

Kombination von terrestrischem Laserscanning, UAV- und Nahbereichsphotogrammetrie zur Erfassung komplexer Kirchenbauwerke in Georgien

THOMAS LUHMANN¹, MARIA CHIZHOVA², DENYS GORKOVCHUK³,
ANNIKA JEPPING¹ & HEIDI HASTEDT¹

Zusammenfassung: Im Rahmen einer Messkampagne zur dreidimensionalen Erfassung mehrerer historischer Kirchen in Tbilisi (Georgien) wurden im September 2018 photogrammetrische Aufnahmen und terrestrische Laserscans durchgeführt. Ziel war die vollständige räumliche Rekonstruktion mit einer Ortsauflösung und Genauigkeit von ca. 1cm unter teilweise erschwerten äußeren Bedingungen, die den Einsatz unterschiedlicher Messtechniken erforderten.

Die örtlichen Messdaten wurden durch jeweils zwei Laserscanning-Kampagnen (Leica BLK360 und Faro Focus 3D X330), zwei UAV-Flüge sowie zwei terrestrischen Bildverbänden (Canon D6 und Canon 200D) erfasst. Die photogrammetrischen Punktwolken wurden mit den SfM-Programmen Agisoft PhotoScan und RealityCapture unter Berücksichtigung der Passpunkte aus dem Faro-Laserscan berechnet. Die mittleren Restfehler aus den Registrierungen bzw. photogrammetrischen Auswertungen liegen bei 4 -12 mm, abhängig von der gewählten Softwarelösung.

Im Beitrag werden erste Ergebnisse von einem der Messobjekte hinsichtlich Registrierungs-genauigkeit bzw. Genauigkeit der Bündelausgleichung analysiert. Die mit den einzelnen Verfahren berechneten Punktwolken werden verglichen und daraufhin untersucht, inwieweit eine Fusion der Punktwolken zur Vervollständigung von Lücken und Abschattungen genutzt werden kann.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Im Rahmen einer Messkampagne zur dreidimensionalen Erfassung mehrerer historischer Kirchen in Tbilisi (Georgien) wurden im September 2018 photogrammetrische Aufnahmen und terrestrische Laserscans durchgeführt. Dabei wurden vorab mehrere Projektziele definiert:

- 3D-Rekonstruktion der Außenhaut der Bauwerke
- 3D-Rekonstruktion eines exemplarischen Innenraums
- Einsatz und Untersuchung des neuen Leica BLK360 Scanners unter Praxisbedingungen
- Kombination von UAV- und terrestrischen Bildaufnahmen mit terrestrischen Laserscans
- Nutzung der Daten für zukünftige Untersuchungen zur semantischem Segmentierung
- Nutzung der Daten für Restaurierungsarbeiten und touristische Zwecke

¹ Jade Hochschule Oldenburg, Institut für Angewandte Photogrammetrie und Geoinformatik, Ofener Str. 16, D-26121 Oldenburg, E-Mail: [Thomas.Luhmann, Annika.Jepping, Heidi.Hastedt]@jade-hs.de

² Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Lehrstuhl für Digitale Denkmaltechnologien, Am Zwinger 4, D-96047 Bamberg, E-Mail: maria.chizhova@uni-bamberg.de

³ Kiev National University for Construction and Architecture, E-Mail: denys.gorkovchuk@spm3d.com

Im Rahmen einer laufenden Forschungsarbeit zur modellbasierten Rekonstruktion von zerstörten Bauwerken aus Punktwolken russisch-orthodoxer Kirchen (CHIZHOVA et al. 2016) entstand eine Zusammenarbeit der Jade Hochschule in Oldenburg und der Universität Bamberg mit der Georgian Technical University in Tbilisi. In einer einwöchigen Messkampagne wurden dazu insgesamt drei Kirchen mit verschiedenen Messsystemen aufgenommen:

- Terrestrischer Laserscanner Faro Focus 3D X330
- Terrestrischer Laserscanner Leica BLK360
- UAV DJI Mavic Pro mit FC 220 $f=4.7\text{mm}$
- DSLR-Kamera Canon EOS 200D, $f=10\text{-}20\text{mm}$
- DSLR-Kamera Canon EOS D6 Mark II, $f=24\text{-}50\text{mm}$

Ziel war die vollständige räumliche Rekonstruktion mit einer Ortsauflösung und Genauigkeit von ca. 1 cm unter teilweise erschwerten äußeren Bedingungen, die die Kombination unterschiedlicher Messtechniken erforderten. Dazu werden zunächst einzelne Gesamtpunktwolken aus den Laserscans und den photogrammetrischen Aufnahmen erzeugt. Die photogrammetrischen Auswertungen werden zum einen mit Agisoft PhotoScan, zum anderen mit RealityCapture durchgeführt. In einem anschließenden Fusionschritt werden die Punktwolken in ein Gesamtmodell zusammengeführt.

Aufgrund logistischer und organisatorischer Gründe konnte keine detaillierte Vorplanung durchgeführt werden. Die erstmalige Ortsbegehung fand am ersten Tag der Kampagne statt. Auf die Auswahl der durch die lokalen Partner bereitgestellten Messgeräte (Faro Scanner, DJI Drohne) bestand keine Einflussmöglichkeit. Messtechnische Hilfsmittel mussten zum Teil kurzfristig vor Ort organisiert werden, ebenso wie Zugangsberechtigungen für die religiösen Stätten.

Eine tachymetrische Passpunktmessung konnte aus technischen Gründen nicht durchgeführt werden. Es wurde daher entschieden, Passpunkte für die photogrammetrische Orientierung aus den registrierten Gesamtpunktwolken des Laserscannings zu entnehmen.

Im folgenden Beitrag werden die einzelnen Messobjekte kurz vorgestellt. Die Untersuchungen beschränken sich jedoch zunächst auf die Andreas-Kirche im Lurdji-Kloster. Die Auswertung der anderen Messobjekte erfolgt in naher Zukunft.

Untersuchungen ähnlicher Art liegen aus der Literatur vor, beziehen sich jedoch auf andere verfügbare hard- und softwaretechnische Lösungen. Beispiele geben KERSTEN et al. (2015), NAUMANN et al. (2015) oder REMONDINO (2011).

1.2 Messobjekte

Ursprünglich geplant waren die Aufnahmen der georgischen Kirchenanlagen Lurdji und Sioni in der georgischen Hauptstadt Tbilisi (Tiflis). Aufgrund der räumlichen Nachbarschaft zur Andreas-Kirche in Lurdji wurde kurzfristig entschieden, auch die benachbarte russisch-orthodoxe Johannes-Kirche zu erfassen. Beschreibungen zu den Objekten finden sich in ANCHABADZE & VOLKOVA (1990).

1.2.1 Kloster Lurdji

Das Lurdji-Kloster ist ein orthodoxer Architekturkomplex in Tbilisi (Abb. 1). Das Kloster wurde im 7. Jhd. begründet, die ältesten Teile lassen sich auf das 12. Jhd. datieren, was der Regierungs-

zeit von Königin Tamar entspricht. Im 16. Jhd. wurde das Kloster von Persern zerstört und erst ein Jahrhundert später restauriert. Aktuell besteht der Sakralkomplex aus zwei Kirchen und dem dazu gehörigen historische Park Vera. Nach der Zerstörung wurde die Andreas-Kirche im 17. Jhd. als Basilika mit dreiteiligem Kirchenschiff restauriert. Ende des 19. Jhd. wurde die Kirche nach einem Projekt von A. Chizhov rekonstruiert und hat eine neue kugelförmige Kuppel bekommen, was für die georgische Architektur nicht typisch war. Diese Kuppel wurde 1995 durch eine klassische georgische Kegelkuppel ersetzt. Das früher mit blauen Keramikdachziegeln bedeckte Dach besteht heute aus blaugrau lackierten Zinkblechen. Die Dachgestaltung hat den Namen des Klosters bestimmt: „lurdji“ bedeutet blau. Aufgrund der verschiedenen Umbauten liegt die Kirche nicht im typischen Stil georgischer Kirchen mit kreuzförmigen Grundriss vor, sondern in einer rechteckigen Grundform mit Kreuzdach und zentrischem Turm, der einen zylindrischen Sockel und eine kegelförmige Spitze besitzt.

Die Kirche hat eine Größe von ca. 17 m x 12 m x 25 m (B x L x H). Sie befindet sich inmitten eines bebauten Wohngebiets und der am Rand liegenden Parkanlage, so dass teilweise eine sehr eingeschränkte Zugänglichkeit vom Boden aus gegeben war. Das Material der Außenmauern besteht aus Sandstein bzw. Ziegelsteinen und besitzt eine natürliche Rauigkeit sowie ausgebrochene Stellen, die durch Witterung und Abnutzung entstanden sind. Die Dachflächen sind weitgehend texturarm.

Für das Objekt wurde die Aufnahme der Außenhaut festgelegt. Dazu wurden zwei UAV-Flüge, zwei terrestrische DSLR-Bildverbände sowie zwei Laserscannmessungen durchgeführt.



Abb. 1: Andreas-Kirche im Kloster Lurdji

1.2.2 Weitere Kirchenbauwerke

Während der Messkampagne wurde zusätzlich die Johannes-Kirche, die sich ebenfalls im Lurdji-Komplex befindet, aufgenommen (Abb. 2 links). Sie wurde als klassische russische Kirche mit Schiff-Konstruktion und fünf Zwiebelkuppeln im Zeitraum 1898-1901 durch den russischen Statthalter G. Golitsyn erbaut.

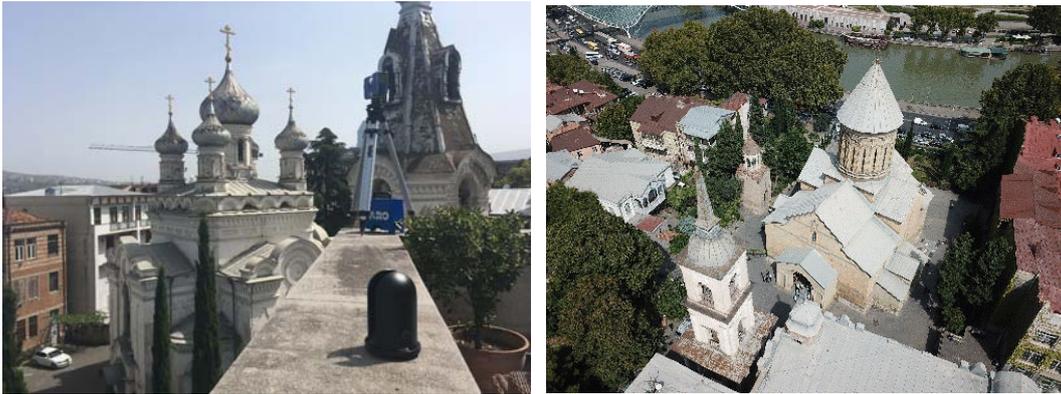


Abb. 2: Links: Russische Kirche im Kloster Lurdji; vorne: Leica BLK360; hinten auf Stativ: Faro Scanner
Rechts: Sioni-Kathedrale

Aufgrund der erheblichen Einschränkungen in der Zugänglichkeit wurde von diesem Objekt lediglich ein Laserscan mit dem Leica BLK360 aufgenommen. Eine photogrammetrische Aufnahme konnte nicht realisiert werden.

Die Sioni-Kathedrale ist die historische Hauptkirche der Stadt Tbilisi und eines der wichtigsten Zentren der georgischen Orthodoxie (Abb. 2 rechts). Der Bau der ursprünglichen Kirche begann im 6. Jhd. durch den georgischen König Wachtang I. Gorgassali, ihr endgültiger Aufbau ist auf das 7. Jhd. datiert. Diese erste Kirche wurde nach der Einrichtung des Tiflis-Emirates vollständig zerstört. Die neue Sioni-Kathedrale wurde im 12. Jhd. aufgebaut und hat mehrmals Zerstörungen und Rekonstruktionen erlebt (17. und 18. Jhd.). Nach der Restaurierung 1980-1983 hat die Kirche ihre mittelalterliche Gestalt behalten und entspricht stilistisch der klassischen prä-mongolischen Sakralarchitektur Georgiens.

Das Objekt wurde sowohl von außen als auch von innen aufgenommen. Insgesamt wurden wiederum zwei UAV-Flüge sowie jeweils zwei terrestrische DSLR-Bildverbände und zwei Laserscannmessungen im Innen- und Außenraum durchgeführt.

2 Laserscanning

2.1 Signalisierung

Alle aufgenommenen Objekte wurden mit Zielmarken ausgestattet, die in ca. 10 m Abstand zueinander am Gebäude sowie in der rückwärtigen Umgebung angebracht wurden (Übersicht in Abb. 3). Wie zuvor erwähnt, konnten die Zielmarken nicht tachymetrisch eingemessen werden, sondern dienten für das Laserscanning ausschließlich als Verknüpfungspunkte, deren 3D-Koordinaten anschließend für die photogrammetrische Datumsfestlegung verwendet werden.

Die Zielmarken bestanden aus den üblichen schachbrettartigen Signalen (A4-Größe). Zusätzlich konnten einige Profi-Targets (Tilt & Turn Targets) eingesetzt werden, die auf Stativen ohne Änderung des Markenzentrums um die eigene Achse gedreht werden, um sie von verschiedenen Standpunkten und aus der Luft optimal messen zu können.

2.2 Faro Focus 3D X330

2.2.1 Übersicht

Der Faro Focus 3D X330 (Abb. 2 im Hintergrund) ist ein geodätischer Laserscanner mit Phasenvergleichsverfahren und einer 3D-Punktgenauigkeit von ca. 2 mm in 10 m Entfernung. Die maximale Reichweite beträgt 330 m. Für das Laserscanning wurde ein Punktabstand von 6 mm in 10 m Entfernung gewählt. In diesem Modus benötigt ein vollständiger Scan ca. 25 Minuten, inklusive der zusätzlich aufgenommenen Bilddaten. Eine Übersicht der erfassten Daten kann Tab. 1 entnommen werden.

Tab. 1: Laserscanning-Daten Lurdji Andreas

	Standpunkte	3D-Punkte	Scandauer	Mittl. Auflösung	Reg.präzision Register360	Reg.präzision Cyclone
Faro	11	350 Mio.	4.5 h	3 – 5 mm	6 mm	4 mm
BLK	20	784 Mio.	1.5 h	4 – 8 mm	9 mm	4 mm

Neben 9 bodennahen Standpunkten wurden zwei Scans von erhöhten Standpunkten aus dem benachbarten Glockenturm sowie von einer Dachterrasse eines anderen Gebäudes aufgenommen (Abb. 2). Aufgrund der eingeschränkten Standortwahl konnten einige Teile des Daches sowie des Turmkegels nicht erfasst werden. Die Punktauflösung am Objekt schwankt bedingt durch sehr unterschiedliche Messdistanzen zwischen ca. 1 mm und 30 mm (Turm).

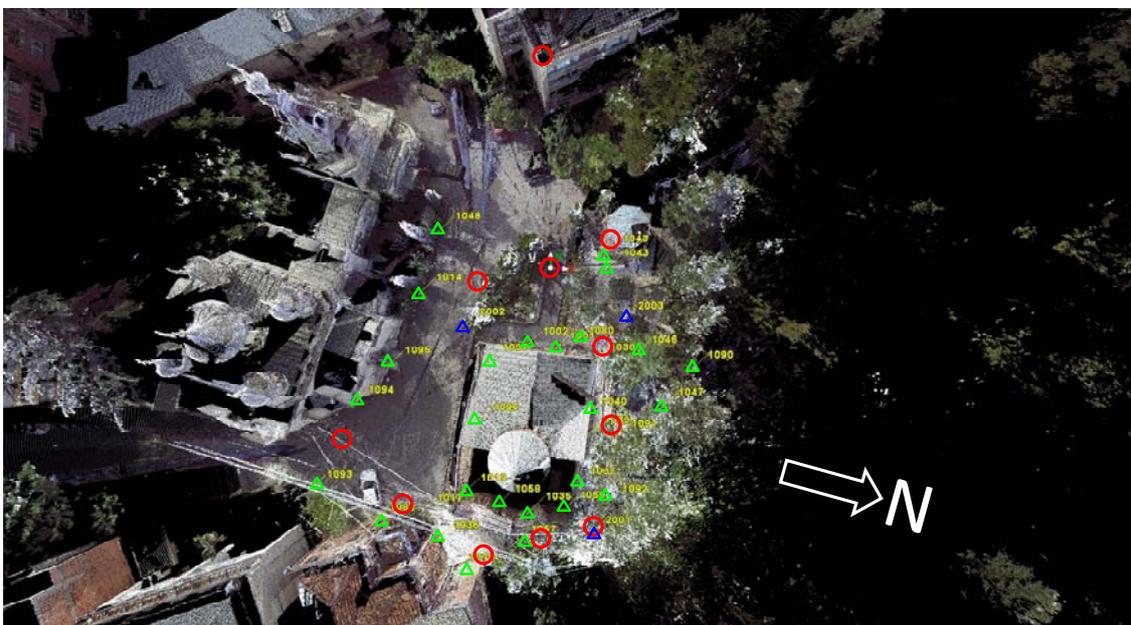


Abb. 3: Übersicht der registrierten Faro-Gesamtpunktwolke mit Verteilung der Standpunkte (rot) und Zielmarken (Papiermarken grün, Profitargets blau)

2.2.2 Registrierung

Vor Ort wurde mit dem Programm Faro Scene eine erste Registrierung aller einzelnen Punktwolken durchgeführt, um die Güte und Vollständigkeit der Daten zu überprüfen. Später wurden

die Daten mit Register 360 registriert, das die Extraktion der 3D-Koordinaten der automatisch gemessenen Zielmarken erlaubt. Die Registrierung erfolgte über die abgebildeten Zielmarken mit anschließender Optimierung (ICP). Die mittlere Standardabweichung der Gesamtregistrierung beträgt dabei 6 mm. Bei einer Registrierung mit der Software Cyclone verbessert sich die Präzision der Registrierung auf 4 mm. Die mittlere Punktauflösung liegt zwischen 3 mm in bodennahen Bereichen und 5 mm am Turm. Abb. 3 stellt eine Übersicht der registrierten Punktwolke mit den Standpunkten und den erfassten Zielmarken dar.

2.3 Leica BLK360

2.3.1 Übersicht

Der seit 2017 auf dem Markt erhältliche Laserscanner Leica BLK360 (Abb. 2 im Vordergrund) zeichnet sich vor allem durch seine Handlichkeit aus. Das Gerät ist vorwiegend für einfache Gebäudeaufnahmen mit mittleren Genauigkeitsansprüchen bei einer Reichweite bis 60 m konzipiert. Erste Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit zeigen BLASKOW et al. (2018), die die vom Hersteller angegebene 3D-Punktgenauigkeit von ca. 6 mm in 10 m Entfernung bestätigen. Die Distanzmessung erfolgt nach dem WFD-Prinzip (wave form digitizer). Das Laserscanning mit dem BLK wurde im Betriebsmodus High Density vorgenommen, der einem Punktabstand von 6 mm in 10 m Entfernung entspricht. In diesem Modus benötigt ein vollständiger Scan inklusive der Aufnahme von Panoramabildern ca. 5 Minuten. Eine Übersicht der erfassten Daten kann Tab. 1 entnommen werden.

Beim BLK werden die erfassten Daten zunächst im Scanner gespeichert und anschließend per WLAN auf einen Tablet-Computer übertragen.

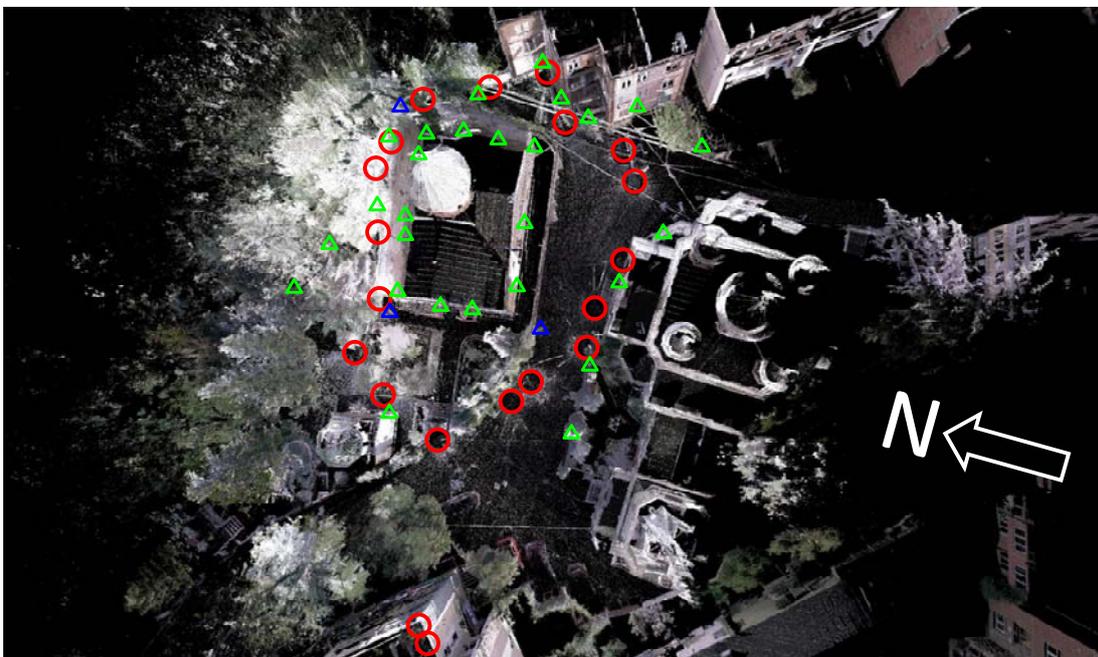


Abb. 4: Übersicht der registrierten BLK-Gesamtpunktwolke mit Verteilung der Standpunkte (rot) und Zielmarken (Papiermarken grün, Profitargets blau)

2.3.2 Registrierung

Auch für die BLK-Scans wurde noch vor Ort eine erste Registrierung mit dem Programm ReCap durchgeführt. Die spätere Gesamtregistrierung mit Register 360 ergab eine mittlere Standardabweichung von 9 mm. Die Registrierung erfolgte über die abgebildeten Zielmarken mit anschließender Optimierung (ICP). Die mittlere Punktauflösung liegt zwischen 4 mm in bodennahen Bereichen und 8 mm am Turm. Bei einer Registrierung mit der Software Cyclone verbessert sich auch hier die Präzision der Registrierung auf 4 mm. Abb. 4 stellt eine Übersicht der registrierten Punktwolke mit den Standpunkten und den erfassten Zielmarken dar.

2.4 Vergleichende Analyse

2.4.1 Registrierung

Beide untersuchten Scanner konnten problemlos in einem praktischen Projekt eingesetzt werden. Auch wenn der BLK360 eher als Scanner für Innenräume oder einfache BIM-Anwendungen mit geringeren Genauigkeitsanforderungen eingestuft werden muss, hat er sich in diesem Projekt auch als geeigneter Scanner für eine vollständige Bauwerkserfassung gezeigt. Besonders vorteilhaft im Vergleich zum Faro ist dabei die schnelle und einfache Datenerfassung. Nachteilig ist die sehr begrenzte Batteriekapazität sowie die fehlende USB-Schnittstelle bzw. SD-Speicherkarte zur Übertragung der Daten ohne Netzwerkverbindung sowie eine geringere Robustheit gegenüber Sonneneinstrahlung und Hitze. Aufgrund der technischen Spezifikationen und den Registrierungsergebnissen kann davon ausgegangen werden, dass die Faro-Punktwolke qualitativ besser ist als die des BLK.

Die aus beiden Punktwolken extrahierten Zielmarkenkoordinaten konnten über eine 3D-Ähnlichkeitstransformation mit 7 Parametern bei einer mittleren Standardabweichung (RMS der transformierten Objektkoordinaten) von 3.7 mm aufeinander transformiert werden. Die berechneten Transformationsparameter

$$X_0 = 75164.16740 \text{ mm}$$

$$\omega = -0.036144^\circ$$

$$m = 0.999821$$

$$Y_0 = -669.69493 \text{ mm}$$

$$\varphi = 0.004090^\circ$$

$$Z_0 = 37.12007 \text{ mm}$$

$$\kappa = 174.755005^\circ$$

zeigen beim mitberechneten Maßstabsfaktor m und bei der Abweichung von der Horizontalen (ω , φ) zunächst auffällige Abweichungen zu den erwarteten Werten 1 bzw. 0, die bei Anwendung auf eine Distanz von 20 m jedoch im Bereich von <1 cm liegen. Eine 3D-Transformation ohne mitgeführten Maßstab verschlechtert das Ergebnis jedoch.

Noch nicht endgültig geklärt sind softwareabhängige Abweichungen in den Registrierungen, die nicht auf die Datenqualität, sondern auf Probleme bei Datenexport und Systemeinstellungen zurückzuführen sind.

2.4.2 Qualität der Punktwolken

Die Qualität der Punktwolken wird in diesem Beitrag zunächst nur exemplarisch analysiert. Dabei werden die Abweichungen des BLK-Scans gegenüber der Faro-Punktwolke als Referenz untersucht. Ein erster Vergleich der beiden registrierten und ungefilterten Punktwolken an einer

Außenwand durch Cloud-to-Cloud-Vergleich (Funktion Cloud/Cloud-Distance in CloudCompare) zeigt in Abb. 5 links, dass beide Punktwolken im Bereich von 5-10 mm zueinander passen, mit Ausnahme der Bereiche der Objektkanten (Gebäudeecken, Dachfirst). Auffällig sind geradenförmige Sprünge in den Abweichungen, die vermutlich auf systematische Restabweichungen der Registrierungen oder die Einbeziehung der Scans von benachbarten Gebäuden zurückzuführen sind. Weiterhin ist eine mit zunehmender Gebäudehöhe wachsende Diskrepanz deutlich erkennbar. Ihre Ursache liegt vermutlich in der ausschließlich horizontalen Verteilung der Zielmarken sowie ggf. einer mit zunehmendem Vertikalwinkel schlechteren Scengenauigkeit.

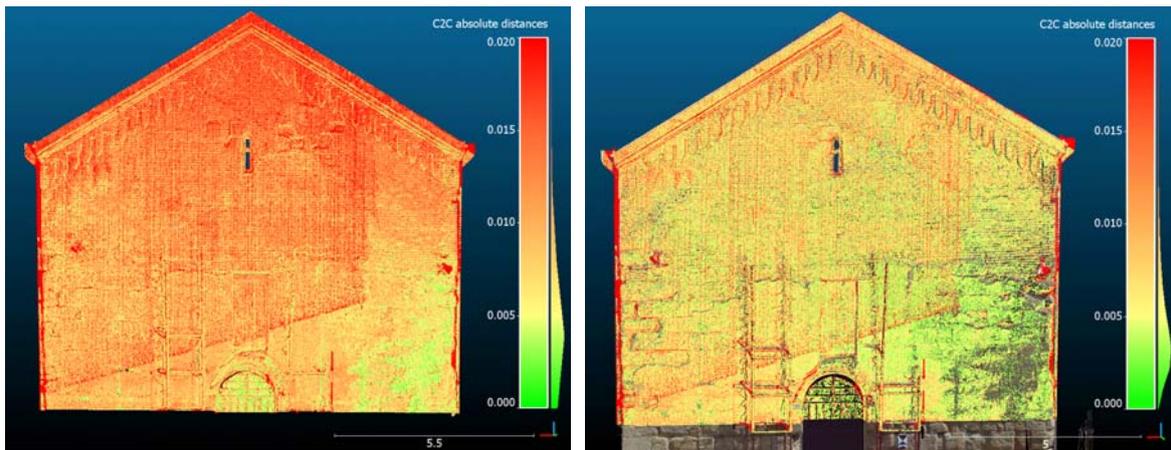


Abb. 5: Vergleich Faro-BLK: links Cloud-to-Cloud; rechts Cloud-to-Cloud nach ICP (in mm)

Abb. 5 rechts zeigt das Ergebnis nach einer zusätzlichen Anpassung der Scans über ICP. Die höhenabhängigen Systematiken werden dadurch weitgehend eliminiert, was erneut auf ein Datumproblem bei der Registrierung hindeutet. Das Histogramm der Abweichungen zeigt ein Maximum bei 4 mm, was eine gesamthafte systematische Verschiebung der Punktwolken zu einander indiziert.

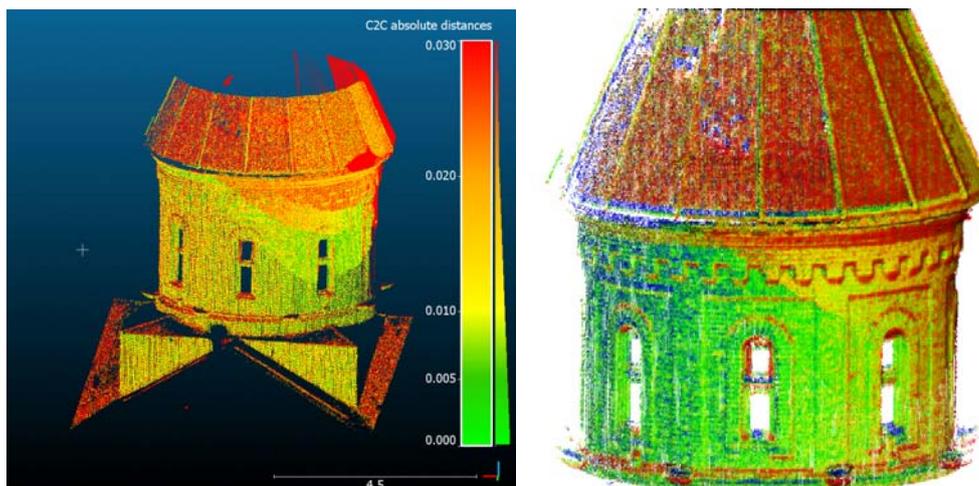


Abb. 6: Vergleich Faro-BLK: links Cloud-to-Cloud nach der Registrierung mit Register (in mm); rechts Cloud-to-Mesh für Registrierung mit Cyclone (max. 17 mm)

Abb. 6 zeigt die Restabweichungen am Kirchturm, die dort bis zu 30 mm für die Registrierungen aus Register 360 betragen. Bei einem Cloud-to-Mesh Vergleich mit der in Cyclone registrierten Punktwolke sinken dort die Abweichungen auf maximal 17 mm. Auch hier ist es offensichtlich, dass mit zunehmender Gebäudehöhe die Diskrepanz zwischen beiden Scans zunimmt.

3 Photogrammetrie

3.1 UAV-Flüge

Durch die örtlichen Partner konnte eine Drohne vom Typ DJI Mavic Pro mit FC 220 Kamera (12 Mpixel) bereitgestellt werden (Brennweite $f=4.7$ mm, Bildformat 6.4 mm \times 4.8 mm, Pixelgröße 1.6 μ m). Die maximale Flugdauer beträgt ca. 22 Minuten. Die Drohne wurde von einem erfahrenen Operateur manuell gesteuert. Es wurden ein mäanderförmig geflogener Bildverband mit Senkrechtaufnahmen sowie zwei kreisförmig angelegte Bildverbände mit Schrägluftaufnahmen aus unterschiedlichen Entfernungen aufgenommen. Tab. 2 stellt die wichtigsten Flugdaten zusammen. Abb. 7 zeigt Beispielbilder der drei verschiedenen Flüge.

Tab. 2: UAV-Flugdaten Lurdji Andreas-Kirche

	Bilder	Flughöhe ü.G.	Distanz	Bildmaßstäbe	GSD
Nadir	173	30 – 35 m	20 – 30 m	4600 – 6500	7 – 10 mm
Kreis 1	88	15 – 20 m	14 – 25 m	3600 – 5200	5 – 9 mm
Kreis 2	107	45 – 55 m	25 – 32 m	5500 – 6700	9 – 11 mm
Gesamt	368	15 – 55 m	14 – 32 m	3600 – 6700	5 – 11 mm



Abb. 7: Beispielbilder der UAV-Flüge

3.2 Terrestrische Bildaufnahme

Vom Boden aus wurden jeweils zwei handgehaltene Bildverbände mit digitalen Spiegelreflexkameras (DSLR) aufgenommen, die jeweils Zoom-Objekte besaßen. Fix-Fokus-Objektive standen nicht zur Verfügung. Die Objektive wurden jeweils in der kürzesten Brennweite mit Klebeband fixiert, Autofokus und Sensorreinigung wurden deaktiviert. Die Bilder wurden im JPEG-Format bei niedriger Kompression gespeichert.

Die Kamera Canon EOS D6 Mark II mit Objektiv $f=24-50$ mm besitzt einen 26.2 Mpixel Vollformat-CMOS-Sensor (35.9 mm \times 24.0 mm, Pixelgröße 6.5 μ m) und einen integrierten GPS-Empfänger. Die Canon EOS 200D mit Objektiv $f=10-20$ mm besitzt einen 24.2 Mpixel CMOS Sensor im DX-Format (22.3 mm \times 14.9 mm, Pixelgröße 3.7 μ m). Die Öffnungswinkel bezogen auf die Bilddiagonale betragen 84° (Canon D6) bzw. 106° (Canon 200D).

Tab. 3: Terrestrisch aufgenommene Bilddaten

	Kamera	Bilder	Entfernung	Bildmaßstäbe	GSD
1	Canon 200D	206	1 – 20 m	120 – 2000	2 – 15 mm
2	Canon D6	465	1 – 20 m	120 – 2000	2 – 15 mm

Die Bildaufnahme wurde so angelegt, dass folgende Kriterien weitgehend erfüllt wurden:

- Hohe gegenseitige Überlappung für sichere Messung und Zuordnung von Verknüpfungspunkten (feature points);
- Kombination von Senkrecht- und Schrägaufnahmen für optimale geometrische Schnittbedingungen;
- Kombination von Nahaufnahmen (Abstand 1–2m) und Fernaufnahmen (5–20m) zur Erzielung einer hohen Objektauflösung bei gleichzeitig großer Objektdeckung durch Übersichtsbilder;
- Zahlreiche gekantete (um jeweils 90° gedrehte) Aufnahmen zur sicheren Kamerakalibrierung;
- Kleine Blendenöffnung zur Erreichung einer hinreichend großen Schärfentiefe.

Die Dauer der Bildaufnahme betrug pro Bildverband ca. 1,5 Stunden.

3.3 Auswertung

3.3.1 Agisoft PhotoScan

Das Softwareprogramm PhotoScan (neu: MetaShape) der russischen Firma Agisoft ist ein weit verbreitetes Structure-from-Motion (SfM) Programm, das in vielen verschiedenen Anwendungsfeldern eingesetzt wird. Es liefert neben der Orientierung (Alignment) und den ausgeglichenen Objektkoordinaten (dünne Punktwolke) eine über semi-globales Matching erzeugte dichte Punktwolke, Oberflächenvermaschungen und True-Orthophotos. Die Software bietet gut dokumentierte Kalibriermodelle für die innere Orientierung und zahlreiche Import- und Exportformate sämtlicher Orientierungsparameter.

Die automatische Prozessierung aller Bilddaten aus den verschiedenen Datensätzen, die sehr stark unterschiedlichen Aufnahmebedingungen und Qualitäten für die Auswertung in PhotoScan unterliegen, erwies sich als schwierig. Die automatisierte Zuordnung aller Bilddaten verwies auf einen deutlichen Orientierungsfehler, der sich durch die Ausbildung zweier zueinander rotierter Rekonstruktionen der Kirche zeigte (Abb. 8). Dargestellt sind Ansichten einer reduzierten dichten Punktwolke nach der automatischen Orientierung aller Bilder. Erkennbar ist hier, neben der doppelten Rekonstruktion des gleichen Gebäudes, dass diese stark zueinander rotiert sind (Abb. 8 links) und auch ein Maßstabsunterschied (Abb. 8 rechts) vorliegt. Es konnte identifiziert werden, dass die Bilder der DJI sowie der Canon EOS 200D eine gleichwertige und gleichgelagerte Rekonstruktion ergeben, während die Bilder der Canon EOS 6D zu einer deutlichen Fehlorientierung führen. Aus diesem Grund wurde in PhotoScan zunächst nur ein reduzierter Bilddatensatz für die Auswertung hinzugezogen.

Die Auswertung der Bilddaten des UAV-Fluges sowie der Canon EOS 200D erfolgte in getrennten Blöcken (chunks). Jeder Bilddatensatz einer Kamera wurde in der Auflösungsstufe „medium“ (reduziert um Faktor 4 zur Originalauflösung) automatisch orientiert und geprüft. Es wur-

den lediglich 2 Bilder im automatischen Orientierungsprozess eliminiert. Abb. 9 rechts zeigt alle Bildpositionen nach der Zusammenführung der getrennten Blöcke. Die Messung der Passpunkte erfolgte vorab getrennt in den Blöcken. Insgesamt wurden in der Erstprozessierung 20 Passpunkte zur Georeferenzierung genutzt (vgl. Abb. 9 links). Aufgrund des Bewuchses um die Kirche wurden auf der nördlichen Seite der Kirche zunächst keine Passpunkte identifiziert, da sie lediglich im terrestrischen Bildmaterial abgebildet sind. Der Großteil der nördlichen Fassade unter dem Blattwerk des angrenzenden Bewuchses ist für Luftaufnahmen verdeckt.



Abb. 8: Ansichten einer reduzierten dichten Punktwolke nach fehlerhafter automatischer Orientierung in PhotoScan 1.4.1; links: fehlerhafte Orientierung mit doppelter Rekonstruktion und Rotation; rechts: Frontansicht der Kirche mit doppelter Rekonstruktion des Eingangsportals

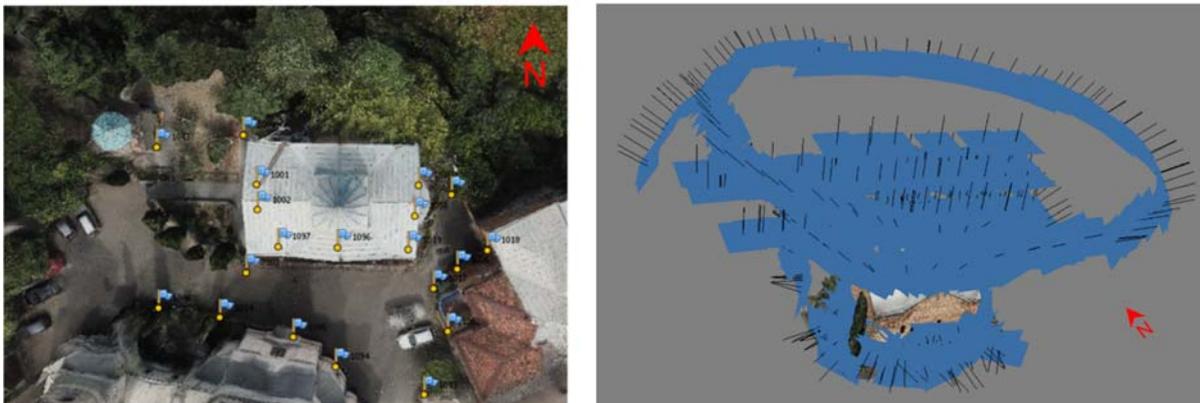


Abb. 9: links: Passpunktübersicht der Auswertung in PhotoScan; rechts: Übersicht der Bilddaten aus Bildflug und terrestrischen Bilder nach der Bildorientierung in PhotoScan

Die zusammengefassten Blöcke wurden abschließend gemeinsam ausgeglichen unter Berücksichtigung der Simultankalibrierung der beteiligten Kameras (f , c_x , c_y , k_1 - k_3 , p_1 - p_2 , b_1 - b_2). Der mittlere Rückprojektionsfehler ($RMS_{\text{rück}}$) beträgt 5.2 Pixel für alle Verknüpfungspunkte und 0.5 Pixel für die Passpunkte. Der $RMS_{\text{rück}}$ erscheint damit relativ hoch, er konnte jedoch zu diesem Zeitpunkt noch nicht abschließend geprüft werden. Zu identifizieren sind vereinzelte Bilder, die

sehr hohe Rückprojektionsfehler aufweisen, so dass davon auszugehen ist, dass noch fehlerhafte Zuordnungen vorliegen, die in einer weiteren Analyse näher zu analysieren sind. Die mittlere 3D-Abweichung an den Passpunkten beträgt 3.1 cm bei einer a priori Genauigkeit von 7 mm (siehe Tab. 4). Die erzielten Abweichungen erscheinen in Bezug auf die Passpunkte realistisch, da zum einen insbesondere die Abbildungsqualität der A4-Marken bei den Drohnenbildern sehr stark eingeschränkt ist und zum anderen wenige Passpunkte mit guten Schnittbedingungen erfassbar waren. Die Betrachtung der Passpunktabweichungen allein über die Bilder der Canon EOS 200D ergibt eine mittlere Abweichung von 6 mm, was ihrer Messqualität entspricht und bei diesem Nahbereichsbildverband zu erwarten war. Die Abweichungen im cm-Bereich resultieren damit vornehmlich aus dem UAV-Flug.

Das texturierte und vermaschte 3D-Modell aus Abb. 10 basiert auf der Generierung einer dichten Punktwolke in der Qualitätsstufe „high“ (reduziert um Faktor 2 zur Originalauflösung, 42 Mio. Punkte). Die anschließende 3D-Vermaschung erfolgte mit höchster Vermaschungsdichte (resultierend in etwa 8.4 Mio. Flächen). Zur Texturierung wurde die „adaptive orthophoto“ Methode gewählt, die eine Bildauswahl auf Grundlage der Flächenausrichtung wählt und gleichzeitig eine Mosaikierung erlaubt.



Abb. 10: Texturiertes und vermaschtes 3D-Modell aus PhotoScan (Alignment „medium“, Dense cloud „high“, Mesh „arbitrary, high“, Texture „adaptive orthophoto, mosaic“)

Aufgrund der komplexen Bildanordnung und der Objektgeometrie entstehen hohe Rechenzeiten im Bereich von ca. 1 Stunde für das Alignment und ca. 5 Tagen für die Berechnung der dichten Punktwolke (Qualitätsstufe "high", Prozessor i7-4770 mit 3.4 GHz CPU, GeForce GTX 645, 16 MB RAM). Das 3D-Modell verweist außerdem auf Unsicherheiten in der Rekonstruktion der nördlichen Seite der Kirche (Verdeckungen durch Bewuchs, schwierige Bildverknüpfungen) sowie an der westlichen Seite (kurze Seite in Abb. 10 links). Das westliche Kirchenportal kann in der dichten Punktwolke noch mit ausreichender Qualität rekonstruiert werden, jedoch erfolgt zum einen durch die Vermaschung eine Fehlkonstruktion des halbrunden Ausbaus und zum anderen sind die Modelltexturen sehr verschwommen und blass. Diese Abweichungen sind näher

zu untersuchen und ggf. alternative Modellierungswerkzeuge einzusetzen. Die Generierung einer dichten Punktwolke mit höherer Auflösung könnte ergänzend zu einem qualitativ höheren 3D-Modell führen. Diese sowie weitere statistische Untersuchungen zur Simultankalibrierung und Ausgleichung der Bildverbände folgen in weiteren Analyseschritten.

3.3.2 RealityCapture

Die Software RealityCapture der slowakischen Firma Capturing Reality ist ein weiteres auf Structure-from-Motion basierendes Photogrammetrie-Programm, das sich durch seine schnelle hochparallele, GPU-basierte Datenverarbeitung und die Möglichkeit zur direkten Integration von Laserscanning-Punktwolken auszeichnet. Dabei wird implizit davon ausgegangen, dass die Laserscanning-Daten von höherer Genauigkeit als die photogrammetrische Auswertung sind, d.h. die Orientierung der Bilder und die damit berechnete Punktwolke wird der Laserscanreferenz angepasst. Nachteilig am Programm sind die begrenzte Einflussmöglichkeit der Parametersteuerung und die sehr sparsame Angabe von statistischen Kenngrößen der Ergebnisse. Je nach gewähltem Modell zur Kameramodellierung werden die Parameter der inneren Orientierung ggf. für jedes Bild getrennt ermittelt (bildvariante innere Orientierung). Photogrammetrische Orientierungs- und Kalibrierungsdaten können nicht in andere Formate exportiert werden. RealityCapture ermöglicht nicht den Export von Punktwolken, sondern ausschließlich die Ausgabe fertig vermaschter Oberflächenmodelle.



Abb. 11: Vermaschtes Gesamtmodell mit RealityCapture 1.0.3

Im Lurdji-Projekt wurden sämtliche vorhandenen Bilder aller Kameras gemeinsam mit der Faro-Punktwolke unter Einbeziehung von 22 Passpunkten ausgewertet. Dabei wurden 1100 Bilder von insgesamt 1570 Bildern vollautomatisch orientiert. Lediglich in einigen Bereichen des Daches und der Turmspitze versagte die automatische Bildverknüpfung, da entweder überwiegend homogene (texturlose) Objektflächen oder starke Variationen zwischen Vordergrund (Kreuz) und Hintergrund (Bäume, Park) auftraten. Zur Kamerakalibrierung wurde ein Modell mit drei

radial-symmetrischen und zwei tangentialen Verzeichnungsparametern gewählt. Der mittlere Rückprojektionsfehler (entspricht Sigma 0) beträgt 0.6 Pixel.

Die in RealityCapture triangulierte Oberfläche besteht aus ca. 140 Mio. Dreiecken. Die Rechenzeit für das Alignment auf einem Rechner mit i7 6700k Prozessor, 64GB RAM und NVIDIA GTX980TI Grafikkarte betrug ca. 7 Minuten, die Berechnung der dichten Punktwolke und Vermaschung (Qualitätsstufe Medium) benötigte ca. 4,5 Stunden.

Abb. 11 zeigt das berechnete 3D-Modell als Vermaschung (ca. 5 mm Punktabstand). Die hohe Qualität wird zum einen durch die Vollständigkeit des Gesamtmodells belegt, zum anderen zeigen aber auch Detailansichten, wie gut das Objekt rekonstruiert wurde, besonders auch an den schwer zugänglichen Seiten (Abb. 12). Feinste Details wie das Baugerüst am Eingang oder filigrane gusseiserne Zäune im rückwärtigen Bereich werden korrekt modelliert. Lediglich das Kreuz auf der Turmspitze zeigt noch "Schleier", die durch die o.g. Hintergrundproblematik sowie einige fehlende Bilder verursacht sein dürften.

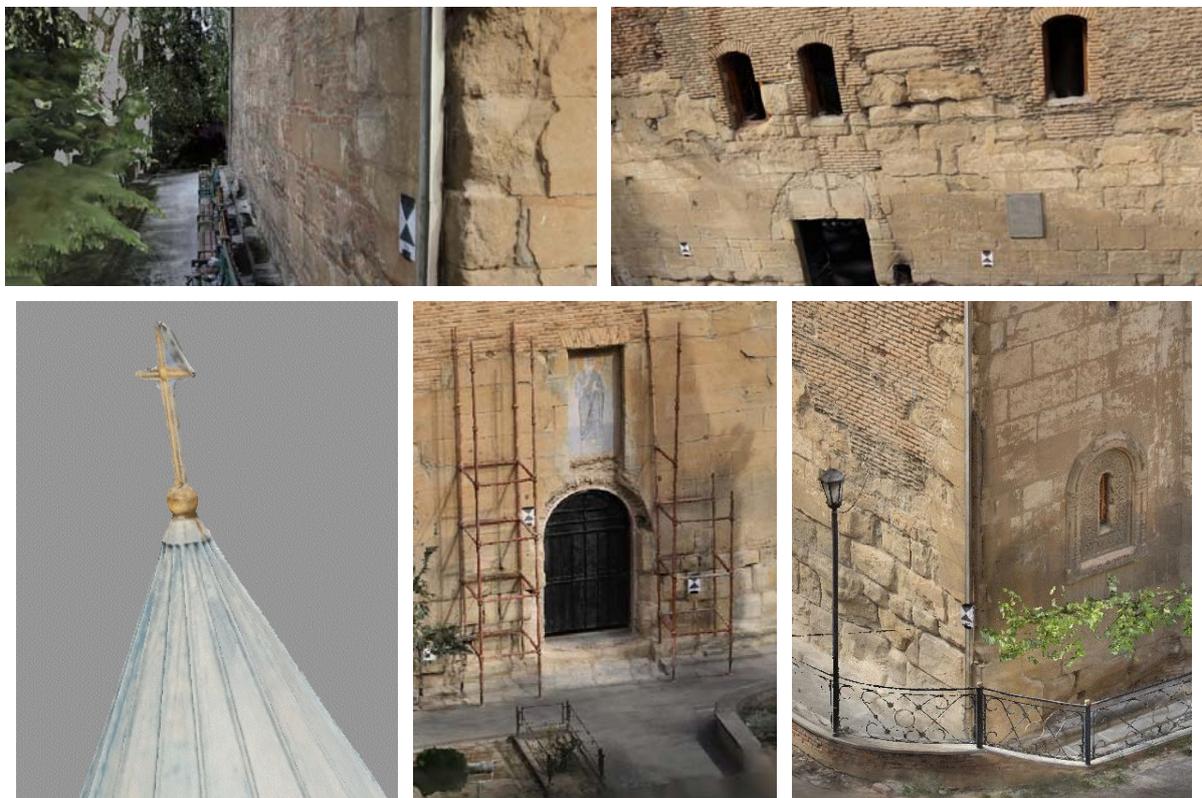


Abb. 12: Detailansichten aus der mit RealityCapture gerechneten Punktwolke

3.4 Ergebnisanalyse

Die aufgenommenen Bildverbände besitzen unterschiedlich gute Konfigurationen für SfM. Während die UAV-Bildflüge durch sehr hohe Überlappungen und gleichmäßige Orientierungsdaten problemlos orientiert werden können, gelingt dies für die einzelnen terrestrischen Bildverbände nur mit manuellen Eingriffen. Insbesondere der D6-Datensatz zeigt einige Problemstellen mit zu geringen Überlappungen oder aus der Reihe fallenden Bildern, die in der Sequenz das Objekt

nicht kontinuierlich abdecken. Problematisch sind auch um 90° gekantete Aufnahmen, welche die Orientierung (Alignment) offenbar stören können. Werden jedoch alle vorhandenen Bilder gemeinsam ausgewertet, gelingt die Orientierung weitgehend ohne Probleme bis auf wenige, nicht orientierbare Bilder.

Tab. 4: Photogrammetrische Auswertungen

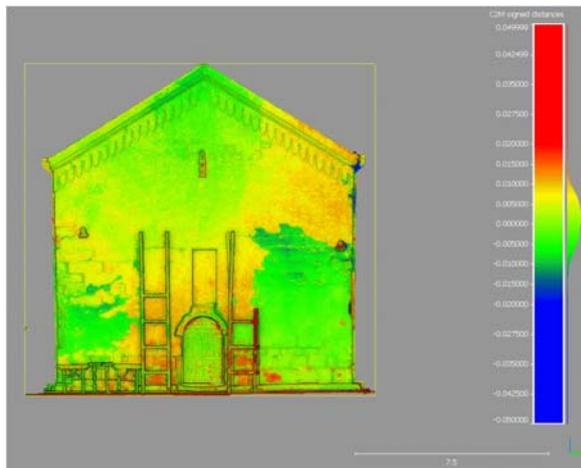
Software	Orientierte Bilder	Rückprojektionsfehler	RMS Objekt	Rechenzeit Alignment	Rechenzeit Dichte Punktwolke
Agisoft	572	5.2 px	31 mm	1 h	6 T
RealityCapture	1100	0.6 px	5 mm	7 min	4.5 h

Zum jetzigen Zeitpunkt der Auswertungen ist das Ergebnis von RealityCapture deutlich besser als von PhotoScan (Tab. 4). Zudem sind die Rechenzeiten erheblich kürzer. Aufgrund der beobachteten systematischen Restfehler bei der Kamerakalibrierung in PhotoScan sowie einer noch nicht endgültigen Analyse der Programmeinstellungen und der Passpunktkonfiguration können diese Aussagen jedoch noch nicht als endgültig aufgefasst werden. Insgesamt zeigt das Ergebnis der photogrammetrischen Auswertung, dass eine mittlere Standardabweichung der 3D-Punkte von ca. 5 mm im Objektraum erreichbar ist. Dabei ist zu beachten, dass die Passpunkte aus dem Faro-Scan entnommen und nicht tachymetrisch (mit möglicher höherer Genauigkeit) eingemessen worden sind.

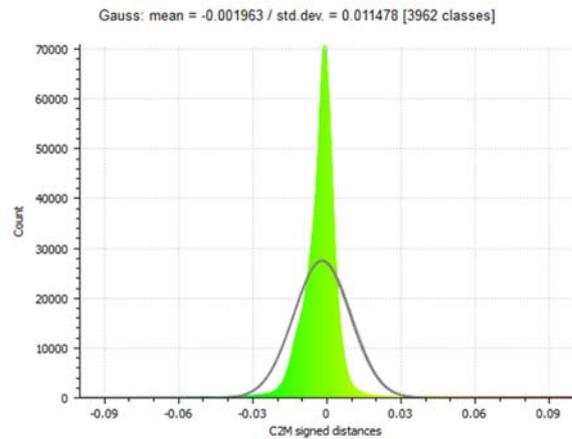
Die dargestellten Punktwolken sind Rohdaten ohne jede Filterung oder manuelle Nachbearbeitung. Für nachfolgende Anwendungen oder Visualisierungen müssen sie jedoch noch aufbereitet und gesäubert werden. Der exemplarische Vergleich beider Punktwolken zeigt im Detail einige gravierende Unterschiede, die jedoch ebenfalls noch nicht endgültig bewertet werden können. Da in RealityCapture die Faro-Punktwolke in den SfM-Prozess integriert ist, entsteht im Anschluss auch eine Punktwolke, die sehr nahe am Laserscanergebnis liegt. Die Detailanalysen zeigen aber auch, dass z.B. filigrane Objektdetails, die nicht vom Laserscanning aufgelöst werden, durch die Bildauswertung sehr gut rekonstruiert werden.

4 Weitere Versuche

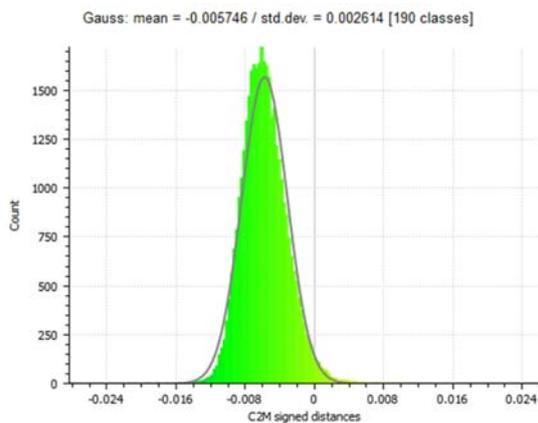
Abb. 13 zeigt einen ersten Vergleich (Cloud-to-Mesh) der mit RealityCapture gerechneten Punktwolke mit allen Bilddaten und der Punktwolke des BLK360 gegenüber der Referenz aus dem Faro-Scan. Abb. 13a,b stellen die Abweichungen über die gesamte Objektfassade dar. Die mittlere Abweichung beträgt lediglich 2 mm, d.h. die gemeinsame Auswertung der TLS- und der Bilddaten führt zu einem hochwertigen 3D-Modell der Oberfläche. Zu sehen sind hier flächenhafte Bereiche ähnlicher Abweichungen, die zumindest zum Teil auch durch die sehr unterschiedliche Oberflächentextur des Mauerwerks erklärt werden können (vgl. Abb. 1). Abb. 13c und d zeigen die entsprechenden Histogramme der Abweichungen im unteren und im oberen Bereich der Fassade. Hier wird sichtbar, dass im oberen Bereich schlechtere Daten vorliegen, analog zum Ergebnis aus Abs. 2.4.2.



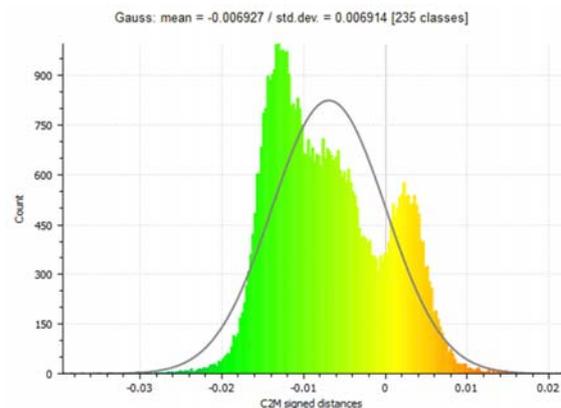
a) Abweichungen zum Referenzmodell



b) Histogramm über gesamte Außenwand



c) Histogramm über untere Wandhälfte



d) Histogramm über obere Wandhälfte

Abb. 13: Vergleich der mit RealityCapture gerechneten Punktwolke (BLK360 und Bilder) gegenüber Faro

5 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Bericht stellt erste Ergebnisse einer umfangreichen Messkampagne dar, die im September 2018 in Georgien durchgeführt wurde. Ziel war zunächst, den Einsatz unterschiedlicher Messsysteme und Auswerteverfahren für die 3D-Rekonstruktion historischer Kirchen unter realen Bedingungen zu evaluieren, um daraus Erfahrungen für kommende Projekte zu sammeln. Grundsätzlich liefern terrestrisches Laserscanning und auf Structure-from-Motion basierende photogrammetrische Verfahren ähnliche Ergebnisse.

Der Vorteil des Laserscannings besteht zunächst aus der zuverlässigen Erfassung von Punktwolken, ohne dass besonderes ingenieurtechnisches Know-how erforderlich ist. Voraussetzung sind stabile Standpunkte sowie hinreichende gegenseitige Überlappungen bzw. Passpunktkonfigurationen. Der Zeitaufwand für die Aufnahme im Feld betrug mit den eingesetzten Geräten das 2-5fache einer photogrammetrischen Bildaufnahme. Der Laserscanner Leica BLK360 hat sich als taugliches Gerät erwiesen, das im Rahmen seiner Spezifikationen verlässliche Ergebnisse liefert.

Die UAV-gestützte photogrammetrische Aufnahme erlaubt die Vermessung der Dach- und Turmflächen, die durch TLS nicht zu erkennen sind. Der Einsatz selbst einer einfachen, preiswerten Drohne hat sich hier als praxistauglich gezeigt. Die terrestrisch aufgenommenen Bilder sind dann problemlos auswertbar, wenn eine große gegenseitige Überlappung (ca. 80-90%) sichergestellt ist und zwischendurch auf gekantete oder aus der Reihe fallende Aufnahmen verzichtet wird. Die Auswertung einzelner terrestrischer Bildverbände ist nicht ohne weiteres möglich gewesen, in der Kombination mit den UAV-Bildern konnten aber alle Aufnahmen orientiert werden. Die Gesamtgenauigkeit liegt mit ca. 5 mm im Bereich des Laserscannings. Je nach Hard- und Softwareausstattung sind die erforderlichen Rechenzeiten bei der hohen Anzahl von Bildern zum Teil nicht praktikabel. Die hochparallelisierte Lösung von RealityCapture zeigt jedoch, dass optimierte Implementierungen mit gleichzeitiger TLS-Datenfusion möglich ist und zu hochqualitativen Ergebnissen führt.

Ausblickend sind weitere Untersuchungen geplant, in denen intensivere Analysen der Kamerakalibrierung und der dichten Punktwolken vorgenommen werden. Es ist weiterhin vorgesehen, weitere SfM-Programme mit diesen Daten zu testen.

Schließlich werden in naher Zukunft auch die anderen aufgenommenen Kirchen ausgewertet.

6 Literaturverzeichnis

- ANCHABADZE, Y.D. & VOLKOVA, N.G., 1990: Altes Tbilisi. Miklucho-Maklai (Hrsg.), Russische Akademie der Wissenschaften, Institut für Ethnografie.
- BLASKOW, R., LINDSTAEDT, M., SCHNEIDER, D. & KERSTEN, T., 2018: Untersuchungen zum Genauigkeitspotential des terrestrischen Laserscanners Leica BLK360. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018, Luhmann, T. & Schumacher, C. (Hrsg.), VDE Verlag GmbH, Berlin/Offenbach, 284-296.
- CHIZHOVA, M., KOROVIN, D., BRODOWSKII, M., BRUNN, A., STILLA, U. & LUHMANN, T., 2017: Probabilistic reconstruction of orthodox churches from precision point clouds using cellular automata. 3D Arch 2017, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **42**(2/W3), 187-194, doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-187-2017.
- KERSTEN, T., LINDSTAEDT, M., MAZIULL, L., SCHREYER, K., TSCHIRSCHWITZ, F. & HOLM, K., 2015: 3D-Erfassung, Modellierung und Visualisierung der Festungsanlage Kristiansten in Trondheim durch Photogrammetrie und terrestrisches Laserscanning im Rahmen von ERASMUS-Programmen. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band **24**, T. Kersten (Hrsg.), 35. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 16.-18. März 2015 an der Universität zu Köln, Tagungsband auf CD-ROM, 78-89.
- NAUMANN, M., GRENZDÖRFFER, G., NIEMEYER, F. & FRANK, A., 2015: Symbiose von UAS-Photogrammetrie und TLS zur Vermessung und 3D-Modellierung von Kirchenbauwerken am Beispiel des Greifswalder Domes. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2015.
- REMONDINO, F., 2011: Heritage Recording and 3D Modeling with Photogrammetry and 3D Scanning. Remote Sensing, **3**(6), 1104-1138.