

# Integration und Bewertung photogrammetrischer Methoden und GIS zur Dokumentation von archäologischen Projekten am Beispiel von Gheriat el-Garbia (Libyen)

AGNES DINKEL<sup>1</sup>, LUDWIG HOEGNER<sup>1</sup> & MANFRED STEPHANI<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: In der vorliegenden Arbeit wird der Einsatz von photogrammetrischen Methoden und die Nutzung von Geoinformationssystemen für die Dokumentation des Denkmalbestands am Beispiel des römischen Ensembles von Gheriat el-Garbia (Libyen) diskutiert. Neben der Erzeugung verschiedener photogrammetrischer Produkte wird geprüft, mit welchen Auswirkungen für dieses Aufgabengebiet zu rechnen ist, wenn der Aufwand für die Aufnahme variiert wird. Dabei werden insbesondere die Variation der Anzahl der verwendeten Bilder und die Minimierung der Passpunkte unter Berücksichtigung der Passpunktconstellation und der resultierenden Genauigkeit beleuchtet. Exemplarisch wird gezeigt, dass ein GIS nicht nur eine integrative und effektive Möglichkeit bildet, heterogene Daten zu verwalten, sondern parallel zu den Arbeiten auch für die Planung und das Qualitätsmanagement genutzt werden kann. Die Erfassung von Denkmälern ist damit ein Themengebiet, das auch von der Geodäsie und der Geoinformation im Blick behalten werden sollte.*

## 1 Was weg ist, ist weg

Obwohl die sog. Welterbekonvention in den 40 Jahren ihres Bestehens von mehr als 190 Staaten ratifiziert wurde (UNESCO 1963), befindet sich das kulturelle Erbe der Menschheit in einer prekären Situation: Jährlich werden zahlreiche Objekte nicht nur durch medienwirksame Zerstörungsaktionen radikaler Gruppierungen in Krisengebieten, sondern auch durch Ignoranz, Habgier und Armut auf der ganzen Welt zerstört. Eine Trendwende dieser Entwicklung ist derzeit nicht abzusehen, vielmehr nimmt die Zerstörung immer mehr an Geschwindigkeit zu.

Daher gewinnt die schnelle Erfassung und Dokumentation des aktuellen Zustands der historischen Monumente eine immer zentralere Bedeutung. Neben den Fachdisziplinen der Denkmalpflege, der Bauforschung und den verschiedenen archäologischen Disziplinen, sind hier besonders die Geodäsie und die Geoinformation gefordert, da diese die dazu benötigten Instrumentarien und Methoden bereitstellen können.

Die hier vorgestellte Arbeit diskutiert am Beispiel des Denkmalbestands des römischen Ensembles von Gheriat el-Garbia (Libyen) (Mackensen 2010, 2011)<sup>2</sup>, in welcher Form photogrammetrische Methoden und GIS zur Dokumentation in der Denkmalpflege genutzt werden können, und welche

---

<sup>1</sup> Technische Universität München, Fachbereich für Photogrammetrie und Fernerkundung, Arcisstr. 21, D-80333 München, E-Mail: Agnes.dinkel@tum.de, ludwig.hoegner@tum.de, manfred.stephani@bv.tum.de

<sup>2</sup> Die verwendeten Daten wurden im Rahmen des vom LMUexcellent-Programm geförderten Projekts „Das severische Kastell MYD(–)/ Gheriat el-Garbia (Libyen)“ im Rahmen von archäologischen Feldkampagnen 2009 und 2010 unter der Leitung von Prof. Michael Mackensen vom Institut für Provinzialrömische Archäologie der LMU erhoben. Für die Zurverfügungstellung der Daten sei den Verantwortlichen an dieser Stelle herzlich gedankt.

Vorteile sich hierdurch ergeben. Detailliert wird insbesondere untersucht, wie sich die Variation der bei einer photogrammetrischen Auswertung verwendeten Parameter auf die Qualität und Genauigkeit der Ergebnisse auswirken.

## 2 Photogrammetrie

Als Testbeispiel für die photogrammetrischen Untersuchungen dienen die Reste eines römischen Wachturms, der in einer Entfernung von ca. 1 km nordwestlich vom römischen Militärkastell von Gheriat el-Garbia liegt (Abb. 1). Der runde Turm wurde während der archäologischen Kampagne außerplanmäßig besucht und dokumentiert (Mackensen 2010), da er schon teilweise zerstört und vom Einsturz bedroht ist.

Dafür wurde zum einen eine Bilderstrecke von 47 sich überlappenden Aufnahmen (> 60%, Nikon D300) um den Turm herum angefertigt. Zum anderen wurden 14 Passpunkte rundum an Ober- und Unterkante des Turms angebracht und tachymetrisch mit Katastergenauigkeit vermessen (Abb. 2). Auf dieser Basis kann eine verdichtete 3D-Punktwoke des Turms berechnet werden, die die Basis für alle weiteren Produkte bildet (Abb. 3), wobei hier die Software von Pix4D, Matlab und Cloud Compare genutzt werden: Damit lassen sich Oberflächen- und Volumenmodelle des Turms ableiten, die für Animationen oder zum 3D-Druck von realen Modellen verwendet werden können. Für die Wissenschaftler entscheidender sind jedoch die aus Schnitten und Profilen der Punktwoke ableitbaren Kenngrößen des Turms, wie Durchmesser, Mauerdicke, erhaltene Höhe des Bauwerks etc. und der Grundriss. Auch Abrollungen der äußern Mauerschale des Turms bilden für die Bauforscher und Archäologen eine wichtige Grundlage für Kartierungen von Bauphasen, Bearbeitungspuren oder Schäden am Bauwerk.



Abb. 1: Römischer Wachturm in Gheriat el-Garbia (Libyen): Ansicht von Südwesten

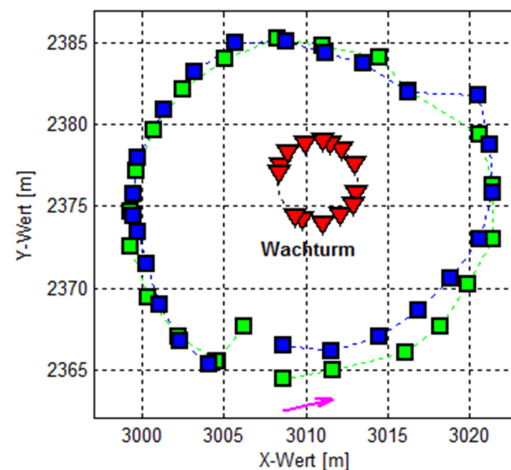


Abb. 2: Römischer Wachturm in Gheriat el-Garbia (Libyen): Konstellation der Passpunkte (Dreiecke) und Kamerapositionen (Quadrate) für die photogrammetrische Erfassung des Turms; Pfeil: Laufrichtung

Allerdings stellt sich die Frage, ob der hier vorgenommene v.a. zeitliche und technische Aufwand für die Dokumentation auch reduziert werden kann, und dennoch die avisierte Genauigkeitsvorgabe (Katastergenauigkeit) erreicht bzw. beibehalten werden kann.

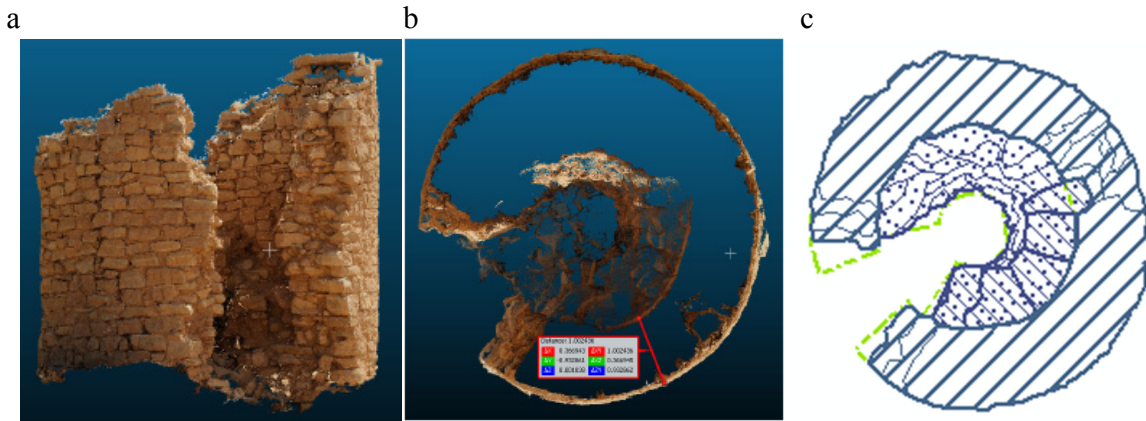


Abb. 3: Römischer Wachturm: a) 3D-Punktwolke, b) Abgreifen von Kenngrößen: Mauerstärke aus einem Querschnitt der Punktwolke c) Aus Punktwolke abgeleitetes Produkt: Grundriss des Bauwerks

Dazu werden verschiedene Parameter reduziert, deren Konstellation variiert und das mit diesen berechnete Ergebnis mit der beschriebenen Maximalkonfiguration verglichen. Einer der veränderten Parameter stellt die Anzahl der für die Berechnung der Punktwolke verwendeten Bilder dar. Mit der Reduzierung der Bilderzahl treten verschiedene Effekte auf, von denen besonders die Lageänderung der berechneten Kamerapositionen sehr plastisch veranschaulicht, mit welchen Effekten hier zu rechnen ist: Abbildung 4 zeigt die Residuen zwischen der Lage der Kamera bei der Maximalkonfiguration und der bei einer Bilderzahl von 25, 17 und 12. Diese drei Konfigurationen werden hier exemplarisch für eine Entwicklung gezeigt, die sich mit abnehmender Bilderzahl abzeichnet. Dabei kann mit 12 Bildern gerade noch eine geschlossene Lösung für das Bauwerk berechnet werden. Die Konfiguration mit 25 Bildern zeigt zwar kleinere Abweichungen von der Maximalkonfiguration, jedoch weisen sie ein einheitliches Muster auf. Im Gegensatz dazu geht diese einheitliche „Ordnung“ bei der Konfiguration mit 17 Bildern verloren, die Residuen besitzen unterschiedliche Beträge und beginnen zu divergieren. Bei der kleinstmöglichen Konfiguration mit nur 12 Bildern ist, obwohl noch immer eine Lösung für das gesamte Bauwerk erstellt werden kann, kein einheitlicher Trend mehr beobachtbar. Vielmehr zerfallen die berechneten Punkte in zwei Gruppen, die sich teils mit großen Beträgen gegeneinander verschieben. Diese Beobachtungen zeigen, dass sich schon lange vor dem Versagen einer Lösung deutliche Fehler ansammeln, obwohl eine Punktwolke und die Kamerapositionen berechnet werden können. Ähnliche Phänomene zeichnen sich auch für die Kamerakalibrierung, Höhenwerte und die Genauigkeit der Punkte ab. Daher sollte bei einer photogrammetrischen Aufnahme eines Bauwerks nicht auf eine vergleichsweise ausführliche Dokumentation mittels Bildern verzichtet werden, was angesichts des geringen Zeitaufwands, den weitere Aufnahmen bedeuten, kein großes Problem und nur geringen Zeitverlust darstellen sollte.

Eine weitere Möglichkeit, Zeit zu sparen, bildet die Reduzierung der Passpunkte auf ein Minimum von drei. Allerdings stellt sich die Frage, welche Konstellation der Passpunkte für ein solches

Objekt am besten geeignet ist. Zu diesem Zweck wurden die Auswirkungen von Konstellationen mit drei Passpunkten berechnet.

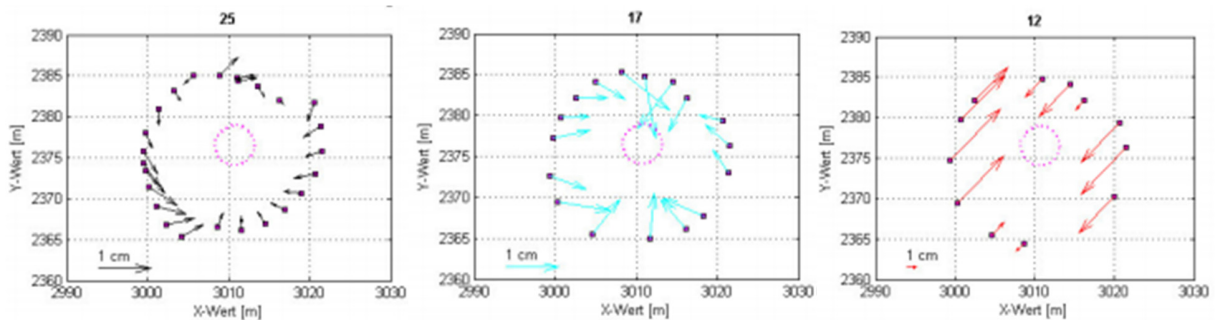


Abb. 4: Römischer Wachturm: Einfluss der Bilderzahl (25, 17, 12) auf die Lage der Kamerapositionen im Vergleich zur Maximalkonfiguration

Diese Konstellationen lassen sich wie folgt beschreiben: alle Passpunkte befinden sich auf einer Seite des Objekts, an seiner Unterkante oder an seiner Oberkante. Wiederum verdeutlichen die Änderung der Lagekoordinaten der Kamerapositionen im Vergleich zur Maximalkonfiguration anschaulich die Effekte (Abb. 5): Auch hier lassen sich unterschiedliche Muster bei den Residuen beobachten. Bei einer einseitigen Anbringung der Passpunkte besitzen die Residuen den kleinsten Betrag und zeigen eine Rotation ungefähr um die Mitte des Turms in Richtung der Bewegung bei Aufnahme der Bilder. Die Skalierung wird dabei annähernd beibehalten. Im Gegensatz dazu weisen die anderen Konstellation zwar keine Rotation auf, dafür aber deutlich größere Beträge und eine deutliche Skalierung der Kamerapositionen: Bei der Konstellation mit Passpunkten an der Oberkante wird der Maßstab deutlich verringert, wogegen er sich bei der Konstellation an der Unterkante deutlich vergrößert. Vergleicht man also die verschiedenen Konstellationen, so schneidet die einseitige Anbringung der Passpunkte vor allem aufgrund des geringen Verschiebungsbetrags am besten ab. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch beim Vergleich der Höhenkomponente der Kamerapositionen, den Parametern der parallel durchgeführten Kamerakalibrierungen und dem Vergleich der verdichteten Punktwolken. Letzterer besitzt für die einseitige Passpunktanbringung einen Mittelwert von 4,7 mm bei einer Standardabweichung von 2,8 mm für die Differenz zur Maximalkonfiguration. Auch die Berechnung eines Worst-Case-Szenarios auf Basis der vorliegenden Daten und eine Abschätzung der Fehlerfortpflanzung zeigen, dass maximal mit einer Abweichung von ca. 8 mm für die einseitige Konstellation von der Maximalkonfiguration zu rechnen ist. Der Wert liegt jedoch weit unter der Genauigkeit der Passpunkte selbst, die lediglich Katastergenauigkeit besitzen. Dies zeigt, dass sich zwar Effekte aufgrund der Passpunktreduzierung deutlich nachweisen lassen, diese aber keine relevante Größe besitzen. Für die Messung der Passpunkte vor Ort kann der Zeitaufwand reduziert werden: Es kann darauf verzichtet werden, den Tachymeter für die Einmessung der Passpunkte auf allen Seiten des Objekts aufzustellen. Bei einer einseitigen Anbringung der Passpunkte kann dieser Vorgang so auf ein Minimum reduziert werden. Allerdings sollte man, um mögliche Messfehler aufzudecken zu können, die Anzahl der Passpunkte mindestens auf vier erhöhen und so die nötige Redundanz

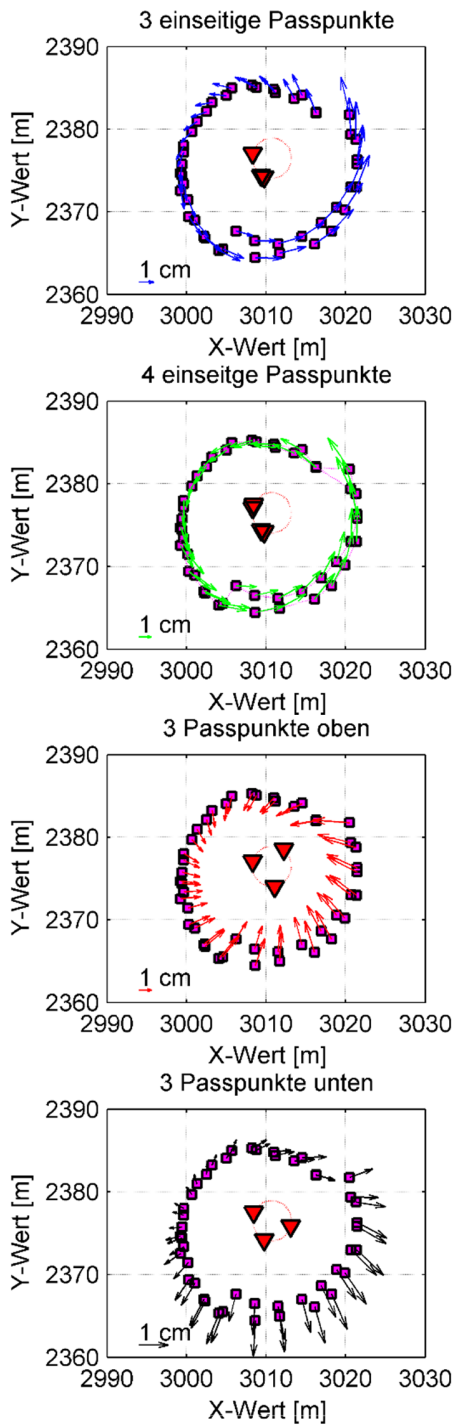


Abb. 5: Einfluss Passpunktanstellung auf die Lage-Koordinaten der Kamerapositionen. Residuen im Vergleich zur Maximalanstellung: einseitige Anbringung von 3 bzw. 4 Passpunkten, Anbringung von 3 Passpunkten an Ober- bzw. Unterkante des Wachturms.

schaffen. Zudem gelten diese Beobachtungen nur für einen geschlossenen Bildverband. Eine Untersuchung für offene, nicht in sich geschlossene Bildverbände muss getrennt hiervon betrachtet werden.

Bildmessung stellt somit eine alternative Methode zur Erfassung von Denkmälern dar, zumal sich historische Objekte aufgrund ihrer variationsreichen Oberfläche gut für photogrammetrische Methoden eignen. Durch die sehr starke Verknüpfung der einzelnen Bilder eines geschlossenen Verbandes entsteht ein stabiles 3D-Modell, welches nur noch durch Passpunkte skaliert, gedreht und gelagert werden muss.

### 3 GIS

Eine weitere, zeitgemäße Möglichkeit, die Erfassung von Kulturdenkmälern zu unterstützen, bildet die Verwaltung und Sicherung der aufgenommenen Daten in Form eines



Abb. 6: Gheriat el-Garbia: Porta Decumana des Militärkastells: Vergleich 3D-Scan (schwarz), tachymetrische Messung (gelbe Dreiecke) und analoge Messung (Planumszeichnung mit Passpunkten; sonstige Farben) in ArcMap (Esri)

Geoinformationssysteme (GIS). So können nicht nur heterogene Daten verschiedenster Fachdisziplinen wie Bauforschung, Archäologie, Geophysik und verschiedene biologische Disziplinen etc. übersichtlich und effektiv miteinander verwaltet und organisiert werden, sondern auch verschiedene Dokumentationsmedien wie Kartenmaterial, Satellitenbilder, lokale Messungen mit Tachymeter oder 3D-Scanner, photogrammetrische Messungen oder analoge Messungen, abgeleitete Pläne und Beschreibungen. Ein parallel zu den Arbeiten geführtes GIS ermöglicht darüber hinaus eine tagesaktuelle Übersicht über den Fortschritt der Arbeiten und eine Planung und Koordination der beteiligten Teams. So verwendet, können GIS-Systeme einen Beitrag zum Qualitätsmanagement leisten.

Durch den unmittelbaren Vergleich können beispielsweise Inkonsistenzen und mögliche Fehler zwischen Daten, die mit unterschiedlichen Messmethoden aufgenommen worden sind, aufgedeckt und korrigiert werden. Abbildung 6 zeigt den Vergleich zwischen 3D-Scandaten, tachymetrischen Messungen und einer analogen Planungszeichnung eines Tors des römischen Militärlagers von Gheriat el-Garbia. In diesem Fall rühren die Widersprüche daher, dass die Daten in zwei unterschiedlichen Jahren des Projekts aufgenommen wurden, wobei erst im zweiten Jahr ein ausgeglichenes Festpunktfeld zur Verfügung stand. Eine Korrektur der Daten der ersten Kampagne ist daher notwendig. An diesem Beispiel kann man nachvollziehen, dass ein GIS nicht nur eine Datenbank ist, in der Ergebnisse zusammengeführt werden, sondern vielmehr auch als aktives Hilfsmittel für Qualitätsmanagement und Planung während der Arbeiten genutzt werden kann.

## 4 Fazit

In der Arbeit wird gezeigt, dass die Erhaltung des kulturellen Erbes der Menschheit nicht nur ein Thema für die entsprechenden Fachdisziplinen ist. Vielmehr können auch Ingenieurdisziplinen wie die Geodäsie und die Geoinformation einen substanziellen Beitrag zur Erfassung des Denkmalbestands liefern, indem Methoden wie die Bildmessung von Objekten und integrative Systeme wie GIS auch in diesem Themengebiet zum Einsatz kommen. Es gilt, auch in Zukunft ein Auge darauf zu haben, inwieweit neue Methoden und Techniken auch in diesem Aufgabengebiet Anwendung finden können. Durch das Zusammenwirken von etablierten und neuen technischen Verfahren kann ein Mehrwert sowohl vor Ort als auch bei der Auswertung der erhobenen Daten erzielt werden.

## 5 Literaturverzeichnis

MACKENSEN, M., 2010: Das severische Vexillationskastell Myd(---)/Gheriat el-Garbia am limes Tripolitanus (Libyen): Bericht über die Kampagne 2009. Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts, Römische Abteilung **116**, 363-458.

MACKENSEN, M., 2011: Das severische Vexillationskastell Myd(---) und die spätantike Besiedlung in Gheriat el-Garbia (Libyen): Bericht über die Kampagne im Frühjahr 2010. Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts, Römische Abteilung **117**, 247-375.

UNESCO, 1963: Übereinkommen zum Schutz des Kultur- und Naturerbes der Welt. <http://unesco.de/infothek/dokumente/uebereinkommen/welterbe-konvention.html>; Stand 30.10.2016.