

Untersuchung der Eignung photogrammetrischer Methoden zur Erzeugung von 3D-Punktwolken aus historischen Bilddatenbeständen

Theresa Vietze¹, Danilo Schneider¹ & Ferdinand Maiwald¹

Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird untersucht, inwiefern bildbasierte Methoden, insb. Structure-from-Motion geeignet sind, um aus historischen Fotografien 3D-Punktwolken zu erzeugen. Dabei werden Probleme aufgezeigt und Lösungen vorgestellt. Neben zu geringer Auflösung der Bilder und unbekannter Kamerageometrie, wurde als wesentliche Schwierigkeit die für die 3D-Rekonstruktion ungünstige Aufnahmekonfiguration (nur wenige Aufnahmerichtungen mit großer Basis) identifiziert, die mit Hilfe aktueller Aufnahmen desselben Objektes teilweise kompensiert werden konnte. Diese Möglichkeit besteht jedoch nur bei Objekten, die sich nicht signifikant verändert haben und aktuell noch existieren, was bei dem für diese Untersuchungen verwendeten Objekt, dem Kronentor des Dresdner Zwingers, der Fall war. Die aus historischen Fotografien erstellten 3D-Punktwolken bzw. daraus entwickelten 3D-Modellen können später genutzt werden, um historische Zustände eines Objektes „erlebbar“ zu machen, um bauliche Veränderungen nachzuweisen oder um wertvolle historische Objekte für die Zukunft zumindest virtuell zu „konservieren“.

1 Einleitung

Als Informationsquelle für die geschichtliche Forschung existieren neben Texten und Kunstwerken seit etwa 200 Jahren auch photographische Abbildungen. Historische Aufnahmen von bereits zerstörten oder veränderten Architekturobjekten besitzen einen hohen Informationsgehalt und stellen für die Geschichtswissenschaft und -didaktik einen großen Wert da. In der Photogrammetrie können aus Fotos, die aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen wurden mittels Methoden wie Structure-from-Motion (SfM) oder Stereoauswertung dreidimensionale Modelle erstellt werden. Ziel der Untersuchungen ist die Generierung eines dreidimensionalen Modells eines Objektes aus historischen Aufnahmen. Hierbei entstehen unterschiedliche Probleme für diese photogrammetrischen Methoden. Oft wurde ein Objekt nur aus demselben Blickwinkel oder von der „schönsten“ Seite fotografiert. Meist ist es aus diesem Grund nicht möglich ein vollständiges 3D-Modell zu rekonstruieren bzw. müssten die entsprechenden Objektbereiche mittels Annahmen des Bearbeiters interaktiv modelliert werden. Deshalb wurde für diesen Beitrag ein Objekt gewählt, für das eine hohe Anzahl von Aufnahmen vorhanden ist. Anhand des Bilddatenbestands der Fotothek der Sächsischen Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek (SLUB) wird das Kronentor des Dresdner Zwingers rekonstruiert. Den Untersuchungen ging eine umfassende Literaturrecherche voraus, die aufzeigen soll, welche verschiedenen Ansätze zur photogrammetrischen Verarbeitung von historischen Aufnahmen bereits getestet wurden.

¹ Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, D-01062 Dresden, E-Mail: theresa.vietze@mailbox.tu-dresden.de, [[danilo.schneider](mailto:danilo.schneider@tu-dresden.de), [ferdinand.maiwald](mailto:ferdinand.maiwald@tu-dresden.de)][@tu-dresden.de](mailto:ferdinand.maiwald@tu-dresden.de)

Vor der Verarbeitung der historischen Aufnahmen mittels SfM wurde das Datenmaterial nach Verwendbarkeit sortiert. Dabei wurde der Datenbestand subjektiv nach verschiedenen Kriterien reduziert. Aus den verbliebenen Aufnahmen wurden anschließend verschiedene Modelle erzeugt. In diesem Bearbeitungsschritt entstanden verschiedene Probleme, welche der Beitrag näher beschreibt. Dies beinhaltet größtenteils das Problem der vielen Aufnahmen von nahezu identischen Standorten. Es wird darauf eingegangen, wie dies behoben werden kann, z.B. durch Nutzung aktueller Fotos zur Orientierung weiterer historischer Aufnahmen. Abschließend wird die Qualität der erzeugten Modelle analysiert und mit anderen Modellen (Punktwolken erstellt aus aktuellen Bildern und mittels terrestrischem Laserscanning) verglichen.

1.1 Stand der Forschung

Objekte, die bisher häufig untersucht werden, sind archäologische Funde bzw. Fundorte sowie im Laufe der Zeit zerstörte oder veränderte Architektur. Oft liegen in diesen Fällen nur wenige und nicht speziell auf photogrammetrische Verfahren ausgerichtete Aufnahmen vor. Für archäologische Untersuchungen sollten beispielsweise im Jahre 1940 gefundene Dinosaurierspuren aus 17 Fotografien rekonstruiert werden (FALKINGHAM et al. 2014). Die einzelnen Spuren wurden im Laufe der Zeit ausgegraben und an verschiedene Museen verteilt oder sie sind verschollen. Da verschiedene Zeichnungen und die Fotografien des Gebietes zum Zeitpunkt der Entdeckung vorlagen, konnte die Erstellung eines 3D-Modelles mittels Structure-from-Motion (SfM) dazu beitragen, den ursprünglichen korrekten Verlauf der Spuren wiederherzustellen. Ein weiteres Beispiel ist die architektonische Rekonstruktion von serbischen Kirchen (STOJAKOVIC & TEPAV 2009). Aufgrund geringer Erhaltungsmaßnahmen sind dort oft Dächer oder Mauern eingefallen. Die Teile, die noch bestehen, wurden in dieser Untersuchung mit einem Laserscanner aufgenommen. Gebäudeteile, die zerstört waren, konnten durch historische Aufnahmen manuell wiederhergestellt werden. Aus der Verknüpfung beider Verfahren konnten verschiedene Kirchen neu modelliert werden (STOJAKOVIC & TEPAV 2009). Das Internet ist gefüllt mit den verschiedensten Fotos und Schnappschüssen von Sehenswürdigkeiten und Kulturdenkmälern. Mittels einer konkreten Suche nach diesen Touristenfotos konnten große Teile Roms in nur 24 Stunden mittels SfM rekonstruiert werden (AGARWAL et al. 2009). Des Weiteren konnte der Baaltempel in Palmyra durch touristische Fotografien und professionelle Panoramaaufnahmen dreidimensional rekonstruiert und virtuell für die Nachwelt erhalten werden (WAHBEH & NEBIKER 2016). Schließlich soll ein letztes Beispiel zeigen, wie die erzeugten Ergebnisse in ein Stadtmodell integriert werden können. Bei „4D Cities“ Projekten wurden historische Stadtmodelle erstellt, welche verschiedene zeitliche Epochen der städtischen Entwicklung zeigen (SCHINDLER & DELLAERT 2012; KERSTEN et al. 2012). Dadurch konnten Veränderungen an ausgewählten Gebäuden sehr schnell erkannt und zeitlich festgehalten werden.

1.2 Informationen zum Untersuchungsobjekt „Kronentor“

Der Zwinger ist eines der meistbesuchten Sehenswürdigkeiten der Stadt Dresden. Das Kronentor bildet dabei den westlichen Eingang in die Schlossanlage. Zu beiden Seiten schließen sich zwei Langgalerien an vor denen sich ein Wassergraben entlang zieht. Über diesen führt eine schmale Brücke zum Kronentor hin. Das Kronentor wurde 1714 als eine Art Tor mit Turm in barocker Architektur errichtet. Zwei Säulenpaare bilden die Hauptbestandteile des Durchganges. Das Tor

ist zweigeschossig angelegt, wobei das Obergeschoss nur über die Dachgänge der Seitenflügel erreicht werden kann. Eine Attika schließt die nach allen vier Seiten geöffnete Halle des oberen Stockwerks. Das Kronentor wird durch eine zwiebelartige Kuppel mit einer goldenen Krone abgeschlossen.

1945 wurden große Teile des Zwingers, unter anderem auch das Kronentor, stark beschädigt. Nach Kriegsende folgte dann der Wiederaufbau. Später wurde die Kuppel mit Goldbeschlägen versehen. Zwischen 2012 und 2016 wurde das Kronentor komplett saniert. Mittels historischer Bilder können ursprüngliche Bauzustände photogrammetrisch rekonstruiert werden. Dabei besteht die Möglichkeit, bauliche Veränderungen durch Vergleiche mit aktuellen Modellen aufzuzeigen.

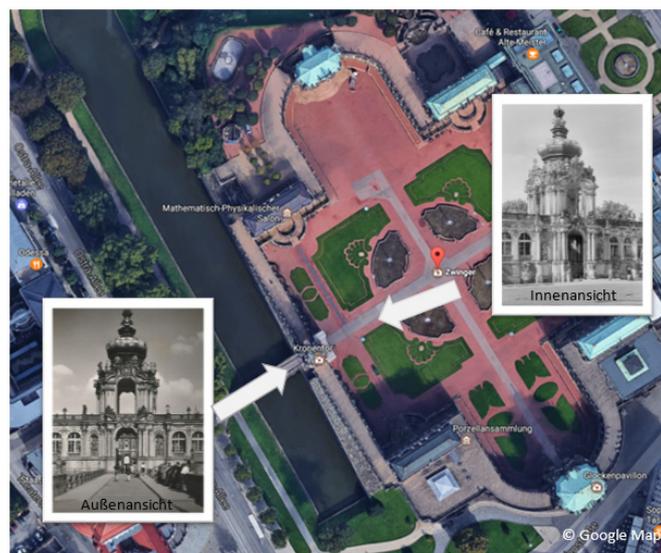


Abb. 1: Geländeübersicht des Zwingers mit Kronentor (aus Google Maps)

2 Datenquellen

Für den Bilddatenbestand des Kronentores des Dresdner Zwingers wurden aus der Mediathek der Sächsischen Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek Dresden (SLUB) zunächst mehr als 800 historische Fotos aus unterschiedlichen Zeitepochen mittels Schlagwort-Suche gefiltert. Dabei konnte der Datensatz schon durch detailliertere Suchkriterien auf 499 Bilder reduziert werden. Dies stellt auf den ersten Blick zwar einen sehr großen Datenbestand dar, der sich aber anhand von weiteren Auswahlkriterien auf 44 Aufnahmen beschränken ließ. Diese Auswahlkriterien lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Zunächst sind alle Aufnahmen entfernt worden, die augenscheinlich nicht das Kronentor zeigen bzw. nicht für eine spätere 3D-Rekonstruktion mittels Structure-from-Motion (SfM) geeignet sind. Dazu zählen unter anderem Zeichnungen, Postkarten und Skizzen. Auch Nachtaufnahmen und Aufnahmen, auf denen das Kronentor eingerüstet ist, verfälschen das erzielte Ergebnis. Aufnahmen mit großer Entfernung zum Objekt bieten nicht die nötige Detailgenauigkeit für eine Rekonstruktion. Es wurde dabei beachtet, dass der Bildausschnitt das Kronentor in voller Größe darstellt. Insgesamt konnte der Datensatz von 499 auf 89 Bildern reduziert werden. Daran anschließend wurde durch Beurteilung

der Qualität der Fotos eine weitere Selektion durchgeführt. Bilder mit einer zu geringen Scanauflösung eignen sich oft nicht für SfM, da bestimmte Details nicht wiedergegeben bzw. auf dem Foto dargestellt sind. Folglich wurden meist zu wenige Merkmalspunkte gefunden, wodurch diese Aufnahmen entweder gar nicht oder nur ungenau orientiert werden konnten. Auch beim anschließenden „Dense Matching“ wurden viele falsche Punktzuordnungen festgestellt, welche zu fehlerhaften Punkten in der Punktwolke führten. Überstrahlung oder Unschärfe verfälschen ebenso das Ergebnis. Einige wenige Bilder mussten aufgrund ihrer Qualität aussortiert werden, da sie sich stark verzogen hatten oder Knicke aufwiesen. Abschließend konnte ein Datensatz mit 44 Bildern erstellt werden (Beispielbilder in Abb. 2), von dem auszugehen war, dass dieser für die Erstellung von Punktwolken mittels SfM prinzipiell geeignet war.

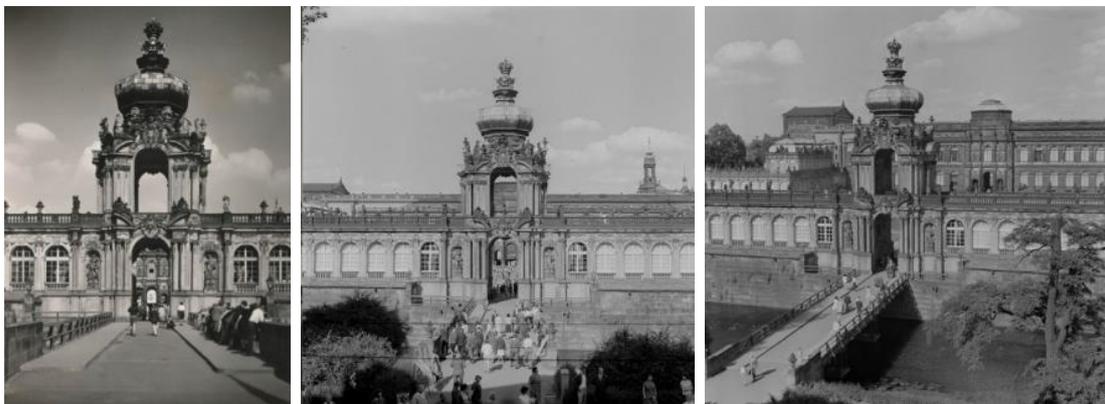


Abb. 2: Zur Punktwolken-Generierung verwendete historische Bilder des Dresdner Zwingers (Auswahl)

Bei Betrachtung des neuen Datensatzes war jedoch festzustellen, dass sich Aufnahmen von einigen Richtungen häuften. Von einigen Standpunkten gab es deutlich mehr Fotografien als von anderen Ansichten auf das Gebäude. Die historischen Aufnahmen stammen vor allem von Privatpersonen oder Zeitungsfotografen, welche das Kronentor nicht nach photogrammetrischen Aspekten fotografierten. Dies stellt für SfM ein Problem dar, da die Überlappungsbereiche der Fotos von zwei verschiedenen Standpunkten somit nicht hoch genug sind, um diese miteinander verknüpfen zu können. Außerdem ist die Basis zwischen den Bildern zu groß, um zuverlässig homologe Bildpunkte bestimmen zu können. Deshalb werden Fotos von dazwischenliegenden Standpunkten benötigt, welche aber entweder nicht existieren oder eine zu geringe Auflösung aufweisen. Die örtlichen Gegebenheiten schränken den Fotografen zusätzlich in der Wahl des Aufnahmestandpunktes ein. Somit können die Aufnahmen in zwei Gruppen unterteilt werden: Aufnahmen, von außerhalb des Zwingers und Aufnahmen, deren Standpunkt innerhalb lag (s. Abb. 1). Für diese zwei Gruppen wurde nachfolgend versucht zwei verschiedene Punktwolken zu erstellen. Anschließend sind diese noch in ein gemeinsames Koordinatensystem zu überführen.

3 Auswertung und Ergebnisse

Mittels Structure-from-Motion (LOWE 2004) wurde in dem Programm PhotoScan von Agisoft getestet, ob aus den historischen Aufnahmen Punktwolken erstellt werden können. Durch

vorangehende Recherchen und Erfahrungen versprach dieses Programm die besten Ergebnisse (REMONDINO et al. 2012; SANTAGATI et al. 2013; AGISOFT 2016). Alternativ wurden auch andere Programme, wie z.B. VisualSfM getestet. Der Vergleich der Programme soll aber hier nicht im Vordergrund stehen.

In diesem Kapitel werden Punktwolken gezeigt, welche aus den zuvor ausgewählten historischen Aufnahmen erstellt wurden. Dabei stellt eine Punktwolke die Seite des Kronentors dar, welche außerhalb des Zwingers liegt. Die andere Punktwolke repräsentiert den vom Schlosshof aus sichtbaren Objektbereich (Abb. 1). Die Kalibrierung der Kameras wird mittels Selbstkalibrierung von PhotoScan bestimmt. Die erstellten Punktwolken sind bisher noch maßstabslos und nicht absolut orientiert.

3.1 Generierung von Punktwolken ausschließlich aus historischen Aufnahmen

Zur Erstellung der Punktwolke, welche das Kronentor von außen zeigen soll, wurden zunächst 25 für qualitativ hochwertig empfundene Bilder in PhotoScan eingeladen. Bei dem Arbeitsablauf war jedoch festzustellen, dass einige Fotos nicht genügend überlappende Bereiche zu anderen aufweisen. In PhotoScan konnten deshalb automatisch lediglich 11 Bilder relativ zueinander orientiert und anschließend zum Generieren einer Punktwolke (Abb. 3) verwendet werden.



Abb. 3: Aus historische Bildern erstellte Punktwolke (Ansicht von außerhalb des Zwingers)

Zunächst einmal kann das Kronentor als solches erkannt werden. Kleine Details, wie z.B. die Sandsteinfiguren auf den Seitenflügeln sind nur schemenhaft zu erahnen, wie in Abb. 4 zu erkennen ist. Dies liegt daran, dass die gegebene Auflösung der Aufnahmen die feinen Details nicht wiedergeben kann. Der Zwinger mit Kronentor wurde 1945 teilweise zerstört. Durch den Wiederaufbau wurden kleine bauliche Details verändert bzw. Figuren ersetzt. Die genauen Aufnahmedaten der Bilder sind nicht bekannt. Es kann deshalb vermutet werden, dass Aufnahmen aus unterschiedlichen Bauepochen in den Bildverband eingegliedert wurden. Die baulichen Veränderungen führen zu Rekonstruktionsfehlern.

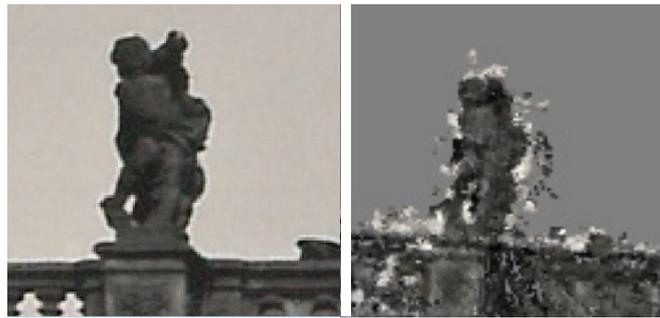


Abb. 4: Vergleich eines Ausschnitts aus historischer Aufnahme (links) und Punktwolke (rechts)

Es ist festzustellen, dass die ausgewählten Fotografien meist aus zentraler Position aufgenommen wurden (Abb. 5). Deshalb ist einerseits das Modell an einigen Stellen aufgrund von Verdeckungen lückenhaft. Andererseits führt die sehr kurze Basis zwischen den Kamerastandpunkten zu schleifenden Schnitten und verschlechtert damit die Genauigkeit der Bestimmung der Objektpunkte. Um ein besseres Ergebnis erzielen zu können, müssen die Randaufnahmen, welche zunächst nicht mit orientiert werden konnten, für eine bessere Strahlenschnittkonfiguration einbezogen werden.

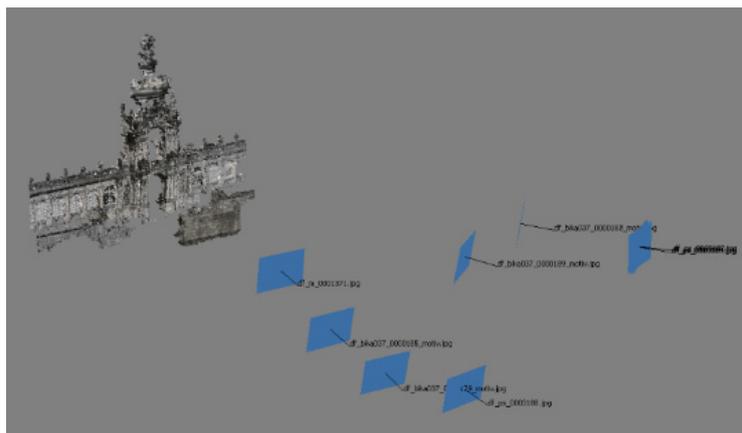


Abb. 5: Historische Punktwolke mit Aufnahmestandpunkten der verwendeten Aufnahmen

Die Grundlage für eine zweite Punktwolke bildeten Fotografien, welche von innerhalb des Zwingers aufgenommen wurden. Es ist jedoch festzustellen, dass ausschließlich Fotografien, welche von der linken Blickrichtung aufgenommen wurden, den Bildverband bilden. Aufnahmen von anderen Standpunkten, die die Strahlenschnittgeometrie stärken könnten, wurden wegen zu geringer Auflösung nicht mit einbezogen. Einige der verwendeten Bilder wurden außerdem von einem weiter entfernten Standpunkt aufgenommen (Abb. 6). Die gegebene Auflösung am Objekt reicht bei diesen nicht, um genaue Details am Kronentor zu erkennen. Um ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielen zu können, ist eine Digitalisierung der analogen Fotografien mit deutlich höherer Auflösung notwendig. Dies setzt voraus, dass die analoge Vorlage ein größeres Auflösungspotential bietet als die aktuelle Digitalisierung darstellen kann. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass ein hochauflösender Scan bei vielen Fotografien möglich ist, da häufig nur das Vorschau bild der Fotothek der SLUB abgespeichert wurde.

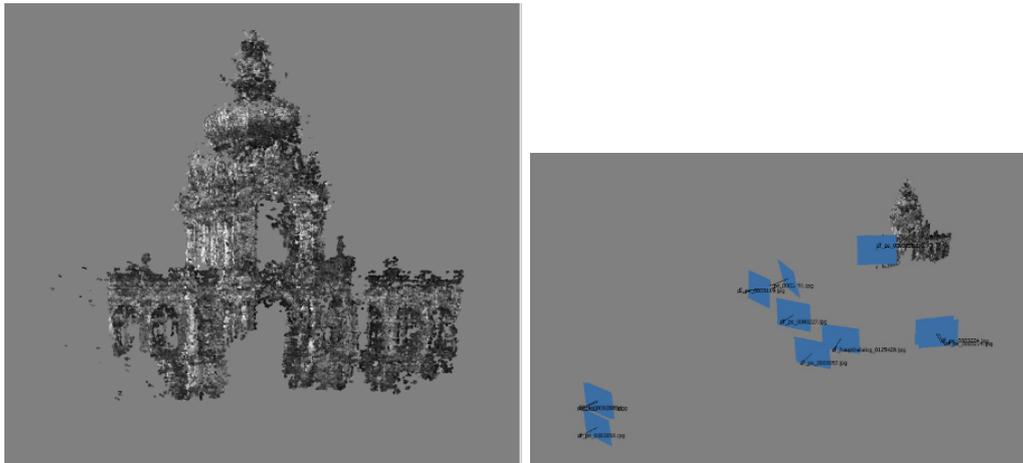


Abb. 6: Historische Punktwolke (Ansicht vom Zwingerhof) mit Aufnahmestandpunkten (rechtes Bild)

3.2 Generierung einer Punktwolke aus historischen und aktuellen Aufnahmen

Die folgenden Untersuchungen beziehen sich nur auf die Außenseite des Kronentors (Kap. 3.1). Zur Orientierung von weiteren historischen Aufnahmen werden aktuelle Bilder als „Füllmaterial“ verwendet, um mit kleineren Basisabständen zwischen den Bildern schrittweise alle Bilder hinzuzufügen. Somit können historische Bilder, welche am Rand liegen, mit in die Punktwolke einbezogen werden.

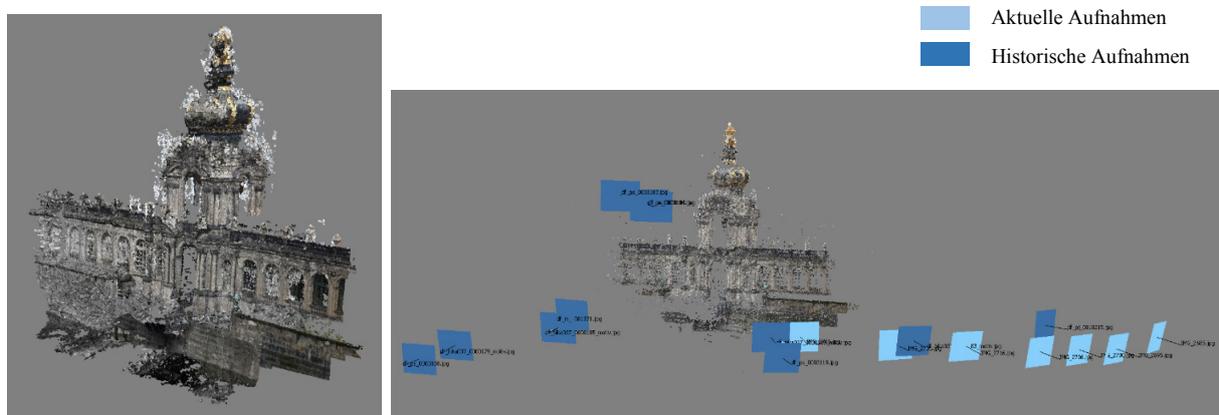


Abb. 7: Punktwolke erstellt aus historischen und aktuellen Bildern sowie Aufnahmestandpunkte

In Abb. 7 ist zu erkennen, dass der Detailgrad und die Anzahl der Punkte in der Punktwolke deutlich durch die aktuellen Aufnahmen gestiegen sind (von ca. 1,3 auf 3 Millionen Punkte in der „Dense Cloud“). Die historischen Punkte wurden durch aktuelle überlagert. Deutlich ist dies durch die bauliche Veränderung der Krone zu erkennen. Die historischen Aufnahmen zeigen die Goldbeschläge auf dem Dach nicht. Damit verfälschen die aktuellen Bilder die historische Punktwolke. Deshalb müssen diese Punkte herausgenommen werden, was im nachfolgenden Kapitel detaillierter beschrieben wird.

3.3 Generierung einer Punktwolke aus historischen Aufnahmen unter Nutzung aktueller Fotografien zur Unterstützung der Bildorientierung

Es soll nachfolgend eine Punktwolke erstellt werden, bei welcher die aktuellen Bilder nur zur Unterstützung der Bestimmung der Orientierung der historischen Bilder einbezogen wurden. Zum einen kann die zuvor berechnete Orientierung eines Bildes (Kap. 3.2) gespeichert und in das neue Projekt importiert werden. Dies bedeutet, dass im gesamten Workflow nur historische Aufnahmen verwendet werden. Zum anderen kann in dem bereits erstellten Projekt angegeben werden, dass die aktuellen Fotos bei der Generierung der „Dense Cloud“ nicht beachtet werden sollen. Resultierend wird in beiden Fällen eine Punktwolke erstellt, bei welcher alle Punkte ausschließlich aus historischen Aufnahmen stammen. Durch dieses Vorgehen konnten zwei weitere historische Fotos in den Bildverband mit integriert werden. Im Vergleich zur ersten Punktwolke konnten einige Lücken gefüllt bzw. auch an einigen Stellen der Detailgrad verbessert werden (Abb. 8). Auch die Anzahl an Punkten in der „Dense Cloud“ konnte von ca. 1,3 auf 1,7 Millionen gesteigert werden.

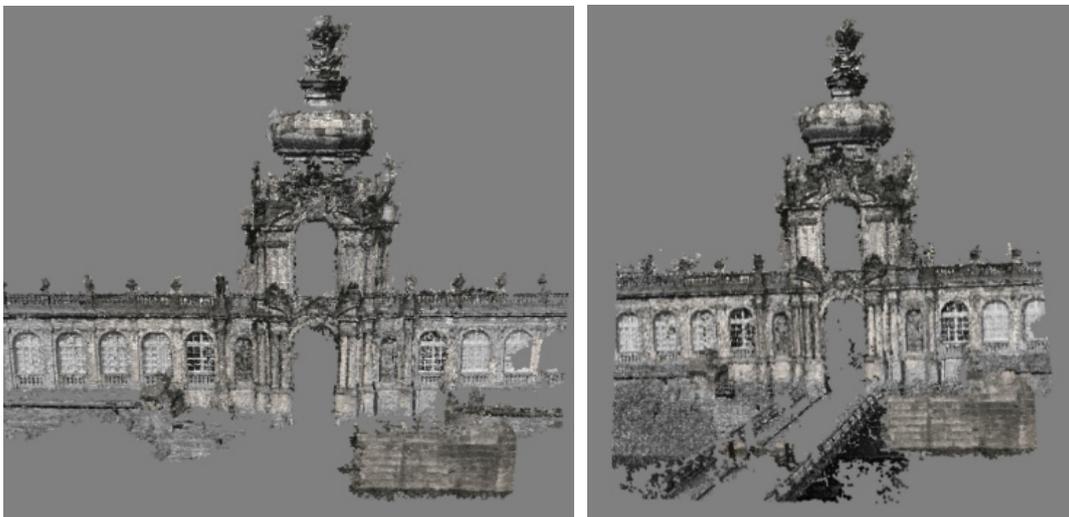


Abb. 8: Vergleich der Punktwolken basierend auf 11 (links) bzw. 13 (rechts) historischen Bildern

3.4 Vergleich der Punktwolken basierend auf historischen Bildern mit Punktwolken aus aktuellen Bildern sowie terrestrischen Laserscannerdaten

Abbildung 9 zeigt den Vergleich der historischen Punktwolke mit einer Punktwolke, welche aus 40 ausschließlich aktuellen Bildern erstellt wurde. In beiden Fällen sind die gleichen Einstellungen in PhotoScan verwendet worden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die aktuelle Punktwolke nach visuellem Eindruck weniger verrauscht dargestellt und Details differenzierter abgebildet werden. Die dritte abgebildete Punktwolke wurde mit einem terrestrischen Laserscanner Riegl LMS-Z420i von insgesamt 6 rund um das Kronentor verteilten Standpunkten erzeugt und zeigt den im Vergleich höchsten Detailgrad und das geringste Rauschen.

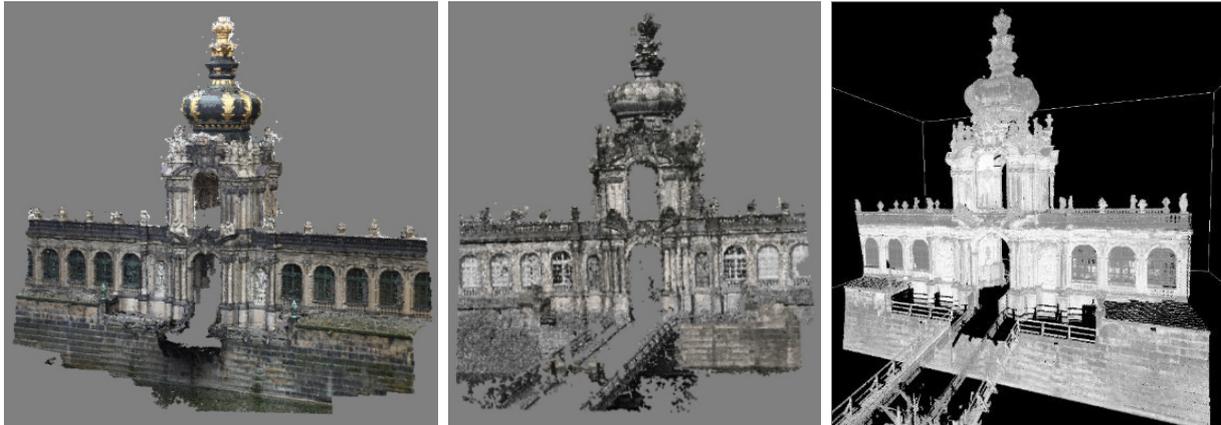


Abb. 9: Vergleich der Punktwolken basierend auf aktuellen (links) bzw. historischen Bildern (Mitte) sowie terrestrischen Laserscannerdaten (rechts)

4 Fazit & Ausblick

Grundsätzlich ist es möglich aus historischen, digitalisierten Analogaufnahmen dreidimensionale Punktwolken und daraus triangulierte und texturierte 3D-Modelle zu erstellen. Der Beitrag zeigt, welche Anforderungen an die Fotos gestellt werden müssen bzw. wie der Structure-from-Motion-Workflow beeinflusst werden kann, um Punktwolken bzw. Modelle mit hoher visueller Qualität zu erstellen. Zu berücksichtigende Faktoren sind zum Beispiel die Aufnahmekonfiguration oder vorhandene Informationen über die Aufnahmetechnik. Aber auch die Auflösung und die Qualität der Aufnahmen spielen eine große Rolle. Außerdem werden im Beitrag alternative Möglichkeiten zur Erzeugung historischer 3D-Modelle diskutiert. Insbesondere wird auf die Integration aktueller und historischer Fotos in einer gemeinsamen SfM-Auswertung eingegangen. Diese Möglichkeit besteht natürlich nur, sofern das Objekt sich baulich über die verschiedenen Zeitepochen hinweg nicht signifikant verändert hat und aktuell noch existiert und auch erreichbar ist. Bei Verfügbarkeit sehr weniger geeigneter Bilder bzw. bei zu großen Abständen zwischen den Aufnahmepositionen wurden Teilmodelle des Objektes erstellt. Diese können gegebenenfalls in einer späteren Weiterverarbeitung zusammengefügt werden.

Im nächsten Schritt soll untersucht werden, inwieweit sich eine hochauflösendere Digitalisierung der verwendeten historischen Fotografien auf die Qualität der Punktwolken auswirkt. Dafür sollen möglichst objektive Qualitätsmetriken, u.a. für die Genauigkeit und Vollständigkeit definiert werden, mit Hilfe derer die Qualität verschiedener Punktwolken verglichen und analysiert werden kann.

Es soll ferner untersucht werden, ob bei ungenügender Qualität der vorhandenen historischen Fotos möglicherweise ein interaktiver, auf der Modellierung von Objektgeometrien basierender Ansatz mit Blick auf die Verwendung der Modelle im Rahmen der Geschichtswissenschaft und -didaktik zu besseren Ergebnissen führen kann. Außerdem bietet sich die Orientierung einzelner historische Fotos an, welche anschließend lediglich als Texturen für virtuelle 3D-Modelle verwendet werden.

5 Literaturverzeichnis

- AGARWAL, S., SNAVELY, N., SIMON, I., SEITZ, S. M. & SZELISKI, R., 2014: Building rome in a day. IEEE 12th international conference on computer vision, 72-79.
- AGISOFT, 2016: Agisoft PhotoScan User Manual. http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf, letzter Zugriff am 20.1.2017.
- FALKINGHAM, P., BATES, K. & FARLOW, J., 2014: Historical Photogrammetry: Bird's Paluxy River Dinosaur Chase Sequence Digitally Reconstructed as It Was prior to Excavation 70 Years Ago. PLoS ONE **9**(4), 1-5.
- KERSTEN, T. P., KELLER, F., SAENGER, J. & SCHIEWE, J., 2012: Automated generation of an historic 4d city model of Hamburg and its visualisation with the GE engine. 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) **7616**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 55-65.
- LOWE, D. G., 2004: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision **60**(2), 91-110.
- REMONDINO, F., DEL PIZZO, S., KERSTEN, T. P. & 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) **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.
- SCHINDLER, G. & DELLAERT, F., 2012: 4d cities: analyzing, visualizing, and interacting with historical urban photo collections. Journal of Multimedia **7**(2), 124-131.
- STOJAKOVIC, V. & TEPAVCEVIC, B., 2009: Optimal methods for 3d modeling of devastated architectural objects. Proceedings of the 3rd ISPRS International Workshop 3D-ARCH **38**, 5.
- WAHBEH, W. & NEBIKER, S., 2016: Kombination unterschiedlicher Photogrammetrischer Ansätze zur Rekonstruktion zerstörter Kulturdenkmäler. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band **25**, KERSTEN, T. (Hrsg.), 338-350.