

Virtuelle Rekonstruktion des Almaqah-Tempels von Yeha in Äthiopien mit Hilfe terrestrischer Laserscanning-Daten

Maren LINDSTAEDT¹, Klaus MECHELKE², Mike SCHNELLE³ & Thomas KERSTEN¹

¹HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning

²HafenCity Universität Hamburg, Geodätisches Labor, Hebebrandstr. 1, 22297 Hamburg,

³Deutsches Archäologisches Institut, Außenstelle Sana'a der Orient-Abteilung, Bauforschung, Podbielskiallee 69-71, 14195 Berlin

Zusammenfassung

Im Herbst 2009 wurde in Zusammenarbeit zwischen dem Deutschen Archäologischen Institut (Außenstelle Sana'a der Orientabteilung) und der HafenCity Universität Hamburg der Almaqah-Tempel von Yeha in Äthiopien durch terrestrisches Laserscanning und digitale Photogrammetrie erfasst. Der Tempel stammt aus dem 7. Jahrhundert v. Chr. und zählt zu den am besten erhaltenen Bauwerken sabäischer Architektur in Afrika. Für aktuelle und künftige Messaufgaben vor Ort wurde ein geodätisches Netz angelegt und mittels GPS-Punktbestimmung in das UTM-Koordinatensystem eingebunden. Die erfassten 3D-Daten bilden die Grundlage für alle zukünftigen Arbeiten am Tempel. So wurde aus den Punktwolken ein virtuelles 3D-Modell des Tempels erstellt, aus dem u.a. bauliche Deformationen der Fassaden für geplante Restaurierungsarbeiten abgeleitet werden konnten. Mit Hilfe der Punktwolke und bauforschungstechnischen Untersuchungsergebnissen wurde das heute nicht mehr vorhandene Propylon (Torbau) virtuell rekonstruiert. Zusätzlich stehen die Daten für die Einbindung in den Masterplan zur touristischen Erschließung der Region Tigray um Yeha und Axum zur Verfügung.

1 Einleitung

Das terrestrische Laserscanning hat sich heute auf vielen archäologischen Fundstätten als eine effiziente Technik zur Dokumentation von Forschungsobjekten und Grabungsabschnitten etabliert. Durch die Eigenschaft, eine extrem hohe Anzahl von Punkten sehr schnell zu erfassen, werden Laserscanner heute oftmals dem Tachymeter vorgezogen. Die Grabungsarbeiten müssen für die Aufnahme durch terrestrisches Laserscanning nicht lange unterbrochen werden, der jeweilige Grabungszustand lässt sich jedoch sehr detailliert im Rechner abbilden und später analysieren. Je nach Wunsch wird nur die Punktwolke für archäologische Analysen verwendet, oder aber es wird ein komplettes 3D-Modell des Objektes erstellt.

Auch wenn keine Grabungsarbeiten durchgeführt werden, so ist heute zunehmend der Einsatz gleich mehrerer Sensoren für die Dokumentation historischer Stätten zu beobachten, so nutzen z.B. REMONDINO et al. (2009) nicht nur einen Laserscanner und terrestrische photogrammetrische Aufnahmen, sondern auch noch von einem Unmanned Autonomous Vehicle (UAV) aus der Luft aufgenommene Bilder für die Dokumentation der ehemaligen Maya-Stadt Copán. Für die Aufnahme des Erechtheion in Athen haben EL-HAKIM et al.

(2008) Laserscanner unterschiedlicher Genauigkeiten gemeinsam verwendet und mit digitalen Bildern kombiniert.

Das hier vorgestellte Projekt ist eine Kooperation der HafenCity Universität Hamburg mit der Außenstelle Sana'a der Orientabteilung des Deutschen Archäologischen Instituts. Die Kooperation besteht seit einigen Jahren und bisher wurden schon einige Objekte im Jemen erfasst und modelliert, z.B. der Almaqah-Tempel in Sirwah (LINDSTAEDT et al. 2008) oder der große Damm in Marib (SOMMER & KERSTEN 2007).

Die Aufnahme des Almaqah-Tempels von Yeha wurde in dieser ersten Kampagne sowohl durch terrestrisches Laserscanning als auch durch digitale Photogrammetrie durchgeführt. Die Verwendung der photogrammetrischen Aufnahmen war zum Aufnahmezeitpunkt noch nicht endgültig definiert, so dass diese Aufnahmen zumindest die Grundlage zur späteren Objekttexturierung bilden sollten. Neben der Dokumentation des heutigen Zustandes des 2700 Jahre alten Tempels für die notwendigen Restaurierungsarbeiten ging es bei dieser Datenerfassung auch um die Option, ein virtuelles 3D-Modell des ursprünglichen Tempels zu erstellen. Dafür wurde unter der Berücksichtigung bauforschungstechnischer Aspekte die Punktwolke und das 3D-Modell als Konstruktionsgrundlage genutzt. Dieses Ergebnis ist nun nicht nur für weitere archäologische Untersuchungen nutzbar, sondern kann auch in den Masterplan für die touristische Erschließung der Regionen Axum und Yeha mit einbezogen werden.

2 Der Almaqah-Tempel von Yeha in Äthiopien

Der Almaqah-Tempel von Yeha befindet sich im Norden Äthiopiens, ca. 30 km nordöstlich der Stadt Adwa. Der Tempel wurde in sabäischer Bauweise errichtet und datiert auf ca. 700 v.Chr.



Abb. 1: Der Almaqah-Tempel von Yeha in Äthiopien (links): Ansicht von Westen (Mitte), Ostfassade im Tempelinneren (rechts)

Die Abmessungen betragen ca. 18 m x 15 m, die ursprüngliche Höhe betrug mehr als 14 Meter. Die Wände sind ohne den Einsatz von Mörtel aus bis zu 3 m langem Stein gemauert, wobei die Steine sehr eben sind und mit großer Präzision hergestellt wurden, so dass zwischen ihnen im Laufe der Jahrhunderte kaum Fugen entstanden sind. Generell sind die

Wände sehr gut erhalten, an einer Stelle ist sogar die ursprünglich abschließende oberste Steinlage noch vorhanden. Über dem Eingang auf der Westseite ist ein U-förmiger Ausbruch des Mauerwerks zu erkennen (s. Abb. 1 Mitte). Im Inneren schließt eine zweite Wand bis auf die halbe Höhe von ca. 6 m an die Außenwand an, die an mehreren Stellen noch ihre ursprüngliche Höhe besitzt. Im Eingangsbereich lässt das noch vorhandene Fundament auf einen Propylon (Torbau) schließen, der heute jedoch nicht mehr existiert.

3 Datenerfassung

Für die Aufnahme des Tempels wurde der terrestrische Laserscanner IMAGER 5006 der Firma Zoller + Fröhlich eingesetzt (siehe Abb. 2 rechts). Der Scanner misst Distanzen mit dem Phasendifferenzverfahren in einem Eindeutigkeitsbereich bis 79m. Weitere technische Details des Gerätes finden sich z.B. in MECHELKE et al. (2008) und KERSTEN et al. (2009).

Die Aufnahme fand im Rahmen der Herbstkampagne im Oktober und November 2009 statt, wobei der Tempel an insgesamt sechs Tagen von 58 Standpunkten erfasst wurde. Die reine Scanzeit betrug jedoch nur ca. zwölf Stunden. Dabei wurden für eine umfassende Aufnahme sowohl vom Boden als auch von erhöhten Standpunkten aus gescannt (s. Abb. 2 links und Mitte). Hierfür wurde ein Gerüst mit einer Höhe von zwölf Metern errichtet, um auch die Mauerkrone erfassen zu können. In der Regel wurde die Scanauflösung „high“ gewählt (6.3mm@10m), was in einer Datenmenge von insgesamt ca. 11,1 GB resultierte. Für die spätere Einfärbung der Punktwolken wurde eine Nikon D40 (mit 18mm-Objektiv) auf dem Scanner adaptiert und außerdem wurde eine Nikon D200 (mit 14mm-Objektiv) auf einem Nodalpunktadapter verwendet.



Abb. 2: Eingesetzter Laserscanner IMAGER 5006 von Zoller + Fröhlich (rechts) auf Gerüstturm (links) und auf der Tempelmauer (Mitte)

In dieser ersten Kampagne wurde als Grundlage ein großräumiges geodätisches Netz angelegt, um sich in den folgenden Expeditionen auf das identische geodätische Grundlagentnetz beziehen zu können. Dafür wurden acht Punkte mit GPS bestimmt, die sich sowohl um das Dorf verteilen als auch in Tempelnähe befanden. Dieses Netz wurde tachymetrisch verdichtet, zudem wurde für den Tempel ein spannungsfreies Sondernetz geschaffen, um hier

für das Objekt selbst die höchstmögliche Genauigkeit erreichen zu können. Für jeden Scan wurden im Tempelareal eine ausreichende Anzahl von Zielzeichen gut verteilt signalisiert, so dass immer eine direkte Georeferenzierung der jeweiligen Station erfolgen konnte. Auf diese Weise konnte eine Genauigkeit von 2-3 mm für die Georeferenzierung der Punktwolken erreicht werden.

4 Datenauswertung

Die Auswertung der erfassten Daten gliederte sich in mehrere Teilaufgaben. Klar definiertes Ziel dieser ersten Messkampagne ist die Bestandsaufnahme, d.h. die Erstellung eines vollständigen, detaillierten Modells des Tempels. Zwar liegen darüber hinaus einige Pläne und Zeichnungen des Bauwerkes aus den letzten Jahrzehnten vor (DE MAIGRET & ROBIN 1998), doch sollten als Grundlage für eine geplante Restaurierung die Deformationen der Fassaden ermittelt und visualisiert werden. Die Generierung des virtuellen 3D-Modells aus der Punktwolke als Dokumentation des aktuellen Bestandes und die Rekonstruktion des ursprünglichen Tempelzustandes werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

4.1 Dreiecksvermaschung

Für die Modellierung des Tempels wurde eine Dreiecksvermaschung mit der Software Geomagic durchgeführt. Die Rohdatenmenge von 300 Mio. Punkten wurde durch Ausdünnung und Segmentierung um den Faktor 12 auf eine Größe von ca. 26 Mio. Punkten reduziert, der Punktabstand betrug dabei noch 10 mm. Schließlich wurde das Gesamtmodell aus fünf Einzelteilen, nämlich aus den vier Fassaden und dem Boden, zusammengesetzt. Als Kompromiss zwischen Dateigröße und Detaillierungsgrad wurde eine Datenmenge von 12 Mio. Dreiecken als akzeptabel erachtet, zumal dieses Modell nun in beliebigen Bereichen um höher aufgelöste Modellteile ergänzt werden kann. Verschiedene Ansichten des 3D-Modells sind in Abb. 3. dargestellt.

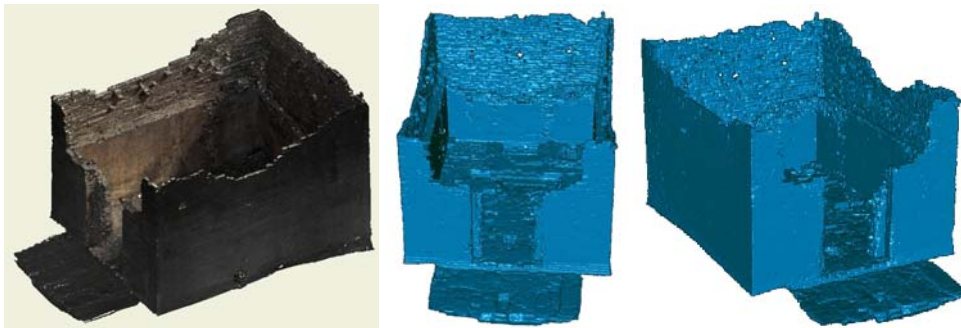


Abb. 3: Ansichten des Almaqah-Tempels in der Software Geomagic

4.2 Deformationen der Tempelfassaden

Für eine geplante Restaurierung des Tempels sind eine detaillierte Dokumentation des heutigen allgemeinen Zustandes sowie eine Erkennung und Quantifizierung möglicher

Gefahrenquellen unerlässlich. Das gesamte Bauwerk ist nach Bezahlung des Eintritts für Besucher zur Besichtigung frei zugänglich. Es gibt keine Sicherheits- oder Warnhinweise, obwohl die Steine des Mauerwerks in mehreren Bereichen nur noch sehr lose aufeinander liegen und sich einige gefährliche Überhänge gebildet haben. Auch die bisherige Dokumentation in Plänen hat sich nicht mit den sicherheitsrelevanten Aspekten und den Konsequenzen für die Restaurierung beschäftigt.

Aus diesem Grund wurden für die einzelnen Tempelfassaden die Abweichungen aus der Senkrechten dokumentiert. Die senkrechte Wand wurde aus der Punktwolke idealisiert auf dem Grundriss rekonstruiert, während die Punktwolke der jeweiligen Fassade trianguliert wurde. Mit beiden Datensätzen wurde ein 3D-Vergleich durchgeführt und ein Differenzplot erstellt, in dem farbcodiert die Gefahrenstellen jeder Fassade sofort als Maß erkannt werden können. Abbildung 4 zeigt dies beispielhaft für die äußere Nordfassade, in der nach Osten ein Überhang von knapp 30 cm zu erkennen ist, während der westliche Teil sich eher nach innen neigt.

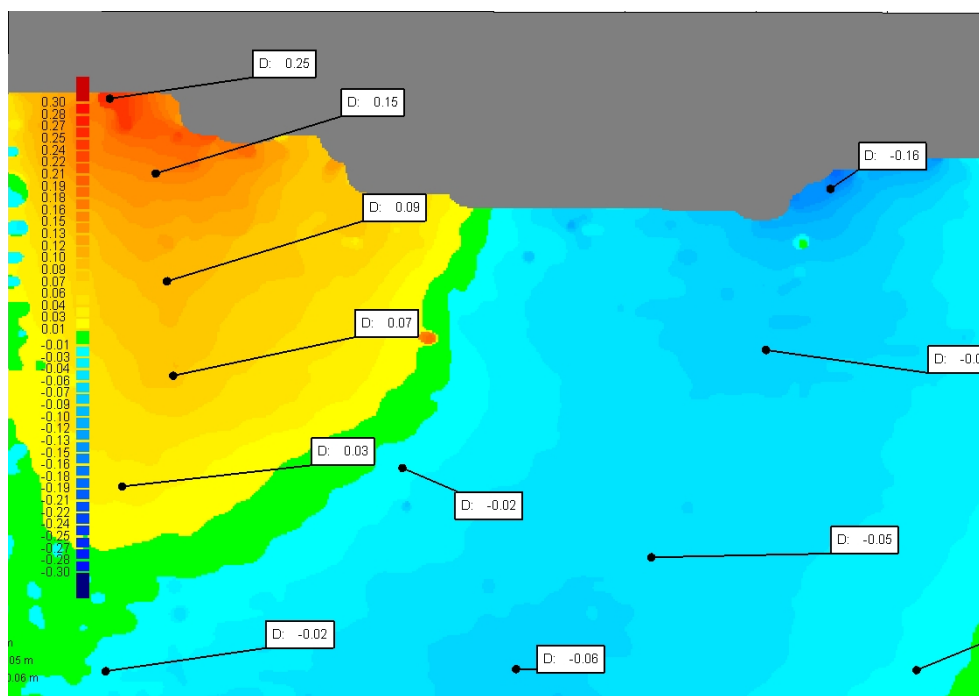


Abb. 4: Abweichungen der Nordfassade aus der Senkrechten (Einheit in Meter)

Zusätzlich lassen sich aus den Dreiecksvermaschungen der inneren und der äußeren Wand die Variationen in der Wandstärke aufzeigen, wie in Abb. 5 zu sehen ist.

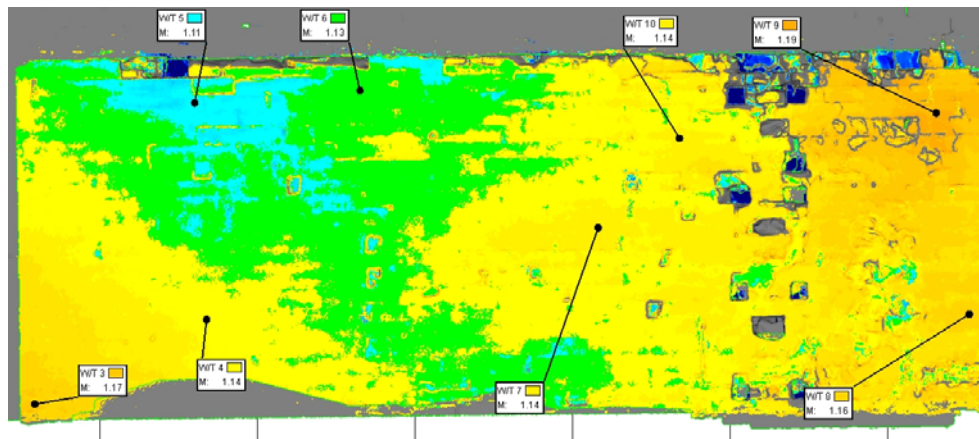


Abb. 5: Variationen der Wandstärke für die Nordfassade (Einheit in Meter)

4.3 Virtuelle Rekonstruktion

Der virtuellen Rekonstruktion gingen vor Ort neben der 3D-Scanaufnahme bauforscherische Untersuchungen und Literaturrecherchen voraus, deren Ergebnisse in Beschreibungen, Photos und analogen Skizzen festgehalten wurden. Sie bildeten das bauhistorisch-wissenschaftliche Gerüst und dienten als Grundlage für die Nutzung der 3D-Scandaten zur Objektrekonstruktion. Aufgrund des erheblichen Arbeitsumfangs einer virtuellen Gesamt-rekonstruktion erfolgte zunächst nur eine Rekonstruktion des Tempel­eingangs, die in weiteren Arbeitsschritten zu einer vollständigen Rekonstruktion des Tempels führen soll. Die hierfür eingesetzten Programme sind die Software LupoScan der Firma Lupos3D und AutoCAD.

Die ursprünglich geplante Methode der Vektorisierung und Rekonstruktion direkt in Lupo3D musste aufgrund fehlender Zeichenfunktionen in der 3D-Ansicht leider verworfen werden. Zur Anwendung kam stattdessen eine Methode, bei welcher in den verschiedenen 2D-Ansichtsfenstern der Einzelscans die Oberflächen des baulichen Bestandes des Tempels in LupoScan vektorisiert und nach AutoCAD transferiert worden sind. Zur schärferen und plastischeren Darstellung der Einzelscans sind vor der Vektorisierung von den 2D-Ansichten sogenannte Spot-Bilder in LupoScan berechnet worden, bei denen für jedes Pixel der Auftreffwinkel des Laserspots auf die Oberfläche berechnet und in Grauwerten dargestellt wird, da hier nicht mit RGB-Werten gearbeitet wurde. Nachdem alle benötigten Vektordaten erstellt und nach AutoCAD exportiert worden sind, erfolgten dann alle ergänzenden Rekonstruktionszeichnungen unter Einbeziehung der Ergebnisse der bauforscherischen Untersuchungen und direkter Maße aus der Punktwolke in AutoCAD. Im Eingangsbereich des Tempels befinden sich Säulenfundamente, die auf ein ehemaliges Propylon schließen lassen, welches hier im ersten Schritt rekonstruiert wurde (s. Abb. 6). In weiteren Schritten wird zukünftig der Innenbereich des Tempels modelliert werden, bis das komplette Aussehen des Bauwerkes virtuell wiederhergestellt ist.

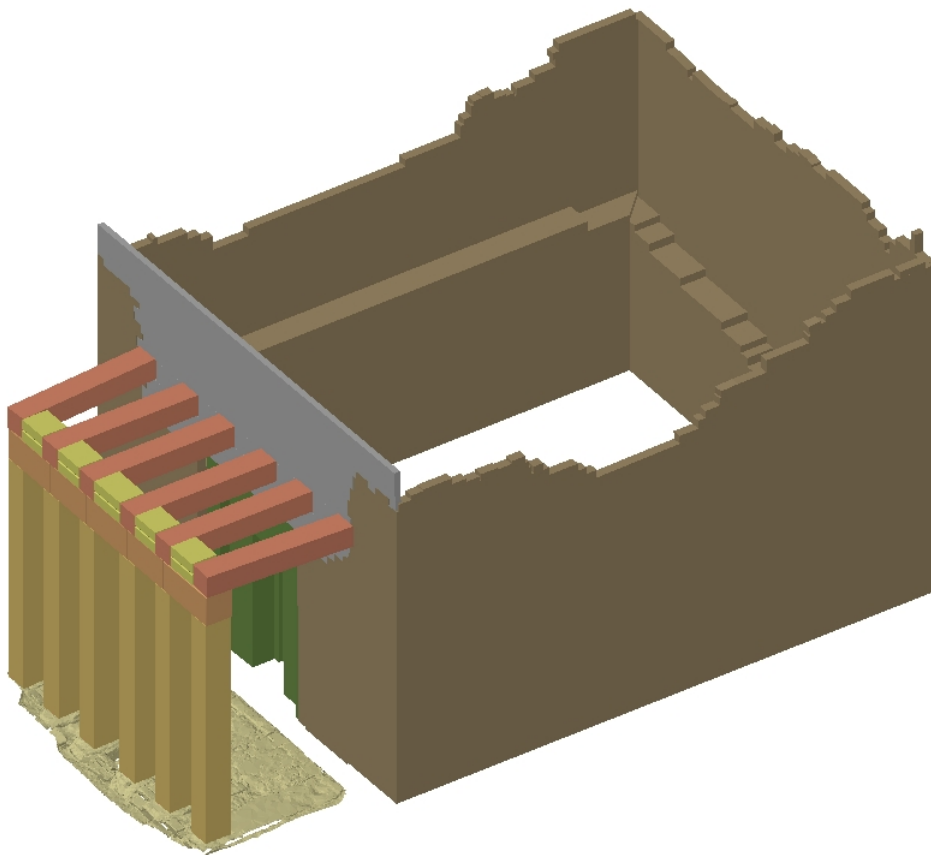


Abb. 6: Rekonstruiertes Propylon und Mauerwerk mit dem heutigen Bestand in CAD

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Für den Almaqah-Tempel von Yeha hat sich das terrestrische Laserscanning als ideale Erfassungsmethode herausgestellt. Durch ausreichende Arbeitszeit vor Ort war es möglich, eine lückenlose und detaillierte Dokumentation des heutigen Zustandes durchzuführen. Die generierte Punktwolke ist für vielfältige Aufgaben wie z.B. die Erstellung des 3D-Modells, zur Ableitung der Fassadendeformationen und der virtuellen Rekonstruktion des Tempel­einganges eingesetzt worden. Diese Informationen werden die geplanten Restaurierungsarbeiten signifikant unterstützen.

Die dargestellte Methode bietet der Bauforschung gute Möglichkeiten, dreidimensionale Vektordaten aus großen Punktwolken zu generieren. Sie vereinfacht die Ergänzung des baulichen Bestandes mit rekonstruktiven Elementen in Form von anschaulichen 3D-Modellen erheblich. Eine direkte Verknüpfung von Punktwolken und Vektoren, wobei die Punktwolke die Darstellung des Bestandes und die Vektordaten die Funktion der Darstellung der Rekonstruktion übernehmen, ist eine weitere interessante Kombination.

Die hier generierten Daten bilden die Grundlage für kommende Messaufgaben, dazu zählen unter anderem die Dokumentation der geplanten Grabungen und die Überwachung der Restaurierung. Ferner wird das Modell Datengrundlage eines 3D-GIS sein, das für die Dokumentation und Analyse archäologischer Objekte und Fragestellungen eingesetzt werden wird. Schließlich werden Modell und Rekonstruktion so aufbereitet, dass sie in touristische und geplante museale Anwendungen direkt vor Ort und auch im Internet eingebunden werden können.

6 Literatur

- El-Hakim, S. Beraldin, J.-A., Picard, M., Cournoyer, L. (2008): *Surface Reconstruction of large complex Objects from mixed range data – the Erechtheion experience*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part B5, pp. 1077-1082.
- Kersten, Th., Mechelke, K., Lindstaedt, M., Sternberg, H. (2009): *Methods for Geometric Accuracy Investigations of Terrestrial Laser Scanning Systems*. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, Heft 4, pp. 301-316.
- Lindstaedt, M., Kersten, Th., Mechelke, K., Götting, M., Heiden, R. (2008): *Virtuelles 3D-Modell der antiken Tempelanlage in Sirwah/Jemen zur archäologischen Objektdokumentation durch terrestrisches Laserscanning und Photogrammetrie*. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 17, Hrsg. E. Seyfert, 28. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 23.-25. April 2008 in Oldenburg, pp. 59-68.
- de Maigret, A. & Robin, C. (1998): *Le grand temple de Yéha (Tigray, Éthiopie), après la première Campagne de Fouilles de la Mission Française*. Comptes-rendus des séances de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, Année 1998, Volume 142, Numéro 3, pp. 737-798.
- Mechelke, K., Kersten, Th., Lindstaedt, M. (2008): *Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen neuester terrestrischer Laserscannersysteme - Leica ScanStation 2 und Z+F IMAGER 5006*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2008, Th. Luhmann/C. Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 317-328.
- Remondino, F., Gruen, A., von Schwerin, J., Eisenbeiss, H., Rizzi, A., Girardi, S., Sauerbier, M., Richards-Rissetto, H. (2009): *Multi-Sensor 3D Documentation of the Maya site Copan*, 22nd CIPA Symposium, October 11-15, 2009, Kyoto, Japan.
- 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.