

Jan-Ruben Fischer

Digitale Photogrammetrie an den Schlusssteinen des Berner Münsters

Neue Perspektiven für Denkmalpflege und Inventarisierung

In den Jahren 2014–2017 wurden die Netzgewölbeschlusssteine des Berner Münsters mittels der 3D-Objekterfassungsmethode der digitalen Photogrammetrie aufgenommen. Diese Technologie verspricht revolutionäres Potential hinsichtlich der Dokumentation von Architektur und Bildplastik.

Die Netzgewölbeschlusssteine im Chor des Berner Münsters sind kunst- und baugeschichtlich einzigartig, dennoch konnte bislang keine umfassende konservatorische Oberflächenerfassung durchgeführt werden. Durch die Anfertigung von Gipsabdrücken zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurden vielmehr irreversible Schäden an den Farb- und Materialauflagen einzelner Schlusssteine hinterlassen. Ziel für eine zeitgerechte und nachhaltige Bestandsaufnahme war daher, die Farb- und Oberflächenerfassung so durchzuführen, dass keine weiteren Eingriffe die wertvollen Originale beschädigen würden. Am Ende sollte ein zur Langzeitarchivierung und weiteren Verarbeitung geeigneter digitaler Gipsabdruck stehen. Für eine detaillierte räumliche Objekterfassung haben sich hierfür besonders zwei moderne Aufnahmeverfahren angeboten: das *Laserscanning* und die *digitale Photogrammetrie*.

Auswahl der Erfassungsmethode

Um für die anstehende 3D-Aufnahme der Schlusssteine die adäquate Erfassungsmethode zu ermitteln, wurden im Jahr 2014 Vergleichsaufnahmen veranlasst. Hierfür wurden insbesondere das *3D-Laserscanning* und die *digitale Photogrammetrie* als moderne berührungslose Aufnahmeverfahren miteinander verglichen. Unter den schwierigen Bedingungen vor Ort und den damit verbundenen Problemen zeigte sich die Photogrammetrie-Methode hinsichtlich der komplexen Herausforderungen in vielen Punkten flexibler als die lasergestützte Erfassung. So gelang es der *digitalen Photogrammetrie*, die feinen geometrischen Oberflächendetails im Ergebnis differenzierter und umfassender wiederzugeben als die vergleichende Bestandsaufnahme durch das *Laserscanning*. Da das Verfahren auf zahlreichen hochauflösenden Fotos beruht, konnte auch eine

deutlich höhere Qualität der auf das 3D-Modell aufgetragenen Farbtexturen erzielt werden.

Bei der Aufnahme komplexer Objekte ist es generell eine besondere Herausforderung, schlecht zugängliche Bereiche, wie z.B. überlappende Falten oder Durchbrüche, möglichst komplett zu erfassen. Zwischen Deckengewölbe und Schlussstein war für den Zwischenraum der Problemstellen, die sogenannten «Hinterschneidungen» oder «Verschattungen», manchmal kaum mehr als eine Handbreit Platz. Auch bei der Lösung dieser Schwierigkeiten konnte die Photogrammetrie jenen Stellen noch beikommen, die per Laserscanning technisch nicht mehr erreichbar waren. Hier kommt vor allem die Flexibilität der Photogrammetrie-Methode zum Tragen, mit der adaptiv mit unterschiedlichen Kamerasystemen derartige Stellen noch erreicht werden können. Grössere Laserscanner sind zu sperrig, kleinere Laserscanner können durch ihren limitierenden Distanzbereich nicht den erforderlichen Mindestabstand einhalten. Ergänzend lässt sich festhalten, dass im Vergleich zu einem herkömmlichen Gipsabdruck beide berührungslosen Methoden auf alle Fälle schonender und wirtschaftlicher sind. Es entfallen die Behandlung des Originals mit Trennmitteln und eine mögliche Beschädigung beim Abnehmen des Negativs.

Aufgrund dieser für das geforderte Aufnahmeszenario ermittelten Vorteile aus den Vergleichsaufnahmen fiel die Wahl der am besten geeigneten Erfassungsmethode für die Aufnahme der Schlusssteine letztendlich auf die Methode der *digitalen Photogrammetrie*.

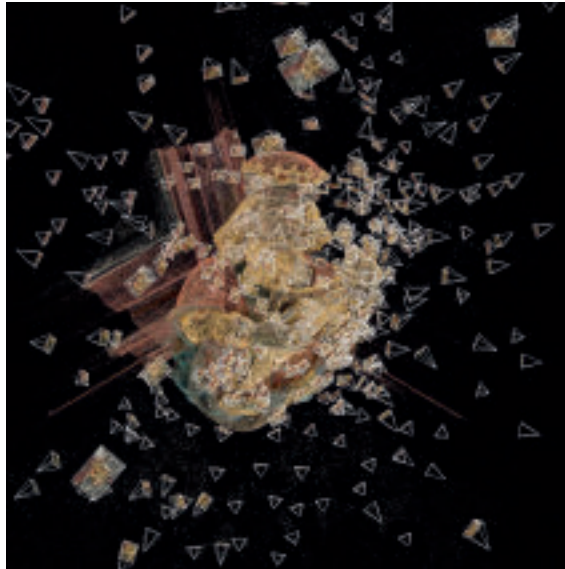
Photogrammetrie

Das Verfahren der *Photogrammetrie* ist fast so alt wie die *Fotografie* selbst und wurde grundlegend bereits im 19. Jahrhundert entwickelt. Es be-

»
Photogrammetrische
Aufnahmen der Schluss-
steine im Berner
Münster. Abgebildet ist
die Aufnahme des *David*.
© Jan-Ruben Fischer



1 Sämtliche berechnete Kamerapositionen aus der photogrammetrischen Aufnahme des *David* mit der 3D-Punktwolke im Hintergrund.
© Jan-Ruben Fischer



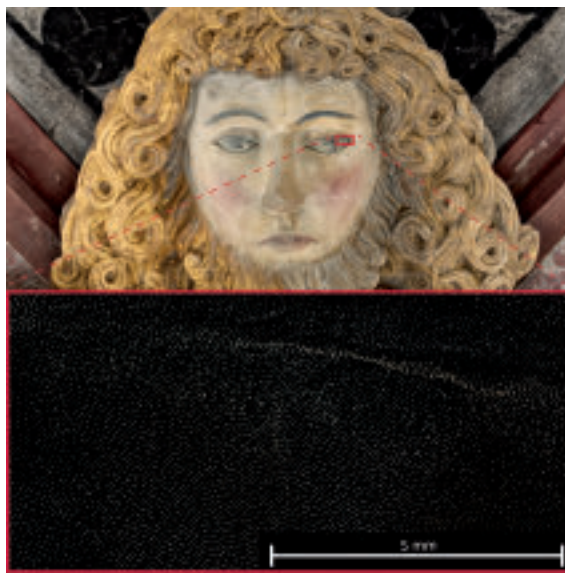
1

2 Die Photogrammetrie-Punktwolke des *Achatius* ist so dicht, dass die Punkte wie eine geschlossene Oberfläche erscheinen. © Jan-Ruben Fischer



2

3 Erst durch übermassstäbliches Vergrössern offenbart sich der Punktcharakter der Punktwolke.
© Jan-Ruben Fischer



3

4 Die Dreiecksvermaschung des *Achatius* ohne Farbtextur als geschlossene 3D-Oberfläche



4

schreibt prinzipiell das Messen aus Fotos und die daraus resultierende Möglichkeit, die räumliche Lage und Geometrie eines Objekts aus einem oder mehreren Fotos rückwirkend bestimmen zu können. Im letzten Jahrhundert wurde auf dieser Basis die sogenannte *analytische* Photogrammetrie als sehr präzise Dokumentationsmethode entwickelt. Sie wird als Spezialdisziplin in der Denkmalpflege bis heute erfolgreich eingesetzt. Während hier bereits die zugrundeliegende Ermittlung der Bild- und Objektkoordinaten mittels digitaler Rechenverfahren durchgeführt wird, werden zu dokumentierende Merkmale trotzdem noch manuell durch einen Operateur räumlich interpretiert und gewöhnlich in eine projektive Vektorzeichnung extrahiert. Auch wenn es technisch prinzipiell möglich wäre, jeden einzelnen sichtbaren Oberflächenpunkt zu bestimmen und interpretativ zu extrahieren, wäre das mit einem unwirtschaftlichen

Zeitaufwand verbunden. Darüber hinaus werden in der Regel keine Hinterschnidungen erfasst, da nur mit verhältnismässig wenigen Grundlagenfotos gearbeitet werden kann. Als Konsequenz wird daraus ein projektiver Vektorplan entwickelt.

Digitale Photogrammetrie

Um den Begriff von der analytischen Photogrammetrie abzugrenzen, soll der Begriff *Digitale Photogrammetrie* eingeführt werden. Er steht für einen essentiellen und intensiven computerunterstützten Einsatz, um auf Grundlage der photogrammetrischen Aufnahmen eine komplette, hochaufgelöste 3D-Oberfläche zu erzeugen. Das ist auch deswegen notwendig, da die erhebliche Digitalisierung der Arbeitsprozesse gänzlich neue Produkte und Einsatzmöglichkeiten schafft, die mit der analytischen Photogrammetrie in dieser Art nicht realisierbar wären.



Der Vergleich der Originalfotografie mit dem texturierten 3D-Modell am Beispiel des Achatius.
© Jan-Ruben Fischer

3D-Druck im Massstab 1:1
aus der photogrammetrischen Erfassung am Beispiel des Achatius.
© Jan-Ruben Fischer

Die digitale Photogrammetrie basiert ebenfalls auf denselben Grundprinzipien wie die analytische Photogrammetrie. Gleichwohl wird hier keine manuell interpretative Merkmalsextraktion durchgeführt, stattdessen findet eine rein digitale Mustererkennung statt. Ein Algorithmus analysiert die aus unterschiedlichen Blickwinkeln gemachten Fotos und identifiziert auf diesen identische Muster. Diese Informationen gestatten es nun, die ursprünglichen Kamerapositionen bei der Aufnahme vor Ort exakt zu rekonstruieren. Auf diesem Wege wird eine mehrere tausendfach schnellere Auswertung einer gewaltigen Menge an selektiven Merkmalen möglich, was im Idealfall in den folgenden Arbeitsschritten die umfassende Berechnung der kompletten 3D-Oberfläche eines Objektes erlaubt. Wie dicht bzw. fein aufgelöst diese Oberfläche abgetastet werden kann, hängt von zahlreichen Faktoren ab, unter anderem von der Qualität der Fotos, der Auflösung des Kamerasensors oder der Beschaffenheit der Oberfläche. Der gegenwärtige Stand der Technik für eine wirtschaftliche Punktdichte im Nahbereich bewegt sich bei Bedarf bereits weit im Submillimeterbereich. Mit modernen Rechnersystemen werden in diesem digitalen Arbeitsschritt viele tausend Punkte pro Sekunde erzeugt, was bei einer mehrstündigen Rechenzeit ein hochaufgelöstes 3D-Modell aus Hunderten Millionen Punkten ermöglicht. Als Primärergebnis steht aus dieser Berechnung eine sehr dicht aufgelöste 3D-Punktwolke zur Verfügung, aus der im folgenden Arbeitsschritt, der sogenannten Triangulation oder Dreiecksvermaschung, die eigentlichen 3D-Flächen erzeugt werden. Durch die bereits vorhandene Orientierung der Kamerapositionen im Raum ist es abschliessend möglich,



aus den Fotos die Farbtexturen auf die berechneten 3D-Oberflächen zu projizieren. Hier zeigen sich die wesentlichen Vorteile dieser Methode in einer naturgetreuen Wiedergabe der Farbfassungen und Materialtexturen inklusive aufliegender Verschmutzungen und angetroffener Verwitterungsbilder.

Der Einsatz von digitaler Photogrammetrie als Kernmethode in der Wertschöpfungskette von Bestandserfassungen erlaubt einen im Vergleich zu anderen Methoden relativ reibungslosen kompletten Prozessablauf von der berührungslosen Erfassung bis zum Endprodukt. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens, das sich methodisch flexibel an unterschiedlichste Anwendungsbereiche und Anforderungen anpassen lässt.



1



2



3



4

Photogrammetrische Erfassung der Schlusssteine: Objektgeometrie und Oberflächen

Die Schlusssteine sind wesentlicher Teil des statischen Systems des Deckengewölbes und können daher nicht entnommen werden. Aus diesem Grund mussten sie vor Ort hängend und über Kopf erfasst werden. Dazu kommt die hohe, geometrisch komplexe bildhauerische Qualität der Schlusssteine mit sehr fein gearbeiteten und ausdifferenzierten Formen, die sich in freigestellten, raumgreifenden Heiligenattributen, Händen etc. oder auch in zahlreichen Durchbrüchen und tiefen Hinterschneidungen ausprägen. Diese schwierige Ausgangssituation war für eine möglichst umfassende und berührungslose Oberflächenerfassung eine grosse Herausforderung. Um eine komplette photogrammetrische Aufnahme eines einzigen Schlusssteins durchzuführen, waren letztlich Hunderte hochauflösende Fotos nötig, die jeden Oberflächenpunkt des aufzunehmenden Objekts idealerweise mehrfach auf unterschiedlichen Fotos abbildeten. Nur so wurde eine möglichst lückenlose räumliche Rekonstruktion möglich.

Lichtverhältnisse und Materialauflagen

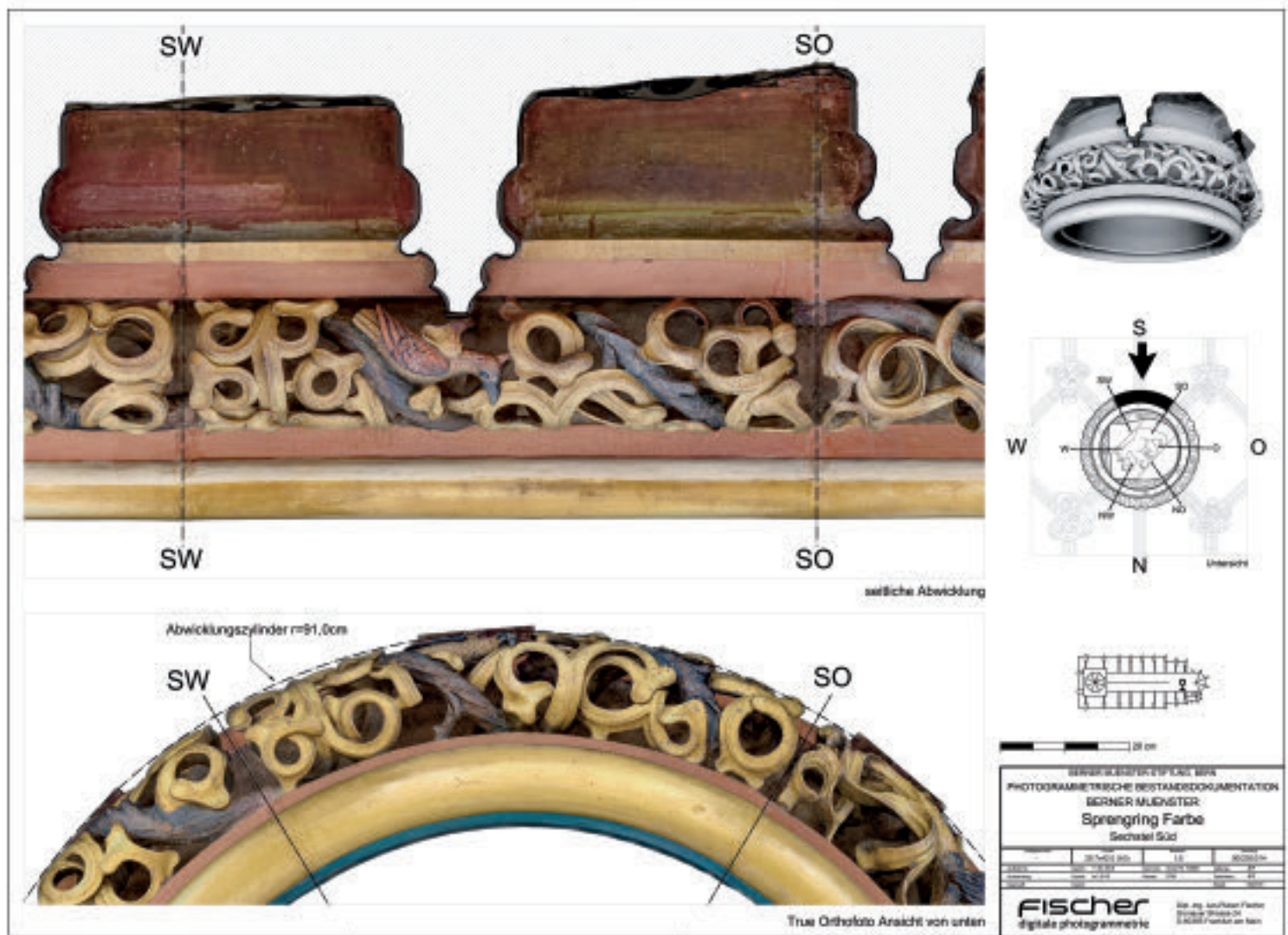
Die Lichtsituation unter dem Deckengewölbe ist im Tagesverlauf sehr dynamisch und speist sich aus dem Tageslicht, das je nach Sonnenstand oder bewölktem Himmel durch die farbigen Glascheiben gefärbt und gefiltert wird. So wird ein sehr lebendiges und abwechslungsreiches Licht- und Schattenspiel auf die Schlusssteine geworfen. Mit überdies komplett verschatteten und stets dunklen Hinterschneidungsbereichen ist diese Lichtsituation alles andere als ein ideales photogrammetrisches Aufnahmeszenario und macht das Arbeiten mit dem verfügbaren Licht kaum möglich. Im Übrigen verhindert auch das vibrationsanfällige Gerüst mit mobilen Gerüstböden in situ keine Langzeitaufnahmen. Jede kleinste Erschütterung führt zu einer Verwacklung der Fotos. Erst durch den Einsatz mobiler Studio-Blitze konnten die Problembereiche Licht und Belichtungszeit angemessen gelöst werden, ohne gleichzeitig den wirtschaftlichen Aspekt aus den Augen zu verlieren. So wurde gewährleistet, dass die einzelnen Steine möglichst umfassend, homogen und der jeweiligen Situation entsprechend ausgeleuchtet werden konnten. Anhand der Reduktion des polychromen Tages- und Dauerkunstlichts auf ein absolutes Minimum war es letztlich sogar möglich, sauber farbkalibrierte

1 Das Endprodukt für den praktischen Einsatz: adaptiv vermaschtes 3D-Modell, kombiniert mit hochauflösenden 8K-Texturen. © Jan-Ruben Fischer

2 Rückseitiger Blick auf das 3D-Modell mit der Hinterschneidung sowie dem Durchbruch am linken Arm des Achatius. Im Durchbruch kann man die Rückseite der Parierstange des Schwertes sehen. © Jan-Ruben Fischer

3 Unbearbeitetes Bildschirmbild eines für das Internet optimierten WebGL-Modells am Beispiel des Achatius. Die Dreiecke wurden zwanzigfach reduziert, die Texturen um ein Viertel verkleinert. © Jan-Ruben Fischer

4 Das fertige 3D-Farbmodell aus der photogrammetrischen Erfassung des Sprengings mit seinen komplexen Durchbrüchen und Hinterschneidungen. © Jan-Ruben Fischer



Oberflächenfarben für die späteren 3D-Texturen zu gewinnen. Ein weiteres Augenmerk musste ferner auf die oft zu grossen Teilen in Gold gefassten Materialauflagen gelegt werden. Diese waren durch ihre hohen Reflexionseigenschaften photogrammetrisch schwieriger zu erfassen als diffuse Bereiche. Auch hier war die homogene Flächenausleuchtung durch die Studioblitzte für eine präzise Oberflächenerfassung förderlich. Schliesslich wurden für das gesamte Projekt aus 87 Schlusssteinen über 40 000 einzelne hochauflösende Fotos angefertigt.

Einsatzmöglichkeiten und Nutzen

Das Primärziel war zunächst die Dokumentation und Sicherung der Schlusssteine. Die eingefärbte Punktwolke zur digitalen Langzeitarchivierung wird deshalb als einfache, nicht proprietäre Textdatei gespeichert. Jeder einzelne Punkt speichert schlicht seine X,Y,Z-Koordinate, die Richtung, in die er «schaut» (Normalenvektor), und seine Farbe als RGB-Wert nach dem

Rot-Grün-Blau-Farbmodell. So lassen sich auch in Zukunft komplett unabhängig von der verwendeten Software die räumlichen Daten der Schlusssteine einlesen und interpretieren.

In der Praxis kann es heutzutage noch sehr umständlich sein, mit grossen Punktwolken-Daten effizient zu arbeiten. Als 3D-Arbeitsmodelle dienen daher für den praktischen Einsatz die adaptiv optimierten Dreiecksvermaschungen der 3D-Schlusssteine. Da diese 3D-Modelle aus einem geschlossenen Dreiecksnetz bestehen, lassen sie sich sehr vielfältig im Bereich CAD und 3D einsetzen. Ergänzt wird die 3D-Oberflächenbeschaffenheit dieser Modelle mit dem Informationsgehalt der hochauflösenden Texturen mit einer Auflösung von ca. 67 Megapixeln.

Als zusätzliche Sicherheit lassen sich ohne grösseren Aufwand aus den digitalen Daten mittels 3D-Druckverfahren jederzeit physische 1:1-Kopien oder massstäbliche Verkleinerungen anfertigen. Solch ein 3D-Druck wurde bereits exemplarisch an der Figur des *heiligen Achatius*

Kartierungsplan des Sprengrings mit der geometrisch längentreuen Zylinderabwicklung und der Orthotopoprojektion.
© Jan-Ruben Fischer

erfolgreich durchgeführt und bestätigte auch haptisch die feine Detailqualität des digitalen 3D-Modells.

Für die Schadenskartierung wurden aus diesen 3D-Daten unter anderem CAD-Pläne erzeugt, die als Kartierungsgrundlage Verwendung fanden. Aufgrund ihrer dreidimensionalen Natur war es überdies möglich, sie auf eine Zylinderebene abzuwickeln, um exakte und längentreue Orthofotopläne zu erhalten.

Abschliessend lassen sich die erzeugten 3D-Daten natürlich auch für unterschiedlichste mediale Anwendungen einsetzen. Entsprechend optimiert, wurden kürzlich die Schlusssteine mit moderner Browsertechnik im Internet als sogenanntes WebGL verfügbar gemacht. So kann jeder Interessierte mit einem Internetzugang sich die 3D-Modelle im Netz betrachten. Von hier ergeben sich weitere Einsatzmöglichkeiten. Das digitale Oberflächenmodell eignet sich besonders sowohl im Einsatz von modernen Lehr- und Ausstellungskonzepten als auch in Anwendungen rund um die virtuelle Realität.

Fazit

Erst durch die sprunghafte technische Entwicklung der letzten Jahre ist es möglich geworden, automatisiert hochauflösende 3D-Modelle einzig aus unzähligen Fotografien berechnen zu können. Zusammen mit hochentwickelter digitaler Kameratechnik und dem schnell wachsenden Trend der Parallelisierung von Computerrechenprozessen sowie der Entwicklung immer leistungsfähigerer Softwarealgorithmen hat sich die digitale Photogrammetrie von einer Spezialdisziplin des Vermessungswesens zu der räumlichen Objekterfassungsmethode der Wahl in vielen anderen Anwendungsbereichen entwickelt.

Im Einsatz für die 3D-Oberflächenerfassung der Schlusssteine am Berner Münster haben sich die 3D-Modelle aus der *digitalen Photogrammetrie* als ideale Ausgangsprodukte bewährt, um für den Einsatz in der Denkmalpflege, der Bauwerksdokumentation, dem 3D-Druck oder vielseitig in medialen Anwendungen weiterverarbeitet zu werden. Die Methode zeigte sich als äusserst flexibel und adaptierte sich an schwierige Szenarien, wo andere Methoden an ihre Grenzen sties. Eine sorgfältige Planung und Durchführung der Aufnahmen resultiert in einem hochpräzisen farbigen 3D-Oberflächenmodell. Sie ist ideal für das Erfassen und Nachbilden komplexer, detaillierter und strukturierter Oberflächen.

Der einmalige Schatz der 500 Jahre alten Netzgewölbeschlusssteine des Berner Münsters ist nun mittels *digitaler Photogrammetrie* bis in das kleinste Detail geometrisch und farblich erfasst und für zukünftige Generationen gesichert. Er ist heute nur noch einen Mausklick entfernt und gewährt Einblicke, die über die Jahrhunderte hinweg nur ganz wenigen Menschen unter einem hohen Aufwand möglich waren. So unterstützen die digitalen 3D-Modelle nicht nur die Aufgaben in der Denkmalpflege, sondern leisten auch einen wichtigen Beitrag bei der Öffentlichkeitsarbeit. ●

Zum Autor

Jan-Ruben Fischer, Architekturstudium an der TU Karlsruhe (KIT), arbeitete nach seinem Diplomabschluss 2005–2009 im Wiener Architekturbüro Coop Himmelb(l)au als Architekt und 3D-Spezialist. 2009–2014 war er an der Bauhaus-Universität Weimar am Lehrstuhl *Informatik in der Architektur* in Forschung und Lehre angestellt. 2015 gründete er sein Ingenieurbüro *fischer – digitale photogrammetrie frankfurt* in Frankfurt am Main. Hier bietet er hochspezialisierte Ingenieursdienstleistungen und Beratung im Bereich der architektonischen Bauaufnahme an. Die Spezialisierung konzentriert sich auf die fotografische, berührungslose 3D-Erfassung von Bauwerken und Kulturgütern und deren digitale Auswertung. Diese dienen sowohl als Grundlage für Planungen von Sanierungsmassnahmen als auch zur nachhaltigen Langzeitdokumentation.
Kontakt: janruben.fischer@gmail.com

Résumé

La photogrammétrie numérique appliquée aux clefs de voûte de la collégiale de Berne

Grâce aux développements technologiques fulgurants des dernières années, il est désormais possible de générer des modèles 3D haute résolution sur la seule base d'un nombre important de photographies. Avec le perfectionnement des caméras numériques, la parallélisation croissante des processus de calcul informatiques et le développement de logiciels et d'algorithmes toujours plus performants, la photogrammétrie numérique, qui représentait jusque-là une discipline spécialisée issue de la conservation des monuments historiques, est devenue une méthode de saisie tridimensionnelle des objets applicable à de nombreux autres domaines.

Dans le cas de la saisie des clefs de voûte de la collégiale de Berne, les modèles 3D obtenus par photogrammétrie numérique se sont avérés constituer une base idéale

pour être développée à des fins de conservation, de documentation, d'impression 3D et d'utilisations multimédias diverses. Cette technique s'est révélée d'une grande flexibilité et s'est adaptée à des situations difficiles, où d'autres méthodes montraient leurs limites. Une préparation et une exécution minutieuses des photographies permettent d'obtenir un modèle 3D couleurs d'une grande précision. Ce procédé est idéal pour saisir et reproduire en détail des surfaces structurées complexes.

Le trésor exceptionnel que constituent les clefs des voûtes réticulées de la collégiale de Berne est désormais numérisé jusque dans les moindres détails, tant en termes de géométrie que de couleurs. Dorénavant accessible en un clic de souris, il est archivé pour les générations futures et permet de voir ce que n'avaient jusque-là vu que de rares privilégiés, au prix d'efforts considérables. Ainsi les modèles numériques 3D ne sont-ils pas seulement au service de la conservation du patrimoine, mais contribuent-ils aussi à l'information d'un public élargi.

Riassunto

L'applicazione della fotogrammetria digitale nel rilievo delle chiavi di volta della cattedrale di Berna

Grazie alla rapida e profonda evoluzione tecnologica degli ultimi anni è diventato possibile elaborare in modo automatizzato dei modelli 3D in alta risoluzione a partire da un elevato numero di fotografie. Insieme alla sofisticata tecnologia digitale delle fotocamere e alla crescente tendenza alla parallelizzazione dei processi di calcolo computerizzato, così come allo sviluppo di software e algoritmi sempre più raffinati, la fotogrammetria digitale si è trasformata

da disciplina specialistica della conservazione dei monumenti storici in tecnica privilegiata per il rilievo di oggetti applicata anche a molti altri campi.

Impiegati nell'ambito del rilievo 3D della superficie delle chiavi di volta della cattedrale di Berna i modelli 3D della fotogrammetria digitale si sono dimostrati prodotti di base ideali non solo nel campo della conservazione dei monumenti storici, ma anche in sede di documentazione dell'edificio, di stampa 3D e di vari utilizzi in campo mediale. Il metodo si è dimostrato estremamente flessibile e adatto anche a scenari difficili, in cui altre tecniche di rilievo hanno mostrato i loro limiti. Un'accurata pianificazione e realizzazione dei rilievi consente l'ottenimento di un modello 3D a colori e ad alta precisione della superficie di un oggetto. La fotogrammetria digitale si presta in particolare per il rilievo e la restituzione di superfici complesse, dettagliate e strutturate.

Grazie a questa tecnica lo straordinario tesoro delle chiavi di volta del soffitto a costoloni della cattedrale di Berna, risalente a 500 anni fa, è stato rilevato geometricamente e cromaticamente in ogni minimo dettaglio e archiviato per le generazioni future. Oggi basta un click del mouse per ammirare questo tesoro e scoprire immagini che finora sono state accessibili solo a un numero ristretto di persone e con grande dispendio di mezzi. In questo senso, i modelli 3D non supportano solo i compiti della conservazione dei monumenti storici, ma danno anche un importante contributo informativo alla collettività.

Stuck- und Putzrestaurierung

- Untersuchung
- Konzepterarbeitung
- Konservierung
- Restaurierung
- Dokumentation
- Expertisen
- Beratung
- Stuckaturen und Oberflächen

Kradolfer
GIPSERHANDWERK

Gipsergeschäft
Kradolfer GmbH

8570 Weinfelden
Telefon 071 622 19 82
www.kradolfer.ch