

3D-DRUCK EINES ZAHNES AUS EINEM SPÄTMITTELALTERLICHEN GRAB IN ARCHAIA PHENEOS

Proof of Concept: Kontext – Dokumentation – Replik

Aktuelle archäologische Forschung kommt ohne Interdisziplinarität und den gezielten Einsatz ursprünglich disziplinfremder Methoden und Verfahren kaum mehr aus. Dies ist jedoch keine Plage sondern eine Bereicherung: Nicht nur werden die archäologischen Erkenntnisse bereits im Team einer gründlichen Überprüfung unterzogen, bei der eine sich eventuell eingeschlichene ‚Betriebsblindheit‘ enttarnt werden kann, sondern es eröffnen sich dadurch auch Möglichkeiten, die bei einer konventionellen archäologischen Vorgehensweise nicht wahrgenommen hätte werden können und die für die archäologische Analyse eine entscheidende Bereicherung darstellen.

Im konkreten Fall geht es um die Zusammenarbeit zwischen Anthropologie und Archäologie, die jedoch keineswegs für die jüngsten Entwicklungen repräsentativ ist. Relativ neu hingegen sind auch für die Anthropologie Verfahren, die Analysen auf zellulärer oder molekularer Ebene erlauben. Dazu gehören beispielsweise auch DNA-Analysen, die u.a. Aufschluss über Verwandtschaftsverhältnisse geben können. Im Rahmen der von 2011 bis 2015 in Archaia Pheneos, Griechenland, durchgeführten Ausgrabungen [\[1\]](#) wurden östlich der heute sichtbaren Kirche Agios Konstantinos auf einem Plateau des Stadtberges zwei Körperbestattungen aufgedeckt. Um DNA-Analysen durchzuführen, musste den Toten dafür geeignetes Knochenmaterial entnommen werden, in unserem Fall jeweils ein Zahn. Die Zähne wurden mit der Genehmigung des zuständigen griechischen Ministeriums ausgeführt, um die Untersuchungen in den Labors der Universität Göttingen durchzuführen. Eine solche Ausfuhrgenehmigung wird prinzipiell nur in jenen Fällen gewährt, wenn eine Referenzprobe im Land bleibt bzw. das Untersuchungsmaterial wieder nach Griechenland zurückgebracht wird. Die Untersuchung der DNA setzt jedoch eine Zerstörung der Probe voraus, da nur dadurch nicht kontaminiertes Material gewonnen werden kann. Deswegen verband das Ministerium mit der Ausfuhrgenehmigung die Auflage, einen Abdruck der beiden Zähne herzustellen. Wir vereinbarten [\[2\]](#), von den beiden Zähnen 3D-Modelle herzustellen und statt eines direkten Abdrucks 3D-Drucke anzufertigen und diese nach Griechenland zurückzubringen.

Der Kontext

Auf einem Ausläufer des Stadtberges östlich der Akropolis von Pheneos steht heute die kleine, griechisch-orthodoxe Kirche Agios Konstantinos. Bei der Feststellung des Verlaufs der Stadtmauer der antiken Siedlung an der Nordseite dieses Sattels (Schnitt B-BI) konnten im Jahr 2012 etwa 10 Meter östlich von Agios Konstantinos zwei Bestattungen (Grab 1 und Grab 3) ausgegraben werden. Beigaben oder Tracht- und Bekleidungsreste waren nicht vorhanden, die Skelette aber ausgesprochen gut erhalten. Die Gräber waren Ost-West orientiert mit den Köpfen im Westen, die Grabgruben waren im Bezug zur heutigen Humusoberkante verhältnismäßig seicht (ca. 0,7m zwischen Humusoberkante und Unterkante der Grabgruben) [3].

Die Bestatteten in Grab 1 und Grab 3 lagen in gestreckter Rückenlage nebeneinander, die Oberarme eng am Körper, die Unterarme quer über den Bauch. Der Abstand zwischen diesen beiden Beisetzungen betrug zirka 0,8m. Die Grabgruben waren eng ausgestochen und an den Wänden nur teilweise mit größeren Bruchsteinen ausgekleidet. In beiden Fällen waren die Köpfe der Verstorbenen im Westen an den Wänden der Gruben angelehnt und dergestalt aufgestellt worden, dass das Kinn am Ansatz der Schlüsselbeine ruhte und die Gesichter nach Osten blickten. Über dem Kopf des Skelettes in Grab 3, sowie über den östlichen Enden von Grab 1 und Grab 3 lagen größere Steine, wodurch sich der Eindruck ergab, die Körper der Verstorbenen wären zumindest partiell abgedeckt gewesen. Weitere Abdecksteine – auch verlagert – konnten nicht nachgewiesen werden.

Bei dem Individuum in Grab 1 handelt es sich um eine Frühadulte von 25 bis 30 Jahren [4]. Die im Oktober 2013 übermittelten Ergebnisse einer ¹⁴C-Datierung dieser Überreste stellen die Bestattung in den Zeitraum zwischen 1420 und 1460 n.Chr. [5]. Das Geschlecht des Individuums in Grab 3 konnte als männlich mit einem Alter von 8,5 bis 11 Jahren bestimmt werden. In beiden Fällen konnte keine Todesursache festgestellt werden [6].

Die beiden Gräber sind parallel zueinander und dem christlichen Verständnis entsprechend nach Osten blickend ausgerichtet, wodurch sich auf dem Geländesattel ein – zumindest spätmittelalterlicher – Friedhof vermuten lässt, dessen Ausdehnung und Belegungsdichte bis dato unbekannt sind. Eine mittelalterliche Kirche in unmittelbarer Nähe zu dieser Begräbnisstätte ist mit hoher Wahrscheinlichkeit anzunehmen [7]. Inwieweit ein solcher Bau mit der heute bestehenden Kirche Agios Konstantinos korreliert, konnte aber noch nicht geklärt werden. Bei einem Friedhof

wäre es notwendig gewesen, die Gräber an der Oberfläche zu kennzeichnen, auch um zu garantieren, dass die vorhandenen Bestattungen bei der Anlage neuer Gräber nicht gestört wurden. Allerdings ist mit einer Einebnung des Plateaus um Agios Konstantinos und einem dadurch bedingten Niveauverlust zu einem unbekanntem Zeitpunkt nach der Einbringung der Leichen zu rechnen. Damit lässt sich nicht nur die geringe Tiefe der Grabgruben erklären, sondern auch der Verlust der zu erwartenden Grabmarkierungen.

Der Mangel an Grabbeigaben ist bei Bestattungen des Spätmittelalters gängig, meist wurden die Verstorbenen nur in ein Hemd und/oder in Tücher gewickelt begraben. Auch das Aufrichten der Köpfe – oft auch mit einer unter den Hinterkopf gelegten Stütze – gegen Osten, die Einbringung in gestreckter Rückenlage mit den Unterarmen über dem Unterleib und die (teilweise) Auskleidung und Abdeckung der Grabgruben war im mittelalterlichen Griechenland üblich [\[8\]](#).

Die Dokumentation

Voraussetzung für einen 3D-Druck ist ein digitales 3D-Modell, das für sich bereits eine detaillierte und umfassende Dokumentation des aktuellen, noch nicht beprobten Zustandes der Zähne darstellt [\[9\]](#). Ein solches wurde für beide Zähne zu Testzwecken in zwei getrennten Verfahren doppelt erstellt: mit Structure-from-Motion (SfM) [\[10\]](#) und mit einem Streifenlichtscanner (SLS) [\[11\]](#).

Für den 3D-Scan wurde der Streifenlichtscanner (Hexagon PrimeSCAN R8) des [Instituts für Antike](#) an der Karl-Franzens-Universität Graz mit dem zugehörigen automatischen Drehteller und der Software OptoCat 2018 herangezogen, dessen fix verbautes Messfeld mit einem Durchmesser von ca. 50 cm jedoch nicht optimal für die Erfassung kleiner Objekte wie der Zähne ist. Die Kameraauflösung von 8 Megapixeln ermöglichte dennoch die Erstellung von ausreichend genauen 3D-Modellen der Zähne unter der Verwendung der maximalen Auflösung.

Für das SfM wurden von den Zähnen 104 (Zahn aus Grab 1) bzw. 115 (Zahn aus Grab 3) Fotos angefertigt. Dafür wurde eine Nikon D700 mit 12,1 Megapixeln mit einem Makroobjektiv mit 60 mm Fixbrennweite auf einem Stativ verwendet. Um die Tiefenunschärfe trotz entsprechend hoch gewählter Blendenzahl zu minimieren, musste ein gewisser Abstand zwischen Kamera und Zähnen gewahrt werden. Die Zähne wurden auf einem manuellen Drehteller platziert und zwischen den Fotos um ca. 15° gedreht. Nach einer vollen Umdrehung wurde der Zahn auf eine andere Seite

gedreht, sodass alle Punkte der Oberfläche auf möglichst vielen Fotos aus verschiedenen Perspektiven sichtbar waren. In der Software Agisoft Metashape 1.5.4 wurde der Hintergrund ausmaskiert und die Berechnung des 3D-Modells mit den höchsten Einstellungen vorgenommen. Um die fertigen Modelle in der korrekten Größe zu erhalten, wurden sie in der Software Meshlab 2016.12 an den mit dem Streifenlichtscanner aufgenommenen Modellen ausgerichtet und dabei genauestens skaliert.

Bei beiden Methoden wurde neben den Geometriedaten auch die Textur aufgenommen, die aber für den folgenden Druckvorgang nicht relevant ist. Erwartungsgemäß liegen die Texturen des SfM qualitativ weit über jenen des SLS. Hinsichtlich der Qualität der Geometriedaten liegen die SfM-Modelle (1.499.647 bzw. 1.204.576 Punkte) trotz wesentlich höherer Punktdichte nur wenig vor den SLS-Modellen (39.842 bzw. 37.277 Punkte), was sich aber auf für den 3D-Druck kaum bedeutende Details beschränkt [\[12\]](#).

Im Vergleich mit dem SfM-Modell ist im SLS-Modell kein erkennbarer Unterschied in der Geometrie des Zahnschmelzes zu sehen. Dieser kann aufgrund seiner Transparenz zu einem Problem für aktive, auf Licht basierende Aufnahmetechniken wie Laser- und Streifenlichtscanner werden [\[13\]](#).

Die Replik

Hintergrund. Bei dem hier verwendeten 3D-Druckverfahren (Fused Filament Fabrication) [\[14\]](#), das seit den 1980er Jahren bekannt ist, werden computergesteuert thermoplastische Kunststoffe mittels eines erhitzten Druckkopfs in dünnen Schichten (von typischerweise 0,1–0,3 mm) auf eine Unterlage aufgetragen, um dreidimensionale Objekte zu erzeugen. Der Druckkopf wird hierbei softwaregesteuert über drei Achsen bewegt und baut jeweils eine horizontale Ebene auf, bevor er um die gewählte Schichtdicke auf die nächste Ebene angehoben wird. Als Kunststoffe werden z.B. Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polylactide (PLA), oder Polyethylenterephthalat (PET) verwendet, die in Form sogenannter Filamente in unterschiedlicher Stärke kommerziell erhältlich sind. 3D-Modelle (entweder aus dem 3D-Scanner oder in CAD-Software erstellt) werden mittels Slicing Software (ein Programm, das die exakte Steuerung des Druckkopfes festlegt) in ein für den Drucker verarbeitbares Format gebracht.

Methodik. Für den 3D-Druck wurde ein modifizierter Creality Ender 3® Drucker mit einer maximalen Auflösung von 0,06 mm verwendet, der über einen OctoPrint (Open Source, V1.3.12) Druckserver (Raspberry Pi Zero) betrieben wurde. Die aus dem 3D-Scanner stammenden und bereinigten Modelle (PLY, Polygon File Format) wurden in FreeCAD (Open Source, V0.18.3) importiert und ins STL-Format (Standard Triangulation Language, ein Format, das 3D-Körper mit Hilfe von Dreiecksfacetten definiert) umgewandelt. Dieses wurde in Ultimaker Cura (Open Source Slicing Software, V4.3.0) importiert und in GCODE (ein Format, das die Steuerung des 3D-Druckers übernimmt) konvertiert. Folgende Einstellungen wurden für den Druck definiert: 0,1 mm Schichtdicke, 50% Fülldicke, 205°C Drucktemperatur, 70°C Druckplattentemperatur. Als Druckplatte wurde eine beschichtete Glasplatte verwendet. Die Zahnmodelle wurden aufrecht stehend gedruckt und benötigen dank der kleinen Auflagepunkte an den Zahnwurzeln eine Druckplattenhaftung (Brim) sowie Stützstrukturen (ab 60°) an allen überhängenden Stellen. Als Kunststofffilament wurde weißes Polylactid (PLA 1,75 mm, Geeetech, Deutschland) verwendet. Für den Druck (Zähne aus Grab 1/3) wurden 0,95/0,98g Filament (1,22/1,04g inklusive Stützstruktur und Druckplattenhaftung) innerhalb von 38/32 Minuten verarbeitet. Nach Entfernung der Stütz- und Haftstrukturen wurden die Modelle händisch mit Schleifpapier (Körnung 120) nachbearbeitet und mit Akrylfarben koloriert.

Diskussion. Dank der zuletzt stark gesunkenen Kosten und deutlich einfacheren Handhabung hat der 3D-Druck in den letzten Jahren auch den Consumer-Markt erreicht. Die Verfügbarkeit kostengünstiger 3D-Druckverfahren ermöglicht es so, relativ schnell und günstig Repliken von gescannten Objekten zu erstellen. Der verwendete Kunststoff (PLA) wird aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt und ist biokompatibel [15]. Auch kleinere Objekte (in diesem Fall jeweils nur etwa 2cm) lassen sich so in kürzester Zeit replizieren, wobei die Größe in Bedarfsfall auch verändert werden kann. Im vorliegenden Fall dienen die Repliken als Platzhalter für Proben, die für anthropologische Untersuchungen entnommen wurden. Die maßstabgetreuen Repliken können hierbei direkt an der Entnahmestelle wieder eingesetzt werden, um die Integrität des Fundobjekts nach der Probenentnahme zu wahren. Nachbearbeitet und koloriert sind die Repliken für Außenstehende allerdings kaum von Originalen zu unterscheiden und eignen sich daher beispielsweise auch als Ausstellungsobjekte oder um fehlende Fragmente zu ergänzen.

Fazit

Als *Proof of Concept* beweist die vorliegende Anwendung, dass mit den heute verfügbaren Mitteln auch relativ kleine Objekte mittels 3D-Scan und 3D-Druck einfach und kostengünstig repliziert werden können, wodurch sich ein breites Anwendungsspektrum in Archäologie und Anthropologie sowie in den Restaurierungswissenschaften und im Ausstellungswesen eröffnet.

[1] Die Synergasia zwischen der Ephorie Korinth und dem Österreichischen Archäologischen Institut in Athen, vertreten durch die [Universität Graz](#), bildet den organisatorischen Rahmen des Projektes: [FWF-Projekt P 30446](#).

[2] Wir danken den Mitarbeiter/-innen der Ephorie, insbesondere K. Christos, V. Papathanasiou und I. Tsingri, für die gute Zusammenarbeit.

[3] K. Kissas – M. Lehner – P. Scherrer, Pheneos 2012 und 2013: Bericht über die zweite und dritte Grabungs- und Surveykampagne, Jahreshefte des Österreichischen Archäologischen Institutes in Wien 83, 2014, 133–156, bes. 141; J. Kraschitzer, Zwei spätmittelalterliche Bestattungen von der Peloponnes und ihr Kontext, Beiträge zur Mittelalterarchäologie in Österreich 35, 2019 (in Druck).

[4] Die ursprüngliche, nicht auf anthropologischen Untersuchungen beruhende Annahme, es würde sich um eine Männerbestattung handeln (Kissas – Lehner – Scherrer a.O. 141) wird hiermit richtiggestellt. – Im Knochenmaterial aus Grab 1 wurden auch Schädeldachreste (u.a. Stirnbein) eines Fetus von 5–8 Lunarmonaten identifiziert, die eine Schwangerschaft der Bestatteten wahrscheinlich machen. Allerdings muss auch auf die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass diese Knochenreste durch Materialverlagerung in das Grab eingetragen wurden.

[5] Durchgeführt von Beta Analytic Inc., 4985 SW 74 Court, Miami, Florida 33155, USA. Probennummer Beta – 361374, Radiokarbonjahre 450+/-30BP: 1 Sigma mit Cal AD 1430-1450 (Cal BP 520-500, 68%); 2 Sigma mit Cal AD 1420-1460 (Cal BP 530-490, 95%).

[6] Die Anthropologische Untersuchung wurde im Jahr 2017 von Michael Schultz und Tyede Helen Schmidt-Schultz (Zentrum Anatomie, Universitätsmedizin Göttingen) durchgeführt.

[7] N. Poulou-Papadimitriou – E. Tzavella – J. Ott, Burial practices in Byzantine Greece: archaeological evidence and methodological problems for its interpretation, in: M. Salamon – M. Wołoszyn – A. Musin – P. Špehar (Hrsg.), Rome, Constantinople and Newly-Converted Europe. Archaeological and Historical Evidence (Kraków 2012) 377-428, bes. 413.

[8] Ch. K. Williams II – O. H. Zervos, Frankish Corinth: 1995, Hesperia 65, 1996, 1–55, bes. 22f.; Ch. K. Williams II – L. M. Snyder, Ethne Barnes und Orestes H. Zervos, Frankish Corinth: 1997, Hesperia 67, 1998, 223–281, bes. 240f.; Sh. E. J. Gerstel – M. Munn – H. E. Grossman – E. Barnes – A. H. Rohn – M. Kiel, A late medieval settlement at Panakton, Hesperia 72, 2003, 147–234, bes. 217f.; J. L. Rife, The Roman and Byzantine graves and human remains, Isthmia IX (Princeton 2012) 161. 183.

[9] S. White – C. Hirst – S. E. Smith, The Suitability of 3D Data: 3D Digitisation of Human Remains, Archaeologies 14, 2, 2018, 250–271, bes. 252–255.

[10] J. Guery – M. Hess – A. Mathys, Photogrammetry, in: A. Bentkowska-Kafel – L. MacDonald (Hrsg.), Digital Techniques for documenting and preserving Cultural Heritage (Kalamazoo 2017) 229–235, bes. 229–231.

[11] D. Rieke-Zapp – S. Royo, Structured Light 3D Scanning, in: A. Bentkowska-Kafel – L. MacDonald (Hrsg.), Digital Techniques for documenting and preserving Cultural Heritage (Kalamazoo 2017) 247–251, bes. 247–250.

[12] Dies soll kein pauschales Urteil darüber sein, welche Technologie für die Erfassung der Zähne besser geeignet ist. Es werden hier lediglich die Daten verglichen, die mit den zur Verfügung stehenden Mitteln gewonnen werden konnten.

[13] L. Fiorenza – S. Benazzi – O. Kullmer, Morphology, wear and 3D digital surface models: materials and techniques to create high-resolution replicas of teeth, Journal of Anthropological Sciences 87, 2009, 211–218, bes. 215.

[14] J. Dale Prince, 3D Printing: An Industrial Revolution, Journal of Electronic Resources in Medical Libraries 11, 2014, 39-45.

[15] G. Bhuvanesh – N. Revagade – J. Hilborn, Poly(lactic acid) fiber: An overview. Progress in Polymer Science 32, 2007, 455–482.

© Paul Bayer, Johanna Kraschitzer, Harald Noedl, Elisabeth Trinkl
e-mail: paul.bayer@edu.uni-graz.at, johanna.kraschitzer@uni-graz.at,
noedlh@gmail.com, elisabeth.trinkl@uni-graz.at

This article should be cited like this: P. Bayer – J. Kraschitzer – H. Noedl – E. Trinkl, 3D-Druck eines Zahnes aus einem spätmittelalterlichen Grab in Archaia Pheneos. *Proof of Concept*: Kontext – Dokumentation – Replik, Forum Archaeologiae 93/XII/2019 (<http://farch.net>).