

# **Erfahrungen bei der messtechnischen Erfassung, Modellierung und Darstellung von kleinförmigen Kunstobjekten**

**JÜRGEN PEIPE<sup>1</sup>, NICOLAS KOZUSCHEK<sup>2</sup> & HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA<sup>2</sup>**

*Zusammenfassung: Eine Vielzahl kunsthistorischer Objekte verfügt über komplex ausgestaltete Oberflächen und sind eher klein dimensioniert. Im vorliegenden Bericht werden Erfahrungen bei der optischen 3D-Erfassung solcher Objekte vorgestellt, Problemfelder werden genannt und es wird über die Eignung der eingesetzten Messsysteme - Streifenprojektionssysteme und Laserscanner - berichtet. Diese Geräte sind grundsätzlich für die 3D-Digitalisierung kleinförmiger Objekte ausgelegt. Allerdings sind Laserscanner meist relativ teuer und daher für viele potentielle Anwender - gerade im Bereich Kunstwissenschaft und -dokumentation etc. - kaum erschwinglich. Mit dem MicroScan Lasersensor, befestigt am MicroScribe Messarm, steht jetzt eine preiswerte Alternative zur Verfügung. Mit Messgenauigkeiten im Bereich von 0.2-0.3 mm bietet das System eine ausreichende Erfassungsqualität für vielfältige Anwendungen. Neben einer einfachen Bedienung ist insbesondere die rasche Erfassungsgeschwindigkeit ein nicht zu unterschätzender Vorteil. Am Beispiel der 3D-Digitalisierung des Kissens Karls des Kühnen werden erste Erfahrungen mit dem Lasersensor dokumentiert. Der Vergleich mit einer parallel ausgeführten Objektmessung mit einem Streifenprojektionssystem zeigt die grundsätzliche Qualität beider Messsysteme.*

## **1 Einleitung**

Im Rahmen der 27. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF im Jahre 2007 wurde in einem Vortrag über die *3D-Dokumentation des Essener Domschatzes* berichtet (BANGE et al. 2007a). Der Stand des Projekts wurde aufgezeigt, d. h. die eingesetzten Messsysteme (Streifenprojektionssysteme) wurden vorgestellt sowie Kalibrieraspekte und Genauigkeitsmaße genannt. Abschließend wurden modellierte Kunstobjekte als Ergebnis der 3D-Digitalisierung gezeigt. Inzwischen ist ein weiteres Messsystem für dieses Aufgabengebiet hinzugekommen, das speziell zur Erfassung kleinvolumiger Kunstgegenstände geeignet ist. Es handelt sich um einen preiswerten und flexibel einsetzbaren Laserscanner, bestehend aus einem MicroScribe Messarm und einem MicroScan Lasersensor (RSI 2008; Abb. 1). Ein Genauigkeitstest des Gerätesystems wurde durchgeführt und erste Ergebnisse wurden publiziert (PRZYBILLA et al. 2008).

Im Folgenden sollen die für die Dokumentation von Kunstwerken eingesetzten Geräte an Hand ihrer technischen Spezifikationen einander gegenübergestellt werden (Kap. 2). Anschließend werden die bei der Messung auftretenden Problemfelder beschrieben und es wird auf eigene Erfahrungen hingewiesen, inklusive eines Vergleichs der Messsysteme (Kap. 3 und 4).

<sup>1</sup>) Jürgen Peipe, Universität der Bundeswehr München, Institut für Photogrammetrie und Kartographie, e-mail: [j.k.peipe@unibw-muenchen.de](mailto:j.k.peipe@unibw-muenchen.de)

<sup>2</sup>) Nicolas Kozushek & Heinz-Jürgen Przybilla, Hochschule Bochum, Fachbereich Vermessung und Geoinformatik, e-mail: [heinz-juergen.przybilla@fh-bochum.de](mailto:heinz-juergen.przybilla@fh-bochum.de)

## 2 Messsysteme und Software

Als Messwerkzeuge zur Digitalisierung von Kunstobjekten wurden zunächst zwei Streifenprojektionssysteme eingesetzt: ein Breuckmann *optoTOP HE-600*, das durch ein *triTOS* System mittlerer Genauigkeit abgelöst wurde (BREUCKMANN 2008; PEIPE & PRZYBILLA 2005; BANGE et al. 2007a). Das *triTOS* enthält die auf einer Basis montierten Systemkomponenten, bestehend aus Kamera (1.3 MPixel) und Streifenlichtprojektor, wobei unterschiedliche Basislängen und Objektive für unterschiedliche Arbeitsbereiche zur Verfügung stehen. Bei flächenhafter Objekterfassung wird eine Genauigkeit von ca. 0.1 - 0.2 mm erreicht. Hinweise zur Kalibrierung und Handhabung des Messsystems finden sich auch in BANGE et al. (2007b).

Der Laserscanner MicroScan wird in Verbindung mit dem Messarm MicroScribe eingesetzt (RSI 2008; Abb. 1). Der Lasersensor registriert 28000 3D-Punkte pro Sekunde, während er über die zu erfassende Oberfläche geführt wird. Innerhalb eines Arbeitsbereichs von ca. 1.5 m (Durchmesser) wird eine Messgenauigkeit von ca. 0.2 - 0.3 mm erzielt (PRZYBILLA et al. 2008). Der Messarm behält auch in Verbindung mit dem Lasersensor seine taktilen Fähigkeiten, d. h. die 3D-Bestimmung von Einzelpunkten, Konturen etc. ist parallel zur flächenhaften Antastung mit dem Scanner möglich.



Abb. 1: Laserscanner G2LX, bestehend aus Messarm MicroScribe und Lasersensor MicroScan

Die Software des Systems leistet u. a. die nutzerseitige Kalibrierung, die Anpassung der Empfindlichkeit der im Laserscanner eingebauten Kamera an die Beschaffenheit der Objektoberfläche (Reflexionseigenschaften), die Steuerung des Messablaufs, die Verknüpfung von Punktwolken aus unterschiedlichen Scans desselben Objekts und den Datenexport (Punktwolken bzw. diverse Polygonformate). Insgesamt gesehen bildet die Kombination MicroScribe + MicroScan ein preiswertes, relativ kleines und leichtes, daher gut transportierbares und flexibel einsetzbares Messsystem, das zudem einfach zu handhaben ist.

Die der Generierung der Punktwolken folgenden Editier- und Modellierarbeiten wurden innerhalb der Geomagic Studio / Qualify Software durchgeführt (GEOMAGIC 2008).

### 3 Objekte, Messablauf, Problemfelder

Typische Messobjekte aus dem Essener Domschatz sind Becher und Kelche, Schwerter und Leuchter, Skulpturen und Statuen, Buchdeckel und Kästchen, etc. – all dies sind relativ kleinvolumige Objekte. Sie bestehen aus den unterschiedlichsten Materialien wie Gold, Messing, Kupfer, Holz, Elfenbein u. a., sind mit Edelsteinen und Perlen besetzt und weisen oftmals komplexe Oberflächen auf. Von solchen (und anderen) objektspezifischen Gegebenheiten lassen sich Problemfelder ableiten, wie zum Beispiel:

- Reflexionsverhalten des Objekts: Materialabhängig kann es zu starken Reflexionen kommen. Aber auch transparente Oberflächen (Edelsteine etc.) werden nicht korrekt erfasst. Es ist zu untersuchen, wie das Messsystem auf solche, nicht-kooperative Oberflächen reagiert. Reflexionen kann man unter Umständen umgehen, wenn man den Sensor umpositioniert und weitere Scans aus anderen Richtungen erzeugt, mit anschließender Verknüpfung der Punktwolken.
- Kontrastschwelle: Ein gerätespezifisch definierter Mindestkontrast am Objekt sollte dafür sorgen, dass nur sinnvolle Punkte gemessen werden. Wenn die Punkterfassung – z. B. an Kanten – unsicher wird, sollte der Sensor die Messung einstellen. In diesem Fall kann es hilfreich sein, das Messsystem umzupositionieren und unter günstigeren Bedingungen eine weitere Messung zu starten.
- Krümmung des Objekts, d. h. wie groß ist die Neigung der Oberfläche des Objekts im Verhältnis zur Blickrichtung des Sensors. Eine bestimmte Grenzneigung darf nicht überschritten werden, um korrekte Messpunkte zu erhalten.
- Verdeckungen, Abschattungen, Hinterschneidungen: Messsystem umpositionieren und weitere Aufnahmen machen.
- Punktdichte: Weitgehend von der Form und Struktur des Objekts abhängig. Limitierung der Punktzahl, wenn die Kapazität der Software für die Weiterverarbeitung der Rohdaten nicht ausreicht (Krümmungsbasierte Datenreduktion sinnvoll).
- Messablauf: Betrieb/Handhabbarkeit eines Messsystems, z. B. auch Aufwärmzeit, Kalibrierung, Dauer der Datenerfassung pro Einzelaufnahme, Zeitbedarf für die Aufstellung am Messplatz bzw. für das Umpositionieren.
- Umgebungsbedingungen: Stabile Temperaturverhältnisse sollten vorliegen, keine Vibrationen, kein Staub, möglichst geringer Fremdlichteinfluss während der Messungen, etc.
- Datenverarbeitung: Rechengeschwindigkeit bei großen Punktmengen, Algorithmen zur Vereinigung verschiedener Punktwolken desselben Objekts, Überführung der originalen Messdaten in Polygondarstellungen, Texturierung und Visualisierung des Objektmodells.

### 4 Testmessungen und Bewertung der Messsysteme

Wie in BANGE et al. (2007a) angedeutet, ist die 3D-Digitalisierung der in ihrer Oberflächencharakteristik stark variierenden Kunstgegenstände ein komplexes und aufwendiges Vorhaben. Eine besondere Schwierigkeit stellt der "Materialmix" der Objekte dar. Glänzende Gold- oder Silber-

flächen einerseits, Edelsteine und Emailleflächen andererseits erschweren die optische Objekterfassung. Hinzu kommen oftmals filigrane Strukturelemente der Kunstwerke. Räumliche Hinterschnidungen und Verdeckungen sind insbesondere bei figürlichen Darstellungen häufig anzutreffen. Bei Behältnissen (Dosen, Kelche, Urnen etc.) sind als Folge schmaler Grenzflächen die Punktwolken der äußeren und inneren Teile nur mit hohem Aufwand zu verknüpfen. Ähnliche Probleme treten bei lang gestreckten Objekten (z. B. Lanzen, Schwerter, Bischofsstäbe) auf. Zu berücksichtigen ist zudem, dass das Anbringen von Signalisierungen oder die Bearbeitung der Oberflächen mit Sprays zur Verbesserung des Reflexionsverhaltens grundsätzlich nicht möglich sind.

Streifenprojektionssysteme lassen sich vorteilhaft einsetzen, wenn das zu messende Objekt möglichst vollständig im – systembedingt begrenzten – Messvolumen aufgenommen werden kann. Die Positionierung des Messgegenstands auf einem Drehteller vereinfacht die Erfassung erheblich: Bei ortsfestem Sensor kann das Objekt durch Rotation des Tellers allseitig erfasst werden. Zu beachten ist eine hinreichend große Überdeckung benachbarter Scans, da als Folge von Objektkrümmung und Reflexion die abgebildeten Punktwolken oft zu schmalen „Punktstreifen“ degenerieren (Abb. 2). Ihre räumliche Verknüpfung – über ICP-Algorithmen – führt in einem solchen Fall nicht unbedingt zur Konvergenz, da die Struktur der Objekte zu wenig ausgeprägt ist (glatte Flächen) und die verfügbare Anzahl identischer Punkte zu gering ist.

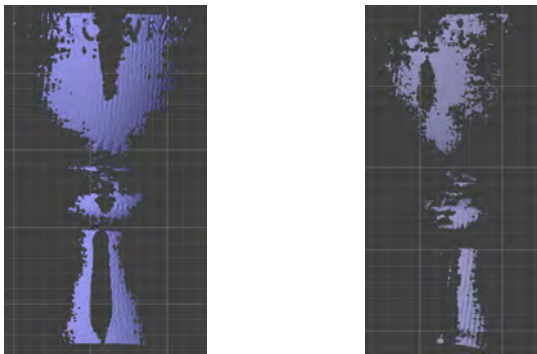


Abb. 2: Einzelscan eines Kelchs mit normalen (li.)  
und geringem Punktvolumen, als Folge veränderter Aufnahmerichtung (re.)

Das Streifenprojektionssystem wird in der Regel zum Messobjekt transportiert und dort aufgebaut. Dabei können die vom Hersteller vorgesehene Kalibrierung und notwendige Aufwärmphasen der Sensorik durchaus einen zeitlichen Umfang von einer Stunde in Anspruch nehmen. Das Umgebungslicht ist bei einem Messverfahren mit aktiver Beleuchtung (strukturiertes Licht) nicht ohne Einfluss, d. h. sowohl zu helle als auch zu dunkle Messräume behindern die Funktion des Systems. Im Extremfall ist eine Messung unmöglich.

Die vor Beginn der Messung festzulegende Konfiguration des Streifenprojektionssystems (Länge der Basis, Objektivbrennweiten) definiert das nutzbare Messvolumen sowie den Abstand vom Sensor zum Objekt. Dies schränkt die Flexibilität der Aufnahmekonfiguration ein, wobei die relativ geringe Tiefe des Messbereichs ein weiteres limitierendes Element dargestellt. So kann es sein, dass eine Gesamtmessung aus vielen, zum Teil nur sehr wenig Information enthaltenden Scans besteht. Dabei sind – selbst bei kleineren Gegenständen – oft 50-100 Scans notwendig, um eine objektdeckende Abbildung zu erhalten. Daraus resultiert ein nicht zu unterschätzender Aufwand für die Verknüpfungsberechnungen, der – in Abhängigkeit von der Qualität der Punktwolken – ein Mehrfaches der Erfassungsdauer beansprucht. Stehen Kunstobjekte nur begrenzte Zeit zur Verfügung, bietet es sich an, die Orientierung der Teil-Punktwolken im Post-Processing durchzuführen.

Die Kombination aus Messarm und Triangulationsscanner, wie sie im System MicroScribe + MicroScan realisiert ist, hat sich als ausgesprochen flexibles Messwerkzeug erwiesen. Die freie räumliche Positionierung, die durch den Messarm (in einem Radius von ca. 80 cm) gewährleistet ist, ermöglicht ein zügiges Messen, mit deutlichen Geschwindigkeitsvorteilen gegenüber dem Streifenprojektionssystem. Bei dem in Abb. 3 und 4 (li.) dargestellten Kissen Karls des Kühnen lag die Aufnahmedauer mit dem MicroScribe + MicroScan bei ca. 1.5 Stunden, während eine vergleichbare Messung mit dem triTOS-System (einschließlich Verknüpfung) um den Faktor 3 länger beanspruchte. Dabei wurde der MicroScan-Sensor in einem Abstand von ca. 50 mm über das Messobjekt geführt. Ohne Positionswechsel des Messarms konnte nicht nur die Oberseite des Kissens erfasst werden, auch die Kissenseiten (bis zum Rand des innen hohlen Objektes) ließen sich problemlos messen.

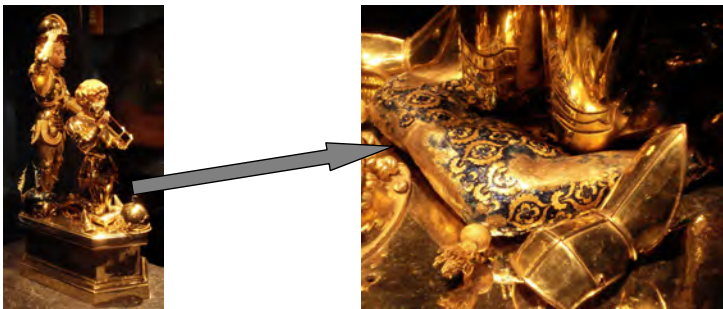


Abb. 3: Reliquiar Karls des Kühnen – rechts das Kissen

Da der Sensor linienhaft erfasst, sollte das Messobjekt aus mehreren – zumindest zwei senkrechten – Richtungen abgetastet werden. Dies gewährleistet eine homogene Punktdichte, vergleichbar mit der des rasterförmig messenden Streifenprojektors (Abb. 4 re.). Besonders vorteilhaft arbeitet das System, wenn das Messobjekt aus kleineren Flächenelementen besteht und der Sensor, dem Krümmungsverlauf folgend, in gleichmäßigem Abstand über die Oberfläche geführt werden kann. Die Freihandführung des Scanners erfordert jedoch eine gewisse Übung, insbesondere auch, um eine möglichst senkrechte Abtastung zu erreichen. Die Handhabung eines Streifenprojektionssystems ist im Vergleich dazu weniger problematisch. Sie bietet zudem bei großen – quasi in einer Aufnahme erfassbaren – Oberflächen Vorteile.

Nach den bisherigen Erfahrungen reagiert der Laserscanner deutlich weniger kritisch auf die bei kunsthistorischen Objekten häufig anzutreffenden Materialeigenschaften. Während z. B. die Emaille-Oberfläche des Kissens durch den Streifenprojektor nur unvollständig erfasst werden konnte (Abb. 6), enthielt der Datensatz aus der Messung mit dem MicroScan nur wenige, kleinere Datenlöcher, die im Rahmen der weiteren Bearbeitung mit der Geomagic Software problemlos geschlossen werden konnten (Abb. 5).

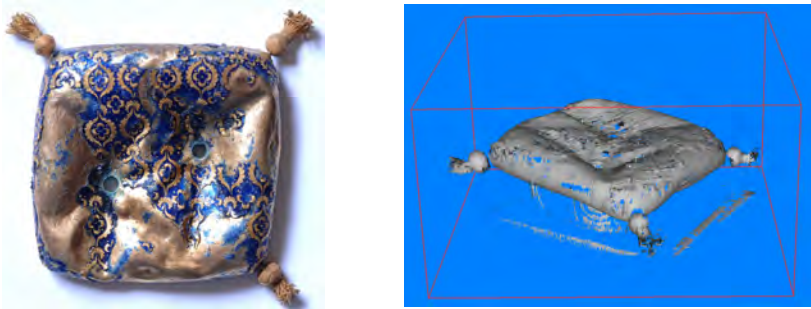


Abb. 4: Foto des Kissens nach Entnahme aus dem Reliquiar (li.) – MicroScan Rohdaten (re.)

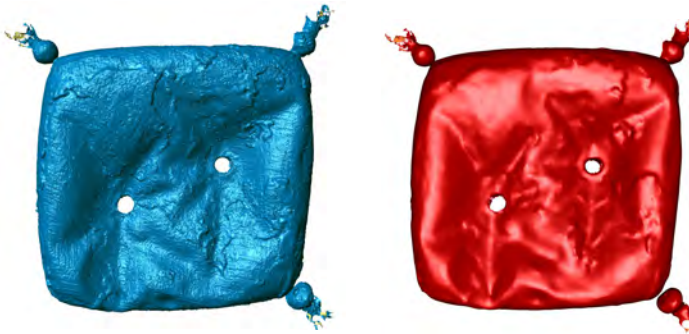


Abb. 5: Bearbeitetes Polygonmodell (li.) – geglättetes Modell als Basis für Replikat (re.)

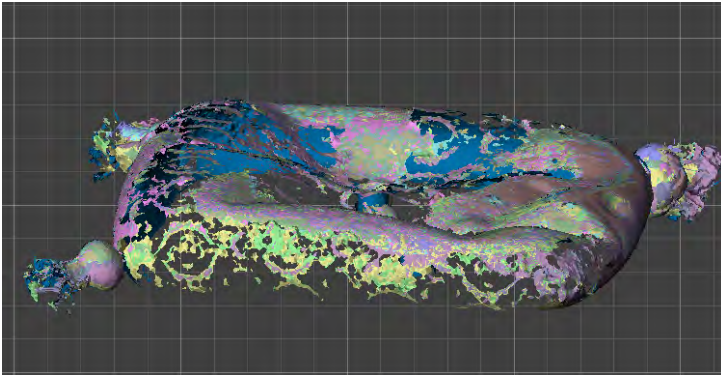


Abb. 6: triTOS-Punktwolke – schwarze Bereiche im Objekt beschreiben Datenlücken

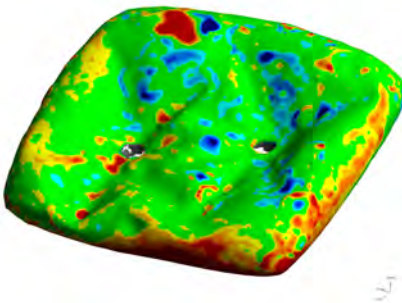


Abb. 7: Abweichungen der Oberflächen

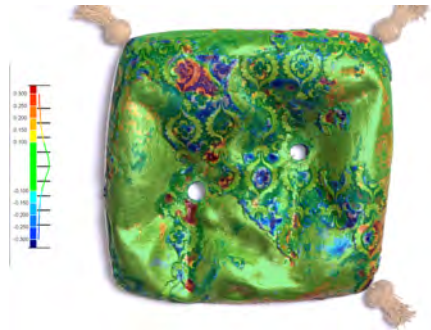


Abb. 8: wie Abb. 7, jedoch mit gemappter Textur

Ein Vergleich der aus den parallel durchgeführten Messungen mit Streifenprojektionssystem und MicroScribe + MicroScan abgeleiteten 3D-Modelle (Abb. 7 und 8) zeigt in weiten Bereichen eine sehr gute Übereinstimmung der triangulierten Oberflächen. Lediglich in Randbereichen, die vom Streifenprojektor nur unvollständig erfasst werden konnten, sowie an einigen emaillierten Stellen auf der Kissenoberseite, liegen die Abweichungen oberhalb 0.3 mm. Beide Systeme dokumentieren somit ihre grundsätzliche Eignung für derartige Aufgabenstellungen.

## 5 Schlussbemerkungen

Der Einsatz eines Streifenprojektionssystems und des MicroScribe + MicroScan Laserscanners bestätigte deren grundsätzliche Eignung für die Digitalisierung und virtuelle Rekonstruktion von kleinvolumigen Kunstobjekten. Beide Geräte weisen eine ähnliche Messgenauigkeit auf, aber auch eine Reihe von Unterschieden in der Handhabung und bei der Objekterfassung selbst. Es liegt nahe, bei kommenden Untersuchungen eine gemeinsame, sich ergänzende Anwendung der beiden Messsysteme zu testen. Vorstellbar ist eine "Übersichtsaufnahme" mit dem Streifenprojektionssystem, während die detaillierte Feinarbeit – auch an kritischen Stellen (Kanten, Abschattungen, schwierige Materialien etc.) – mit dem Laserscanner erfolgen könnte.

## 6 Literaturverzeichnis

- BANGE, L., PEIPE, J. & PRZYBILLA, H.-J., 2007a: 3D-Dokumentation des Essener Domschatzes. Publ. DGPF, Bd. 16 (Hrsg.: E. Seyfert), Muttentz/Schweiz, S. 433-440.
- BANGE, L., PEIPE, J. & PRZYBILLA, H.-J., 2007b: Genauigkeitsmaße eines Streifenprojektionssystems zur 3D-Objekterfassung. In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Oldenburger 3D-Tage 2007 (Hrsg. T. Luhmann & Ch. Müller), Wichmann, Heidelberg, S. 116-122.
- BREUCKMANN, 2008: Produktinformation optoTop & triTOS. [www.breuckmann.com](http://www.breuckmann.com) (27.02.08)
- GEOMAGIC, 2008: Produktinformation Geomagic. [www.geomagic.com](http://www.geomagic.com) (27.02.08)
- PEIPE, J., PRZYBILLA, H.-J., 2005: Modeling the Golden Madonna. In: Proceedings CIPA 2005 XX Int. Symposium, Turin, Italy, ISSN 1682-1777, S. 934-936.
- PRZYBILLA, H.-J., PEIPE, J. & KOZUSCHEK, N., 2008: Zur Genauigkeitsprüfung eines preiswerten, kleinvolumigen Laserscanners. In: Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Oldenburger 3D-Tage 2008, Wichmann, Heidelberg (im Druck)
- RSI, 2008: Produktinformation MicroScribe und MicroScan. [www.rsi-gmbh.de](http://www.rsi-gmbh.de) (27.02.08)