



## Vermessung des Wiener Stephansdoms mit einem Laserscanner

### Survey of the St. Stephen's Cathedral in Vienna with a laser scanner

Franz Zehetner, Wien und Nikolaus Studnicka, Horn

#### Kurzfassung

Regelmäßige, vollständige und vor allem genaue Vermessungen historisch bedeutsamer Gebäude sind sowohl für laufende Erhaltungsmaßnahmen als auch für eine vollständige Langzeitdokumentation erstrebenswert. Klassische Methoden zur Erstellung von Bestandsplänen waren in der Regel zeitaufwendig und teuer.

In den Jahren 2018/19 wurde der Wiener Stephansdom mit Hilfe eines 3D-Laserscanners innerhalb weniger Arbeitstage vollständig vermessen. Der vorliegende Beitrag beschreibt die Erfassung von mehr als tausend Scans und deren Verarbeitung zu einer präzisen und hochauflösenden 3D-Punktwolke. So ist es insbesondere für die Dombauhütte möglich geworden, jederzeit beliebige Ansichten und Schnitte des Gebäudes zu erstellen. Diese werden für die Bauanalyse, als Grundlage für die laufende Schadensdokumentation und für die Simulation historischer Bauzustände verwendet.

**Schlüsselwörter:** Terrestrisches Laserscanning, 3D Scan, Historisches Gebäude, Kathedrale, Stephansdom

#### Abstract

Regular, complete, and – above all – accurate surveys of historically significant buildings are desirable both for ongoing conservation measures and for complete long-term documentation. Classical methods for the preparation of as-built plans were usually time-consuming and expensive.

In 2018/19, the Vienna St. Stephen's Cathedral was completely surveyed within a few working days with the help of a 3D laser scanner. This paper describes the acquisition of more than a thousand scans and their processing to a precise and high-resolution 3D point cloud. Now it is possible, especially for the cathedral building authority, to create any section and view of the building at any time. These are used for the building analysis, as a basis for the continuous damage documentation, and for the simulation of historical building conditions.

**Keywords:** terrestrial laser scanning, 3D scan, historical building, cathedral, St. Stephens cathedral

#### Vorbemerkung

In den vergangenen Jahren hat sich das terrestrische Laserscanning in der dreidimensionalen Vermessung von Bauwerken auf breiter Ebene durchgesetzt. In vielen Bereichen konnte der gesamte Aufnahme- und Auswerteprozess immer weiter verbessert werden: Die Laserscanner messen mit Millimeter-Genauigkeit und es können dutzende, hochauflösende Scans pro Stunde aufgenommen werden, die noch im Scanner nahezu in Echtzeit zusammengesetzt werden.

Eine gotische Kathedrale ist ein komplexes Gebäude, das große Dimensionen, feine Details und eine Vielzahl von Einzelräumen aufweist. Der Wiener Stephansdom wurde bereits 2005 (nur der Innenraum) und nun wieder ab 2018 (innen, außen, Dach, Katakomben, Nebenräume) mit einem terrestrischen Laserscanner vermessen. Dies soll Inhalt dieses Aufsatzes sein. Die einfachere Handhabung bei der Datenaufnahme, die höhere Genauigkeit und die schnellere Verfügbarkeit der Ergebnisse stellen einen großen Fortschritt

für die Bauaufnahme historischer Gebäude dar. Direkt aus der Punktwolke können Vorlagen für klassische Pläne generiert werden. Der aktuelle Zustand des Gebäudes kann exakt und maßgetreu dokumentiert werden und dient als Grundlage für Restaurierungsplanungen, zur statischen und bauhistorischen Analyse des Bauwerks, zur Visualisierung von historischen Informationen für eine breitere Öffentlichkeit bis hin zur Möglichkeit, im Falle von Schäden anhand der Dokumentation den Bau oder bestimmte Details originalgetreu rekonstruieren zu können.

#### 1. Laserscanner

Terrestrisches Laserscanning (TLS) ist eine Messmethode zur dreidimensionalen Objekterfassung. Für die hier beschriebene Vermessung 2018/2019 des Stephansdoms wurde der RIEGL 3D-Laserscanner VZ-400i [Riegl, 2020] eingesetzt. Von jedem Standpunkt tastet der Scanner seine Umgebung systematisch durch Drehung um die vertikale und horizontale Achse bei gleichzeitiger

Laserentfernungsmessung ab, wobei pro Sekunde durchschnittlich etwa 500.000 Messpunkte nach dem Impuls-Laufzeit Prinzip erfasst werden. Durch Aneinanderreihung mehrerer Scanstandpunkte können größere Bereiche erfasst werden, wobei die gegenseitige Orientierung dieser Scanpositionen (im Folgenden „Registrierung“ genannt) automatisch erfolgt.

### 1.1 Datenaufnahme

Beim typischen Arbeitsablauf mit einem TLS Scanner wird ein sogenannter Panoramascan nach dem anderen aufgenommen. Ein Operator trägt den auf einem Dreibeinestativ montierten Laserscanner quasi im Minutentakt ungefähr zehn Meter weiter und startet mit nur einem Tastendruck einen neuen Scan. Dabei werden in einer vollen Scannerdrehung durchschnittlich

22,5 Millionen Messpunkte in 45 Sekunden Scanzeit erfasst. Die Winkelauflösung beträgt standardmäßig 40 Milligrad, dieses Scanmuster wird auch „Panorama40“ genannt (Tabelle 1). Die räumliche Auflösung der Messpunkte ist entfernungsabhängig und beträgt in 10 Metern Distanz vom Scanner durchschnittlich sieben Millimeter. Zwischen den Scanpositionen werden je nach Scanobjekt 5-15 Meter Abstand gelassen. So ist gewährleistet, dass möglichst wenig Oberflächen „unerfasst“ bleiben und die großen Überlappungsbereiche der Scans die anschließende Registrierung unterstützen können. Erst seit Kurzem ist man in der Lage hunderte Scans pro Tag aufzunehmen. Ermöglicht wird das durch die hohe Messrate und die hohe Drehrate des Ablenkspiegelrades des Laserscanners, aber vor allem auch durch die automatische Registrierung



Abb. 1: Vermessung des Wiener Stephansdoms mit einem terrestrischen Laserscanner RIEGL VZ-400i

Laserscanner	RIEGL VZ-400i
Messfrequenz	1,2 MHz, durchschnittlich 500.000 Messungen pro Sekunde
Scanmuster	„Panorama40“ (Gesichtsfeld 360° x 100°)
Auflösung (horizontal und vertikal)	0,04° entspricht 7 mm in 10 Meter Distanz
Scanzeit (ohne Umstellen)	45 Sekunden
Max. Anzahl der Scanpositionen pro Stunde	50 Scans pro Stunde (mit Umstellen und Fotoaufnahme)
Messreichweite	0,5 – 250 Meter (800 Meter bei niedrigerer Messfrequenz)
Genauigkeit / Präzision	5mm / 3mm
Aufgesetzte Kamera	Nikon D850 mit Nikkor 14mm Objektiv, 46 Megapixel / Vollformat

Tab. 1: Spezifikation des terrestrischen Laserscanners RIEGL VZ-400i

der Scans, ohne die Notwendigkeit Reflektoren feinzuscannen. Bei diesem Projekt wurden pro Scanposition jeweils fünf kalibrierte 45 Megapixel Fotos aufgenommen. Nur im Innenraum erfolgte wegen der längeren Belichtungszeit die Aufnahme der Fotos bei stillstehendem Scannerkopf, sonst bereits während des Scanvorganges.

## 1.2 Registrieren der Scanpositionen

Die Scans werden zeitgleich zur Aufnahme im Scanner miteinander registriert. Dies erlaubt es dem Anwender quasi in Echtzeit auf einem Mobiltelefon den Scanfortschritt als Lageplan zu sehen. Das automatische Registrieren der jeweils letzten Scanposition zu den bereits zusammengeführten ist ein mehrstufiger Prozess. Zu Beginn wird die irreguläre, hochauflösende Punktwolke in einen reduzierten, regulären „Voxeldatensatz“ umgewandelt. Dieser stellt die Basis für einen Übergang aus dem räumlichen Bereich in den Spektralbereich über die Fouriertransformation dar. Die entscheidende Eigenschaft der Fouriertransformation für diesen Anwendungsfall ist, dass sich eine Verschiebung und Drehung eines Datensatzes im Spektralbereich so darstellt, dass sich die Drehung nur im Betrag der Fouriertransformierten des transformierten Datensatzes zeigt, wohingegen in der Phase der Fouriertransformierten, Translation und Drehung wirksam werden. Diese Eigenschaft ermöglicht es, über die Analyse der Beträge des neu zu registrierenden Datensatzes und einem zuvor gebildeten Referenzdatensatz die Drehung zu bestimmen – unbeeinflusst von der Translation. Nach Bestimmung der Drehung kann diese auf den zu registrierenden Datensatz angewendet werden. Eine neuerliche Fouriertransformation und eine Analyse der Phasenverschiebung erlaubt dann die zuverlässige Bestimmung der Translation [Ullrich & Fürst, 2017]. Im letzten Schritt wird ein modifizierter ICP (Iterative Closest Point) Algorithmus angewendet. Die Registrierung erfolgt automatisch und robust.

Nach der erfolgreichen Registrierung aller Scanpositionen eines Projektes kann es unter anderem bei einem Schleifenschluss zu geringen Klaffungen kommen. Um diese über das Projekt auszugleichen, wird in der Regel der Blockausgleich „Multi Station Adjustment“ der proprietären Software RiSCAN PRO angewendet. Dieser bewerkstelligt eine rigorose Anpassung mittels der Scandaten als solchen, GNSS-Messungen und Scanner-internen Sensordaten. Falls – wie in diesem Fall – vorhanden, werden auch Kontrollpunkte

verwendet. Die durchschnittliche Rechenzeit pro Scanposition beträgt 14 Sekunden. Abschließend wird automatisiert ein detaillierter Bericht erstellt.

Bei der Vermessung des Wiener Stephansdoms wurden in den Jahren 2018/2019 an mehreren Tagen zirka tausend Laserscans aufgenommen und zusammengesetzt. Die maximale Tagesleistung bei den beschriebenen Einstellungen beträgt 400 Scanpositionen pro 8-Stunden Arbeitstag. Gerade bei einem so umfangreichen Scanprojekt ist es von großer Wichtigkeit, Kontrollpunkte mit einem Theodolit einzumessen. Diese dienen unter anderem der Kontrolle der Messgenauigkeit des gesamten Vermessungsprojekts. Das Vermessungsbüro Meixner [Meixner, 2020] hat zirka fünfzig retro-reflektierende, kreisrunde Klebefolien mit seiner hochgenauen Totalstation eingemessen. Dabei wurden der Stephansplatz, der Innenbereich, der Dachboden und die Katakomben des Doms abgedeckt. Die Genauigkeit des Polygonzugs lag bei einem Millimeter. Während der Scanaufnahme wurden dieselben Reflektoren mit dem Laserscanner feingescannt. Der abschließende Genauigkeitsreport nach dem „Multistation Adjustment“ weist eine Standardabweichung der Kontrollpunkt-Koordinaten zwischen Totalstation und Laserscanner von sechs Millimetern aus.

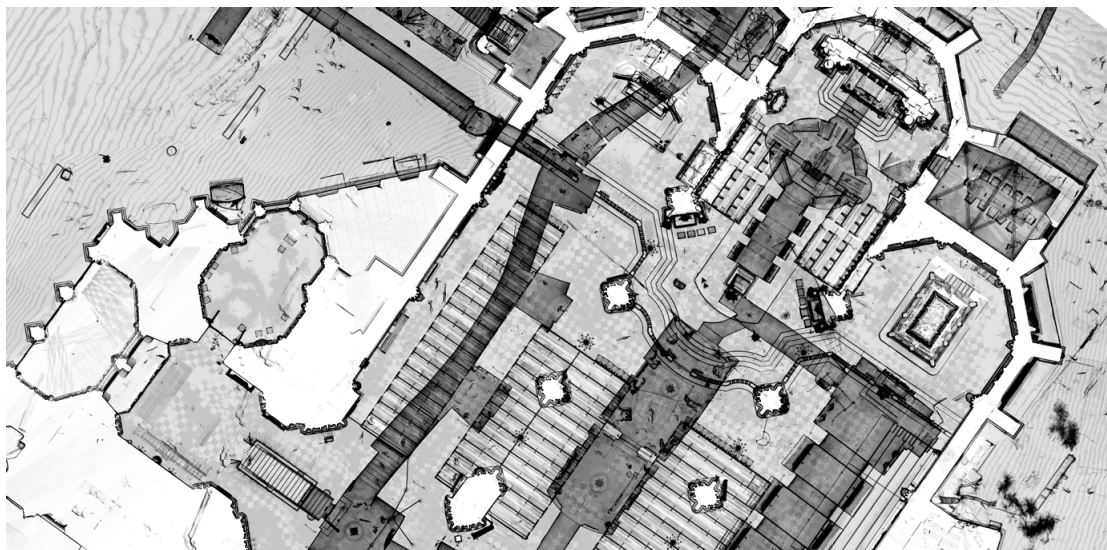
Die Koordinaten wurden im Gauß-Krüger-Koordinatensystem, Zone M34 und dem „Wiener Null“ Bezugsniveau eingemessen. Außerdem wurde das sogenannte Dom-Koordinatensystem mit ein paar Kontrollpunkten im Inneren des Doms definiert. Dies soll die Verbindung zwischen den historischen, zweidimensionalen Plänen und Schadenskartierungen mit der aktuellen dreidimensionalen Punktwolke ermöglichen.

## 1.3 Prozessieren der Scandaten

Das automatische Prozessieren der Laserscans beinhaltet standardmäßig folgende Schritte:

- Filtern (Geisterpunkte und fliegende Punkte löschen, etc.)
- Registrieren der jeweils letzten Scanposition zum Gesamtprojekt
- Blockausgleich aller Scanpositionen zueinander (mit extern eingemessenen Kontrollpunkten)
- Einfärben der Scans mit der Farbinformation einer aufgesetzten Fotokamera
- Homogenisieren der Scandaten und Zusammenführen zu einer Gesamtpunktwolke





**Abb. 2:** Wiener Stephansdom: homogenisierte Punktwolke aus zirka tausend Scanpositionen, durchschnittlicher Punktabstand 2 mm

Als Ergebnis erhält man eine homogene Punktwolke mit einem fast einheitlichen Punktabstand von wenigen Millimetern. Als derzeitiges Standard-Austauschformat für große, homogenisierte Punktwolken gilt das sogenannte LAS Format. Der einfachste Weg CAD-Pläne eines bestehenden Gebäudes zu erstellen ist, eine orthogonale Ansicht einer Punktwolke als Vorlage zu nehmen. Diese ist gut interpretierbar und kann relativ einfach zu einer Vektorgrafik umgezeichnet werden. Seit Jahren gilt diese Vorgehensweise als Standard.

## 2. Verwendung der Laserscans in der Praxis

Der Bau der gotischen Kathedralen, die über Jahrhunderte von unzähligen verschiedenen Steinmetzen und Bauleuten errichtet worden waren, war auch schon im Mittelalter ohne genaue Pläne nicht denkbar. Einige davon haben sich bis heute erhalten und sind ein beeindruckendes Zeugnis der mittelalterlichen Handwerkskunst. Die weltweit größte Sammlung mittelalterlicher Planrisse<sup>1)</sup> stammt aus der Wiener Dombauhütte und befindet sich seit dem 19. Jahrhundert im Kupferstichkabinett der Akademie der Bildenden Künste<sup>2)</sup>. Diese Pläne sind aber als Grundlage für moderne Restaurierungsmaßnahmen nicht verwendbar, da zumindest im erhaltenen Bestand

kein vollständiger Plansatz vorhanden ist. Durch die lange Bauzeit des Stephansdoms, die sich über fast vierhundert Jahre erstreckt und viele Stilphasen umfasst, gab es naturgemäß auch keinen einheitlichen Bauplan für das gesamte Gebäude, sondern nur für Bauteile oder für bestimmte Herausforderungen an Gestaltung und Bautechnik. Für eine anspruchsvolle, moderne Restaurierung sind aber exakte Plangrundlagen des Gesamtbaues oder zumindest der aktuell zu restaurierenden Bauteile erforderlich. Einige der erhaltenen mittelalterlichen Pläne wurden wohl schon für diesen Zweck erstellt.

Seit der frühen Neuzeit wurden sehr eindrucksvolle, detail- und weitgehend maßstabsgetreue Gesamtansichten des Domes gedruckt. Für einzelne Restaurierungs- und Bauvorhaben wurden auch Pläne angefertigt, es hat sich davon aber nur wenig erhalten. Der Umgang der barocken Bauleute mit dem gotischen Gebäude und seinen typischen Formen war ein sehr freier. Anbauten (wie die Sakristeien oder der Abschluss des Nordturmes) und Ergänzungen (etwa nach 1683) wurden in damals aktuellen Formen vorgenommen, der mittelalterliche Bestand wurde teilweise überformt. Ab dem Beginn des 19. Jahrhunderts änderte sich aber der Zugang zur mittelalterlichen Bauweise: Für die Ergänzungs- und Restaurierungsarbeiten wurden genaue Aufnahmen des Bestandes angefertigt, etwa ab 1810 sowie 1842

1) Die Sammlung wurde mehrmals wissenschaftlich bearbeitet und die Pläne publiziert, so von Hans Koepf, 1969 und umfassend von Johann Josef Böker, 2005

2) Knofler, 2011

und 1860 für den Südturm oder für die Ergänzung der Langhausfassaden 1850-53.

Weniger detailliert, aber dennoch in der Dokumentation des damaligen Zustandes des Gesamtbaues sehr wertvoll, sind die genauen Bauaufnahmen, die im 19. und 20. Jahrhundert für kunstwissenschaftliche Publikationen über den Dom angefertigt wurden. Die wichtigsten sind die Publikation von Franz Tschischka 1831<sup>3)</sup>, in der der Zustand des Domes vor den umfassenden Restaurierungsmaßnahmen des Historismus sehr gut dokumentiert wurde, und der Band der österreichischen Kunsttopographie, der 1931 von Hans Tietze<sup>4)</sup> herausgegeben worden ist, der uns noch immer einen guten Eindruck vom Erscheinungsbild des Domes vor 1945 gibt. Die zahlreichen dafür angefertigten Aufnahmen (nicht alles wurde veröffentlicht) waren auch eine wichtige Grundlage für den Wiederaufbau nach dem Brand.

Die historischen Bauaufnahmen gaben entweder einen guten Überblick über das Gesamtbauwerk – konnten dabei aber maßstabsbedingt die Details nicht berücksichtigen – oder beschränkten sich auf jene Bauteile, die gerade bearbeitet wurden. Für diejenigen Teile, die nach 1945 erneuert oder wieder aufgebaut werden mussten, wurden natürlich exakte Pläne angefertigt, die auch bedeutende Teile des zu restaurierenden Altbestandes (wie die zerstörten Pfeiler und Teile der Gewölbe) umfassen, aber auch mit ihnen lag keine umfassende und genaue Planaufnahme vor. Erst ab 1991 wurde auf photogrammetrischem Weg ein sehr weitgehender Plansatz im Maßstab 1:50 erstellt. Aber auch hier können in der zweidimensionalen Darstellung nicht alle Einzelheiten der komplizierten räumlichen Verhältnisse dargestellt werden, vor allem das Fehlen der in den Hauptansichten verdeckten Bereiche, etwa der Flanken der Strebepfeiler, stellt eine große Lücke in der Bestandsdokumentation dar.

Das dreidimensionale Modell erlaubt es nun endlich, auch die meisten Abschnitte der räumlich komplexen Bauteile darzustellen. Die Verbindung von Innen- und Außenansicht gibt auch vielfältige Informationen über Aufbau und Struktur des Mauerwerks: die Dicke der Mauern ist klar erkennbar, darüber hinaus gibt die Verbindung der Fugenschnitte an der Außen- und der Innenseite Hinweise darauf, ob das Mauerwerk ein- oder mehrschalig aufgebaut ist, ob unterschiedliche

Setzungen in den verschiedenen Wandschalen erfolgt sind, ob Risse durch die gesamte Dicke des Mauerwerkes laufen oder nur oberflächlich sind. Mit den räumlichen Informationen können auch Untersuchungen über die akustischen und optischen Eigenschaften des Domes durchgeführt werden, die als Grundlage für die Lichtplanung und die Positionierung von Musikern und Maßnahmen zur Verbesserung der akustischen Verhältnisse dienen können.

## 2.1 Erstellung von orthogonalen Ansichten und Schnitten

Der klassische, zweidimensionale Plan bildet noch immer eine wichtige Grundlage für die Beschäftigung mit einem historischen Bauwerk. Im Baubetrieb sind zweidimensionale Pläne seit Jahrhunderten üblich, sie sind für die Fachleute leicht verständlich und für die meisten Anwendungsgebiete ausreichend. Die klassischen Planansichten Grundriss, Aufriss und repräsentative Schnitte können leicht aus der Punktwolke gewonnen und dann in dem für die weitere Verarbeitung passenden Programm nachgezeichnet und bearbeitet werden.

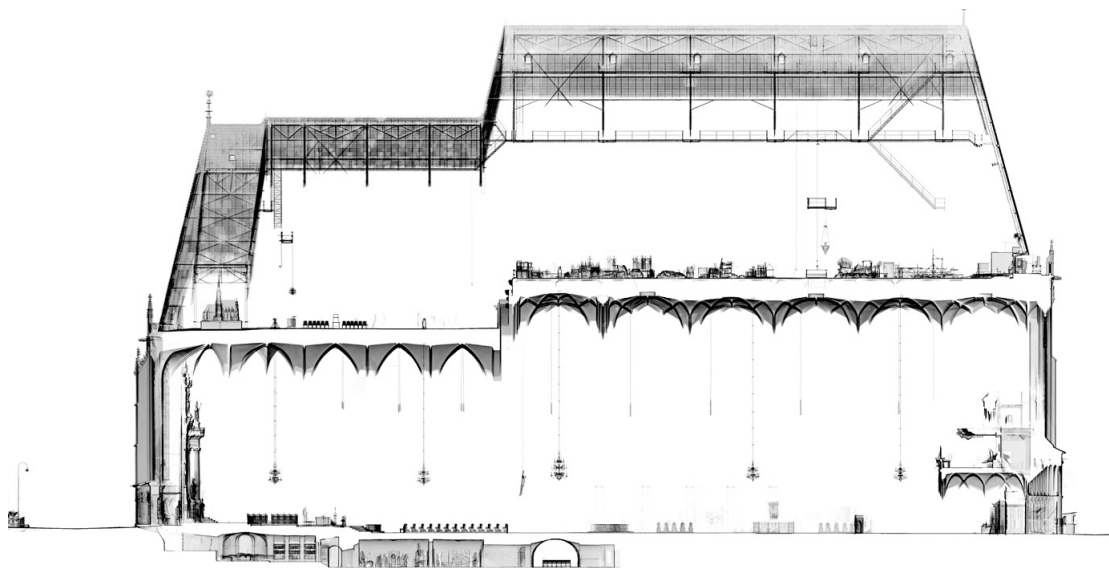
Ein Laserscanprojekt aus vielen hunderten Scanpositionen ergibt in einem ersten Schritt eine Punktwolke mit mehreren Milliarden Messpunkten, welche die Objektgeometrie sehr gut widerspiegelt, aber alleine durch ihre Größe schwierig zu bearbeiten ist (Abbildung 3). Die Fülle an Informationen muss nach den Regeln der Baukunst analysiert und interpretiert werden.

Aus RiSCAN PRO kann man ein vollständiges Scanprojekt als RiPANO Projekt exportieren, in dem mithilfe von Panoramaansichten zwischen den Scanpositionen navigiert werden kann. Dabei ist es möglich, an bestimmten Punkten Marker zu setzen und die Koordinaten abzugreifen. Zusätzlich kann man Distanzen messen, Pfade definieren und diese exportieren. Die Herstellung von Bestandsplänen wird wesentlich vereinfacht, da auch rasch und intuitiv maßstäbliche Ansichten und Schnitte generiert werden können. Dabei läuft die Software in einem „Browser“, kann also von mehreren Personen ohne eigene Softwareinstallation verwendet werden. Die Rasterdaten können anschließend im DXF oder GEOTIFF Format exportiert werden.

Die auf analytischem Weg gewonnenen Pläne und Schnitte bieten ein weitgehend getreues Bild des Gebäudes, auch wenn es – wie bei historischen Gebäuden üblich – komplizierte oder

3) Tschischka Franz, Der Wiener Stephansdom, 1831

4) Tietze, Hans, Österreichische Kunsttopographie, 1931



**Abb. 3:** Längsschnitt durch die Laserscan-Punktwolke des Stephansdoms mit Dachboden, Kirchenraum und Katakomben

unregelmäßige Formen aufweist. Sie sind viel näher an der Wirklichkeit als die mit Handaufmaß aufgenommenen Pläne, bei denen sich – auch bei sehr exaktem Arbeiten – Vereinfachungen und Reduktionen auf geometrische Grundformen kaum vermeiden lassen. Die exakte Dokumentation des Bauwerks erfüllt auch noch den Zweck, den Bau in seinem jetzigen Zustand möglichst getreu dem Vorbild für kommende Generationen zugänglich und erkennbar zu machen. Denn der Bau verändert sich sowohl durch die ständige, unaufhaltsame natürliche Erosion des Steines als auch durch Katastrophen, wie Brände, Erdbeben oder Kriegsereignisse, die – wie uns der Brand von Notre Dame in Paris 2019 sehr eindrucksvoll bewusst gemacht hat – auch in unserer Zeit nicht ausgeschlossen sind.

## 2.2 Freie Schnitte

Ein enormer Vorteil der dreidimensionalen Aufnahme gerade für einen komplexen Gewölbebau wie den Stephansdom ist aber die Möglichkeit, auch Schnitte entlang beliebig im Raum liegender Ebenen zu erstellen. Natürlich konnten solche Schnittzeichnungen auch mit klassischen Mitteln angefertigt werden, sie erforderten aber einen erheblichen Zusatzaufwand. Schnitte, die nicht den orthogonalen Gebäudeachsen folgen, können für die Analyse eines historischen Bauwerkes vielfältig genutzt werden: diagonale Schnitte können für die statische Analyse von Türmen besonders

aufschlussreich sein, da in dieser Richtung die maximale Kraftableitung erfolgt. Darüber hinaus kann auch entlang jeder beliebigen Gewölberippe geschnitten werden. So können nicht nur die Konstruktionsweise und der Kraftverlauf in einem klassischen Kreuzrippengewölbe abgebildet werden, sondern auf einfache Art auch komplexe Netzrippengewölbe, wie sie etwa im Langhaus des Stephansdomes vorkommen. Diese können geometrisch und statisch analysiert und dadurch besser verstanden und auf Schwachstellen untersucht werden.

## 2.3 Lageplan der Katakomben

Die Katakomben von St. Stephan sind über viele Jahrhunderte entstanden. Der älteste Teil ist die Herzogsgruft unter dem Chorraum aus dem 14. Jahrhundert. Sie wurde 1754/55 erheblich erweitert und mit einer weitläufigen Unterkirche ergänzt<sup>5)</sup>. Die Bereiche der Katakomben, die nicht unter dem Dom selbst, sondern unter dem Stephansplatz liegen, sind relativ jung (Abbildung 4). Nachdem der Stephansplatz als Friedhof genutzt wurde, konnten sie erst nach dem Verbot der Bestattungen errichtet werden. Sie waren aber nicht nur vom Dom aus zugänglich, sondern hatten auch Aufgänge in die benachbarten Häuser. Der Aufgang zum Deutschordenshaus ist noch gut erkennbar, auch wenn er heute abgemauert ist. In manchen Bereichen aber überschneiden sich

5) Tietze, S.



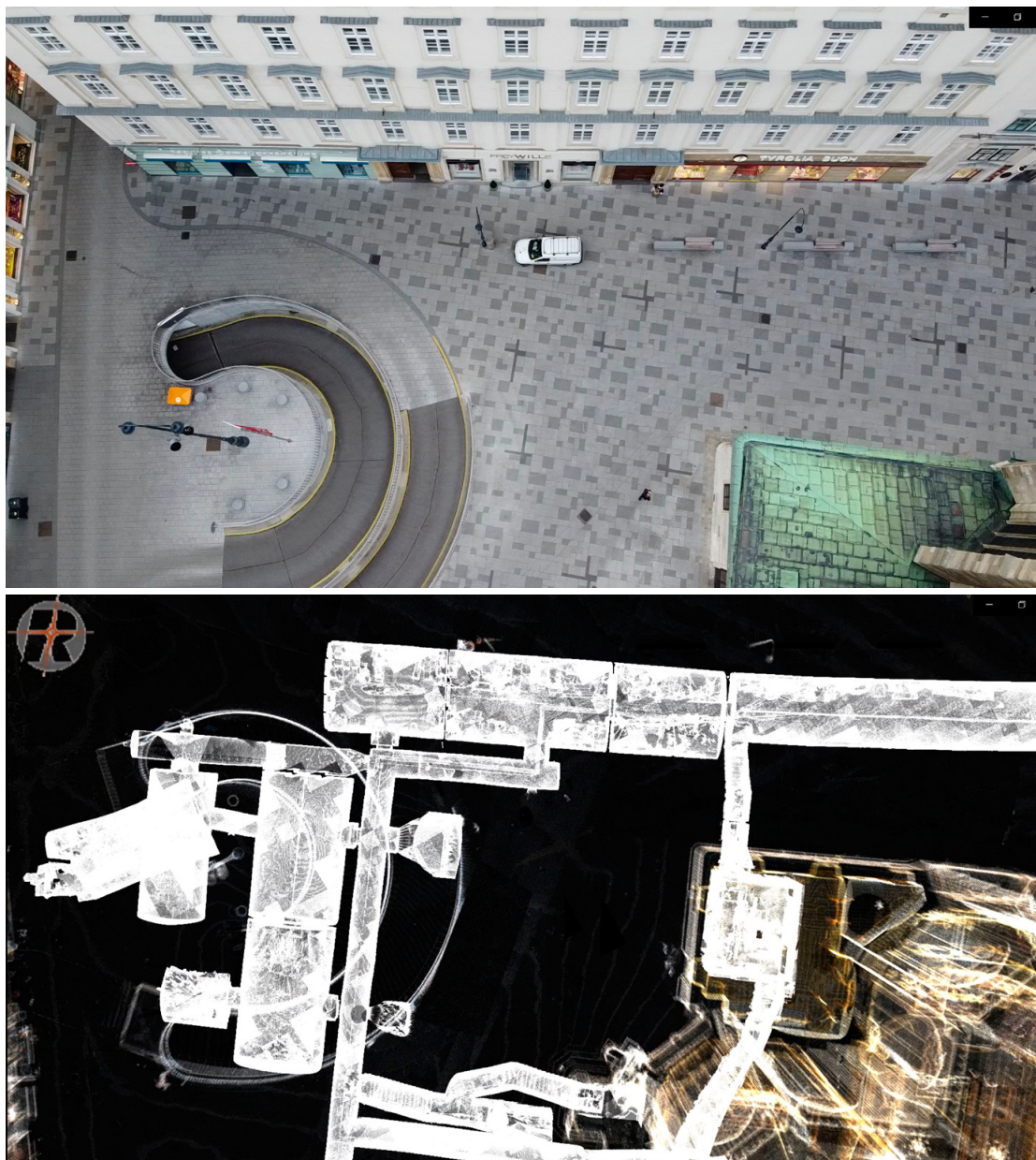


Abb. 4: Fotoaufnahme (oben) und Scanansicht (unten) des östlichen Stephansplatzes mit den unterirdischen Katakomben

diese regelmäßig geplanten Katakomben mit den älteren, tieferliegenden Kellern der umgebenden Häuser. Pläne der Katakomben sind zwar seit dem 18. Jahrhundert immer wieder erstellt worden, die Höhenlage und ihre räumliche Situation zueinander sind aber auf einem zweidimensionalen Plan nicht darstellbar, erst mit dem 3D-Scan ist man nun in der Lage, diese komplexen räumlichen Verhältnisse darzustellen.

#### 2.4 Wandgemälde im Bischofstor

Ein aktueller Anwendungsfall der 3D-Analyse am Dom sind die Forschungen an den Wandmalereien in der Vorhalle des Bischofstores an der Nordseite des Langhauses von St. Stephan. Das Portal war bis 1945 eines der Haupttore des Stephansdomes. Im frühen 16. Jahrhundert wurde vor das Figurenportal von 1365 eine fünfeckige Vorhalle gebaut. Heute befindet sich hier der



*Abb. 5: Wandfläche des Strebepfeilers beim Bischofstor: Ansicht der originalen 3D Punktwolke mit vermeintlicher Skizze von Dürer (links), rechts zusätzlich mit virtuell eingesetztem Epitaph des Johannes Rechwein*

„Domshop“. Dass sich an der Wandfläche des Strebepfeilers eine großformatige Wandmalerei befand, konnte man nur mehr erahnen. 2018 konnte diese Fläche gereinigt und konservatorisch behandelt werden<sup>6)</sup>. Die Malerei, die unter der dicken Schmutzschicht zum Vorschein kam, war überraschend (Abbildung 5). Sie hat die Form eines dreiteiligen Retabels mit einem rundbogigen Mittelstück und zwei Seitenfeldern. Es sind zwar fast nur mehr die Vorzeichnungen der Gemälde, die auf den dünnen, feuchten Putz „al fresco“ aufgetragen wurden, erhalten, die später aufgetragene „secco“-Ausmalung ist großteils verloren gegangen. Aber auch die Vorzeichnungen, vor allem der beiden Seitenflügel, sind von höchster

Qualität. Sie sind keine Schülerarbeit, sondern stammen von der Hand eines Meisters, eventuell sogar von Albrecht Dürer selbst. Die Malerei des mittleren Feldes wurde erst später in der jetzigen Form ausgeführt, bemerkenswert ist aber, dass die Umrisse der Ergänzung dieselbe Form haben wie das um 1515 entstandene Epitaph des Johannes Rechwein, das sich im Inneren des Domes befindet. Dieses Epitaph könnte in einer früheren Phase das Mittelstück der gesamten Komposition im Bischofstor gebildet haben. Die Plausibilität dieser Theorie kann mit Hilfe des Laserscans überprüft werden: Nachdem beide Teile gescannt wurden, wurden im virtuellen Modell das Epitaph und der Strebepfeiler mit seiner Wandmalerei zusammengeführt. Die Umrisse stimmen exakt

6) Restaurierbericht BDA im Archiv der Dombauhütte





Abb. 6: Trianguliertes und texturiertes Modell, erstellt in der Software Euclidean

überein, das Epitaph könnte daher wirklich Teil der Komposition der Wandmalerei gewesen sein.

Die mögliche Urheberschaft Albrecht Dürers gibt diesem Forschungsprojekt eine besondere Aufmerksamkeit, aber es handelt sich beim Einsatz der 3D-Technologie keineswegs um einen Einzelfall, ähnliche Fragestellungen finden sich in der Bauforschung häufig. Zahlreiche Skulpturen wurden im Laufe der Zeit an andere Bauteile versetzt oder in ein Museum gebracht. Die Simulation von vermuteten, früheren Zuständen im virtuellen Modell kann ein wertvoller Beitrag in der Diskussion um einen Rekonstruktionsvorschlag sein, da seine Glaubwürdigkeit besser beurteilt werden kann.

## 2.5 Unregelmäßigkeiten

Der 3D-Scan bietet aber nicht nur für solche Detailuntersuchungen wertvolle Grundlagen. Die Möglichkeit, den gesamten Bau zu erfassen, gewährt in vielen Anwendungsfällen wertvolle Informationen, etwa um geplante oder durch die Jahrhunderte entstandene Unregelmäßigkeiten zu erkennen. Die gotischen Kathedralen sind nur in ganz wenigen Fällen in einer einzigen Bauphase entstanden. Sie wurden immer wieder vergrößert, modernisiert und verschönert. Oft wurden aber auch in einem Bauteil während der Bauarbeiten die Pläne geändert. Der Südturm des Stephansdomes, das Wahrzeichen Wiens, wurde in der Mit-

te des 14. Jahrhunderts an den bestehenden Chor angebaut. Damals war eine viel geringere Höhe geplant<sup>7)</sup>. Um 1400 erfolgte eine Umplanung, bei der ein weiteres Turmgeschoß eingefügt wurde und so der Turm die Höhe von 137 m erreichte – er war damit zu dieser Zeit der höchste Steinturm Europas. Die gesteigerte Höhe und damit das noch höhere Gewicht überfordert zwar die Fundamente nicht, führte aber zu einer stärkeren Setzung des Turmes, vor allem gegenüber dem schon bestehenden Chor, der ja als älterer Bauteil den normalen Verdichtungsprozess des Untergrundes schon hinter sich hatte. Die beiden Türme (der unvollendete Nordturm wurde erst ab 1450 an Chor und Langhaus angefügt) haben sich daher um ca. 30 cm stärker gesenkt als die angrenzenden Chor Teile, was zu Rissen in der Chorwand und zur Verformung der angrenzenden Gewölbe geführt hat. Während die Risse in der Wand natürlich sichtbar waren und im 19. Jahrhundert geschlossen wurden, ist die Analyse der Gewölbeverformung erst mit dem Laserscan möglich geworden. Schon auf Grundlage der Scans von 2005 [Zehetner & Studnicka, 2005] konnten die

7) Die höchsten Türme des 14. Jahrhunderts waren zwar schon um 120 m hoch (Freiburg, Lübeck), die Konzeption Rudolfs IV. sah aber vor, eine viertürmige Anlage mit den beiden schon bestehenden, ca. 60 m hohen, romanischen Westtürmen zu errichten, sodass eine zu große Höhe von Nord- und Südturm nicht diesem Konzept entsprochen hat.

Auswirkungen der Setzungsbewegung des Südturmes auf die benachbarten Gewölbe untersucht werden. Trotz ihrer im 3D-Modell erkennbaren Verformung weisen die Gewölbe keine Risse auf und sind stabil und statisch sicher.

Die Überlagerung verschiedener Bauteile im virtuellen Modell ermöglicht es, Unregelmäßigkeiten im Gebäude leichter festzustellen. Abweichungen von der idealen Form können schon im ursprünglichen Bau – beabsichtigt oder nicht – von Anfang an vorgekommen sein, oder sie sind durch Veränderungen am Gebäude – bedingt durch Erosion, Fundamentsetzung oder statische Mängel – entstanden. Sie können nun genau untersucht werden, bei statisch relevanten Veränderungen kann ihr Gefahrenpotential berechnet oder zumindest abgeschätzt und darauf basierend die gegebenenfalls erforderlichen Sicherungsmaßnahmen geplant und durchgeführt werden. Der horizontale Schub der Gewölbe wird bei gotischen Domen durch teilweise sehr aufwändige außenliegende Strebewerke aufgefangen. In manchen Fällen können sie aber – durch Konstruktionsfehler oder zeitbedingte Schäden – zu schwach für die auftretenden Kräfte sein. In diesen Fällen können die Gewölbe, das Strebewerk und die gesamte Gebäudewand verformt und im Extremfall zerstört werden. Die vollständige Abbildung der Wand im 3D-Modell erlaubt auch hier eine genaue Analyse und die Planung allenfalls nötiger Eingriffe.

## 2.6 Kartierungsgrundlage

Auch bei der Planung und Dokumentation von Restaurierungsmaßnahmen bieten Pläne, die auf Basis eines 3D-Scans erstellt wurden, neue Möglichkeiten. In den Bereichen, für die mittelalterliche Pläne vorhanden sind, eignen sich diese nicht als Grundlage für die Kartierung von Schäden und durchgeführten Restaurierungsmaßnahmen, da die Plandarstellung nicht mehr heutigen Darstellungsweisen entspricht. Derzeit wird auf Basis der photogrammetrischen Planaufnahmen aus den 1990er Jahren kartiert. Ein Problem dabei ist aber, dass in den Plänen nur die Hauptansichten des Domes wiedergegeben sind, wodurch viele Bauteile – wie etwa die Flanken der Strebepfeiler und allgemein plastische Details – nicht ersichtlich sind. Die fehlenden Teile müssen immer wieder ergänzt werden, was einen hohen Aufwand darstellt und nicht in der erforderlichen Genauigkeit erfolgen kann.

Im 3D-Scan hingegen sind die meisten dieser wichtigen Details vorhanden und dreidimensio-

nal exakt aufgenommen. Auf dieser räumlichen Grundlage kann zukünftig die Dokumentation der Schäden und der Restaurierungsmaßnahmen in einer viel höheren Qualität und wesentlich aussagekräftiger durchgeführt werden. Allenfalls erforderliche, zusätzliche räumlich-geometrische Daten können einfach bereitgestellt und zu den vorhandenen Plänen und Scans hinzugefügt werden.

## 3. Diskussion

Gerade Projekte an solchen Monumentalbauten wie dem Stephansdom motivieren immer wieder dazu, der modernen Technik möglichst viel abzufordern. Dabei darf am Weg zu technisch möglichen Daten aber das Grundziel der geforderten, bewährten Ergebnisse nicht aus den Augen verloren werden. Ohne rasch, effizient und exakt 2D-Ansichten und Schnitte in hinreichender Auflösung (im Innenraum fast flächendeckend 2-3 Millimeter) erstellen zu können, machen 3D-Punktwolken nur beschränkt Sinn. Eine weitere Erkenntnis dieses Projektes war, dass die Dombauhütte einen leistungsstarken Laptop für die permanente Datenbereitstellung anschaffen musste. Nur so ist gewährleistet, dass Fragestellungen auch rasch beantwortet werden können. Der gesamte Datensatz ist auf der Hälfte einer 2 Terabyte SSD Festplatte gespeichert. Voraussichtlich werden die Vermessungen mittels Laserscanner die Arbeit der Dombauhütte auch weiterhin begleiten. Voraussetzung dafür ist, dass neue Daten auch immer wieder in den Bestandsdatensatz eingepflegt werden können. Die Dombauhütte dokumentiert seit ca. 15 Jahren mit Hilfe von planorientierten Datenbanken, in denen Beschreibungen von Schäden und Maßnahmen, Photodokumentation und Materialanalysen sehr exakt am Gebäude verortet werden können und so Problemzonen gut auffind- und darstellbar gemacht werden.

Dieses Projekt hat geholfen anfängliche Probleme mit dem MultiStation Adjustment zu lösen. Es hat sich gezeigt, dass Bereiche wie der Innenraum, der Dachboden, die Katakomben oder der Stephansplatz zuerst einzeln und dann in ihrer Gesamtheit ausgeglichen werden sollten. Danach erkennt man an beliebig angesetzten Schnitten, dass die homogenisierte Gesamtpunktwolke konsistent ist.

Obwohl praktisch der gesamte „Workflow“ automatisiert ist, sind doch noch immer händische Reinigungen der Punktwolke von Vorteil. Messpunkte von Spiegelungen an Glasflächen oder von

sich bewegenden Menschen am Stephansplatz können nur semi-automatisch gelöscht werden. Es besteht Hoffnung, dass in Zukunft auch für diese Arbeiten intelligente Algorithmen entwickelt werden.

Im Zuge der Auswertungen wurden vom Büro Meixner in der Software „Euclidean Geovise Massive Datenmanager“ die Punktwolken trianguliert und mit den automatisch aufgenommenen Fotos texturiert. Die Navigation ist an moderne Spielkonsolen angepasst und die Geschwindigkeit der virtuellen Flüge ist beeindruckend. Es bleibt zu hoffen, dass so auch viele junge Besucher in Zukunft Interesse an historischen Gebäuden gewinnen.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich der 3D-Laserscan als schnelle und zuverlässige Technologie für die Vermessung von Bestandsgebäuden etabliert [Studnicka et al, 2019]. Aber warum ist der 3D-Scan so praktisch für die Architekturvermessung? Der wohl wichtigste Aspekt neben Vollständigkeit, einfacher Handhabung und dem hohen Detailgrad der Vermessung, der erzielt werden kann, ist die Wirtschaftlichkeit. Die traditionellen Techniken vom Handaufmaß bis zur tachymetrischen Vermessung sind deutlich langsamer und bergen großes Fehlerpotential durch die Tatsache, dass der Anwender nur jene Bauteile vermisst, die er vor Ort auch wahrnimmt. Mit dem 3D-Laserscanner, der die Raumgeometrie unvoreingenommen und millimetergenau vermisst, ist es nahezu ausgeschlossen, dass ein Detail übersehen wird. Der Anwender muss nur Sorge tragen, durch Umstellen des Dreibeinstativs Scanschatten zu minimieren.

Verfügt man über einen vollständigen und korrekten Datensatz eines Objektes, geht es nun darum, diesen korrekt zu interpretieren und für die diversen Bedarfsträger aufzubereiten. Hier liegt der Vorteil in der Technologie darin, dass alle Produkte für alle Bedarfsträger auf demselben Datensatz basieren. Es können sowohl die Forderung der Denkmalpflege nach verformungstreuen 2D-CAD-Plänen in Grundriss, Schnitt und Ansicht erfüllt als auch progressivere Herangehensweise via BIM („Building Information Modeling“) in allen Varianten unterstützt werden.

Die exakte räumliche Bestandsaufnahme und Dokumentation von Schäden und Maßnahmen wird – wegen ihrer großen Möglichkeiten und der immer einfacher und effizienter werdenden Hand-

habung – in der Zukunft wohl ein fix eingesetztes Werkzeug der Baudenkmalpflege werden. Die mittels Laserscanner erstellte Momentaufnahme liefert schon für sich sehr viel mehr Informationen als ein zweidimensionaler Plan. Mit modernen – auch mobilen – Computern können die großen dreidimensionalen Modelle sehr gut bearbeitet werden, laufende Veränderungen am Bauwerk können auf diese Weise effizient dokumentiert werden. Die dreidimensionale Baudokumentation entwickelt sich – neben Photodokumentation und beschreibenden Texten bzw. Datenbanken – zu einem unverzichtbaren Werkzeug für die Pflege von komplexen Baudenkmalern.

#### Referenzen

- Böker (2005), Böker, Johann Josef:* Architektur der Gotik. Bestandskatalog der weltgrößten Sammlung an gotischen Baurissen der Akademie der Bildenden Künste Wien, Salzburg, 2005.
- Knofler (2004), Knofler, Monika:* „Von der Dombauhütte in die Sammlungen. Die Odyssee der gotischen Planrisse“ in: Der Dombau von St. Stephan [Hrsg.: Michaela Kronberger; Barbara Schedl], Wien, 2011.
- Koepf (1969), Koepf, Hans:* Die gotischen Planrisse der Wiener Sammlungen (Studien zur Oesterreichischen Kunstgeschichte, Vol. IV), Wien, 1969.
- Meixner (2020),* www.meixner.com, letzter Zugriff 05/2020, Meixner Vermessung ZT GmbH, 1060 Wien, Österreich
- Riegl (2020),* www.riegl.com, letzter Zugriff 05/2020, RIEGL Laser Measurement GmbH, 3580 Horn, Österreich
- Studnicka et al (2019), Studnicka, Nikolaus, Groiss, Bernhard, Ganspöck, Mathias:* Online-Erstellung von orthogonalen Ansichten und Schnitten aus Laser Scanner Daten, Oldenburger 3D Tage 2019, Tagungsband, <https://www.vde-verlag.de/buecher/537660/photogrammetrie-laserscanning-optische-3d-messtechnik.html>
- Tietze, Hans:* Geschichte und Beschreibung des St. Stephansdomes in Wien, Wien, 1931.
- Tschischka, Franz:* Der St. Stephans Dom in Wien und seine alten Kunstdenkmale, Wien, 1832.
- Ullrich und Fürst (2017), Ullrich, Andreas, Fürst, Christoph:* Vollautomatischer Ansatz für die Onboard-Datenregistrierung im terrestrischen Laserscanning. Beiträge zum 165. DVW-Seminar am 11. und 12. Dezember 2017 in Fulda.
- Zehetner und Studnicka (2005), Zehetner, Franz, Studnicka, Nikolaus:* Cultural heritage documentation by combining near-range photogrammetry and terrestrial laser scanning - St. Stephens Cathedral, Vienna, 6. Internat. LACONA Tagung, Wien, 2005.

#### Anschriften der Autoren

**MMag. Franz Zehetner,** Archiv der Dombauhütte St. Stephan, Stephansplatz 3, A-1010 Wien.  
E-Mail: fz@dombauwien.at

**Dipl.-Ing. Nikolaus Studnicka,** RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, Riedenburgerstr. 48, 3580 Horn.  
E-Mail: nstudnicka@riegl.com