

EINSATZ DER OPTISCHEN 3D-DIGITALISIERUNG IM DENKMALSSCHUTZ UND DER ARCHÄOLOGIE

Dr.-Ing. habil. Bruno Lull
Projektleiter

Institut für innovative Technologien und Technologietransfer e. V.
Neefestraße 80 a
09119 Chemnitz

Telefon: 0371/38252-41, FAX: 0371/38252-10

Für eine Reihe von Anwendungen sind die taktilen 3D-Meßverfahren nicht mehr sinnvoll einsetzbar. Deshalb werden seit einiger Zeit auch optoelektronische Meßsysteme eingesetzt. Neben den interferometrischen Meßverfahren hat vor allem die Topometrie sowohl durch ihren an die interferometrischen Verfahren nahtlos anschließenden Meßbereich von wenigen μm bis einige mm als auch durch ihre einfache Handhabbarkeit und größere Mobilität an Bedeutung gewonnen. Die Topometrie bestimmt generell die aktuelle 3D-Form eines Meßobjektes. Für den Einsatz der topometrischen 3D-Meßtechnik stehen heute moderne Bildverarbeitungssysteme, hochauflösende CCD-Kameras sowie die Adaption der aus der Interferometrie bekannten Verfahren der Streifenanalyse zur Verfügung.

Meßtechnik

Am Institut für innovative Technologien und Technologietransfer Chemnitz wurde ein leistungsfähiger optischer 3D-Digitalisierplatz aufgebaut, der neben dem Einsatz auf technischen Gebieten wie im Formen- und Werkzeugbau für die Automobilindustrie auch im Denkmalschutz und in der Archäologie eingesetzt wird.

Der optische 3D-Digitalisierarbeitsplatz besteht aus 3 Komponenten (siehe Bild 1):

- 3D-Koordinatenmeßmaschine mit einem analogen Rundtisch
Meßvolumen brutto: $2500 \times 1500 \times 1800 \text{ mm}^3$, Tragfähigkeit des Drehtisches: 2500 kg
- Topometrischer 3D-Sensor, bestehend aus einer CCD-Kamera und einem Streifenprojektor mit entsprechender Bildverarbeitungssoftware, Meßvolumen: $230 \times 160 \times 160 \text{ mm}^3$
- Bildverarbeitungssoftware zur Weiterverarbeitung der Meßpunktewolke

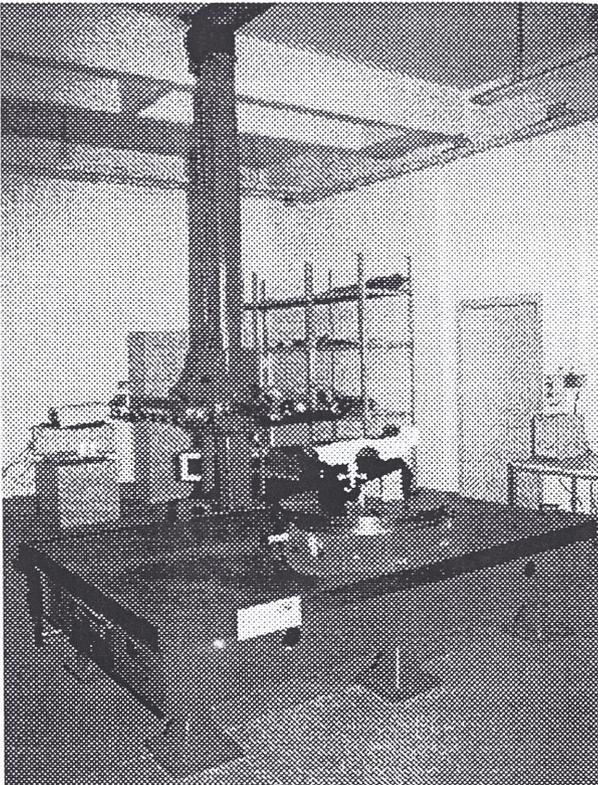


Bild 1: 3D-Koordinatenmeßmaschine mit
Rundtisch und optischem Sensor

Die Bildverarbeitungssoftware des optischen Sensors stellt in der Funktionsgruppe 3D-Meßtechnik Funktionen zur 3D-Absolutvermessung von Meßobjekten zur Verfügung während die Software zur Weiterverarbeitung der Meßpunktewolke die Vorverarbeitung und anschließend die Archivierung von Meßpunktewolken, die Durchführung des Soll-Ist-Vergleiches, die Flächenrückführung, die NC-Programmierung und die Erstellung von FEM-Modellen erlaubt. Die beiden sind vernetzt und besitzen ISDN-Anschluß, um die massenhaft produzierten Daten effektiv verarbeiten und übertragen zu können.

Der optische Sensor wird vor dem ersten Einsatz und dann in Intervallen mit Hilfe einer Kalibrierplatte kalibriert. Beim Einsatz auf der Koordinatenmeßmaschine erfolgt anschließend die Einmessung des Sensor-Koordinatensystems auf das Koordinatensystem der Meßmaschine sowie das Einmessen des Drehtisches mit speziellen Einmeßkörpern (Vielkugelobjekt mit 16 Kugeln bzw. 1 Einmeßkugel).

Die erzielbare Genauigkeit bei topometrischen 3D-Meßverfahren ist von der Präzision der Systemeichung abhängig bzw. inwieweit systematische Abbildungs- und Gitterfehler erfaßt und korrigiert werden können. Die Meßgenauigkeit für die Objektiefe liegt bei $1/4000 \times$ Bildfenstergröße. Bei einer Bildfenstergröße des eingesetzten optischen Sensors von $230 \times 160 \text{ mm}^2$ ist eine Meßgenauigkeit von ca. $40 \dots 60 \mu\text{m}$. Das Verfahren der bildhaften Topometrie besitzt einige verfahrensbedingten Grenzen und Fehlermöglichkeiten, die der Nutzer wissen sollte:

- Eine Hauptkenngröße des Verfahrens der Topometrie ist der Triangulationswinkel ϑ zwischen Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung. Dieser Winkel hat Abschattungen am Meßobjekt zur Folge d.h. Bereiche, wo eine Meßwertaufnahme und Auswertung nicht möglich ist, z.B. Bohrungen, Hinterschneidungen, enge Spalte.
- Das Auflösungsvermögen, d.h. welche Unterschiede in einzelnen Merkmalen noch auflösbar sind, steigt mit größer werdendem Triangulationswinkel und höherer Liniendichte. Wie bereits genannt, bedingen aber größere Triangulationswinkel Abschattungen und damit nicht vermeßbare Objektbereiche.

Wie bei allen optischen Verfahren stellen das Reflexions- und Streuverhalten der Objektoberflächen ein wesentliches Kriterium für die Möglichkeit und Güte der Meßwertaufnahme dar. Reflektierende und dunkle bzw. überstrahlte und unterbelichtete Oberflächen liefern keine auswertbaren Meßinformationen

Vorverarbeitung der Meßpunktewolke

Das Verfahren zur optischen 3D-Vermessung/Digitalisierung liefert umfangreiche Datenmengen in der Größenordnung von bis zu mehreren Millionen Meßpunkten. Die Meßdaten liegen bei dem Verfahren der bildhaften Triangulation teilstrukturiert vor. Die erzeugten Rohpunktewolken weisen solche Eigenschaften wie Positionsrauschen, Dopplungspunkte, Fehlstellen, Überschwinger und Ausreißer auf. Die praktischen Anforderungen für die Weiterverarbeitung von 3D-Meßpunktewolken ergeben sich einerseits aus den Eigenschaften der erzeugten Meßpunktewolke und andererseits aus dem Anliegen der 3D-Formfassung. Bild 2 zeigt die Verarbeitungsetappen der 3D-Meßpunktewolken.

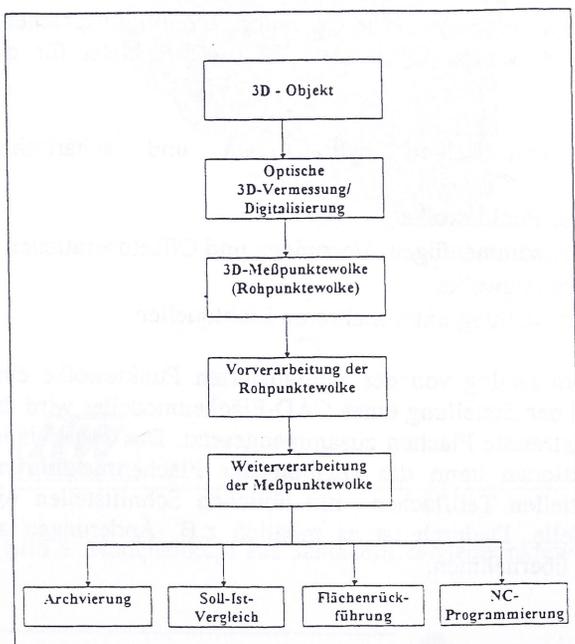


Bild 2: Verarbeitungsetappen der Meßpunktewolke

Als erster Schritt nach der Vermessung/Digitalisierung erfolgt die Vorverarbeitung der Rohpunktewolke als Voraussetzung für eine effektive Weiterverarbeitung der Meßpunktewolken zur Archivierung, zum Soll-Ist-Vergleich, zur Flächenrückführung und zur NC-Programmierung.

Die Vorverarbeitung der Rohpunktewolke erfolgt mit der auch zur Flächenrückführung eingesetzten Software SURFACER. Ziel der Vorverarbeitung der bei der Vermessung bzw. Digitalisierung erzeugten Rohpunktewolke ist die Korrektur unerwünschter meist verfahrensspezifischer Eigenschaften der Punktewolken bzw. Schaffung von Voraussetzungen und Anforderungen an die Punktewolken bezüglich der Weiterverarbeitung.

Folgende Teilaufgaben sind bei der Vorverarbeitung zu lösen:

- Zusammenfügen der Teilbilder zum 3D-Objekt
- Beseitigung von Ausreißern
- Ergänzung von fehlenden Daten
- Regularisierung
- Minderung oder Beseitigung von Redundanz, Ausdünnung

Nach der Vorverarbeitung der Rohpunktewolke sind eine Reihe von Manipulationen möglich, mit deren Hilfe

- beliebige räumliche Ansichten des Objektes,
- beliebige Details des Objektes als separate Meßpunktewolken,
- beliebige Schnitte in beliebiger Richtung als einzelne Punktemengen oder als 3D-Kurven,
- polygonisierte Punktewolken und
- (bedingt) beliebige Flächen

aus den Meßpunkten erzeugt werden können.

Weiterverarbeitung der Meßpunktewolke

Archivierung von Meßpunktewolken

Die optische 3D-Digitalisierung kann vorteilhaft zur Erfassung, Digitalisierung und anschließender Archivierung von kulturhistorisch wertvollen Objekten im Denkmalsschutz und in der Archäologie eingesetzt werden. Die so archivierten Objekte stehen so jederzeit in Form von Dateien auf unterschiedlichen Datenträgern z.B. als CD-ROM manipulierbar zur Rekonstruktion zu Verfügung.

Flächenrückführung

Die Flächenrückführung von 3D-Digitalisierdaten ist eine komplexe mathematische Operation, die mit entsprechend intelligenter Software (hier der SURFACER) aber durchgeführt werden kann. Der SURFACER bietet für die Flächenrückführung folgende Möglichkeiten

- Flächenerstellung direkt auf der Punktewolke im kartesischen, zylindrischen und sphärischen Koordinatensystem
- Kombinierte Flächenerstellung mit Begrenzungskurven und der Punktewolke
- Flächenerzeugung mit vorhandenen Flächenelementen durch Zusammenfügen, Verrunden und Offsetoperationen
- Flächenanalyse; Darstellung der Abweichung der Fläche zur Punktewolke,
- Punkteabweichung zur Fläche, Krümmungsplot und Flächendarstellung unter mehreren Lichtquellen

Mit den von der Software angebotenen Möglichkeiten kann im Dialog von der digitalisierten Punktewolke eine strukturierte geglättete Flächenbeschreibung erzeugt werden. Bei der Erstellung eines CAD-Flächenmodelles wird die komplexe räumliche Struktur aus einzelnen durch Formlinien getrennte Flächen zusammengesetzt. Das Ergebnis ist eine Flächenbeschreibung als VDA-File. Durch Analysefunktionen kann die Qualität der Flächenrückführung überprüft werden. Insbesondere bietet die Erzeugung von partiellen Teilflächen mit üblichen Schnittstellen wie VDAFS, IGES die Möglichkeit der Einfügung in CAD-Modelle. Dadurch ist es möglich z.B. Änderungen an vorhandenen Formen bzw. Objekten in CAD-Beschreibungen zu übernehmen.

3D-Digitalisierung im Denkmalschutz und in der Archäologie

Denkmalspflege

Die Denkmalspflege widmet sich der Erhaltung und Pflege kulturhistorisch wertvoller Denkmale. Dabei sind zwei Aufgaben von besonderer Bedeutung:

- Archivierung von Denkmalen wie z.B. Skulpturen aus Holz oder Stein mit dem Ziel die Unikate reproduzierbar für die unterschiedlichsten Zwecke zur Verfügung zu haben und
- Restaurierung von zerstörten oder beschädigten Denkmalen

Für beide Einsatzfälle ist die berührungslose optische 3D-Digitalisierung besonders gut geeignet. Für die Archivierung werden Informationen digital gespeichert, um damit ein elektronisches Archiv kulturhistorischer wertvoller Denkmale anzulegen, die mit einer leistungsfähigen 3D-Bildverarbeitungssoftware alle üblichen Manipulationen im Raum zu läßt und z.B. für Dokumentationszwecke reproduziert werden können. Andererseits dient das elektronische Archiv der originalgetreuen Reproduktion von nicht mehr zur Verfügung stehenden Unikaten. Sowohl die originalgetreue Reproduktion von Unikaten als auch die Restaurierung von zerstörten oder beschädigten Denkmalen wie Skulpturen ist mit Hilfe der modernen NC-Technik möglich. Denkbar ist z.B. die NC-Fertigung von Skulpturen mit einem entsprechenden Aufmaß, so daß der Bildhauer seine Intentionen und Vorstellungen noch verwirklichen kann.

Bild 3 zeigt das Original, die Meßpunktewolke und die polygonisierte Meßpunktewolke eines Mädchenkopfes aus dem 19. Jahrhunderts¹ aus Sandstein. Diese Meßpunktewolke des Mädchenkopfes wurde aus 26 Einzelaufnahmen zusammen gesetzt und besteht in der exakten Darstellung aus ca. 2.5 Mill. Meßpunkten. Mit Hilfe der Bildverarbeitungssoftware läßt sich diese Meßpunktewolke beliebig ausdünnen. Damit steht dieses digital gespeicherte Objekt für die Reproduktion und Dokumentation beliebig manipulierbar, z.B. in unterschiedlichen Ansichten, zur Verfügung. Im Bild der polygonisierten Meßpunktewolke kennzeichnen die weißen Stellen fehlende Informationen, d.h. aus dieser Sensorstellung konnten keine verwertbaren Meßinformationen erhalten werden.

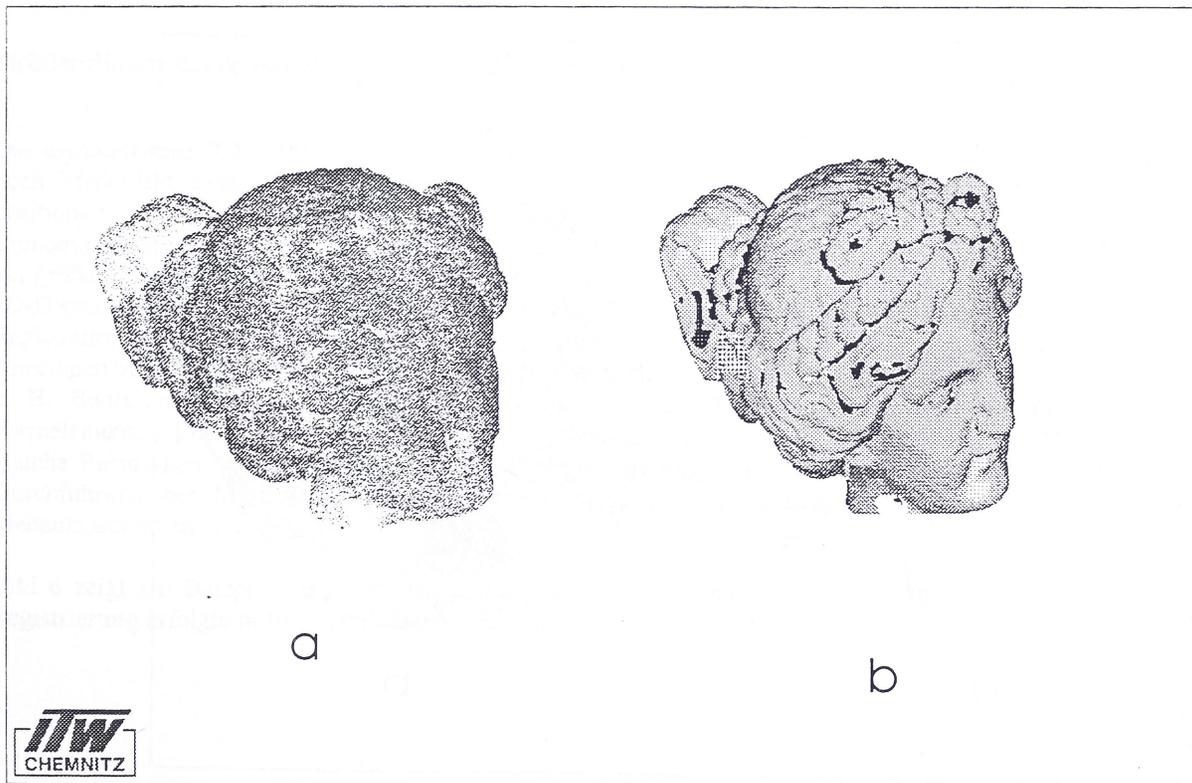


Bild 3: Mädchenkopf aus Sandstein, a-Meßpunktewolke, b-polygonisierte Meßpunktewolke

¹ Leihstück aus dem Fundus des Landesamtes für Denkmalspflege, Dresden

□ Archäologie

In der Archäologie sind folgende Aufgaben mit Hilfe der optischen 3D-Meßtechnik realisierbar:

- Aufbau eines elektronischen Archivs der archäologischen Fundstücke zur Weiterverarbeitung mit 3D-Bildverarbeitungssoftware z.B. zur Erstellung von Profil- und Schnittzeichnungen von historischen Gefäßen
- Zusammensetzen von Objekten z.B. Gefäßen aus den Fundstücken mit Hilfe der 3D-Bildverarbeitungssoftware
- Aufbau eines elektronischen Archivs für museale Unikate

Aus den vorhandenen Bruchstücken eines Objektes (Bild 4a, Terrine mit Leichenbrand²) wurde mit Hilfe der 3D-Bildverarbeitungssoftware das Objekt rechnerunterstützt rekonstruiert (Bild 4b). Durch die berührungslose Digitalisierung erfolgt eine schonende Behandlung der Fundstücke. Die Digitalisierung der Bruchstücke mit Hilfe des optischen Sensors ist zeitlich sehr effektiv möglich. Mehrere kleine Bruchstücke können mit einer Meßaufnahme digitalisiert und später mit der 3D-Bildverarbeitungssoftware wieder vereinzelt werden. Bruchstücke, für die mehrere Meßaufnahmen erforderlich sind, wenn die Abmessungen das Meßfeld des Sensors übersteigen bzw. wenn das Bruchstück starke Krümmungen oder Hinterschneidungen aufweist, werden mit Hilfe der Software automatisch zum Gesamtobjekt zusammen gefügt. Bemerkt werden soll an dieser Stelle, daß auf Grund der 6 Freiheitsgrade im Raum (3 translatorische und 3 rotatorische Freiheitsgrade) der Prozeß des Zusammensetzens relativ zeitaufwendig ist. Handelt es sich um Regelgeometrien wie Kugel, Kreis, Zylinder, Kegel u.a. erfolgt eine Unterstützung durch die Bildverarbeitungssoftware. Um das Zusammensetzen der einzelnen als Meßpunktewolken vorliegenden Bruchstücke zu erleichtern, können die vorhandenen softwareseitigen Hilfsmittel jedoch effektiv eingesetzt werden. So ist z. B. das Anbringen von Linien an markanten Bruchkanten zu empfehlen, um mit deren Hilfe das räumliche Anordnen zeiteffektiver durchführen zu können. Gleichermäßen können Bruchkanten auch mit 3D-Kurven "nachgezeichnet" werden, da dadurch ebenfalls ein leichteres Zusammenfügen ermöglicht wird. Das zeitweise Ausblenden (z. B. Darstellung nur jedes 5. oder 10. Punktes der Meßpunktewolke) bringt auch erhebliche zeitliche Vorteile. Die so rekonstruierten Objekte stehen damit für beliebige Auswertungen und Dokumentationen zur Verfügung z.B für die Anfertigung von Profilschnitten, Querschnitten. Bild 5 zeigt die Meßpunktewolke eines rekonstruierten altertümlichen Kruges³ mit Profil- und Querschnitten sowie die aus der Meßpunktewolke durch Flächenrückführung erzeugte Ansicht.

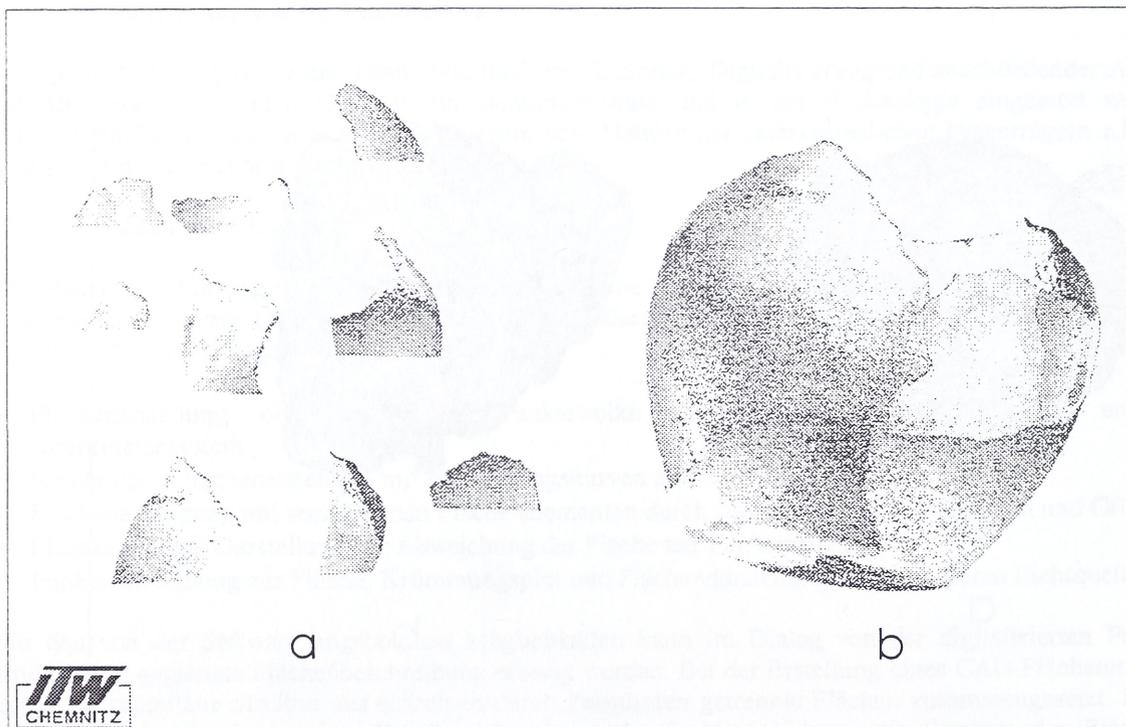


Bild 4: Rekonstruktion von Objekten aus Fundstücken, a-Fundstücke, b-Rekonstruiertes Teilobjekt (Terrine)

² Leihstück aus dem Fundus des Landesamtes für Archäologie, Dresden

³ Leihstück aus dem Fundus des Amtes für Archäologie, Dresden

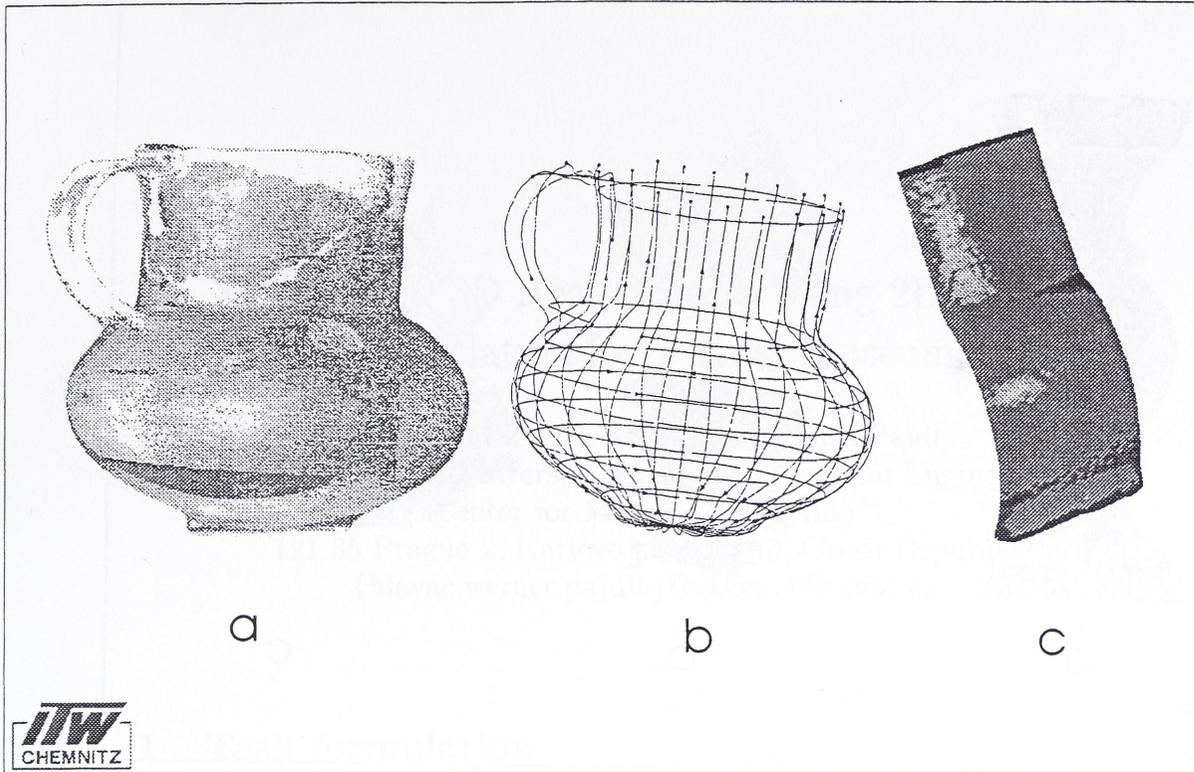


Bild 5: Messpunktwolke eines vollständig rekonstruierten altertümlichen Kruges
a-Messpunktwolke, b-Profil- und Querschnitt, c-Flächenrückführung aus der Messpunktwolke

Mobiler Einsatz des optischen Sensors zur 3D-Objektvermessung

Die topometrische 3D-Meßtechnik ermöglicht auch dann eine Objektdigitalisierung, wenn weder optischer Sensor noch Meßobjekt exakt, wie bei der oben beschriebenen Konfiguration auf einer 3D-Koordinatenmeßmaschine, positioniert werden können. Das kann aus Gründen der Größe und des Gewichts des Objektes, der nicht möglichen Demontage oder einfach weil das Objekt nicht auf die Meßmaschine gebracht werden kann erforderlich sein, wie z. B. ein größere Skulptur aus Sandstein oder ein schweres nicht demontierbares Maschinenteil. In diesem Fall erfolgt die 3D-Digitalisierung nach dem Paßpunktverfahren. Das Zusammenfügen der einzelnen Meßaufnahmen, die sogenannte Registration, die von räumlich unterschiedlichen Standpunkten gemacht wurden, erfolgt entweder durch das Anbringen von Paßmarken an dem Meßobjekt oder anhand markanter am Meßobjekt vorhandener Formelemente wie z. B. Bohrungen, Kanten, Zylinder u.a. Beim Anbringen der Paßmarken bzw. bei der Auswahl relevanter Formelemente ist darauf zu achten, daß in den Einzelmessaufnahmen aus den unterschiedlichen Ansichten jeweils 3 gleiche Paßmarken bzw. entsprechende Formelemente zur Registration erkennbar und identifizierbar sind. Bei der Durchführung der Meßaufnahmen insbesondere im Freien ist auf geeignete Beleuchtungsverhältnisse bei den Meßaufnahmen zu achten.

Bild 6 zeigt am Beispiel eines Balusters⁴ aus Sandstein den mobilen Einsatz der optischen 3D-Meßtechnik. Die Registrierung erfolgte mittels aufgeklebter Paßmarken.

⁴ bereitgestellt von der Zwingerbauhütte Dresden

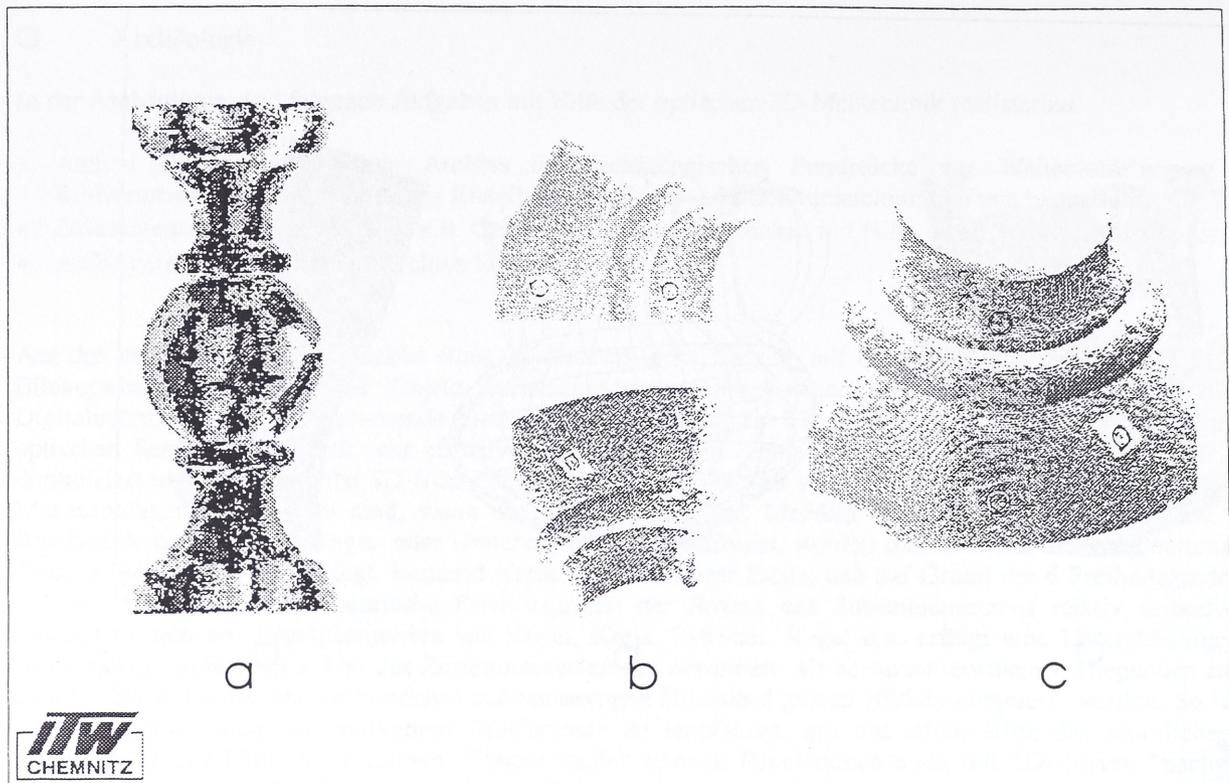


Bild 6: Messpunktewolke eines Baluster, a-gesamter Baluster, b-Ausschnitt mit Paßmarken, c-Registration der beiden Messpunktewolken

Literatur

- /1/ Lull, B., Mierisch, R.; 3D-Laserscannen komplizierter Körper; Sachbericht zum FuE- Vorhaben, gefördert durch das BMWi, Registrier-Nr. 504/95
- /2/ Breukmann, B.; Bildverarbeitung und optische Meßtechnik in der industriellen Praxis, Franzis- Verlag München 1989
- /3/ VDI-Technologiezentrum Physikalische Grundlagen: 3D-Objektvermessung auf kleinere Entfernungen, Broschüre zur Abschlußpräsentation des vom BMBF geförderten Verbundprojektes "3D-Objektvermessung auf kleinere Entfernungen" am 21. und 22.6.1995 München
- /4/ VDI-Technologiezentrum Physikalische Grundlagen: 3D-Objektvermessung auf größere Entfernungen, Broschüre zur Abschlußpräsentation des vom BMBF geförderten Verbundprojektes "3D-Objektvermessung auf größere Entfernungen" am 21. und 22.6.1995 München