

Virtuelles 3D-Modell der antiken Tempelanlage in Sirwah/Jemen zur archäologischen Objektdokumentation durch terrestrisches Laserscanning und Photogrammetrie

MAREN LINDSTAEDT¹, THOMAS P. KERSTEN¹, KLAUS MECHELKE¹,
MARCEL GÖTTING¹, RENÉ HEIDEN¹

Der folgende Beitrag zeigt den kombinierten Einsatz von digitaler Photogrammetrie und terrestrischem Laserscanning bei der 3D-Erfassung und Modellierung des Almaqah-Tempels in Sirwah (Republik Jemen). Das antike Bauwerk liegt 120 km östlich von Sana'a und ca. 40 km westlich der Stadt Marib.

Das Projekt ist eine Kooperation zwischen dem Deutschen Archäologischen Institut (DAI), Außenstelle Sana'a der Orientabteilung und dem Department Geomatik der HafenCity Universität Hamburg. Die Objektaufnahme erfolgte im Februar 2007 mit der digitalen Spiegelreflexkamera FujiFine Pix S2 Pro und dem terrestrischen Laserscanner Trimble GS101 während der archäologischen Ausgrabungen. Der Tempel wurde als Datengrundlage für Archäologen und andere Forschungsdisziplinen durch eine Dreiecksvermaschung modelliert. Verschiedene Möglichkeiten der Texturierung des Modells wurden diskutiert und aufgezeigt.

1 Einleitung

Wurden früher für die Erfassung von komplexen Objekten oftmals photogrammetrische Mehrbildverfahren und geodätische Messmethoden genutzt, so steht seit einigen Jahren mit dem terrestrischen Laserscanning eine weitere leistungsstarke Technologie zur Verfügung. Die Scanner lassen sich je nach gewünschtem Endprodukt allein oder in Kombination mit der Photogrammetrie einsetzen. Durch ihre Eigenschaft eine extrem hohe Punktzahl in kurzer Zeit zu erfassen, sind sie für viele Anwendungen heute eine echte Alternative zu herkömmlichen Erfassungsmethoden, um Daten für die Modellierung von verschiedensten Objekten zu beschaffen.

Ist das zu erfassende Objekt von archäologischer Bedeutung, bietet die Erstellung eines interaktiven, virtuellen 3D-Modells viele Vorteile hinsichtlich der Interpretation und ermöglicht das Zusammenführen unterschiedlichster Informationen mit einem räumlichen Bezug. Die Interaktivität eines Modells liegt in der dem Anwender gegebenen Möglichkeit, sich aus dem dargestellten Objekt die für ihn wichtigen Informationen selbst zu beschaffen. Der Grenze an Informationen ist durch die virtuelle Realität kaum ein Riegel vorgeschoben. Lediglich das Potential der Hard- und Software könnte Einschränkungen liefern, da sie die Möglichkeiten zur Darstellung und Speicherung von Informationen definieren.

Das hier vorgestellte Projekt wurde an der HafenCity Universität Hamburg in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Archäologischen Institut, Außenstelle Sana'a der Orientabteilung durchgeführt. Die Kooperation der beiden Projektpartner läuft schon seit mehreren Jahren, u.a. wurde schon die Erfassung und Modellierung des großen Damms in Marib/Jemen (SOMMER & KERSTEN 2007) gemeinsam durchgeführt. Der in dieser Kampagne aufgenommene Almaqah-Tempel in Sirwah, der 120 km östlich der jemenitischen Hauptstadt Sana'a gelegen ist, wurde durch terrestrisches Laserscanning und digitale Architekturphotogram-

¹ HafenCity Universität Hamburg, Department Geomatik, Hebebrandstr. 1, 22297 Hamburg, e-mail: [Maren.Lindstaedt, Thomas.Kersten, Klaus.Mechelke]@hcu-hamburg.de

metrie erfasst, wobei im Vorfeld noch nicht klar war, ob die Auswertung in Kombination der beiden Datensätze oder nur aus einem der beiden erfolgen sollte. Die Erstellung des Modells für die Archäologen erfolgte dabei im Rahmen einer Diplomarbeit. Von Seiten der Archäologen wurde eine Genauigkeitsforderung von maximal 3 cm angegeben, da das zu generierende 3D-Modell nicht nur für Visualisierungszwecke genutzt werden, sondern auch für spätere Analysen von Statikern, Architekten und Archäologen dienen soll. Der Einsatz von terrestrischem Laserscanning und digitaler Photogrammetrie in der Archäologie ist beispielhaft u.a. bei EL HAKIM et al. (2004) und LINDSTAEDT et al. (2007) nachzulesen.

Zudem ist angedacht, das Modell als Datengrundlage für ein zukünftig noch zu erstellendes 3D-Geoinformationssystem zu nutzen, wie es z.B. vom DAI in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich für die Geoglyphen von Nasca-Palpa in Peru realisiert wurde, die mit Hilfe photogrammetrischer Methoden kartiert und anschließend in einem 3D-GIS bereitgestellt wurden (LAMBERS 2004).

2 Das Aufnahmeobjekt, der Almaqah-Tempel von Sirwah

Die sabäische Stadtanlage von Sirwah ist etwa 40 km südwestlich von Marib im Jemen gelegen. Bei einem annähernd trapezförmigen Grundriss nimmt das Stadtareal eine Fläche von etwa 220 m x 230 m ein. Abb. 1 zeigt eine Luftaufnahme der komplexen Stadtanlage in der sich der Almaqah-Tempel (rot umkreist) von Sirwah befindet.

Der Tempel gilt als eines der Meisterwerke der sabäischen Baukunst. Er bildet das zentrale Element der Stadtanlage und wurde in die Stadtmauer integriert. Mitte des 7. Jahrhunderts v. Chr. wurde der Hauptbau errichtet, der in den nachfolgenden Jahrhunderten mehrfach umgebaut und erweitert wurde. In die Stadtmauer eingebettet befindet sich die über 8 m hohe Tempelmauer, die noch heute sehr gut erhalten ist. Die Mitte des Hofes beherrschen die Inschriftensteine Karib'il Watar, die sich auf einem gemauerten und ursprünglich womöglich mit Alabasterplatten verkleideten Sockel erheben. Die 6,80 m langen, übereinander liegenden Steine tragen auf beiden Seiten die bisher längste bekannte sabäische Inschrift.

Die Nord-Südausdehnung der Tempelanlage beträgt etwa 40 m und die Ost-Westausdehnung ca. 30 m. Die Höhe der Außenmauer misst maximal 9 m über Boden und der Turm im südöstlichen Teil des Tempels ist mit 10 m das höchste Objekt der Anlage.

Die Restauration der Tempelanlage dauert bereits mehrere Jahre, wobei der Tempel heute vollständig freigelegt ist.



Abb. 1: Luftaufnahme der sabäischen Stadtanlage von Sirwah (GERLACH 2003) (links), Almaqah-Tempel im Februar 2007 (rechts)

3 Die Aufnahmesysteme

Die kombinierte Aufnahme des Almaqah-Tempels erfolgte mit der digitalen Spiegelreflexkamera Fujifilm Fine Pix S2 Pro mit einem 28mm-Nikkor-Objektiv (Fläche des Super-CCD Chips 23,3 mm x 15,6 mm mit maximal 4256 x 2848 Pixel) und dem terrestrischen Laserscanner Mensi GS101 von Trimble. Das Laserscanningsystem, bestehend aus Scanner, Software und Zubehör, arbeitet nach dem Impulslaufzeitverfahren. Bei einer optimalen Messentfernung von 2-100 m beträgt die Messgenauigkeit einer Einzelstrecke 6 mm. Durch eine Winkelauflösung von 0,0018° lässt sich in 100 m Entfernung eine Gitterweite von 3x3 mm² realisieren. Der Panorama-View Scanner (360° horizontal, 60° vertikal) kann max. 5000 Punkte/sec messen. Die geodätische Netzmessung und Bestimmung der Passpunkte wurden mit dem Tachymeter TCRP 1201 R300 der Firma Leica durchgeführt.

4 Photogrammetrische Objektaufnahme und Laserscanning

Die Objektaufnahme erfolgte in einer vierwöchigen Messkampagne im Februar 2007, wobei in jeder Woche sechs Tage gearbeitet wurde. Das Team bestand aus einem wissenschaftlichen Mitarbeiter und zwei Diplomanden der HafenCity Universität Hamburg.

Für die zu Beginn durchgeführte Netzmessung wurden die in einer früheren Kampagne mit GPS im UTM-System bestimmten Festpunkte genutzt; innerhalb dieses erstellten Netzes wurden dann die Passpunkte für die Photogrammetrie und das Laserscanning bestimmt.

Für die photogrammetrische Aufnahme wurden 285 Passpunkte (Signal siehe Abb. 8) an das Objekt angebracht. Insgesamt wurden mit der Fuji FinePix S2 Pro an zwei Tagen 450 Aufnahmen gemacht, die ein Datenvolumen von 16 GB besitzen. Um möglichst gute Schnittgeometrien zu gewährleisten, wurden die Aufnahmen nicht nur vom Boden, sondern auch von einer Leiter bzw. vom Turm des Tempels aus gemacht. Da auch Details wie z.B. die Inschriftensteine erfasst und ausgewertet werden sollten, ergaben sich sehr unterschiedliche Aufnahmeabstände und daraus resultierend große Unterschiede in den Bildmaßstäben.



Abb. 2: Aufnahme mit dem terrestrischen Laserscanner MENSIGS101

Die Aufnahme mit dem Laserscanner Mensi GS101 dauerte die ganze Kampagne über, wobei die Messungen jedoch mehrmals für einige Tage unterbrochen wurden. Zunächst wurde mit großen Objekten wie der Außenmauer begonnen, später erfolgte die Aufnahme der kleineren Objekte wie die Inschriftensteine und die Bronzekammern. Insgesamt wurden 41 Standpunkte benötigt und 45 Millionen Punkte erfasst, was einer Datenmenge von 2,7 GB entspricht. Für die Registrierung und Georeferenzierung wurden auf jedem Standpunkt mehrere Kugeln gescannt, die wie die photogrammetrischen Passpunkte mit dem Tachymeter bestimmt wurden. Da die maximale Betriebstemperatur des Scanners von 40⁰ Celsius immer schon im Lau-

fe des Vormittags erreicht wurde, war das Arbeiten nur mit einem Sonnenschirm als Hitzeschutz möglich.

5 Datenauswertung

5.1. Registrierung und Georeferenzierung der Punktwolken

Für die Registrierung bzw. Georeferenzierung der Scandaten wurde das Programm RealWorks Survey 5.1 genutzt, das wie der Scanner aus dem Hause Trimble stammt. Aufgrund der großen Datenmenge von 45 Millionen Punkten erfolgte keine Registrierung mehrerer Standpunkte in ein Scannerkoordinatensystem, sondern jeder Standpunkt wurde über die gescannten Kugeln direkt im UTM-System georeferenziert. Eine Ausnahme bildeten lediglich die sieben Standpunkte der Bronzekammern, da hier nicht für jeden Scan ausreichend geodätisch bestimmte Kugeln zur Verfügung standen und daher erst eine Registrierung der Stationen zueinander erfolgte. Insgesamt ergab sich für alle Objektpunkte eine mittlere Genauigkeit von 9 mm, die innerhalb des zu erwartenden Rahmens lag und für die von den Archäologen geforderte Modellgenauigkeit ausreichend war.

Für die weitere Bearbeitung wurde die Punktwolke (Abb. 3) auf einen Punktabstand von 15 mm ausgedünnt, was immer noch einer Punktzahl von 22 Mio. entsprach. Daher wurde die Punktwolke in sieben zu modellierende Bereiche segmentiert und in ASCII-Files mit RGB-Werten exportiert.



Abb. 3: Gesamtpunktwolke des Almaqah-Tempels nach Georeferenzierung

5.2. Photogrammetrische Auswertung

Von den aufgenommenen 450 Bildern wurden nicht alle weiter verwendet, sondern es wurden ca. 260 Bilder der interessierenden Bereiche ausgewählt und auf zwei Bildverbände verteilt. Die Bildorientierungen dieser Bildverbände mit je ca. 130 Bildern und die Kamerakalibrierung der Fuji S2 wurden simultan in je einer Bündelblockausgleichung mit dem Programm PHIDIAS bestimmt, das eine MDL-Applikation (MicroStation Development Language) für das CAD-System MicroStation ist.

Eine gute Verknüpfung innerhalb der Bildverbände wurde durch die hohe Anzahl von gemessenen Punkten pro Bild gewährleistet (14 bzw. 21 Stück), wobei jeder Objektpunkt durchschnittlich in sieben bzw. acht Bildern gemessen wurde. Im Zuge der simultanen Kamerakalibrierung wurden vor allem die systematischen Fehler bedingt durch die hohe Objektivverzerrung kompensiert, durch einen Vergleich der beiden Kalibrierungen untereinander ließen sich die Ergebnisse jeweils bestätigen. Die durchschnittliche Messgenauigkeit der Bild-

punkte lag bei 3 – 4 μm , was ca. einem halben Pixel entspricht. Die Genauigkeit für die Objektpunkte betrug ca. 3-4 mm und lag damit ebenso unterhalb den von den Archäologen geforderten Werten.

5.3. Modellierung des Tempels

Für die Modellierung des Tempels standen nun sowohl die durch das Laserscanning generierte Punktwolke als auch die orientierten Bilder zur Verfügung. Im Verlauf der Projektbearbeitung wurde entschieden, die Modellierung aus Zeitgründen nur über eine Dreiecksvermaschung der Punktwolke durchzuführen und die Bilder in erster Linie zur Kontrolle und Texturierung des generierten Modells zu nutzen. Durch die Nutzung der Software PHIDIAS war zwar die Möglichkeit zur kombinierten Auswertung von Scandaten und Bildern gegeben, doch aufgrund der Komplexität des Objektes wurde diese Lösung verworfen.

Für die Dreiecksvermaschung wurde die Software Raindrop Geomagic in der Version 9 verwendet. Bei den aus RealWorks Survey exportierten Punktwolken wurden vor dem Import noch die Koordinaten gekürzt, da die Software aus dem Industriebereich kommt und die UTM-Koordinaten nicht ohne Probleme zu verwenden waren. Die nachfolgend beschriebenen Arbeitsschritte wurden für alle sieben Teilbereiche durchgeführt.

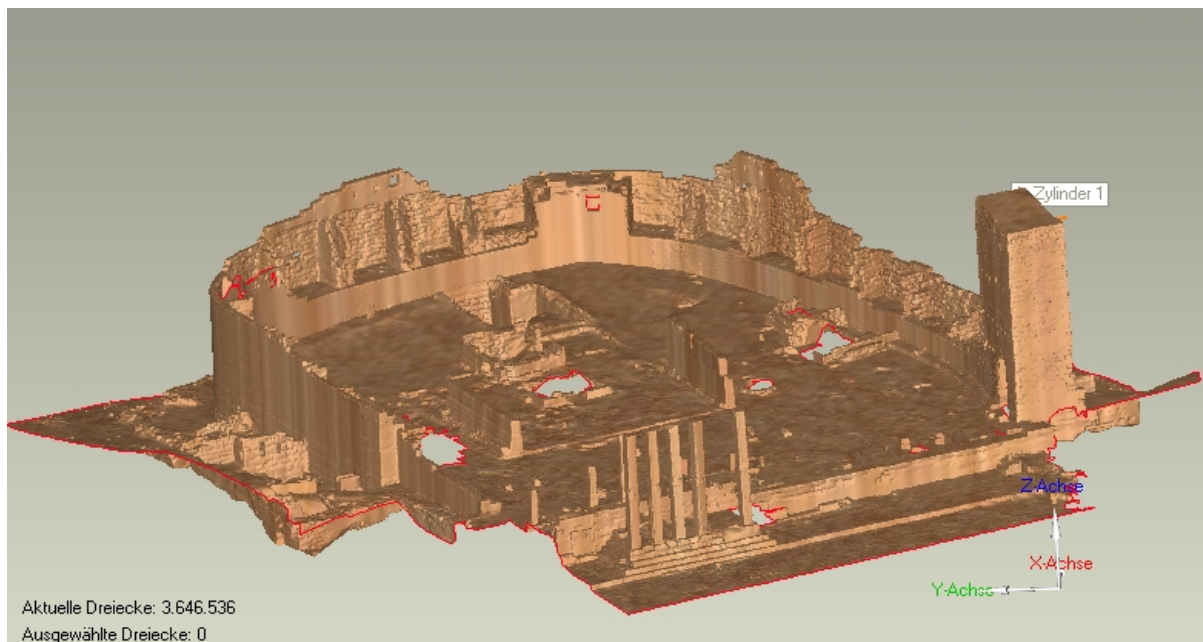


Abb. 4: Das in Geomagic modellierte Gesamtmodell des Almaqah-Tempels

Über eine Filterfunktion wurden zunächst noch vorhandene Ausreißer beseitigt. Dann wurde die Triangulation durchgeführt, meistens jedoch nicht für den gesamten Teilbereich auf einmal, sondern je nach Punktdichte mit unterschiedlichen Dreiecksgrößen für verschiedene Teilbereiche. Abschließend wurden die noch im Modell vorhandenen kleineren Löcher gefüllt, hierfür gibt es in der Software Geomagic mehrere Optionen, u.a. das hier verwendete krümmungsbasierte Füllen, um die fehlenden Dreiecke bestmöglich der umliegenden Objektform anzupassen. In der Software wird bei der Dreiecksvermaschung jedem erzeugten Dreieck ein Farbwert zugewiesen, der aus den drei verwendeten Punkten interpoliert wird. So wirkt das erzeugte Modell schon recht anschaulich, doch für realistische Visualisierungszwecke muss dennoch auf eine Texturierung des Modells mit digitalen Bildern zurückgegriffen werden. Im Anschluss an die Vermaschung wurden bei Bedarf noch die Polygone geglättet, weil durch Registrierungsungenauigkeiten in den Überlappungsbereichen der Scans eine

leicht raue Oberfläche entstanden war. Da die Datenmenge nach der Modellierung bei ca. 12 Mio. Dreiecken lag, wurde in einigen ausgewählten Bereichen die Anzahl der Dreiecke deutlich reduziert. Dies war z.B. bei der Außenmauer der Fall, die durch die sehr fein geformten Steine eine ganz glatte Oberfläche aufweist, und somit die Genauigkeit des Modells durch die Reduktion nicht beeinträchtigt wurde. Das Ergebnis der Modellierung ist in Abbildung 4 zu sehen.

Um nachweisen zu können, dass die Form des Modells nicht unter der Datenreduktion gelitten hatte, wurden die beiden Modelle (vor und nach der Reduktion) miteinander verglichen. Das Ergebnis ist in Abb. 5 zu sehen, die Abweichungen liegen zum größten Teil nur im Bereich von einigen Millimetern. So ließ sich die Anzahl der Dreiecke auf ca. ein Drittel verringern.

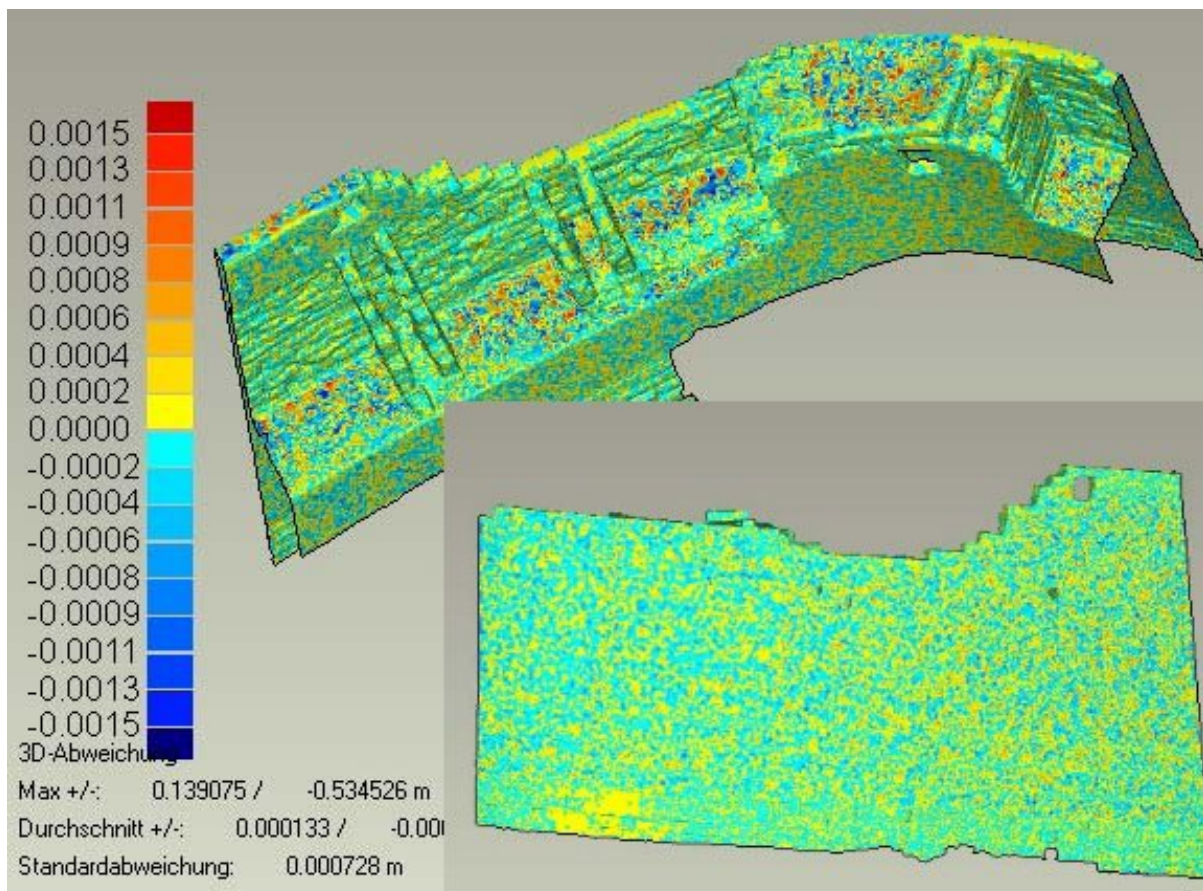


Abb. 5: Abweichungen zwischen originalem und reduziertem Modell des Tempels

Abschließend wurde das Modell durch einige Maße aus der Photogrammetrie kontrolliert. Dabei lagen die mittleren Streckendifferenzen bei 13mm, und auch die maximale Abweichung von 27mm liegt in dem von den Archäologen geforderten Rahmen. Eine detaillierte Beschreibung der Modellierung ist in GÖTTING & HEIDEN (2007) zusammengefasst.

In einem weiteren Versuch wurde untersucht, inwiefern sich weitere Datenreduktionen auf die Genauigkeit des Modells auswirken. Dafür wurde als Ausgangsdatensatz das Modell mit den 3,5 Mio. Dreiecken verwendet. Die Reduktion erfolgte in sieben Schritten bis zu einem Minimum von 5% der ursprünglichen Dreiecksanzahl (Abb.6). Dabei wurde für die Berechnung immer die Option der maximalen Krümmungspriorität gewählt. Das Ergebnis zeigte, dass bei fünf von sechs Vergleichsstrecken in allen Stufen bis einschließlich 10% alle Differenzen innerhalb von 2,5cm zum Ausgangsdatensatz lagen (Tab.1). Die einzige Strecke mit einer größeren Abweichung, die Strecke 4, ist eine durch abgerundete Kanten nicht eindeutig

zu Steinlänge. So sind Maße von klar zu definierenden Strecken auch in dem stark reduzierten Modell mit einer Genauigkeit von deutlich unter 5 cm zu bestimmen. Dies belegt, dass bei Verwendung der krümmungsbasierten Reduktion in den ebenen Bereichen z.T. stark reduziert wird, die Ecken und Kanten selbst aber erhalten bleiben, und somit auch die ursprüngliche Geometrie des Modells bewahrt wird.

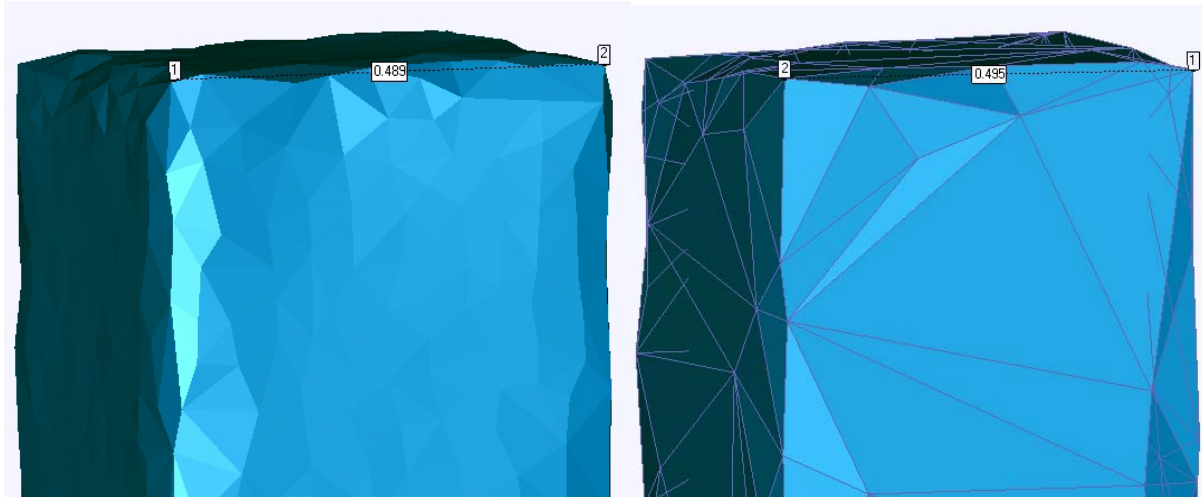


Abb. 6: Ausgangsdatensatz (links) und auf 10% reduzierter Datensatz

Tab. 1: Differenzen zwischen Ausgangsdatensatz und reduzierten Daten [cm]

		Datensatz reduziert auf x Prozent						
		80%	60%	50%	25%	20%	10%	5%
Strecke	1	0,2	0,4	1,1	0,9	1,0	0,5	0,4
	2	-0,1	0,0	-0,5	0,2	-0,1	-0,5	-0,2
	3	0,3	0,1	-0,1	-0,7	-0,8	-0,7	4,5
	4	-4,7	0,8	-7,0	-5,7	-6,1	-4,5	-6,7
	5	-1,5	-2,1	-0,9	0,1	0,0	0,2	2,1
	6	0,3	0,1	0,0	1,3	0,9	1,4	-1,0

5.4. Texturierung des Modells

Zuletzt wurden Teile des Modells mit den erfassten Photos texturiert. Dafür wurden zwei verschiedene Softwarepakete getestet und die Ergebnisse miteinander verglichen. Aufgrund der Modellgröße wurden beispielhaft nur der Turm und ein Inschriftenstein texturiert, um daran die Eignung der unterschiedlichen Programme aufzuzeigen. Die Bearbeitung erfolgte zum einen wie schon auch die Modellierung in Geomagic Studio 9 und zum anderen mit dem Programm QTSculptor (Demo-Version) der Polygon Technology GmbH. Die Ergebnisse waren jedoch beide nicht vollkommen zufriedenstellend. Die Programme realisieren die Registrierung von Bild und Modell über Passpunkte, was nicht immer reibungslos funktionierte, auch nicht bei einer höheren Anzahl von Passpunkten als gefordert. Die größten Probleme gab es beim Einsatz von Geomagic, die Registrierung gelang nur ab und an, ein Grund dafür konnte jedoch nicht gefunden werden. Eine Möglichkeit, die Orientierungen der Bilder zu nutzen gibt es in keinem der beiden Programme. In QTSculptor besteht immerhin die Option, eine Kamerakalibrierung einzugeben, um Verzeichnungen zu berücksichtigen. Ein weiteres Problem ergab sich im Überlappungsbereich zweier Bilder. Dort wurden entweder beide Texturen gemischt, was zu einer Unschärfe in diesem Bereich führte, oder es gab eine klare Kante ohne radiometrische Angleichung der beiden Bilder, die dann deutlich im Modell zu sehen war (Abb. 7).



Abb. 7: Radiometrische Unterschiede in den Texturen

Zudem sind für die Beurteilung der Qualität die Registrierungsgenauigkeiten nicht quantifizierbar und auch nur in QTScultor überhaupt visuell zu kontrollieren. Der texturierte Turm und der Inschriftenstein sind in Abb. 8 dargestellt.



Abb. 8: Turm und Inschriftenstein, texturiert in Geomagic

6 Geplante GIS-Anbindung

Damit auch andere Fachdisziplinen mit diesem Modell arbeiten können, wurde es in das VRML-Format exportiert. Durch die Verwendung eines geeigneten Viewers lässt sich der Tempel nicht nur interaktiv von allen Seiten betrachten, es können auch beliebige Maße abgegriffen werden (Abb. 9 rechts). Damit dient es als wertvolle Informationsquelle für Bauingenieure, Architekten, Statiker und Archäologen und ersetzt in vielen Bereichen das aufwän-

dige Handaufmass. Des Weiteren ist das Modell als Grundlage für eine Datenbank der Archäologen generiert worden, um dann im Feld z.B. Funde direkt im Modell kartieren und mit Informationen versehen zu können (Abb. 9 links).



Abb. 9: Einsatzmöglichkeiten des Modells: Datengrundlage für eine GIS-Anbindung (links) und Messung einer Distanz im VRML-Viewer (rechts)

7 Fazit und Ausblick

Mit dieser Arbeit wurde die 3D-Objekterfassung des Almaqah-Tempels in Sirwah/Jemen mit Hilfe des Verfahrens des Laserscannings dargelegt. Der hier eingesetzte Trimble GS101 ermöglichte die Einhaltung der von den Archäologen geforderten Genauigkeit von 3 cm, was durch die photogrammetrischen Daten nachgewiesen werden konnte. Somit kann das Modell als Datengrundlage für verschiedene Forschungsdisziplinen vor Ort dienen.

Die Modellierung durch Dreiecksvermaschung der Punktwolke ergibt ein so gut wie vollständiges Abbild des Tempels, die Auswertung der photogrammetrischen Daten war hierbei gar nicht notwendig. Dabei ist die Modellierung durch Vermaschung sehr viel weniger zeitaufwändig als bei der photogrammetrischen Auswertung und Rekonstruktion in CAD, trotzdem ist das durch die Vermaschung erstellte Modell in seinem Detaillierungsgrad mit einer steingerechten Auswertung gleichzusetzen. Ein großes Problem ist hierbei jedoch immer noch die Datenmenge. Der Laserscanner bietet die Möglichkeit, hohe Datenraten zu erfassen, doch die Auswertung und Weiterverarbeitung dieser Datenmengen auf ein Maß, das sich problemlos auf jedem Rechner handhaben lässt, gestaltet sich schwierig und ist mit viel Aufwand verbunden. Das hier erstellte Modell hat im VRML-Format eine Dateigröße von 120 MB, was die Handhabung auf einem durchschnittlichen PC schon schwierig macht; eine vollständige Texturierung des Tempels in diesem Detaillierungsgrad würde eine Interaktion des Modells unmöglich machen.

Die hier gezeigten Ansätze zur Texturierung des Modells sind noch keine vollständig zufriedenstellenden Lösungen, so war in beiden eingesetzten Programmen die Verwendung von Bildorientierungen nicht möglich und die Texturierung nur mit großem manuellem Aufwand zu bewältigen. Daher wurden nur beispielhaft wenige ausgesuchte Bereiche texturiert. Eine automatische Texturierung der verschiedenen reduzierten 3D-Modelle des Almaqah-Tempels ist durch die Verwendung der Bildorientierungen und den entsprechenden Kamerakalibrierungsdaten mit der 3D Image Software der TU Braunschweig (ABDELHAFIZ & NIEMEIER 2006) geplant.

Aus diesen Gründen sollte für zukünftige Projekte schon im Vorfeld genau geklärt werden, ob eine photogrammetrische Aufnahme bzw. Auswertung gewünscht ist, oder ob Bilder nur zur Texturierung des Objektes aufgenommen werden sollen. Ist das Modell mit einer hohen

Genauigkeit als Datengrundlage für Analysen etc. zu generieren, so ist bei dieser Objektgröße eine Texturierung mit dem heutigen Stand der Technik hinsichtlich Hard- und Software nicht auch noch möglich. Steht hingegen die Visualisierung im Vordergrund, dann sollte das Modell schon von vornherein so vereinfacht werden, dass eine Anwendung nicht nur auf High-End-PCs, sondern für jedermann möglich ist.

8 Literaturverzeichnis

- ABDELHAFIZ, A. & NIEMEIER, W., 2006: Developed technique for automatic cloud texturing using multi images applied to a complex site. IAPRS Volume XXXVI, Part 5, H.-G. Maas, D. Schneider (Eds.), Dresden 25-27 September 2006. http://rcswww.urz.tu-dresden.de/~isprs/proceedings/paper/ABDE_610.pdf
- EL-HAKIM, S. F., FRYER, J., PICARD, M., WHITING, E., 2004: Digital Recording of Aboriginal Rock Art. Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM'2004), Ogaki, Japan, November 17-19, pp. 344-353, NRC48049.
- GERLACH, I., 2003: Die archäologisch-bauhistorischen Untersuchungen in der sabäischen Stadtanlage und Oase von Sirwah. Artikel aus 25 Jahre Ausgrabungen und Forschungen im Jemen -1978-2003, Hefte zur Kulturgeschichte des Jemen – Band 1, pp. 96 – 105. Print Art – Sana'a.
- GÖTTING, M., & HEIDEN, R., 2007: Interaktives virtuelles 3D-Modell der antiken Tempelanlage in Sirwah/Jemen zur archäologischen Objektdokumentation durch terrestrisches Laserscanning und Photogrammetrie. Unveröffentlichte Diplomarbeit, HafenCity Universität Hamburg, August
- LAMBERS, K., 2004: The Geoglyphs of Palpa, Peru: Documentation, Analysis and Interpretation. Thesis presented to the Faculty of Arts of the University of Zurich for the degree of Doctor of Philosophy, 214 S.
- LINDSTAEDT, M., KERSTEN, TH., SAUERBIER, M., PETERHANS, J., FUX, P., 2007: Terrestrisches Laserscanning und digitale Photogrammetrie zur archäologischen Dokumentation der Petroglyphen von Chichictara in Peru. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007, Th. Luhmann/C. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 328-337.
- SOMMER, A. & KERSTEN, TH., 2007: 3D-Modell des Nordportals des alten Dammes in Marib/Jemen durch Kombination von digitaler Architekturphotogrammetrie und terrestrischem Laserscanning. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2007, Th. Luhmann/C. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 300-309.