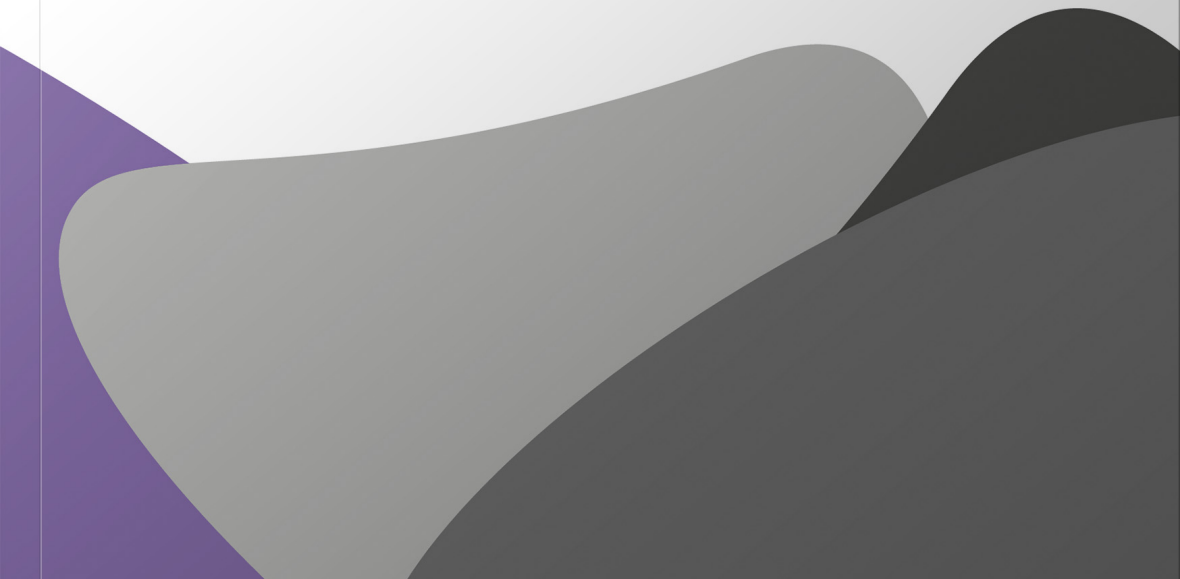


From Global to Local?

**Digitale Methoden in den Geisteswissenschaften im
deutschsprachigen Raum: Ein Triptychon**

*Ulrike Wuttke, Christopher Nunn, Christian Schröter,
Melanie Seltmann & Christian Wachter*



**Gigamesh von Zeile 1 zur 3D
Artefaktanalyse in der NFDI**

Hubert Mara

**From Global to Local? Digitale Methoden in den
Geisteswissenschaften im deutschsprachigen Raum: Ein Triptychon**
Herausgegeben von Ulrike Wuttke, Christopher Nunn,
Christian Schröter, Melanie Seltsmann, Christian Wachter

Publiziert in Melusina Press (Universität Luxemburg), 2026
11, Porte des Sciences
L-4366 Esch-sur-Alzette
<https://www.melusinapress.lu>

Verlagsleitung:	Niels-Oliver Walkowski, Johannes Pause
Lektorat:	Carolyn Knaup, Niels-Oliver Walkowski, die Herausgeber:innen
Gestaltung:	Valentin Henning, Erik Seitz
Umschlagsbild:	Sara-Lee Nußbaum

Die digitale Version dieser Publikation steht unter <https://www.melusinapress.lu>
frei zur Verfügung.

Bibliografische Information der Nationalbibliothek Luxemburg:
Die Nationalbibliothek Luxemburg verzeichnet diese Publikation in der
Luxemburgischen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über bnl.public.lu abrufbar.

Druck: Libri Plureos GmbH, Friedensallee 273, 22763 Hamburg.

DOI (Publication):	10.26298/1981-5722-gvz1
DOI (Container):	10.26298/1981-5722
ISBN (Web):	978-2-919815-72-2
ISBN (PDF):	978-2-919815-73-9
ISBN (Print):	978-2-919815-74-6

Das vorliegende Werk steht unter einer CC BY-SA 4.0 Lizenz. Informationen zu
dieser Lizenz finden Sie unter
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de>. Die in diesem Werk
enthaltenen Bilder und Ressourcen unterliegen der selben Lizenz, sofern sie
keiner anderen Quelle entnommen wurden oder mit einer anderen Lizenz
versehen sind.





2026

GigaMesh von Zeile 1 zur 3D-Artefaktanalyse in der NFDI

Hubert Mara

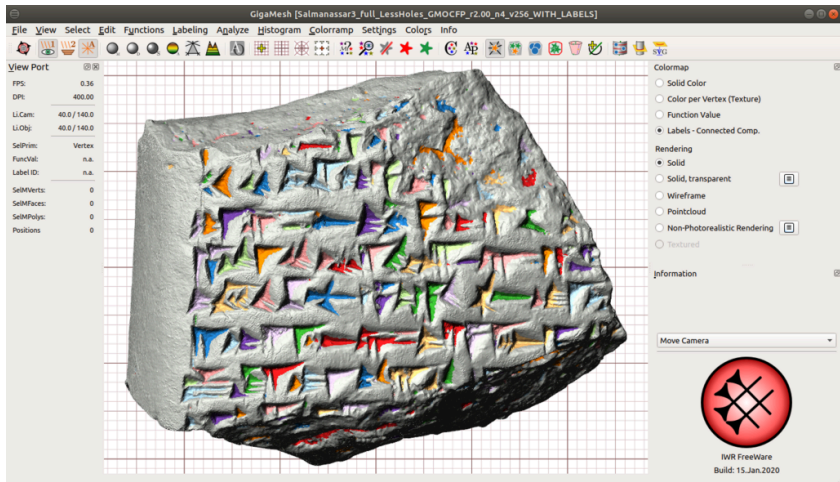


ABBILDUNG 1: Hubert Mara, Screenshot, CC BY. Die Benutzungsoberfläche des GigaMesh Software Frameworks in seiner Version vom 15. Januar 2020. Erzeugt wurde ein solides 3D-Rendering eines Tontafelfragments mit eingefärbten Gruppen von Keilen (als Elemente der Schrift). Sichtbar sind zudem verschiedene Auswahlmöglichkeiten für Arbeitsschritte und Rendervarianten und Informationen zum digitalen Objekt.

Typ: wissenschaftliche Software. *Entwicklung:* Hubert Mara (project lead) in Kollaboration mit Kolleg*innen und Mitarbeiter*innen. *Veröffentlichungsdatum:* rolling release; binaries seit 2009, Offenlegung des Quellcodes April 2020. *Plattform:* Linux, ab April 2019 Windows; experimentelle Mac-Version. *Medium:* lokal ausführbar ohne Installation; binaries online. *Sprache:* Englisch. *Programmiersprache:* C++.

Zur Artefaktbiographie

Das Sprichwort ‚Eine Reise von tausend Meilen beginnt mit dem ersten Schritt‘ gilt auch für die Softwareentwicklung. Dieser Beitrag soll daher einen Überblick über Entscheidungsprozesse und glückliche Zufälle geben, die zum GigaMesh Software Framework (kurz GigaMesh) geführt haben, das zunehmend von Anwender*innen von Mittelamerika bis Japan genutzt wird. GigaMesh bildet die Grundlage für eine Reihe von Publikationen und ist Teil von Forschung und Lehre des Instituts für Archäoinformatik, das 2024 unter dem Namen Institute of Computational Ancient Studies (CompAS) am Fachbereich Geschichts- und Kulturwissenschaften der Freien Universität Berlin eingerichtet wurde.

Da GigaMesh hauptsächlich in der Archäologie eingesetzt wird, ist hier zunächst der Kontext wichtig. Meine ersten Versuche, Software für archäologische Auswertungen zu entwickeln, reichen von meinen ersten Publikationen¹ bis zu meiner Diplomarbeit 2006 an der TU Wien, wobei der Schwerpunkt auf der Berechnung von Profilschnitten in 3D-erfassten Keramikfragmenten als Grundlage für die Klassifizierung von Gefäßtypen lag. Wie damals typisch für den Bereich Bildverarbeitung und Mustererkennung, waren diese ersten Softwarefragmente mit GNU Octave als Prototyp entwickelt. So waren sowohl das Einlesen des de-facto freien Stanford Polygon (PLY) Formats² für 3D-Dreiecksgitter als ASCII-Datei als auch die Berechnung von ebenen Schnitten durch die Gitter gut möglich. Die Bestimmung der konkaven Innenseite eines Keramikfragmentes mittels Krümmungsabschätzung war damit allerdings nur schwer umsetzbar und sehr ineffizient, da die Dreiecksgitter unstrukturiert sind und somit nur schwer in die Matrixform, für die Octave eigentlich gedacht ist,

1 Martin Kampel et al., „Profile Segmentation Scheme for Automated Classification of Archaeological Sherds,“ in *The Digital Heritage of Archaeology. CAA 2002. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 30th CAA Conference, Heraklion, Crete, April 2002*, hg. von Martin Doerr und Apostolis Sarris (Athen: Archive Monuments and Publications Hellenic Ministry of Culture, 2003), 275–80, <http://dx.doi.org/10.15496/publikation-2168>.

2 Greg Turk und Mark Levoy, „Zippered Polygon Meshes from Range Images,“ in *SIGGRAPH94: 21st International ACM Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, hg. von Dino Schweitzer et al. (New York: Association for Computing Machinery, 1994), 311–18, <https://doi.org/10.1145%2F192161.192241>.

überführt werden konnten. Daher habe ich mit fachtypischer kollegialer Unterstützung eine erste eigene Bibliothek in C geschrieben, die in Octave integriert werden konnte und als eine Vorabversion von GigaMesh gesehen werden kann.

2007 führte mich meine persönliche Reise als Marie Curie Fellow an die Universität Florenz in Prato (heute: PIN – „Città di Prato“ University Centre). Durch die thematische und geographische Nähe zur Universität Pisa kam ich hier in Kontakt mit den Entwicklern von MeshLab³, das Ende 2005 in Übungen zur Computergrafik entstand und heute eine bekannte Software zur Manipulation von 3D-Messdaten ist, die eine Vielzahl von Algorithmen anbietet. Neben dem pragmatischen Ansatz, Algorithmen für Dreiecksnetze in Vorlesungen zu üben, ist damit eine Software entstanden, die Blender ergänzt. Letztere ist vor allem für die 3D-Modellierung entwickelt worden, wie sie in der Filmindustrie verwendet wird. Ähnlich wie bei Software für die 3D-Modellierung in der Architektur handelt es sich dabei um Born-Digital-Modelle mit einer relativ geringen Anzahl von Elementen wie Punkten und Flächen, Dreiecksgittern oder z. B. Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) für einzelne Objekte, beispielsweise ein auf einer Drehscheibe hergestelltes Stück rotationssymmetrischer Keramik. An dieser Stelle ist die Unterscheidung von 3D-Messdaten zu Born-Digital-Modellen relevant, die bei gleicher Größe andere Daten liefern, da z. B. eine Wand mit nur 4 Punkten beschrieben wird. Im Gegensatz dazu beschreiben Messdatensätze eine Oberfläche typischerweise mit Tausenden von Punkten. Der Grund hierfür ist, dass auch für 3D-Messungen das Nyquist-Shannon sampling theorem gilt.⁴ Damit wird für viele hochwertige archäologische Fundstücke eine räumliche Auflösung im Bereich von 20 µm nötig.

Durch die einzigartige Gelegenheit einer Projektstelle der Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder, hatte ich 2009 die Möglichkeit, eine

3 Paolo Cignoni et al., „MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool,“ in *Sixth Eurographics Italian Chapter Conference: Salerno, Italy, July 2nd - 4th, 2008. Eurographics Italian Chapter proceedings*, hg. von Vittorio Scarano et al. (Salerno: Eurographics Association, 2008), 137–42, <https://doi.org/10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChapConf2008/129-136>.

4 Ullrich Köthe, „Reliable Low-Level Image Analysis“ (Habil., Universität Hamburg, 2007).

Promotion am Interdisziplinären Zentrum für wissenschaftliches Rechnen (IWR) der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg beim Mathematiker Willi Jäger zu beginnen, der schon in den 1980er Jahren begonnen hatte, das wissenschaftliche Rechnen für die Geisteswissenschaften zu erschließen.⁵ Als Erstbetreuer ermöglichte mir Willi Jäger viel thematischen Spielraum und vor allem Zeit, da die typischen zeitintensiven universitären Aufgaben eines promovierenden Mitarbeiters und das Fortschreiten in die zweite Runde der Exzellenzinitiative nachgeordnet werden konnten. Zweiter Betreuer meiner Arbeit wurde Hans Georg Bock, der sich als Informatiker und Numeriker für das sogenannte Tempelpuzzle von Ban-teay Chhmar, Kambodscha interessierte, das ebenfalls mit 3D-Messdaten gelöst werden sollte.⁶ Vorausgegangen war eine Arbeit zur Modellierung dieser Tempel im Angkor-Stil.⁷ Während Willi Jägers Vorschlag eines digitalen Werkzeugs für die Arbeit an Keilschrifttafeln als Forschungsthema seines Kollegen Stefan Maul in der Heidelberger Akademie der Wissenschaften als Anwendungsgebiet meines Promotionsprojektes attraktiver war als die Tempelanlagen, kam aus den Gesprächen mit Hans Georg Bock die Erkenntnis, dass man mit Software für wissenschaftliches Rechnen wie MUSCOD-II⁸ einen alternativen Karriereweg einschlagen konnte, den man heute als Research Software Engineer (RSE) bezeichnen würde. Insofern ist es wenig überraschend, dass am IWR in den letzten Jahren

5 Willi Jäger, „Antrittsrede,“ in *Die Heidelberger Akademie der Wissenschaften im Spiegel ihrer Antrittsreden 1944–2008. Mit einem Verzeichnis ihrer ordentlichen Mitglieder 1909–2008*, hg. von Volker Sellin und Sebastian Zwies (Heidelberg: Winter, 2009), 734–38, aufgerufen am 07. November 2025, https://www.hadw-bw.de/sites/default/files/documents/Antrittsreden_1944-2008%20%281%29.pdf.

6 Anja Schäfer et al., „Large Scale Angkor Style Reliefs: High Definition 3D Acquisition and Improved Visualization Using Local Feature Estimation,“ in *Revive the Past. Proceedings of the 39th Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, hg. von Philip Verhagen (Amsterdam: Amsterdam University Press, 2012), 70–80, aufgerufen am 07. November 2025, https://proceedings.caaconference.org/files/2011/08_Schafer_et_al_CAA2011.pdf.

7 Pheakdey Nguonphan, „3D Modelling of the Temples of Angkor Based on Religious Conceptions,“ in *„Archaeologizing“ Heritage? Transcultural Research – Heidelberg Studies on Asia and Europe in a Global Context*, hg. von Michael Falser und Monica Juneja (Berlin, Heidelberg: Springer, 2013), 127–40, https://doi.org/10.1007/978-3-642-35870-8_7.

8 Kirches, Christian et al., „Modeling Mixed-Integer Constrained Optimal Control Problems in AMPL,“ *IFAC Proceedings* 45, Nr. 2 (2012): 1124–29, <https://doi.org/10.3182/20120215-3-AT-3016.00199>.

ein sehr nützliches Scientific Software Center (SSC) entstanden ist, das Vorbild für viele andere Standorte sein sollte.

Nach Begutachtung des damaligen Entwicklungsstandes von MeshLab wurde schnell klar, dass die Einarbeitung in dessen Struktur sehr zeitaufwendig sein würde und trotz des im Vergleich zu Blender schlankeren Codes viel zu viele Algorithmen enthalten waren, als für die Visualisierung von einfacheren Zeichen notwendig waren. Inspiriert durch die Unterlagen der Vorlesung und Übung „Computergraphik“ von Susanne Krömker, entstanden die ersten Zeilen Code in einem Verzeichnis namens OpenGL, in dem die komplett neu geschriebene Krümmungsberechnung und der Import von PLY-Dateien mit Qt4 für die graphische Oberfläche kombiniert wurden. Gleichzeitig wurde ein hochauflösender 3D-Scanner für Messungen in Kambodscha einerseits und für das KAL-Projekt⁹ von Stefan Maul im Vorderasiatischen Museum zu Berlin andererseits angeschafft, der Ende 2009 ausgeliefert wurde. Die ersten Datensätze vor dieser Erwerbung waren daher sehr rudimentäre Messungen einer Keilschrifttafel (88/677)¹⁰, die mit verschiedenen Geräten im Rahmen der Beschaffung eines hochauflösenden 3D-Scanners erstellt wurden.

Danach standen neueste Hardware, hochwertige Testdaten und ein rudimentäres Framework für die 3D-Erfassung von Keilschrifttafeln zur Verfügung. Was blieb, war die zentrale Frage nach der für mein Promotionsprojekt zu entwickelnden wissenschaftlichen Methode im Umfeld des wissenschaftlichen Rechnens, die als Werkzeug in der Assyriologie Anwendung finden sollte. Willi Jäger hatte ursprünglich ein Kodierungssystem vorgeschlagen, das für numerische Analysen geeignet sein sollte. Das war damals aber nicht möglich, weil man in Fotos oder 3D-Messdaten keine Zeichen erkennen konnte. Inzwischen, d. h. gut 10 Jahre später, konnten dafür KI-basierte Ansätze¹¹, eine paläographische Kodie-

⁹ „Edition literarischer Keilschrifttexte aus Assur.“ Forschungsstelle der Heidelberger Akademie der Wissenschaften, Universität Heidelberg, zuletzt geändert 7. März 2024, <https://www.ori.uni-heidelberg.de/assyriologie/forschung/keilschrift/>.

¹⁰ Hubert Mara, „Multi-Scale Integral Invariants for Robust Character Extraction from Irregular Polygon Mesh Data“ (PhD Diss., Universität Heidelberg, 2012), 166, fig. B.2, <https://doi.org/10.11588/heidok.00013890>.

¹¹ Ernst Stötzner et al., „CNN based Cuneiform Sign Detection Learned from Annotated 3D Renderings and Mapped Photographs with Illumination Augmentation,“

rung sowie Schemata für weitere Annotationen vor allem linguistischer Art¹² geschaffen werden. Zur Zeichenerkennung bot sich ein aus heutiger Sicht klassischer Ansatz mittels 3D-Filter an, um die als 3D-Dreiecksgitter erfassten Oberflächen der Tontafeln zu segmentieren. Aufgrund der erst kürzlich mathematisch nachgewiesenen Robustheit von Integral-Invarianten-Filtern und deren Anwendbarkeit für 3D-Puzzles¹³ fiel die Entscheidung zugunsten derselben in Kombination mit einem Multiskalenansatz. Die Implementierung des Multi-Scale Integral Invariant (MSII) Filters wurde daher zum Herzstück von GigaMesh,¹⁴ das um weitere Implementierungen von Algorithmen wie z. B. zum Labeling erweitert wurde. Im Gegensatz zu MeshLab wird jedoch darauf geachtet, dass Informationen wie ein Skalarwert oder der Feature-Vektor der 3D-Messpunkte modular verwendet werden.

Auf Einladung von Markus Reindel wurde GigaMesh bei dessen KAAK-DAI Grabung in Honduras 2017 erstmals intensiv in der archäologischen Feldforschung getestet.¹⁵ Dabei entstanden zunächst handschriftliche Anleitungen im Stil von Kochbüchern, von denen einige als YouTube-Videos vor allem von Paul Bayer umgesetzt wurden. Dadurch hat sich die Zahl der internationalen Nutzer*innen stark erhöht, was sich an den Besucher*innen der GigaMesh-Website, den YouTube-Aufrufzahlen, aber auch an Supportanfragen zeigt. Die YouTube-Videos sind zusätzlich auf

in *2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)* (Paris: IEEE, 2023), 1672–80, <http://dx.doi.org/10.1109/ICCVW60793.2023.00183>.

12 Timo Homburg, „Linked Open Data for Languages Written in Cuneiform Script“ (PhD Diss., Universität Halle, 2024).

13 Qi-Xing Huang et al., „Reassembling Fractured Objects by Geometric Matching,“ in *SIGGRAPH06: Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference*, hg. von John Finnegan und Eugene Fiume (Boston: ACM Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2006), 569–78, <http://dx.doi.org/10.1145/1179352.1141925>.

14 Hubert Mara et al., „GigaMesh and Gilgamesh 3D Multiscale Integral Invariant Cuneiform Character Extraction,“ in *The 11th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST (2010)*, hg. von Alessandro Artusi et al. (Eindhoven: The Eurographics Association, 2010), 131–38, <https://doi.org/10.2312/VAST/VAST10/131-138>.

15 Franziska Fecher et al., „The Ceramic Finds from Guadalupe, Honduras: Optimizing Archaeological Documentation with a Combination of Digital and Analog Techniques,“ *Journal of Global Archaeology* 2020 (5. Oktober 2022): 6–41, <https://doi.org/10.34780/joga.v2020i0.1009>.

dem Heidelberg Dokumentenserver heiDOK publiziert und entsprechend mit einem Digital Object Identifier (DOI) zitierbar.¹⁶ Neben der Erhöhung der Reichweite und der Verringerung der Einstiegshürde hat die Erstellung der Videos eine Überarbeitung des Graphical User Interface (GUI) und der UserXperience (UX) ausgelöst, da durch das Aufzeichnen der Arbeitsschritte sehr schnell und eindrücklich klar wurde, welche Aktionen gut zusammengefasst werden sollten. Dadurch wurden die Arbeitsabläufe effizienter und die Tutorials kürzer.

Durch die Änderung der thematischen Ausrichtung und eine Art Umstrukturierung der Exzellenzstrategie für die Universität Heidelberg wurde die Zukunft von GigaMesh immer ungewisser, so dass die verbleibende Zeit dafür genutzt wurde, die Software Open Source zu stellen. Glücklicherweise war die Johannes Gutenberg-Universität Mainz mit Kai-Christian Bruhn und Doris Prechel daran interessiert, GigaMesh in das DFG-Projekt Digitale Edition der Keilschrifttexte aus Haft Tappeh zu integrieren.¹⁷ Daraus hat sich eine sehr fruchtbare Zusammenarbeit entwickelt, die zu einer Reihe von Publikationen zur Erweiterung von GigaMesh im Bereich der technischen Metadaten geführt hat, die hauptsächlich von Timo Homburg verfasst wurden.¹⁸ Dies steht auch im Einklang mit der Nationalen Forschungsdateninfrastruktur (NFDI), insbesondere dem archäologisch orientierten Konsortium NFDI4Objects.¹⁹ Aktuell werden in diesem Zusammenhang auch Annotationsmöglichkeiten für Keile als radikales Element der Keilschriftzeichen entwickelt, die eine Grundlage für bildbasierte manuelle Annotationen in 2D und 3D bilden.²⁰

16 Paul Victor Bayer und Serap Özer, „GigaMesh Software Framework Tutorial 9: Unpacking a Cuneiform Tablet,“ Video-Tutorial, 31. Juli 2019, MP4 Video, 6:20, <https://doi.org/10.11588/heidok.00026892>.

17 „Digitale Edition der Keilschrifttexte aus Haft Tappeh (Iran),“ Projekte, GEPRIS (DFG), aufgerufen am 29. Juli 2025, <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/424957759>.

18 Timo Homburg, „Linked Open Data for Languages Written in Cuneiform Script,“; Stötzner, Homburg und Mara, „CNN based Cuneiform Sign Detection Learned from Annotated 3D Renderings.“

19 „Startseite,“ NFDI4Objects, Hochschule Mainz, aufgerufen am 29. Juli 2025, <https://nfdi4objects.net>.

20 Jan Philipp Bullenkamp und Hubert Mara, „Wedge Detection for Predictive Graphical Annotation of Cuneiform Tablets in 3D,“ in *GCH 2024 – Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*, hg. von Massimiliano Corsini et al. (Eindhoven: The Eurographics Association, 2024), <https://doi.org/10.2312/gch.20241260>.

Bleibt noch ein Blick in die Zukunft: Es zeichnet sich ab, dass der allgemeine und notorische Mangel an Research Software Engineers (RSE) dazu führen wird, dass speziell auch die Pflege des GUI von GigaMesh immer schwieriger wird, da ein Wechsel vom Anwendungsframework Qt5 auf Qt6 längst überfällig wäre. Auch die Aktualisierung von Implementierungen im Bereich des ebenfalls abgekündigten OpenGL-Standards gestaltet sich alles andere als einfach. Abgesehen davon, dass RSE mit Kenntnissen im Bereich der Computergrafik in der Industrie sehr gesucht und gut bezahlt sind, sind viele universitätstypische Gepflogenheiten wie Lehrdeputate und starre Gehaltsschemata hinderlich, um entsprechende Mitarbeiter*innen zu finden und zu halten. Auf der positiven Seite steht das große Interesse am Standort Berlin, eine Archäoinformatik in Forschung und Lehre zu etablieren, die sich konsequent auf die 3D-Messtechnik sowie die direkt angrenzenden Bereiche Metadaten, Datenpublikation bzw. NFDI4Objects konzentriert.

Zum Abschluss möchte ich mich herzlich bei Lisa Wilhelmi für das wertvolle Lektorat und die konstruktiven Anmerkungen bedanken.

Bibliographie

Bayer, Paul Victor und Serap Özer. „GigaMesh Software Framework Tutorial 9: Unpacking a Cuneiform Tablet.“ Video-Tutorial. 31. Juli 2019. MP4 Video, 6:20. <https://doi.org/10.11588/heidok.00026892>.

Bullenkamp, Jan Philipp und Hubert Mara. „Wedge Detection for Predictive Graphical Annotation of Cuneiform Tablets in 3D.“ In *GCH 2024 – Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*, herausgegeben von Massimiliano Corsini, Daniele Ferdani, Arjan Kuijper und Hasan Kutlu. Eindhoven: The Eurographics Association, 2024. <https://doi.org/10.2312/gch.20241260>.

Cignoni, Paolo, Marco Callieri, Massimiliano Corsini, Matteo Dellepiane, Fabio Ganovelli und Guido Ranzuglia. „MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool.“ In *Sixth Eurographics Italian Chapter Conference: Salerno, Italy, July 2nd - 4th, 2008. Eurographics Italian Chapter proceedings*, herausgegeben von Vittorio Scarano, Rosario De Chiara und Ugo Erra, 137–42. Salerno: Eurographics Association, 2008. <https://doi.org/10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChapConf2008/129-136>.

Fecher, Franziska, Markus Reindel, Peter Fux, Brigitte Gubler, Hubert Mara, Paul Bayer und Mike Lyons. „The Ceramic Finds from Guadalupe, Honduras: Optimizing Archaeological Documentation with a Combination of Digital and Analog Techniques.“ *Journal of Global Archaeology* 2020 (5. Oktober 2022): 6–41. <https://doi.org/10.34780/joga.v2020i0.1009>.

GEPRIS (DFG). „Digitale Edition der Keilschrifttexte aus Haft Tappeh (Iran).“ Projekte. Aufgerufen am 29. Juli 2025. <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/424957759>.

Homburg, Timo. „*Linked Open Data for Languages Written in Cuneiform Script*.“ PhD Diss., Universität Halle, 2024.

Huang, Qi-Xing, Simon Flöry, Natasha Gelfand, Michael Hofer und Helmut Pottmann. „Reassembling Fractured Objects by Geometric Matching.“ In *SIGGRAPH06: Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference*, herausgegeben von John Finnegan und Eugene Fiume, 569–78. Boston: ACM Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2006. <http://dx.doi.org/10.1145/1179352.1141925>.

Jäger, Willi. „Antrittsrede.“ In *Die Heidelberger Akademie der Wissenschaften im Spiegel ihrer Antrittsreden 1944–2008. Mit einem Verzeichnis ihrer ordentlichen Mitglieder 1909–2008*, herausgegeben von Volker Sellin und Sebastian Zwies, 734–38. Heidelberg: Winter, 2009, aufgerufen am 07. November 2025. https://www.hadw-bw.de/sites/default/files/documents/Antrittsreden_1944-2008%20%281%29.pdf.

Kampel, Martin, Robert Sablatnig und Hubert Mara. „Profile Segmentation Scheme for Automated Classification of Archaeological Sherds.“ In *The Digital Heritage of Archaeology. CAA 2002. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 30th CAA Conference, Heraklion, Crete, April 2002*, herausgegeben von Martin Doerr und Apostolis Sarris, 275–80. Athen: Archive Monuments and Publications Hellenic Ministry of Culture, 2003. <http://dx.doi.org/10.15496/publikation-2168>.

Kirches, Christian, Hans Georg Bock und Sven Leyffer. „Modeling Mixed-Integer Constrained Optimal Control Problems in AMPL.“ *IFAC Proceedings* 45, Nr. 2 (2012): 1124–29. <https://doi.org/10.3182/20120215-3-AT-3016.00199>.

Köthe, Ullrich. „Reliable Low-Level Image Analysis.“ Habil., Universität Hamburg, 2007.

Mara, Hubert. „Multi-Scale Integral Invariants for Robust Character Extraction from Irregular Polygon Mesh Data.“ PhD Diss., Universität Heidelberg, 2012. <https://doi.org/10.11588/heidok.00013890>.

Mara, Hubert, Susanne Krömker, Stefan Jakob und Bernd Breuckmann. „GigaMesh and Gilgamesh 3D Multiscale Integral Invariant Cuneiform Character Extraction.“ In *The 11th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST (2010)*, herausgegeben von Alessandro Artusi, Morwena Joly, Genevieve Lucet, Denis Pitzalis und Alejandro Ribes, 131–38. Eindhoven: The Eurographics Association, 2010. <https://doi.org/10.2312/VAST/VAST10/131-138>.

NFDI4Objects. „Startseite.“ Hochschule Mainz. Aufgerufen am 29. Juli 2025. <https://nfdi4objects.net>.

Nguonphan, Pheakdey. „3D Modelling of the Temples of Angkor Based on Religious Conceptions.“ In *„Archaeologizing‘ Heritage? Transcultural Research – Heidelberg Studies on Asia and Europe in a Global Context*, herausgegeben von Michael Falser und Monica Juneja, 127–40. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35870-8_7.

Schäfer, Anja, Hubert Mara, Julia Freudenreich, Bernd Breuckmann, Christiane Düffort und Georg Bock. „Large Scale Angkor Style Reliefs: High Definition 3D Acquisition and Improved Visualization Using Local Feature Estimation.“ In *Revive the Past. Proceedings of the 39th Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, herausgegeben von Philip Verhagen, 70–80. Amsterdam: Amsterdam University Press, 2012, aufgerufen am 07. November 2025. https://proceedings.caaconference.org/files/2011/08_Schafer_et_al_CAA2011.pdf.

Stötzner, Ernst, Timo Homburg und Hubert Mara. „CNN based Cuneiform Sign Detection Learned from Annotated 3D Renderings and Mapped Photographs with Illumination Augmentation.“ In *2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, 1672–80. Paris: IEEE, 2023. <http://dx.doi.org/10.1109/ICCVW60793.2023.00183>.

Turk, Greg und Mark Levoy. „Zippered Polygon Meshes from Range Images.“ In *SIGGRAPH94: 21st International ACM Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, herausgegeben von Dino Schweitzer, Andrew Glassner und Mike Keeler, 311–18. New York: Association for Computing Machinery, 1994. <https://doi.org/10.1145%2F192161.192241>.

Universität Heidelberg. „Edition literarischer Keilschrifttexte aus Assur.“ Forschungsstelle der Heidelberger Akademie der Wissenschaften. Zuletzt geändert 7. März 2024. <https://www.ori.uni-heidelberg.de/assyriologie/forschung/keilschrift/>.