfallen.

Es ist davon auszugehen, dass der 3D-Druck der erfassten Modelle in ausreichender Qualität möglich ist. Die Genauigkeit des Drucks sollte kaum einen negativen Einfluss auf die Genauigkeit einer gedruckten Figur im Vergleich zu einem digitalen Modell aufweisen. Um Figuren auszustellen oder generell als Anschauungsobjekt sind gedruckte Krippenfiguren durchaus vorstellbar. Ob eine gedruckte Figur rein optisch als Ersatz für eine handgeschnitzte Krippenfigur dienen kann muss im Zweifelsfall näher betrachtet werden.

Mit professioneller Kameraausrüstung sind die erreichbaren Qualitäten der dichten Punktwolken mittels Photogrammetrie sehr zufriedenstellend. Sie kommen der realen Krippenfigur sehr nahe und stellen eine detailreiche, originalgetreue und relativ vollständige dreidimensionale Erfassung dar.

Literaturverzeichnis

- Agisoft. (30. April 2015). *Agisoft PhotoScan Full Change Log*. Abgerufen am 24. Juni 2015 von <http://www.agisoft.com/downloads/installer/>
- Brand, J. (24. Dezember 2014). Die Krippe als Buch- und Studienprojekt. *Stuttgarter-Zeitung*. Abgerufen am 17. Juni 2015 von <http://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.heilig-geist-kirche-in-stuttgart-ost-die-krippe-als-buch-und-studienprojekt.bdaaa8bc-7596-449d-9e79-82ee28fd2604.html>
- Cassaignau, A. (30. April 2015). *How to choose the right material for your 3D prints?* Abgerufen am 30. Juli 2015 von Sculpteo: <http://www.sculpteo.com/blog/2015/04/30/material-for-3d-prints/>
- Cassaignau, A. (29. Juli 2015). *Make beautiful 3D prints: understanding the layer thickness*. Abgerufen am 30. Juli 2015 von Sculpteo: <http://www.sculpteo.com/blog/2015/07/29/make-beautiful-3d-prints-understanding-the-layer-thickness/>
- Cassaignau, A. (30. April 2015). *Understanding our 60 µm layer thickness printing setting*. Abgerufen am 30. Juli 2015 von Sculpteo: <http://www.sculpteo.com/blog/2015/04/30/60%C2%B5m-layer-thickness-3d-printing/>
- Cramer, D. M. (2013). *Weihnachtskrippe von Walter Ohlhäuser*. Katholische Kirchengemeinde Heilig Geist, Stuttgart.
- digitalkamera.de. (a). *Nikon D800E Datenblatt*. (J.-M. Rupprecht, Herausgeber) Abgerufen am 12. Juli 2015 von <http://www.digitalkamera.de/Kamera/Nikon/D800E.aspx>
- digitalkamera.de. (b). *Panasonic Lumix DMC-FZ150 Datenblatt*. (J.-M. Rupprecht, Herausgeber) Abgerufen am 12. Juli 2015 von http://www.digitalkamera.de/Kamera/Panasonic/Lumix_DMC-FZ150.aspx
- digitalkamera.de. (c). *Panasonic Lumix DMC-FS16 Datenblatt*. (J.-M. Rupprecht, Herausgeber) Abgerufen am 12. Juli 2015 von [digitalkamera.de: http://www.digitalkamera.de/Kamera/Panasonic/Lumix_DMC-FS16.aspx](http://www.digitalkamera.de/Kamera/Panasonic/Lumix_DMC-FS16.aspx)
- digitalkamera.de. (d). *Nikon AF 20 mm 2.8 D Datenblatt*. (J.-M. Rupprecht, Herausgeber) Abgerufen am 20. August 2015 von http://www.digitalkamera.de/Objektiv/Nikon/AF_20_mm_28_D/10339.aspx

-
- digitalkamera.de. (e). *Nikon AF-S 85 mm F1.8 G Datenblatt*. (J.-M. Rupprecht, Herausgeber)
Abgerufen am 20. August 2015 von http://www.digitalkamera.de/Objektiv/Nikon/AF-S_85_mm_F18_G/38176.aspx
- Fritsch, D. (2015). *Nahbereichsphotogrammetrie: Kapitel 2 - Aufnahmeverfahren und Auswertemodelle*. Abgerufen am 25. Juni 2015 von Universität Stuttgart: Institut für Photogrammetrie; Vorlesungen für den Studiengang Geodäsie und Geo-Informatik (Master); Nahbereichsphotogrammetrie und Machine Vision: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/lehre/vorlesungen/master-Nah-MV/index.html>
- Fritsch, D. (2015). *Nahbereichsphotogrammetrie: Kapitel 3 - Kalibrierung*. Abgerufen am 25. Juni 2015 von Universität Stuttgart: Institut für Photogrammetrie; Vorlesungen für den Studiengang Geodäsie und Geo-Informatik (Master); Nahbereichsphotogrammetrie und Machine Vision: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/lehre/vorlesungen/master-Nah-MV/index.html>
- Haala, N. (8. Oktober 2014). *Automatische Punktübertragung und relative Orientierung*. Abgerufen am 25. Juni 2015 von Universität Stuttgart: Institut für Photogrammetrie; Vorlesungen für den Studiengang Geodäsie und Geo-Informatik (Master); Computer Vision zur bildbasierten Geodatenerfassung: http://www.ifp.uni-stuttgart.de/lehre/vorlesungen/master-Computer_Vision/index.html
- Haala, N. (8. Oktober 2014). *Bildorientierung durch Structure-from-Motion*. Abgerufen am 25. Juni 2015 von Universität Stuttgart: Institut für Photogrammetrie; Vorlesungen für den Studiengang Geodäsie und Geo-Informatik (Master); Computer Vision zur bildbasierten Geodatenerfassung: http://www.ifp.uni-stuttgart.de/lehre/vorlesungen/master-Computer_Vision/index.html
- Kock, R. (4. Februar 2014). *3D-Reparaturservice*. Abgerufen am 30. Juli 2015 von trinckle: <http://www.trinckle.com/repairservice.php>
- Kock, R. (4. Februar 2014). *Infoportal / 3D-Druckerbenchmark*. Abgerufen am 30. Juli 2015 von trinckle: http://www.trinckle.com/info_benchmark.php
- Kock, R. (4. Februar 2014). *Infoportal / 3D-Druckmethoden*. Abgerufen am 30. Juli 2015 von trinckle: http://www.trinckle.com/info_methods.php
- Kock, R. (4. Februar 2014). *Infoportal/Materialien*. Abgerufen am 30. Juli 2015 von trinckle: http://www.trinckle.com/info_materials.php

-
- Luhmann, T. (2000). *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag.
- Morel, J.-M., & Yu, G. (22. April 2009). *ASIFT: A New Framework for Fully Affine Invariant Image Comparison*. Abgerufen am 23. Juli 2015 von SIAM: <http://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/080732730?journalCode=sjisbi>
- Pasumansky, A. (2. Juli 2012). *Agisoft Community Forum*. Abgerufen am 24. Juni 2015 von Agisoft: <http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=558.0>
- Sculpteo. (a). *Alumide*. Abgerufen am 30. Juli 2015 von <http://www.sculpteo.com/de/alumide-werkstoff>
- Sculpteo. (b). *Brass*. Abgerufen am 30. Juli 2015 von <http://www.sculpteo.com/de/messing-material/>
- Sculpteo. (c). *Detail resin*. Abgerufen am 30. Juli 2015 von <http://www.sculpteo.com/de/harzmaterial>
- Sculpteo. (d). *Multicolor*. Abgerufen am 30. Juli 2015 von <http://www.sculpteo.com/de/multicolor-material-de>
- Sculpteo. (e). *Plastic*. Abgerufen am 30. Juli 2015 von <http://www.sculpteo.com/de/kunststoff-material>
- Sculpteo. (f). *Sterling silver*. Abgerufen am 30. Juli 2015 von <http://www.sculpteo.com/de/silber-material>
- Sculpteo. (g). *Find the material that suits you best*. Abgerufen am 30. Juli 2015 von <http://www.sculpteo.com/de/fundmaterial-das-ihnen-am-besten-passt>
- Sculpteo's 3D Printing Materials*. (2015). Abgerufen am 30. Juli 2015 von Sculpteo: <http://www.sculpteo.com/de/materialien>
- Semyonov, D. (3. Mai 2011). *Agisoft Community Forum*. Abgerufen am 13. Juli 2015 von Agisoft: http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=2747.0;prev_next=prev#new
- Szeliski, R. (3. September 2010). *Computer Vision: Algorithms and Applications*. (Springer, Hrsg.) Abgerufen am 18. Juni 2015 von <http://szeliski.org/Book/>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Krippenfiguren der Gemeinde Heilig Geist (Quelle: Privat Michael Cramer).....	2
Abbildung 2: Punktberechnung im Stereofall bei bekannter äußerer und innerer Orientierung	8
Abbildung 3: Codiertes Lichtschnittverfahren (nach STAHS & WAHL 1990) (Quelle: Luhmann, 2000, S. 469)	9
Abbildung 4: Kameraposition bei stationärer Kamera in PhotoScan.....	14
Abbildung 5: Aufnahme mit Drehteller und stationärer Kamera (Foto: Jakob Schmidt)	15
Abbildung 6: Streifenprojektoraufnahme (Foto: Jakob Schmidt).....	16
Abbildung 7: Einstellung PhotoScan: Fotoausrichtung (a) und Mesh-Generierung (b).....	19
Abbildung 8: Kameraposition bei bewegter Kamera (a) und stationärer Kamera (b).....	23
Abbildung 9: Vermaschte Punktwolken generiert mit bewegter (a) und stationärer Kamera (b) mit zwei Ringen bei mittlerer Berechnungsqualität in PhotoScan, Kamera: D800E	24
Abbildung 10: Mittlerer Berechnungsqualität in PhotoScan mit Bildern der DMC-FS16 (a) und der DMC-FZ150 (b)	24
Abbildung 11: Vermaschte Punktwolken bei hoher Berechnungsqualität in PhotoScan mit bewegter Kamera und unterschiedlichen Kamerasystemen. Nikon D800E (a), Panasonic DMC-FS16 (b) und DMC-FZ150 (c)	25
Abbildung 12: Vermaschte Punktwolken mit Winkeln von 5° (a), 10° (b) und 20° (c) zwischen den Bildern und sechs Aufnahmeringen (Fotos: Nikon D800E, Kamera stationär, Berechnungsqualität: mittel)	26
Abbildung 13: Zusammengefügte Punktwolke aus sechs einzeln generierten Punktwolken	26
Abbildung 14: Vermaschte Punktwolken mit mittlerer Berechnungsqualität aus unterschiedlich vielen Aufnahmeringen: 1 Ring (a), 2 Ringe (b) und 3 Ringe (c) mit 5° Winkel zwischen den Bildern, Kamera: Nikon D800E	27
Abbildung 15: Vollständigkeit der Erfassung des Gesichts mit einem Aufnahmering (a), 2 Ringen (b) und 3 Ringen (c) am Beispiel der vermaschten Punktwolken aus Fotos im 10° Winkel, Kamera: Nikon D800E.....	28
Abbildung 16: Vollständigkeit der Rekonstruktion der gesamten Figur mit unterschiedlich vielen Aufnahmeringen und unterschiedlichen Winkeln zwischen den Bildern: 5° und 1 Ring (a), 5° und 3 Ringe (b) und 10° und 3 Ringe (c)	28

Abbildung 17: Fehlgeschlagene Rekonstruktion in ReCap 360 mit bewegter Kamera, Fotos: Nikon D800E	29
Abbildung 18: Vermaschte Punktwolken mit ReCap 360 (a und c) und mit PhotoScan (b und d) generiert. Bilder DMC-FZ150 (a und b) und DMC-FS16 (c und d)	30
Abbildung 19: Fehlerhafte vermaschte Punktwolken mit ReCap 360 generiert, Bilder im 5° (a) und im 10° Winkel (b)	31
Abbildung 20: Mit einem Streifenprojektor generierte vermaschte Punktwolke des Gesichts der Krippenfigur	32
Abbildung 21: Rekonstruktion der Hände aus allen sechs Ringen mit einem Winkel von 5° zwischen den Bildern, vermaschte Punktwolken (a und b) und farbige dichte Punktwolke (c)	33
Abbildung 22: Vermaschte Punktwolke an den Händen mit 2 Ringen (a) und 4 Ringen (b) generiert	33
Abbildung 23: Vermaschte Punktwolke der Hände aus 6 Ringen mit Bildern im 10° (a) und 20° Winkel (b)	34
Abbildung 24: Vermaschte Punktwolke der Hände mit 5° (250 Fotos) (a) und 10° Winkel zwischen den Bildern (b)	34
Abbildung 25: Ergebnis einer vermaschten Punktwolke mit einer weißen Wand als Aufnahmehintergrund Fotos: Nikon D5200, Berechnungsqualität PhotoScan: mittel.....	35
Abbildung 26: Vermaschte Punktwolken mit weißer Wand (a) und schwarzem Stoff (b) als Hintergrund. Figur vor weißer Wand mit maskiertem Hintergrund (c)	36
Abbildung 27: Textur in PhotoScan: Farbige vermaschte Punktwolke (a), Texturierte vermaschte Punktwolke (b) und fehlgeschlagene Texturierung (c)	37
Abbildung 28: Foto des Kopfes der Josef Krippenfigur (a) und farbige Punktwolke aus einem Ring mit 5° Winkel zwischen den Bildern (b)	38
Abbildung 29: Distanz von Punktwolke aus 3 Ringe zu 6 Ringen, je 10° zwischen Bildern in CloudCompare	44
Abbildung 30: Zwei unterschiedliche Aufnahmekonfigurationen mit vier Ringen	48
Abbildung 31: Ausgehöhlte Büste in Meshmixer	55
Abbildung 32: Gedruckte Büste aus verklebtem Gips in Farbe mit Mattlackschicht	63
Abbildung 33: Vollformatige Aufnahme von oben (a) und unten (b), Nahaufnahme (c) vor schwarzem Stoffhintergrund auf Drehteller mit Skalen	81

Abbildung 34: Kameraposition im ersten Schritt, die blauen Flächen symbolisieren einzelne Fotos.....	82
Abbildung 35: Kameraposition im zweiten Schritt, die blauen Flächen symbolisieren einzelne Fotos.....	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Kameras (Quelle: digitalkamera.de, a - c).....	18
Tabelle 2: Anzahl Verknüpfungspunkte und Größe der dichten Punktwolke mit bewegter Kamera in PhotoScan	39
Tabelle 3: Anzahl Verknüpfungspunkte und Größe der dichten Punktwolke mit stationärer Kamera, mittlere Berechnungsqualität in PhotoScan (PS).....	40
Tabelle 4: Anzahl Verknüpfungspunkte und Größe der dichten Punktwolke mit stationärer Kamera, hohe und sehr hohe Berechnungsqualität in PhotoScan	40
Tabelle 5: Distanzen zwischen den dichten Punktwolken aus unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen zu den Referenzpunktwolken, die mit einem und mit sechs Ringen bei mittlerer Berechnungsqualität und 5° Winkel zwischen den Fotos rekonstruiert wurden	45
Tabelle 6: Distanzen zwischen den dichten Punktwolken aus unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen zu den Referenzpunktwolken, die in hoher Berechnungsqualität aus einem Ring mit 5° Winkel zwischen den Fotos und aus sechs Ringen mit 10° Winkel rekonstruiert wurden	46
Tabelle 7: Distanzen zwischen den dichten Punktwolken aus unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen zu der Referenzpunktwolke, die aus der vermaschten Punktwolke der genauesten Streifenprojektoraufnahme generiert wurde	51
Tabelle 8: Distanzen zwischen den dichten Punktwolken aus unterschiedlichen Aufnahmekonfigurationen zu den Referenzpunktwolken, die aus sechs Ringen bei unterschiedlicher Berechnungsqualität mit 5° Winkel zwischen den Fotos rekonstruiert wurden	79

Anhang

- **Anhang 1:**
USB-Stick mit Bachelorarbeit in Digitalform und den im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Daten
- **Anhang 2: Erläuterung zur Datenstruktur des Datenträgers**
- **Anhang 3: Vollständige Ausführung der Tabelle 5 Seite 45**
- **Anhang 4:**
Anleitung: Fotografische Aufnahme von Krippenfiguren zur photogrammetrischen Rekonstruktion

Anhang 1:

USB-Stick mit Bachelorarbeit in Digitalform und den im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Daten.

Anhang 2: Erläuterung zur Datenstruktur des Datenträgers

Die erfassten und berechneten Daten dieser Bachelorarbeit sind in digitaler Form beigelegt.

Die Struktur dieser Daten wird hier erläutert.

1. Erfassung:

Dieser Ordner beinhaltet alle Rohdaten. Die Fotos für die photogrammetrische Rekonstruktion und die vermaschten Punktwolken, welche das direkte Ergebnis der Streifenprojektoraufnahmen sind. Die Ordner sind nach erfasster Figur und verwendeter Kamera benannt. Die Zusätze "bewegt" und "stationaer" beziehen sich auf das Aufnahmeverfahren.

- ▼  1_Erfassung
 - ▼  Bilder
 - ▼  Hirte
 - >  Nikon_D800E_Brennweite-85mm_stationaer
 - ▼  Josef
 -  NikonD800E_Brennweite-20mm_bewegt
 - >  NikonD800E_Brennweite-85mm_stationaer
 -  PanasonicLumixDMC-FS16_bewegt
 -  PanasonicLumixDMC-FZ150_bewegt
 - ▼  Maria
 - >  NikonD800E_Brennweite-85mm_stationaer
 - ▼  Streifenprojektor
 -  Josef
 -  Maria

2. Verarbeitung:

Der Ordner "Verarbeitung" beinhaltet alle PhotoScan-Dateien und die vermaschten Punktwolken aus ReCap 360 im OBJ-Format. Auch hier sind die Dateien zuerst nach Figur und dann nach verwendeter Kamera und Aufnahmeverfahren sortiert. Die PhotoScan-Dateien sind nach Kamera, Figur und Berechnungsqualität benannt. Die Dateien, welche aus Aufnahmen mit stationärer Kamera berechnet wurden, beinhalten darüber hinaus Zusatzinformationen über die Aufnahmekonfiguration. Die Zahlen 5, 10 und 20 stehen hier für den Winkelabstand zwischen den einzelnen Fotos. Die Bezeichnung mit "1Ring" bis "6Ringe" benennt die Anzahl der verwendeten Aufnahmeringe. Teilweise beinhalten die Unterordner Dateien, in denen Marker und Masken separat abgespeichert sind.

- ▼ 2_Verarbeitung
 - ▼ PhotoScan
 - ▼ Hirte
 - NikonD800E_Brennweite-85mm_stationaer
 - ▼ Josef
 - NikonD800E_Brennweite-20mm_bewegt
 - > NikonD800E_Brennweite-85mm_stationaer
 - PanasonicDMC-FS16_bewegt
 - PanasonicDMC-FZ150_bewegt
 - ▼ Maria
 - NikonD800E_Brennweite-85mm_stationaer
 - ▼ ReCap 360
 - ▼ Josef
 - > NikonD800E_Brennweite-20mm_bewegt
 - > NikonD800E_Brennweite-85mm_stationaer
 - > PanasonicDMC-FS16_bewegt
 - > PanasonicDMC-FZ150_bewegt

3. Auswertung:

Hier sind alle Dateien der Auswertung beinhaltet. Im Ordner "Punktwolken_Josef_Kopf_skaliert_registriert" liegen alle Punktwolken der Köpfe. Diese sind in Metern skaliert und - für eine schnellere Registrierung auf Referenzpunktwolken - auf die Punktwolke "Josef_Kopf_20_mittel – Cloud.ply" registriert. Im Ordner Streifenprojektor befinden sich die Punktwolken, welche aus den vermaschten Punktwolken generiert wurden. Mit ReCap 360 generierte Punktwolken tragen diese Information im Namen. Auch diese Punktwolken sind aus vermaschten Punktwolken generiert.

- ▼  3_Auswertung
 -  Distanz_zu-5Grad_1Ring_hoch
 -  Distanz_zu-5Grad_1Ring_mittel
 -  Distanz_zu-5Grad_6Ringe_mittel
 -  Distanz_zu-10Grad_6Ringe_hoch
 -  Distanz_zu-Streifenprojektor1
- ▼  Punktwolken_Josef_Kopf_skaliert_registriert
 -  NikonD800E_Brennweite-20mm_bewegt
 -  NikonD800E_Brennweite-85mm_stationär
 -  PanasonicLumixDMC-FS16_bewegt
 -  PanasonicLumixDMC-FZ150_bewegt
 -  Streifenprojektor

4. 3D-Druck

Der Ordner 3D-Druck beinhaltet eine Auswahl an Punktwolken, die für einen 3D-Druck optimiert wurden. Alle Dateien sind auf Zentimeter skaliert und wasserdicht. Auf ähnliche Weise wie im Ordner "Auswertung" sind die Dateien nach der Ursprungspunktwolke und den verwendeten Aufnahmekonfigurationen und Berechnungsverfahren benannt. Manche Modelle sind ausgehöhlt. Die Wandstärke wird in diesen Fällen im Dateinamen angegeben.

- ▼  4_3D-Druck
 -  skaliert_cm

Anhang 3: Vollständige Ausführung der Tabelle 5 Seite 45

Tabelle 8: Distanzen zwischen den dichten Punktwolken aus unterschiedlichen Aufnahmeconfigurationen zu den Referenzpunktwolken, die aus sechs Ringen bei unterschiedlicher Berechnungsqualität mit 5° Winkel zwischen den Fotos rekonstruiert wurden

PhotoScan:	Ringe	Bilder	Qualität	Referenz, Werte in [mm]								
				5° 6 Ringe mittel				5° 1 Ring mittel				
				30 %	60 %	90 %	Mittel	30 %	60 %	90 %	Mittel	
D800E 5° stationär	1	72	mittel	0,09	0,13	0,21	0,14	-				
			hoch	0,08	0,11	0,17	0,12	0,08	0,11	0,17	0,11	
	2	144	mittel	0,10	0,14	0,21	0,14	0,10	0,14	0,28	0,18	
	3	218		0,10	0,14	0,24	0,16	0,09	0,13	0,22	0,16	
	4	280		0,08	0,11	0,15	0,10	0,08	0,12	0,19	0,14	
6	432	-				0,08	0,11	0,17	0,14			
D800E 10° stationär	1	36	mittel	0,09	0,12	0,17	0,11	0,07	0,10	0,14	0,10	
			hoch	0,09	0,13	0,22	0,14	0,09	0,13	0,20	0,12	
	2	72	mittel	0,09	0,13	0,19	0,12	0,10	0,13	0,24	0,17	
			hoch	0,09	0,13	0,19	0,13	0,09	0,12	0,20	0,15	
	3 (1.)	108	mittel	0,09	0,12	0,18	0,12	0,10	0,13	0,22	0,15	
	3 (2.)			0,10	0,13	0,23	0,16	0,10	0,13	0,24	0,17	
	3 (1.)	144	hoch	0,09	0,13	0,21	0,13	0,09	0,13	0,23	0,15	
	4 (1.)			0,08	0,11	0,15	0,10	0,90	0,12	0,18	0,14	
	4 (2.)	180	mittel	0,08	0,11	0,15	0,10	0,08	0,11	0,17	0,13	
	5			0,09	0,12	0,17	0,12	0,08	0,11	0,17	0,13	
6	216	mittel	0,08	0,10	0,15	0,10	0,08	0,11	0,17	0,13		
		hoch	0,09	0,13	0,20	0,13	0,09	0,13	0,20	0,14		
D800E 20° stationär	6	108	mittel	0,09	0,12	0,17	0,12	0,08	0,11	0,17	0,12	
			hoch	0,09	0,14	0,23	0,14	0,09	0,13	0,21	0,14	
D800E 5° bewegt	2+	167	mittel	0,21	0,46	0,94	0,46	0,23	0,47	0,97	0,50	
			hoch	0,14	0,22	0,44	0,23	0,14	0,25	0,53	0,28	
DMC-FS16 ca. 10° bewegt	2+	106	mittel	0,25	0,53	1,09	0,54	0,26	0,56	1,16	0,58	
			hoch	0,23	0,50	1,00	0,49	0,24	0,51	1,12	0,56	
DMC-FZ150 ca. 5° bewegt	2+	197	mittel	0,27	0,56	1,22	0,58	0,27	0,60	1,26	0,63	
			hoch	0,17	0,33	0,73	0,35	0,18	0,35	0,80	0,41	
Streifenprojektor- Aufnahme	-	-	1	0,09	0,13	0,22	0,13	0,09	0,12	0,20	0,12	
			8	0,09	0,13	0,22	0,13	0,09	0,12	0,20	0,12	
			11	0,10	0,14	0,23	0,14	0,09	0,12	0,20	0,12	
ReCap 360:												
D800E 5° stationär	2+	250	-	0,1	0,15	0,26	0,15	0,1	0,13	0,24	0,14	
	6	218		0,1	0,14	0,25	0,15	0,1	0,13	0,24	0,14	
DMC-FS16 bew.	2+	106	-	0,23	0,49	1,11	0,54	0,24	0,52	1,17	0,59	
DMC-FZ150 bew.		197		0,17	0,31	0,68	0,33	0,19	0,35	0,78	0,41	

Anhang 4:

Anleitung:

Fotografische Aufnahme von Krippenfiguren zur photogrammetrischen Rekonstruktion

Diese Anleitung dient zur fotografischen Aufnahme von Krippenfiguren, um diese dreidimensional mittels Photogrammetrie zu rekonstruieren.

Für eine solche Aufnahme ist es wichtig, dass so viele Details der Figur wie möglich abgebildet werden. Daher ist es wichtig, dass eine Figur weder unter- noch überbelichtet ist. Auch Schattenwurf auf der Figur ist zu vermeiden.

Benötigte Ausrüstung:

Die gesamte Aufnahme einer Krippenfigur dauert ungefähr 30 Minuten. Für eine qualitativ hochwertige Aufnahme empfiehlt sich eine hochwertige Kamera, idealerweise mit APS-C- oder Kleinbildsensor. Die Brennweite des Objektivs sollte um die 50 mm liegen beziehungsweise sich im Bereich von ca. 20 - 80 mm befinden. Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass eine Krippenfigur möglichst vollformatig fotografiert werden kann, ohne die Kamera sehr weit weg von der Figur oder sehr nahe aufstellen zu müssen.

Ein Stativ ist bei dieser Aufnahme unerlässlich. Es verbessert nicht nur die Bildqualität durch Verwacklungsfreiheit, sondern ist auch für die im Nachfolgenden erläuterte Aufnahmekonfiguration von Bedeutung. Ein Drehteller erleichtert die Aufnahme und kann das 3D-Modell verbessern, welches aus den Fotos generiert wird. Die Figur muss in jedem Fall um die vertikale Achse gedreht werden. Dabei sollte sie immer an der gleichen Stelle stehen, um nicht aus dem Bild zu verschwinden, denn die Kamera ist während der Aufnahme auf den gleichen Punkt beziehungsweise Bereich ausgerichtet. Wenn kein Drehteller zur Verfügung steht, sollte eine Unterlage verwendet werden, auf die die Figur gestellt werden kann. Hierbei muss bedacht werden, dass die Unterlage mit der Figur mitgedreht wird und sich die Position und Ausrichtung der Figur auf dieser Unterlage während der gesamten Aufnahme nicht verändern sollte. Gleiches gilt auch für einen Drehteller. Um die Größe der Figur bzw. des 3D-Modells später bestimmen zu können, sollten eine oder besser mehrere Skalen an dem Drehteller oder der Unterlage befestigt werden. Hierfür kann eine Skala mit Maßeinheit jeder Art verwendet werden. Diese sollte jedoch nicht spiegeln und auf den Fotos ablesbar sein.

Es ist wichtig, dass die Figur vor einem einfarbigen Hintergrund fotografiert wird. Idealerweise ist dieser weiß oder schwarz. Der Hintergrund muss jedoch nicht perfekt einfarbig sein, so dass zum Beispiel leichte Tapetenstrukturen oder Stofffalten bei einem verhängten Hintergrund nicht allzu sehr stören.

Der Aufnahmeraum sollte möglichst gleichmäßig ausgeleuchtet sein. Optimal ist eine indirekte diffuse Beleuchtung. Direkte Beleuchtung ist ungünstig, da der Schattenwurf auf der Figur die später folgende dreidimensionale Rekonstruktion der Krippenfiguren beeinträchtigt. Daher sollte es auch vermieden werden, ein Blitzlicht zu verwenden.

Präzises Arbeiten wirkt sich äußerst positiv auf die aus den Aufnahmen rekonstruierten 3D-Modelle aus.

Vorgehensweise:



Abbildung 33: Vollformatige Aufnahme von oben (a) und unten (b), Nahaufnahme (c) vor schwarzem Stoffhintergrund auf Drehteller mit Skalen

Zuerst wird die Krippenfigur mit oder ohne Drehteller vor dem einfarbigen Hintergrund aufgestellt. Die Figur wird in die Mitte des Drehtellers gestellt und muss um 360° um die vertikale Achse drehbar sein. Dann wird die Kamera mit Stativ so aufgestellt, dass die Figur vollformatig von leicht schräg oben abgebildet wird. Die blauen Flächen in Abbildung 34 stellen die Fotos dar und sollen die Aufnahmeposition verdeutlichen, siehe auch Abbildung 33a.

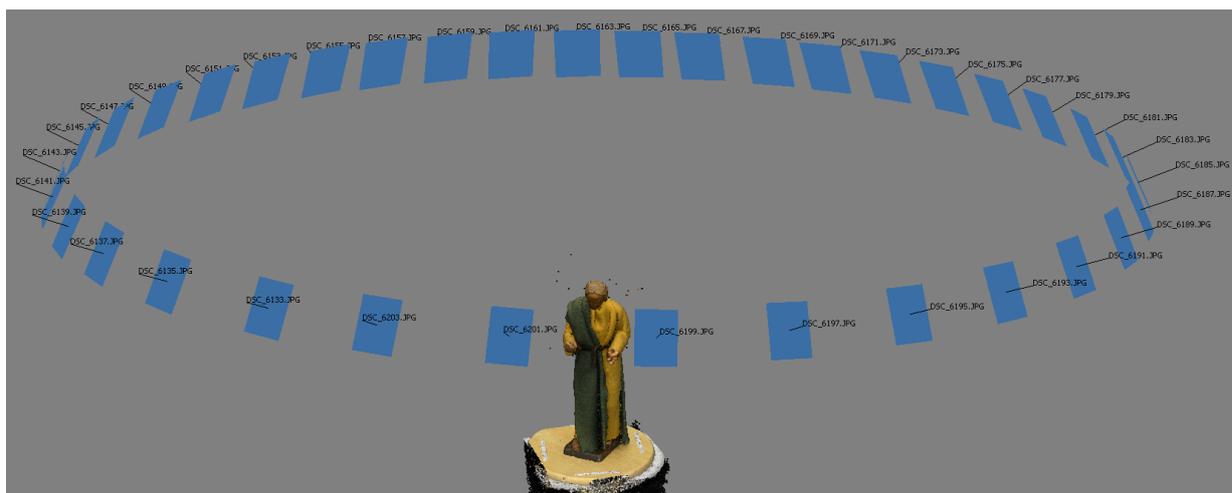


Abbildung 34: Kameraposition im ersten Schritt, die blauen Flächen symbolisieren einzelne Fotos

Nun werden die richtige Belichtungszeit und Blende eingestellt. Erfahrene Fotografen dürfen dies gerne manuell durchführen. Automatische Einstellungen genügen jedoch. Sollten sich die Lichtverhältnisse während der Aufnahme stark ändern, empfiehlt es sich, die Belichtung automatisch bei jedem Foto anpassen zu lassen oder diese Anpassung wenn nötig manuell durchzuführen. Bei manuell gewählter Blendeneinstellung wird eine größere Blendenzahl gewählt, so dass mit einer ausreichenden Schärfentiefe die gesamte Figur scharf abgebildet wird. Da die Schärfentiefe auch von der Brennweite abhängt und daher kein Richtwert angegeben werden kann, richtet sich dies nur an erfahrene Fotografen.

Der Drehteller mit der Figur wird wieder weggenommen. Anschließend wird mit der zuvor ausgerichteten Kamera ein Foto gemacht, welches den Aufnahmehintergrund der Figur abbildet. Der abgebildete Hintergrund sollte in Helligkeit und Farbe dem Hintergrund auf den folgenden Fotos mit Figur entsprechen. Daher ist es wichtig, dass alle Fotos möglichst gleich lange belichtet werden.

Anschließend wird der Drehteller mit der Figur wieder an die vorige Position zurückgestellt. Dann wird ein Foto der Figur gemacht. Als nächstes wird die Figur um die vertikale Achse um ca. 10° gedreht und erneut fotografiert. Dies wird so oft wiederholt, bis die Figur einmal aus allen Richtungen mit insgesamt 36 Bildern abgelichtet wurde. Es sollten nun 36 Bilder gemacht worden sein.

Im nächsten Schritt wird die Kameraposition verändert. Die Figur bleibt an der gleichen Stelle stehen. Die Kamera wird so aufgestellt, dass sie die Figur vollformatig von schräg unten abbildet, siehe Abbildung 35 und Abbildung 33b. Anschließend wird die Figur erneut in 10° Schritten 36-mal abfotografiert.

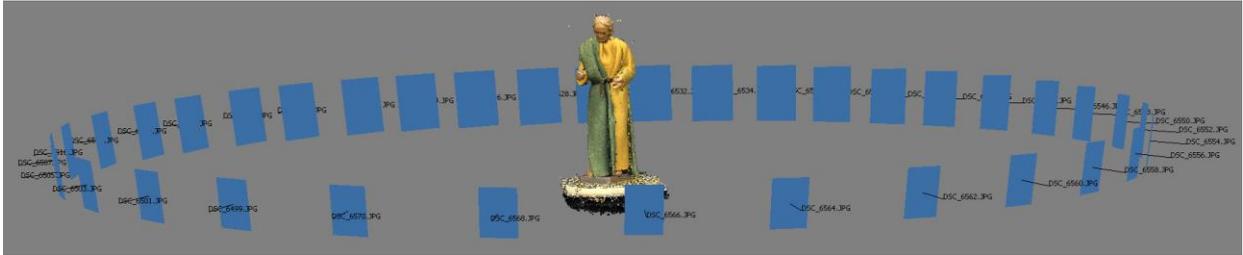


Abbildung 35: Kameraposition im zweiten Schritt, die blauen Flächen symbolisieren einzelne Fotos

Danach wird der Drehteller mit Figur erneut weggenommen, um den Hintergrund der Figur aus der zuletzt verwendeten Kameraposition zu fotografieren.

Der Drehteller mit der Figur wird darauf hin wieder zurückgestellt. Dann wird die Kamera neu aufgestellt und zwar näher an der Figur, so dass der fotografierte Ausschnitt nur noch den Oberkörper der Figur abdeckt. Es ist zu beachten, dass dieser scharf abgebildet wird. Idealerweise ist die Kamera so ausgerichtet, dass die Bildebene parallel zum Gesicht liegt, um diese möglichst vollständig abzudecken, siehe Abbildung 33c. In dieser Position werden erneut in 10° Schritten 36 Fotos gemacht. Danach wird wiederum die Figur weggenommen, um den Hintergrund zu fotografieren.

Die somit erzielten 108 Bilder genügen für eine originalgetreue Rekonstruktion.

Kurzanleitung:**Fotografische Aufnahme von Krippenfiguren zur photogrammetrischen Rekonstruktion**

Zeitaufwand: ca. 30 min

Empfohlene Ausrüstung:

- Kamera mit APS-C- oder Kleinbildsensor, Objektiv mit 20 – 80 mm Brennweite, Stativ
- Drehteller mit Skalen
- einfarbiger Hintergrund für die Aufnahmen

Worauf zu achten ist:

- gleichmäßige indirekte Beleuchtung der Figur, kein Blitz
- gut belichtete, scharfe und vollformatige Abbildung der Figur
- die Position der Figur auf dem Drehteller darf sich nicht verändern
- Aufnahmehintergrund mit gleichen Einstellungen wie Figur fotografieren

Durchführung:

1. Drehteller mit Figur vor einem einfarbigen Hintergrund aufstellen.
2. Ausrichten der Kamera von leicht schräg oben auf die Figur.
3. Drehteller mit Figur wegnehmen und ein Foto vom Aufnahmehintergrund machen.
4. Drehteller mit Figur zurückstellen.
5. Mit jeweils 10° Drehung der Figur insgesamt 36 Fotos machen.
6. Kamera auf niedrigere Höhe einstellen und auf die Figur von leicht schräg unten auf die Figur ausrichten.
7. Figur erneut mit jeweils 10° Drehung fotografieren.
8. Drehteller mit Figur wegnehmen und ein Bild vom Aufnahmehintergrund machen.
9. Drehteller mit Figur erneut aufstellen.
10. Kamera so aufstellen und ausrichten, dass eine großformatige Aufnahme vom Oberkörper der Figur möglich ist.
11. Den Oberkörper der Figur mit jeweils 10° Drehung insgesamt 36-mal fotografieren.
12. Drehteller mit Figur wegnehmen und ein Bild vom Aufnahmehintergrund machen.