

Irmela Herzog, Undine Lieberwirth

## Einleitung

### Zusammenfassung

Bei der archäologischen Dokumentation und Analyse werden dreidimensionale Daten immer wichtiger. 3D-Modelle oder digitale Geländemodelle (DGMs) lassen sich mithilfe von photogrammetrischen Methoden (Structure-from-Motion) oder *Laserscanning* erstellen. Über die Dokumentation von Funden und Befunden hinaus erlauben solche Daten z. B. die virtuelle Rekonstruktion von eingestürzten Mauern, die Mustererkennung auf Keilschrifttafeln oder auch die Analyse der Beleuchtung im Innern eines griechischen Tempels. Archäologische Befunde werden in hoch aufgelösten DGMs (Lidar-Daten) sichtbar. DGMs sind auch die Basis für Sichtbarkeitsanalysen und Berechnungen zur Wegerekonstruktion. Dieses Kapitel führt in die oben erwähnten Methoden ein und erklärt die Zusammenhänge zwischen den Beiträgen im Buch.

Keywords: 3D-Modell; digitales Geländemodell; Structure-from-Motion; Laserscanning; Sichtbarkeitsanalyse; kostenbasierte Wegeberechnung.

The archaeological documentation and analysis of three-dimensional data is becoming increasingly important. 3D models or digital terrain models (*DTMs*) can be created by applying photogrammetric methods (Structure from Motion) or laser scanning. Beyond the documentation of finds and features, 3D data also allow to e. g. virtually reconstruct collapsed walls, to recognize specific patterns on cuneiform tablets or even to analyse the lighting in the interior of a Greek temple. Archaeological features become visible in high-resolution DTMs (Lidar data). DTMs form also the basis for visibility analyses and calculations for route reconstruction. This chapter introduces the methods mentioned above and explains the relations between the contributions in this book.

Keywords: 3D models; digital elevation models; structure from motion; laser scanning; viewshed analysis; least-cost paths.

Dreidimensionale digitale Daten spielen eine zunehmend wichtige Rolle in der Archäologie. Solche Daten dokumentieren nicht nur die genaue Oberfläche von archäologischen Funden und Befunden, sondern auch die des Geländes rund um archäologische Fundstellen. Auf der Grundlage dieser Daten sind dann weitere Analysen möglich, zum Beispiel lassen sich durch Methoden der Bildverarbeitung wichtige Strukturen hervorheben und dadurch besser erkennen.

Diese Einleitung dient nicht nur als Einführung in die Techniken zur Gewinnung und Analyse dreidimensionaler Daten in der Archäologie, sondern erläutert auch die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Beiträgen im vorliegenden Band. Die ersten beiden Beiträge zeigen, wie Computeranwendungen bei der Dokumentation von archäologischen Befunden vor Ort eingesetzt werden können. Zur dreidimensionalen (3D) Vermessung von Befunden und Funden bieten sich zwei verschiedene Ansätze an: Laserscanning und Photogrammetrie, wobei letztere seit kurzem durch das Structure-from-Motion-Verfahren (SfM) einen neuen Aufschwung erhalten hat. Die photogrammetrische Methode der Bündeltriangulation (die im Beitrag von Martin Gussone eine Rolle spielt) erlaubt es schon seit längerem, mithilfe von Photos aus unterschiedlichen Blickwinkeln die (relativen) Positionen von solchen Punkten zu ermitteln, die auf mehreren Photos einer Szene identifiziert werden können. Das erste Resultat von Laserscanning wie von SfM ist eine Punktwolke, deren Koordinaten zusätzlich ein Farbwert zugeordnet ist. Im Falle der SfM-Anwendung ist diese Punktwolke eine sog. *Sparse Point Cloud*, die in einem zweiten, aufwändigen Rechenverfahren noch deutlich verdichtet wird. Bei der Dokumentation von archäologischen Befunden besteht danach die Notwendigkeit, das Koordinatensystem dieser Punktwolke mit demjenigen der vor Ort verwendeten Kartengrundlage in Übereinstimmung zu bringen (Stichwort Georeferenzierung). Manchmal reicht eine georeferenzierte Punktwolke aus vielen Tausend Farbpunkten schon aus, um die archäologische Befundsituation gut zu dokumentieren. Für ein 3D-Modell ist es jedoch notwendig, die Punkte zu einer Oberfläche zu verbinden. Um solchen Oberflächen das realistische Aussehen des dokumentierten Objektes zu verleihen, werden Photos des Objektes auf dieses Drahtmodell projiziert oder eine Textur aus den Farbwerten der Punktwolke berechnet.

Im ersten Beitrag des Bandes erläutert Jochen Reinhard SfM im Detail und zeigt anschaulich anhand dreier Fallbeispiele aus der Grabungspraxis, wie man kostengünstig präzise 3D-Modelle der archäologischen Befunde erstellen kann. Die Grabungsphotos sollten möglichst aus einer erhöhten Position aufgenommen werden. In den drei Fallbeispielen kommen hierzu unterschiedliche Möglichkeiten zum Einsatz: Leiter, Drachen und Multikopter. Eine weitere Alternative ist die Verwendung eines Photogalgens.

Im zweiten Beitrag wird ebenfalls SfM angewendet, und zwar dokumentiert Rebecca Döhl damit Felszeichnungen in der Wüste Ägyptens. Auch mit dem zunächst

eingesetzten Terrestrischen Laserscanner ließen sich die Felsgesteinsformationen und die darauf angebrachten Zeichnungen gut dokumentieren, allerdings stieß diese laserbasierte Messmethode in einigen Fällen an ihre Grenzen, weil ein recht schweres Gerät bewegt werden musste und steile Sandabhänge keine festen Standflächen boten.

Im dritten Beitrag kommt eine andere photogrammetrische Methode zur 3D-Dokumentation von Steinblöcken zum Einsatz, nämlich ein sog. Streifenlichtverfahren. Der Beitrag von Anja Schäfer, Heike Leitte und Hans Georg Bock beschreibt Ansätze, um so genau vermessene Steinblöcke wieder zu Mauern zusammzusetzen. Ziel ist die Rekonstruktion von Tempelanlagen aus dem 12. bis 13. Jahrhundert in Kambodscha, von denen nur noch wenige Mauern erhalten sind. Dazu ist es notwendig, die großen Datenmengen, die bei der 3D-Dokumentation der einzelnen Steinblöcke entstehen, auf die wesentlichen Merkmale zu reduzieren, nämlich die Kanten der Steine. Da die Steine oft unregelmäßige Oberflächen aufweisen, verwittert oder beschädigt sind, ist nur ein komplexes Verfahren in der Lage, die Kanten zuverlässig zu ermitteln. Außerdem werden Kriterien entwickelt, um möglichst effektiv automatisch entscheiden zu können, ob zwei Steine aneinander passen. Dies ist ein Beispiel, wie die 3D-Dokumentation von Befunden oder Funden die Grundlage für weitergehende Analysen bilden kann.

Auch der Beitrag von András Patay-Horváth baut auf einer vorhandenen genauen 3D-Dokumentation auf. Er beschäftigt sich mit dem Zeustempel von Olympia. In vorhergehenden Arbeiten wurde eine zuverlässige virtuelle Rekonstruktion des Tempels erstellt, die nun die Klärung von Detailfragen erlaubt. András Patay-Horváth untersucht zum einen unterschiedliche Szenarien zum Lichteinfall auf die monumentale Goldelfenbeinstatue im Tempelinnern und zum anderen die Aufstellung der Figuren im Ostgiebel. Mithilfe der 3D-Modelle dieser Figuren ist es einfach möglich, verschiedene Positionen bzw. Reihenfolgen der Figuren zu testen.

Hubert Maras Verfahren zur Analyse von Keilschrifttafeln benötigt ebenfalls im ersten Schritt eine genaue 3D-Dokumentation. Da die Keilschriftzeichen häufig auf gewölbte Oberflächen aufgebracht wurden, dokumentiert eine Photographie diese Tafeln nicht genau genug; Zeichnungen solcher oft schon verwitterter oder beschädigter Tafeln sind meist zeitaufwändig und nicht objektiv. Mit einem anspruchsvollen Verfahren gelingt es Hubert Mara, automatisch objektive Zeichnungen zu erstellen, die den Zeichnungen von Fachleuten sehr nahe kommen. Auf Grundlage des 3D-Modells wird zunächst eine Darstellung erzeugt, die die Stellen mit den typischen Eindrücken des Schreibgerätes hervorhebt; es folgen Verfahrensschritte, um eine Abgrenzung der Schriftzeichen und die Eckpunkte der Keile zu errechnen sowie schließlich die Ausgabe als Liniengraphik. Wie bei dem Beitrag von Anja Schäfer, Heike Leitte und Hans Georg Bock findet auch in diesem Fall eine Datenreduktion auf die wesentlichen Merkmale statt, und zwar indem in beiden Fällen aus der Punktwolke der Messdaten Linienzü-

ge generiert werden (Vektorisierung). Dabei ist in beiden Anwendungen eine Methode von besonderer Bedeutung, die für jeden Punkt der Objektoberfläche die Krümmung misst.

Bereits im ersten Beitrag demonstriert Jochen Reinhard, dass sich SfM unter günstigen Voraussetzungen zur Erstellung von digitalen Geländemodellen (DGMs) eignet, falls Luftbilder mit hohem Überlappungsgrad vorliegen. Genauer gesagt erlaubt ein solcher Ansatz nur die Erstellung eines digitalen Oberflächenmodells, da die Vegetation bei den Höhenangaben einbezogen ist. Dies spielt aber bei dem von Reinhard vorgestellten Anwendungsbeispiel nur eine untergeordnete Rolle, denn die Vegetation besteht nur aus einzelnen Kapernsträuchern. Durch Auswertung von Luftaufnahmen aus dem Jahr 1953 ließ sich so die Geländeoberfläche aus dem Befliegungsjahr rekonstruieren, in dem viele moderne Eingriffe noch nicht stattgefunden hatten. In vielen europäischen Staaten ermitteln Landesvermessungsbehörden genaue, hoch aufgelöste DGMs mithilfe von Lidar. Gegenüber SfM besteht bei Lidar-Daten der Vorteil, dass auch im Wald zuverlässige Messwerte der Erdoberfläche vorliegen. Ein Nachteil ist dagegen, dass diese Messpunkte nur das aktuelle Gelände mit vielen modernen Eingriffen dokumentieren. Normalerweise bilden nicht die einzelnen unregelmäßig verteilten Messpunkte die Grundlage für die unten näher beschriebenen Verfahren zur Auswertung von DGMs, sondern ein gleichmäßiges Raster aus Höhenpunkten, das durch Interpolation erzeugt werden kann. Dies erlaubt die Darstellung der Höhenwerte als Grauwertbild. Immer häufiger finden Lidar-Daten Anwendung, um archäologische Fundstellen zu erkennen, die sich durch geringe Höhenunterschiede im DGM abzeichnen. Verschiedene Verfahren vor allem aus dem Bereich der Bildverarbeitung können helfen, Befundstrukturen in solchen Höhenrasterbildern besser zu erkennen. Ein Beispiel ist das Verfahren *Trend removal*, bei dem ein geglättetes DGM von den tatsächlichen Höhenwerten subtrahiert wird, so dass die lokalen Geländeänderungen stärker hervortreten. Das Verfahren *Multi-Scale Integral Invariants* ist eng verwandt mit dem Ansatz, den Hubert Mara für Keilschrifttafeln verwendet, um die Eindrücke des Schreibgeräts besser zu visualisieren. Dabei erlaubt ein multiskaliger Ansatz, Strukturen (zum Beispiel Gruben oder Keileindrücke) unterschiedlicher Größe zu erkennen. Ralf Hesse stellt die von ihm entwickelte frei verfügbare Software *Lidar-Toolbox* (LiVT) vor, die mehrere dieser Verfahren anbietet. Darüber hinaus erläutert Ralf Hesse die Verfahren und zeigt auf, für welche Befundstrukturen die einzelnen Ansätze besonders geeignet sind.

Ein DGM spielt auch eine wichtige Rolle in dem integrierten System, das Martin Gussone vorstellt. Er beschäftigt sich mit einem ca. 9 km<sup>2</sup> großen Areal im heutigen Syrien, wo ein Teil der archäologischen Befunde auch ohne weitere Hilfsmittel durch entsprechende Spuren im Gelände erkennbar ist. Es handelt sich um eine spätantike Pilgerstadt und ihr Umland, das vor allem durch eine frühislamische Kalifenresidenz

aus der ersten Hälfte des 8. Jahrhunderts geprägt ist. Für das Untersuchungsareal führte Martin Gussone die Pläne und Geländedaten der obertägig sichtbaren Baureste, Magnetogramme, entzerrte Luftbilder und ein DGM in einem CAD-System zusammen und konnte auf dieser Grundlage die Baubefunde vier aufeinander folgenden Siedlungsphasen zuweisen.

Sollen bei archäologischen Anwendungen räumliche Daten aus mehreren Quellen gemeinsam ausgewertet werden, kommen in der Regel Geographische Informationssysteme Informationssysteme zum Einsatz. Eine bei archäologischen Studien weit verbreitete GIS-Anwendung auf der Grundlage eines DGMs ist die Berechnung des Sichtbarkeitsbereiches für einen vorgegebenen Standort. Will M. Kennedy verwendet dieses Verfahren für vermutete vorrömische Wachturmstandorte in der Region Petra/Jordanien. Dabei ist die Entfernung zum beobachteten Objekt und dessen Größe zu berücksichtigen, denn eine Ameise ist auf 1 km Entfernung nicht mit bloßem Menschaugen erkennbar, ein herannahender Reiter jedoch schon. Will M. Kennedy verwendet deshalb den Ansatz von Higuchi um den Radius festzulegen, innerhalb dessen die interessierenden Objekte noch erkannt werden und begrenzt die errechneten Sichtbarkeitsbereiche entsprechend.

Sichtbarkeitsanalysen spielen auch im Beitrag von Irmela Herzog und Alden Yépez eine Rolle, in dem ein Altweg zu Inka-Kultstätten am höchsten Berg von Ecuador analysiert wird. Dabei zeigt sich, dass die Personen auf dem Weg zur Kultstätte nur auf einem kleinen Teil der Strecke den nächsten herausragenden Punkt, ein Höhlenportal, im Blick haben. Mit Verfahren zu Wegerekonstruktionen versuchen Herzog und Yépez die Faktoren zu identifizieren, die den Wegeverlauf bestimmten. In den meisten vergleichbaren archäologischen Studien wird der Aufwand zur Bewältigung einer Steigung als entscheidender Faktor angesehen. Zur Schätzung dieses Aufwandes steht eine große Anzahl unterschiedlicher Funktionen zur Verfügung, die in diesem Beitrag am praktischen Beispiel getestet werden, wobei isotropische und anisotropische Ansätze zum Einsatz kommen. Bei den Berechnungen findet ein eigens entwickeltes Programm Anwendung, das einige Nachteile der bisherigen GIS-Standardlösungen zur Wegeberechnung vermeidet.

Um die beste Lösung für ein Problem zu finden, reicht es sehr häufig eben nicht aus, eine fertige Software zu bedienen, ohne ihre Vor- und Nachteile zu verstehen. Denn es ist in vielen Bereichen noch notwendig, bessere, an die archäologischen Bedürfnisse angepasste Software zu entwickeln. Dies zeigen nicht nur der Aufsatz von Irmela Herzog und Alden Yépez, sondern auch die *Lidar-Toolbox* von Ralf Hesse, die Arbeit von Anja Schäfer, Heike Leitte und Hans Georg Bock sowie der von den Teilnehmenden des Workshops preisgekrönte Beitrag von Hubert Mara. Dabei spielen kostenlose Software-Lösungen und insbesondere *Open Source* Programme eine besonders wichtige Rolle.

**IRMELA HERZOG**

Dipl.-Math. (Bonn 1987), ist als wissenschaftliche Referentin im LVR-Amt für Bodendenkmalpflege in Bonn zuständig für die wissenschaftliche EDV. Ihre Forschungsschwerpunkte sind neue Methoden und Anwendungen von Geoinformationssystemen in der Archäologie, statistische Auswertungen archäologischer Daten und die Analyse stratigraphischer Daten.

Irmela Herzog  
LVR-Amt für Bodendenkmalpflege im Rheinland  
Endenicher Str. 133  
53115 Bonn, Deutschland  
E-mail: i.herzog@lvr.de

**UNDINE LIEBERWIRTH**

M.A. (Berlin 2007), ist prähistorische Archäologin und derzeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin beim Exzellenzcluster Topoi an der Freien Universität Berlin tätig wo sie das ‚Forum Spatial Data‘ koordiniert. Ihr wissenschaftliches Interesse liegt in der Verwendung quantitativer, statistischer Analysemethoden in GIS-Anwendungen und digitaler Dokumentationsmethoden in der Archäologie und Bauforschung, wie Remote Sensing und Photogrammetrie.

Undine Lieberwirth  
Freie Universität Berlin  
Exzellenzcluster Topoi  
Hittorfstr. 18  
14195 Berlin, Deutschland  
E-Mail: undine.lieberwirth@topoi.org