

Der Einsatz der Image-Laser-Scanning-Technologie am Beispiel der Bauaufnahme des Propylons des Orakelheiligtums der Fortuna Primigenia in Palestrina (Latium)

Gerold EßER

Institut für Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege, Technische Universität Wien

Abstract. Der Einsatz rechnergestützter Lasermesstechniken auf dem Gebiet der historischen Bauforschung ist seit Jahren ein heiß diskutiertes Thema zwischen Verfechtern des Handaufmaßes und jenen, die sich von den neuen Aufnahmemethoden einen erheblichen wissenschaftlichen Fortschritt versprechen.

Hintergrund ist dabei die Frage, ob die moderne „berührungsfreie“ Messtechnologie für den Bauaufnehmer – durch seine „Distanz zum Bauwerk“ - einen Verlust an Kontrollmöglichkeiten zeitigt und dieser so Arbeitsergebnisse minderer Qualität vor allem im Sinne der inhaltlichen Aussagen in Kauf nehmen muss oder ob im Gegensatz dazu die Vorteile einer korrekten geometrischen Erfassung und einer verbesserten Arbeits- und Zeitökonomie überwiegen.

Eine Bauuntersuchung am republikanischen Propylon der antiken Stadt Preneste, durchgeführt vom Institut für Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege der TU Wien, bot die Gelegenheit, in diesem Punkt größere Klarheit zu gewinnen.

Neben der erprobten Vorgehensweise einer kombinierten Anwendung des Handaufmaßes im Detail und seiner Einbettung in ein präzises, mit einer Totalstation erstelltes Punktenetz, sollten hier zum ersten mal auch die Verwendungsmöglichkeiten eines Image-Laser-Scanners ausgelotet werden.

Über 19 Scan-Positionen konnte die antike Ruine des Propylons innerhalb weniger Tage in ihrer komplexen Geometrie und mit einer hohen Punktdichte erfasst werden. Die zusätzlich durch eine Digitalkamera gewonnenen Bildinformationen dienten zum Einfärben der Punktwolke für Visualisierungsaufgaben und zur Erstellung von hoch auflösenden, farbgetreuen Orthophotos der wichtigsten Projektionsebenen.

Im Sinne der selbst gewählten Erfolgskriterien (Datenkompatibilität, Maßhaltigkeit, Auswertbarkeit für 2D-Pläne, Verortung der Ergebnisse im Gesamtgrundriss) stellen die gewonnenen Planunterlagen mit ihrer hohen Präzision, Abbildungsqualität und Zeitökonomie einen erheblichen Fortschritt für die Bauaufnahme geometrisch komplexer Architekturen dar.



Fig. 1 – Palestrina, Propylon, westlicher Monumentalbrunnen, Bauzeit Ende des 2. Jahrhunderts v. Chr.

Vorüberlegungen zur Methodik des Aufmaßprozesses

Der Einsatz rechnergestützter Lasermesstechniken auf dem Gebiet der historischen Bauforschung ist seit einigen Jahren Gegenstand einer kontrovers geführten Diskussion. Während die Verfechter altbewährter Aufnahmefethoden im traditionellen Handaufmaß den einzig gangbaren Weg sehen, um zu Ergebnissen zu gelangen, die einen Erkenntnisgewinn im Sinne bauforscherischer Fragestellungen ermöglichen, erhoffen sich die Anwender modernster Technologien einen erheblichen wissenschaftlichen Mehrwert.¹

Die vom Bauforscher allenfalls sporadisch thematisierte Sorge, dass die moderne Technologie für den Bauaufnehmer – durch seine *Distanz zum Bauwerk*² – einen nicht wieder wett zu machenden Verlust an Kontrollmöglichkeiten zeitigt und dieser so Arbeitsergebnisse minderer Qualität vor allem im Sinne der inhaltlichen Aussagen in Kauf nehmen muss, liegt in der Funktionsweise des mit dem Handaufmaß verbundenen, klassischen Aufmaß- und Analyseprozesses begründet, bei dem *Maß nehmen* und *analytisches Schauen* fast zwangsläufig Hand in Hand gehen, die beiden wichtigsten Bestandteile des Prozesses auf diese Weise also in einer Person vereint sind und darüber hinaus noch fast gleichzeitig ablaufen. Das mit Hilfe dieser bewährten Vorgehensweise zu erwartende Arbeitsergebnis ist in der Regel die noch vor Ort nahezu vollständig fertig gestellte, maßstäbliche und mit Befund-Notierungen angereicherte Bleistiftzeichnung.³

Dieser *ganzheitliche* Aspekt des Handaufmaßes geht nun bei der Verwendung moderner Lasermesstechnologien verloren. Schon das Aufmaß mit der Totalstation – eine Neuerung im Work-Flow, deren Nutzen für die Bauaufnahme seit den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts sehr kontrovers diskutiert wurde und heute zu den anerkannten Methoden zählt - sprengt die Einheitlichkeit des Prozesses zwangsläufig auf, in welchem der Operator des Messinstrumentes seine ganze Konzentration darauf verwendet, in einem ersten Schritt den digitalen Rohplan eines bestimmten Gebäudebereichs zu erstellen. Auf Grund seines Arbeitsortes bei dem Gerät, welches Messungen auch über größere Distanzen zulässt, ist es dem Bearbeiter in dieser Phase nicht möglich, am Detail verifizierte Beobachtungen zur Beschaffenheit des Bauwerks zu machen oder gar festzuhalten. Untersuchungen dieser Art wären demnach separat in einem zweiten Schritt und auch Erfolg versprechender vor dem Hintergrund des nunmehr vorliegenden Gebäudeplans vorzunehmen.

Das im vorliegenden Beitrag zu diskutierende Gebäudeaufmaß mit der neuesten Laser basierten Messtechnik, dem Image-Laser-Scanner oder auch terrestrischen 3D-Scanner, setzt die Tendenz der Aufgabentrennung des *Messens* auf der einen und des *Untersuchens* auf der anderen Seite fort, ja vertieft die Kluft sogar noch um wichtige Aspekte. Die zu beobachtenden negativen Seiteneffekte sind meiner Ansicht nach folgende:

1. Die komplexe Hardware und Software des 3D-Scanners erfordert eine spezialisierte Schulung und zeitaufwändige Einarbeitung des Bedienpersonals. Ein solche gehört in naher Zukunft auf Grund der an den Hochschulen herrschenden Finanznot nicht zu den Standards der Bauforscher-Ausbildung und so ist die Gefahr des Einsatzes von „bauforscherischen Laien“ im Bereich des Gebäudeaufmaßes mit 3D-Scannern verstärkt gegeben.
2. Das Prinzip des Laser-Scannings einer großen Menge undefinierter Punkte zwingt den Bauaufnehmer nicht, sich das Bauwerk an spezifischen Stellen genauer anzusehen – ein Aspekt,

der beim Aufmaß mit der Totalstation durchaus noch zum Tragen kommt -; sein Blick schweift in dieser Phase vielmehr orientierungslos über die noch unbekanntes Gebäudeoberflächen.

3. Die beim Scannen entstehenden Rohdaten erfordern einen – je nach Aufgabenstellung – teils erheblichen Nachbearbeitungsaufwand und Zeitbedarf, bevor dem Bauforscher verwertbare Plangrundlagen vorliegen. Die zeitliche Trennung von *Maßaufnahme* und *Bauanalyse* ist zumindest bei den beiden letzt genannten Aspekten die Folge.

Da es für den Bauforscher aber entscheidend ist, genau zu wissen, *was* und *wie* gemessen wurde, sollte bei dem Versuch, die neue Messtechnik im Felde der Bauforschung einzusetzen, besonderes Augenmerk darauf verwendet werden, der Tendenz der *Distanzierung vom Bauwerk* entgegenzuwirken: Eine zeitliche Aufgabentrennung erscheint zwar unumgänglich, eine Arbeitsteilung mit personellen Konsequenzen aber ist zu vermeiden, weil diese wohl nur zu unerwünschten Ergebnissen führen kann.



Fig. 2, 3 – Bauaufnahmefethoden: Handaufmaß am Nymphaeum `di ponte spedalato` in Palestrina, terrestrisches Laserscanning am Propylon in Palestrina

Diesen ernstzunehmenden Bedenken steht jedoch eine Reihe von Vorteilen gegenüber, die sich aus der Anwendung der neuen Technik ergeben. So ist es mit ihrer Hilfe möglich, die gesamte Bauwerksoberfläche⁴ in einer fast beliebigen Punktdichte räumlich zu erfassen und auszuwerten, was einen erheblichen Fortschritt gegenüber der so manchem Bauforscher verfügbaren photogrammetrischen Methode der 2D-Bildverzerrung bedeutet, die sich mit der ebenen Darstellung von einfachen Gebäudeoberflächen beschäftigt. Als weiterer wichtiger Vorteil schlägt die um ein Vielfaches erhöhte Arbeitsgeschwindigkeit zu Buche, die den Aufnahmeprozess revolutioniert und dem Bauaufnehmer bei gleich bleibendem Zeitbudget einen größeren Freiraum für seine eigentliche Aufgabe, die Untersuchung des Bauwerks, verschafft. Und drittens verspricht das digitale Aufmaß mit dem 3D-Scanner Genauigkeiten im Zentimeter-Bereich bezogen auf das Gesamtgebäude.⁵ Als vielleicht spektakulärstes Novum der neuen Technik jedoch ist die im Falle des in Palestrina eingesetzten 3D-Scanners der Fa. Riegl (Horn, Österreich) geglückte Kombination von Scanning und Photogrammetrie in einem System. Sie ermöglicht die vollständige Integration von Geometrie- und Bild-Daten, die gleichsam als Nebenprodukt die eingefärbte Punktwolke (ein photorealistisches 3D-Modell auf

Punktebasis) und nach weiteren Bearbeitungsschritten die Möglichkeit der Erstellung von Gebäudeschnitten in beliebigen Schnittebenen und von farbigen Orthophotos bietet.⁶

Ob nun das weitgehend automatisierte Aufmass mit dem Image-Laser-Scanner den Bauaufnehmer so weit von seinem Untersuchungsgegenstand entfernt, dass es ihm in der Folge unmöglich wird, zu verlässlichen und aussagekräftigen bauforscherischen Ergebnissen zu gelangen oder ob im Gegensatz dazu - und unter Ausgleich der oben genannten negativen Folgen für den Analyseprozess - die Vorteile einer präzisen und umfassenden geometrischen Aufnahme und einer verbesserten Arbeits- und Zeitökonomie überwiegen? Eine im April 2004 begonnene Bauaufnahme am republikanischen Propylon⁷ des Terrassenheiligtums der antiken Stadt Praeneste,⁸ durchgeführt vom *Institut für Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege der TU Wien, Fachgebiet Architekturgeschichte und Bauforschung*,⁹ bot als Studienprojekt mit dem Schwerpunkt „Forschung in der Lehre“ die Gelegenheit – neben ihrem Hauptzweck der Untersuchung der komplexen Baugeschichte des antiken Gebäudes – neue Untersuchungsmethoden in der Gebäudedokumentation zu erproben und so vertiefende Argumente zur Klärung der oben skizzierten methodischen Fragestellung zu liefern. Bei den vorliegenden Darstellungen handelt es sich um einen ersten Arbeitsbericht, der sich schwerpunktmäßig mit den technischen Möglichkeiten des 3D-Scannings beschäftigt. Eine abschließende Stellungnahme zur Verwendbarkeit der neuen Technologie in der Bauforschung ist für den Zeitraum nach Abschluss der zweiten Aufmasskampagne im Mai 2005 vorgesehen.

Als Mitglied des 2003 gegründeten *TUW-ILSCAN Competence Centers* der TU Wien¹⁰ und der daraus resultierenden Verfügbarkeit eines Riegl Scanners hatte unser *Fachgebiet Architekturgeschichte und Bauforschung* im Rahmen der Bauaufnahme-Kampagne in Palestrina erstmals die Möglichkeit, den Einsatz eines Image-Laser-Scanners in der Lehre zu testen.¹¹ Ziel war die Integration des Scanners in die Bauaufnahme-Philosophie des Instituts, die eine kombinierte Anwendung des Handaufmasses mit Aufnahmeinstrumenten des Low-Tech-¹² und solchen des High-Tech-Segments vorsieht. In diesem



Fig. 4, 5 – Hightech-Messinstrumente: Totalstation Leica TCRM 1103plus und Laserscanner Riegl LMS-Z420i mit Canon EOS 1Ds

Zusammenhang stellte sich die Frage, in welchem Maße sich der IL-Scanner mit der im täglichen Bauaufnahmegeschäfts des Instituts bewährten berührungslos messenden, rechnergesteuerten und motorisierten Totalstation kombinieren lassen würde, die selbst über die halbautomatische Funktion des *Profil-Scans* in jeder beliebigen Raumebene und zusätzlich über das Feature des *Flächen-Scans* verfügt.¹³ Ergebnis der Arbeit mit der Totalstation auf dem Weg zu einem vollwertigen Bauaufnahmeplan ist wahlweise eine in AutoCad lesbare dxf - Datei oder aber ihr maßstäblicher Plot auf Karton oder Zeichenfolie. Welche Form des Outputs auch

immer gewählt wird, er ermöglicht die Weiterbearbeitung und Verdichtung einer Grundrissebene oder eines Vertikalschnitts durch die Handvermessung. Von besonderem Interesse war daher von Anfang an die Frage,

ob auch 3D-Scan-Daten als Basis für eine händische Verdichtung zu Gebäudeschnitten genutzt werden können. Und neben den Schnittdarstellungen bilden die Ansichtsdarstellungen wichtige Medien zur Veranschaulichung von Architekturen oder zur Beschreibung von auf diese bezogenen Untersuchungsergebnissen. So bezog sich der zweite große Interessenkomplex auf die Aussicht, die mit dem bis dato bestehenden technischen Standard erzielbaren Ergebnisse der Photogrammetrie, die digitalen ebenen Entzerrungen einfacher Wandflächen, durch Orthophotos räumlich komplexer Gebäudeoberflächen zu ergänzen, die aus den 3D-Scan-Daten gewonnen wurden. Der Untersuchungsgegenstand, das Propylon in Palestrina, stellte auf Grund seiner vielgestaltigen räumlichen Anordnung und seiner komplexen Höhenentwicklung für die Frage der Gebäudeschnitte und wegen seines stark erodierten Erhaltungszustandes und der wenigen erhaltenen ebenen Gebäudeoberflächen in der Frage der Gebäudeansichten für beide Interessenslagen ein ideales 'Versuchsobjekt' dar.

Das Bauwerk

Das antike *Praeneste* – heute Palestrina im östlichen Latium - mit dem Terrassenheiligtum der Göttin *Fortuna Primigenia* gilt als eine bedeutende Orakelstätte der italischen Halbinsel – vergleichbar mit dem Orakel in Delphi. Während die Stadtgeschichte heute auf Grund der archäologischen Kleinfunde und Inschriften¹⁴ bis in die Anfänge des 8. Jahrhunderts v. Chr. zurückverfolgt werden kann, gehört die monumentale Anlage des einen Großteil der Stadtfläche einnehmenden Heiligtums in ihrer uns bekannten Form einer Umgestaltungsphase am Ende des 2. Jahrhunderts v. Chr. an.

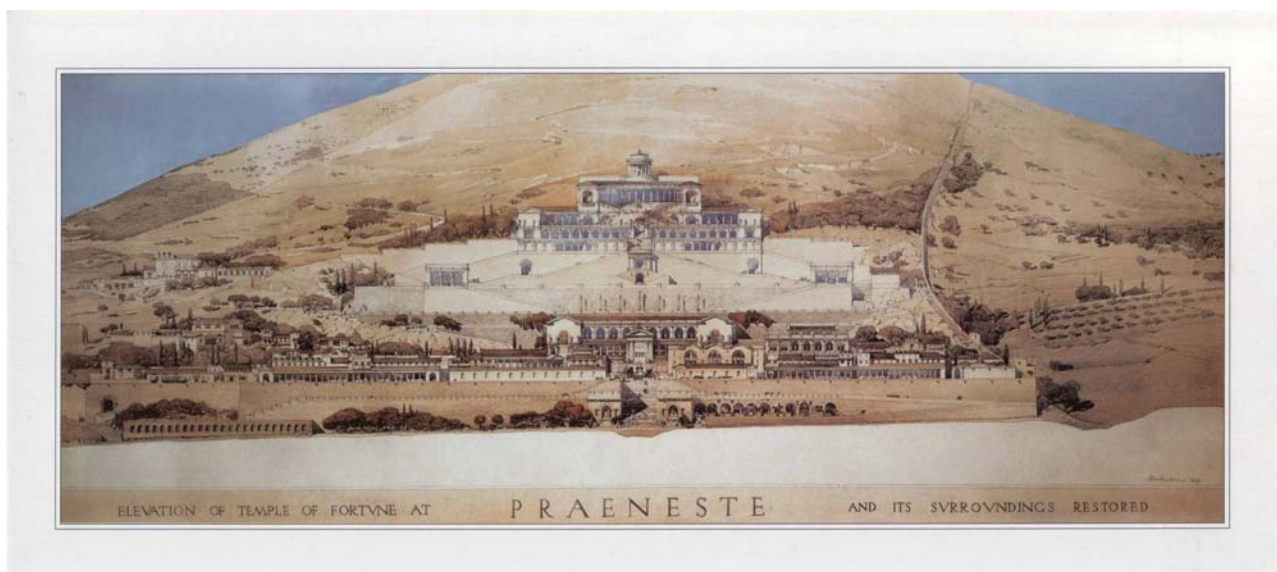


Fig. 6 – Palestrina / Praeneste: Rekonstruktion der Stadtansicht von Bradshaw, 1919

In seiner Gänze am steil abfallenden Südhang des *Monte Ginestro* gelegen, ist das innerhalb der Mauern befindliche Stadtgebiet aufgeteilt in die Wohnstadt – das ursprüngliche Kerngebiet der Besiedlung und spätere zivile Zentrum mit dem Forum und der Basilika – und die darüber thronende, über sieben Geländeterrassen erschlossene, achsensymmetrische Tempelanlage, die der gesamten Stadt ihre Ausrichtung entlang einer nord-südlich orientierten Spiegelachse diktiert. Am Durchstoßpunkt dieser zentralen städtischen Wandelachse mit dem Mauerring der Stadtverteidigungsanlagen bildet das Propylon als monumentaler Torbau den inszenierten Auftakt und einen ersten wichtigen Höhepunkt auf dem Weg der

Pilger zum Heiligtum der Fortuna Primigenia. Das Bauwerk, das seit der Renaissance Studienobjekt einer Vielzahl bekannter Architekten war und auch von den Ausgräbern des 19. Jahrhunderts in ihren Darstellungen der Gesamtanlage der antiken Stadt wiedergegeben wurde,¹⁵ wird seit je her als eine breite Treppenanlage mit zwei flankierenden, über die Mittelachse der Treppe gespiegelten Flügelbauten rekonstruiert. Wenn diese Sichtweise auch bis heute weitgehend geteilt wird, so entbehrt sie doch auf Grund einer fehlenden tiefer gehenden Auseinandersetzung mit dem Bauwerk seit Entstehen der archäologischen und bauarchäologischen Forschungsmethoden einer festen Grundlage, insofern als von einer Treppe heute jede Spur fehlt und von den beiden Flügelbauten nur der westliche – vermutlich eine monumentale Brunnenanlage - in seinen wesentlichen Teilen erhalten ist.¹⁶ Eine fundierte wissenschaftliche Untersuchung¹⁷ stand also noch aus, als eine erste verformungsgerechte Vermessung und bauforscherische Analyse im März 2004 von der TU Wien mit dem Ziel begonnen wurde, diese Lücke zu schließen.



Fig. 7 – Palestrina, Propylon, heutiger Zustand mit dem westlichen Monumentalbrunnen (links), der `leeren´ Mitte an der Stelle, an der sich einst möglicherweise eine breite Treppenflucht befand, und den Resten eines östlichen Torbauwerks (rechts)

Definition der Aufgabe

Ziel des Scannings war die Erstellung eines möglichst vollständigen 3D-Modells des gesamten Bauwerks als Messbasis für die exakte Bestimmung seiner Geometrie und als Grundlage zur Erarbeitung von Planunterlagen für die weitere Bauanalyse. Als Produkte wurden eine eingefärbte Punktwolke zu Visualisierungszwecken, die Extraktion von hoch auflösenden Orthophotos mehrerer Abbildungsebenen und die Erstellung von definierten horizontalen und vertikalen Gebäudeprofilen angestrebt.

Die Kriterien für den Erfolg des Experiments wurden im Vorhinein wie folgt definiert:

1. die Kompatibilität der Daten von 3D-Scanner und Totalstation und damit die Möglichkeit der maßgenauen Verortung von Scannerdaten und Ergebnissen der Nachbearbeitungsprozesse in den herkömmlich erstellten Lageplan;
2. die Maßgenauigkeit der Daten sollte - auf das Gesamtgebäude bezogen - nicht deutlich geringer sein als jene der vergleichbaren Messungen mit der Totalstation, Toleranzbereich 1,0 cm;
3. die Auswertbarkeit der Scanner-Rohdaten im Sinne der bauforscherischen Aufgabenstellung als 2D-Plangrundlagen (Gebäudeschnitte, Orthophotos);
4. eine Zeitersparnis gegenüber den gebräuchlichen Methoden der Aufnahme definierter Punkte und der digitalen ebenen Entzerrung.

Aufnahmestrategie

Genutzt wurde der Scanner LMS-Z420i der Fa. Riegl¹⁸ in Kombination mit der Digitalkamera Canon EOS 1Ds¹⁹. Über 18 Scan-Positionen, die sich sowohl außerhalb als auch innerhalb des Bauwerks befanden,

konnte die antike Ruine in nur drei Mann-Tagen nahezu vollständig aufgenommen werden.²⁰ Von jeder Position aus wurde zunächst ein gering auflösender Scan²¹ erstellt, der zum Auffinden der für die Orientierung der Scans erforderlichen Reflektormarken diente; die sichtbaren Reflektoren wurden anschließend aus dem Datensatz extrahiert und zur exakten Bestimmung ihrer Lage mit einer hohen Auflösung fein gescannt. Danach erfolgte der eigentliche *verwertbare* Scan, dessen Auflösung in Entsprechung eines Punktabstandes von ca. 1 cm am Bauwerk gewählt wurde.²² In einem dritten Schritt wurden mit der auf dem Scanner fest montierten Digitalkamera die das Gebäude abbildenden Photos aufgenommen.²³ Abschließend erfolgte die Orientierung der Scan-Positionen untereinander mit Hilfe der ca. 50 im direkten Umfeld des Baus verteilten, flachen Reflektormarken, die für diesen Zweck mit der Totalstation eingemessen und als übergeordnetes *globales Koordinatensystem* in das Scan-Projekt eingefügt wurden.²⁴ Die Orientierung – auch *Referenzierung* genannt – gelang mit fortschreitendem Einbinden der Einzel-Scans zunehmend auf das gesamte Gebäude bezogen mit bis zu einem maximalen Fehler von 4 mm.²⁵

Um eine bessere Kontrolle der Datenqualität zu ermöglichen, wurden Teile der Nachbearbeitung der Rohdaten – das sg. *Post-Processing* – sodann schon vor Ort durchgeführt, mit der Option der Wiederholung einzelner Scans. So konnte die texturierte Punktwolke nach dem Herausschneiden unerwünschter Daten (Vegetation, Personen, Autos etc.) und nach einer Reduktion der Datenmengen der Einzel-Scans (*Resampling*)²⁶ in einem *View* montiert werden.



Fig. 9 – Palestrina, Propylon, texturierte Punktwolke des westlichen Monumentalbrunnens

Das Kriterium der System-Kompatibilität

Mit der in der Steuer-Software RiSCAN PRO gegebenen Möglichkeit der Transformation der Scan-Daten in das übergeordnete Koordinatensystem der Totalstation ist die Grundlage für eine vollständige Kompatibilität der beiden Systeme gegeben. Über den Export im dxf-Format²⁷ sind damit die Punktwolke sowie Teile von dieser und all ihre Folgeprodukte in den gängigen Zeichenprogrammen mit den übrigen Daten der Bauaufnahme vergleichbar, können also in den allgemeinen Lageplan eingepasst werden und stehen zur Weiterbearbeitung im Rahmen der Bauanalyse zur Verfügung.

Der Laserscanner - ein Messinstrument in der Bauforschung?

Im Arbeitsfeld der historischen Bauforschung werden dem Image-Laser-Scanner seine Qualitäten als im Bauaufnahme-Prozess nutzbares Messinstrument bis heute abgesprochen.²⁸ Die Vorbehalte beziehen sich auf folgende mehr oder minder konkret zu greifende Argumente:

1. Die Punktwolke ist ein *diffuses und unkalkulierbares Gebilde*.
2. Die Genauigkeit der Messergebnisse ist zumindest in der Bauaufnahmepraxis noch nicht nachgewiesen.²⁹
3. Der Weg von der Punktwolke zum zwei-dimensionalen architektonischen Plan, in dem Messungen erst wirklich einfach durchführbar sind, ist noch nicht gegeben.

Hintergrund besonders für den unter Punkt 1 formulierten Vorbehalt ist die Tatsache, dass ein 3D-Scan aus einer Vielzahl undefinierter - weil vom Bauaufnehmer nicht explizit festgelegter - Punkte besteht, die das aufzunehmende Objekt sozusagen nur *zufällig* mit abbilden.³⁰ Daraus ergeben sich auch die Schwächen des Scans in der Abbildung von Kanten, während kontinuierliche Flächen durch den Scan sehr gut repräsentiert werden.³¹

Die im Folgenden dokumentierten Ergebnisse der Bauaufnahme in Palestrina belegen, dass die Entwicklung des Scannings im Bezug auf die unter Punkt 2 und 3 genannten Argumente wichtige Schritte vorangekommen ist: Die in Palestrina erreichte Referenzierung der Scans mit einer Standardabweichung von 4 mm garantiert, dass sich keine schwerwiegenden Messfehler aus der „Montage“ der Einzel-Scans ergeben. Wenn sich die Abbildungsgenauigkeit der Einzelmessungen bei +/-10 mm einpendelt, so ist dieser Wert allein auf die Streckenmessung – also das Maß der Entfernung in Richtung des Messstrahls – bezogen, während Horizontal- und Vertikalwinkel des gemessenen Punktes exakt bestimmt werden. Bezogen auf einen Gebäudeschnitt würde also im idealisierten Fall eines Erdgeschoss-Grundrisses, bei dem sich der Scanner-Standpunkt nahezu in der Schnittebene befindet und die Messstrahlen orthogonal auf die Gebäudeoberfläche treffen, statt einer eindeutigen „Punkte-Spur“ ein „Punkte-Band“ abgebildet, welches in seiner Breite in etwa der statistischen Messgenauigkeit von +/- 10 mm entspricht.

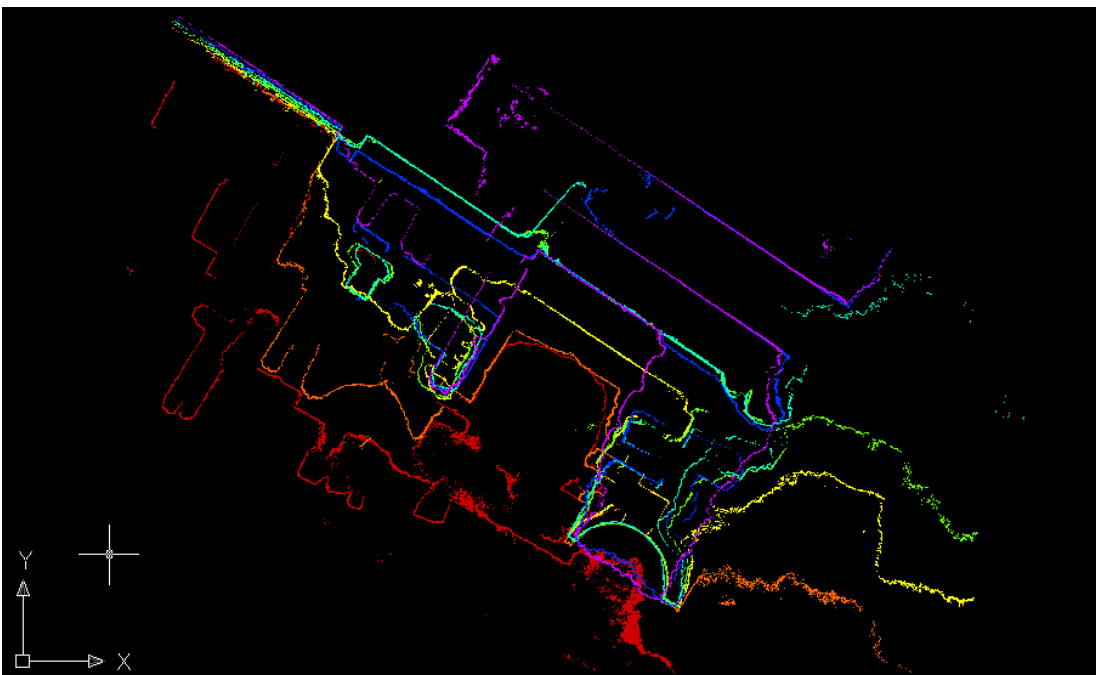


Fig. 10 - Palestrina, Schichtenmodell des komplexen räumlichen Gebildes des Propylons, Selektion einer Anzahl von horizontalen Scheiben der Höhe 2 cm

Die Messergebnisse aus Palestrina zeigen folgendes Bild: Ähnlich der Darstellungsweise einer Computer-Tomographie aus dem Bereich der Medizin lässt sich eine Punktwolke in genau kalkulierbare ebene Scheiben zerlegen.³² Je geringer die Höhendimension einer ausgeschnittenen Scheibe angenommen wird, desto präziser beschreibt das resultierende Punkteband bei eventuell geneigten oder unebenen Wandoberflächen die tatsächliche Außengrenze des Bauwerks in der definierten Schnittebene. Eine Reduktion der Scheibenhöhe auf 2 cm³³ erzeugt in unserem Beispiel eine Breite des Punktebandes von ebenfalls 2 cm, in manchen Bereichen noch darunter. Die Überlagerung des Punktebandes der IL-Scan-Daten mit der Punktespur der Totalstation zeigt (siehe Abb.):

1. eine fast perfekte Übereinstimmung der Daten beider Systeme (in schätzungsweise 90% der Fälle ist ein Oszillieren des Punktebandes des 3D-Scanners um die Punktespur der geodätischen Daten herum zu beobachten),
2. das erwartete „Rauschen“ von +/- 10mm des IL-Scans,
3. in wenigen Bereichen geringe Abweichungen von dem statistisch zu erwartenden Verhältnis zwischen IL-Scan-Daten und TOTAL-Daten.

Weitere Tests der Verhaltensweisen der beiden Messsysteme auf unterschiedlichen Oberflächentypen können die so erzeugten Punktebänder des IL-Scanners für den Bauaufnehmer noch kalkulierbarer machen. Schon jetzt kann aber gesagt werden, dass die Maßhaltigkeit und auch Auswertbarkeit der 3D-Scan-Daten für vertikale und horizontale Gebäudeschnitte durchaus an die Möglichkeiten der Totalstation heranreicht, dass also der Image-Laser-Scanner als ein im Bauaufnahmeprozess einsetzbares und ernstzunehmendes Messinstrument erachtet werden kann.

Die dargestellten Erfahrungen lassen in ihrer Konsequenz die folgenden Auswirkungen für den Bauaufnahmeprozess vermuten:

1. Ein koordiniertes Zusammenwirken von Totalstation und 3D-Scanner würde eine weitere Beschleunigung des Aufmassprozesses bedeuten, da es mit dem 3D-Scanner möglich wird, von einem Standort aus Daten gleich mehrerer Schnittebenen aufzunehmen; die relativ kurze Nachbearbeitungszeit, die zur Erstellung der Profilscheiben benötigt wird, fällt dabei kaum ins Gewicht.³⁴
2. Der IL-Scanner würde in dieser Kooperation wesentliche Aufgaben der Totalstation übernehmen. Jedoch sollten weiterhin die für die Bauanalyse wichtigen Punkte am Bauwerk definiert und mit der Totalstation eingemessen werden. Die zusätzliche Bilddokumentation dieser Punkte - über die Album-Funktion der Steuerungssoftware TOTAL bei der Messung möglich - erscheint weiterhin sinnvoll.
3. Nachteil der Entwicklung wäre allerdings ein erhöhter organisatorischer Aufwand beim Handling des mitzuführenden „Maschinenparks“ und eine noch größere Abhängigkeit von einer immer komplexeren und damit unter Umständen auch anfälligen Technik.

Orthophotos aus Scan-Daten

Orthophotos stellen wichtige Plangrundlagen für die Bauanalyse dar. Sie sind bis heute die Domäne von Photogrammetern und Vermessern; ihre Erstellung ist auf Grund der teuren, sehr spezifischen Technik und der erforderlichen speziellen Fachkenntnisse ein dem Bauforscher nur schwer erschließbares Arbeitsgebiet. Orthophotos setzen in aller Regel eine gesonderte Beauftragung voraus und haben daher einen erhöhten

Zeitbedarf bei der Projektabwicklung und einen größeren organisatorischen Aufwand - für die Koordination der Arbeitsabläufe etc. - zur Folge.

Verschiedene Software-Pakete ermöglichen seit kurzem die Weiterverarbeitung von Scan-Daten zu hoch auflösenden Orthophotos. Getestet wurden im Zuge der Bearbeitung der Daten aus Palestrina die Entwicklungen der Fa. Riegl, deren Feature in der Scanner-Betriebssoftware RiSCAN PRO enthalten ist und das Modul ORTOPHOTO der Fa. Geodata,³⁵ das derzeit unter dem Namen CITYGRID in RiSCAN PRO eingearbeitet wird.³⁶ Das verschafft dem Bauforscher die Möglichkeit, die Erstellung von Orthophotos quasi im *Do-It-Yourself*-Verfahren entsprechend seinen Anforderungen zu kontrollieren und direkt abzurufen.

Zur Vorgehensweise: Voraussetzung sind referenzierte, ge-„resample“-te Scans³⁷ und kalibrierte und entzerrte Photos³⁸ der abzubildenden Gebäudeteile. Der nächste Arbeitsschritt unterscheidet die beiden Programm-Module: während die Bearbeitung in RiSCAN PRO die händische Erstellung von *meshes* (Dreiecksvermaschungen) und deren Texturierung durch entzerrte Photos erfordert, werden in CITYGRID die zur Weiterverarbeitung ausgewählten Scans in so genannte „object views“ geladen. Nach der Definition der Projektionsebene, der Begrenzung des Projektionsraumes und der Bestimmung der erwünschten Bildauflösung beginnt der Rechenvorgang zur Erstellung der Orthophotos.



Fig. 11 – Palestrina, Propylon, westlicher Monumentalbrunnen, Südseite, Orthophoto der Hauptansichtsseite als Produkt aus Laserscanning und Photogrammetrie, Verwendung dreier Scanpositionen

Die Bearbeitung der Scan-Daten der Hauptansichtsseite des Propylons in Palestrina brachte folgende Resultate: sehr gute Abbildungsergebnisse (Schärfe, Auflösung) mit der Qualität des photographischen Ausgangsmaterials sind bei Verwendung nur eines Scans in den geschlossenen, kontinuierlichen Flächen bei beiden Programm-Modulen zu erwarten. Allerdings entstehen durch die Tiefenstaffelung der Fassade in

der Projektionsansicht der sichttoten Bereiche Informationslücken und gerade an den Abbruchkanten zu diesen Bereichen ist die Wiedergabe unbefriedigend.

Die Berechnung eines Orthophotos aus mehreren Scans schließt Lücken aus sichttoten Bereichen. Mit CITYGRID sind auch bei dieser Aufgabenstellung sehr scharfe Ergebnisse erzielt worden, auch vermittelt dieses Programm zwischen den aus unterschiedlichen Besonnungssituationen resultierenden abweichenden Materialfarben.

Im schleifenden Schnitt aufgenommene Scan-Bereiche führten im Orthophoto allerdings zu Problemen: eine stark abfallende Auflösung der Bilder zwischen orthogonal und schleifend aufgenommenen Bereichen bis hin zu verschwommen wirkenden Bildteilen sind die Folge. Hier ist der Anwender gefordert, der diese unerwünschten Ergebnisse – in den Grenzen des aufzunehmenden Bauwerks³⁹ - durch eine umsichtige Aufstellung des Scanners vermeiden kann.

Der Vergleich aber von Ergebnissen der beiden unabhängig voneinander entwickelten Software-Module zeigt ihre nahezu perfekte geometrische Übereinstimmung und damit im Sinne eines mit Bildinformationen ausgestatteten architektonischen Plans die Vollwertigkeit des Messergebnisses. Orthophotos aus 3D-Scan-Daten sind also – neben den Gebäudeschnitten – die zweite Form von zweidimensionalen Planunterlagen, auf die zukünftige Bauaufnahmen werden zurückgreifen können.

Resumée

Zusammenfassend kann gesagt werden: das terrestrische Laserscanning hat – zumindest im Falle der verwendeten Hard- und Software - deutliche Schritte hin zu seiner Verwendbarkeit im Arbeitsfeld der Bauforschung und Denkmalpflege gemacht. Die definierten Erfolgskriterien der Daten- und Systemkompatibilität, der Maßhaltigkeit und Genauigkeit der Messergebnisse und der Möglichkeit der Erstellung von zweidimensionalen Plangrundlagen für Grundriss, Schnitt und Ansicht, die für einen Gewinn bringenden Einsatz in der Gebäudedokumentation sprechen, wurden in der untersuchten Systemkonstellation durchweg erfüllt. Insbesondere die produzierten Orthophotos und Gebäudeprofile stehen nun für einen zweiten Test zur Verfügung: ihre Bearbeitbarkeit als Plangrundlagen für die Bauanalyse. Eine zweite Aufmasskampagne im Jahr 2005 wird uns in diesem Punkt – so ist zu hoffen – größere Klarheit verschaffen. Lediglich das Kriterium einer verbesserten Zeitökonomie ließ sich unter den gegebenen Umständen der erstmaligen Anwendung des Scanners wegen der mangelnden Arbeitsroutine noch nicht abschließend bewerten. Erst weiter gehende Erfahrungen mit dem 3D-Scanner in zukünftigen Bauaufnahmen werden hier verlässliche Aussagen möglich machen. Die enge Zusammenarbeit zwischen Hardware-Produzenten, Software-Entwicklern und Anwendern - hier die Fa. Riegl und das TUW-ILSCAN Competence Center der TU Wien - hat sich jedenfalls gelohnt, ermöglichte sie doch die Optimierung der Technik im Hinblick auf das aus dem Blickwinkel aller Beteiligten *Wünschenswerte* und *Sinnvolle*.

Quellen

- Amt, S. 2001. Hochtechnisierte Verfahren der Bauaufnahme. Eine kritische Betrachtung. In: Weferling, U., Heine, K., Wulf, U. (Hrsg.). Von Handaufmass bis Hightech - Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung. Interdisziplinäres Kolloquium, Cottbus, 23.-26. Februar 2000: 95-98
- CIPRARI, A., Duca G. 2003. L'ex Seminario Vescovile di Palestrina. Tesi di Laurea in Architettura, Biblioteca Fantoniana Palestrina.
- Delbrueck, R. 1907-1912. Hellenistische Bauten in Latium. I-II
- Fasolo, F., Gullini, G. 1953. Il santuario della Fortuna Primigenia a Palestrina. I-II

- Heine, K. 2001. Aufnahmeverfahren am Beispiel der frühbyzantinischen Siedlungen von Akören. In: Weferling, U., Heine, K., Wulf, U. (Hrsg.). Von Handaufmass bis Hightech - Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung. Interdisziplinäres Kolloquium, Cottbus, 23.-26. Februar 2000: 175-181
- Juretzko, M. 2002. The System TOTAL for Recording the Geometry and Image Data of Historic Buildings and Monuments. In: J. Albertz (Hrsg.). Proceedings to the CIPA Symposium 2001 in Potsdam: 611-613
- Klein, U. 2001. Bauaufnahme und Dokumentation
- Gatti, S., Agnoli, N. 2001. Palestrina. Santuario della Fortuna. Museo Archeologico Predestino. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato
- Kähler, H. 1958. Das Fortunaheiligtum von Palestrina Praeneste. In: Annales Universitatis Saraviensis. Philosophie 7, 3-4
- Langheinrich, L. o.J. Terrestrisches Laserscanning und Streifenprojektionsmethode am Beispiel des Romanischen Schottenportals Regensburg. Diplomarbeit, Unveröffentlichtes Manuskript.
- QUILICI, L. 1980. L'impianto urbanistico della città bassa di Palestrina. In: Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts, Römische Abteilung, 87:171-214
- Riemann, H. 1985. Zur Südmauer der Oberstadt von Praeneste. In: Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts, Römische Abteilung, 92: 151-168
- Schuller, M. 1990. Bauforschung. In: Der Dom zu Regensburg - Ausgrabung, Restaurierung, Forschung. Kunstsammlungen des Bistums Regensburg, Band 8:168-223
- Schuller, M. 2001. Mehr Denken statt nur Messen. In: Weferling, U., Heine, K., Wulf, U. (Hrsg.). Von Handaufmass bis Hightech - Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung. Interdisziplinäres Kolloquium, Cottbus, 23.-26. Februar 2000: 213-226
- Wangerin, G. 1992. Bauaufnahme - Grundlagen, Methoden, Darstellung. 2. verb. und erw. Aufl.
- Weferling, U., Heine, K., Wulf, U. (Hrsg.) 2001. Von Handaufmass bis Hightech - Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung. Interdisziplinäres Kolloquium, Cottbus, 23.-26. Februar 2000
- Wulf, U. 2001. Mit welcher Methode sollen wir aufnehmen? In: Weferling, U., Heine, K., Wulf, U. (Hrsg.). Von Handaufmass bis Hightech - Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung. Interdisziplinäres Kolloquium, Cottbus, 23.-26. Februar 2000: 153-164

¹ Eine sehr ausführliche Dokumentation von Beiträgen zu dieser Themenstellung findet sich im Begleitband des Interdisziplinären Kolloquiums „Von Handaufmass bis Hightech. Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung“ (WEFERLING 2001), vgl. eben dort insbesondere die eher High-Tech-kritischen Beiträge von M. Schuller (SCHULLER 2001) und S. Amt (AMT 2001). Zu den Vortragenden, die den Wert berührungsloser Aufnahmeverfahren betonen, vgl. u.a. U.Wulf (WULF 2001) und K.Heine (HEINE 2001).

² G. Wangerin erkennt in ihrem Grundlagenwerk durch „die CAD-Auswertung“ lediglich „eine größere Distanz zum Objekt“, deren Folgen aber erscheinen noch nicht sehr greifbar (WANGERIN 1992: 48). U. Klein wägt sehr deutlich die Pro und Contra der unterschiedlichen Aufmassmethoden gegeneinander ab, ohne jedoch die Frage der *Distanzierung des Bauaufnehmers* anzuschneiden (KLEIN 2001). S. AMT weist allerdings deutlich auf das bei berührungslosen Aufmassstechniken system-immanente Problem der „Distanz zum Objekt bei der Vermessung“ und die daraus folgenden Gefahren für den Aufnahmeprozess hin (AMT 2001).

³ M. Schuller beschreibt den Prozess des Messens, Zeichnens und analytischen Kombinierens sehr anschaulich in seinem Beitrag „Bauforschung“ in dem Band „Der Dom zu Regensburg. Ausgrabung, Restaurierung, Forschung“ (SCHULLER 1990:168 und 172)

⁴ Eine Einschränkung ergibt sich aus der technischen Notwendigkeit, 3D-Scanner für bestimmte Entfernungsbereiche zu optimieren. Daraus resultiert im Maßstabbereich von Architekturen mit ihren teils erheblichen Gebäudemmaßen einerseits und ihren konstruktiven und gestalterischen Details andererseits die erwünschte Nutzbarkeit unterschiedlicher Scannertypen wie dem terrestrischen Laserscanner, der hier ca. 90% der Aufgaben bewältigt, und dem Streifenlicht-Scanner für den Nahbereich. Zur gemeinsamen Nutzung beider Systeme vgl. den Beitrag von M. Schaich in dieser Publikation, sowie die Diplomarbeit von L. Langheinrich (LANGHEINRICH o.J.)

⁵ Der im Rahmen unserer Bauaufnahme eingesetzte Scanner wendet das Impuls-Laufzeit-Verfahren an und arbeitet mit einer Entfernungsgenauigkeit um +/- 10mm. Vgl. Angaben des Herstellers Fa. Riegl, Horn unter <<http://www.riegl.co.at>>

⁶ Der Vollständigkeit halber sollen an dieser Stelle auch weitere aus 3D-Scan-Daten erzeugbare Produkte wie z.B. das texturierte Mesh und das Drahtgittermodell bzw. CAD-Modell zumindest Erwähnung finden; mögliche Anwendungen in der Bauforschung wurden allerdings vom Autor nicht eingehend untersucht und können daher in diesem Aufsatz auch nicht behandelt werden.

⁷ Das griechische Wort *própylon* wird im Italienischen mit *propileo* übersetzt. In der deutschen Literatur ist für den Torbau in Palestrina der Begriff *Propylon* gebräuchlich, vgl. (RIEMANN 1985)

⁸ Das Projekt war nur durchführbar dank der Kooperationsbereitschaft der Soprintendenza dei Beni archeologici ed architetonici per il Lazio, Dr.ssa Sandra Gatti und des Circolo Culturale Prenestino „R.Simeoni“

⁹ das Fachgebiet steht unter der Leitung von Univ.-Prof. M.A. Dr.Ing. Marina Döring-Williams, Projektleitung in Palestrina Univ.Ass. Dipl.-Ing. Arch. Gerold Eßer, Studienassistentin Dott.Arch. Vittoria Capresi

¹⁰ Das *TUW-ILSCAN Competence Center* wird neben dem *Institut für Kunstgeschichte, Bauforschung und Denkmalpflege* durch das Institut für Stadt- und Regionalforschung, das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, das Institut für Computergraphik und Algorithmen und das Institut für Städtebau (alle TU Wien) getragen

¹¹ Der interdisziplinären Zusammenarbeit mit dem *Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung* der TU Wien, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Karl Kraus, ist es zu verdanken, dass der Scanner in Palestrina von Dipl.Ing.cand. Thomas Redl im Rahmen seiner Diplomarbeit betrieben und die Rohdaten zu einem Teil schon vor Ort ausgewertet werden konnten.

¹² Einfache und intuitiv bedienbare Messgeräte wurden von der Arbeitsgruppe Geodäsie der Ruhr-Universität Bochum, Prof. Dr.-Ing. Michael Scherer, als Prototypen für die TU Wien hergestellt. Der sg. „Orthovector“ sendet - auf einem Kurbelstativ im Raum aufgestellt - ein räumliches, einnivelliertes und horizontal drehbares Achsenkreuz aus Laserstrahlen aus und erlaubt von diesem Standpunkt aus die Streckenmessung in der so definierten horizontalen Ebene. Der sg. „Polarvector“ stellt eine Erweiterung des gleichen Prinzips dar und ermöglicht die kombinierte Horizontalwinkel- und Streckenmessung. Bei beiden Geräten werden die gemessenen Werte – wie beim Handaufmass – händisch in die vermasste Skizze oder maßstäbliche Zeichnung übertragen.

¹³ Für die TU Wien wurde von der *Arbeitsgruppe Geodäsie der Ruhr-Universität Bochum*, Prof. Dr.-Ing. Michael Scherer, eigens ein TCRM1103plus der Fa. Leica als Prototyp mit Kameras verschiedener Brennweiten ausgestattet, welche die Bilddokumentation der gemessenen Punkte und die Steuerung des Tachymeters über den Bildschirm des Notebooks ermöglichen. Zur Steuerung des TCRM dient die Software *TOTAL*. Das Programm verfügt u.a. über die Funktion der ebenen Entzerrung auf der Basis der gemessenen Punkte und ermöglicht es, Kommentare und Notizen mit Messpunkten zu verknüpfen. Eine Beschreibung des Systems findet sich bei (JURETZKO 2002)

¹⁴ Die Ausführungen in diesem Teil folgen der zusammenfassenden Darstellung der Stadtgeschichte Palestrinas und ihres Heiligtums bei (GATTI, Sandra 2001). Siehe auch (KÄHLER 1958), (QUILICI 1980) und (RIEMANN 1985)

¹⁵ unter ihnen Pirro Ligorio, Andrea Palladio, Pietro da Cortona, Jean-Nicolas Huyot, Guènepin, L. Rossini, Paul Blondel; vgl. dazu die sehr vollständige Zusammenstellung der graphischen Darstellungen des Fortuna-Heiligtums in Palestrina in (CIPRARI 2003)

¹⁶ vgl. (RIEMANN 1985: 158)

¹⁷ Die wichtigen Studien Delbrücks zu den spät-hellenistischen Konstruktionen in Rom und Latium zu Beginn des 20. Jahrhunderts sowie die Ausgrabungen F. Fasolos und G. Gullinis nach den Zerstörungen des 2. Weltkriegs befassten sich – nach Kenntnis des Autors – nicht mit dem Propylon der Stadt, vielmehr standen bei erstem das damals sg. *Untere Heiligtum* - also die Bauwerke des Forums -, bei letzteren die durch die Kriegsbomben *freigelegten* baulichen Reste des Heiligtums der Fortuna im Zentrum der Aufmerksamkeit. Vgl. (DELBRUECK 1907) und (FASOLO 1953)

¹⁸ Technische Daten: 360° Horizontaler Aufnahme-Winkel, 80° vertikaler Aufnahme-Winkel, 8.000 - 12.000 Punkte / Sek., Messdistanz 2 - 800 Meter, minimale Schrittweite: horizontal 0,004°, vertikal 0,004°; weitere technische Daten auf der Homepage des Herstellers: <<http://www.riegl.com>>

¹⁹ Technische Daten: 4.064 x 2.704 Pixel, Objektiv-Brennweite 20mm

²⁰ Dank der Lage des Bauwerks am Hang waren auch Aufnahmen von erhöhten Positionen aus möglich, sodass die der Aufsicht angehörenden horizontalen und geneigten Flächen wie Dächer, Gelände etc. gescannt werden konnten. Zur Möglichkeit einer tatsächlich vollständigen Erfassung eines Objekts vgl. aber einschränkend Fußnote 4.

²¹ der sg. „*Overview-Scan*“ besitzt eine voreingestellte Winkel-Schrittweite von 0,2°.

²² Der sg. „*Panorama-Scan*“ kann mit der voreingestellten Winkel-Schrittweite von 0,12° ausgeführt werden. Seine Auflösung ist aber ebenso gut frei wählbar und sollte dem Verwendungszweck der gewünschten Zwischen- und Endprodukte angepasst werden, da bei zu kleiner Winkel-Schrittweite die produzierte Datenmenge quadratisch wächst.

²³ Die Brennweite des Objektivs sollte dabei dem vertikalen Öffnungswinkel des Scanners entsprechen. Über die in der „*Camera-Calibration*“ und „*Mounting-Calibration*“ definierten festen Bezugs-Parameter zwischen den räumlichen Punkten des Scans und den ihnen entsprechenden Pixeln des Photos berechnet die Steuerungssoftware des Scanners „RISCAN PRO“ später das „Einfärben“ der Punktwolke oder die Texturierung der „*Meshes*“ (Dreiecks-Vermaschungen), die für die Erstellung von Orthophotos benötigt werden.

²⁴ Neben der Tatsache, dass auf diese Weise die Scan-Daten in das Koordinatensystem der Totalstation transferiert werden und so die spätere gemeinsame Nutzung der Daten beider Systeme ermöglicht wird, ergibt sich aus diesem Schritt ein zweiter, nicht unwesentlicher Vorteil: die 3D-Scans und alle ihre Folgeprodukte sind fortan nämlich horizontalisiert; eine Möglichkeit, die derzeit bei ausschließlicher Nutzung des Laser-Scanners noch nicht alle Typen bieten.

²⁵ Der ausgemittelte Fehler wird als *Standard-Abweichung* bezeichnet. Diese Größe besagt, dass 68% aller Messwerte - in unserem Beispiel - mit maximal 4 mm Abweichung zugeordnet werden konnten. Weitere 31% der Werte weisen eine größere Abweichung bis zum 3-fachen der Standardabweichung auf (hier also bis 12mm), 1% der Messwerte weichen noch stärker ab.

²⁶ Das „*resampling*“ ist erforderlich, um ein besseres Handling der Punktwolke, die am effektivsten in der Bewegung gezeigt werden kann, zu erreichen.

²⁷ Der Export als dxf gelingt über einen Zwischenschritt, in dem die gewählten Scan-Positionen in einen „*Object-View*“ geladen werden.

²⁸ Die technische Entwicklung hat allerdings erst in den letzten Jahren sehr an Fahrt gewonnen, so dass bis heute nur wenige Beiträge zum Thema vorliegen. So formuliert U. Klein noch im Jahre 2001 - nach Nennung einiger Vorbehalte gegen die neue Technik - abschließend: „...bis zu einem kompletten Gebäudeaufmass mit Scannern ist aber noch ein weiter Weg zurückzulegen“ (KLEIN 2001, S. 47)

²⁹ Die Messgenauigkeit (range accuracy) des Riegl-Scanners LMS-Z420i wird in seinem Datenblatt mit +/- 10 mm (standard deviation, single shot) angegeben.

³⁰ Die undefinierten Punkte der Punktwolke bilden den Gegensatz zu den bei Einzelpunktmessung genau definierten Punkten der Totalstation. Der Profil-Scan der Totalstation ist in dieser Hinsicht sozusagen ein Mittelding zwischen Punktwolke und Einzelpunkt: beim Profil-Scan sind die Scan-Ebene, sowie Startpunkt und Endpunkt des Profils genau bestimmt, während die zwischen Start und Ende befindlichen Punkte in einer Raumachse – beim Horizontal-Scan ist das die Z-Achse, auf der die Punkte innerhalb eines zu definierenden Bereichs gesucht werden - schwerer greifbar sind.

³¹ Die Strategie der Fa. Riegl verbindet das 3D-Scanning mit der Photogrammetrie. Dort, wo der Laser-Scanner unstrukturierte Freiformflächen durch eine Punkteanzahl vollständig und präzise beschreibt, zeigt die Photogrammetrie ohne Kontraste erzeugende Beleuchtung Schwächen. Das Photo hingegen trägt in dieser „Kooperation“ – neben seiner generellen Aufgabe, feinstrukturierte Texturen zu liefern – dazu bei, Gebäudekanten ungebrochen darzustellen, welche wiederum dem Scanner Probleme bereiten können.

³² Die Operation wurde durch Export der Scan-Daten als dxf und Bearbeitung im AutoCad durchgeführt.

³³ Diese Höhe entspricht einer mit Rücksicht auf die in Teilen stark beschädigten, sehr unebenen Wandflächen des Propylons realisierbaren maximalen Ebenendicke bei der Erstellung eines Profil-Scans mit der Totalstation, Software TOTAL der Ruhr-Universität Bochum, vgl. Endnote 12 und den zugehörigen Haupttext.

³⁴ Es wäre allerdings erstrebenswert, die Erstellung von Profilscheiben in definierten Schnittebenen im Steuerprogramm des 3D-Scanners zu realisieren, da größere Datenmengen im Zeichenprogramm nur schwer bearbeitet werden können.

³⁵ Geodata, Leoben (Österreich). Homepage: <www.geodata.at>

³⁶ An dieser Stelle möchte ich der Fa. Riegl für die freundliche Unterstützung bei der Bearbeitung der Daten aus Palestrina danken, insbesondere Hr. Nikolaus Studnicka und Hr. Anton Wagenonner, die mir wiederholt mit technischem Rat zur Seite standen.

³⁷ Das „*resampling*“ meint die Verkleinerung der Datenmenge durch Eliminierung eines festzulegenden Anteils an Punkten, vgl. auch Fußnote 19. Das „*resampling*“ der Einzel-Scans wird angeraten, weil Orthophotos und *meshes* aus nicht ge-„*resample*“-ten Scans Löcher in den Flächen aufweisen können.

³⁸ Der auch im deutschen Sprachgebrauch für den Prozess des Entzerrens der Photos gebräuchliche - weil sehr kurze - englische Ausdruck lautet „*undistort*“. Gemeint ist, dass die beim Photographieren durch die Wölbung der Photo-Optik entstehende Linsenverzeichnung eliminiert wird. Das Kamera-Modell entspricht in diesem Fall jenem einer idealen Lochkamera.

³⁹ Grenzen setzen Räume einer Breite unterhalb von 4,0 Metern, da Scan-Abstände < 2,0 Metern keine verlässlichen Messergebnisse mehr liefern, vgl. dazu auch Endnoten 4 und 17.