

Erfahrungen mit 3D Scanning am i3mainz

Andreas MARBS

Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren haben 3D-Scanning-Methoden bei der Erfassung und Vermessung von regelmäßigen (z.B. Industrie, Anlagenbau...) und unregelmäßigen Objekten (z.B. Skulpturen, Denkmäler...) immer größere Bedeutung erlangt. Die Frage tauchte auf: Kann 3D Scanning herkömmliche Vermessungsmethoden wie Nahbereichsphotogrammetrie oder Tachymetrie ersetzen? Mit dieser Frage hat sich auch das i3mainz, Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik der Fachhochschule Mainz, beschäftigt.

Seit etwa zwei Jahren werden am i3mainz 3D-Scanner zur Aufnahme von Objekten vor allem in Architektur, Archäologie und Denkmalpflege, aber auch in anderen Bereichen, eingesetzt. Dazu konnten drei unterschiedliche Geräte beschafft werden: der Triangulationslaserscanner *S25* der Firma *Mensi*, der Ranging-Laserscanner *Cyrax 2500* von *Leica Geosystems* und der Lichtstreifenprojektionsscanner *Atos II* der *Gesellschaft für Optische Messtechnik (GOM mbH)*. Diese Geräte sind völlig unterschiedlich hinsichtlich ihrer Funktionsprinzipien, Spezifikationen und typischen Anwendungen.

Im vorliegenden Dokument sollen anhand von Projekten mit den 3D-Scannern Probleme bei der Aufnahme und Auswertung aufgezeigt werden. Bei den gescannten Objekten handelt es sich um eine Höhle, die Fassaden einer Kirchenruine, ein Grabmal (Kenotaph) sowie um steinzeitliche Artefakte. Es wird auf Software-Produkte eingegangen, die für die Bearbeitung von unregelmäßigen Oberflächen geeignet sind.

Ein Problempunkt bei der Beschaffung des richtigen 3D-Scanners ist die Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Geräten. Gemeinsame Prüfverfahren für 3D-Scanner gibt es bislang nicht. Das i3mainz hat deswegen einen Testparcours für Laserscanner eingerichtet, um die auf dem Markt befindlichen Geräte hinsichtlich ihrer Eigenschaften zu untersuchen.

1 Scanner am i3mainz

Das Institut für Raumbezogene Informations- und Messtechnik (i3mainz) der Fachhochschule Mainz beschäftigt sich mit Forschungs- und Entwicklungsaufgaben sowie mit Technologietransfer vor allem auf den Gebieten Raumbezogene Informationssysteme, Digitale Bildverarbeitung, Digitale Photogrammetrie, 3D-Scanning, Fernerkundung und Satellitengestützte Punktbestimmung. Das Institut kann auf die verschiedenartigsten Systeme zur Erfassung und Prozessierung von Daten zurückgreifen.

Seit Frühjahr 2001 konnten drei verschiedene Scannersysteme beschafft werden. Fünf wissenschaftliche Mitarbeiter unter der Leitung von Prof. Dr. Wolfgang Böhler sind derzeit ausschließlich damit beschäftigt, Scanning-Projekte durchzuführen. In den folgenden Abschnitten sollen die institutseigenen Geräte kurz vorgestellt werden.



Abb. 1: Scanner am i3mainz: *Mensi S25*, *Cyrax 2500*, *GOM Atos II* (v.l.n.r.)

1.1 Mensi S25

Der *S25* Scanner arbeitet nach dem Triangulationsverfahren und ist deswegen bei Tageslicht nur eingeschränkt einsetzbar. Aufgrund seiner relativ großen Basis (0,8 m) ist er sowohl für die Erfassung kleiner Objekte wie Statuen, als auch für das Scannen größerer Objekte (Höhlen, Industrieanlagen...) geeignet. Bei Objektentfernungen zwischen 2 und 10 m ist der *S25* mit geometrischen Genauigkeiten zwischen 0,5 und 2 mm praktisch konkurrenzlos auf dem Markt. Ab etwa 10 m Objektentfernung nimmt die Genauigkeit aufgrund des Triangulationsverfahrens jedoch rapide ab und der Scanner ist auch wegen seiner relativ geringen Scanrate von ca. 100 Hz nur noch bedingt geeignet. Ein integrierter Schrittmotor erlaubt die Rotation des Gerätes um die horizontale Achse. So wird ein Öffnungswinkel von $46^\circ \times 320^\circ$ realisiert. Für die Weiterverarbeitung der Scandaten bietet *Mensi* die Software *3Dipsos* an. Hier werden die Punkte verwaltet, registriert und editiert. Aus den Punktwolken lassen sich sowohl CAD-Modelle als auch 3D-Vermaschungen berechnen.

1.2 Leica Geosystems (Cyra) Cyrax 2500

Der *Cyrax 2500* Laserscanner arbeitet nach dem Impulslaufzeitverfahren. Dieses Messprinzip erlaubt das Scannen von Objekten bis etwa 100 m bei beliebigen Lichtverhältnissen und einer Scanrate von 1000 Hz. Damit ist das Gerät für die Aufnahme von Bauwerken, Industrieanlagen und für die topographische Geländeaufnahme geeignet. Die Genauigkeit liegt im Bereich weniger Millimeter, der Öffnungswinkel beträgt $40^\circ \times 40^\circ$. Ähnlich wie *Mensi's 3Dipsos* bietet *Cyra* eine 3D-Auswertesoftware *Cyclone* an. Diese wird in erster Linie für die Registrierung der Punktwolken und die Erstellung von CAD-Modellen eingesetzt.

1.3 GOM Atos II

Im Gegensatz zum *Mensi S25* und *Cyrax 2500* handelt es sich beim *Atos II* nicht um einen Laserscanner. Bei diesem Gerät wird ein Lichtstreifenmuster auf das Objekt projiziert und von zwei Kameras wieder aufgenommen. Aus den beiden Kamerabildern werden innerhalb weniger Sekunden 1280 x 1024 Datenpunkte auf dem Objekt berechnet. Das i3mainz verfügt über zwei Sensor Setups, mit denen sich Messvolumina von $200 \times 160 \times 160 \text{ mm}^3$ und $800 \times 640 \times 640 \text{ mm}^3$ bei einer mittleren Objektentfernung von etwa 1,1 m realisieren lassen. Die Genauigkeiten liegen im Bereich von einigen Hundertstel Millimetern. Die *Atos*-Software gestattet die automatische Fusionierung der Einzelscans sowie die Erstellung und Bearbeitung von 3D-Meshes. Typische Anwendungen für diesen Scanner sind Qualitätskontrolle, Flächenrückführung und Rapid Prototyping für kleine Objekte.

2 Projekte

2.1 Höhle

Die Erfassung und Dokumentation unterirdischer Höhlensysteme ist eine große Herausforderung für herkömmliche Vermessungsmethoden. Wegen ihrer unregelmäßigen Form scheint Laserscanning die ideale Methode zu sein, um solche Höhlen aufzunehmen. Das i3mainz hatte Gelegenheit, das Potenzial von Laserscannern in den „Vulkanhöhlen“ der Osteifel zu testen. Dabei handelt es sich um ein riesiges Höhlensystem, das im Mittelalter durch den Abbau von vulkanischem Basaltgestein in den Lavamassen des Wingertsbergvulkans entstanden ist. Dieses Höhlensystem ist kaum geodätisch erfasst worden, somit existieren auch nur sehr unzureichende Kartenwerke.

Für eine Demonstration des *Cyrax*-Scanners sollte ein Teil eines etwa 7 Meter hohen und 30 Meter breiten Hohlrums gescannt werden. Die fünf Einzelscans wurden durch Platzierung von kleinen Kugeln (Durchmesser 72 mm) miteinander verknüpft. Bei einer durchschnittlichen Punktdichte von 5 cm wurden etwa 1 Million Punkte registriert. Noch vor Ort war es möglich, die Einzelscans zu fusionieren und für weitere Untersuchungen (z.B. Schnitte) zu verwenden.

Problematisch bei der Arbeit mit dem *Cyrax* war das relativ kleine Messfeld von $40^\circ \times 40^\circ$. Um wirklich eine Rundumvermessung der Höhlen zu ermöglichen, sind deswegen sehr viele Standpunkte notwendig. Außerdem hat tropfendes Wasser die Arbeiten erschwert und die Standpunktwahl eingeschränkt, denn Wassertropfen auf der Optik des Scanners machen eine Messung unmöglich.

Eine wichtige Anforderung an das Scannen in Höhlen ist die Unabhängigkeit vom Stromnetz. In der Regel gibt es nicht überall Stromanschlüsse und der Einsatz eines Generators in einer Höhle ist wegen der Abgase auch nicht ratsam. Deswegen sollte ein Scanner in der Lage sein, mit Hilfe von Akkus oder Batterien über längere Zeit zu arbeiten. Die Powerbox des *Cyrax* mit den integrierten Akkus erlaubt ein netzunabhängiges Arbeiten von ca. 8 Stunden.

Die entstehende Punktwolke sollte für eine einfache Visualisierung vermascht werden. Hierfür ist die *Cyclone*-Software (v4.0) jedoch ungeeignet, da sie dem Benutzer keine echte 3D-Vermaschung gestattet. Deswegen wurden mit *Cyclone* nur die Einzelscans verknüpft; die weitere Bearbeitung erfolgte mit der 3D-Modellierungssoftware *Raindrop Geomagic*.

Abb. 2 zeigt die Punktwolke und das fertige 3D-Modell eines Höhlenabschnittes. Laserscanning ist die wohl einzig sinnvolle Methode um solch komplexe unregelmäßige Strukturen komplett zu erfassen.

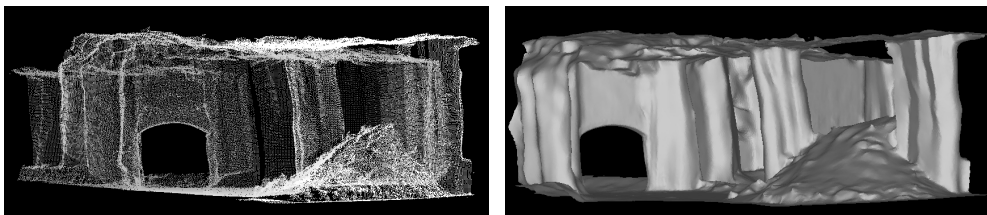


Abb. 2: Punktwolke und 3D-Modell eines Höhlenabschnittes

2.2 Klosterruine

Die Fassaden einer Klosterruine aus dem 13. Jahrhundert sollten im Zuge einer Bauphasenkartierung photogrammetrisch vermessen werden. Ziel war die Erstellung von Linien- und Orthophotoplänen. Da für die Erstellung der Orthophotos Digitale Oberflächenmodelle benötigt wurden, lag es nahe, diese durch Laserscanning zu beschaffen. Zu diesem Zweck wurden die Fassaden teils mit dem *Mensi S25*, teils mit dem *Cyrax 2500* gescannt. Aus der unregelmäßigen Punktwolke wurde ein DOM berechnet, welches wiederum Grundlage für die Orthophotoberechnung und –mosaikierung war. Die Verknüpfung der Scan- und Bilddaten erfolgte über geodätisch bestimmte Passpunkte, die in den Scans lokalisiert werden konnten.

Beim Scannen war zu beachten, dass der *S25* aufgrund seines Funktionsprinzips nicht bei hellem Tageslicht arbeitet, da sonst der Laserfleck auf dem Objekt nicht identifiziert werden kann. Deswegen mussten diese Arbeiten in der Nacht erfolgen. Die Arbeiten vor Ort waren innerhalb weniger Stunden erledigt und auch die Auswertung bis hin zum Digitalen Oberflächenmodell ging vergleichsweise schnell.

Somit ist Laserscanning eine schnelle und genaue Methode zur Erstellung von DOMs von Fassaden. Besonders vorteilhaft ist dieses Verfahren bei sehr unregelmäßigen Fassaden, wie es im vorliegenden Beispiel der Fall war.

2.3 Kenotaph

Der Kenotaph (Anm.: Fachbezeichnung für leeres Grabmal) des Kaisers Maximilian I. ist das bedeutendste deutsche Kaisergrab und zugleich das wertvollste kunsthistorische Denkmal des Landes Tirol (HANKE 2003). Das zwischen 1555 und 1565 erbaute Monument (Größe ca. $2,5 \times 4,5 \times 2 \text{ m}^3$) befindet sich in der Hofkirche Innsbruck und enthält an den Seiten 24 Relieftafeln aus weißem Marmor (jeweils ca. $80 \times 50 \text{ cm}^2$ groß) mit sehr detailreich dargestellten Szenen aus Maximilians Leben. Auf dem Deckel des Kenotaphen befindet sich die kniende Statue des Kaisers umgeben von den vier Kardinaltugenden, die jeweils auf den Ecken angeordnet sind. Alle diese Figuren bestehen aus dunkler Bronze. Anlässlich der Konservierung und Restaurierung des Grabmals war erstmals seit der Fertigstellung eine vollständige geometrische Erfassung und Dokumentation möglich. Für 10 Tage war der Kenotaph ringsum zugänglich und sowohl von Gittern als auch von Glasscheiben befreit. Diese Zeit wurde genutzt, um das Objekt mit modernsten Vermessungsmethoden hochgenau zu erfassen. Dabei kamen sowohl Nahbereichsphotogrammetrie (nicht vom i3mainz durchgeführt) als auch 3D-Scanning-Verfahren zum Einsatz.

Die Gesamtgeometrie des Kenotaphen inklusive der Statuen sollte mit dem *Mensi S25* erfasst werden, während für die feinen Relieftafeln (Details im Zehntelmillimeterbereich) der *GOM Atos II* eingesetzt wurde.

Die Arbeiten mit dem *S25* gestalteten sich weniger problematisch, als zunächst angenommen. Das Gerät hatte keine Probleme mit der dunklen Oberfläche des schwarzen Marmorrahmens, in den die Tafeln eingefasst sind. Auch die dunklen Bronzefiguren konnten gescannt werden. Das gesamte Objekt wurde mit einem durchschnittlichen Punktabstand von 2 mm abgetastet. Bei insgesamt 20 Standpunkten wurden innerhalb von 5 Tagen und Nächten etwa 10 Millionen Punkte registriert. Die Fusion der Einzelscans erfolgte durch Kugeln, die rund um das Objekt platziert wurden. Diese Kugeln wurden vorher durch Beobachtung eines Richtungsnetzes eingemessen, um so einen einheitlichen Bezugsrahmen für alle Messungen zu realisieren.



Abb. 3: Punktwolke des Kenotaphen aus Mensi-Scanner-Daten (schattierte Ansicht)

Das Scannen der 24 Relieftafeln mit dem *Atos II* beanspruchte wesentlich mehr Zeit. Um dem hohen Detaillierungsgrad der Tafeln gerecht zu werden, wurde ein Sensor Setup mit einem kleinen Messfeld (350 x 280 mm²) gewählt. Bei der Sensorgröße von 1280 x 1024 Pixel entspricht das einem Punktabstand von ca. 0,25 mm auf dem Objekt. Pro Tafel wurden zwischen 12 und 30 Scans aus verschiedenen Positionen durchgeführt, um jedes Relief komplett abzudecken und Verdeckungen möglichst zu vermeiden. Die Verknüpfung der Einzelscans erfolgte über Klebmarken, die allerdings nicht direkt auf dem Marmor angebracht werden durften. Deswegen wurden diese auf einem System von Klebestreifen befestigt, die über die Relieftafeln gespannt wurden, ohne diese direkt zu berühren. Mit der Oberfläche der Marmortafeln hatte der *Atos* ebenfalls keine Probleme. Lediglich bei direkter Sonneneinstrahlung durch die Kirchenfenster auf das Objekt war eine Messung unmöglich. Pro Relieftafel wurden bis zu 500 MB an reinen Punktdaten aufgezeichnet.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die Auswertung der Daten noch in Arbeit. Zunächst werden durch Vermaschung 3D-Modelle der Relieftafeln erstellt. Dabei zeigte sich schnell, dass die Bearbeitung solch riesiger Datenmengen mit heutiger Software und Hardware sehr schwierig und zeitaufwändig ist. Jede Tafel wurde mit bis zu 25 Millionen Punkten abgetastet. Diese Punkte müssen zunächst sinnvoll reduziert werden, um überhaupt eine Vermaschung zu ermöglichen aber gleichzeitig keine Details verloren gehen zu lassen. Die Software *Raindrop Geomagic* (v4.1) ist dafür zwar gut geeignet, hat aber interne Grenzen für die Anzahl der Punkte bzw. Dreiecke. Deswegen muss jede Tafel zunächst in kleinere Abschnitte zerlegt werden, um diese einzeln zu bearbeiten und später wieder zusammenzufügen. Der aufwändigste Teil der Arbeit ist das Füllen der Löcher im Dreiecksnetz. Dies ist zwar größtenteils automatisiert möglich, bei komplizierten und großen Löchern ist jedoch immer manuelle Nachbearbeitung notwendig, um ein ansprechendes Ergebnis zu erhalten. Selbstverständlich dient das Hole Filling nur kosmetischen Zwecken und gibt keineswegs die wahre Geometrie des Objektes wieder.

Der Zeitaufwand für die komplette Bearbeitung der Daten wird vermutlich einige Monate betragen (bei einer reinen Aufnahmezeit von wenigen Tagen). Dafür zeigen die Ergebnisse (virtuelle 3D-Modelle) dann sehr realitätsnahe Abbildungen des Objektes, welche den Informationsgehalt eines Linienplans und die Qualität eines Photos deutlich übertreffen. Mit Hilfe künstlicher Beleuchtung lassen sich 3D-Modelle so visualisieren, dass sogar sehr feine Oberflächenstrukturen gut sichtbar werden.



Abb. 4: Ausschnitt (12 x 12 cm²) einer Relieftafel. V.l.n.r: Photo (Quelle: Prof. K. Hanke, Innsbruck), photogrammetrische Linienauswertung (Hanke), 3D-Modell

2.4 Steinzeitliche Artefakte

Steinzeitliche Artefakte (Faustkeile, Pfeilspitzen...) befinden sich in beträchtlicher Zahl im Besitz privater Sammler und sind somit für die wissenschaftliche Forschung und die Präsentation in Museen nicht zugänglich. Ziel des Projektes „Virtuelle Sammlung steinzeitlicher Artefakte“ am i3mainz ist die dreidimensionale Erfassung einer großen Zahl dieser Objekte zu Zwecken der Forschung, Präsentation und Dokumentation.

Das i3mainz hat ein Verfahren entwickelt, in weniger als 45 Minuten ein komplettes und „wasserdichtes“ 3D-Modell eines Artefaktes im STL-Format herzustellen. Hierzu wurde eine Lagerung auf einem Drehteller entworfen, die anhand von Zielmarken auf dem Drehteller die automatische Verknüpfung der Einzelscans erlaubt. Für die Aufnahme der Unterseite muss das Objekt zwischendurch gewendet werden. Die Verknüpfung der beiden „Hälften“ erfolgt durch Matching der überlappenden Bereiche.

Ist das Verfahren eingespielt, gestaltet sich das Scannen der Artefakte als recht problemlos. Lediglich bei komplexen Steinoberflächen mit kristallinen Einschlüssen oder bei halbdurchsichtigem Material kommt es zu Problemen bei der Aufnahme und es entstehen Fehlpunkte. Außerdem hat sich gezeigt, dass das System sehr sensibel auf Erschütterungen und Beleuchtungswechsel reagiert. Deswegen sollten die Arbeiten in einem fensterlosen Raum ohne Bewegung von weiteren Personen durchgeführt werden.

Da die Scantechnik trotz kurzer Erfassungszeiten sehr umfangreiche Datenmengen liefert, müssen jetzt Verfahren entwickelt werden, die eine Reduktion der Daten ohne wesentlichen Informationsverlust ermöglichen. Gleichzeitig sind im Rahmen des Projektes Programme zu erstellen, die wesentliche Größen- und Formparameter aus den Daten extrahieren. Diese Parameter werden anschließend verwendet, um die Funde automatisch in sinnvolle Gruppen und Klassen einzuordnen.

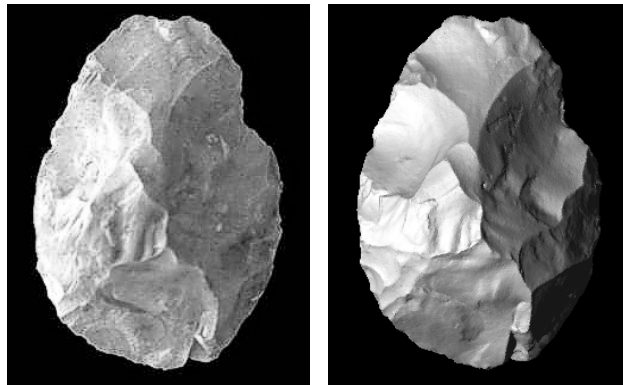


Abb. 5: Photo und 3D-Modell (mit künstlicher Beleuchtung) eines Faustkeils

3 Software

Die Qualität der Auswertesoftware bei der Verarbeitung von Scandaten ist entscheidend für die Qualität des entstehenden Modells und die Bearbeitungszeit. Je nach Aufgabenstellung beträgt das Verhältnis zwischen Aufnahme- und Auswertzeit zwischen 1:5 und 1:10. Oft reicht selbst der zehnfache Aufwand nicht aus (vgl. 2.3). Deswegen sollte großes Augenmerk auf die Wahl der richtigen Software gelegt werden. Neben den gängigen Softwareprodukten zur Verarbeitung von 3D-Punktwolken bieten die Scannerhersteller auch eigene Programme an. Diese sind jedoch oftmals nur bedingt geeignet und konzentrieren sich meist auf ein typisches Anwendungsfeld. So liegt der Schwerpunkt bei den Produkten *Mensi 3Dipsos* (v2.4) und *Cyra Cyclone* (v4.0) auf der Modellierung von regelmäßigen Objekten zur Herstellung von CAD-Plänen im Anlagenbau. Zwar sind teilweise auch Funktionalitäten für unregelmäßige Oberflächen implementiert (Erstellung von Dreiecksnetzen), diese sind jedoch oft nur rudimentär und erfordern ein hohes Maß an manueller Nacharbeit. Die *Atos*-Software ist auf die schnelle Erstellung von Dreiecksmodellen spezialisiert, kann dabei aber nur Daten des *Atos*-Scanners einlesen.

Aus diesen Gründen hat das i3mainz das Softwarepaket *Raindrop Geomagic* erworben. Dieses Produkt vereint die Funktionalitäten Punktdatenregistrierung, -bereinigung, Vermaischung, Datenreduktion, Meshbearbeitung, Erstellung von NURBS-Flächen und Qualitätskontrolle. Es lassen sich Daten beliebiger Scanner einlesen und verarbeiten. *Geomagic* hat sich als sehr leistungsfähig bei der Bearbeitung von unregelmäßigen Oberflächen erwiesen. Es gibt jedoch in der aktuellen Version (v4.1) Probleme mit sehr großen Datenmengen. Außerdem konnte das Produkt *InnovMetric PolyWorks* (v7.2) getestet werden. Auch diese Software erwies sich als sehr gut geeignet für die Erstellung und Bearbeitung von Dreiecksnetzen. Ausschlaggebend für die Beschaffung von *Geomagic* war letztendlich der geringere Preis.

4 Fazit und Ausblick

Bei der Bearbeitung der Projekte wurde deutlich, dass das eigentliche Scannen in der Regel der einfachste und schnellste Teil der Arbeit ist. Aus den gemessenen Punktdaten brauchbare Ergebnisse abzuleiten, beansprucht meist einen wesentlich größeren Zeit- und Arbeitsaufwand. Die angebotenen Softwareprodukte der Scannerhersteller sind dabei oftmals nur unzureichend geeignet, besonders für die Auswertung von unregelmäßigen Oberflächen. Bei Verwendung von speziellen Softwarelösungen für die Verarbeitung und Veranschaulichung von Scandaten lassen sich aber sehr gute Ergebnisse erzielen.

Die aufgeführten Projekte können als ideale Anwendungen für 3D-Scanning betrachtet werden. Mit diesem Messverfahren lässt sich die Nahbereichsphotogrammetrie ergänzen und teilweise sogar ersetzen. Die Ergebnisse sehen oftmals schöner aus und beinhalten mehr Informationen, als es herkömmliche Messmethoden zu leisten vermögen. Das Verhältnis vom Arbeitsaufwand zur Qualität der Ergebnisse sollte dabei aber immer mitbetrachtet werden, um wirtschaftliches Arbeiten zu gewährleisten.

Gegenwärtig läuft am i3mainz das Forschungsprojekt „Effizientere Dokumentation in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie durch Anwendung von 3D-Scannern“. Dabei geht es vor allem um die Durchführung von Beispielprojekten anhand verschiedenster Objekte, um die Effizienz von Scanning-Verfahren im Vergleich zu herkömmlichen Methoden beurteilen zu können. Außerdem wurden Testverfahren für Laserscanner entwickelt, die es den Anwendern erlauben sollen, die Qualität ihrer Scanner zu beurteilen und die Geräte der verschiedenen Hersteller hinsichtlich ihrer Eigenschaften miteinander zu vergleichen.



5 Literatur

- Böhler, W., Heinz, G., Marbs, A. (2001): *The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording*. Albertz, J. (Hrsg.): XVIII. International Symposium of CIPA. 18.-21. September 2001, Potsdam, S. 430-436 (oder unter <http://www.i3mainz.fh-mainz.de>)
- Hanke, K. (2003): *Dokumentation des Grabmals Kaiser Maximilian I. in der Innsbrucker Hofkirche*. Chesi, Weinhold (Hrsg.) "12. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2003". Wichmann-Verlag
- i3mainz (2003): *Web-Site des i3mainz über 3D-Scanning in der Denkmalpflege*. <http://scanning.fh-mainz.de>