

Kombination unterschiedlicher Photogrammetrischer Ansätze zur Rekonstruktion zerstörter Kulturdenkmäler

WISSAM WAHBEH¹ & STEPHAN NEBIKER¹

Zusammenfassung: In diesem Beitrag dokumentieren wir Untersuchungen und Resultate zur bildbasierten 3D-Rekonstruktion des Baaltempels, eines der wichtigsten Syrischen Kulturdenkmäler. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf der kombinierten Nutzung frei verfügbarer touristischer Bildaufnahmen und professioneller Panoramaaufnahmen. Der Rekonstruktionsprozess umfasst die automatische Bildorientierung unter Einbezug geometrischer Bedingungen für die Panoramaaufnahmen und anschliessendes Multi-View Dense Image Matching. Zudem zeigen wir den Nutzen von Panoramabilddaten in der Co-Registrierung und Georeferenzierung schwach verknüpfter Bildblöcke und Punktwolken auf. Als Resultat des Rekonstruktionsprozesses mit den kombinierten Bilddatenquellen resultieren weitgehend vollständige und detaillierte 3D-Modelle mit einer guten relativen und absoluten Genauigkeit.

1 Einleitung

In der Syrischen Stadt Palmyra, ca. 250 km nordöstlich von Damaskus gelegen, befinden sich die monumentalen Überreste einer mächtigen Stadt, die eines der wichtigsten kulturellen Zentren der Antike war. Palmyra befand sich am Schnittpunkt mehrerer Zivilisationen und war eine pulsierende Oasenstadt, als sie Mitte des 1. Jahrhunderts n. Chr. als Teil der Provinz Syria unter Römische Kontrolle geriet. Palmyra gewann laufend an Bedeutung als Stadt an der Handelsroute, welche Persien, Indien und China mit dem Römischen Reich verband. In der Stadt finden sich einzigartige Beispiele monumentaler Grabmäler, in welchen sich Griechisch-Römische Kunst mit einheimischen Elementen und Persischem Einfluss zu einem unverwechselbaren Stil vereinen. Ausserhalb der Stadtmauern finden sich Überreste eines Römischen Aquädukts und einer riesigen Nekropole.

Palmyra ist das Symbol der Syrischen Archäologie und ein UNESCO-Weltkulturdenkmal. Als Folge des Bürgerkriegs in Syrien wurde Palmyra 2013 in die Rote Liste des gefährdeten Welterbes der UNESCO eingetragen. Die Terrororganisation Islamischer Staat (IS) zerstörte in den von ihm besetzten Gebieten im Nordosten Syriens und im Westen Iraks zahlreiche Kulturdenkmäler. In Palmyra zerstörte der IS die bekanntesten Monumente: den Tempel des Bēl, auch bekannt als Baaltempel, den Triumphbogen (Hadrianstor) an der Prachtstrasse der Stadt sowie den Baalschamin-Tempel. Der grosse Baaltempel (Abb. 1) gilt als wichtigster Sakralbau des 1. Jahrhunderts n. Chr. im Osten mit einer einzigartigen Architektur (KHAN ACADEMY, 2016). Der Tempel befindet sich im Zentrum eines quadratischen architektonischen Bezirks mit einer Seitenlänge von ca. 205 m. Dieser Bezirk wurde wiederum von einer Säulenhalle (Portikus) umgeben. Der Tempel selbst hat ein massives Fundament, welches eine gestufte

¹ FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Vermessung und Geoinformation IVGI, Gründenstrasse 40, CH-4132 Muttenz, E-Mail: [wissam.wahbeh, stephan.nebiker]@fhnw.ch

Plattform trägt. Auf der obersten Plattform (Stylobat) mass der Tempel 55×30 m und der Hauptraum (Cella) mit der Kultstatue wies eine Höhe von 14 m und horizontale Dimensionen von $39.45 \text{ m} \times 13.86 \text{ m}$ auf.



Abb. 1: Einige der für die Rekonstruktion verwendeten touristische Aufnahmen des Baaltempels

Touristische Fotos von Kulturdenkmälern sind sehr nützlich, indem sie deren geometrischen und spektralen Eigenschaften zu früheren Zeitpunkten festhalten. Mit der systematischen Zerstörung Syrischer und Irakischer Kulturdenkmäler durch den IS steigt der Bedarf nach Lösungen zur Dokumentation sowie zur virtuellen Rekonstruktion dieser Objekte als Basis für Visualisierungen und für allfällige zukünftige Rekonstruktionen. Die virtuellen 3D-Rekonstruktionen sind auch ein wichtiges Statement, dass zumindest das virtuelle Gedächtnis auch durch derartige barbarische Zerstörungen nicht gelöscht werden kann.

Die photogrammetrische Rekonstruktion ist die einzig verfügbare Lösung in Fällen wie diesem, in welchen das Monument zerstört wurde und keine systematischen 3D-Aufnahmen bspw. mittels Laserscanning existieren. Ein ähnliches Problem stellte sich nach der Zerstörung der grossen Buddha-Statuen von Bamiyan, Afghanistan durch die Taliban im Jahre 2001. Im Anschluss daran wurde eine photogrammetrische 3D-Rekonstruktion mit nur drei metrischen Aufnahmen aus dem Jahre 1970 durchgeführt (GRÜN et al. 2003). Heute, nach über einem Jahrzehnt rasanter Entwicklungen in der Photogrammetrie und Computer Vision sind automatisierte 3D-Rekonstruktionen aus grossen Sammlungen an metrischen und sogar nicht-metrischen Aufnahmen, bspw. von Touristen, möglich.

Aktuelle Forschungsbestrebungen zur bildbasierten 3D-Rekonstruktion von urbanen Räumen oder Kulturdenkmälern können in zwei Hauptströmungen unterteilt werden: genaue 3D-Rekonstruktionen aus (semi-) professionellen Bilddaten einerseits und hoch skalierbare 3D-Rekonstruktionen aus webbasierten Foto-Sammlungen andererseits. KOUTSOUDIS et al. (2014), bieten eine gute Übersicht über Algorithmen auf der Basis von Structure-from-Motion (SfM) und Dense Multi-View Reconstruction (DMVR) und den erzielbaren Resultaten bei Verwendung von (semi-) professionellen DSLR-Kameras. KERSTEN & LINDSTAEDT (2012) und SANTAGATI et al. (2013) untersuchen das Genauigkeitspotential bildbasierter 3D-Rekonstruktionen durch Vergleiche mit Referenzdaten aus terrestrischen Laserscans (TLS). Demgegenüber zeigen beispielsweise AGARWAL ET AL. (2011) das Potential einer vollautomatischen 3D-Rekonstruktion urbaner Räume oder grosser Monumente aus ungeordneten Foto-Sammlungen im Web. Die beiden Hauptströmungen werden einerseits ergänzt durch Untersuchungen wie etwa von REMONDINO et al. (2012) zu (kostengünstigen) Bildorientierungslösungen mit einer kritischen Diskussion zu schwachen Netzgeometrien, wie diese bei öffentlichen Bilddaten oft

unvermeidbar sind. Die nachfolgenden Untersuchungen bauen zudem auf Methodiken zur Beurteilung von Dense Image Matching Resultaten auf (CAVEGN et al. 2015).

In diesem Artikel stellen wir zunächst die verfügbaren touristischen und professionellen Bilddaten vor und diskutieren typische Limitierungen touristischer Aufnahmen. In Kapitel 3 diskutieren wir drei unterschiedliche Strategien zur 3D-Extraktion. In Kapitel 4 beschreiben wir einen Ansatz zur Co-Registrierung mehrerer partieller Punktwolken, die typischerweise aus öffentlichen Bilddaten entstehen. Schliesslich zeigen wir die Nutzung sphärischer Photogrammetrie als Mittel zur Co-Registrierung und Georeferenzierung des Gesamtmodells.

2 Datensätze

2.1 Bilddaten

Für die Rekonstruktion des Baaltempels standen zwei Bilddatenquellen zur Verfügung: frei zugängliche touristische Fotos sowie Panoramaaufnahmen, die mit professioneller Ausrüstung erfasst worden waren.

Die touristischen Aufnahmen wurden im Web gesucht, wovon ein Grossteil auf flickr.com gefunden wurde. In der Bildsuche wurden Bildtags in verschiedenen Sprachen verwendet, die einen thematischen oder örtlichen Bezug zum Objekt haben könnten. Als besonders wertvoll erwies sich auch die "Reverse Image Search"-Funktion von Google. Diese liefert Suchergebnisse basierend auf der inhaltlichen und semantischen Ähnlichkeit (z.B. gleiche Website) mit einem Eingabebild und lieferte zusätzliche Fotos ohne thematische Tags. In einer anschliessenden Filterung wurden Bilder ohne EXIF-Header und einer Bilddimensionen unter 1200×1600 Pixel entfernt, womit noch 180 geeignete touristische Fotos verblieben (vgl. Abb. 2 & 3). Diese umfassten 112 Aussenaufnahmen und 68 Innenaufnahmen des Tempels über einen Zeitraum von 2005 bis 2011 und mit einer grossen Bandbreite an Brennweiten.

Die professionellen Panoramaaufnahmen waren von G. Fangi auf einer Exkursion durch Syrien im Jahr 2010 erfasst worden. Von den total 20 Panoramen, bestehend aus insgesamt 551 Einzelaufnahmen, decken 13 Panoramen den Aussenraum sowie 7 Panoramen den Inneraum des Tempels ab (vgl. Abb. 2 & 3). Die Bilder wurden mit einer DSLR-Kamera Canon EOS 450D mit einem 28 mm Objektiv und einem Nodaladpater erfasst, womit ein gemeinsames Projektionszentrum für alle Aufnahmen eines Panoramastandorts realisiert wird. Um die Bildgeometrie der Originalbilder zu erhalten und um Umprojektions- bzw. Stitching-Fehler zu vermeiden, wurden für die nachfolgenden Untersuchungen ausschliesslich die Original-Einzelaufnahmen verwendet. Zudem unterstützen typische SfM-Softwarepakete, wie etwas AgiSoft PhotoScan, ausschliesslich das perspektivische Lockkamera- sowie neuerdings auch Fischaugenmodelle, nicht aber typische Panoramaprojektionen. Aus der Panoramamesskampagne standen 74 der Aussenaufnahmen sowie 162 der Innenaufnahmen für den Rekonstruktionsprozess zur Verfügung.

2.2 Netzgeometrie und Bilderfassungsmuster

Die Qualität der Netzgeometrie ist ein Schlüsselfaktor für genaue und zuverlässige 3D-Rekonstruktionen (ALSADIK et al. 2014). Im Falle touristischer Aufnahmen ist die Netzgeometrie allerdings kaum beeinflussbar. Typische Bilderfassungsmuster von Touristen auf städtischem Massstab wurden beispielsweise von KÁDÁR & GEDE (2013) anhand der Geotags von frei

zugänglichen Bildsammlungen im Internet untersucht. In unseren Untersuchungen interessieren die Erfassungsmuster auf Stufe Sehenswürdigkeit bzw. Kulturdenkmal und deren Auswirkungen auf den Rekonstruktionsprozess und die Resultate. Touristen interessieren sich oft viel stärker für berühmte bzw. herausragende Teile eines Kulturdenkmals als für weniger bekannte oder weniger leicht zugängliche Teile. Eine vertiefte Analyse und Diskussion dieser Aspekte finden sich in WAHBEH & NEBIKER (2016).



Abb. 2: Standorte und Blickrichtungen der Aussenaufnahmen (touristische Fotos: grün; Panoramas: blau)

Abbildung 2 zeigt die Aufnahmestandorte und Blickrichtungen der Aussenaufnahmen des Baaltempels und Abbildung 3 diejenigen der Innenaufnahmen. Ein visueller Vergleich zeigt die Komplementarität der Panoramaaufnahmen (blau) und der touristischen Fotos (grau/grün) sowie die unvollständige Abdeckung durch letztere.

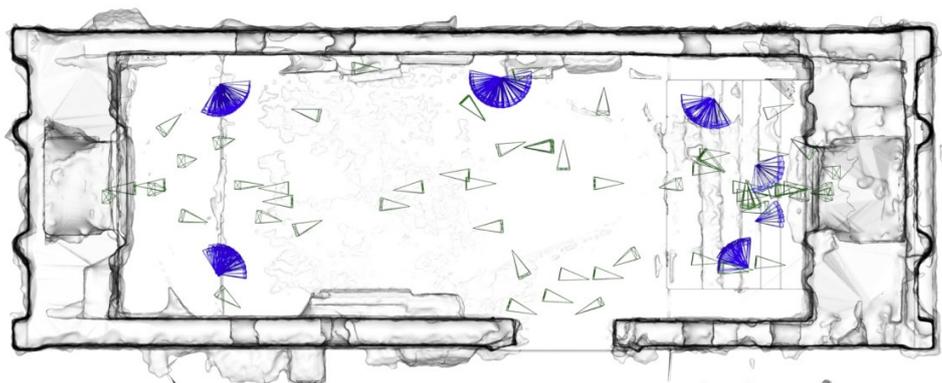


Abb. 3: Standorte und Blickrichtungen der Innenaufnahmen im Grundriss des erzeugten 3D-Modells (touristische Fotos: grün; Panoramas: blau)

3 3D-Extraktion

Wie bereits in früheren Arbeiten aufgezeigt wurde, nimmt die Zahl an quelloffenen und kommerziellen Softwarepaketen für die Bündelorientierung und für die dichte Bildzuordnung stetig zu (SANTAGATI et al. 2013; KOUTSOUDIS et al. 2014). Aufgrund früherer Vergleiche verschiedener Lösungen wurde für die folgenden Untersuchungen Agisoft PhotoScan verwendet. Ein wichtiger Grund war die Möglichkeit, in der Bündelausgleichung geometrische Bedingungen einzuführen. In unserem Fall war insbesondere die Option zur Fixierung eines gemeinsamen Projektionszentrums für alle Aufnahmen eines einzelnen Panoramas sehr wertvoll. Zudem hatten andere Autoren, wie etwa REMONDINO et al. (2012) aufgezeigt, dass PhotoScan im Vergleich mit anderen Softwarepaketen sowohl bezüglich Genauigkeit als auch Zuverlässigkeit gut abschnitt, auch bei ungünstigen Netzgeometrien.

3.1 Bildorientierung und Bildzuordnung

Die verwendeten zwei Bilddatensätze waren beide nicht mit dem Ziel einer genauen und detaillierten 3D-Rekonstruktion erfasst worden. Beide Datensätze haben jedoch ihre spezifischen Stärken, die in der Folge ausgenutzt werden sollen. So bieten einerseits die touristischen Aufnahmen eine sehr dichte und hoch aufgelöste Abdeckung besonders wichtiger Teile der Denkmäler. Nachteile sind eine oft schwache Netzgeometrie, eine unvollständige Abdeckung sowie die Verwendung zahlreicher nicht-metrischer Kameras. Andererseits wurden die Panoramaaufnahmen von bewusst gewählten, gut verteilten Standorten aus mit einer fixen Brennweite aufgenommen. Die grossen Basislinien und die daraus resultierenden grossen Schnittwinkel sind zwar ideal für eine interaktive Panoramaphotogrammetrie, aber ungeeignet für SfM-Ansätze.

Um die Beiträge der einzelnen Datensätze zur automatischen 3D-Rekonstruktion beurteilen zu können, wurden die nachfolgenden drei Szenarien A) – C) untersucht. Zu diesem Zweck wurden 3D-Punktwolken für jedes Szenario berechnet und anschliessend verglichen.

- Szenario A) Ausschliessliche Verwendung der touristischen Aufnahmen
- Szenario B) Touristische Aufnahmen in Kombination mit Panorama-Einzelbildern **ohne** geometrische Bedingungen
- Szenario C) Touristische Aufnahmen in Kombination mit Panorama-Einzelbildern **mit** geometrischen Bedingungen

3.2 Generierte Punktwolken

Die Aussenhülle des Tempels konnte für alle drei Szenarien in einem einzigen Berechnungsdurchlauf rekonstruiert werden (Abb. 4, blau). Demgegenüber konnten die Innenaufnahmen nicht als gesamtes und in einem Durchlauf orientiert und berechnet werden, da kaum touristische Aufnahmen existieren, welche die beiden sich gegenüberliegenden spektakulären nördlichen und südlichen Kammern verknüpfen würden.

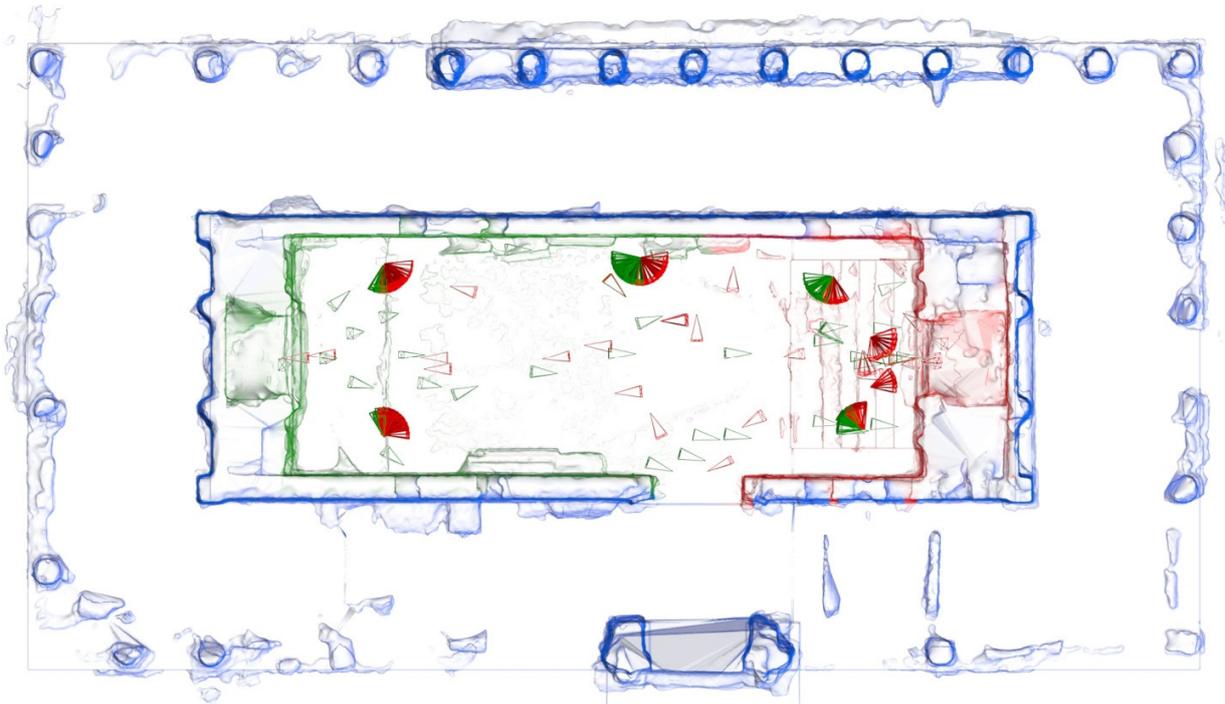


Abb. 4: Grundriss des Baaltempels eingefärbt nach den drei rekonstruierten Teilbereichen bzw. den drei Punktwolken: Innenraum Nordseite (grün); Innenraum Südseite (rot) und Aussenraum (blau).

Als Folge davon wurden die Innenaufnahmen in zwei separate, sich überlappende Gruppen unterteilt und pro Gruppe eine Punktwolke abgeleitet. Die erste Gruppe enthält die Aufnahmen der nördlichen Kammer (Abb. 4, links/grün), die zweite diejenigen der südlichen Kammer (Abb. 4, rechts/rot). In den Szenarien B und C wurden die Panorama-Aufnahmen mit einbezogen. Der Einbezug gemeinsamer Panoramaaufnahmen in diesen Szenarien kann in der späteren Co-Registrierung ausgenutzt werden. Aus dem umfassendsten Szenario C mit den meisten Bilddaten ergaben sich folgende drei Punktwolken: eine Punktwolke für den nördlichen Innenraum mit ca. 8.5 Mio. Punkten und für den südlichen mit 9.5 Mio. Punkten sowie eine Punktwolke der Aussenhülle mit ca. 6.5 Mio Punkten.

3.3 Analyse der Ergebnisse

Um den Einfluss der einzelnen Bilddatentypen und der geometrischen Bedingungen zu analysieren, wurden die bildbasierten Punktwolken miteinander verglichen. Da wegen der Zerstörung des Tempels kein unabhängiger Referenzdatensatz zur Verfügung stand, wurden die Ergebnisse aus Szenario C) in der Folge als Referenz verwendet. Dieses Szenario umfasst alle verfügbaren Bilddaten und wurde mit geometrischen Bedingungen prozessiert, welche für alle Einzelaufnahmen eines Panoramas jeweils ein gemeinsames Projektionszentrum schätzen. Damit werden die Redundanz und die Stabilität des Bildblocks signifikant erhöht. Für die folgenden Experimente wurde die Punktwolken des südlichen Innenraums aus den drei Szenarien verglichen (Abb. 4, rechts/rot). Alle drei Punktwolken wurden vorgängig über gemeinsame natürliche Merkmale co-registriert. Der ungefähre Modellmassstab wurde über

bekannte Masse aus archäologischen Plandaten eingeführt. Abbildungen 5 und 6 zeigen die Vergleiche der Szenarien A und B mit der Referenzpunktwolke aus Szenario C.

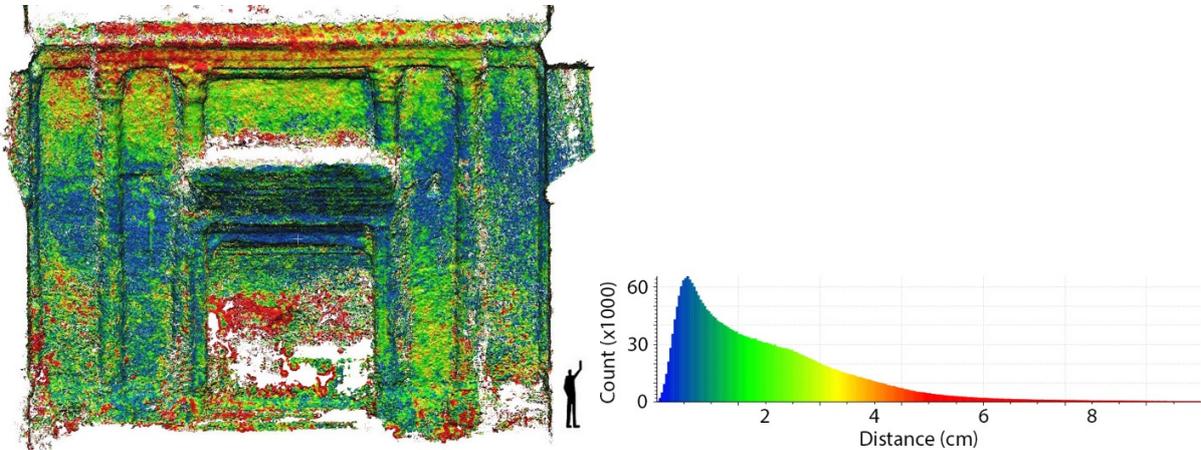


Abb. 5: Abstandsanalyse zwischen Punktwolke A (nur touristische Aufnahmen) und C (touristische Aufnahmen in Kombination mit Panorama-Einzelbildern mit geometrischen Bedigungen)

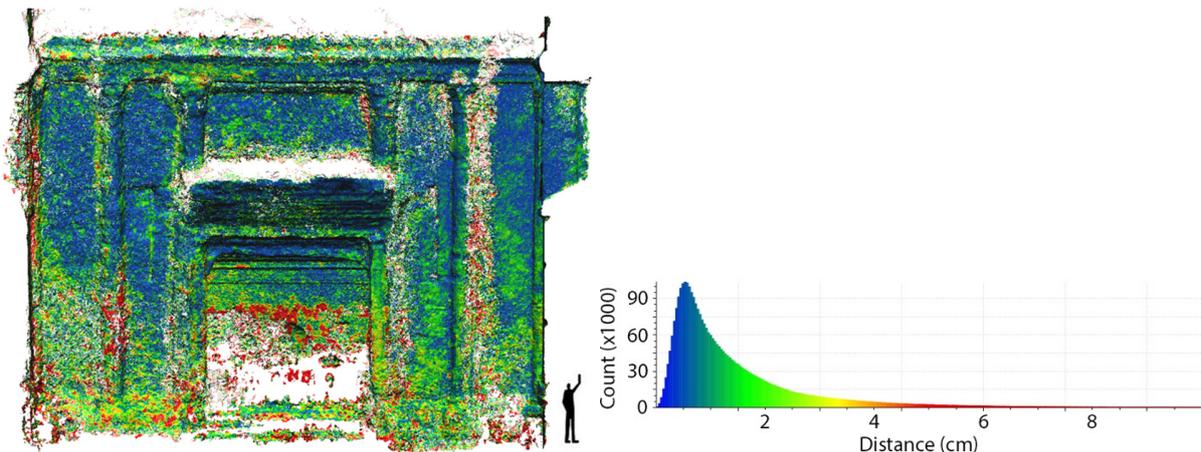


Abb. 6: Abstandsanalyse zwischen Punktwolke B (touristische Aufnahmen in Kombination mit Panorama-Einzelbildern ohne geometrischen Bedigungen) und C (Kombination mit geometrischen Bedigungen)

Abbildung 5 illustriert die Abstände zwischen der Punktwolken A und C der südlichen Innenwand. Der mittlere Abstand beträgt 2.2 cm und die Standardabweichung 3.3 cm. In diesem Vergleich sind vor allem am oberen Rand der Wand bzw. des Bildblocks noch signifikante systematische Effekte zu erkennen, die auf nicht kompensierte Fehler in der Orientierung der touristischen Aufnahmen schliessen lassen. Abbildung 6 zeigt den identischen Vergleich zwischen Punktwolke B und C mit einem mittleren Abstand von 1.5 cm und einer Standardabweichung von 1.4 cm. Dies lässt darauf schliessen, dass das Rauschen der extrahierten Puktwolke durch die Einführung der Panorama-Aufnahmen um mehr als einen Faktor 2 reduziert werden konnte.

4 Co-Registrierung mit Panoramazentren als virtuelle Passpunkte

Die Co-Registrierung der beiden inneren Punktwolken stellte einige Herausforderungen wegen fehlender Passpunkte und einer geringen Punktdichte in den überlappenden Bereichen an den West- und Ostwänden. Versuche zur Nutzung gemeinsamer natürlicher Merkmale ergaben keine befriedigenden Resultate. Die Lösung bestand darin, die Transformationsparameter zwischen den beiden Bildnetzen zu schätzen und diese für die Transformation der Punktwolken zu verwenden. Dabei dienten die fünf Panoramazentren, die in beiden Bildblöcken mitgeschätzt worden waren, als gemeinsame 'virtuelle' Passpunkte. Eine 3D-Helmerttransformation zwischen den beiden Punktgruppen ergab einen mittleren 3D-Transformationsfehler von ca. 12 cm mit einer minimalen Restklaffe von 5 cm für das zentrale Panorama (Abb. 7) und einer maximalen von 17 cm an beiden entfernten Panoramastandorten. Dieser mittlere Transformationsfehler entspricht ca. 0.3% der maximalen Dimension der Halle von ca. 40 m, was in Anbetracht der erschwerten Umstände als zufriedenstellend betrachtet werden darf.

5 Sphärische Photogrammetrie als topographische Datenbank

5.1 Sphärische Panorama-Photogrammetrie

Sphärische Panorama-Photogrammetrie (SPP) verwendet sphärische Panoramen als Bildbasis. Diese werden vorgängig aus überlappenden Einzelbildern erzeugt, die idealerweise mittels Nodaladapter zentrisch erfasst und anschliessend in einer sphärischen Projektion "gesticht" bzw. fusioniert werden (SZELINSKY & SHUM 1997). Hauptvorteile der SPP sind ein grosses Gesichtsfeld von bis zu $360^\circ \times 180^\circ$ in Kombination mit einer hohen Auflösung. Objektkoordinaten werden in der Regel via Vorwärtseinschnitt mit interaktiven Bildbeobachtungen in mind. zwei Panoramen bestimmt. SPP wird erfolgreich zur interaktiven 3D-Rekonstruktion architektonischer Kulturdenkmäler eingesetzt (PISA ET AL. 2010). Um den Mangel an Stereoskopie auszugleichen und trotzdem komplexe Oberflächen modellieren zu können, werden neue Modellierungsansätze untersucht. So werden beispielsweise die orientierten sphärischen Bildpanoramen in eine CAD-Umgebung projiziert (e.g. D'ANNIBALE et al. 2009). Für eine detailliertere Betrachtung der sphärischen Photogrammetrie sei auf FANGI & NARDINOCCHI (2013) verwiesen.

5.2 Sphärische Photogrammetrie zur Georeferenzierung von Punktwolken

Im vorliegenden Fall, wo keine Passpunkte für eine einheitliche Georeferenzierung der einzelnen Bildblöcke bzw. der daraus resultierenden 3D-Punktwolken vorliegen, bietet sich die sphärische Panorama-Photogrammetrie als Ersatzlösung an. Dabei dient die SPP einerseits zur Schätzung eines einheitlichen Panoramabildverbandes über einen Netzausgleich und andererseits zur Bestimmung von neuen 3D-Passpunkten. Zur absoluten Orientierung und möglichst genauen Skalierung des lokalen SPP-Netzes wurden die Hauptachsen des Tempels und existierende Plandaten des Tempelinnenraums ($39.45 \text{ m} \times 13.86 \text{ m}$) beigezogen.



Abb. 7: Das zentrale Panorama im Innenraum des Baaltempels.

Das photogrammetrische Netzwerk der Panoramaaufnahmen des Aussenraums ist in Abb. 8 dargestellt. Es besteht aus 13 sphärischen Panoramen verteilt rund um den Tempel und wurde mittels 1320 Bildbeobachtungen mit einem σ_0 von 0.0051 radians orientiert.

```
Number observations= 1320
Number of unknowns = 298
      redundancy = 1022
Number unk.points = 82
Number unk.0 bear. = 13
SIGMA NAUGHT= .005079
```

* σ_0 in radians

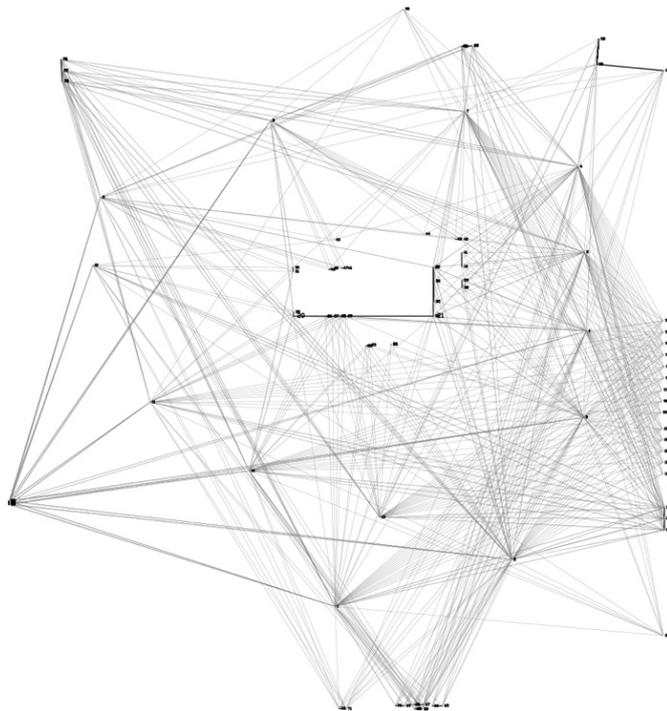


Abb. 8: Äusseres photogrammetrisches Netz der Panoramaaufnahmen

Das photogrammetrische Netz der Panoramen im Inneraum wird in Abb. 9 dargestellt. Es besteht aus insgesamt sieben Panoramen, wovon fünf den ganzen Innenraum abdecken und zwei Detailaufnahmen der südlichen Kammer liefern. Die Bündelausgleichung besteht aus 692 Beobachtungen und weist ein σ_0 von 0.0033 radians auf.

```

Number observations= 692
Number of unknowns = 363
      redundancy = 329
Number unk. points = 113
Number unk.0 bear. = 6
  SIGMA NAUGHT= .003338

```

* σ_0 in radians

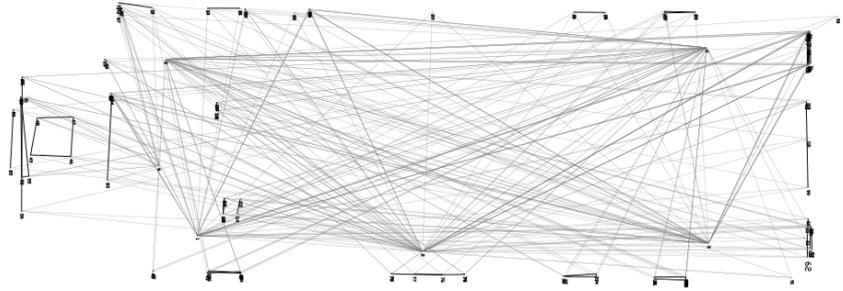


Abb. 9: Netzwerk der Panoramen im Innenraum

Im Anschluss an die Bündelorientierung liegen die Verknüpfungspunkte aus diesen sphärischen Bildblöcken als 3D-Objektpunkte vor, die als dünn besetzte 3D-Punktwolken (FANGI & NARDINOCCHI 2013) verwendet oder zu polygonalen Gittermodellen weiter verarbeitet werden können (FANGI & WAHBEH 2013). Im Baaltempel dienten diese Verknüpfungs- bzw. Neupunkte aus dem Netzausgleich zur Skalierung und Georeferenzierung der generierten Punktwolke in ein einheitliches Koordinatensystem.

6 Resultate

Die Ergebnisse der bildbasierten 3D-Rekonstruktion des Baaltempels aus einer Kombination von frei zugängliche Touristen-Aufnahmen und professionellen Panorama-Aufnahmen werden in Abbildung 10 und 11 illustriert.



Abb. 10: Das definitive 3D-Modell des Baaltempels als trianguliertes Oberflächenmodell der fusionierten Punktwolke (rechts) und Modell mit Texturen aus den Inputbilddaten (links)

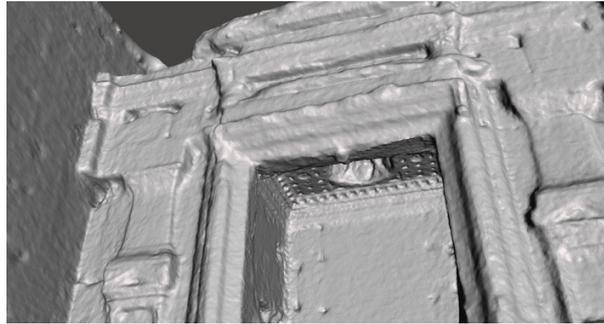


Abb. 11: Detailansicht des erzeugten Oberflächenmodells für einen Ausschnitt der nördlichen Kammer.

Mit dem vorgestellten Ansatz konnte eine weitgehend vollständige, dichte 3D-Punktwolke erzeugt werden. Ausnahmen bilden einige horizontale Flächen an Maueroberflächen und an einigen Stellen des Bodens. Die Dichte des erzeugten Oberflächenmodells und damit der Detaillierungsgrad variieren stark. Auf Grund der typischen touristischen Bilderfassungsmuster werden die 'interessanten' Teile des Monuments sehr detailreich und realitätstreu abgebildet. Dies gilt ganz besonders in Kombination mit den perfekt co-registrierten Texturdaten. Auf Grund der vorgestellten Untersuchungen, hat das resultierende 3D-Modell eine hohe metrische Qualität mit einer relativen Genauigkeit im Bereich von 2-3 cm und einer absoluten Genauigkeit über die gesamte Objektausdehnung von 10-15 cm, was in etwa 0.3% der Tempelausdehnung entspricht.

7 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag haben wir verschiedene Methoden und Szenarien für die bild-basierte 3D-Rekonstruktion von zerstörten oder nicht mehr zugänglichen Kulturdenkmälern vorgestellt und am Beispiel des zerstörten Baaltempels im Syrischen Palmyra praktisch untersucht. Unsere Untersuchungen umfassten einerseits eine Rekonstruktion aus ausschliesslich frei verfügbaren touristischen Bildaufnahmen aus dem Web sowie Rekonstruktionen in Kombination mit professionellen Panoramaaufnahmen. Die Rekonstruktion nur mit touristischen Aufnahmen lieferte eine gute relative Genauigkeit und einen hohen Detaillierungsgrad für die populären Teile des Monuments. Auf Grund der unvollständigen Abdeckung dieser Aufnahmen konnte allerdings der Tempel nur unvollständig rekonstruiert werden. Die Kombination von touristischen Fotos und professionellen Panoramaaufnahmen stellte sich demgegenüber als sehr mächtig heraus. Sie erlaubte eine fast vollständige 3D-Rekonstruktion des gesamten Baaltempels mit einer guten relativen und absoluten Genauigkeit und einem sehr hohen Detaillierungsgrad für die wichtigen Teile des Monuments. Die Unterstützung von geometrischen Bedingungen in der Bündelorientierung zur Schätzung eines gemeinsamen Projektionszentrums aller Aufnahmen eines jeweiligen Panoramastandorts stellte sich als sehr wertvoll heraus und resultierte in einer signifikanten Qualitätssteigerung. Um ein vollständiges, co-registriertes und georeferenziertes 3D-Modell zu erzeugen, mussten innovative Co-Registrierungsansätze gefunden werden. Dabei zeigten sich die Panoramabilder wiederum als sehr wertvoll. Einerseits dienten die gemeinsamen Projektionszentren als virtuelle Passpunkte zur Co-Registrierung von Bildblöcken mit einer geringen Punktdichte in den Überlappungsbereichen. Andererseits konnte mit einem photo-

grammetrischen Netzwerk aus sphärischen Panoramen und mit sphärischen photogrammetrischen Auswertungen das gesamte 3D-Modell korrekt georeferenziert, d.h. skaliert und in ein einheitliches lokales Bezugssystem transformiert werden.

In unserer zukünftigen Arbeit werden wir Methoden untersuchen, welche eine Quantifizierung und Visualisierung der Rekonstruktionsqualität für unterschiedliche Teile bzw. Abschnitte rekonstruierter Monumente ermöglichen. Zudem planen wir, historische Bilder in den Bildorientierungs- und 3D-Extraktionsprozess einzubeziehen mit dem Ziel, die Vollständigkeit und Genauigkeit solcher Rekonstruktionen weiter zu verbessern. Schliesslich hoffen wir, dass diese 3D-Rekonstruktionen eine nützliche Basis für eine allfällige physische Rekonstruktion des Baaltempels in friedlicheren Zeiten bieten könnte.

8 Dank

Wir bedanken uns hiermit bei allen unbekanntenen Personen, die ihre Fotos von Palmyra frei verfügbar im Internet veröffentlichten. Ein weiterer Dank gilt Gabriele Fangi für die Zurverfügungstellung der Panorama-Aufnahmen des Baaltempels.

9 Literaturverzeichnis

- AGARWAL, S., FURUKAWA, Y., SNAVELY, N., SIMON, I., CURLESS, B., SEITZ, S.M. & SZELISKI, R., 2011. Building rome in a day. *Communications of the ACM* **54** (10), 105-112.
- AGISOFT, 2016: AgiSoft PhotoScan User Manual. http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro_1_0_0_en.pdf
- ALSADIK, B., GERKE, M. & VOSSELMAN, G., 2013: Automated Camera Network Design for 3D Modelling of Cultural Heritage Objects. *Journal of Cultural Heritage* **14** (6), 515-526.
- ALSADIK, B., GERKE, M., VOSSELMAN, G., DAHAM, A. & JASIM, L., 2014: Minimal camera networks for 3d image based modeling of cultural heritage objects. *Sensors* **14** (4), 5785-5804.
- D'ANNIBALE, E. & FANGI, G., 2009: Interactive modelling by projection of oriented spherical panorama. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **38** (5/W1).
- CAVEGN, S., HAALA, N., NEBIKER, S., ROTHERMEL, M. & TUTZAUER, P., 2014: Benchmarking High Density Image Matching for Oblique Airborne Imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **40** (3), 45-52.
- FANGI, G., 2007: The multi-image spherical panoramas as a tool for architectural survey. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **36** (5/C53), 311-316.
- FANGI, G. & WAHBEH, W., 2013: The destroyed minaret of Umayyad Mosque of Aleppo, the survey of the original state. *European Scientific Journal, SPECIAL*, edition **4**.
- FANGI, G. & NARDINOCCHI, C., 2013: Photogrammetric processing of spherical Panoramas. *The Photogrammetric Record* **28** (143), 293-311.

- GRUEN, A., REMONDINO, F., ZHANG, L., 2002: Reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. *Int. Arch. of Photogrammetry and Remote Sensing* **34** (5), 363-368.
- KÁDÁR, B. & GEDE, M., 2013: Where Do Tourists Go? Visualizing and Analysing the Spatial Distribution of Geotagged Photography. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* **48** (2), 78-88.
- KERSTEN, T. & LINDSTAEDT, M., 2012: Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications Using Open-Source Software and Web Services. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, (6), 727-740.
- KHAN ACADEMY, 2016: Temple of Bel, Palmyra. www.khanacademy.org/humanities/ancient-art-civilizations/palmyra/a/temple-of-bel-palmyra
- KOUTSOUDIS, A., VIDMAR, B., IOANNAKIS, G., ARNAOUTOGLU, F., PAVLIDIS, G. & CHAMZAS, CH., 2014: Multi-image 3D reconstruction data evaluation. *Journal of Cultural Heritage* **15** (1), 73-79.
- NEBIKER, S., LACK, N. & DEUBER, M., 2014: Building Change Detection from Historical Aerial Photographs Using Dense Image Matching and Object-Based Image Analysis. *Remote Sensing* **6** (9), 8310-8336.
- REMONDINO, F., DEL PIZZO, S., KERSTEN, TH., TROISI, S., 2012: Low-cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation – a Critical Overview. *EuroMed 2012 - Int. Conference on Cultural Heritage*, Ioannides, M., Fritsch, D., Leissner, J., Davies, R., Remondino, F. & Caffo, R. (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, Volume **7616**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 40-54.
- SANTAGATI, C., INZERILLO, L., DI PAOLA, F., 2013: Image-based modeling techniques for architectural heritage 3D digitalization: Limits and potentialities. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **40** (5/W2), 555-560.
- SZELISKI, R. & SHUM, H.-Y., 1997: Creating full view panoramic image mosaics and texture-mapped models. *Computer Graphics (SIGGRAPH'97 Proceedings)*, 251-258.
- WAHBEH, W., NARDINOCCHI, C., 2015: *Toward the Interactive 3D Modelling Applied to Ponte Rotto in Rome*. Nexus Network Journal Vol.1 Springer Basel
- WAHBEH, W. & NEBIKER, S., 2016: Combining Public Domain And Professional Panoramic Imagery For The Accurate And Dense 3d Reconstruction Of The Destroyed Bel Temple In Palmyra. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **3** (5).