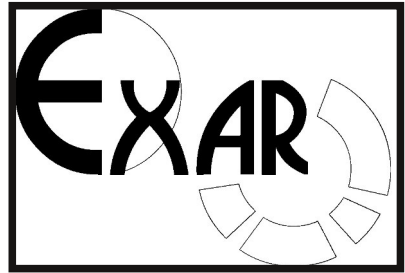


EXPERIMENTELLE ARCHÄOLOGIE IN EUROPA  
Jahrbuch 2025  
Heft 24

Herausgegeben von Gunter Schöbel  
und der Europäischen Vereinigung zur  
Förderung der Experimentellen  
Archäologie / European Association for  
the advancement of archaeology by  
experiment e.V.

in Zusammenarbeit mit dem  
Pfahlbaumuseum Unteruhldingen,  
Strandpromenade 6,  
88690 Unteruhldingen-Mühlhofen,  
Deutschland



EXPERIMENTELLE ARCHÄOLOGIE  
IN EUROPA  
JAHRBUCH 2025

Unteruhldingen 2025

Gedruckt mit Mitteln der Europäischen Vereinigung zur Förderung der Experimentellen Archäologie / European Association for the advancement of archaeology by experiment e.V.

Redaktion:	Ulrike Weller, Thomas Lessig-Weller, Erica Hanning
Textverarbeitung und Layout:	Ulrike Weller, Thomas Lessig-Weller
Bildbearbeitung:	Ulrike Weller, Thomas Lessig-Weller
Umschlaggestaltung:	Thomas Lessig-Weller, Ulrike Weller

Umschlagbilder: Sönke Hartz, Frank Wiesenberg, Universität Trier

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie, detaillierte bibliographische Daten sind im Internet abrufbar unter:  
<http://dnb.dbb.de>

ISBN 978-3-944255-24-8

© 2025 Europäische Vereinigung zur Förderung der Experimentellen Archäologie / European Association for the advancement of archaeology by experiment e.V. - Alle Rechte vorbehalten

Gedruckt bei: Beltz Bad Langensalza GmbH, 99947 Bad Langensalza, Deutschland

## Inhalt

*Gunter Schöbel*

Vorwort

8

## Experiment und Versuch

Bettina Birkenhagen, Michael Dillenburger

Bierbrauen nach römischem Vorbild – erste Experimente und Ergebnisse

11

*Frank Wiesenberg*

Reduce to the Max – oder: Wie klein darf ein römischer Glasofen sein?

21

*Mark Taylor, David Hill, Bettina Birkenhagen*

Neue Anregungen zur Herstellung römischer Cameogefäße

39

*Andreas Klumpp*

Von hölzernen Rosten, Kieselsteinen, „Schnellkochtopfdeckeln“  
und dem Huhn in der Flasche. „Exotische“ Kochgeräte und -methoden  
aus der Dissertation „Culina Historica“

49

*Andreas Franzkowiak*

issin sol behebēt dir din füß gesund – Eisensohlen gegen Fußangeln

61

## Rekonstruierende Archäologie

*Hannes Wiedmann*

Experimentelle Herstellung paläolithischer Flöten

77

*Svenja Furken, Sönke Hartz*

Pfeil sucht Bogen – das Ahrensburger Steinzeitexperiment

89

*Josef Engelmann*

Bemerkungen zur Herstellung spätbronzezeitlicher Sichelgriffe

103

*Kayleigh Saunderson, Karina Grömer*

Lady of the Rings – eine besondere hallstattzeitliche Kleidungsform

113

<i>Peter Johann</i> Die Bissula – ein seegängiges römisches Handelsschiff im Experiment	125
<i>Helmut Balk, Margarete Madelung</i> Vom Handwerk zur Musik und zurück – Forschungsnachbauten eines Hammerflügels aus der Schule von J. A. Stein (um 1780) und ihre klangliche Wiederbelebung	139
 <b>Vermittlung und Theorie</b>  	
<i>Thomas Lessig-Weller</i> Experimentelle Archäologie und Schule – eine Beziehung mit Zukunft?	161
<i>Frank Wiesenberg</i> Die Römische Glashütte in der RömerWelt am caput limitis zwischen Experiment, Versuch und Vermittlung	173
<i>Fabian Brenker</i> ,Fiktive‘ Konstrukte im kollektiven ‚Wissen‘ der Darstellenden Interpretation am Beispiel bürgerlicher Kleidung und Fußsoldaten im Hochmittelalter	189
<i>Susanne Bosche</i> Handwerk und Digitalisierung Hand in Hand. Das Potenzial von 3D-Digitalisierungsverfahren für die Experimentelle Archäologie	201
<i>Julia Heeb</i> Das EU-Projekt „RETOLD“ – einheitliche Dokumentationsstrategien für archäologische Hausmodelle und altes Handwerk	217
<i>Gunter Schöbel</i> Drei Vereine – und ihre Möglichkeiten zur Unterstützung der Experimentellen Archäologie in Europa. Der Süd- und Westdeutsche Altertumsverband (1900-2024), der Pfahlbauverein (1922-2024) und die Europäische Vereinigung zur Förderung der Experimentellen Archäologie (1990-2024) in Deutschland und Europa	229

## Jahresbericht, Autorenrichtlinien

*Ulrike Weller*

Vereinsbericht der Europäischen Vereinigung zur Förderung der  
Experimentellen Archäologie (EXAR) für das Jahr 2024

247

Autorenrichtlinien „Experimentelle Archäologie in Europa“

251

# Vorwort

Die als „Perle der Schwäbischen Alb“ bekannte Stadt Blaubeuren auf der Schwäbischen Alb – mit ihrem Blautopf – war das Ziel der 21. Jahrestagung der EXAR, die vom 19. bis zum 22. September 2024 stattfand. Die „älteste Kunst der Menschheit“ – UNESCO Welterbe seit 2017 – lockte Experimentalarchäologinnen und -archäologen in das maßgebende Museum neuester Konzeption, um die Anfänge eines besonderen Kapitels und 40.000 Jahre Menschheitsgeschichte kennen zu lernen. Die aktuelle Präsentation wurde uns im Urgeschichtlichen Museum, dem URMU, durch die Museumsleiterin Frau Dr. Stefanie Kölbl und ihre Mitarbeiter, Frau Rohn und Herr Wiedmann, in liebenswerter und höchst sachkundiger Weise nähergebracht. Wir danken ihnen und dem ganzen Organisationsteam ganz herzlich an dieser Stelle.

Die Vermittlungsstätte ist eine Zweigstelle des Archäologischen Landesmuseums Baden-Württemberg, aber noch mehr des Urgeschichtlichen Institutes der Universität Tübingen. Die Kolleginnen und Kollegen Joachim Hahn, Hansjürgen Müller-Beck und Anne Scheer gestalteten die ersten Jahre. Heute tragen Nicolas Conrad vom Tübinger Institut, eine Stiftung unter Beteiligung des Landkreises und der Stadt und die Gesellschaft für Urgeschichte e. V. die Einrichtung – ein Erfolgsmodell. Die Experimentelle hatte dort stets eine starke methodische Verankerung mit direkten Bezügen zu den Forschungsausgrabungen. Die „Tage der offenen Höhle“, Workshops zur Methode und Konzerte mit Altsteinzeitflöten durch Friedrich Seeberger am authentischen Ort

sind uns alle noch in sehr guter Erinnerung.

Die Jahrestagung hielt wieder spannende Vorträge, informative Poster und ein neues Jahrbuch 2024 bereit. Persönlich danken darf ich dem Redaktionsteam um Ulrike Weller, Thomas Lessig-Weller und dem Vorstand noch einmal herzlich für die Zuwidmung der letzten Jahresbilanz an mich. Dies war eine unerwartete und große Freude.

18 Berichte und Vorträge enthält der neue Band. Sie fallen nahezu gleich gewichtig in die Rubriken „Experiment und Versuch“, „Rekonstruierende Archäologie“ sowie „Vermittlung und Theorie“. Chronologisch konnten Themen vom Paläolithikum bis zur Neuzeit behandelt werden. Thematisch sind von der Steinbearbeitung frühester Epochen über das Bierbrauen in römischer Zeit bis zur Rekonstruktion eines Hammerflügels des 18. Jhs. viele spannende Versuche geschildert. Auch die Aufgaben für den Schulunterricht oder die Positionierung zur Living History oder dem re-enactment finden Raum in dieser Darstellung.

Viel Freude beim Lesen, dem Gestalten weiterer Experimente und der Entwicklung qualitativvoller Vermittlungsprogramme.

Unteruhldingen im Juli 2025

Prof. Dr. Gunter Schöbel

1. Vorsitzender EXAR e. V.  
Pfahlbaumuseum Unteruhldingen

## Handwerk und Digitalisierung Hand in Hand

### Das Potential von 3D-Digitalisierungsverfahren für die Experimentelle Archäologie

Susanne Bosche

**Summary – Entangling Craftmanship and Digitisation. The Potential of 3D Digitisation Processes for Experimental Archaeology.** *3D digitisation provides a powerful tool for experimental archaeology. Due to the high demands of archaeological sciences and craftsmanship, the technologies used are challenged to achieve maximum performance and it is necessary to develop new, alternative procedures and methods. They can also offer craftsmen unique documentation, analysis and surveying tools that perfectly fulfil conservation requirements and make their work much easier. In this text, we present some of the application and solution strategies of photogrammetry, 3D scanning and endoscopy / videoscapy in the examination and scientific reconstruction of historical keyboard instruments. 3D scanning enables the detailed recording, measurement and analysis of the instruments and their components and their mutual comparison for analysing deformations and damage and serves as a control instance. The combination of endoscopy / videoscapy allows us to precisely measure the difficult to access interior of the instruments with its very important structures.*

*Keywords: 3D-scanning, Photogrammetry, Survey Technology*

*Schlagworte: 3D-Scannen, Photogrammetrie, Vermessungstechnik*

#### Einleitung

Am Beginn eines experimentalarchäologischen Projekts steht das Sammeln möglichst vieler Informationen und Hinweise über die Konstruktionsweise, die Materialien, genutzten Werkzeuge etc., die für den Nachbau des Originals von Bedeutung sind und/oder benötigt werden. Die Erforschung und der Nachbau historischer Tasteninstrumente bilden keine

Ausnahme dieser Regel. Die spezifischen Bedürfnisse der Instrumente stellen uns vor besondere Herausforderungen. Wir wollen die historischen Originale unverändert konservieren und auf ihrer Grundlage spielbare Instrumente konstruieren, deren Klang möglichst nahe am (hypothetischen) Klang des Originals liegt. Das Bindeglied zwischen Nachbau und Original bildet die physikalische Beschaffenheit der Instrumente als Grundlage für die

Klangentstehung. Für unser Vorhaben benötigen wir also möglichst präzise Informationen über die physikalische Beschaffenheit der Originale, ohne die Originale zu beeinträchtigen oder gar zu zerstören (Balk, Madelung 2025; <[www.greifenberger-institut.de](http://www.greifenberger-institut.de)>). Eine Messgenauigkeit im Zehntelmillimeterbereich, die systematische Erforschung des nur eingeschränkt zugänglichen Innenraums und die Sichtbarmachung von Arbeitsspuren sind nur einige der vielen Herausforderungen, die die hochpräzise handwerkliche Arbeit, die zum Bau der Nachbauten benötigt wird, an die Datenaufnahme stellt. Hinzu kommen die allgemeinen Anforderungen an wissenschaftliche Verfahren wie eine Wiederholbarkeit der Resultate und eine Bearbeiterunabhängigkeit, sowie konservatorische Anforderungen wie eine kontakt- und zerstörungsfreie Datenaufnahme.

Die 3D-Digitalisierungstechnologien haben sich in den letzten Jahren zu einem wertvollen und mächtigen Werkzeug zur Umsetzung dieser Anforderungen und Ziele herausgebildet. Sie erlauben eine kontakt- und zerstörungsfreie und zugleich äußerst effiziente Aufnahme von Messdaten mit einer hohen Punktdichte in kürzester Zeit und setzen sich damit klar von anderen Messverfahren wie der Koordinatenmesstechnik ab. Während bei letzterer jeder einzelne Messpunkt manuell angefahren werden muss und einen Berührungskontakt der Messsonde mit der Objektoberfläche erfordert, erfasst ein 3D-Scanner in der gleichen Zahl fünf- bis sechsstelligen Zahlen an Messpunkten ohne jeglichen Kontakt mit dem Originalinstrument. Das Objekt wird nicht nur konservatorisch sicherer, sondern auch durch deutlich mehr Messdaten digital erfasst und repräsentiert. Eine Digitalisierung der Instrumente mittels Photogrammetrie wäre ebenfalls möglich, aber durch die Vielzahl an benötigten Bildern deutlich zeit-

und ressourcenaufwändiger. Dazu gesellt sich eine risikobehaftete Skalierung des Modells anhand eines Referenzmediums, da Photogrammetrie-Modelle zwar proportional verlässlich sind, aber anders als die Daten von 3D-Scannern keine Absolutwerte beinhalten.

Aus diesen Gründen nehmen 3D-Digitalisierungsverfahren in unserem Arbeitsalltag eine immer wichtigere Rolle ein, ohne jedoch die bisherigen Verfahren vollständig zu verdrängen. Unser allgemeines Anliegen ist es, auf möglichst effizientem Weg an möglichst aussagekräftige und präzise Informationen zu gelangen. Die bisherige messtechnische Erfassung eines Hammerflügels mit Hilfe eines Koordinatenmessarms dauert immerhin zwischen einem bis eineinhalb Monaten. Daher gehört die Auswahl der bestgeeigneten Technologie ebenso zu dieser Arbeit wie die Anpassung der Verfahren an unsere spezifischen Bedürfnisse und bei Bedarf die Entwicklung neuer, alternativer Herangehensweisen. Durch ihre spezifischen, oftmals sehr detaillierten und für industrielle Verfahren ungewohnten Anforderungen fordert die Experimentalarthologie die 3D-Digitalisierung in vielfältiger Hinsicht heraus und befördert somit ihre Weiterentwicklung und die Konzipierung neuer, alternativer Verfahren und Wege. Die wissenschaftliche Anwendung der Digitalisierungsverfahren bedarf eines mindestens gleich hohen Präzisions- und Genauigkeitsgrades wie industrielle Verfahren. Ein Hobelspan, beispielsweise, hat eine Dicke von 0,1 mm. Wie soll ein Bauteil eines Nachbaus eines historischen Tasteninstrumentes die gleiche Feinheit wie das Original erreichen, wenn sich die dem Nachbau zugrundeliegenden Baupläne nicht in diesem Genauigkeitsbereich bewegen? Allein mit dieser Anforderung bewegen wir uns bereits im Grenzbereich der unter Idealbedingungen möglichen Genauigkeit

der 3D-Scanningtechnologie. Hinzu kommen Frage- und Aufgabenstellungen, die sich nur durch die Anforderungen der experimentalarchäologischen Verfahren und /oder die spezifischen Beschaffenheiten der untersuchten Objekte ergeben. In welchem anderen Kontext wird die Untersuchung eines geschlossenen Innenraums mit hochkomplexer Untergliederung und eingeschränkter Zugänglichkeit in der Dimension eines historischen Tasteninstrumentes relevant? Wie finden wir eine Lösung, die sowohl unseren messtechnischen und dokumentatorischen Anforderungen als auch den konservatorischen Bedenken gerecht wird?

Weite Teile unserer Arbeit mit 3D-Digitalisierungsverfahren gestalten sich letztlich als angewandte Problemlösung. Auf den folgenden Seiten möchten wir einige der in diesem Kontext entstandenen Strategien und Wege zur digitalen Untersuchung historischer Tasteninstrumente vorstellen, die sich auch in anderen experimentalarchäologischen Projekten gewinnbringend anwenden lassen. Die Zeilen sollen keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, sondern lediglich aus dem Arbeitsalltag des GIMK berichten. Generell gilt: Jedes Problem, jede Anforderung ist individuell – weshalb auch jede Lösungsstrategie auf individuelle Bedürfnisse reagiert. Auf diesem Weg profitieren 3D-Digitalisierungsverfahren, Handwerk und Experimentalarchäologie gegenseitig voneinander und fordern sich gegenseitig zu einem immer weiter fortschreitenden Verschieben der eigenen Grenzen heraus.

### **Digitalisierung und Vermessung der sichtbaren Oberflächen**

Unser Einstieg in die 3D-Digitalisierung begann mit einem klar umrissenen Ziel und Forschungsprojekt. Der 3D-Scanner Leo der Firma Artec sollte uns dabei helfen, Deformationen unserer Hammerflü-

gel-Nachbauten durch Umwelteinflüsse wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit und die Nutzung der Instrumente zu dokumentieren und systematisch zu untersuchen (vgl. auch LE CONTE U. A. 2016.). Benötigt wurden für derartige Untersuchungen möglichst präzise 3D-Digitalisate der Nachbauten, was uns mit der Herausforderung konfrontierte, einen Hammerflügel verlässlich und präzise mit dem handgeführten 3D-Scanner Artec Leo zu digitalisieren – keine einfache Aufgabe, wenn man bedenkt, dass unsere Hammerflügel mit ihren großen, gleichförmigen Oberflächen, verwinkelten Bereichen, schwarzen Oberflächen, glänzenden Metallelementen (Wirbel, Stifte) und ihren dünnen, glänzenden Saiten, die noch dazu quasi frei schwebend über die für die Verformungsmessung interessanteste Fläche, den Resonanzboden, verlaufen, so ziemlich alle Faktoren beinhalten, die 3D-Scanner vor große Herausforderungen stellen. Trotzdem haben wir durch lange Tests eine Vorgehensweise entwickelt (Bosche u. a. [im Erscheinungsvorgang]), die es uns erlaubt, die Instrumente in kurzer Zeit zu scannen und reproduzierbare 3D-Modelle (Abb. 1) mit einer Präzision von 0,2-0,3 mm zu erstellen – ein mit Blick auf die technisch mögliche Präzision des 3D-Scanners unter Idealbedingungen von 0,1 mm ein erstaunlich guter Wert. Die Entwicklung dieser Methodik erfolgte überwiegend unter dem Gesichtspunkt der Effizienz: Die 3D-Modelle sollten zuverlässig und verlässlich, aber auch mit möglichst geringem Arbeits- und Zeitaufwand erstellt werden.

Nach der Entwicklung dieser Verfahrensweise konnten wir beginnen, standardmäßig mit dem 3D-Scanner zu arbeiten und sein Potential für unsere übrigen messtechnischen Anforderungen zu erkunden. Die Verformungsdokumentation und -untersuchung ist inzwischen nur eines von vielen Projekten, die wir in unserem Ar-



*Abb. 1: 3D-Modell eines Hammerflügels aus der Schule von J. A. Stein. – 3D model of a fortepiano from the school of J. A. Stein.*

beitsalltag nutzen und entwickeln. Von Anfang an und bis heute liegt unser Fokus auf der Nutzung der 3D-Digitalisierungstechnologie für messtechnische Fragen. Das in den Geisteswissenschaften stark verbreitete Erstellen von Präsentationsmodellen mit möglichst ansprechender Textur (siehe rein exemplarisch MEANS U. A. 2016; MÜNSTER U. A. 2016; HOSTETTLER U. A. 2024) ist für uns ein Nebenschauplatz, der nur dann besondere Aufmerksamkeit erhält, wenn er zur Lösung messtechnischer Fragen beitragen kann (siehe unten). Durch den Verzicht auf die Berechnung der mit einem zweiten, im 3D-Scanner fest installierten Kamerasystem aufgenommenen Texturdaten – insbesondere bei der Erstellung von Modellen größerer Objekte wie unserer Hammerflügel – können wir ein wissenschaftstheoretisches Problemfeld umgehen. Grundsätzlich lässt sich jeder von den Sensoren des 3D-Scanners aufgenommene Raumpunkt als Messpunkt verstehen; die Dichte der berechneten Punktwolke bestimmt den Flächenverlauf, die erkennbaren Details und den Repräsentations-

grad des Digitalisats für die digitalisierte Oberfläche. Bei großen Scanobjekten erreichen diese Punktwolken Größen Dimensionen, für die die Texturberechnungen selbst von handelsüblichen Computern im obersten Leistungssegment nicht mehr durchgeführt werden kann, ohne das Modell zuvor zu verkleinern. Dabei wird die Punktwolkendichte reduziert, d. h. es werden Messpunkte aufgrund festgelegter Regeln algorithmisch gelöscht, was zu Detailverlusten, aber auch zu wahrnehmbaren Veränderungen an der Oberfläche der Digitalisate führen kann. Wissenschaftstheoretisch betrachtet greifen wir damit in die Aussagekraft der Daten des Messsystems ein, was eine zu diskutierende Maßnahme ist. Benötigen wir ein texturiertes Modell eines großen Scanobjekts, fertigen wir daher eine Kopie des geometrischen Messmodells an, die wir anschließend verkleinern und texturieren. So bleiben uns trotz der Rechenoptionen alle Informationen enthalten und es kann bei Bedarf eine Fehlerkontrolle am nicht veränderten Modell durchgeführt werden.

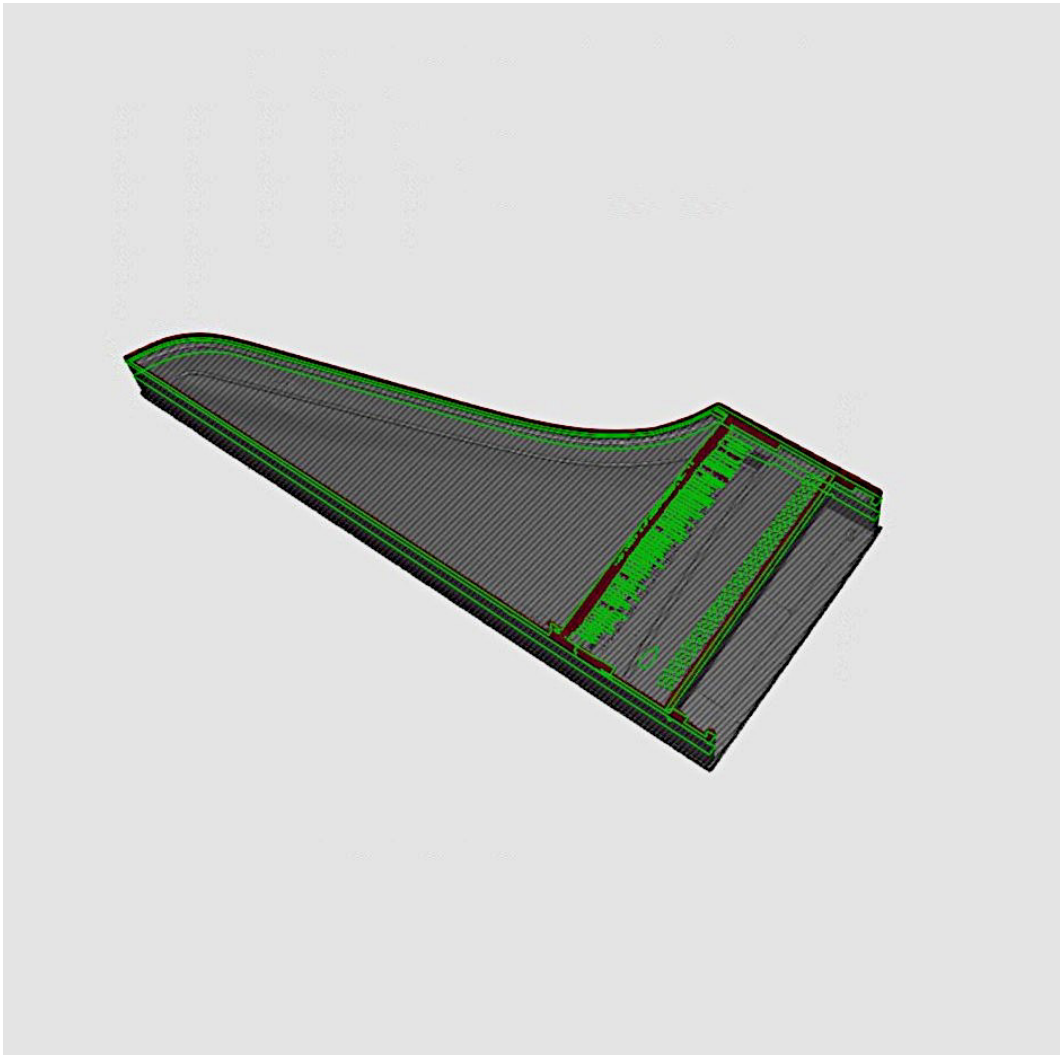


*Abb. 2: 3D-Modell eines Hammerflügels von F. J. Spath. Details: Wirbel und Anrisslinie. – 3D model of a fortepiano by F. J. Spath. Details: Tuning pins and scribe line.*

Ein 3D-Scanner, der für die Digitalisierung großer und mittelgroßer Objekte hervorragend geeignet ist, gelangt bei der Aufnahme kleinster Details an unseren komplexen Instrumenten an seine Grenzen. Die für den Nachbau sehr wichtigen exakten Eindringpunkte der Stegstifte und Wirbel konnten von unserem Artec Leo nicht oder nur sehr unpräzise erfasst werden. Hier leistet der auf kleinere Objekte ausgerichtete Artec Space Spider mit kleinerem Sichtfeld, aber höherer Präzision von bis zu 0,05 mm deutlich bessere Arbeit. Diese Parameter führen zu einer deutlich höheren Punktwolkendichte und zu einem deutlich höheren Zeitaufwand als beim Artec Leo. Daher setzen wir den Artec Space Spider nur in den Fällen und Bereichen ein, in denen die Leistung des Artec Leo für unsere Bedürfnisse nicht ausreicht. In einem 3D-Modell eines Hammerflügels von Franz Jacob Spath aus dem Jahr 1761, der sich heute im Heimatmuseum von Oberammergau befindet und aktuell von unserem Institut erforscht und nachgebaut wird, wurde der Korpus nach unserer gewohnten Vorgehensweise

mit dem Artec Leo eingescannt; die Bereiche mit den Stegstiften und den Wirbeln wurden durch Scandaten des Artec Space Spider ergänzt. So entstand ein Gesamtmodell mit vertretbarer und handhabbarer Dateigröße, in dem nicht nur der Korpus in seiner Gesamtheit erfasst ist, sondern auch die Eindringpunkte der Stifte und Wirbel und die Anrisslinien der Wirbelpositionen (Abb. 2) als Spuren des Arbeitsprozesses von F. J. Spath erkennbar werden.

Auf Basis dieser Daten lassen sich aus dem 3D-Modell alle Maße entnehmen, die für den Nachbau dieser Komponenten von Bedeutung sind: die Abmessungen des Korpus, des Resonanzbodens, die Positionen der Stege, Wirbel und Stifte etc. Für die Entnahme der Messwerte und die Auswertung der Digitalisate stellt Artec Studio einige wichtige Tools zur Verfügung. Lineare und geodätische Messungen erlauben die Bestimmung von Längen zwischen zwei Klickpunkten auf einer Oberfläche bzw. über einen Kantenverlauf. Eine Präzision dieser leider stark von



*Abb. 3: Ebenenschnitt in Artec Studio. – Section analysis in Artec Studio.*

der Klickgenauigkeit abhängigen Messungen ist durch ein nachträgliches Einzoomen und Anpassen der zunächst grob gesetzten Messpunkte möglich. Soll die Abhängigkeit der Messungen von der Klickgenauigkeit umgangen werden, lassen sich einzelne Flächen zu geometrischen Grundkörpern (Ebenen, Zylindern, Kegeln etc.) umwandeln und die Abstände und Schnittpunkte zwischen den so erstellten Grundkörpern algorithmisch bestimmen. Diese Messungen sind nicht mehr von der individuellen Klickgenauig-

keit abhängig, sondern von der mathematisch bestimmten Flächenrückführung, die durch die hohe Dichte der Punktwolke sehr verlässliche Resultate erzielt. Ebenfalls algorithmisch bestimmen lassen sich bei Bedarf die Volumina der Digitalisate und ihre Schnittbereiche mit Grundkörpern oder Ebenen. Die Möglichkeit, eine Referenzebene zu konstruieren, im Modell zu platzieren und alle Schnittpunkte und -strecken des Modells mit dieser Ebene algorithmisch bestimmen zu lassen (Abb. 3), ist ein wichtiges Werkzeug

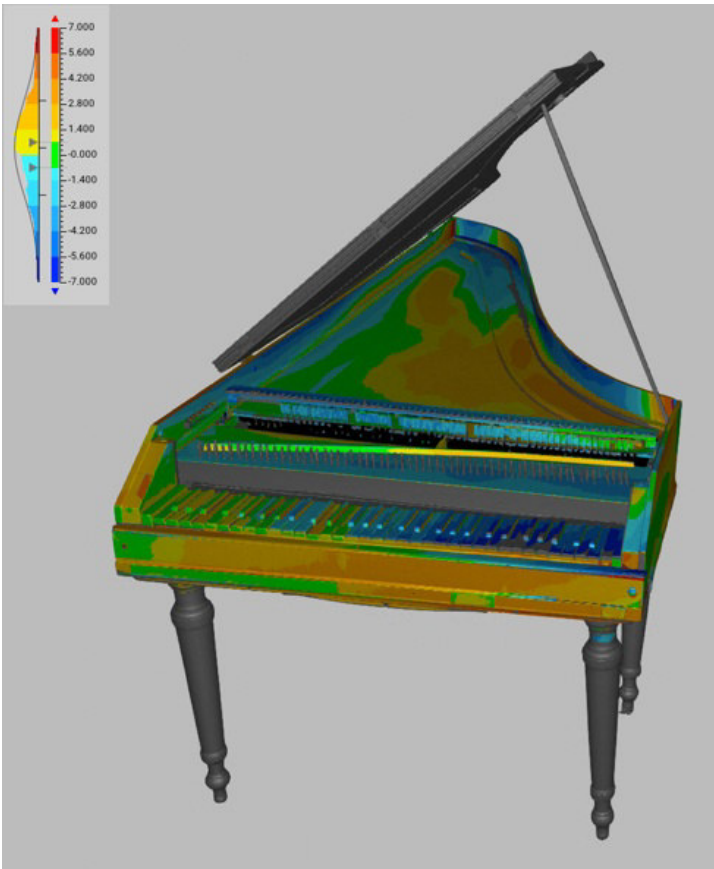


Abb. 4: Vergleich zwischen dem Original-Hammerflügel der Stein-Schule und seinem Nachbaus. – Comparison between the original Stein fortepiano and its replica.

für die Erstellung von Bauplänen aus den Digitalisaten. Beinahe ebenso wertvoll erweist sich die Möglichkeit, Abstände eines Modells von einem Grundkörper oder von einem zweiten Modell bestimmen zu lassen. Positioniert man beispielsweise eine Ebene geschickt neben einer Bruchkante, lässt sich deren Oberflächenverlauf durch die Abstandsmessung äußerst präzise bestimmen. Die Abstandsmessung zwischen zwei Modellen ermöglicht uns die Umsetzung unseres Anfangsprojekts, der Verformungsanalyse. Hierzu werden zwei 3D-Scanmodelle desselben Nachbaus, die in einem festgelegten Abstand zueinander aufgenommen wurden, übereinandergelegt und der Abstand zwischen ihnen berechnet. Durch Absolutzahlen und eine Farbkennzeichnung (Abb. 4) zeigt uns Artec Studio, welche Bereiche sich in diesem Zeitraum in welche Richtung und

wie stark verändert haben. Wiederholt man diese Messungen systematisch über einen längeren Zeitraum unter einer Dokumentation der Umweltbedingungen und Nutzungsereignisse, lassen sich die Ergebnisse systematisch auswerten und analysieren. Auf die gleiche Weise lässt sich das Verhältnis unserer Nachbauten zu den Originalen untersuchen und damit eine Art ‚Kontrollinstanz‘ für die Aussagekraft ihres Klangbildes für die Originale gewinnen. Ein in Abb. 4 gezeigter Vergleich eines Nachbaus eines Hammerflügels aus der Schule von J. A. Stein aus der Zeit um 1780, der sich im Besitz des Instituts befindet, mit dem Original offenbart, dass die bautechnisch und klanglich relevanten Bereiche (der Resonanzboden und die Mechanik) trotz der langen unterschiedlichen Nutzungsgeschichte der Instrumente zu einem hohen Grad überein-

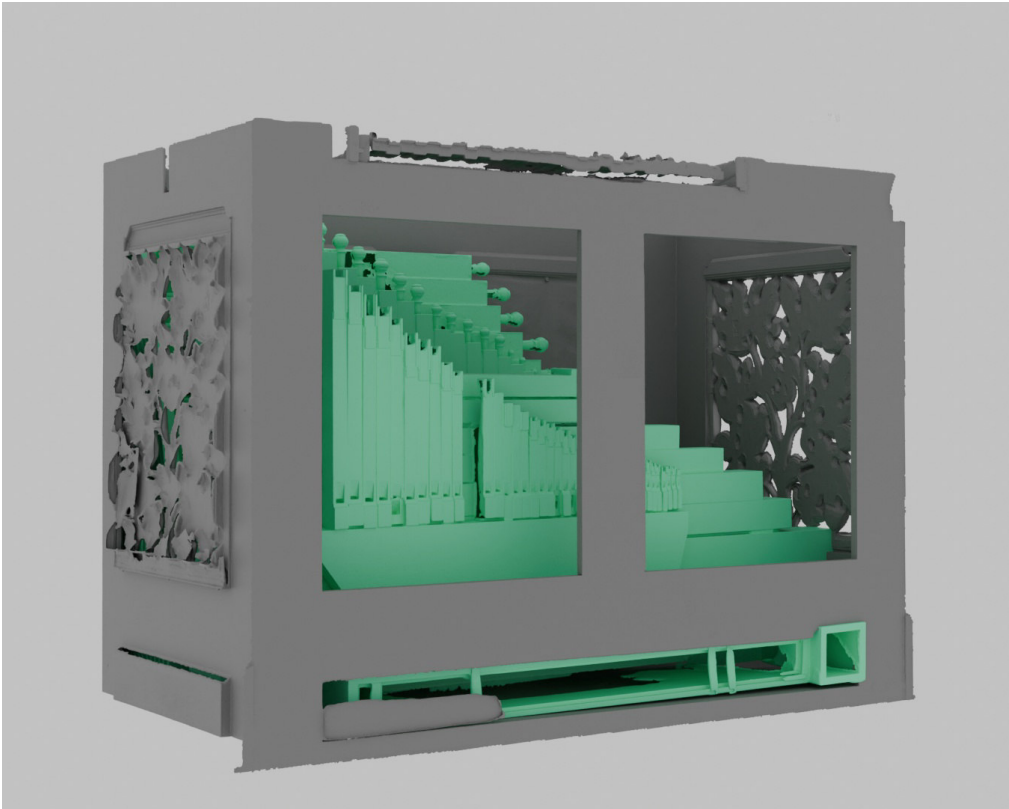
stimmen. Deutlichere Abweichungen zeigen sich lediglich bei den klanglich nicht relevanten Furnieren auf den Seitenflächen des Korpus, die sich auf handwerkliche Gründe zurückführen lassen.

Die zielgerichtete Nutzung dieser Vermessungs- und Analysetools ermöglicht nicht nur das Gewinnen von Maßen und Positionierungen, sondern auch die Entwicklung von konstruktionstechnischen Lösungsverfahren. In einem laufenden Projekt soll eine Orgel des im 17. Jahrhundert tätigen Orgelbauers Nicolaus Manderscheidt als Truhenorgel nachgebaut werden. Aufgrund des beschränkten Raums stellt uns die Anordnung der Orgelpfeifen im Inneren der Truhe vor große Herausforderungen. Um Beschädigungen und Mehrarbeit zu vermeiden, führen wir die Überlegungen und Tests zur Positionierung der Pfeifen zunächst an einem Digitalisat durch. Hierzu haben wir die Innenseiten der Truhe und die relevanten Pfeifen in ihren festgelegten Anordnungsgruppen digitalisiert; auf eine Digitalisierung der für die aktuelle Fragestellung nicht relevanten Außenflächen und eine Texturierung haben wir verzichtet. Die Digitalisate (*Abb. 5*) lassen sich im Computer nach Belieben verschieben und anordnen. Da ihre Maße mit der genannten Genauigkeit mit den Originalen übereinstimmen, lassen sich so verschiedene Varianten der Positionierung und Anordnung testen, bis die bestmögliche Lösung gefunden ist. Diese wird dann auch handwerklich beim Nachbau umgesetzt. Bei einer Dämpfung eines Hammerflügels von Gregor Deiß aus der Zeit um 1815 lässt sich auf ähnliche Weise überprüfen, ob sich wiederholende Einzelteile aus einer nach Fertigstellung zerschnittenen Leiste gefertigt wurden, indem wir sie im Digitalisat isolieren und aneinanderlegen.

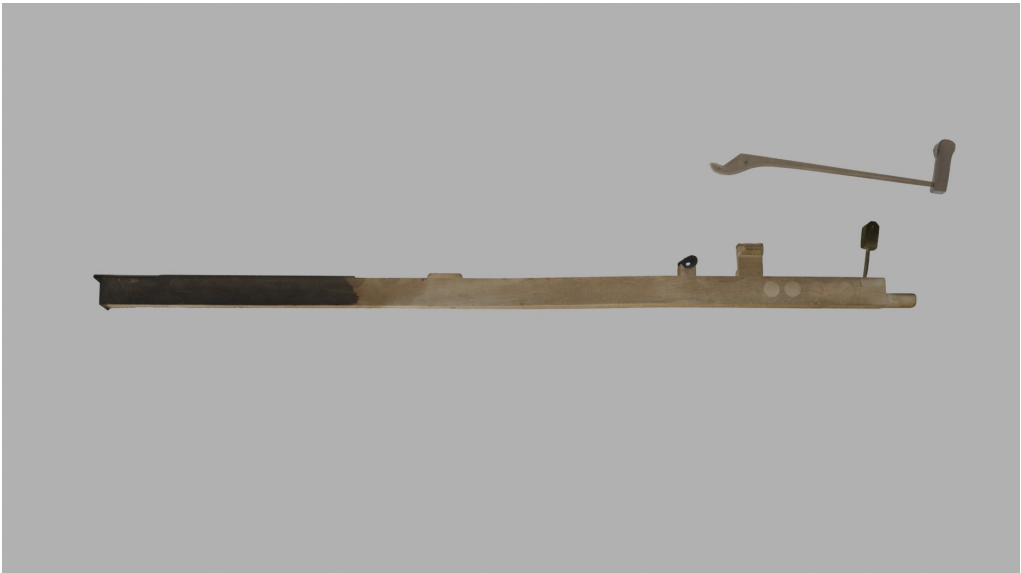
Die hohe Präzision des Artec Space Spider ermöglicht uns das Digitalisieren und

Auswerten einzelner Bauteile und die Dokumentation und Analyse von Arbeitsspuren und Konstruktionsansätzen (vgl. auch LEVOY U. A. 2023; BOGACZ U. A. 2019a; BOGACZ U. A. 2019b). Auf der Seitenfläche des 3D-Scans einer Taste eines Hammerflügels von Gregor Deiß (*Abb. 6*) werden die Sägespuren, die bei seiner Fertigung entstanden sind, deutlich erkennbar. Das gleiche gilt für die Verbindungsspuren der Elemente der Hammerkapsel, den Übergang zum Filz auf dem Hammerkopf, die Achse des Hammerstiels und viele weitere Details. Beim Gesamtscan einer Dämpfung (*Abb. 7*) lassen sich Verlauf und Länge kurzer, dünner Drähte vermessen. Diese deutlich kleineren 3D-Modelle können ohne allzu großen Rechenaufwand und ohne vorherige Dezimierung der Messdaten texturiert werden – ein großer Gewinn, da uns die Textur in einigen Fällen dabei helfen kann, zusätzliche Informationen über die Konstruktion und kulturgeschichtliche Einordnung der Bauteile und Instrumente zu erfassen und digital zu archivieren. Die Länge des Farbauftrags auf der Taste (*Abb. 6*) beispielsweise lässt sich nur dem texturierten 3D-Scanmodell entnehmen; im Geometrie-Modell fehlt diese Information. Das gleiche gilt für die Spuren von Wasserschäden, Leimreste, verlaufene oder getropfte Farbspuren und kulturhistorisch relevanten Informationen wie der Signatur des Instrumentenbauers, die wichtige Informationen über den Schaffer, den Herstellungsort und die Fertigungszeit enthält.

Trotz der hohen Qualität der Artec Scanner kann es vorkommen, dass weder die Leistungsfähigkeit der 3D-Scansensoren noch die der in ihnen verbauten Texturkameras alle konstruktionstechnisch relevanten Details erfassen kann. Dies gilt beispielsweise für die beiden Schichten des zweilagig angebrachten Leders auf dem Hammerkopf. Soll auf eine Auftei-



*Abb. 5: Truhe und Pfeifen des Nachbaus der Manderscheidt-Orgel. – Chest and pipes of the replica of the Manderscheidt organ.*



*Abb. 6: Taste eines Hammerflügels von G. Deiß. – Key of a fortepiano by G. Deiß.*

lung der Informationen in mehrere Dateien verzichtet werden, können mit einem externen Kamerasystem aufgenommene Digitalphotographien mit hoher Auflösung mit den Daten des 3D-Scanners in Verbindung gebracht und auf das 3D-Modell aufgebracht („gemappt“, *Abb. 8*) werden. So werden alle relevanten Informationen in einer einzelnen Datei gebündelt und können für die messtechnische Auswertung genutzt werden.

Neben den bereits geschilderten Messverfahren können hierbei auch andere Auswertungsstrategien zur Anwendung kommen, die es uns erlauben, konstruktionstechnische Fragen zu verfolgen und zu beantworten. Bei einem originalen Pfeifenstock der bereits erwähnten Manderscheidt-Orgel (*Abb. 9*) sind einige der Luftkanäle auf einer Seite noch von der ursprünglichen, die Kanäle luftdicht verschließenden Papierschicht bedeckt. Bei einigen Bohrungen lässt die hohe Präzision des Artec Space Spider die verdeckten Öffnungen bereits im Geometrie-Modell erkennen, da der Scanner die leichte Vertiefung der Papierabdeckung an dieser Stelle erfassen kann. Bei den übrigen Stellen benötigen wir einen alternativen Lösungsweg. Ausgehend von der sichtbaren Öffnung auf der anderen Seite können wir aus den Seitenwänden der Bohrung einen Zylinder erstellen und anschließend verlängern. So kann der Austrittspunkt der Bohrung auf der verdeckten Seite präzise bestimmt werden.

Alle diese Messungen und Analysen lassen sich durchführen, ohne die Originale dem Risiko von Beschädigungen auszusetzen, ohne Material und Arbeitszeit für Tests zu verlieren, oder zum Zeitpunkt der Messung direkten Zugriff auf die Originalteile zu haben – eine enorme Erleichterung für die Beantwortung von Fragen, die erst nach der Datenaufnahme und während des Arbeitsprozesses entstehen.

Weitere Lösungswege zur Vermessung und Auswertung der 3D-Modelle lassen sich durch andere Softwares angehen; langfristig geplant ist die Entwicklung einer eigenen Software, die auf die messtechnische Auswertung von 3D-Modellen für handwerkliche Verfahren und wissenschaftliche Analysen hin optimiert ist. Das 3D-Scanning erweist sich so als sehr sinnvolles und vielfältig einsetzbares Hilfsmittel bei der Rekonstruktion von Arbeitsprozessen, dem experimentellen Nachbau und der wissenschaftlichen Dokumentation, Archivierung und kritischen Würdigung.

### **Die Innenkonstruktion**

Für die Erfassung der Innenraumkonstruktion der Hammerflügel lässt sich 3D-Scanning trotz aller Optimierungen nicht anwenden, da die Scanner schlicht zu groß sind, um in den zumeist nur durch wenige kleine Öffnungen zugänglichen Innenraum eingebracht werden zu können. Hier gilt es, nach alternativen Wegen zu suchen, um die manuelle Auswertung konventioneller bildgebender Verfahren wie Röntgen und Endoskop- bzw. Videoskop-Aufnahmen zu ergänzen. Unser Ziel ist auch bei diesem aktuell noch laufenden Projekt eine Effizienzsteigerung bei der Vermessung der Innenkonstruktion. Die Anforderungen und Wünsche an die 3D-Digitalisate sind klar umrissen und aus den konventionellen Verfahrensweisen abgeleitet. Um Maße aus Röntgen- und Endoskop-Aufnahmen entnehmen zu können, muss ein Referenzmaß mit bekannter Länge in jedem ausgewerteten Bild fassbar sein. Die Einbringung eines derartigen Referenzmaßes in den Innenraum kann sich schwierig gestalten und ist mit Beschädigungsrisiken verbunden. Da eine bekannte Länge in jedem ausgewerteten Bild vorhanden sein muss, muss das Referenzmaß gemeinsam mit dem Endoskop im Innenraum des Instruments

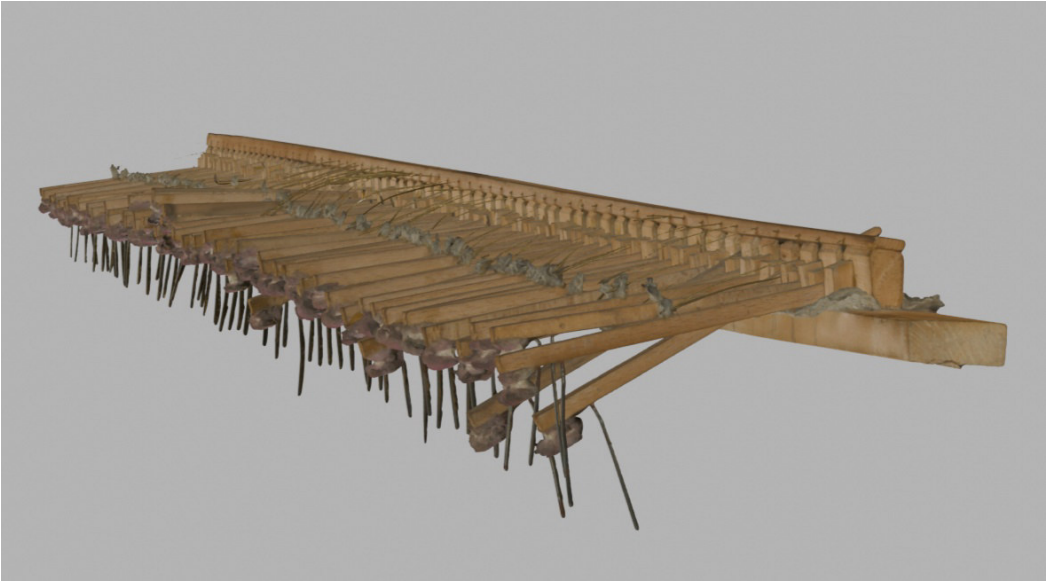


Abb. 7: Digitalisat einer Dämpfung. – Digitalisation of a damper.



Abb. 8: Digitalphotographie eines Hammerkopfes. – Digital photography of a hammer-head.



Abb. 9: Pfeifenstock der Manderscheidt-Orgel. – Upper board of the Manderscheidt organ.

bewegt werden, womit sich das Risiko weiter erhöht. Extrapolationen durch den Transfer bereits berechneter Längen aus anderen Bildern mit Überlappungsbereichen bringen das hohe Risikopotential mit sich, dass sich eventuelle Rechenfehler und Rundungen durch die Auswertungen aller Bilder fortsetzen, ohne dass dies auf den ersten Blick und ohne Gegenkontrolle ersichtlich wäre. Hinzu kommt das Problem, dass die Elemente der Innenkonstruktion (Rasten, Streben etc.) zur Längenbestimmung vollständig mit klar umrissenen Kanten im Bild zu sehen sein müssen – eine hohe, oftmals leider zu hohe Herausforderung selbst für die leistungsfähigsten Endoskope bzw. Videoskope. Aufgrund dieser Schwierigkeiten ist die Innenraumvermessung mit einem hohen Zeitaufwand und mathematischen und messtechnischen Schwierigkeiten verbunden, von denen einige umgangen werden könnten, wenn es möglich wäre, mehrere Aufnahmen aus dem Innenraum algorithmisch miteinander zu räumlich messbaren Modellen zu verbinden. Diese Beschreibung führt uns zu einem klassi-

schen Aufgabenbereich der Photogrammetrie, der Berechnung von Raumdaten aus Photographien.

Benötigt werden zur Ausführung der Berechnungen hohe Zahlen an systematisch aus verschiedenen Kamerapositionen aufgenommenen Bildern mit einem Überlappungsbereich von mindestens 70 %, sodass jeder Bildpunkt auf mehreren Aufnahmen zu sehen ist. Äußerst hilfreich für die Durchführung ist zudem eine hohe Tiefenschärfe.

Dieses Anforderungsprofil liefert uns die Rahmenbedingungen unserer Verfahrensentwicklung. Die einzige Kameraart, die uns für die Aufnahmen aus dem Instrumenteninnenraum zur Verfügung steht, sind Endoskop- bzw. Videoskop-Kameras mit den zugehörigen Objektiven. Zur Ausstattung des Instituts gehört ein IPLEX NX Videoskop der Firma Evident/Olympus, dessen technische Neuerungen die Durchführung unseres Vorhabens ermöglichen. Das Videoskop selbst bringt zwei Stereo-Objektive mit sich,

durch die Messaufnahmen ohne Referenzmedien nach dem photogrammetrischen Prinzip innerhalb einer einzigen Capture möglich sind. Allerdings ist das Bildfeld dieser Stereo-Objektive vergleichsweise klein, sodass sich die Gesamtlänge der Streben und Rasten (wenn überhaupt) nur in einzelnen Glücksfällen und mit einer nicht zu vernachlässigenden Unschärfe und Objektivverzerrung an den Bildrändern erfassen lässt. Für kurze Strecken bieten die Stereo-Messobjektive daher zwar eine deutliche Erleichterung der Arbeitsabläufe; das gesamte Anforderungsprofil vermögen sie aber nicht zu erfüllen. Das gleiche gilt für die zugehörige Software, die die Extrapolation von Referenzmaßen unter Einbeziehung der Objektivkorrektur und damit zumindest eine Auswertung der wenigen geeigneten Aufnahmen ermöglicht.

Allerdings zeichnet sich das IPLEX NX nicht nur durch seine Messobjektive aus, sondern auch durch seine für ein Videoskop überraschend hohe Bildschärfe und -qualität. Diese ermöglicht es uns, die Aufnahmen des Videoscops für photogrammetrische Berechnungen heranzuziehen. Da der ‚Ausschuss‘ an nicht verarbeitbaren Bildern aufgrund der trotz aller Optimierungen weiterhin vorhandenen Bildunschärfe hoch ist, generieren wir die Bilder für die photogrammetrischen Berechnungen mittels Video-Aufnahmen. Bei einer ruhigen, gleichmäßigen Führung des Videoskop-Schlauchs ergibt sich hierbei zwar ein zumindest annähernd systematischer Aufbau der Bildfolge. Trotzdem erreicht der Grad der Systematik nicht einmal annähernd den einer Datenaufnahme eines freistehenden Objekts. Durch die limitierte Zugänglichkeit müssen wir diese Einschränkung als Voraussetzung akzeptieren und mit ihr arbeiten.

Erste Tests haben ergeben, dass Reality-Capture, eine der marktführenden Photo-

grammetrie-Softwares, sehr gut in der Lage ist, die räumliche Struktur der Bereiche zwischen den Rasten, die den Innenraum maßgeblich untergliedern, zu errechnen (Abb. 10). Probleme ergeben sich bei den Übergängen über die Rasten, da aufgrund der Höhenbeschränkung der Kamerapositionen durch den Resonanzboden kaum Aufnahmen möglich sind, auf denen signifikante Stellen zweier benachbarter Bereiche gleichzeitig deutlich erkennbar sind. Die Größe und Qualität der Überlappungsbereiche zwischen diesen ‚Innenkompartimenten‘ sind also stark beschränkt. Die Lösung dieser Problematik führt über zwei Faktoren: zum einen kann die Bildmenge weiter erhöht werden, wobei bei der Aufnahme der Versuch unternommen werden sollte, auch schwer erreichbare Kamerapositionen direkt unter dem Resonanzboden und oberhalb der Rasten einzunehmen. Zum anderen können sorgsam gesetzte Kontrollpunkte dabei helfen, die Bereiche miteinander zu verbinden. Erste Versuche in dem laufenden Projekt deuten in Richtung eines vergleichsweise hohen Aufwands zum Setzen dieser Kontrollpunkte, da Punkte in unscharfen Hintergrundbereichen zu Fehlberechnungen der Raumstruktur führen können. Daher gilt es, beim Zusammenführen der Modellkomponenten schrittweise vorzugehen und jeden neuen Berechnungsschritt auf seine Plausibilität hin zu überprüfen.

Die Methodenentwicklung zur Videoskop-Photogrammetrie ist ein laufendes Projekt, sodass wir an dieser Stelle noch keine abschließenden Ergebnisse oder Schlussfolgerungen präsentieren möchten. Nach aktuellem Stand scheint es sich abzuzeichnen, dass eine Kombination aus der photogrammetrischen Lösung und dem konventionellen Ansatz am effizientesten zu den gewünschten Resultaten, nämlich der Entnahme von Messstrecken (nicht der Erstellung eines 3D-

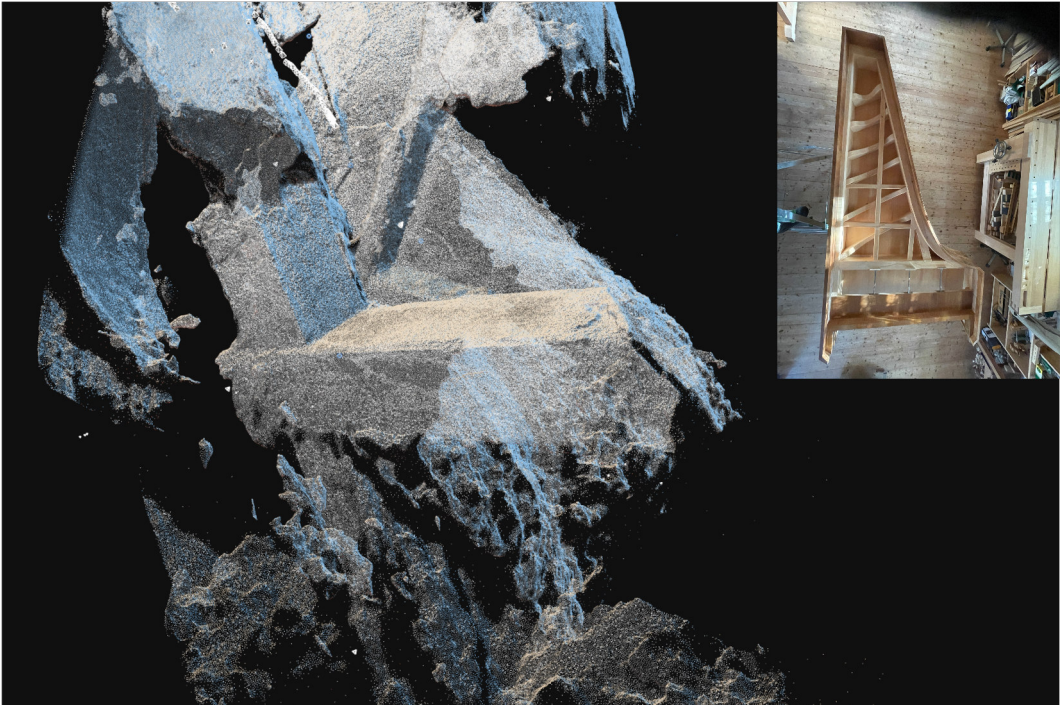


Abb. 10: Punktwolke einer photogrammetrischen Teilrekonstruktion eines Innenraums. Offener Nachbau und Endoskop-Aufnahme. – Point cloud of a photogrammetric partial reconstruction of an interior. Open replica and endoscope image.

Modells des Innenraums!) führt. Photogrammetrische Modelle der Innenraumkompartimente lassen sich mit Erfahrung vergleichsweise leicht erstellen. Das Einbringen eines Referenzmediums ist durch die Video-Funktion mit Erfahrung ebenfalls unproblematisch. Somit lassen sich alle in den 3D-Teilmodellen sichtbaren Bauteile leicht und mit geringem Aufwand digital vermessen; die Ergebnisse können anschließend ebenfalls leicht zusammengeführt werden. Durch diesen Weg kann auf das mühsame und zeitaufwändige Zusammenfügen der Kompartimente verzichtet werden, ohne dass der gewünschte Erkenntnisgewinn leidet. Weitere Tests und Experimente werden zeigen, ob sich diese Vermutung bewahrheiten wird und ob sich die Videoskop-Photogrammetrie als praktikables und effizientes Werkzeug zur messtechnischen Erfassung von Innenräumen erweisen wird, wie es sich

nach aktuellem Stand abzeichnet. Innenräume ohne oder mit deutlich schwächer ausgeprägter Binnenuntergliederung sollten mit dem Verfahren problemlos räumlich erfass- und messbar sein.

### Fazit

Beschränkt man 3D-Digitalisierungstechnologien nicht auf Visualisierungsstrategien, sondern versteht sie als wertvolles Untersuchungswerkzeug, können sie den Arbeitsalltag von Experimentalarchäologen erheblich erleichtern. Bei richtiger Anwendung lassen sich mit bloßem Auge kaum sichtbare Spuren früherer Werkprozesse sichtbar machen und analysieren! Objekte können vermessen, analysiert, digital rekonstruiert und untersucht werden, ohne sie Beschädigungsrisiken auszusetzen. Durch synchrone und diachrone Vergleiche mehrerer Digitalisate

desselben oder verschiedener Objekte lassen sich Qualitätskontrollen durchführen und Veränderungen an den Objekten analysieren. Die Datenaufnahme geschieht berührungs- und zerstörungsfrei und erfüllt damit alle konservatorischen Anforderungen. Die Leistungsfähigkeit aktueller Hochleistungsscanner ermöglicht die Digitalisierung kleinster und größter Objekte mit einer wiederholbaren Genauigkeit bis in den Zehntelmillimeterbereich, was den Ansprüchen der meisten handwerklichen Verfahren gerecht wird. Je nach Wunsch lassen sich die Mess- und Analysedaten während der Arbeit nach konkretem Bedarf direkt aus dem 3D-Modell entnehmen oder in eigenen Arbeitsschritten zu Plänen und Datentabellen verarbeiten, die dann die Grundlage für die handwerkliche Arbeit bilden können. Unsere nächste Weiterentwicklung ist auf die Erstellung von Bauplänen und Schablonen aus den 3D-Digitalisaten ausgerichtet, für deren Nutzung die gewohnte handwerkliche Arbeitsweise nicht an alternative Messverfahren angepasst werden muss.

Werden die 3D-Digitalisierungstechniken als Hilfsmittel zur Beantwortung konkreter Fragen und zur Lösung spezifischer Aufgaben- und Problemstellungen herangezogen, kann sich ihr Potential voll entfalten. Die Anforderungen experimentalarchäologischer Forschung und handwerklicher Arbeit fordern die 3D-Digitalisierungstechnologien dazu heraus, ihre Grenzen immer weiter auszureizen und bisher unbekannte Anwendungs- und Lösungsstrategien zu entwickeln, die später auch für andere Fragestellungen herangezogen werden können. Umgekehrt bieten die Möglichkeiten der 3D-Digitalisierung der Forschung und dem Handwerk einzigartige Dokumentations- und Analysestrategien, die ihre Arbeit erleichtern und weiter befördern können. Digitalisierung und Handwerk, innovative und tradi-

tionelle archäologische Forschung gehen Hand in Hand und treiben sich gegenseitig zu Höchstleistungen an – ein für beide Seiten gewinnbringendes Zusammenspiel mit viel Potential für die Experimentalarchäologie der Zukunft.

## Literatur

**BALK, H., MADELUNG, M. 2025:** Vom Handwerk zur Musik und zurück – Forschungsnachbauten eines Hammerflügels von J. A. Stein (um 1780) und ihre klangliche Wiederbelebung. Experimentelle Archäologie in Europa 24. Jahrbuch 2025, 139-158.

**BOGACZ, B., U. A. 2019a:** Recovering and Visualizing Deformation in 3D Aegean Sealings. In: Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications, VISIG-RAPP 2019, 4. Cham 2019, 457-466.

**BOGACZ, B., U. A. 2019b:** Quantifying Deformation in Aegean Sealing Practices. In: Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications. 14th International Joint Conference. Cham 2019, 589-609.

**BOSCHE, S., U. A. [im Erscheinungsvorgang]:** Artec Leo Meets Anton Walter. Die Digitalisierung eines Hammerflügels mit dem 3D-Scanner Artec Leo [im Erscheinungsvorgang].

**HOSTETTLER, M., U. A. 2024:** The 3 Dimensions of Digitalised Archaeology. State-of-the-Art, Data Management and Current Challenges in Archaeological 3D-Documentation. Cham 2024.

**LE CONTE, S., U. A. 2016:** Bringing Back Historical Instruments to Playing Conditions: Measuring Changes. In: M. Kaliske u. a. (Hrsg.), Analysis and Characterisation of Wooden Cultural Heritage by Scientific Engineering Methods. Proceedings for the International Symposium 28.-29. April 2016, Stiftung Händel-Haus Halle. Dresden 2016, 117-122.

**LEVOY, M., U. A. 2023:** The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues. In: Seminal Graphics Papers: Pushing the Boundaries 2. New York 2023. <<https://doi.org/10.1145/3596711.3596733>>.

**MEANS, B. K., U. A. 2016:** Virtual Mobility Archaeology Project with Further Applications of Three Dimensional Digital Scanning of Archaeological Objects. Richmond 2016.

**MÜNSTER, S., U. A. 2016:** 3D Research Challenges in Cultural Heritage II. How to Manage Data and Knowledge Related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage, Lecture Notes in Computer Science 10025. Cham 2016.

### **Abbildungsnachweis**

Abb. 1-10: © GIMK

### **Autorin**

Susanne Bosche  
DiAuViS / Greifenberger Institut für  
Musikinstrumentenkunde  
Wasengrund 3  
68239 Mannheim  
Deutschland  
[susanne.bosche@diauvis.com](mailto:susanne.bosche@diauvis.com)