

# Innovative Dokumentationstechniken in der Denkmalpflege

Bernhard Strackenbrock

Innovative Dokumentationstechniken werden im Folgenden mit dem Schwerpunkt auf der dreidimensionalen Vermessung von Bauwerken und deren unmittelbarer Umgebung sowie im Hinblick auf architekturgebundene Kunst besprochen. Dabei werden weniger technische Einzelheiten behandelt, für die es in Angelegenheiten der Vermessung und Fotogrammetrie außer auf besondere Kompetenz auch auf viel Erfahrung ankommt. Vielmehr sollen am virtuell dargestellten Denkmal Hinweise zu (Bild-)Auflösungen, Anforderungen und Herangehensweisen an ein „dreidimensionales“ Aufmaß gegeben werden. Dabei wird der Unterschied zwischen der Vermessung des Denkmals, mittlerweile häufig als „scannen“ bezeichnet, und der Erstellung von verformungsgerechten Plänen und Orthophotos des Denkmals herausgearbeitet. Die praktische Arbeit am Denkmal erfolgt bis heute fast ausschließlich mit zweidimensionalen Plänen und Orthophotos, so dass diese Unterlagen nicht vernachlässigt werden dürfen. Basis innovativer Dokumentationstechniken in der Denkmalpflege ist seit ca. 1860 die Fotogrammetrie,

oder wie im 19. Jahrhundert verständlicher beschrieben, die Messbildkunst. Dabei geht es im Kern darum, Objekte nicht direkt, sondern indirekt aus Bildern dieser Objekte zu vermessen. Bei den Bildern kann es sich um analoge oder digitale Fotografien handeln, also Bilder mit einer zentralen Perspektive, die auf einen Schlag mittels einer Belichtung entstehen, aber auch um Abtastbilder, hier als erstes Laserscans, bei denen ein Laserstrahl Punkt für Punkt seine Umgebung abtastet. Laserscannen ist also ein Unterpunkt in der Fotogrammetrie. Natürlich können auch alle Arten von Bildern gemischt in einem Projekt vorkommen.

## Warum Fotogrammetrie?

Fotogrammetrische Verfahren werden seit nunmehr 160 Jahren für die Dokumentation und Vermessung von Denkmalen eingesetzt und ständig verbessert. Denkmalpflege und Archäologie waren dabei am Anfang die Innovationstreiber,



Abb. 1 Vorgehensmodell zum Aufbau eines Meßbildarchives (Grafik: Bernhard Strackenbrock)

◁

Stuckateur beim Modellieren von Antragsstück, im Zuge der Deckenrekonstruktion in der Residenz Würzburg (Foto Landbauamt Würzburg)

deren komplexe Fragestellungen im 19. Jahrhundert zu entsprechenden Kamerakonstruktionen und Auswerteverfahren geführt haben. Dies wird im deutschsprachigen Raum 1885 durch die Gründung der Königlich Preußischen Meßbildanstalt unterstrichen.<sup>1</sup> Auf ihrer Arbeit beruht das heute im Brandenburgischen Landesamt für Denkmalpflege befindliche Messbildarchiv mit seinen ca. 100 000 historischen Aufnahmen von Denkmälern aus der Zeit von 1885 bis 1921, die heute noch für 2D- und 3D-Auswertungen herangezogen werden können.

Die Denkmalpflege wurde in den 1920er Jahren vom Militär als dem wesentlichen Innovationstreiber abgelöst, und seit der Jahrtausendwende kamen zivile Anwendungen wie zunächst Google Earth, die Robotik und die Automobilindustrie (Stichwort „autonomes Fahren“) hinzu, in jüngster Zeit dann auch die Computerspiele-, Kino- und Werbeindustrie mit einem riesigen Bedarf an realen virtuellen Kulissen. Mit dem Einstieg der Computerspieleindustrie sind fotogrammetrische Programme kostengünstig und leistungsfähig geworden.

Die Fotogrammetrie erzeugt im ersten Arbeitsschritt eine Vielzahl von Bildern des zu vermessenden Objekts. Diese Bilder können langfristig archiviert werden, sie bilden eine Bildkonserve, so etwas wie eine Zeitkapsel des Objekts zum Zeitpunkt der Aufnahme. Im zweiten Schritt werden dann aus diesen Bildern Produkte wie 3D-Punktwolken oder 3D-Modelle, Orthophotos und verformungsgerechte Pläne abgeleitet. Dieser Schritt kann in einer oder mehreren Generationen mit dann aktueller Software, neu entwickelten Verfahren und neuen Fragestellungen wiederholt werden. Die Bildkonserve kann erweitert werden, oder es werden mehrere Zeitkapseln eines Objekts erzeugt, um Veränderungen zu detektieren. Fotogrammetrie ist also fortührungsfähig, nachhaltig und nachvollziehbar. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass man im Besitz der Bildkonserve ist. In nunmehr über 40 Jahren freier Berufstätigkeit in der Denkmalsvermessung und Dokumentation wurden aber seitens einer Denkmalsbehörde, Schlösserverwaltung, einem kirchlichen Bauamt oder anderen öffentlichen Auftraggeber diese Unterlagen in originaler Qualität, also auch zukünftig auswertbar, nicht ein einziges Mal abverlangt. Dieser Missstand ist umso weniger zu begreifen, als viele Schäden durch Kriege oder anderweitige Desaster in der Vergangenheit nur auf der Grundlage von Bildern, insbesondere Messbildern, restauriert oder ergänzt werden konnten.

## Voraussetzung

Um eine fotogrammetrische Bauwerksdokumentation qualitativ hochwertig durchführen zu können, bedarf es eines umfangreichen Fachwissens, dem sicheren Einsatz der erforderlichen Instrumente, der nur durch Übung zu erwerben ist, und einer klaren Zielvorgabe. Ist die Formulierung einer ausreichend klaren Zielvorgabe nicht möglich bedarf es einer Vorstellung von den benötigten Ergebnissen, die in einem iterativen Prozess konkretisiert werden müssen. Letztere setzt eine langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Denkmalsdokumentation voraus, da jedes Objekt ein Unikat ist und oft eine Anpassung der Herangehensweise erforderlich macht.

Sind verformungsgerechte Pläne zu erstellen, ist zudem ein architektur- und baugeschichtlicher sowie baukonstruktiver Hintergrund erforderlich. Eine direkte Kenntnis des Objekts durch intensive Begehungen oder Mitarbeit der Auswertenden ist bei dessen Vermessung und fotogrammetrischen Aufnahme ebenfalls unerlässlich. Die erforderliche breite Qualifikation wird in der Regel nur ein Projektteam aus verschiedenen Fachleuten abdecken können.

## Auflösungen

Um einen fotogrammetrischen Dokumentationsprozess für ein Denkmal zu definieren,<sup>2</sup> müssen die primären Ergebnisse und die Aufgaben, die infolge der Ergebnisse durchgeführt werden sollen, bekannt sein, selbst wenn es auch nur Standardaufgaben wären. Um eine Aufgabe zu erfüllen, müssen die erforderlichen Details und Phänomene in den Messbildern erkennbar sein. Die „Darstellungsgenauigkeit“, wie sie in der analogen Welt anhand von verschiedenen Maßstäben des Handaufmaßes üblicherweise abgebildet wird, kann dabei nicht ohne weiteres in die digitale fotogrammetrische Welt übertragen werden.

Hierbei ist es erforderlich, dass die zu bearbeitenden Phänomene auch auf den Bildern oder Laserscans gut zu erkennen und manuell oder automatisch in die erforderlichen Ergebnisse überführbar sind. Dafür ist oft eine erheblich höhere fotogrammetrische Auflösung erforderlich als auf analogem Wege der Vermessung üblich gewesen ist.

Die fotogrammetrische Auflösung zerfällt in eine geometrische Auflösung, auch als Footprint oder pixels per inch (PPI) bezeichnet, und eine Auflösung, die die zu differenzierenden Farben oder Grautöne bestimmt. Um Aufgaben der Architektur oder Statik zu bearbeiten, sollte die Auflösung bei 2 x 2 bis 3 x 3 mm je Pixel liegen, was einem Footprint von 2–3 mm oder 8–13 PPI entspricht. Nach Eckstein<sup>3</sup> können damit die Inhalte des verformungsgerechten Aufmaßes Stufe III abgedeckt werden. Hingegen braucht es für die Stufe IV eine Auflösung von 1 x 1 mm. Zur Erstellung von Plänen und Modellen in diesen Bereichen reicht auch eine Farbtiefe von 8 BIT aus, d. h. je Grundfarbe sollen 256 Abstufungen erkennbar sein. Für beide Auflösungen gilt, dass es sich um rauschfreie Bilder handelt!

Für Schadenskartierungen von Natursteinfassaden auf der Grundlage von Orthophotos sollte die geometrische Auflösung um 25 bis 50 % höher liegen als für Zeichnungen.

Für Arbeiten an komplexen Fassungen und Malerei muss die Auflösung deutlich höher in einem Bereich von 0,5 bis 0,1 mm, d. h. zwischen 50 und 250 PPI liegen. In Sonderfällen können auch 0,05 mm oder 500 PPI erforderlich sein. Das entspricht 20 000 x 20 000 Pixel je qm Oberfläche. Die Farbtiefe sollte auch 10 oder 12 Bit betragen, also 1 024 bis 4 096 Abstufungen je Grundfarbe.

Mit den beiden Parametern geometrische Auflösung und radiometrische Auflösung kann der fotogrammetrische Prozess abschließend definiert werden. Um scharfe Ergebnisse ohne Doppelkonturen zu bekommen, müssen alle weiteren Parameter der Vermessung zwangsläufig im Bereich der Auflösung liegen.

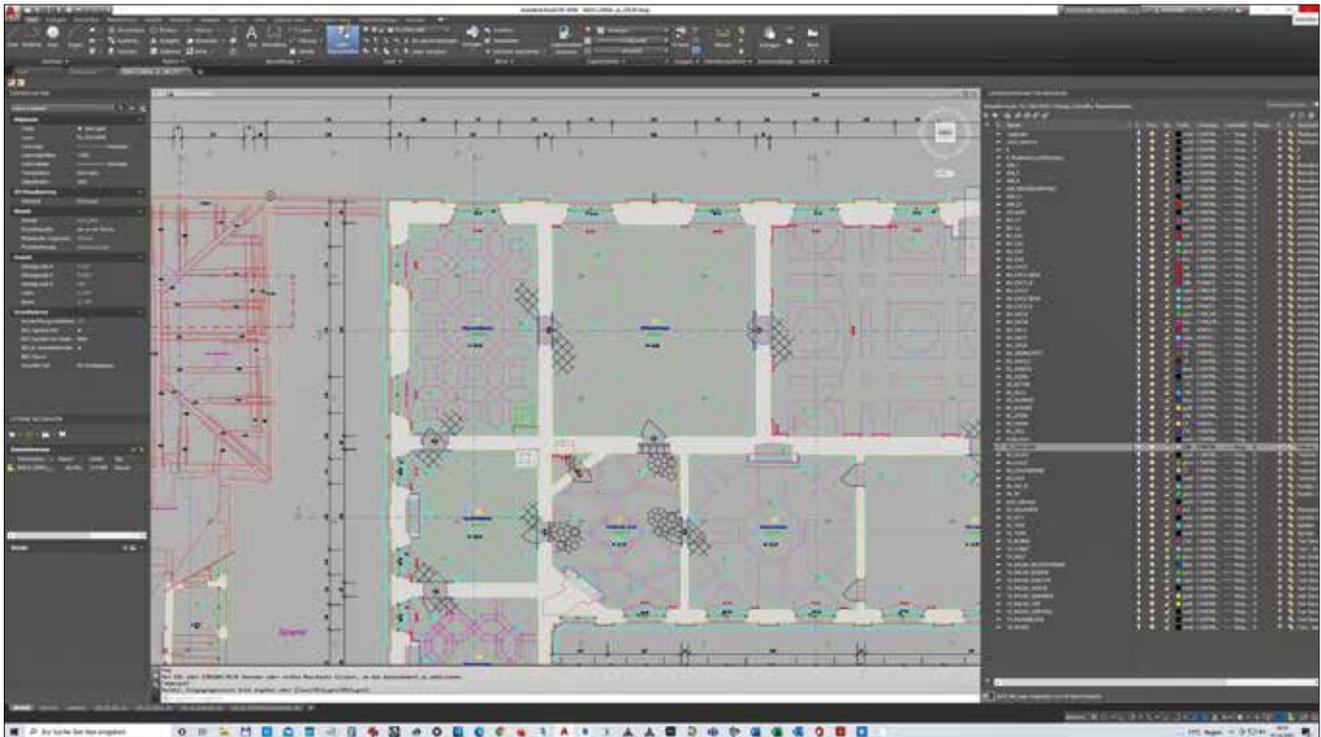


Abb. 2 Stadtresidenz Landshut. Verformungsgerechte CAD-Zeichnung, hier aus Punktwolken und Laserscans erstellt (Foto Bernhard Strackenbrock 2016/17)



Abb. 3 Stadtresidenz Landshut. Homogene 3D-Punktwolke zur Unterstützung der CAD Auswertung und als Grundlage zur Berechnung von Orthophotos (Foto Bernhard Strackenbrock)

## Vorgehensmodell

Um ein Denkmal mit Raumkunstwerken optimal zu erfassen, setzen wir das Multi-Scale-/Multi-Sensor-Vorgehensmodell ein.<sup>4</sup> Sollen dabei an Fassungen oder Malerei über einen gan-

zen Raum oder Raumfluchten Auflösungen unter 0,5 mm erreicht werden, ist zusätzlich ein Multi-Kamera-Einsatz erforderlich.<sup>5</sup> Mit einem Laserscanner wird zuerst ein Basismodell mit 2–3 mm Auflösung aufgenommen, bei gefassten Räumen natürlich in Farbe mit ausreichend Licht. Dieses Basismodell

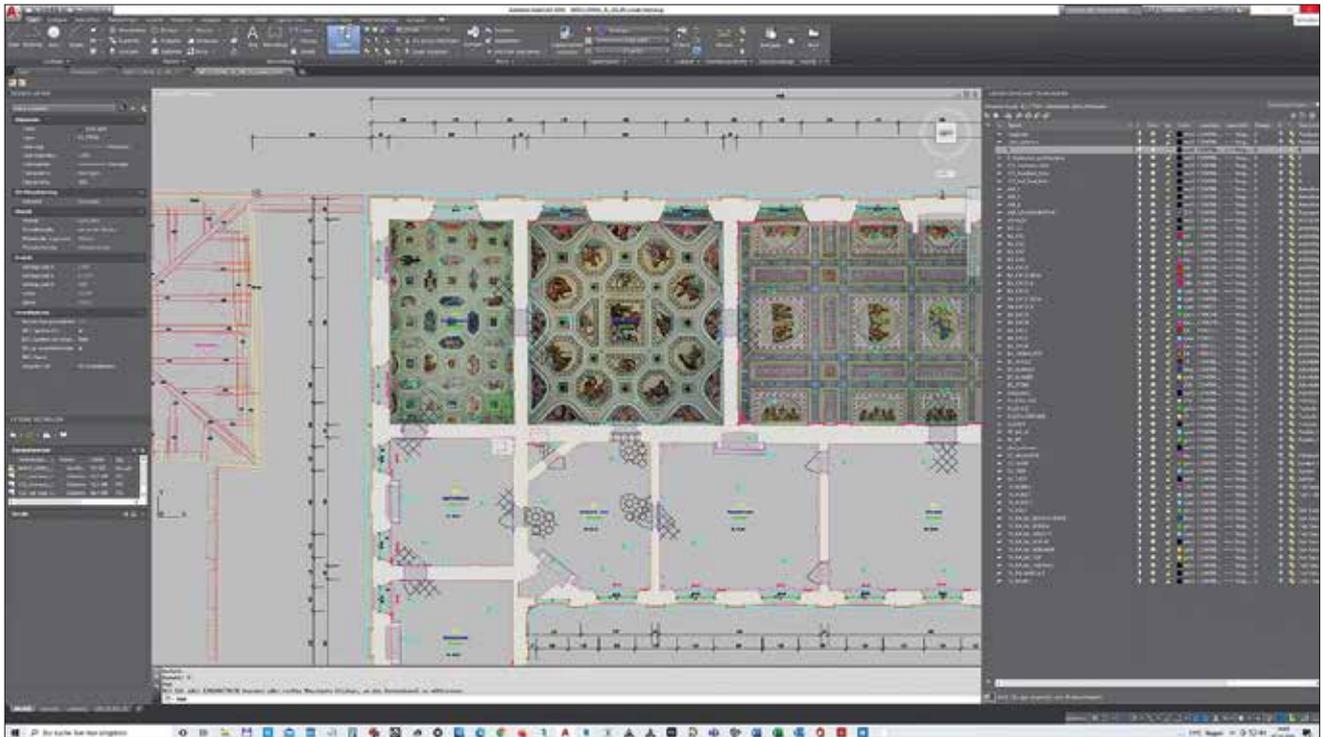


Abb. 4 Stadtresidenz Landshut. Die Kombination von verformungsgerechter Zeichnung und Orthophoto bietet dem Denkmalpfleger umfangreiche Informationen in hoher Dichte (Foto Bernhard Strackenbrock)

wird mit einer Weitwinkeldigitalkamera auf 0,5 mm verdichtet. Wenn erforderlich, kann eine zweite Verdichtungsstufe mit einer längeren Brennweite auf 0,1 mm erfolgen. Die Kameras können dabei aus der Hand geführt werden, oder man verwendet ein Einbeinstativ, das es heute bis zu 10 m Höhe gibt. In Ausnahmefällen bei stark spiegelnden Objekten ist allerdings erheblich mehr Aufwand erforderlich, da Kamera und Lichtaufbau durch ein Passepartout abgedeckt werden müssen. Damit können auch die Spiegelmalereien im Spiegelkabinett von Würzburg so fotografiert werden, dass sich das Aufnahmeequipment in den Ergebnissen nicht spiegelt.

Die für das Basismodell erforderlichen Laserscans sollten in farbig gefassten Räumen auch grundsätzlich in Farbe erfolgen. Die Laserscans werden in einem Gebäudekoordinatensystem orientiert. Bei einem Gebäudekoordinatensystem handelt es sich um ein für das Gebäude festgelegtes Koordinatensystem, entweder in UTM-Koordinaten oder in einem lokalen System mit Bezug auf die Gebäudehauptachse. Dieses Koordinatensystem wird mit einem Theodolit oder vergleichbaren Gerät hochgenau ausgemessen und mit einer ausreichenden Zahl von fest markierten Passpunkten im und am Gebäude dauerhaft verankert.

Sind die Laserscans orientiert, wozu meistens Software des entsprechenden Herstellers verwendet wird, ist es unerlässlich, jeden Scan für sich in ein gängiges Austauschformat aus der Software des Herstellers zu exportieren. Hier seien das E57- und das PTX-Format erwähnt. Die Qualität der Orientierung ist durch ein entsprechendes Protokoll nachzuweisen. Alle digitalen Messbilder müssen ebenfalls aus den RAW-Formaten der Hersteller in allgemein gültige Formate wie TIFF übertragen werden. Sollen die Bilder langfristig für fotogrammetrische Zwecke nutzbar sein, ist

bei dieser Übertragung, oft auch als digitale Entwicklung bezeichnet, einiges zu beachten. Um die Leistungsfähigkeit moderner Bildsensoren mit kleinem Pixel auszunutzen, sind ebenso leistungsfähige Objektive der Oberklasse erforderlich. In diesem Bereich gehen alle Hersteller den Weg, den physikalischen Objektivaufbau bestmöglich aber mit noch vertretbarem Aufwand zu optimieren, und die verbleibenden Restfehler wie Farbsäume u. ä. mathematisch zu kompensieren. Die Parameter dafür stammen entweder aus den Konstruktionsdaten der Objektive oder aus aufwendigen Laboruntersuchungen und werden in Listen für die RAW-Bildverarbeitung abgelegt. Das RAW-Bild, die Parameterliste für die Objektivverbesserung und das entsprechende Programm gehören somit zusammen, um ein optimales Ergebnis zu bekommen. Leider ist die Parameterliste oft nicht ohne weiteres einsehbar oder separat speicherbar. Wir bringen daher in einem ersten Schritt diese Objektivverbesserungen immer an den RAW-Daten an und speichern alle Bilder im gängigen TIFF-Format, um die langfristige Nutzung zu sichern. Weitere Filter auf Bilder können dann auch im fotogrammetrischen Prozess erfolgen.

Alle Scans und Messbilder werden einer abschließenden Bündelausgleichung unterzogen. Damit wird ein mathematischer Prozess beschrieben, der für alle Aufnahmen die endgültige Lage (äußere Orientierung) im Gebäudekoordinatensystem durch Minimierung der Restfehler berechnet und für jede Messbildaufnahme auch die Parameter der inneren Orientierung bestimmt. Für diesen Arbeitsschritt stehen mittlerweile mehrere Programme zu Verfügung. Bei den hier zu betrachtenden Auflösungen von 0,5 mm und kleiner muss man jedoch beachten, dass die Festpunkte in einem Gebäude nicht mit dieser kleinen Auflösung gemessen wer-



Abb. 5 Stadtresidenz Landshut. Modelle für Virtual Reality (VR) können oft auf den ersten Blick beeindruckend sein. Die hinterlegte Geometrie ist aber meist auf unter 1% der ursprünglichen Informationen ausgedünnt und auch für die Textur werden nur wenige Prozent der Originalauflösung verwendet (Foto Bernhard Strackenbrock)

den können. Um unterschiedlich genaue Beobachtungen in ein hochgenaues Ergebnis zu überführen, bedarf es guter Kenntnisse der Ausgleichsmathematik, um keine Modellverbiegungen zu erzeugen. Modellverbiegungen wird man meist auch erst dann bemerken, wenn man später Veränderungen an einem Objekt nachweisen möchte und dabei nicht nur die Fehler der ersten Messung detektieren will.

Laserscans, Messbilder und Orientierungsdaten für jedes Bild und jeden Laserscan können dann in einem Messbildarchiv abgelegt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass nur öffentlich definierte Datenarten genutzt werden. Da man auf das Messbildarchiv nach der ersten Auswertung nur selten zugreifen wird, müssen die Daten nicht online zugänglich sein; sie können auch in einem „kalten“ Archiv offline auf Festplatten abgelegt werden. Dieses Messbildarchiv wäre zuletzt an den Denkmalseigentümer zu übergeben, wobei natürlich auch eine Rechteübertragung erfolgen müsste.

Ein digitales Archiv bedarf immer der Pflege. Die langfristige Pflege digitaler Daten ist in entsprechenden Archiven oder Rechenzentren mittlerweile Standard. Natürlich kann man auch einen der großen kommerziellen Cloud-Anbieter wie Microsoft, Google und Co. damit beauftragen, was meist preiswerter ist als eine eigene Insellösung. Zudem speichern diese Anbieter ihre Daten auch mehrmals in weltweit verteilten Rechenzentren.

## Virtueller Zwilling

Der Begriff des Virtuellen Zwillings wird sehr weitläufig verwendet. Hier soll er aber nur eingeschränkt auf den Vir-

tuellen Zwilling der Geometrie und der farblichen Fassung eines Denkmals verstanden werden. Das Denkmal wird dabei nicht als 2D- oder 3D-Funktionsmodell wie beim Building Information Modelling (BIM) betrachtet, da meist über den wirklichen Aufbau von Decken, Wänden etc. nur punkthafte oder keine gesicherten Informationen vorliegen und verformte Bauelemente in BIM-Klassen nicht zufriedenstellend abgebildet werden können – ganz zu schweigen von farbigen Fassungen oder architekturgebundener Kunst. Der digitale Zwilling der Geometrie soll für alle Aufgaben der Erforschung, Erhaltung und Präsentation des Denkmals herangezogen werden können.

Im bekannten analogen oder halb digitalen Vorgehen wird die Geometrie eines Denkmals anhand einer Sammlung von hinreichend dichten verformungsgerechten Plänen und Orthophotos beschrieben, die aus dem Messbildarchiv von einem Operator durch fotogrammetrische oder Laserscan-Auswertung erstellt wurden. Im digitalen Raum werden zunächst verformungsgerechte Pläne als CAD-Zeichnungen aus den Laserscans des Messbildarchivs durch manuelle Auswertung erzeugt. Der gesamte Inhalt des Messbildarchivs wird dann in eine hochdichte 3D-Punktwolke umgerechnet. Diese 3D-Punktwolke hat dieselbe Auflösung wie 2D-Orthophotos, wobei unterschiedliche Bereiche eines Denkmals auch unterschiedlich berechnet werden können, ohne dass dafür manuelle Eingriffe nötig sind. Aus der Punktwolke können wieder beliebige Orthophotos, Höhenlinien oder weitere Pläne abgeleitet werden. Die Punktwolke kann durch Annotationen mit weiteren Informationen angereichert werden. Da 3D-Punktwolken im Bereich der Geoinformationssysteme (GIS) schon lange eingesetzt werden, stehen

zahlreiche Methoden zur statistischen oder KI-Analyse von Punktwolken zur Verfügung. Dazu kommen leistungsfähige Internetplattformen, um 3D-Punktwolken einer hohen Zahl von berechtigten Nutzern ohne spezielle Software per Internetbrowser zugänglich zu machen. 3D-Punktwolken wenden sich an professionelle Nutzer wie das Team einer Bau- oder Restaurierungskampagne. Für das breite Publikum kann aus der Punktwolke und dem Messbildarchiv durch Vereinfachung ein 3D-Maschenmodell abgeleitet werden, das für VR-Zwecke geeignet ist.<sup>6</sup> Ein solches VR-Modell enthält aber nur wenige Prozent der ursprünglichen Informationen.

## Abstract

Innovative documentation techniques are discussed in this article with a focus on the three-dimensional surveying of buildings and their immediate surroundings as well as with regard to architecture-related art. The focus is not so much on technical details, which in matters of surveying and photogrammetry require not only special competence but also

a great deal of experience. Instead, the aim is to use a virtual representation of a monument to provide information on (image) resolutions, requirements and approaches to a "three-dimensional" survey. In doing so, the difference between surveying the monument, now often referred to as "scanning", and creating plans and orthophotos of the monument that are correct for deformation will be worked out. Practical work on monuments is still done almost exclusively with two-dimensional plans and orthophotos, so these documents should not be neglected. Since about 1860, the basis of innovative documentation techniques in monument preservation has been photogrammetry, or more understandably described in the 19th century as Messbildkunst (art of measured images). In essence, this involves measuring objects not directly, but indirectly from images of these objects. The images can be analogue or digital photographs, i.e. images with a central perspective that are created in one swoop by means of an exposure, but also scanning images, in this case first of all laser scans, in which a laser beam scans its surroundings point by point. Laser scanning is thus a sub-item in photogrammetry. Of course, all types of images can also be mixed in one project.

---

<sup>1</sup> ALBERTZ 2001.

<sup>2</sup> Siehe BRUNNER/STRACKENBROCK/WIESNETH 2019.

<sup>3</sup> Siehe ECKSTEIN 2003.

<sup>4</sup> STRACKENBROCK/HIRZINGER/WOHLFEIL 2016.

<sup>5</sup> STRACKENBROCK/TSUCHIYA 2020.

<sup>6</sup> HIRZINGER/STRACKENBROCK 2019.



Abb. 6 Fotogrammetrische Probeaufnahmen im Spiegelkabinett der Würzburger Residenz (Foto Bernhard Strackenbrock)