

Kostengünstige 3D-Dokumentation von Skulpturen des Barockbildhauers Philipp Jakob Straub

THOMAS MIKL¹ & VIKTOR KAUFMANN¹

Zusammenfassung: Dieser Beitrag beschreibt zwei kostengünstige Konzepte zur Erstellung von maßstabsgetreuen photo-texturierten 3D-Modellen von Skulpturen des Barockbildhauers Philipp Jakob Straub (1706-1774) unter Verwendung von Digitalkameras, einer Totalstation und kommerzieller 3D-Auswertesoftware. Die beiden Konzepte wurden im Zuge eines Auftrages des Instituts für Kunstgeschichte der Karl-Franzens-Universität Graz von der Arbeitsgruppe für Fernerkundung und Photogrammetrie des Instituts für Geodäsie an der Technischen Universität Graz entwickelt und für mehrere Skulpturen in Graz und in der benachbarten Südoststeiermark umgesetzt. Der Hintergrund für diesen Auftrag ist das EU-Projekt „Tracing the Art of the Straub Family“, welches das Werk des erwähnten Barockbildhauers dokumentieren und für klassische und moderne Medien zugänglich machen soll.

1 Einleitung

Im Rahmen des EU-Projektes „Tracing the Art of the Straub Family“ (TRARS 2018) sollten im Auftrag des Instituts für Kunstgeschichte der Karl-Franzens-Universität Graz von der Arbeitsgruppe für Fernerkundung und Photogrammetrie des Instituts für Geodäsie an der Technischen Universität Graz exemplarisch mehrere Skulpturen des Barockbildhauers Philipp Jakob Straub (1706-1774) in Graz und in der benachbarten Südoststeiermark dreidimensional vermessen und entsprechende Visualisierungen in Form von photo-texturierten 3D-Modellen bereitgestellt werden. Das übergeordnete Ziel des EU-Projektes ist es, das Werk des Bildhauers zu dokumentieren und dieses für klassische und moderne Medien zugänglich zu machen.

Die Herausforderung für die Umsetzung der Auftragsarbeit war es, ein kostengünstiges Konzept zu entwickeln, mit dem einerseits wichtige geometrische Kenngrößen der Skulpturen, wie ihre Höhe, Breite und Tiefe, bestimmt und andererseits auch photo-texturierte 3D-Modelle erstellt werden können. Bei den ausgewählten Skulpturen handelt es sich um lebensgroße Heiligendarstellungen aus Sandstein oder Holz, die zum Teil aufgrund ihrer exponierten Lage nur schwer zugänglich sind oder nur bei schlechten Lichtverhältnissen aufgenommen werden können. In diesem Beitrag werden die Arbeiten für vier ausgewählte Skulpturen exemplarisch erläutert (Tab. 1).

¹ Technische Universität Graz, Institut für Geodäsie, Arbeitsgruppe für Fernerkundung und Photogrammetrie, Steyrergasse 30/I, A-8020 Graz,
E-Mail: miki@student.tugraz.at, viktor.kaufmann@tugraz.at

Tab. 1: Name, Lage und Eigenschaften der Skulpturen

Name	Lage	Eigenschaften
Heiliger Leonhard	Mureckerstraße 18, 8083 St. Stefan im Rosental	freistehende und frei zugängliche Sandsteinfigur
Maria Immaculata	Mariahilferstraße 9, 8020 Graz	Eckstatue aus Sandstein im ersten Obergeschoss
Mater Dolorosa	Minoritenkirche Mariahilf, Mariahilferplatz 3, 8020 Graz	Wandstatue aus Holz im Innenraum einer Kirche
Engelsturz	Minoritenkirche Mariahilf, Mariahilferplatz 3, 8020 Graz	zwei Statuen auf dem Giebel einer Kirche in über 18 m Höhe

Die folgende Abbildung zeigt photographische Aufnahmen der behandelten Skulpturen.



Abb. 1: Photographische Aufnahme der Statue des Heiligen Leonhard (a), der Maria Immaculata (b), der Mater Dolorosa (c) und der Darstellung vom Engelsturz (d)

2 Methoden

LUHMANN (2018) beschreibt unterschiedliche Methoden, um Skulpturen dreidimensional zu vermessen, wie z.B. Tachymetrie, terrestrisches Laserscanning, Streifen- und Musterprojektionssysteme und terrestrische Photogrammetrie.

Eine alleinige Aufnahme von wenigen diskreten Punkten mithilfe eines Tachymeters, um die gewünschten Kenngrößen daraus abzuleiten, erschien von vornherein aufgrund der mangelnden Definitionsgenauigkeit als ungeeignet. Ein weiterer Nachteil der Tachymetrie ist, dass gewisse unbedingt notwendige Punkte wegen der exponierten Lage der Skulpturen nicht sichtbar oder durch reflektierende Oberflächen nicht messbar sein können. Da es sich bei den Skulpturen um Heiligendarstellungen handelt, welche auch vergoldete Elemente, wie z.B. einen Heiligenschein, vorweisen, wurde eine reine Erfassung der geometrischen Kenngrößen mithilfe eines Tachymeters ausgeschlossen.

Die dreidimensionale Vermessung von Skulpturen mithilfe eines terrestrischen Laserscanners hätte den Vorteil, dass sowohl das maßstabsgetreue photo-texturierte 3D-Modell als auch die gewünschten geometrischen Kenngrößen aus der Punktwolke abgeleitet werden können. Diese Methode kann jedoch ebenfalls an reflektierenden Oberflächen nicht verwendet werden. Des Weiteren eignen sich stationäre Laserscanner im gegebenen Anwendungsfall nicht, da die Instrumentenhöhe nach oben hin beschränkt ist und die Skulpturen meist über die Kopfhöhe ragen oder überhaupt auf einem höheren Niveau positioniert sind. Außerdem wäre die vollständige Erfassung der komplexen Oberfläche nur mit einer großen Anzahl an Aufstellungen möglich. Schlussendlich wurde aufgrund mangelnder Verfügbarkeit eines geeigneten Gerätes diese Methode ausgeschlossen.

Die Verwendung von kostengünstigen Streifen- und Musterprojektionssystemen, wie einem handgehaltenen 3D-Scanner, wäre für kleinere, frei zugängliche Skulpturen denkbar, jedoch sind diese für exponierte Skulpturen, wie sie im Rahmen dieses Auftrages vorliegen, nicht ohne zusätzliche Kosten bzw. Aufwand anwendbar.

Mit einer rein terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahme der Skulpturen unter Verwendung einer Stehleiter oder einer Hebebühne wären diese Modelle vollständiger. Die Bestimmung des Maßstabes des photogrammetrischen Modells kann durch Hinzunahme von Passpunkten oder bekannten Strecken erfolgen. Die benötigten Passpunkte können wiederum mithilfe eines Tachymeters eingemessen werden. Je nach Genauigkeitsanforderung und Zugänglichkeit der Skulpturen können markante natürliche Punkte oder signalisierte Punkte verwendet werden. Die Kombination aus terrestrisch-photogrammetrischer Aufnahme und Tachymetrie erwies sich unter den vorgegebenen Rahmenbedingungen als optimal, um die Aufgabenstellung der 3D-Modellierung und Kenngrößenermittlung zu lösen.

3 Umsetzung

Bei der Umsetzung des Auftrages wurden zwei Konzepte verwendet, die sich in der Art der verwendeten Kamera und der verwendeten Passpunkte unterscheiden.

Das erste Konzept ermöglicht eine sehr genaue und detaillierte Erfassung von frei zugänglichen Skulpturen, da hier einerseits eine Digitalkamera Nikon D800 mit einer Auflösung von 36 Megapixel und andererseits neben gut definierten, natürlichen Punkten auch signalisierte Passpunkte verwendet wurden. Dieses Konzept wurde nur an der Sandsteinfigur vom Heiligen Leonhard angewendet.

Das zweite Konzept unterscheidet sich im Gegensatz zum ersten, dass anstelle einer hochauflösenden Digitalkamera Nikon D800 eine Digitalkamera Nikon D300 mit einer Auflösung von 12 Megapixel und nur natürliche Passpunkte verwendet werden. Dieses Konzept eignet sich für Objekte, an denen aufgrund ihrer exponierten Lage eine Signalisierung nicht möglich oder einfach nicht erwünscht ist, und wurde auf die drei verbleibenden Skulpturen angewendet.

In den nachfolgenden Abschnitten wird die Umsetzung der beiden Konzepte erläutert.

3.1 Datenakquisition

Zur Erfassung der geometrischen Kenngrößen und zur Erstellung der 3D-Modelle der Skulpturen wurde jeweils eine terrestrisch-photogrammetrische und eine geodätische Aufnahme vorgenommen.

3.1.1 Terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme

Bei der terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahme wurden die beiden Digitalkameras Nikon D800 und Nikon D300 verwendet. Von jeder Skulptur wurden mehrere Aufnahmen von unterschiedlichen Bodenstandpunkten vorgenommen, um ihre Oberfläche möglichst vollständig abzudecken. Bei der Sandsteinfigur vom Heiligen Leonhard wurde eine einfache Stehleiter verwendet, um auch Blickwinkel von oben zu ermöglichen. Die photographischen Aufnahmen der exponierten Darstellung des Engelsturzes vom Bodenniveau konnten durch die Nutzung einer Hebebühne um Aufnahmen von höheren Standpunkten ergänzt werden. Eine vollständige Abdeckung der Oberfläche dieser Skulptur konnte dennoch nicht erreicht werden. Aufgrund der schlechten Lichtverhältnisse im Innenraum der Minoritenkirche Mariahilf wurde bei der Holzfigur der Mater Dolorosa der interne Blitz der verwendeten Kamera genutzt.

3.1.2 Geodätische Aufnahme

Zur Ableitung des Maßstabes der photogrammetrischen 3D-Modelle wurden bei allen Skulpturen einzelne, gut definierte, natürliche Punkte und bei der Sandsteinfigur des Heiligen Leonhard zusätzlich signalisierte Punkte eingemessen. Die Signalisierung erfolgte mit kleinen selbstklebenden Passmarken mit acht Sektoren. Bei der geodätischen Aufnahme wurden auch nutzbare Zusatzpunkte zur Bestimmung der geometrischen Kenngrößen der Skulpturen, wie ihre Höhe, Breite und Tiefe, aufgenommen. Die geodätischen Messungen der einzelnen Skulpturen wurden mithilfe der Totalstation TPS1201R von Leica Geosystems GmbH von zumindest einem Standpunkt durchgeführt. Bei der Sandsteinfigur vom Heiligen Leonhard und bei der Eckstatue der Maria Immaculata erfolgte die geodätische Aufnahme mit zwei zwangszentrierten Aufstellungen, um gut verteilte Passpunkte einmessen zu können. Für die vier Skulpturen wurden folgende Konzepte und Aufnahmekonfigurationen verwendet.

Tab. 2: Verwendete Konzepte und Aufnahmekonfigurationen der Skulpturen

Name	Konzept	terrestr.-photogr. Aufnahme			geodätische Aufnahme	
		Kamera	# Aufn.	Hilfsmittel	# Standpkt.	Art der Passpkt.
Heiliger Leonhard	1	Nikon D800	226	Stehleiter	2	signalisiert und natürlich
Maria Immaculata	2	Nikon D300	26	-	2	natürlich
Mater Dolorosa	2	Nikon D300	47	interner Blitz	1	natürlich
Engelsturz	2	Nikon D300	(54)	Hebebühne	(3)	natürlich

Die terrestrisch-photogrammetrische und die geodätische Aufnahme des Engelsturzes erfolgte im Rahmen einer umfassenden Fassadendokumentation.

3.2 Auswertung

Die Auswertung der geodätischen und der terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahme zur Bestimmung der geometrischen Kenngrößen und zur Erstellung der 3D-Modelle erfolgte mit kommerzieller Software. Dabei wurde bei beiden Konzepten in gleicher Art und Weise vorgegangen, indem in einem ersten Schritt die geodätische und in einem zweiten Schritt die terrestrisch-photogrammetrische Aufnahme ausgewertet wurde.

3.2.1 Auswertung der geodätischen Aufnahme

In diesem Schritt wurden die diskreten Punktmessungen der geodätischen Aufnahme für die nachfolgende Auswertung der terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahme aufbereitet. Zu Beginn wurden diese Punktmessungen mithilfe der Software Geosi VERM (GEOSI VERM 2018) als Polarpunkte bestimmt. Die resultierenden Punkte wurden im Anschluss in ein objektbezogenes Koordinatensystem transformiert.

3.2.2 Auswertung der terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahme

Die Auswertung der terrestrisch-photogrammetrischen Aufnahme zur Bestimmung des photo-texturierten 3D-Modells der Skulptur erfolgte mithilfe des Verfahrens Structure-from-Motion (SfM) der Software Agisoft PhotoScan (AGISOFT 2018). Das Grundprinzip dieses Verfahrens wird unter anderem in Yi et al. (2014) beschrieben. Als Datengrundlage dienten die photographischen Aufnahmen der beiden Digitalkameras Nikon D300 und Nikon D800 im komprimierten JPG-Format, um die Datenmenge möglichst gering zu halten. Zu Beginn wurden die Aufnahmen durch Image-Matching mit einer anschließenden Bündeltriangulation vorläufig relativ orientiert und eine dünne Punktwolke erzeugt. Zur Ableitung des Maßstabes und zur absoluten Orientierung des photogrammetrischen Modells wurden die Passpunkte in den einzelnen photographischen Aufnahmen manuell eingemessen. Die Parameter der inneren Orientierung (Kamerakonstante, Lage des Bildhauptpunktes, Affinparameter und radial-symmetrische Verzeichnung mit $K1$ und $K2$) der Kamera wurden in Form einer Simultankalibrierung neu bestimmt. Bei Kleinformen der Skulpturen, wie dem Heiligenschein des Heiligen Leonhard, wurde der Hintergrund in den photographischen Aufnahmen maskiert, um den Rauschanteil in diesen Bereichen zu minimieren. Schließlich erfolgte die Erzeugung einer dichten Punktwolke. Aus dieser wurde mittels Dreiecksvermaschung ein digitales Oberflächenmodell und in weiterer Folge durch Texturierung ein maßstabsgetreues photo-texturiertes 3D-Modell generiert.

4 Ergebnisse

Aufgrund der Anwendung der zwei verschiedenen Konzepte sind die erstellten 3D-Modelle unterschiedlich genau und unterschiedlich detailliert.

Für die Sandsteinfigur vom Heiligen Leonhard wurde das erste Konzept angewendet, wodurch eine hohe Genauigkeit erreicht und ein detailliertes 3D-Modell erstellt werden konnte. Mit dieser Vorgehensweise wurde als relative Genauigkeitsangabe ein Reprojection Error (RE) von 0.98

Pixel erzielt, wobei 1 Pixel im Mittel 0.22 mm am Objekt entspricht. Die absolute Genauigkeit des maßstabsgetreuen 3D-Modells liegt bei einem Root Mean Square Error (RMSE) von 3 mm. Folglich können geometrische Kenngrößen der Skulptur als Abstand zwischen zwei diskreten Punkten der dichten Punktwolke mit einer Genauigkeit von 4.2 mm gemessen werden. Diese Genauigkeitsangabe für geometrische Kenngrößen ergibt sich durch folgenden Zusammenhang.

$$\sigma = \sqrt{2} \cdot \text{RMSE} \quad (1)$$

Das 3D-Modell ist bis auf kleinere Strukturen, wie einzelne Segmente des dünnen Heiligenscheins (Abb. 2b), welche bei der Dreiecksvermaschung der dichten Punktwolke mit der verwendeten Software Agisoft PhotoScan herausgefiltert wurden, vollständig und ist in Abbildung 2a dargestellt. Eine Visualisierung dieses 3D-Modells wurde mit der Software CloudCompare (CLOUDCOMPARE 2018) in der Form eines Videos erstellt (KAUFMANN 2018).



Abb. 2: Maßstabsgetreues photo-texturiertes 3D-Modell der Sandsteinfigur vom Heiligen Leonhard in einer Gesamtansicht (a) und in einer Detailansicht (b)

Bei den übrigen Skulpturen wurde nach dem zweiten Konzept vorgegangen, wodurch im Vergleich zur Anwendung des ersten Konzeptes geringere Genauigkeiten erreicht und weniger de-

taillierte 3D-Modelle bestimmt werden konnten. Aufgrund der exponierten Lage der Darstellung des Engelsturzes, welche sich in über 18 m Höhe befindet, konnten trotz Verwendung einer Hebebühne nur Aufnahmen von Standpunkten unterhalb der Skulptur gemacht werden, wodurch das erstellte 3D-Modell nicht vollständig ist (Abb. 3c). Für die Statuen der Maria Immaculata und der Mater Dolorosa konnten im Vergleich zur Darstellung des Engelsturzes nahezu vollständige 3D-Modelle erstellt werden (Abb. 3a & 3b).



Abb. 3: Maßstabgetreues photo-texturiertes 3D-Modell der Statue der Maria Immaculata (a), der Mater Dolorosa (b) und der Darstellung vom Engelsturz (c)

In der folgenden Tabelle sind jeweils die relative und absolute Genauigkeit der 3D-Modelle, welche durch die Anwendung der beiden Konzepte bei den verschiedenen Skulpturen erreicht wurden, angegeben. Die angeführten Kenngrößen wurden aus den zugrundeliegenden dichten Punktwolken der erstellten 3D-Modelle bestimmt, womit sich die Genauigkeit dieser Messungen aus dem jeweiligen RMSE ergibt (Gl. 1).

Tab. 3: Genauigkeit und Kenngrößen der maßstabsgetreuen photo-texturierten 3D-Modelle der Skulpturen

Name	Konzept	RE [Pixel]	RMSE [mm]	Kenngrößen der Gesamtfigur [cm]		
				Höhe	Breite	Tiefe
Heiliger Leonhard	1	0.98	3.0	294	118	92
Maria Immaculata	2	0.34	7.3	254	79	56
Mater Dolorosa	2	0.52	5.7	254	74	46
Engelsturz	2	0.47	14.7	448	232	236

Auffällig ist der RMSE des 3D-Modells der Darstellung des Engelsturzes, welcher im Vergleich zu den übrigen behandelten Skulpturen bei über 1 cm liegt. Dieses Ergebnis ist auf die erschwerten Aufnahmebedingungen bezüglich der exponierten Lage des Objektes in über 18 m Höhe und unter anderem auf die schlechtere Schnittgeometrie zurückzuführen.

5 Fazit & Ausblick

Die beiden Konzepte zur Bestimmung von geometrischen Kenngrößen und zur Erstellung von maßstabsgetreuen photo-texturierten 3D-Modellen von Skulpturen haben sich im Anwendungsfall für lebensgroße Statuen aus Sandstein oder Holz bewährt. Mit dem ersten Konzept können durch die Verwendung von signalisierten Passpunkten und einer hochauflösenden Digitalkamera Nikon D800 detaillierte maßstabsgetreue photo-texturierte 3D-Modelle von lebensgroßen, frei zugänglichen Sandsteinfiguren erstellt werden. Mit einer Stehleiter kann nahezu die gesamte Oberfläche der behandelten Statue abgedeckt und dadurch ein nahezu vollständiges 3D-Modell erstellt werden. Kleinformen, wie z.B. ein dünner Heiligenschein, werden bei der Dreiecksvermaschung der dichten Punktwolke mit der verwendeten Software Agisoft PhotoScan nicht vollständig erhalten.

Das zweite Konzept stellt eine gute Alternative zur aufwändigeren ersten Methode dar, da durch die Verwendung der Digitalkamera Nikon D300 die Datenmenge geringgehalten wird und ebenfalls gute Ergebnisse erzielt werden können. Die Beschränkung der Passpunkte auf gut definierte natürliche Punkte bringt im Vergleich zum ersten Konzept nur eine geringfügig verminderte Genauigkeit mit sich. Bei exponierten Statuen in mehreren Metern Höhe kann die Schnittgeometrie der photographischen Aufnahmen durch die Verwendung einer Hebebühne verbessert werden, jedoch sind hier die Möglichkeiten bezüglich der Vollständigkeit und Genauigkeit trotzdem begrenzt.

Das zweite Konzept könnte für zukünftige Anwendungen bezüglich des zeitlichen und finanziellen Aufwandes noch weiter minimiert werden, indem die Maßstabsermittlung mit zumindest einer bekannten Strecke auf oder im Nahbereich der untersuchten Skulptur im Objektraum be-

schränkt wird. Hierfür können gut definierte Strecken, welche mittels Maßband oder handgehaltenem Distometer im Objektraum eingemessen werden können, oder kalibrierte Maßstäbe (KERSTEN & LINDSTAEDT 2017) verwendet werden, wodurch keine Totalstation benötigt wird und somit sowohl der finanzielle als auch der zeitliche Aufwand bei der Datenakquisition verringert wird. Diese Vorgehensweise eignet sich jedoch nur für frei zugängliche Skulpturen und hat den Nachteil, dass bei Verwendung von wenig Passinformation über den Objektraum das erstellte 3D-Modell zum einen potentiell Verformungen aufweisen kann und zum anderen keine umfassende Kontrolle möglich ist.

6 Literaturverzeichnis

- AGISOFT, 2018: Agisoft PhotoScan User Manual Professional Edition, Version 1.4. http://www.agisoft.com/pdf/PhotoScan-pro_1_4_en.pdf, letzter Zugriff 23.11.2018.
- CLOUDCOMPARE, 2018: User documentation – CloudCompare, Version 2.6.1. <https://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>, letzter Zugriff 24.11.2018.
- GEOSI VERM, 2018: Geosi VERM – Datenblatt. http://www.idc-edv.at/wp-content/plugins/pdfjs-viewer-shortcode/pdfjs/web/viewer.php?file=http://www.idc-edv.at/datenblaetter/GeosiVERM_V18.pdf&download=true&print=true&openfile=false, letzter Zugriff 24.11.2018.
- KAUFMANN, V., 2018: Homepage of Viktor Kaufmann (pseudonym Victor Mercator), Graz University of Technology, Austria. <https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann/>, letzter Zugriff 23.11.2018.
- KERSTEN, T. & LINDSTAEDT, M., 2017: Mit Kamera, Maßstab und Laptop – Best Practice zur Erstellung von 3D-Modellen für eine Museumsausstellung am Beispiel vietnamesischer Kulturobjekte. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 26, T. Kersten (Hrsg.), 37. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Webversion, 35-44.
- LUHMANN, T., 2018: Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 4. überarbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann VDE Verlag GmbH, Berlin/Offenbach.
- TRARS, 2018: Tracing the Art of the Straub Family. <http://trars.eu>, letzter Zugriff 23.11.2018.
- YI, G., JIANXIN, L., HANGPING, Q. & BO, W., 2014: Survey of structure from motion. Proceedings of 2014 International Conference on Cloud Computing and Internet of Things, 72-76.