

Im Dschungel der Aufmaßprodukte. Ergebnisformen der Bauvermessung gezielt auswählen, ausschreiben und nutzen¹

Aufmaßprodukte und Ausschreibung

Sollen an einem Gebäude Veränderungsmaßnahmen und / oder bauliche Eingriffe durchgeführt werden, wird im Vorfeld in der Regel eine Bestandsdokumentation notwendig sein. Innerhalb dieser nimmt meist das Bauaufmaß eine bedeutende Rolle ein, denn es ermöglicht eine mit überschaubarem Aufwand erstellte Gesamterfassung eines Bauwerkes, auf deren Grundlage weitergehende, aber eben nur punktuell einzusetzende und auch nicht mehr zerstörungsfreie Untersuchungsverfahren wie etwa restauratorische Befundung, Materialanalysen, Dendrochronologie oder Archäologie angewendet werden können. Ferner liefert es ganz unmittelbar die Grundlagen für Planungsprozesse, d.h. den praktischen Umgang mit einem Denkmal, wohingegen die beiden anderen Säulen der wissenschaftlichen Baudokumentation, die Baubeschreibung und die Photodokumentation – oft in der Form eines sog. Raumbuches, von Planern bedauerlicherweise meist als weniger wichtig angesehen und somit seltener angefordert werden.²

Immer dann, wenn ein Aufmaß angefertigt werden soll, muss – so ist es in der Praxis unvermeidlich – ein Kompromiss zwischen einerseits Aufwand, d.h. eingesetzten Geldmitteln, und der Aussagekraft sowie dem Dokumentationswert der Aufmaßergebnisse andererseits gefunden werden. Diesen Kompromiss für alle Beteiligten verständlich und eindeutig zu formulieren, ist Aufgabe der Ausschreibung des Aufmaßes.³ Für dessen Vorbereitung gibt es zwei grundsätzliche Möglichkeiten:

1. Man macht sich die Mühe, eine detaillierte Beschreibung aller Aufgaben, Arbeitsschritte und Ergebnisformen des betreffenden Aufmaßprojektes anzufertigen und lässt bisweilen sogar Musterbauteile von potenziellen Auftragnehmern bearbeiten. Diese Vorgehensweise erzeugt bei allen Beteiligten größtmögliche Klarheit über Aufwand und Ergebnis des Projektes und ermöglicht auch eine durchgreifende Abschlusskontrolle der erbrachten Leistungen. Allerdings ist sie in der Praxis nur selten durchführbar, weil man außer Zeit auf Seiten des Ausschreibenden u. U. auch zusätzliche, nicht in jedem Architekturbüro oder Bauamt vorhandene fachliche Expertise benötigt.

Den Umfang des nötigen Expertenwissens verdeutlicht die von Hermann Fuchsberger vorgetragene Empfehlung, für diese Arbeiten einen eigenen Fachmann hinzuzuziehen, der darüber hinaus explizit von allen Firmen unabhängig sein sollte, die nach Abschluss der Baudokumentation für das Erbringen von Planungsleistungen am betreffenden Objekt vorgesehen sind.⁴

2. Einfacher und damit in der praktischen Denkmalpflege oft unumgänglich ist es, aus einem überschaubaren Katalog von Qualitätsstufen auswählen zu können. Ein solcher Katalog wurde bereits 1986 von Johannes Gromer in den von Günter Eckstein herausgegebenen „Empfehlungen für Baudokumentationen“ aufgestellt. Die darin etwas irreführend als „Genauigkeitsstufen“ bezeichneten Qualitätsstufen waren zu ihrer Zeit richtungsweisend, so dass sie – obwohl sie nie in Normen überführt wurden und somit auch keinen rechtlichen Status erhalten haben – als Quasi-Norm bis heute vielfach verwendet werden. Seit damals hat sich die Welt des Bauaufmaßes jedoch durch die Einführung neuer Mess- und Darstellungsverfahren stark verändert, so dass Ausschreibungen nur nach dem System der Gromerschen „Genauigkeitsstufen“ mittlerweile weder bei Ausschreibenden noch bei Dienstleistern die für ein erfolgreiches Projekt nötige Klarheit schaffen können. Die Gründe dafür sind bereits dargelegt worden,⁵ und – zumindest in Österreich – hat man seit 2015 mit der Verabschiedung der ÖNORM A6250-2 „Aufnahme und Dokumentation von Bauwerken und Außenanlagen Teil 2: Bestands- und Bauaufnahme von denkmalgeschützten Objekten“ eine zeitgemäße Orientierungshilfe zur Hand, die durch die am 28.01.2016 publizierten „Richtlinien für Bauhistorische Untersuchungen“ des österreichischen Bundesdenkmalamtes ergänzt werden.⁶ Die Zukunft wird zeigen, inwieweit diese den aktuellen Möglichkeiten und Bedingungen des Bauaufmaßes angepassten Normierungen auch in Deutschland Anwendung finden, und es steht zu hoffen, dass diese Standards helfen, Baudokumentationen nicht nur formal vergleichbar zu machen, sondern Auftraggebern vor allem auch deutlich zu machen, wie sich bezüglich der Inhalte von Bauaufmaßen die Spreu vom Weizen trennen lässt.

Trotz der dadurch vorliegenden Orientierungshilfen verbleibt beim Ausschreibenden immer noch die

Aufgabe, die zu erzielenden Qualitäten eines jeden Aufmaßprojektes zu definieren bzw. aus einem Katalog vorformulierter Qualitätsstufen auszuwählen: Das Ergebnis soll einerseits zuverlässig sein – und damit ist ausdrücklich nicht nur die geometrische d.h. messtechnische Zuverlässigkeit sondern auch die der inhaltlichen Aussage gemeint – und gleichzeitig soll es diese Zuverlässigkeit liefern, ohne unnötige Kosten zu verursachen. Die Frage lautet also: Welche Aufmaßprodukte liefern die gewünschten Informationen am zuverlässigsten und am kostengünstigsten? Angesichts der vielen unterschiedlichen heute zur Verfügung stehenden messtechnischen Verfahren, mit denen Aufmaßprodukte erstellt werden können, sollte man sich tatsächlich vor allem diese Frage stellen und nicht mehr den messtechnischen Werdegang eines Aufmaßproduktes in den Vordergrund stellen. Denn kaum einem Aufmaßprodukt ist heute noch anzusehen, wie es entstanden ist. Eine digitale 2D-Strichzeichnung beispielsweise offenbart nicht, welche Teile von ihr auf tachymetrischen oder photogrammetrischen Messungen basieren, wo vielleicht mit Satellitenvermessung gearbeitet wurde, an welchen Stellen u.U. die Auswertung einer 3D-Punktwolke eingeflochten wurde und wo mit Hilfe händischer Messungen Details geklärt wurden. Diesen Werdegang in Ausschreibungen zu fixieren, ist wenig sinnvoll, denn jeder Dienstleister wird die ihm zu Gebote stehenden Messtechniken ohnehin stets so kombinieren, dass ein für ihn, d.h. je nach Anbieter auch durchaus unterschiedlicher, effektiver Arbeitsablauf herauskommt.⁷ Durch die permanent ablaufende technische Weiterentwicklung wird jeder Dienstleister die Schritte der Datenerfassung und -verarbeitung zudem häufiger modifizieren, um seine Marktfähigkeit zu erhalten. Diese Entwicklungen im Detail zu verfolgen, ist für Auftraggeber nicht zu leisten und daher nicht sinnvoll; aufhorchen sollte man erst wieder, wenn eine neue Technik auch ein neues Produkt hervorbringt. Dennoch ist es auch für den Auftraggeber hilfreich, zumindest einen Einblick in die den angeforderten Aufmaßprodukten zugrundeliegenden Techniken zu haben, denn nur dann ist die Qualitätskontrolle des Ergebnisses möglich, die eine Pflicht ist, der sich ein Auftraggeber auch bei der detailliertesten Ausschreibung nicht entziehen kann.

Kategorien von Aufmaßprodukten

Im Folgenden wird versucht, die derzeit verfügbaren Aufmaßprodukte durch Einteilung in drei Kategorien in eine sinnvolle Ordnung zu bringen sowie deren Möglichkeiten und Grenzen aufzuzeigen, um Auftrag-

gebern eine gezielte Auswahl zu erleichtern. Bewusst erfolgt keine Gliederung nach zugrundeliegenden Messverfahren, die in Handbüchern und Handreichungen bereits übersichtlich dargestellt sind.⁸

1. Nicht interpretierende Produkte

Nicht interpretierend sind alle Punktwolken, und unter diesen verstehe ich aus systematischen Gründen nicht nur 3D-Punktwolken, sondern auch 2D-Punktwolken. Letztere können entweder als Orthophotos oder als entzerrte Bilder vorliegen. Allen Punktwolken liegt stets eine automatisierte Herstellung in dem Sinne zugrunde, dass der Hersteller zwar die Einhaltung der messtechnisch erforderlichen Genauigkeit sowie die möglichst objektive und vollständige Abbildung des Aufgemessenen beachten, sich aber um den Inhalt des Dargestellten keine Gedanken machen muss. Die Attraktivität dieser Produkte ergibt sich aus der zu ihrer Herstellung „lediglich“ nötigen technischen, aber nicht auch inhaltlichen Expertise sowie dem hohen Grad der Automatisierung, beides wirkt sich kostendämpfend aus. Jedem Auftraggeber sollte allerdings klar sein, dass bei einem solchen Produkt der Auftragnehmer zwar nur wenig falsch machen kann, im Sinne eines erkenntnisorientierten, inhaltlich genauen und aussagekräftigen Aufmaßes kann er aber auch nichts richtig machen.⁹

Eng verwandt mit den 3D-Punktwolken sind ferner die Oberflächenmodelle, die weitestgehend automatisiert aus den Punktwolken berechnet werden können.

2. Interpretierende Produkte

Interpretierend sind die allbekanntesten 2D-Strichzeichnungen, die entweder händisch oder digital erstellt werden können. Deren Stärken sind in der Literatur bereits ausreichend gewürdigt, so dass hier wenige Bemerkungen genügen:¹⁰ Die während des Zeichenprozesses permanent ablaufenden Vorgänge des Betonens und Weglassens, des Zusammenführens bruchstückhafter Informationen, des Sichtbarmachens von Unsichtbarem, mithin also des Interpretierens macht die für die Bauforschung und damit auch für die Denkmalpflege so wichtige Qualität dieser Produkte aus. Diese Stärke kehrt sich allerdings bei Einsatz eines unerfahrenen Interpreten in eine gravierende Schwäche um. Ein Auftragnehmer kann bei Strichzeichnungen entweder vieles richtig oder vieles falsch machen. Für ihre Erstellung ist technische und inhaltliche Expertise gleichermaßen notwendig, aber auch Zeit, denn automatisierbar ist beim Interpretieren wenig. Beides wirkt sich auf die Kosten aus.

Zu den interpretierenden Produkten gehören auch 3D-Volumenmodelle, die durch Modellierung im

Computer auf Basis verschiedenster Messdaten entstehen.¹¹ Sie sind allerdings nie ein direktes Produkt des Bauaufmaßes, sondern stets nur ein abgeleitetes. Zu Ihrer Erstellung ist daher – in der Regel erheblicher – Mehraufwand vonnöten, und in ihnen sind zudem die primären Beobachtungs- und Messdaten nicht mehr sichtbar. Bei Bauwerken, die ausschließlich aus standardisierten und mit hoher Wiederholgenauigkeit gefertigten Bauteilen bestehen, mag dies zu verschmerzen sein, weshalb Modellierungen z.B. von Industrieanlagen eine durchaus sinnvolle Darstellungsform sein können. Bei allen anderen Bauwerken jedoch, also dem Normalfall in der Denkmalpflege, erzwingt die Volumenmodellierung stets eine Generalisierung und Vereinfachung der originalen Daten. 3D-Volumenmodelle als direkte und einzige Ergebnisse von Baudokumentationen für Forschungs- und Planungszwecke anzufordern, wäre also grob fahrlässig, sie werden daher im Folgenden nicht behandelt. Unberührt bleibt davon die hervorragende Eignung von 3D-Volumenmodellen als ein Forschungs- und Präsentationsinstrument der historischen Bauforschung, mit dessen Hilfe Erkenntnisse zunächst gewonnen und anschließend für Publikationen, Ausstellungen, aber auch Entscheidungsfindungen visualisiert werden.¹² Gerade die zuletzt genannte Einbindung solcher Modelle in laufende Sanierungsprojekte kann dazu führen, bauforscherische Erkenntnisse für alle Projektpartner verständlich zu machen und somit deren Relevanz für die Sanierungsplanung aufzuzeigen.¹³

3. Hybridprodukte

Eine Vereinigung von Vorteilen und die Eliminierung von Nachteilen der beiden genannten Produktgruppen versprechen schließlich die sogenannten Hybridprodukte, die in der Regel aus der Kombination einer digitalen 2D-Strichzeichnung mit anderen Produkten bestehen. Sie wurden erst mit der Einführung von CAD-Systemen möglich und werden daher in Zukunft steigende Bedeutung erfahren.

3D-Punktwolke

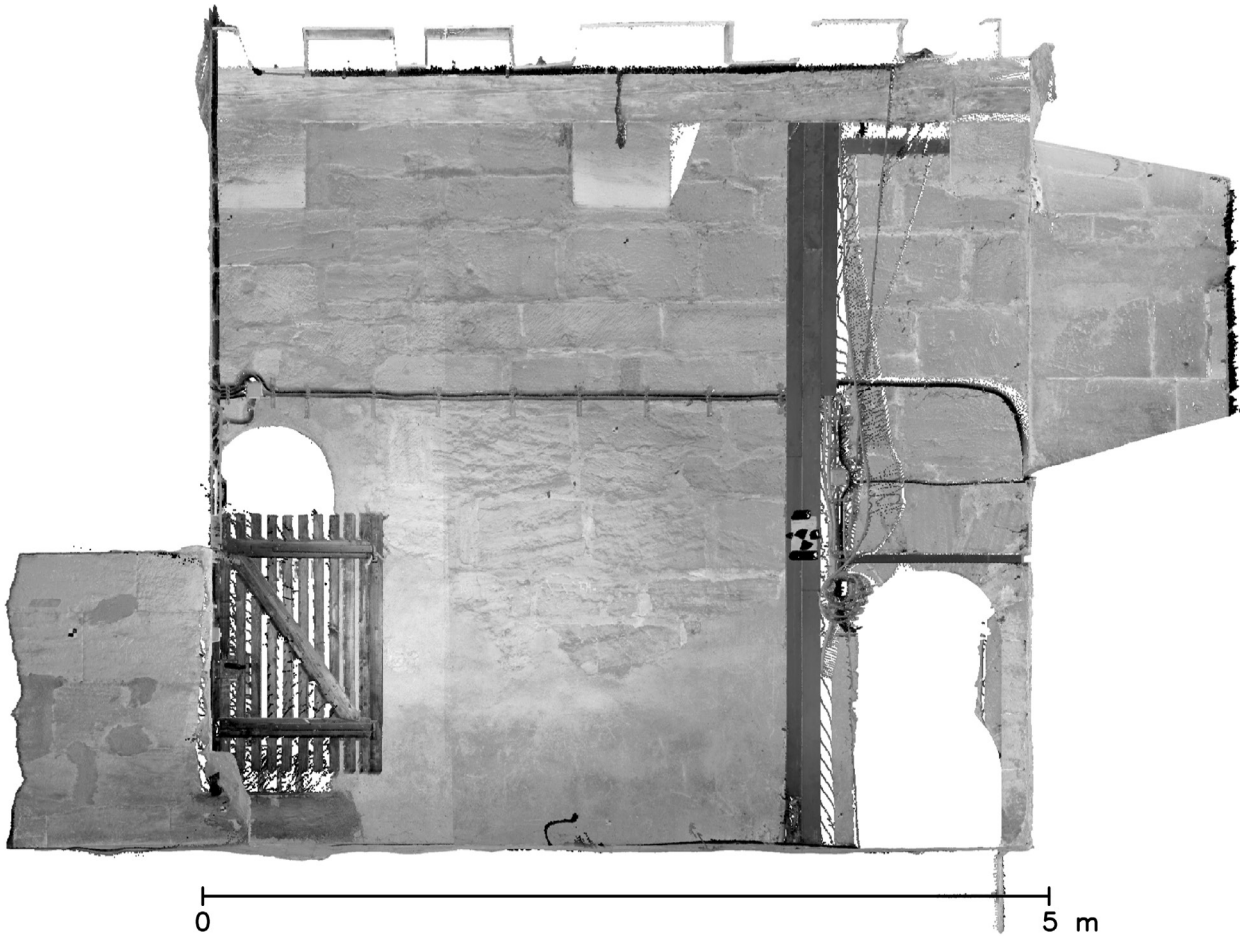
Die nähere Betrachtung der Aufmaßprodukte sei mit der 3D-Punktwolke begonnen. Diese kann heutzutage entweder durch terrestrisches Laserscanning oder – bei geeigneten Objekten – durch automatisierte Mehrbildphotogrammetrie, besser unter dem Begriff „Structure from Motion“ (SfM) bekannt, erzeugt werden.¹⁴

Die am häufigsten genannte Stärke von 3D-Punktwolken ist sicherlich die, dass man sich nach vergleichsweise kurzem Aufenthalt am Objekt ein Modell

desselben in den Computer holt, in dem Maße an allen Stellen abgenommen werden können, die die Punktwolke abdeckt. Die gewaltige – und im Zuge der technischen Entwicklung stetig wachsende – Menge erfasster Daten in Relation zum Zeitaufwand macht diese Eigenschaft überall dort sehr wichtig, wo kulturelles Erbe unmittelbaren Bedrohungen oder sogar jederzeit möglichen Zerstörungen ausgesetzt ist. Solche deprimierenden Szenarien sind dabei nicht nur auf die zahlreichen internationalen Krisenherde beschränkt, sondern werden auch hierzulande beispielsweise durch den Zeitdruck bei Abbruchdokumentationen künstlich aufgebaut. In solchen Szenarien erfüllt die 3D-Punktwolke das Dokumentationsziel „besser als gar nichts“ sehr gut.

Was bedeutet aber die Möglichkeit, „Maße an beliebigen Stellen abzugreifen“, in der Praxis? Sie bedeutet, dass der Ort der Entscheidung über die Relevanz wichtiger und unwichtiger Maße, über relevante und irrelevante Punkte sowie schließlich über die Lokalisierung von Bauteilabgrenzungen vom Bauwerk an den Computerarbeitsplatz verlagert wird. Im Falle abgegangener Objekte ist diese Reihenfolge des Arbeitsprozesses unvermeidlich, doch im Falle noch vorhandener Objekte – und dies gilt ausdrücklich auch für während einer laufenden archäologischen Ausgrabung gemachte Befunde – bedeutet diese Verlagerung die Aufgabe des in der historischen Bauforschung so fruchtbaren und dadurch unentbehrlichen Vor-Ort-Prinzips zugunsten von Methoden der „Fernerkundung“.¹⁵

Der Nutzer einer Punktwolke, also derjenige, der sie in Auftrag gegeben hat, muss sich also sicher sein, Bauteile und ihre Abgrenzungen in der Wolke genauso sicher ansprechen zu können wie am realen Objekt; nur dann kann er eine Punktwolke guten Gewissens nutzen. Dass man dieses gute Gewissen bei allen an einem Gebäude auftretenden Bauteilarten haben könnte, wäre allerdings ein äußerst riskanter Optimismus, wie die Erfahrungen des Verfassers und zahllose andere Beispiele zeigen. Ein beliebig herausgegriffenes Beispiel ist in Abb. 1 dargestellt: Der Steinschnitt der Quaderwand ist in deren oberem Bereich klar erkennbar, im mittleren Bereich etwas schwieriger und im unteren Bereich überhaupt nicht. Der auf den Steinkonsolen aufliegende Streichbalken ist klar erkennbar, sein vorhandenes oder nicht vorhandenes Eingreifen in die Wand jedoch nicht. Das hölzerne Gatter vor dem linken Durchgang ist klar erkennbar, die Begrenzungen des dahinter liegenden Durchganges und der darin liegenden Treppe nicht. Schon dieses Beispiel zeigt, wie stark der Grad der Erkennbarkeit relevanter Informationen von Bauteil zu Bauteil schwanken kann. Soll also ausschließlich eine Punktwolke genutzt wer-



1 Bamberg, Dom, Turm Südost, 2. OG. Schnitt West-Ost der 3D-Punktwolke von innen. Maximaler Punktabstand ca. 2 mm.

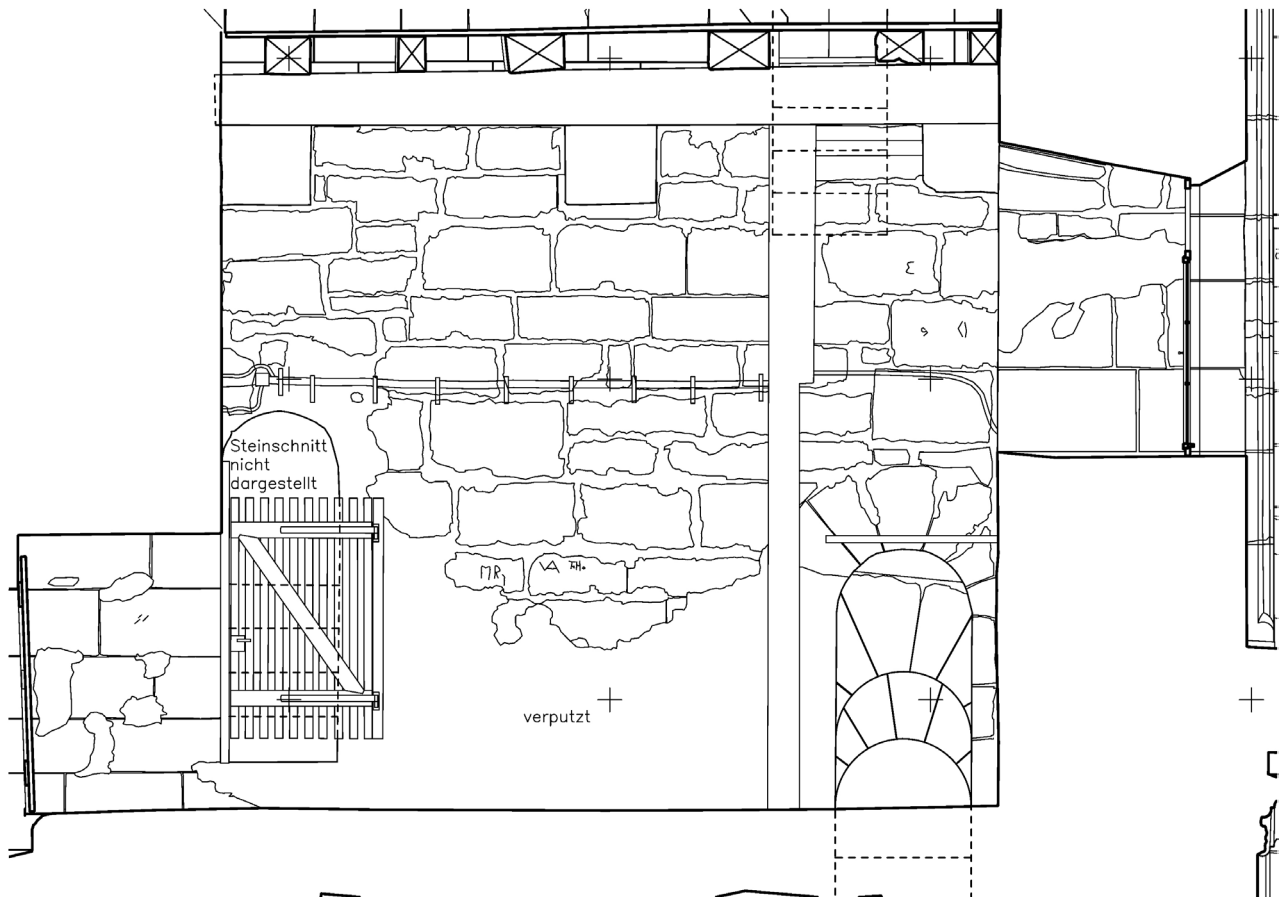
den, muss man dafür Bauteilklassen auswählen, die sich für eine durchgehende „Fernerkundung“ auch eignen, man denke beispielsweise an eine unverputzte Backsteinwand mit hellem Fugenmörtel.

Ob man Objekte in einer Punktwolke erkennen und somit auch daraus abgreifen kann, ist zunächst von deren Auflösung, d.h. vom Abstand der darin erfassten Punkte abhängig – und dies gilt für 3D- und 2D-Punktwolken gleichermaßen. Der Punktabstand ist damit ein wichtiges Qualitätskriterium sowohl einer 3D-Punktwolke wie auch eines Photos, den ein Auftraggeber festlegen sollte.

Wie der Punktabstand festzulegen ist, wird allerdings durchaus unterschiedlich berechnet. Die Autoren des „English Heritage Metric Survey Team“ empfehlen die aus der Praxis abgeleitete Faustformel, den Punktabstand höchstens so groß zu wählen wie die halbe Größe des kleinsten noch als identifizierbar gewünschten Objektes.¹⁶ Wenn also eine Fuge von 5 mm Breite noch erkennbar sein soll, darf der Punktabstand nach dieser Regel 2,5 mm nicht übersteigen. Andreas Brusckke kommt, ausgehend von der Identi-

fizierbarkeit von Objekten auf mit 300 dpi ausgedruckten Photos, bei derselben Fragestellung zu der etwas kleineren Größe von 1,7 mm.¹⁷ Abermals leicht erhöhte Anforderungen legen Gunnar Siedler und Sebastian Vetter zugrunde, wenn sie für einen qualitätvollen Ausdruck 400 dpi als Richtwert empfehlen, aus dem sich ein Punktabstand von 1,3 mm ergibt.¹⁸ David Barber und Jon Mills schließlich wenden auf dasselbe Problem statistische Regeln an.¹⁹ Nach ihren Berechnungen darf der Messpunktabstand nicht größer als 1,7 mm sein, wenn ein Objekt von 5 mm Ausdehnung mit einer Sicherheit von 66% ($\pm 1\sigma$ -Wahrscheinlichkeit) erkannt werden soll. Trotz verschiedener Ansätze der genannten Autoren ergibt sich also ein Punktabstand von rd. 1,7 mm, der mindestens nötig ist, um Objekte im 5 mm-Bereich noch sicher zu erkennen.²⁰ Die daraus resultierende Faustregel von 1–2 mm hat sich in der Praxis der genannten Autoren bewährt und deckt sich auch mit den Erfahrungen des Verfassers.

Will man allerdings nach Barber und Mills eine Sicherheit von 95% bei der Objektidentifizierung erreichen ($\pm 2\sigma$ -Wahrscheinlichkeit), reduziert sich



2 Bamberg, Dom, Turm Südost, 2. OG. Schnitt West-Ost wie in Abb. 1, jedoch als digitale 2D-Strichzeichnung. Rasterkreuzweite 2 m.

der notwendige Punktabstand auf lediglich 0,25 mm. Angesichts der hohen Übereinstimmung aber, mit der die anderen genannten Autoren trotz unterschiedlicher Ansätze die deutlich geringere Auflösung von rd. 1,7 mm als praxistauglich erkannt haben, ist das Erreichen einer derartig hohen Auflösung für Objekte im 5 mm-Bereich als nicht notwendig einzustufen. Ausgehend von der hier angestellten Beispielrechnung lassen sich nun leicht die notwendigen Punktabstände bestimmen, wenn die Aufgabenstellung das Erkennen nur oder sogar von Objekten erfordert, die größer oder kleiner als 5 mm sind.²¹

Alle Berechnungen zum Punktabstand gelten natürlich nur in idealen, d.h. völlig gleichmäßigen Rastern. Reale Punktwolken haben jedoch, bedingt durch die Aufnahmetechnik und das Objekt, variierende Punktabstände, daher spricht man gerne vom sog. mittleren Punktabstand einer Punktwolke. Für den Auftraggeber sicherer ist es jedoch, nicht nach einem mittleren, sondern nach einem maximal zulässigen Punktabstand zu verlangen. Auf diesen empfiehlt es sich gerade bei mit Laserscannern erstellten Punktwolken ggf. durch

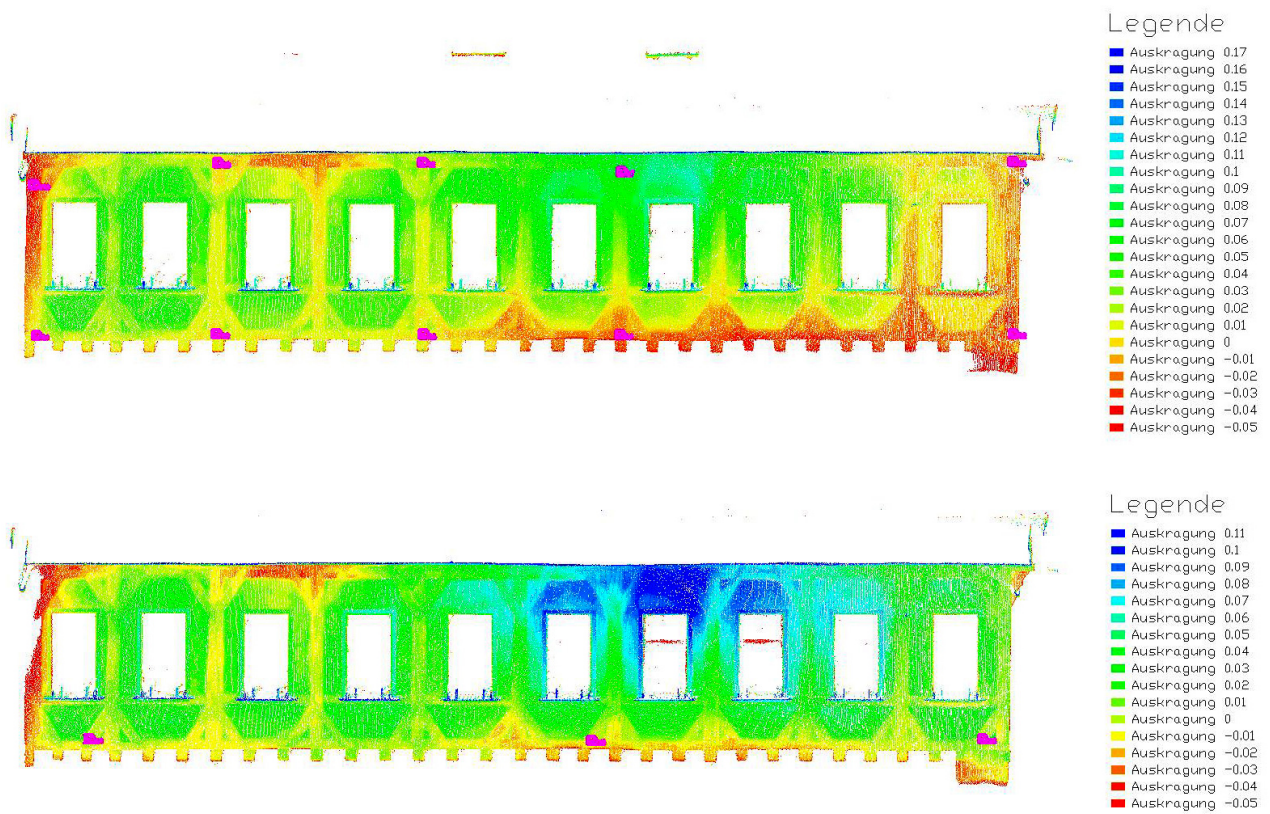
musterhafte Erfassungen oder eingereichte Projektbeispiele des Anbieters besonders zu achten, denn systembedingt wird das Abtastraster aufgeweitet, je weiter ein Punkt von der zwischen Scannerstandort und Objekt gedachten kürzesten Verbindungslinie entfernt liegt.²² Es ist also beispielsweise sinnvoll, sich den mittleren Punktabstand an der Turmspitze und nicht an dessen Sockel, vor dem der Laserscanner direkt aufgestellt werden kann, vorführen zu lassen. Bei mit der SfM-Technik erstellten Punktwolken ist dieser Nachteil systembedingt weniger stark ausgeprägt.

Es kann also festgehalten werden, dass 3D- und 2D-Punktwolken zur „Fernerkundung“ unter der Voraussetzung taugen, dass die zu identifizierenden Strukturen und Befunde gut sichtbar sind und mit der für ihre Größe erforderlichen Auflösung erfasst wurden. Bereits oben war allerdings vor allzu großem Optimismus gewarnt worden, zu glauben, diese uneingeschränkte Sichtbarkeit sei beim größten Teil von Gebäudebauteilen gegeben (vgl. Abb. 1).

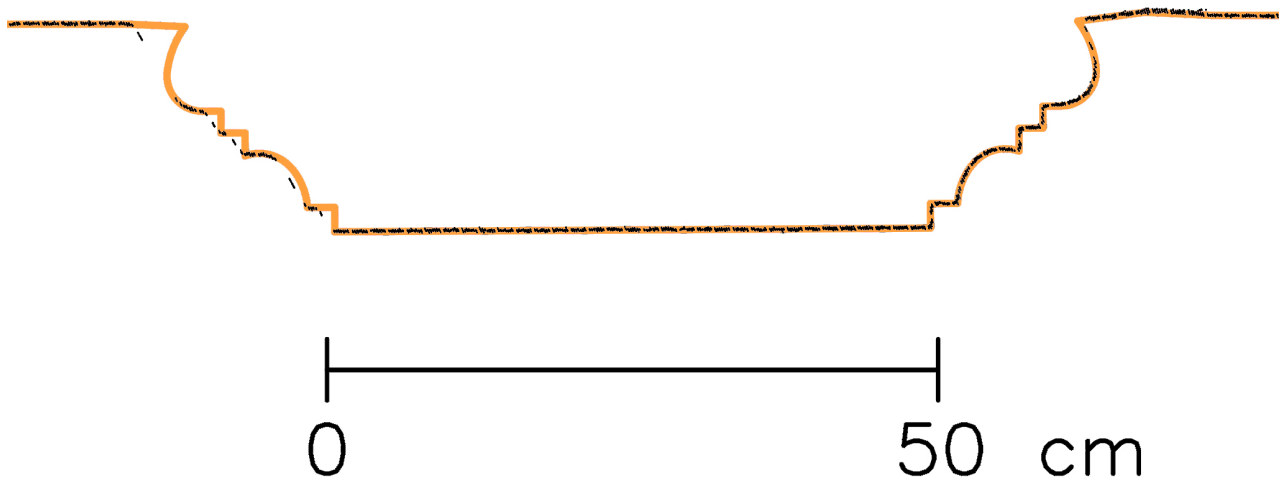
Kommen wir aber noch zu einem weiteren, in diesem Fall nur der 3D-Punktwolke zugeschriebenen Vorteil: Gerne wird sie mit dem Argument beworben, in



3 Bamberg, Dom, Turm Südost. Isometrische Darstellung der 3D-Punktwolke des EG von Südosten. Die Punktwolken der äußeren und inneren Oberflächen sind gleichzeitig dargestellt.



4 Forchheim, Rathaus, Hauptbau, Ostfassade. 3D-Punktwolke des Obergeschosses eingefärbt als Deformationsanalyse mit zwei unterschiedlichen Bezugsebenen.



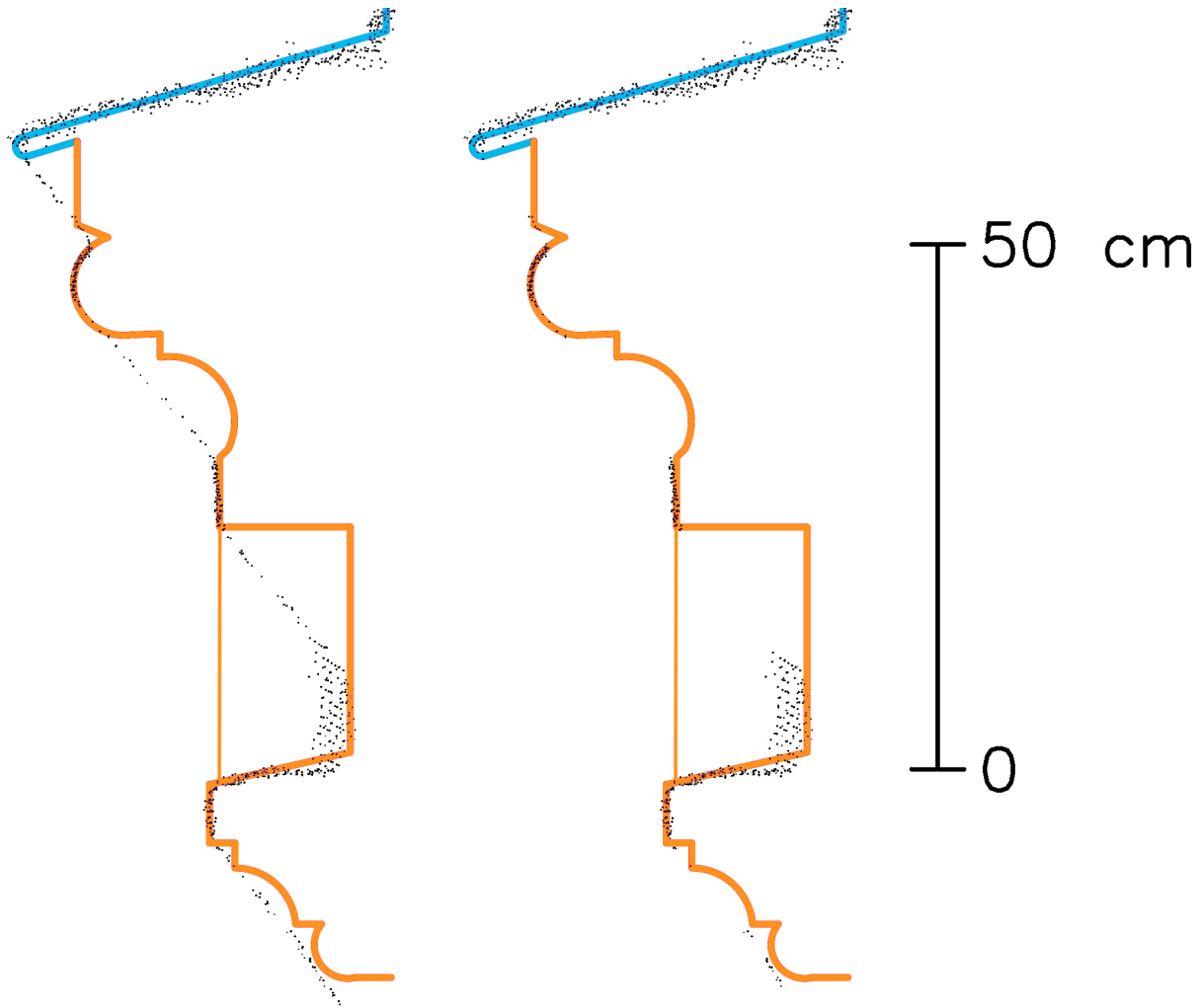
5 Bamberg, Dom, südliches Seitenschiff, Fensterebene, Horizontalschnitt durch einen Pilaster. In schwarz die Punktwolke; farbig die Strichauswertung.

ihr könne man sich einen genauso leichten Überblick über Zusammenhänge innerhalb eines Bauwerkes verschaffen, wie man es von Plänen, insbesondere von Grundrissen und Vertikalschnitten in der seit der Renaissance üblichen Orthogonalprojektion gewohnt ist. Tatsächlich muss man sich aber, wenn nur eine 3D-Punktwolke zur Verfügung steht, die konstruktiven Zusammenhänge eines Gebäudes durch häufiges Drehen der Ansichtsrichtungen und Beschneiden der Punktwolken ähnlich mühsam erschließen, als ob man darin selbst treppauf treppab unterwegs wäre (Abb. 3). In der Praxis kommt bei Nutzern von 3D-Punktwolken in denkmalpflegerischem Kontext daher meist sehr schnell der Wunsch auf, doch lieber Pläne statt der Wolken zur Hand zu haben – die hier angedeuteten direkten Nutzungsmöglichkeiten von 3D-Punktwolken durch den Auftraggeber sind also selten sinnvoll und praktikabel.

Trotz dieser ernüchternden Bilanz gibt es immerhin eine in der Denkmalpflege relevante Aussage, die man nur aus der 3D-Punktwolke gewinnen kann und nicht aus anderen Aufmaßprodukten. Es ist dies die flächige Deformationsanalyse, die für die Abschätzung von Tragwerksproblemen interessant ist (Abb. 4). Wo man ohne Punktwolke eine Vielzahl von Schnitten brauchte, um Verformungen auf die Spur zu kommen, genügt jetzt eine einzige flächige Auswertung. Dass man eine derartige Analyse „auf Knopfdruck“ bekommen könnte, ist allerdings ein Trugschluss: Entscheidend für deren Aussagekraft ist die Festlegung der an dem Beispiel in Abb. 4 senkrecht stehenden Bezugsebene. In der

oberen Deformationsdarstellung (Abb. 4 oben) ist die Bezugsebene quasi automatisiert über gleichmäßig auf dem Fachwerkgerüst verteilte Passpunkte definiert. Heraus kommt ein wenig aussagekräftiges Bild, auf dem vor allem das merkwürdige Zurückweichen der Fußbereiche der Ständer im rechten Teil der Fassade auffällt. Überlegt man dagegen, welche Bauteile überhaupt noch die ursprüngliche Fassadenflucht repräsentieren, so verbleibt einzig die Fachwerkschwelle, die allerdings ganz links auch noch nach hinten ausweicht. Die Definition der Bezugsebene im unteren Beispiel (Abb. 4 unten) erfolgte also nur über drei auf dieser Schwelle liegende Punkte unter Auslassung des linken Randbereiches. Sofort wird das diffuse Bild klarer: Die Wand bietet eine durchgehende Flucht, die nur ganz links etwas zurückweicht. Auffallend ist aber oben in der Fachwerkwand die blau eingefärbte Ausbauchung um ca. 10 cm, die tatsächlich ein Tragwerksproblem des darüber liegenden Dachwerks anzeigt. Die Punktwolke ist dieselbe wie oben, aber das Ergebnis ein völlig anderes. Als Qualitätskriterium für derartige Darstellungen muss also deren Nachvollziehbarkeit gefordert werden. Hier wird dieser Forderung durch die Einblendung der zur Definition der Bezugsebene verwendeten Punkte Genüge getan. So ist abzulesen, ob die Auswertung quasi automatisiert oder erst nach Analyse der Bauwerkskonstruktion gemacht wurde.

Abgesehen von der hier angesprochenen Verformungsanalyse ist die Verwendung von 3D-Punktwolken als Endprodukt eines Aufmaßprojektes nur selten sinnvoll. Sehr sinnvoll hingegen können sie



6 Bamberg, Dom, Turm Südost, 5. OG, Vertikalschnitt durch das Abschlussgesims. In schwarz die Punktwolke, links mit Punktschweif und rechts ohne; farbig die Strichauswertung.

als Zwischenprodukt auf dem Weg zur interpretierenden Strichzeichnung sein, wenn ihre Nutzung den Arbeitsprozess eines Auftragnehmers erleichtert. Diese Anwendung fällt allerdings in den Bereich der vorwiegend für den Auftragnehmer interessanten Technik-Kombinationen, die nicht Schwerpunkt dieses Artikels sind. An dieser Stelle sei aber auf ein Auswerteszenario von 3D-Punktwolken hingewiesen, dessen Anwendung nicht nur Zeitvorteile bietet, sondern auch der inhaltlichen Zuverlässigkeit von Strichzeichnungen zuträglich ist: die Auswertung geschnittener Bauteile (Abb. 5 und 6).

3D-Punktwolken lassen sich leicht entlang beliebig definierter Ebenen zerschneiden, so dass Schnittlinien visualisiert werden. Im Idealfall zeigt die Punktwolke eine Kontur lückenlos (Abb. 5, rechte Pilasterseite), dann hat es der Auswerter sehr leicht, beispielsweise ein Architekturprofil in seine logischen Bestandteile wie Kreisabschnitte und Kanten zu zerlegen und auch

Abweichungen von Kreisformen sehr gut zu erkennen bzw. durch Versuche zu ermitteln. Gerade letzteres geht an der geschnittenen Punktwolke besser als aus jeder anderen Warte, also auch besser als mit Hilfe der Stereophotogrammetrie und selbst der Autopsie vor Ort. Um die Geometrie von Profilen und damit von Architektur zu begreifen, sind 3D-Punktwolken hervorragend geeignet. Auch schwache Abknickungen von Wänden, die in der Realität manchmal kaum wahrnehmbar sind, fallen hier sofort auf und müssen nicht nach dem Zufallsprinzip gesucht werden. In Ausnahmefällen kann es daher sogar für den Auftraggeber interessant sein, die in 3D-Punktwolken so leichten Schnittlinienvisualisierungen selbst zu nutzen: Immer dann, wenn er sich auf bestimmte Schnittführungen nicht festlegen will oder kann.²¹

In der Praxis braucht es allerdings stets einen versierten Auswerter, denn oftmals zeigen Punktwolken eine Kontur eben nicht lückenlos. Die in Abb. 5

gezeigte, horizontal geschnittene Punktwolke eines Pilasters wurde mit einem terrestrischen Laserscanner erzeugt, der rechts neben dem Pilaster positioniert war. Die rechte Seite des Pilasters ist lückenlos erfasst, so dass das Profil sehr präzise konstruiert werden kann. Auf der linken Seite sind dagegen nur wenige Punkte erfasst worden, jedoch die Spiegelung des komplett erfassten Profils lässt sich so genau in die wenigen erfassten Punkte der linken Seite einpassen, dass auch diese Seite mit hoher Sicherheit ausgewertet werden kann. Die Darstellung der Punktwolke im Schnitt erlaubt es dem erfahrenen Auswerter also, mit Hilfe seines Verständnisses für Architektur kleine Erfassungslücken zu überbrücken. Schwieriger wird es dagegen in dem Beispiel von Abb. 6: Hier war der Laserscanner etwas links oberhalb des abgebildeten Gesimses aufgestellt. Dessen Laserstrahl hat hinter vorspringenden Kanten die bekannten Punktschweife erzeugt (Abb. 6 links), die einem unerfahrenen Auswerter ein völlig falsches Profil vorgaukeln. Das Problem der Punktschweife hinter Kanten kann mittlerweile allerdings durch zusätzliche Signalverarbeitung („waveform processing“) gelöst werden, so dass Punktschweife automatisch aus der Punktwolke herausgefiltert werden (Abb. 6 rechts).²⁴ Dann sind die irreführenden Punkte zwar verschwunden, aber die Erfassungslücken werden umso deutlicher. In diesem Beispiel konnte das Profil nur an anderen Stellen des Bauwerkes abgenommen werden, die unter einem günstigeren Scanwinkel erfasst wurden. Die wenigen korrekt erfassten Punkte erlaubten dann die Einpassung des Profils auch an der in Abb. 6 gezeigten Stelle.

Trotz der sich aus der Schnittdarstellung von 3D-Punktwolken ergebenden Stärken machen die gezeigten Beispiele auf ein grundsätzliches Defizit aufmerksam: Immer dort, wo Pfeiler, Nischen, Gesimse, Sockel, Ornamentik, Ausstattungselemente oder Dachwerke ein Gebäude zu einem wirklich dreidimensionalen Objekt machen, haben Punktwolken Abdeckungslücken. Je stärker in die Tiefe gegliedert die erfassten Bauteile sind, desto geringer fällt der Grad der Abdeckung aus und desto schwieriger wird es, aus den bruchstückhaften Informationen brauchbare Erkenntnisse abzuleiten. Und die Lücken liegen meist dort, wo unterschiedlich geartete Bauteile zusammenkommen, also an den sog. Bauteilanschlüssen, die für das Verständnis eines Bauwerkes doch so entscheidend sind (Abb. 1 und 2).

Der Umfang der Abdeckungslücken ist natürlich vom Aufwand abhängig, den ein Auftragnehmer bei der Erfassung betreibt. Wird ein terrestrischer Laserscanner benutzt, wird der Grad der Erfassung durch jeden zusätzlichen Standort des Scanners erhöht, und

noch leichter lässt sich der Erfassungsgrad bei Anwendung der SfM-Technik erhöhen, die mit der Kamera als Sensor sehr mobil und auch nicht mehr terrestrisch gebunden ist wie das Laserscanning. Besonders durch deren zunehmende Anwendung werden sich die Abdeckungslücken von Punktwolken in Zukunft verringern. Gleichwohl wird eine allein durch Punktwolken geleistete und vollständige, also im mathematischen Sinne 100%ige Erfassung so komplexer Objekte, wie Gebäude es sind, ein Wunschtraum bleiben, der durch Dienstleister zuweilen geweckt werden mag, aber nicht eingelöst werden kann. Ein typisches Beispiel zeigt Abb. 2, wo der Steinschnitt des Mauerwerkes oberhalb des auf Konsolen aufgelagerten Streichbalkens durch keine Methode außer der Autopsie vor Ort, d.h. von einer Leiter aus ermittelt werden konnte.

Unvollständigkeit ist also eine systemimmanente Eigenschaft von 3D-Punktwolken, und der Grad der Vollständigkeit wird damit neben dem maximalen Punktabstand zu einem entscheidenden Qualitätskriterium, das man als Auftraggeber prüfen sollte, falls man 3D-Punktwolken unmittelbar nutzen will. Für die Prüfung sind Musterflächen oder ggf. Referenzen des Auftragnehmers am ehesten geeignet, und auch für diese Frage sollte man sich von der Leistungsfähigkeit eines Auftragnehmers anhand schwierig zu erreichender Stellen und nicht anhand besonders einfach zugänglicher Stellen überzeugen.

Die aus den 3D-Punktwolken durch Vermaschung automatisiert berechneten Oberflächenmodelle werden für Anwendungen wie die Kopiererstellung oder das noch wenig verbreitete 3D-Kartieren verwendet; beides sind Spezialanwendungen, die nicht im Fokus dieses Artikels liegen.²⁵ Es ist aber wichtig festzuhalten, dass die Oberflächenmodelle alle Eigenschaften der 3D-Punktwolken vererbt bekommen, so dass für diese sehr ähnliche Qualitätsmerkmale gelten. Ein Oberflächenmodell kann nicht mehr, sondern nur weniger als eine 3D-Punktwolke zeigen.

2D-Punktwolken: Orthophoto und entzerrtes Bild

Betrachten wir im nächsten Schritt die sog. 2D-Punktwolken, also das Orthophoto und seinen weniger universell einsetzbaren Bruder, das entzerrte Bild.

Ein Orthophoto liegt vor, wenn alle darin sichtbaren Objektpunkte deren streng orthogonale Projektion auf die gewählte Bezugsebene darstellen.²⁶ Werden mehrere Photos kombiniert, entsteht im Idealfall von beliebig geformten Objekten ein photographisches Abbild, das dieselben geometrischen Eigenschaften wie

ein orthogonal projizierter Plan hat, jedoch bereichert um Graustufen- oder Farbinformationen. Die Herstellung basiert auf der Projektion von Bildinformationen auf ein digitales Oberflächenmodell des abzubildenden Objektes. Da die Herstellung des notwendigen Oberflächenmodells zu den Zeiten, als dafür nur die Stereo- oder Mehrbildphotogrammetrie zur Verfügung stand, sehr aufwendig war, waren Orthophotos sehr teure Produkte und wurden selten für Dokumentationen im Denkmalsbereich genutzt. Als preiswerte, aber nur zweitbeste Lösung wurden dagegen entzerrte Bilder bevorzugt. Die Produktion von Orthophotos hat sich jedoch bedeutend vereinfacht, seitdem die notwendigen Oberflächenmodelle aus 3D-Punktwolken berechnet werden, die entweder durch terrestrisches Laser-scanning oder durch SfM erzeugt werden können.

Orthophotos können in zwei Varianten hergestellt werden, deren Unterschiede zu kennen auch für Auftraggeber interessant ist: Werden die zugrundeliegenden 3D-Punktwolken mit einem terrestrischen Laserscanner erzeugt, so wird zu jedem gemessenen Punkt auch ein sog. Intensitätswert gespeichert, der Auskunft über die Reflektionseigenschaften und damit die Helligkeit des Objektpunktes gibt.²⁷ Diese Intensitätswerte werden in eine Graustufendarstellung umgesetzt, so dass der Blick auf die Punktwolke dem Blick auf ein Schwarz-Weiß-Photo entspricht (Abb. 1).



7 Bamberg, Dom, Ostchor, Nordseite. Detail des Chorgestühls mit anschließendem Pfeiler als Orthophoto aus Laserscan und externem Photo.

Nutzt man für die Orthophoto-Berechnung nur die Intensitätswerte, so kann die Punktwolke ohne weitere Daten direkt genutzt werden. Vorteil dieser Methode ist – neben ihrer Schnelligkeit – die Tatsache, dass die volle Auflösung der Punktwolke auch im Orthophoto abgebildet wird. Der maximale Punktabstand einer Punktwolke als Qualitätsmerkmal wird also auf die 2D-Punktwolke verlustfrei übertragen. Nachteil ist, dass alle Informationen, die nicht in Graustufen darstellbar sind, verlorengehen. So werden unterschiedliche Farben, die aber gleiche Reflektionseigenschaften haben, im Ergebnis gleich erscheinen. Bei dem einen Objekt mag dies bedeutungslos sein, bei einem anderen Objekt kann es aber auch zum Ausschlusskriterium werden, und bei wieder einem anderen Objekt kann die Relevanz dieses Aspektes bereits innerhalb einer Oberfläche stark schwanken (Abb. 1).

Aufgrund der Unsicherheit, ob alle am Objekt sichtbaren Befunde in einem Graustufenbild trotz ausreichender Auflösung auch abgebildet werden, wird zumeist das farbige Orthophoto bevorzugt. Hierfür sind externe Photos vonnöten, die vorzugsweise von einer direkt mit dem Laserscanner gekoppelten Kamera aufgenommen werden.²⁸ Die Koppelung führt zu einem sehr schnellen Arbeitsablauf, da die 3D-Punktwolke automatisch „eingefärbt“ werden kann, bei den meisten Laserscannern kann man daher leicht von einer intensitätsbasierten Punktwolkendarstellung auf eine farbbasierte umschalten. Einen gravierenden Nachteil hat diese Methode jedoch: Die Auflösung der direkt vom Scannerstandort aufgenommenen Photos ist in der Regel niedriger als die Auflösung der 3D-Punktwolke, daher müssen meist mehrere 3D-Punkte mit derselben Farbinformation belegt werden – eine ursprünglich hohe und vorzugsweise gemäß den oben angestellten Überlegungen zum maximalen Punktabstand eingestellte Auflösung der Abtastung wird durch die Umrechnung in ein farbiges Orthophoto also reduziert. Abhilfe schaffen nur Photos, die unabhängig vom Standort des Scanners aufgenommen wurden. Deren äußere Orientierung muss jedoch aufwendig bestimmt werden, bevor ihre Bildinformationen auf die 3D-Punktwolke projiziert werden können, dieser Arbeitsschritt erhöht den Zeitaufwand beträchtlich.²⁹ Auch in diesem Punkt verspricht allerdings die Anwendung der SfM-Technik einen wesentlichen Fortschritt, denn ein durch sie erstelltes Orthophoto profitiert automatisch von der gleichmäßigen und hohen Auflösung der zur Berechnung verwendeten Photos (Abb. 14 und 15).

Da jedes Orthophoto auf einer 3D-Punktwolke basiert, bekommt es auch deren wichtigste Eigenschaft vererbt: Wo eine 3D-Punktwolke Lücken hat, kann

auch kein Orthophoto berechnet werden. Der Grad der Abdeckung ist also wiederum variabel und wird damit – wie auch die Auflösung – zu einem wichtigen Qualitätskriterium. Diesen zu bestimmen und etwa Lücken zu erkennen, fällt dem Nutzer eines Orthophotos allerdings deutlich leichter als dem einer 3D-Punktwolke: In Abb. 7 oben hat ein vorkragendes Gesims dem unterhalb davon aufgestellten Laserscanner die Sicht versperrt, also kann über dem Gesims auch kein Orthophoto berechnet werden. Der nicht abgedeckte Bereich wird bei der Berechnung entweder in weiß oder schwarz aufgefüllt, so dass jedem Nutzer in diesem Beispiel sofort deutlich wird, dass an der Basis der über dem Gesims aufgehenden Halbsäule kein Steinschnitt zu sehen ist und somit an dieser Stelle auch keine Bauteilanschlüsse geklärt werden können. Weil Orthophotos Lücken so eindeutig offenbaren, werben Hersteller von Laserscannern oder Dienstleister für die Herstellung von 3D-Punktwolken gerne mit zentralprojektiven Punktwolkendarstellungen aus der Sicht des Scanners, die systembedingt keinerlei Lücken zeigen.

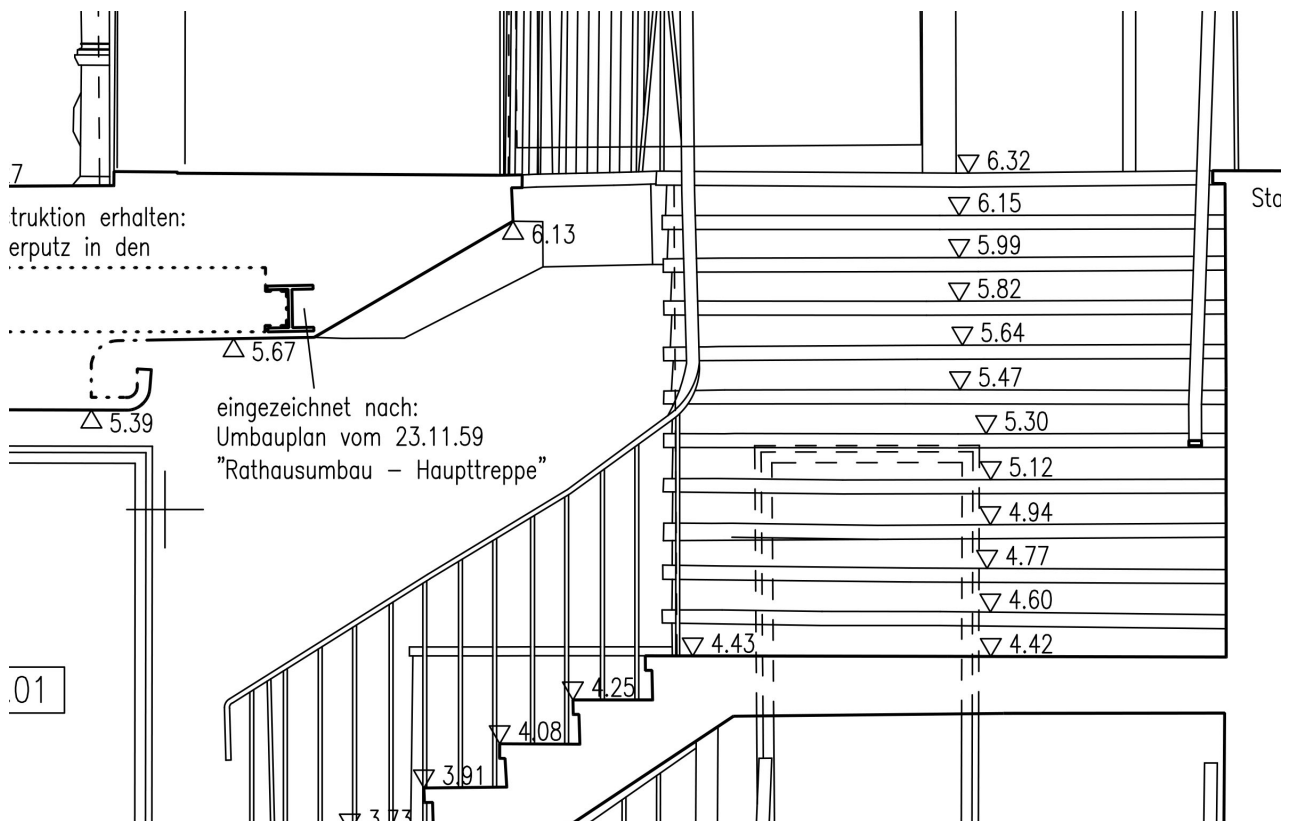
Anders als die 3D-Punktwolke lässt sich das Orthophoto durch jeden Auftraggeber direkt nutzen. Kartierungen können darauf sowohl analog als auch digital erfolgen, und die Verarbeitung ist mit jedem mobilen Computer und letztlich jedem Bildbearbeitungsprogramm auch direkt auf der Baustelle möglich. Wird ferner überlegt, ob beispielsweise von einer Fassade überhaupt eine Strichzeichnung angefertigt werden soll, so kann das Orthophoto eine preiswerte Alternative sein, weil der Arbeitsschritt der Strichauswertung entfällt. An dieser Stelle ist es ausnahmsweise für den Auftraggeber auch wichtig zu wissen, wie das bestellte Produkt entsteht: Denn wer ein Orthophoto bestellt, zwingt den Auftragnehmer, vorher eine 3D-Punktwolke zu generieren. Die Möglichkeit, diese z. B. für eine Verformungsanalyse zu nutzen, entsteht also automatisch mit der Bestellung des Orthophotos, es muss lediglich vereinbart werden, dass dem Auftraggeber nicht nur das Orthophoto sondern auch die 3D-Punktwolke übergeben wird.

Um diese Betrachtung abzuschließen, sei noch die Bedeutung des entzerrten Bildes erwähnt: Ein solches bildet die Objektgeometrie bekanntermaßen nur auf der oder den für die Entzerrung genutzten Ebenen geometrisch richtig ab, alle gegenüber diesen Ebenen vor- oder zurückspringenden Bauteile werden radial versetzt bzw. umgeklappt dargestellt. Trotz der Entwicklung der Laserscanner und der SfM-Technik ist es nach wie vor deutlich preiswerter als das Orthophoto, d. h. vor der Auftragserteilung für ein Orthophoto sollte immer die Tauglichkeit des entzerrten Bildes für die vorgesehene Aufgabe geprüft werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das Orthophoto im Vergleich zur 3D-Punktwolke mehr direkt durch den Auftraggeber nutzbare Eigenschaften besitzt. Auch das entzerrte Bild hat diese Vorteile, allerdings nur, wenn es aufgrund der Objektgeometrie überhaupt einsetzbar ist. Als weiterer Vorteil ist zu nennen, das Photos ausbelichtet und so für eine Nutzung durch zukünftige Generationen vorbereitet werden können. Bei rein digitalen Daten ist die Langzeitarchivierung dagegen immer noch ungeklärt, und für 3D-Punktwolken gilt dies aufgrund der einem permanenten Wandel unterworfenen Speicherformate in noch stärkerer Weise als für 2D-Punktwolken.³⁰

Digitale 2D-Strichzeichnung

Die aus der Sicht der Bauforschung grundsätzlichen Stärken der Strichzeichnung als interpretierendes Aufmaßprodukt waren oben bereits erwähnt worden. Allgemein bekannt ist auch, dass die digitale Strichzeichnung im Vergleich mit den Punktwolken-Produkten das einzige Medium ist, das sich sehr leicht fortschreiben und in derzeit übliche Planungsprozesse nahtlos integrieren lässt. Die „Auflösung“, d. h. der Detaillierungsgrad einer digitalen Strichzeichnung ist zudem sehr variabel, so dass in ein und derselben Zeichnung äußerst unterschiedliche Detaillierungen realisiert und auch jederzeit verdichtet werden können. Im Vergleich mit den automatisiert hergestellten Punktwolken ergibt sich aber noch ein weiterer, entscheidender Vorteil: Die Strichzeichnung ist das einzige Aufmaßprodukt, mit dem komplexe Objekte wie Gebäude vollständig dargestellt werden können – die Vollständigkeit erstreckt sich dabei nicht allein auf schwer zugängliche sondern sogar auf komplett verdeckte Bauteile, die als vermutet, erschlossen oder als durch spezielle Messtechniken wie der Thermographie erfasst eingetragen werden können; und ebenso leicht lassen sich Bauteile ergänzen, deren Existenz beispielsweise nur aus historischen Plänen bekannt ist (Abb. 8). Die potenzielle Vollständigkeit, die allerdings direkt abhängig von der analytischen Leistung des Planverfassers ist, und natürlich die problemlose Fortschreibung in Planungsprozessen führen zu Recht dazu, dass die digitale 2D-Strichzeichnung das am häufigsten angefragte Endprodukt einer Bauwerksvermessung ist. Will man die Qualitäten einer digitalen Strichzeichnung prüfen, empfiehlt sich immer ein Blick auf die Übergänge zwischen unterschiedlich gearteten Bauteilen (Abb. 9): Das Verständnis des Planverfassers für ein Bauwerk offenbart sich weniger z. B. innerhalb einer homogenen Wandfläche aus Natursteinquadern mit



8 Forchheim, Rathaus, Vertikalschnitt durch das Treppenhaus als digitale 2D-Strichzeichnung (Ausschnitt).

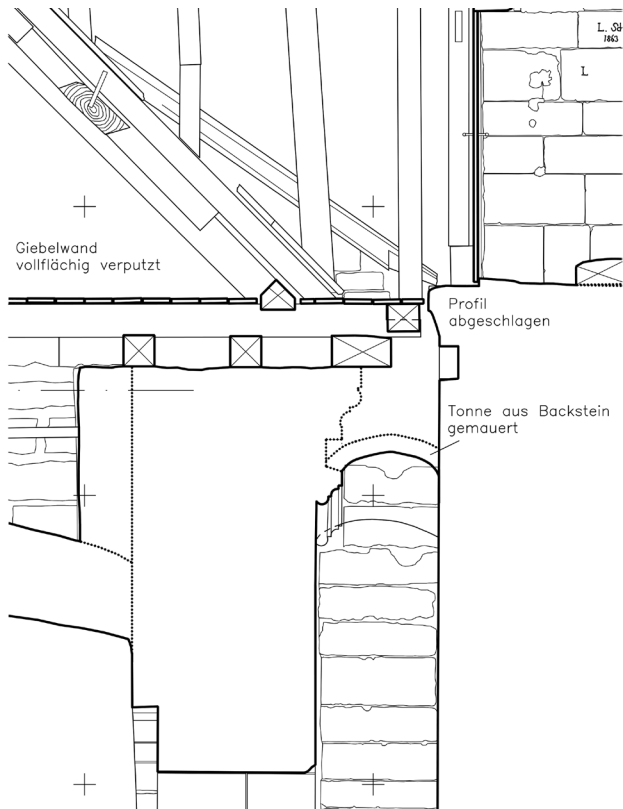
gut sichtbarem Fugenschnitt. Es kommt aber dort zum Tragen, wo diese auf ein anderes Bauteil stößt, also beispielsweise am Fußpunkt eines Dachwerkes. Erst wenn die Konstruktion der Bauteilanschlüsse verstanden wurden und dieses Verständnis in eine lesbare Zeichnung umgesetzt wurde, darf man von Qualität sprechen.

Zumindest kurz sei an dieser Stelle auch die Seite des Auftragnehmers betrachtet, der auf der Suche nach möglichst schnellen Arbeitsprozessen für die Herstellung von Strichzeichnungen ist: Die Erfahrungen des Verfassers bei der Gesamterfassung des Bamberger Domes haben gezeigt, dass die Strichauswertung auf einem ausreichend hoch aufgelösten Orthophoto ungefähr viermal schneller ist als die Auswertung auf einer nicht eingefärbten, aber ebenso hoch aufgelösten 3D-Punktwolke. Dies liegt zu einem kleinen Teil an der besseren Handhabbarkeit des Orthophotos im Computer, im Wesentlichen aber an der sehr sicheren Befundansprache, da Bauteilabgrenzungen ganz unabhängig vom Charakter eines Bauteiles klar erkennbar sind (Abb. 7, 14 und 15). So verbleiben nach der Auswertung weniger unsichere oder nicht auswertbare Bereiche, die vor Ort nachgearbeitet werden müssen. Somit

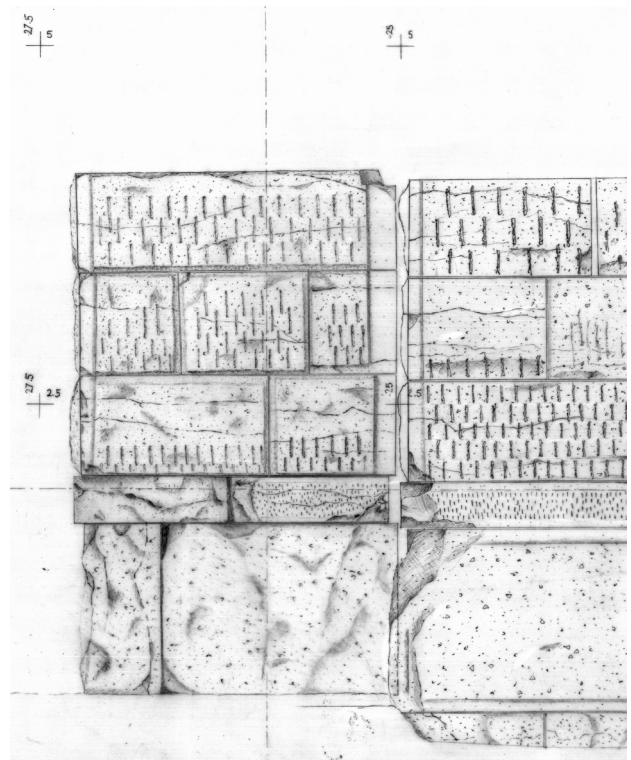
ergibt sich für den Hersteller von Strichzeichnungen eine einfache Faustformel: Überall dort, wo sich für ihn aufgrund eines hohen Abdeckungsgrades die Verwendung von Punktwolken als Zwischenprodukt lohnt, werden Schnittlinien am schnellsten und sichersten durch Auswertung einer 3D-Punktwolke erzeugt, für alles andere ist das Orthophoto die beste Grundlage.

Analoge 2D-Strichzeichnung

Als Alternative zur digitalen 2D-Strichzeichnung kann auch händisch eine analoge Zeichnung angefertigt werden, die jedoch in aktuelle Planungsprozesse aufwendiger zu integrieren ist und daher von Planern heutzutage kaum noch angefordert wird. Bei der Erfassung bestimmter Details jedoch, also insbesondere bei Oberflächenporträts oder der Herausarbeitung kleinteiliger und / oder unscharfer Befunde spielt die Handzeichnung nicht nur ihr analytisches Potenzial voll aus, sondern ist auch das schnellste Medium (Abb. 10). Bei Bauteilen, die die Erfassung solcher Details erfordern, kann die digitale Vektorzeichnung nicht mithalten, und diese Vorteile sind durch die historische Bau-



9 Bamberg, Dom. Anschluss zwischen Gewölbe und Dach des Ostchores sowie dem Südostturm, Detail des Vertikalschnittes. Rasterkreuzweite 2 m.



10 Messene, Arkadisches Tor, Ansicht der Feldseite (Ausschnitt). Analoge Strichzeichnung im Maßstab 1:25, Rasterkreuzweite 2,5 m.

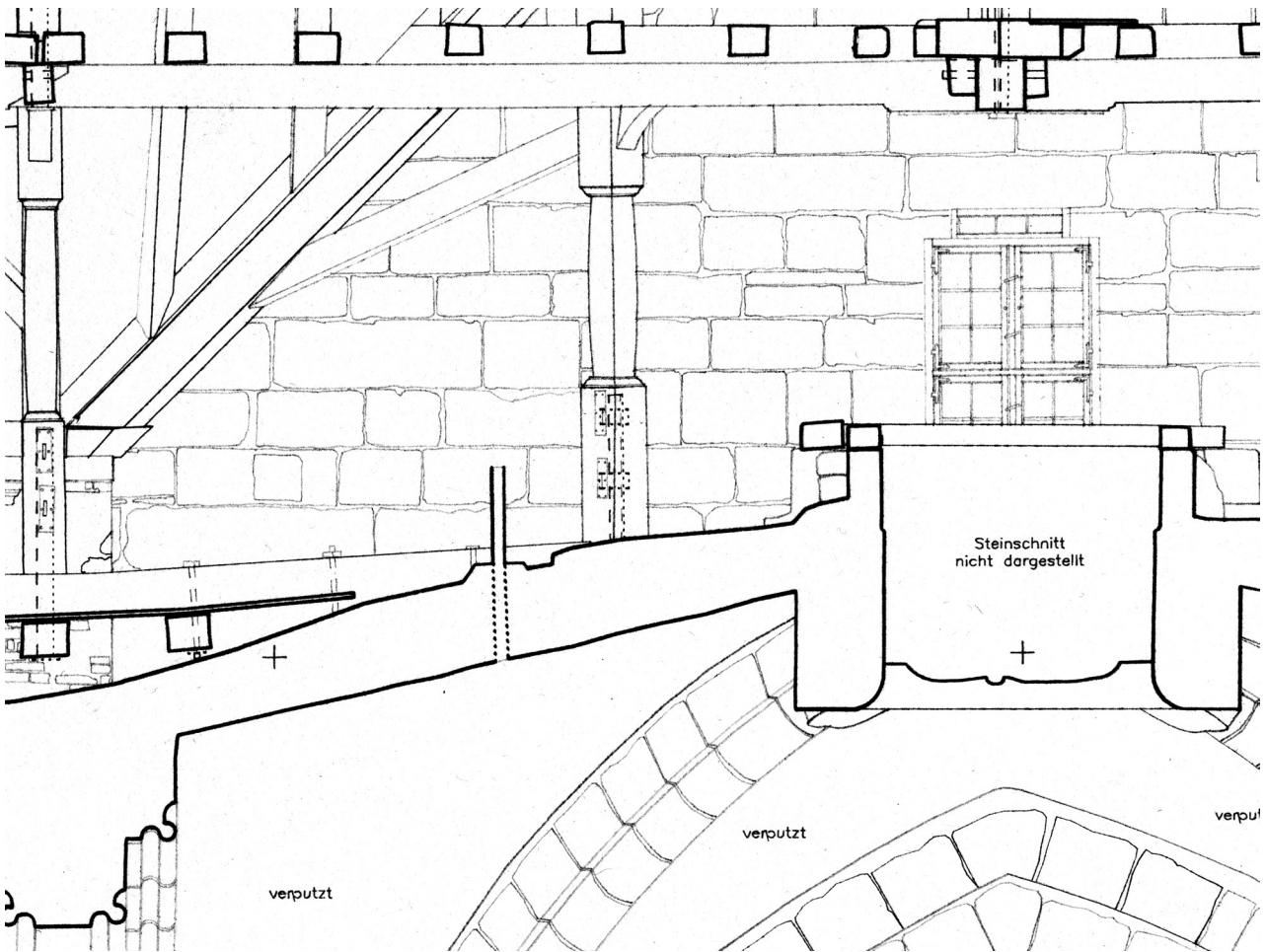
forschung auch stets hervorgehoben worden.³¹ Dies führt sogar dazu, dass die analoge Handzeichnung auch heute noch zur Erfassung kompletter Bauwerke sinnvoll ist, wenn derartige Details flächendeckend zu erfassen sind, beispielsweise bei Bauwerken der griechisch-römischen Antike oder ähnlichen Bauwerken, bei denen an jedem Bauteil kleinste Befunde „lauern“ können, die aber größte Bedeutung haben.

Gerne wird das Produkt „analoge Handzeichnung“ mit dem Begriff „Handaufmaß“ synonym verwendet, was Konfusionen hervorrufen kann. Der Begriff des „Handaufmaßes“ wurde zu einer Zeit geprägt, als der übliche Vorgang des Bauaufmaßes aus dem händischen Messen und dem händischen Zeichnen bestand.³² Heutzutage aber ist eine derartige Vorgehensweise – mit ausdrücklicher Ausnahme von Details – schlichtweg unsinnig, auch für analoge Handzeichnungen ist es aus Gründen der messtechnischen Zuverlässigkeit und der Wirtschaftlichkeit zwingend, sich der Möglichkeiten moderner Messtechnik zu bedienen. Wenn heutzutage die Handzeichnung eines ganzen Bauwerkes und nicht nur eines Wandabschnittes o.ä. entsteht, sollte man sogar erwarten, dass

moderne Messtechnik zu ihrer Herstellung eingesetzt wird.

Dennoch sollte man eine entscheidende Qualität, die der Begriff „Handaufmaß“ zumindest impliziert, nicht aus den Augen verlieren: Das händische Messen erfordert grundsätzlich das Aufsuchen, d.h. das haptische Erkunden eines jeden Punktes, was seiner inhaltlich sinnvollen Darstellung in einer Zeichnung sehr zuträglich ist. Dieser aus der Messmethode geborene Zwang zur Autopsie stellt einen grundsätzlichen Unterschied zu den Methoden der „Fernerkundung“ dar, und zu diesen zählt nicht nur die Photogrammetrie und das Laserscanning – auch die reflektorlose Tachymetrie kann in den Händen eines unerfahrenen Anwenders zu einer solchen werden.

Zu Recht wird daher oft der durch den Einsatz von Methoden der „Fernerkundung“ nicht mehr vorhandene Zwang zur unmittelbaren Autopsie bemängelt. Es ist allerdings ein Irrtum zu glauben, die Beauftragung einer Handzeichnung könne die Autopsie erzwingen, genausowenig wie die Anfertigung einer digitalen Strichzeichnung dieselbe ausschließt. Wieder kommt es allein auf die Qualität des Ausführenden an, die am besten durch Referenzen nachgewiesen wird.



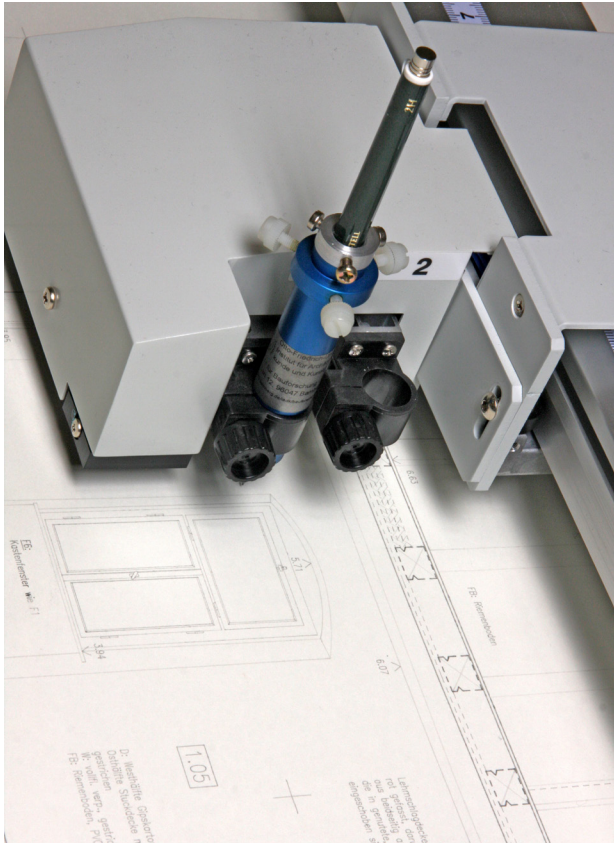
11 Bamberg, Dom, Längsschnitt nach Norden, Ausschnitt im Bereich der Vierung. Scan eines Bleistiftplots im M 1:50, Abbildung hier im originalen Plotmaßstab. Drei differenzierte Strichstärken sind dargestellt.

Die Frage der Langzeitarchivierung ist bei Strichzeichnungen leichter zu lösen als bei Punktwolken: Die Archivierung rein digitaler Daten ist zwar auch dort ungeklärt,³³ doch können Zeichnungen entweder in Tinte auf archivfähigem Papier oder Bleistift auch auf Archivkarton ausgeplottet werden. An der Universität Bamberg konnte für letztere Variante ein speziell umgerüsteter Schneideplotter eingerichtet werden, der mit den für händische Zeichnungen als Standard etablierten Fallminenbleistiften bestückt ist (Abb. 12). Durch die Wahl unterschiedlicher Härtegrade der eingesetzten Minen und einer für diese Anwendung speziell adaptierten Plottersteuerung werden differenzierte Strichstärken und -arten erzeugt, so dass die generierten Plots dem von händischen Zeichnungen bekannten und so aussagekräftigen Duktus entsprechen (Abb. 11). Neben der leichten Archivierbarkeit hat dieses Aufmaßprodukt den Vorteil, auch voll fortschreibungsfähig zu sein. So wird es mit seiner Hilfe beispielsweise möglich, für ein Sanierungsprojekt zunächst ein rein digitales Aufmaß bis zu einem

festgelegten Detaillierungsgrad herzustellen, das anschließend eine zweigleisige Fortschreibung erfährt: Es dient einerseits als Grundlage für den rein digitalen Planungsprozess, andererseits aber auch der baubegleitenden Bauforschung. Diese kann auf aufwendige Messungen verzichten und sich gleichzeitig die Stärken der Handzeichnung zunutze machen, indem aus dem Bleistiftplot durch händische Nachtragungen eine alle Befunde erfassende, analytische und somit auch wissenschaftlichen Ansprüchen genügende Dokumentationszeichnung wird.

Hybridprodukte

Sobald für ein Projekt digitale Aufmaßprodukte verwendet werden, ergibt sich die Möglichkeit der Nutzung sog. Hybridprodukte. Da die digitale 2D-Strichzeichnung das einzige Produkt zur vollständigen Erfassung von Gebäuden ist, sollte diese in allen Hybridprodukten den Rahmen bilden, innerhalb des-



12 Bleistiftplotter der Universität Bamberg Graphtec FC2250 mit Spezialadapter. Als Stifte werden die in Handzeichnungen üblichen Fallminienstifte mit unterschiedlichen Härtegraden verwendet.

sen punktuell andere Produkte eingebunden werden können.

Sehr naheliegend ist zunächst die Einbindung von Handzeichnungen in die digitale Umgebung. Dabei kann die Handzeichnung auf ausgewählte, aber befundreiche Teile eines Gebäudes beschränkt werden, die durch Vektorgraphiken nur unzureichend bzw. nicht mit vertretbarem Aufwand darstellbar und auf photographischen Abbildungen nicht in der nötigen Klarheit erkennbar wären (s. Beitrag Karl Schnieringer in diesem Band, Abb. 16). Dort spielt sie ihre Stärken voll aus, wohingegen sie dort, wo sie gegenüber einer Vektorzeichnung keinen erhöhten Informationsgehalt aufnehmen kann oder nicht schneller in der Herstellung ist, gar nicht erst zum Einsatz kommt. Werden Handzeichnungen in dieser Weise zielgerichtet eingesetzt, ergibt sich, dass eine nachträgliche Vektorisierung, d.h. Umzeichnung am Computer diesen Vorteil wieder zunichte machen würde und daher unterbleiben sollte. Einerseits drohen die vor Ort gewonnenen und in der Zeichnung niedergelegten Erkenntnisse durch den Filter der Umzeichnung verlorenzugehen, und andererseits stellt die Handhabung auch großer Rastergraphiken für moderne CAD-Systeme keine Herausforderung mehr dar.

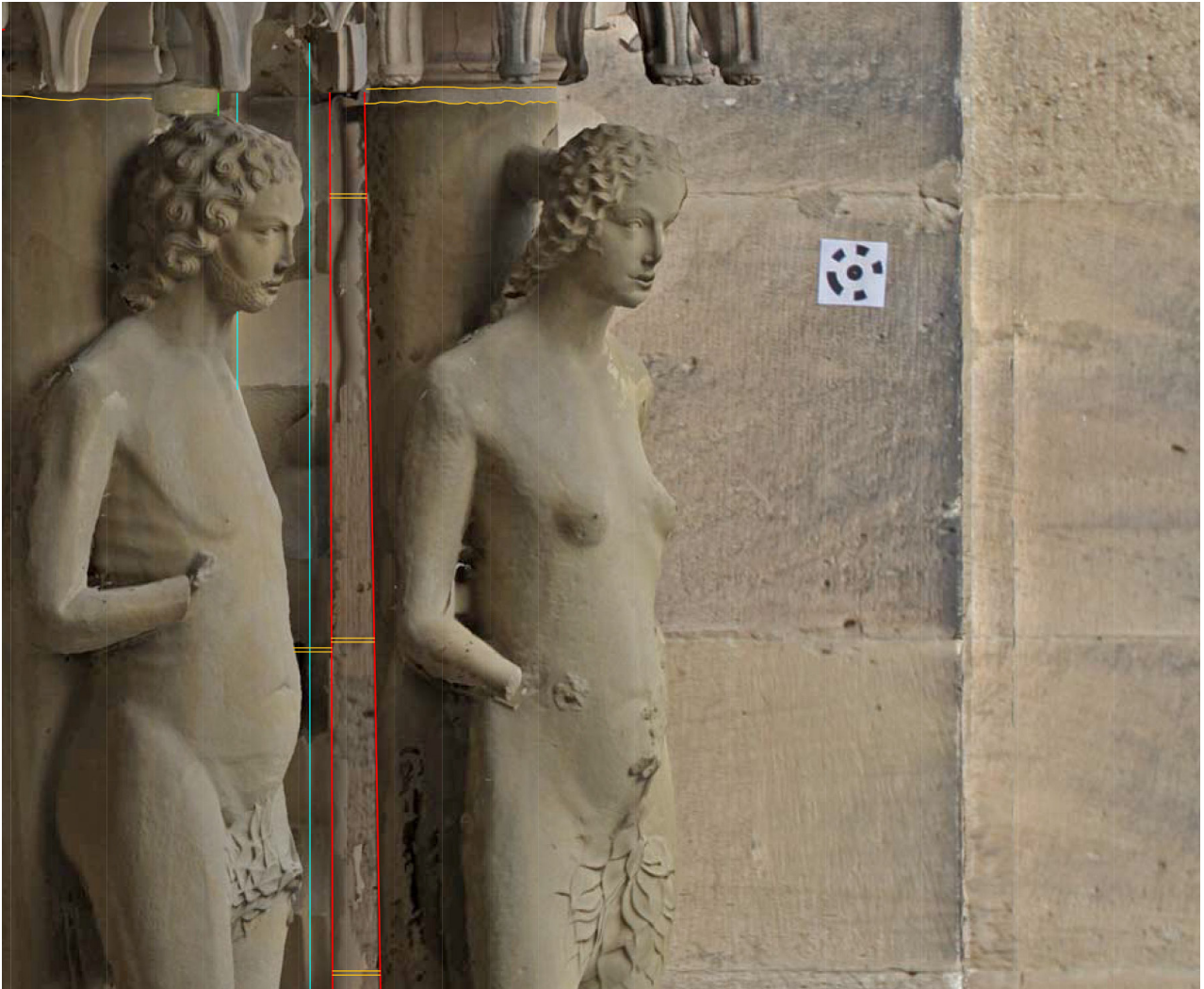
Ebenfalls ein vielseitiges Hybridprodukt ist die Kombination aus Strichzeichnung und Orthophoto. Angesichts der heute erreichbaren Qualität von Orthophotos



13 Bamberg, Dom, nördliche Mittelschiffwand, Gewölbeansatz. Auf die Wandfläche entzerrtes Bild mit 2D-Strichzeichnung überlagert. Nur die Auswertung der Wandfläche ist deckungsgleich mit dem Photo.



14 Bamberg, Dom, Adamsforte, Nordseite. Ausschnitt aus einem mit SfM generierten Orthophoto einschließlich Strichauswertung.



15 Detail aus Abb. 14, Steinschnitt jedoch nur in Bereichen mit Sichtbeschränkung nachgetragen.

sollte man sich häufiger als bisher fragen, an welchen Stellen eines Objektes auf zeichnerische Auswertungen ganz verzichtet werden kann. Prädestiniert dafür sind beispielsweise Wandoberflächen mit gut sichtbaren Fugen, Farbfassungen aller Art, aber auch der plastische Schmuck und die Ornamentik eines Bauwerkes (Abb. 14). Gerade Bauteile mit amorphen Oberflächen, unregelmäßigen Kanten oder Farbfassungen erfahren bei der Umsetzung in Strichzeichnungen eine starke Reduktion der Information, die zudem extrem von der Interpretation des Bearbeiters abhängig ist. Überall dort also, wo die Umsetzung als Strichzeichnung keinen Informationszuwachs sondern im Gegenteil eine unzulässige Reduktion bedeuten würde, sind Orthophotos die ideale Alternative.

Das Tandem aus Photo und Strichzeichnung hat bislang im Aufmaßbereich aus einem recht einfachen Grund nur eine Sonderrolle gespielt: Da Orthophotos teuer waren, wurden für derartige Hybriddarstellungen

meist nur entzerrte Bilder verwendet. Darin sind fast immer von den Entzerrungsebenen abweichende Bauteile wie Sockel, Gesimse, Profile, Gewände, Dachflächen etc. enthalten, die umgeklappt dargestellt werden. Umgeklappt dargestellte Objekte nehmen aber in einer ansonsten streng orthogonalen Darstellung anderen Objekten den Platz weg (Abb. 13). Nahtlose Übergänge zwischen einem entzerrten Bild und einer Strichzeichnung sind also nur dann möglich, wenn das entzerrte Bild vollständig auf die geometrisch korrekt entzerrten Flächen beschnitten wird. Ein Orthophoto jedoch passt sich unabhängig von der Objektgeometrie nahtlos in jede Strichzeichnung ein. Strichdarstellungen können immer dann zum Einsatz kommen, wenn verdeckte oder durch Photos bzw. Scanner nicht zu erfassende Bereiche aufzunehmen sind – und solche Bereiche gibt es in Gebäuden bekanntermaßen zahllose. Der Grad der Vermischung beider Produkte ist beliebig und reicht von der Strichzeichnung mit punktuell einmon-

tierten Orthophotos (s. Beitrag Andreas Brusckhe in diesem Band, Abb. 1) bis hin zum Orthophoto mit nur einigen ergänzenden Strichen in sichttoten Bereichen (Abb. 15).

Will man den Einsatz der Strichzeichnung nun konsequent nur auf Fehlstellen der Punktwolken beschränken, müsste man allerdings bei einem ganzen Bauwerk auch sehr gewöhnungsbedürftige Ergebnisse akzeptieren: Die Übergänge zwischen Punktwolken und Strichzeichnungen lassen sich dann nicht ausschließlich auf klare Bauteilkanten legen, sondern müssen auch Oberflächen scheinbar willkürlich durchschneiden, eben wenn diese sich nicht mit vertretbarem Aufwand ausreichend freilegen lassen um als Punktwolke vollständig erfasst zu werden.

Das in Abb. 14 abgedruckte Orthophoto vom Adamsportal des Bamberger Domes ist mit Hilfe der SfM-Technik entstanden. Für die dafür nötigen ca. 70 Photographien vor Ort einschließlich der tachymetrischen Passpunktbestimmung benötigte eine Person eine Stunde, die anschließende Rechenzeit betrug ca. fünf Stunden, wobei nur zwei davon die Anwesenheit des Bearbeiters erforderten. Die vollständige Strichauswertung des Orthophotos benötigte dann zehn Stunden. Die Zahlen verdeutlichen, dass bei Vorhandensein eines ausreichend hoch aufgelösten Orthophotos der Verzicht auf Strichdarstellungen in ausgewählten Bereichen auch wirtschaftlich attraktiv ist.

Wenig sinnvoll ist dagegen die Ergänzung einer 2D-Strichzeichnung durch 3D-Punktwolken, da in ihnen Fehlstellen schwer zu erkennen sind und erst bei der konkreten Nutzung des Aufmaßes auffallen.

Fazit

Ist das Aufmaß eines Gebäudes anzufertigen, so sollte dieses zunächst in sog. Bauteilklassen untergliedert werden. Typische Bauteilklassen sind etwa „Wandfläche und Bauplastik mit gut sichtbaren Bauelementgrenzen“, „Stuckdecke“, „Dachwerk“, „historisches Holzfenster“ o.ä. Anschließend ist für jede dieser Bauteilklassen das Aufmaßprodukt festzulegen, das den besten Kompromiss zwischen Aufwand und Aussagekraft liefert. Während beispielsweise eine Wandfläche und eine Stuckdecke u.U. zu 100% durch ein Orthophoto erfasst werden können, ist für ein Dachwerk oder ein Holzfenster allein die Strichzeichnung eine sinnvolle Darstellungsform. Für die ausgewählten Produkte muss im Anschluss die Darstellungstiefe festgelegt werden, im Falle einer Strichzeichnung ist dies die Detaillierung und im Falle von Punktwolken die – im besten Fall konstante – Auflösung. Die Aus-

wahl der eingesetzten Messtechnik ist demgegenüber von sekundärer Bedeutung und sollte dem Ausführenden des Aufmaßes überlassen werden, sofern er das Erreichen der geforderten Darstellungstiefe und Messgenauigkeit durch Referenzen überzeugend darlegen kann. Allumfassende Klammer für Objekte ab der Komplexität von Gebäuden wird stets die digitale 2D-Strichzeichnung sein, in die bei ausgewählten Bauteilklassen 2D-Punktwolken oder analoge Strichzeichnungen eingebunden werden.

Entscheidendes Qualitätskriterium eines jeden Aufmaßes bleibt nach wie vor dessen Aussagekraft, die im besten Fall so weit reicht, dass mit seiner Hilfe Fragen beantwortet werden können, die zum Zeitpunkt seiner Erstellung noch überhaupt nicht gestellt wurden.

- 1 Basis dieses Beitrages sind die Erfahrungen des Verfassers aus der Betreuung des Faches „Bauwerksdokumentation“ an der Universität Bamberg sowie aus der Leitung diverser Baudokumentationen in archäologischem und denkmalpflegerischem Kontext, u.a. der Gesamterfassung des Bamberger Domes oder der antiken Stadtmauer von Messene.
- 2 Immer noch grundlegend zur Bedeutung der Baudokumentation für die Denkmalpflege ist PETZET – MADER 1995, vgl. aber jetzt auch BUNDESDENKMALAMT 2014.
- 3 Bei wissenschaftlichen Projekten gelten zwar die Gesetze der Marktwirtschaft nicht wie im hier beschriebenen Szenario, dennoch müssen dort ganz ähnliche Entscheidungen getroffen werden, um den Einsatz von Projektmitteln und Mitarbeitern so zu planen und zu optimieren, dass die gesteckten Forschungsziele überhaupt erreicht werden können.
- 4 FUCHSBERGER 2005, 191–194.
- 5 BRUSCHKE 2014a, 21–32. Vgl. auch den Beitrag desselben Autors in diesem Band.
- 6 Siehe dazu den Beitrag von Hermann Fuchsberger in diesem Band. Die „Richtlinien für Bauhistorische Untersuchungen“ finden sich unter <https://bda.gv.at/fileadmin/Medien/bda.gv.at/SERVICE_RECHT_DOWNLOAD/Richtlinien_fuer_bauhistorische_Untersuchungen.pdf> (05.03.2018).
- 7 Die Frage, inwieweit einzusetzende Messverfahren vor Projektbeginn festgeschrieben werden sollten, wird allerdings kontrovers diskutiert. So findet sich der hier vorgetragene Grundsatz auch bei ECKSTEIN 2003, 9; zustimmend auch HÄDLER 2005, 43. BRUSCHKE 2005, 144. 148 weist aber zu Recht darauf hin, dass durch Vorschreiben einer einzusetzenden Messmethode der Einsatz von nachgewiesenermaßen ungeeigneten Methoden unterbunden werden kann. Allerdings setzt das Vorschreiben von Methoden beim Ausschreibenden genaue Kenntnisse von deren Leistungspotenzialen voraus, diese sind aber durch die technische Entwicklung einem permanenten Wandel unterworfen. ANDREWS u.a. 2009, 31–33 betonen, dass eine produktbezogene Ausschreibung den Kreis der Bewerber offener hält als eine methodenbezogene, dass aber in der Praxis oft eine Mischung beider Ausschreibungsarten nötig ist.
- 8 Vgl. etwa WIEDEMANN 2004, 82–263; ANDREWS u.a. 2009, 11–30; BRUSCHKE 2014a, 22–24. Für das jüngste Mitglied im Kreise der Messverfahren, die Structure-from-Motion-Technik (SfM), s. etwa Ronny Weßling u.a., Structure-from-Motion und Pole-Aerial-Photography für die Dokumentation archäologischer Grabungen, gefunden unter <[160](http://www.unet.univie.ac.at/~a0605641/wp-content/uploads/down-</div><div data-bbox=)

- loads/2014/09/We%C3%9Fling-et-al-2013-Pole-aerial-photography.pdf> (05.03.2018) oder die Bemerkungen von Andreas Brusckke in diesem Band.
- 9 Zur Definition inhaltlich genauer Aufmaße s. GIESE 2011, 122–130 mit weiterführender Literatur. Vgl. auch die folgende Anmerkung.
 - 10 Siehe etwa GERNER HANSEN 2001, 32 f.; HANSEN 2001, 182–186; SCHULLER 2001b, 213–226; GANZERT 2001, 270 f.; SCHULLER 2005, 10–17.
 - 11 Siehe etwa KOKSCH 2005, 133–139 oder die Fallstudie der Modellierung der sog. Iron Bridge in ANDREWS u. a. 2009, 43–50 zu den Stadien der Herstellung solcher Modelle.
 - 12 Vgl. etwa die Diskussionen und gelungenen Beispiele bei Hof 2001, 240–250; GANZERT 2001, 267–269; Hansgeorg Bänkel – Valentina Hinz – Stefan Franz, Griechische Architektur digital-dreidimensional: ein „Arbeitsmodell“ der Heiligtümer am Westrand von Knidos und ein polychromes Schaumodell des Aphaia-tempels von Aegina, in: RIEDEL u. a. 2006, 242–251; ECHTENACHER 2011, 49–57 und weitere Beispiele im selben Sammelband. Vgl. auch den Beitrag von Jonas Brusckke in diesem Band.
 - 13 Siehe den Beitrag von Alexander Wiesneth in diesem Band, mit ebenda Abb. 5. 6. 10. 13f.
 - 14 Zum Laserscanning s. beispielsweise ANDREWS 2009, 18–21; ENGLISH HERITAGE 2011, 7–9; ESSER u. a. 2011, 14–25. Zur SfM-Technik s. Anm. 8.
 - 15 Siehe Anm. 10.
 - 16 ANDREWS u. a. 2009, 21.
 - 17 BRUSCHKE 2014a, 30: Die Ausgabe einer Punktwolke ist „fotorealistisch, das heißt ohne sichtbare Pixelung, wenn mit mindestens 300 dpi gedruckt wird.“ Ein gedrucktes Pixel ist bei dieser Auflösung 0,085 mm groß (25,4 mm / 300), dies entspricht 1,7 mm am Objekt bei einem Druckmaßstab von 1:20. Genau dieser Druckmaßstab wird benötigt, um zwei am Objekt 5 mm weit auseinander liegende Linien noch als getrennt wahrzunehmen, denn die im Ausdruck sich ergebenden 0,25 mm Abstand werden durch rd. 3 Pixel repräsentiert und sind somit bereits differenzierbar.
 - 18 SIEDLER – VETTER 2018, 8f. Bei einer Auflösung von 400 dpi ist ein gedrucktes Pixel 0,064 mm groß, was im Maßstab 1:20 1,3 mm am Objekt entspricht.
 - 19 ENGLISH HERITAGE 2011, 10 Tabelle 2.
 - 20 Der hier berechnete Punktabstand stellt für Punktwolken von terrestrischen Laserscannern in der Regel die Untergrenze dar, da diese Größenordnung bei vielen Geräten bereits mit der Standardabweichung der Punkterfassung identisch ist. Ein mittlerer Punktabstand kleiner als die Standardabweichung der Messung ist jedoch nicht sinnvoll, s. ENGLISH HERITAGE 2011, 10; ESSER u. a. 2011, 22; vgl. auch SIEDLER – VETTER 2018, 10–12.
 - 21 Siehe auch die Berechnung der notwendigen Auflösungen für sehr unterschiedliche Fragestellungen bei SIEDLER – VETTER 2018, 8–12.
 - 22 Vgl. etwa die Festlegungen zum minimalen Auftreffwinkel eines Lasermessstrahls auf eine Objektfläche in der vom Austrian Standards Institute 2015 veröffentlichten ÖNORM A6250-2 zur „Aufnahme und Dokumentation von Bauwerken und Außenanlagen - Teil 2: Bestands- und Bauaufnahme von denkmalgeschützten Objekten“. Das Einreichen von Projektbeispielen im Rahmen der Angebotsabgabe wird beispielsweise von SIEDLER – VETTER 2018, 21f. vorgeschlagen.
 - 23 Ein typisches Anwendungsgebiet ist die geometrische Analyse von Kuppel- und Gewölbekonstruktionen, s. etwa Marina Döring-Williams – Hermann Schlimme, Aufnahme und Analyse sphärischer Oberflächen: Die Kuppel von Sant'Andrea della Valle in Rom, in: Heine u. a. 2011, 211–224.
 - 24 Das „waveform processing“ spielt beim Herausfiltern unerwünschter Informationen wie etwa von Vegetation eine entscheidende Rolle, was vor allem das Airborne Laserscanning überhaupt erst sinnvoll macht. Diese Filtermöglichkeiten werden daher in der Literatur vorwiegend diskutiert, seltener wird dagegen auf die Möglichkeit zum Herausfiltern der Punktschweife hingewiesen, s. etwa den Beitrag von Joanna Setkowitz unter <<http://www.3dlasermapping.com/online-waveform-processing-in-terrestrial-laser-scanning-what-exactly-is-it/>> (05.03.2018).
 - 25 Zur Herstellung von Oberflächenmodellen vgl. etwa Klaus Rohrberg, Modellextraktion von Flächen und Körpern aus Punktwolken, in: Thomas Luhmann – Christina Müller (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik (Heidelberg 2007) 227–233. Zum Erstellen von Kopien und zum 3D-Kartieren s. SCHAICH 2006, 106–108.
 - 26 Zur Definition des Orthophotos besonders auch in Abgrenzung zum entzerrten Bild s. etwa WIEDEMANN 2004, 220–222; ANDREWS u. a. 2009, 11–17; SIEDLER – VETTER 2018, 13; Andreas Brusckke (Beitrag in diesem Band).
 - 27 Zur Technik des Laserscanning s. o. Anm. 14.
 - 28 Siehe etwa ESSER u. a. 2011, 21.
 - 29 Siehe die vorige Anm.
 - 30 Siehe das 2009 von der Arbeitsgruppe Bauforschung in der Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland publizierte Arbeitsblatt Nr. 30: „Empfehlungen zum Umgang mit digitalen Baudokumentationen für eine Langzeitarchivierung“ publiziert unter <<http://www.vdl-denkmalpflege.de/veroeffentlichungen.html>> s.v. Arbeitsblätter Historische Bauforschung (05.03.2018).
 - 31 MADER 2001, 101–110; SCHULLER 2001b, 214–226. Die Zukunft wird zeigen, ob die Qualitäten der Handzeichnung auch digital realisierbar werden. In vollem Gange ist die Entwicklung von Tablet-PCs speziell für Künstler, deren haptischen Eingabeigenschaften denen realer Stifte nachempfunden werden.
 - 32 Zu diesen Techniken s. etwa CRAMER 1993, 19–46; WANGERIN 1992, 49–151. Die von Wangerin propagierte Trennung eines aus Maßskizzen bestehenden Aufmaßes vor Ort und einer Reinzeichnung ist allerdings sehr kritisch zu bewerten.
 - 33 Vgl. oben Anm. 30.

Anschrift:

Jürgen Giese M.A.
 Otto-Friedrich-Universität Bamberg
 Institut für Archäologische Wissenschaften, Denkmalwissenschaften und Kunstgeschichte
 Am Zwinger 4–6, 96047 Bamberg
 juergen.giese@uni-bamberg.de

Bildnachweis:

Abb. 1: Gerhard Gresik – Verfasser
 Abb. 2, 5–7, 9, 12–15: Verfasser
 Abb. 3: Gerhard Gresik – Nils Wetter – Verfasser
 Abb. 4: Gerhard Gresik – David Grüner – Anna Luib – Verfasser
 Abb. 8: David Grüner – Claudia Eckstein
 Abb. 10: Noëmi Welter
 Abb. 11: Peter Dresen – Verfasser – Julia Müller – Ute Schwertheim