

Peter Kozub

Anwendung der 3D-Technologie in der Steinrestaurierung

(Der Text basiert auf dem Artikel: Kozub, Peter: Przykłady zastosowania 3D-modeli w konserwacji i restauracji obiektów kamiennych." (Application of 3D-Models in the Conservation and Restoration of Stone Object). In: *Dziedzictwo rzemiosła artystycznego – tradycyjne techniki oraz nowoczesna konserwacja i restauracja*, Tom 1. Hg. Piotr Niemcewicz, Marta Chylińska. Toruń: Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 2020, S. 89-100. Dieser Artikel wurde von dem Autor übersetzt sowie geringfügig geändert und ergänzt.)

Scans mit den Handscanner Spider Space und Eva von Artec3D, 3D-Modell Erstellung mit der Software Artec Studio 13-15 derselben Firma, Bildbearbeitung 2D-Bilder CorelDRAW Graphics Suite X8, 3D-Schadenskartierung mit metigoMAP 5.0 3D von focus, Bearbeitung des 3D-Modells und Simulationen und Animationen mit blender 4.0, 3D-Druck mit Ton-Drucker delta wasp 40100 clay der Firma WASP.

Alle hier gezeigte Beispiele der Anwendung der 3D-Technologie wurden von den Studierenden und Mitarbeitern der Spezialisierung **Konservierung und Restaurierung von Kulturgut aus Stein**, CICS, TH Köln realisiert.

ABSTRAKT

3D-Modelle von Kunst- und Kulturwerken werden in der Konservierung und Restaurierung auf sehr unterschiedliche Weise eingesetzt. Neben häufigen Anwendungen zur Dokumentation der Geometrie und Textur des Objekts und seines Erhaltungszustands können sie verwendet werden, um den Verlauf destruktiver Prozesse zu untersuchen, alternative Rekonstruktionen fehlender Elemente zu entwickeln oder die Polychromie zu rekonstruieren und zu visualisieren. Sie ermöglichen das Kopieren auch von Objekten mit empfindlicher Oberfläche, sie sind hilfreich bei der Entwicklung von Konservierungsarbeiten, der Überprüfung der Objektstatik, der Visualisierung der Untersuchungsergebnisse und bei der Erstellung neu entwickelter Museumskonzepten.

Die Arbeit präsentiert einige Beispiele für die Verwendung dreidimensionaler digitaler Modelle von Kunst- und Kulturobjekte aus der Restaurierungspraxis.

Schlüsselwörter: 3D-Technologie, digitale Modelle, Konservierung und Restaurierung von Objekten aus Stein

ABSTRACT

3D-models of monuments are used for conservation and restoration in very different ways. In addition to frequent applications for documentation of the geometry and texture of the object and its state of preservation, they can be used to study the course of destructive processes, to develop alternative reconstructions of missing elements, or to reconstruct and visualize polychrome. They can also be used to make copies of objects with sensitive surfaces, to assist in the development of conservation work, to verify the statics of objects, to visualize the results of various types of research, and to prepare newly developed museal conception.

The paper presents several examples of the use of three-dimensional digital models of historic objects in conservation practice.

Keywords: 3D technology, digital models, stone conservation

EINFÜHRUNG

Die 3D Erfassung von Kunstobjekten nimmt immer wichtigere Rolle in der Konservierung und Restaurierung an. Durch die enorme Entwicklung im digitalen Bereich in letzter Zeit bietet die 3D-

Technologie inzwischen neben der bereits seit einigen Jahren in der Konservierung angewandte Aufbereitung von Objektdarstellungen für die Dokumentation vielfältigste Möglichkeiten für die kunstwissenschaftliche Forschung, den wissenschaftlichen Austausch, Planung und Durchführung von Restaurierungsarbeiten und nicht zuletzt für die Vermittlung der Informationen über die restauratorische Bearbeitungsprozesse an die Öffentlichkeit.

Dem Anwender steht dafür eine Vielzahl von Methoden und Geräten zur Verfügung. Zahlreichen Technologien zur Erzeugung von 3D-Modellen (3D-Handscanner, Structured Light Scanning (Streifenlichtscanning), Laserscanning oder Structure from Motion-Verfahren (Photogrammetrie)) gewähren präzisen Geometrien bei unterschiedlichen Dimensionen und erlauben hochqualitative Texturen auch bei problematischen Objekten. Eine inzwischen kaum noch zu überblickende Vielfalt von Computerprogrammen mit diversen Funktionen zur Bearbeitung von 3D-Modellen ermöglicht bis dato ungeahnte Anwendungen. Die Modellierung der dreidimensionalen Objekte wird durch die Entwicklung von haptischen Eingabegeräten enorm erleichtert. Eine große Vielfalt von Vervielfältigungstechnologien lässt die Herstellung von Objekten aus verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften zu. Diese Vielfalt der technischen Möglichkeiten induziert naturgemäß eine Vielfalt der möglichen Anwendungen (**Abb. 1**).

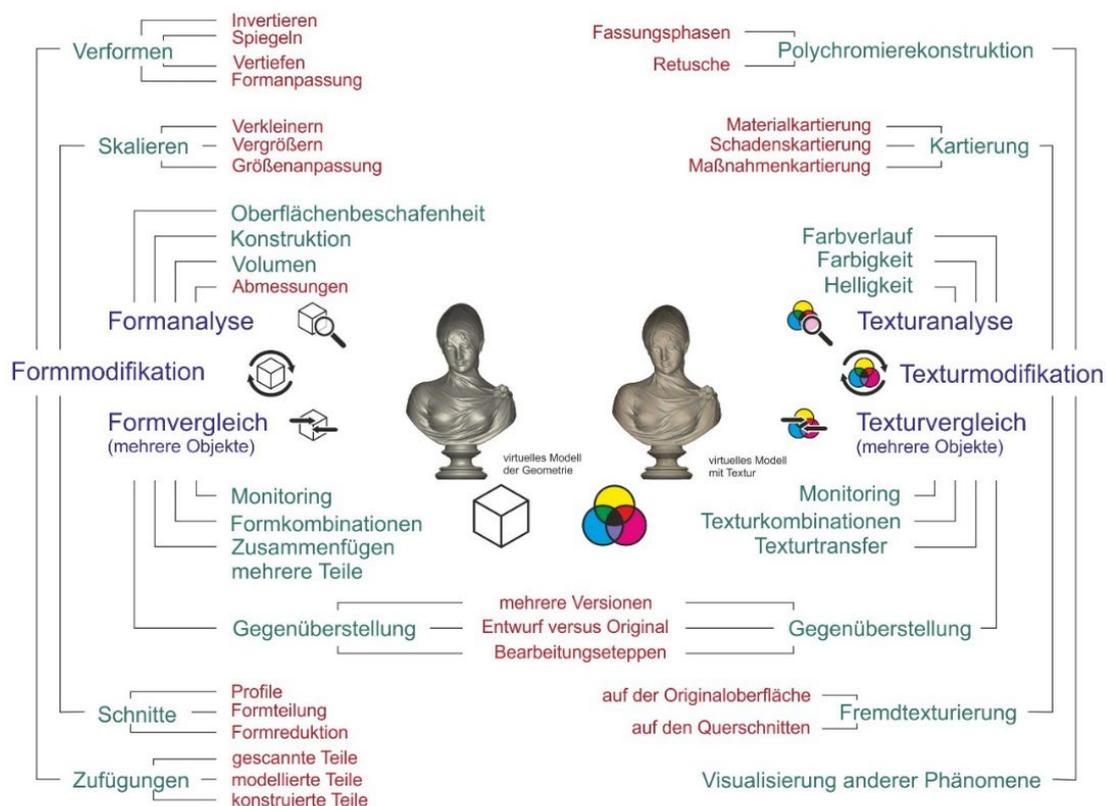


Abb. 1 Schematische Darstellung der Anwendungsmöglichkeiten der 3D-Technologie in der Steinrestaurierung.
©TH Köln - CICS - Peter Kozub

ANWENDUNG DER 3D-MODELLE IN DER STEINRESTAURIERUNG

Durch die berührungslose Erfassung der Objekte und virtuelle Darstellung aber auch durch die Erstellung von physischen Modellen aus den Digitalisaten lassen sich viele restauratorische Arbeitsschritte, die normalerweise das Original beanspruchen wurden, vermeiden bzw. behutsamer durchführen. Die Ziele der Datenerfassung und Bearbeitung können sehr unterschiedlich sein.

Unabhängig davon, wie die Daten generiert bzw. bearbeitet wurden. Die Bandbreite der Anwendungen ist enorm. Der Beitrag bittet lediglich einen Überblick über die gegenwärtigen Anwendungsmöglichkeiten in der Steinrestaurierung.

1. Dokumentation und Visualisierung des Zustandes

In der „klassischen“ Anwendung dieser Technologien werden die 3D-Modelle für dokumentarische Zwecke verwendet. Hier wird per se die Dreidimensionalität der Artefakte erfasst. Dabei werden die gegenwärtige Geometrie und Farbigkeit festgehalten. Die berührungslose Digitalisierung ermöglicht eine sorgfältige Erfassung der Formen und Farbigkeit auch bei fragilen Objekten mit empfindlichen Oberflächen. Zahlreiche, speziell für Restauratoren entwickelte Programme erlauben eine dreidimensionale und somit viel genauere und umfassende Kartierung der Bestandselemente und Schäden im Vergleich zu zweidimensionaler Ausführung (**Abb.2**). Auch die bis vor kurzem nur zweidimensional erfasste Farbigkeit kann nun dreidimensional und durch die Farbmessdaten objektiviert aus verschiedenen Blickwinkeln und unter verschiedenen Beleuchtungen dargestellt und betrachtet werden.

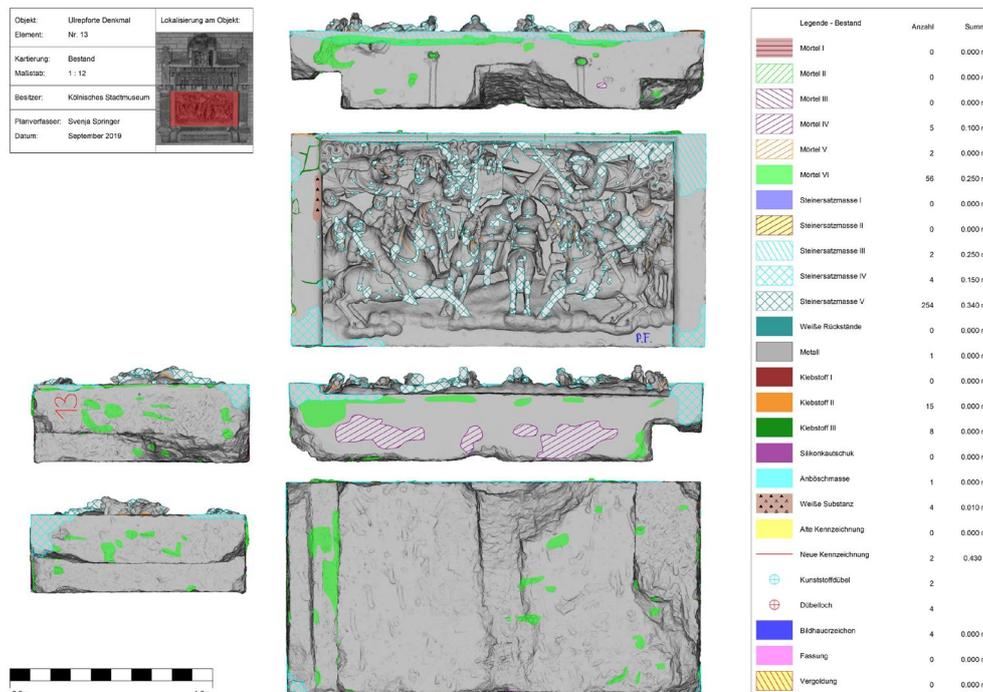


Abb. 2 Beispiel einer 3D-Schadenskartierung. Ulrepforte-Denkmal, Köln. Kampfszene-Relief, Peter Fuchs, Weiberner Tuff (Köln, 1886).

©TH Köln - CICS – Svenja Springer

In einigen Fällen wird die Geometrie und Farbigkeit in allen drei Phasen der Bearbeitung - vor, während und nach der Restaurierung - dreidimensional erfasst. Dies ermöglicht eine präzise Einschätzung der entstandenen Veränderungen (s.a. 3. Monitoring).

2. (fremd)Texturierung der Oberfläche

Bereits bei zweidimensionalen Darstellungen erfolgreich getestete virtuelle Retuschen und Farbrekonstruktionen erreichen hier eine neue Qualität. Angefangen beim Testen von Retusche-Alternativen (Vollretusche, Normalretusche, Neutralretusche, Punktretusche oder Rigatino) über

genaue Anpassung des Farbtons an die vorhandene Farbigkeit z.B. durch die Aufspaltung der Farben bei den additiven Retuschemethoden (z.B. Punktretusche, Tratteggio, astrazione und selezione cromatica) bis zu Rekonstruktion und Visualisierung der Farbigkeit in verschiedenen Zeitphasen noch im Vorfeld aller diesen Maßnahmen am Original.

Überdies ist es möglich auf die Oberfläche der 3D-Modelle eine zusätzliche Textur aufzulegen, die zusätzliche nicht direkt ablesbare Information enthält wie z.B. Materialfeuchteverteilung oder die Temperaturverteilung an der Oberfläche was die Analyse und Interpretation der Erkenntnisse erleichtert.

Die Option bei den digitalen Modellen, die Geometrie des Objektes auch ohne die Textur zu betrachten, was bei den Originalobjekten naturgemäß nicht möglich ist, liefert zusätzliche, meist eben durch die Farbigkeit verborgene Informationen über die Beschaffenheit der Oberfläche des Objektes und erleichtert oft das Erkennen von feinen Veränderungen der Oberflächengeometrie. Die Geometrie kann auch so verändert werden, dass die Informationen noch besser sichtbar werden (**Abb. 3**).

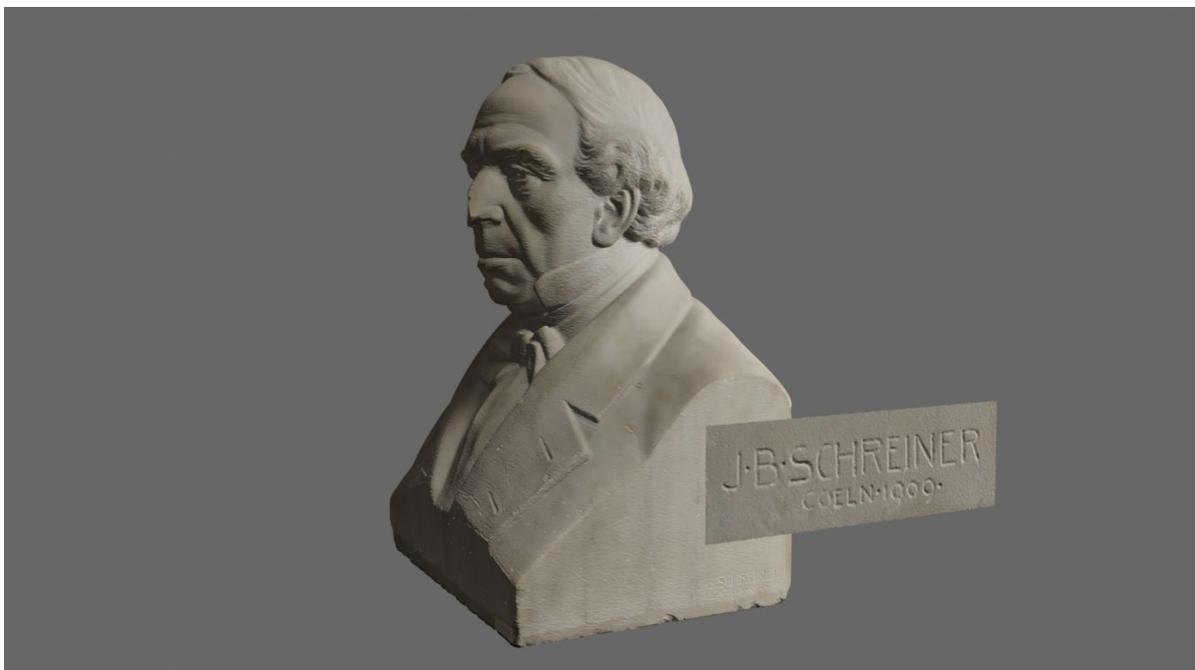


Abb. 3 Verdeutlichung der Inschrift durch Geometrieänderung und Streiflichtsimulation. Johann Baptist Schreiners Büste von Gottfried Ludolf Camphausen, Marmor (Köln, 1909).

©TH Köln - CICS – Samuel Schreiber, Peter Kozub

3. Berechnungen aus der Objektgeometrie

Je nach Digitalisierungsmethode werden 3D-Modelle in hoher Genauigkeit erreicht (z.B. beim Handscanner Spider Artec3D liegt der Abstand zwischen den erfassten Punkten bei 0,1 mm). Das erleichtert, und in vielen Fällen erst ermöglicht, eine präzise Erfassung der Dimensionen. Längen-, Flächen- und das Volumen der Teile oder des Gesamtobjektes können bequem und präzise ermittelt bzw. berechnet werden (**Abb. 4**).

Diese Kennwerte werden für verschiedene Zwecke benötigt. Auch bei komplizierten und komplexen Formen ist eine genaue Vermessung der Strecken quer durch das Artefakt oder entlang der Oberfläche (z.B. Umfang eines Querschnitts) problemlos realisierbar. Diese präzise und vor allem schnelle Erfassung der Masse wird z.B. für die Erstellung der Ultraschalltomographien genutzt (s. a. 4. Visualisierung).

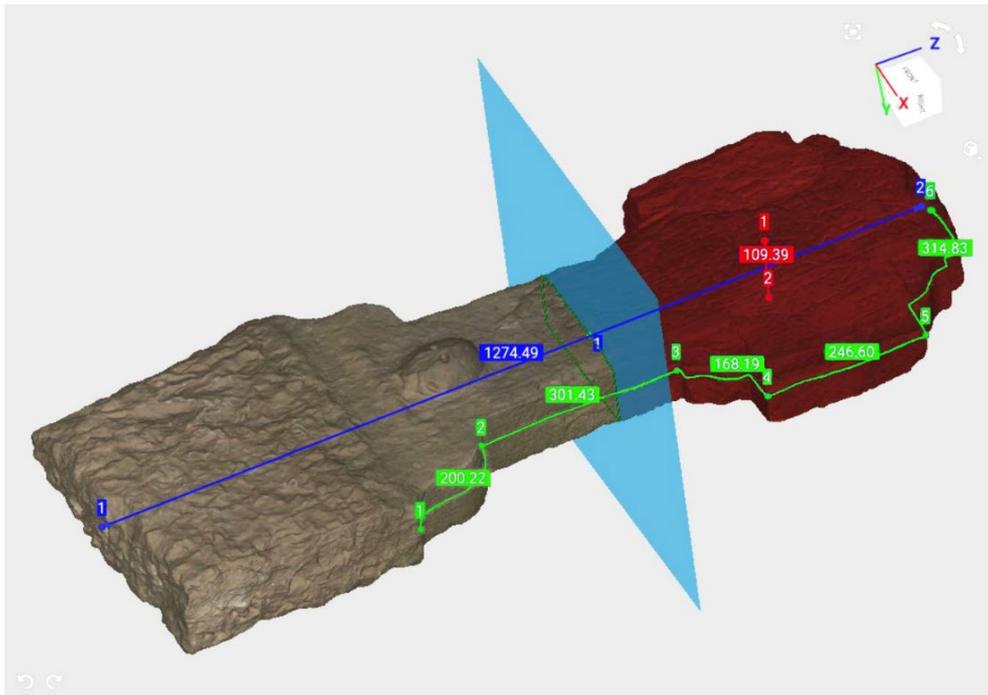


Abb. 4 Beispiel für die Erfassung der Objektdimensionen. Rheinisches Grabkreuz, Stenzelberger Latit, (Bonn, Friedhof Vilich, 1746).

©TH Köln - CICS – Alina Bußmann, Jana Lea-Marie Kraus, Quint Thibault Schulz, Peter Kozub

Die Flächen- und Volumenangaben erlauben die Berechnung von Restaurierungsmaterialmengen (z.B. im Fall einer Festigung von Steinskulpturen) und gestatten eine genaue Kalkulation der Maßnahmen durch die Erfassung der betroffenen Teilflächen (z.B. salzbelasteten Zonen). Aus den virtuell generierten Volumina kann das Gewicht des Objektes problemlos berechnet werden.

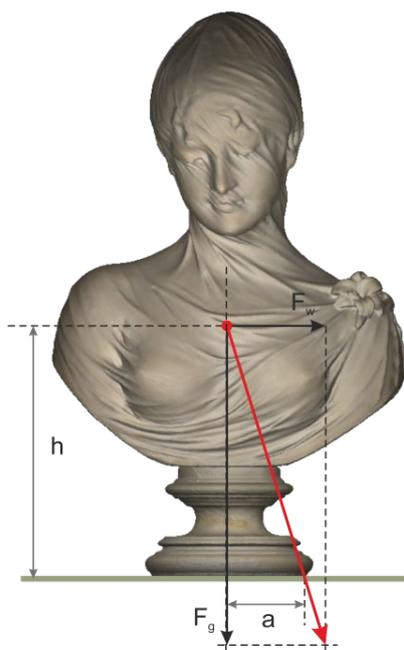


Abb. 5 Lage des Schwerpunkts und Berechnungen des Kippmomentes. Büste der Donna velata von Cesare Lapini, Carrara-Marmor und Alabaster (Florenz, 1901).

©TH Köln - CICS – Karoline Reck, Peter Kozub

Bei den berechneten Geometrien wird in den meisten 3D-Bearbeitungsprogrammen der Schwerpunkt des Objektes angezeigt. Die Lage von diesem Punkt ist sehr wichtig z.B., wenn die Objekte bewegt werden müssen und erleichtert z.B. die Transportplanung. Aus der Schwerpunktlage und den Maßen der Standfläche lässt sich der Kippmoment unproblematisch ermitteln, was z.B. bei der Einschätzung der Standsicherheit der Objekte (**Abb. 5**) oder bei der genauen Planung der Dimensionen von Armierungen hilfreich sein kann.

4. Visualisierung

Die 3D-Modelle bieten überdies verschiedene Präsentationsmöglichkeiten auch in diesem Fall ohne zusätzliche Belastung für die Originalobjekte, z.B. in den Bereichen: Dokumentation, Untersuchung, Ausstellungsplanung oder Ergebnispräsentation. Viele der Möglichkeiten sind nur dank dieser Technologie möglich.

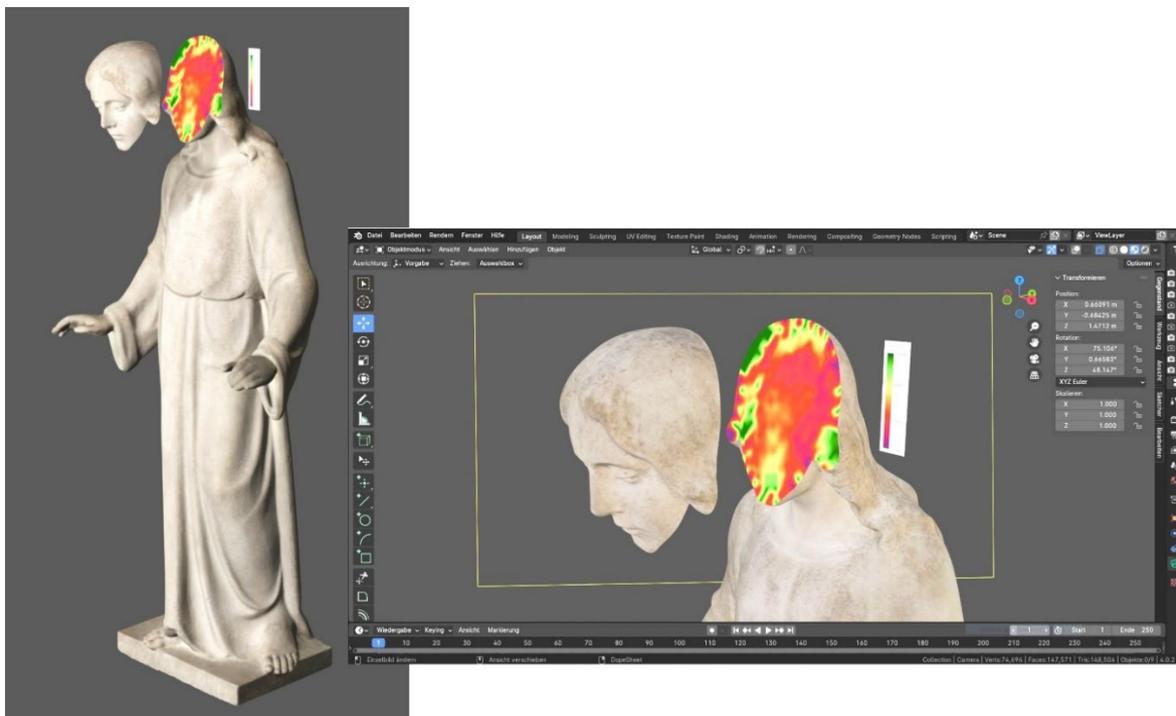


Abb. 6 Visualisierung der Ultraschalltomographiebilder. Grabstein der Familie Braun, Carrara-Marmor (Köln, Melaten-Friedhof, ca. 1900).

©TH Köln - CICS – Laura Deglmann, Rhianna Hussein-Oglu, Svenja Springer, Niklas Underwood, Peter Kozub

Der Einsatz der virtuellen Schnitte durch das Objekt und die Darstellung zusätzlicher Informationen auf den Schnittflächen veranschaulicht und verdeutlicht viele durch verschiedene Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse (z.B. die Visualisierung der Ultraschalltomographiebilder (**Abb. 6**) oder Darstellung des Steinschichtenverlaufs). Die Schnitte sind hilfreich bei der Konstruktionsanalyse, als Rekonstruktionshilfe (z.B. Profilgeometrie) (siehe auch **Abb. 4**), bei der Gestaltung von passgenauen Transportverpackungen oder bei der Planung der Dimensionen und des Verlaufs von Steinelementverbindungen. Die 3D-Technologie hilft ebenso bei der Dokumentation und Analyse von Spuren. Mit 3D-Scannern können Oberflächen hochpräzise erfasst und komplexe Spurenmuster in ihrer räumlichen Tiefe und Anordnung analysiert werden. Diese Technik ermöglicht es, Spuren nicht nur optisch zu dokumentieren, sondern auch deren Form, Verlauf und Randbeschaffenheit genau zu bestimmen. Dadurch ist es möglich, die Spuren detailliert zu interpretieren und Entscheidungen über ihre Erhaltungswürdigkeit zu treffen (**Abb. 7**).

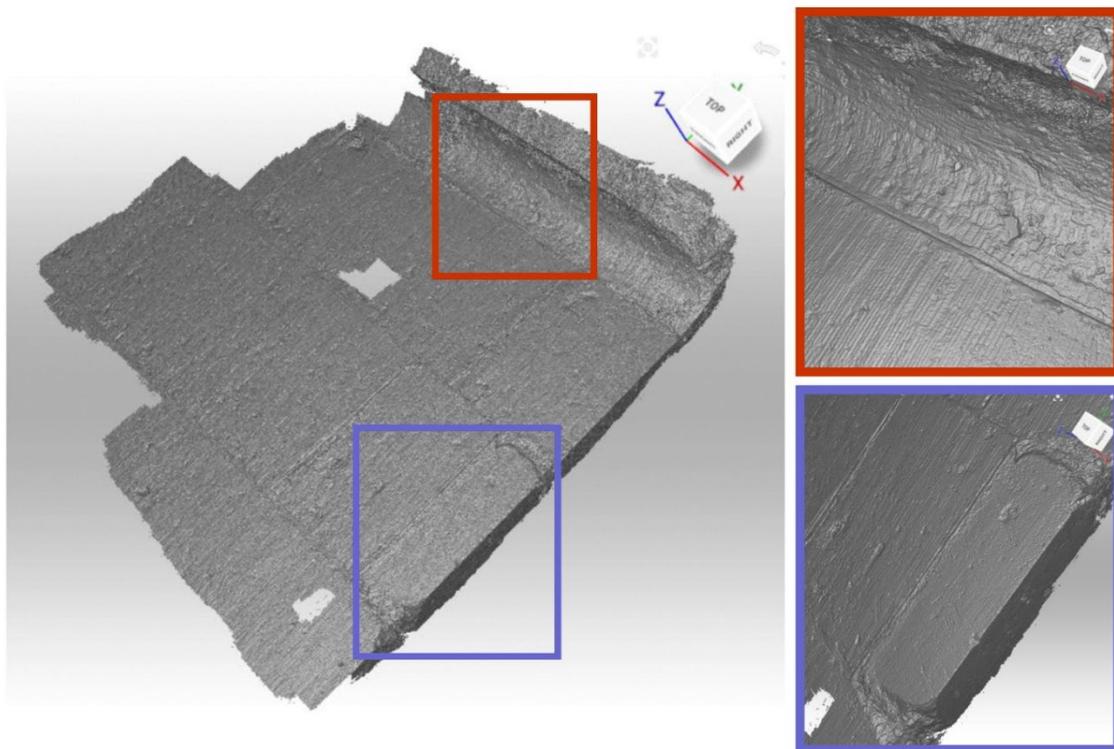


Abb. 7 Analyse der Werkzeugspuren, Mauerabschnitt mit Tropfkante der Abdachung, Chorkranzkapellen des Kölner Doms, Drachenfels-Trachyt.
©TH Köln - CICS – Tanja Pinkale

Auch die Veränderung der Position der einzelnen Teile oder ganzen Objekte und dadurch die Möglichkeit der Betrachtung aus unterschiedlichen Sichtperspektiven, Zufügung von zusätzlichen Elementen oder Simulationen von verschiedenen Objektumgebungssituationen sind gegeben.

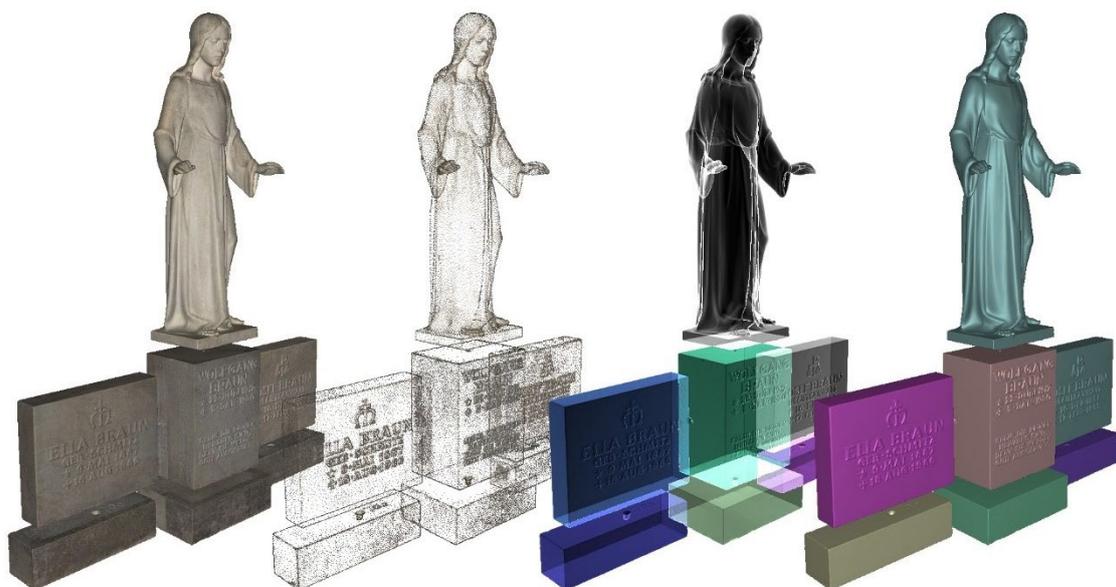


Abb. 8 Visualisierung der Grabmalkonstruktion. Grabstein der Familie Braun, Marmor (Köln, Melaten-Friedhof, ca. 1900).
©TH Köln - CICS – Laura Deglmann, Rhianna Hussein-Oglu, Svenja Springer, Niklas Underwood, Peter Kozub



Abb. 9 Virtuelles Zusammenfügen der Elemente und Szenensimulation. Ulrepforte-Denkmal, Köln. Weiberner Tuff und Udelfanger Sandstein (Köln, 1886).

©TH Köln - CICS – Svenja Springer, Peter Kozub

Verschiedene Darstellungen der 3D-Modelle oder die Kombination der virtuellen Modelle mit den technischen Zeichnungen erlaubt ein besseres Verständnis und eine genauere Einschätzung der Konstruktion und hilft sowohl bei der Planung als auch bei der Durchführung von restauratorischen Maßnahmen (**Abb. 8**).

Das wird besonders deutlich bei mehrteiligen Objekten wo die Zuordnung der einzelnen Elemente nicht einfach ist. Diese können virtuell mühelos zusammengefügt werden auch bei besonders schweren Teilen oder Teilen mit großen Dimensionen (**Abb. 9**).

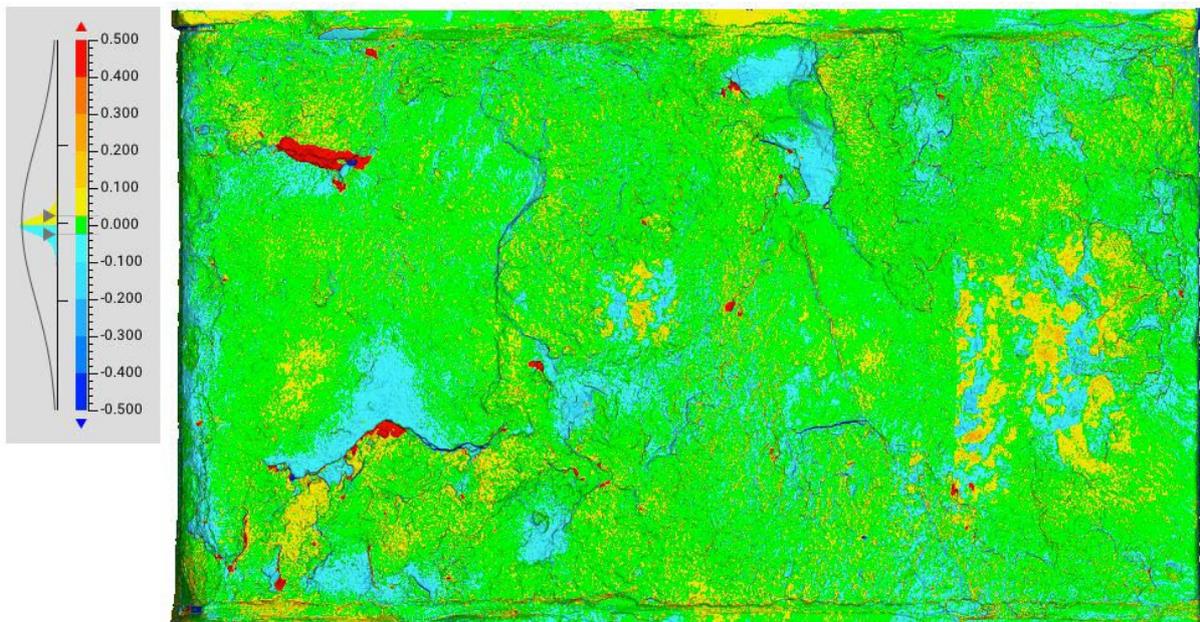


Abb. 10 Erfassung mikrotopographischer Veränderungen der Steinoberfläche. Haus Stapel in Havixbeck. Baumberger Kalksandstein.

©TH Köln - CICS – Peter Kozub

Ebenso können Fragmente, die sich an unterschiedlichen Orten befinden, z.B. in verschiedenen Museen, verglichen werden. Wobei auch genaue stilistische Vergleiche durch Aufeinanderlegen der Modelle leicht realisierbar sind. Auch die Zugehörigkeit der einzelnen Teile kann leicht überprüft werden. Das ist auch im Fall fehlender Zwischenbereiche dimensionskonform möglich. Dieses ist ohne die Originale auf die Gefahren bei dem Transport aufzusetzen durchführbar.

Virtuelle Ergänzungen, wie sie beispielsweise durch Augmented Reality (AR) oder Virtual Reality (VR) ausgeführt werden, sind aufgrund ihrer nicht-invasiven Arbeitsweise vollständig reversibel und erfüllen dieses sonst utopische restauratorische Prinzip vollständig. Diese Ergänzungen können beliebig oft durchgeführt, verändert, bei Bedarf leicht und vollständig entfernt oder durch verbesserte Versionen ersetzt werden, ohne das Original in irgendeiner Weise zu beeinträchtigen. Dabei können sogar alle zeitgebundenen Interpretationen dokumentiert werden und können bei Bedarf betrachtet werden.

Gleiches gilt für die Farbrekonstruktionen. Diese können absolut reversibel entweder direkt am Objekt mittels Projection Mapping (PM) oder virtuell mittels AR oder VR dargestellt werden.

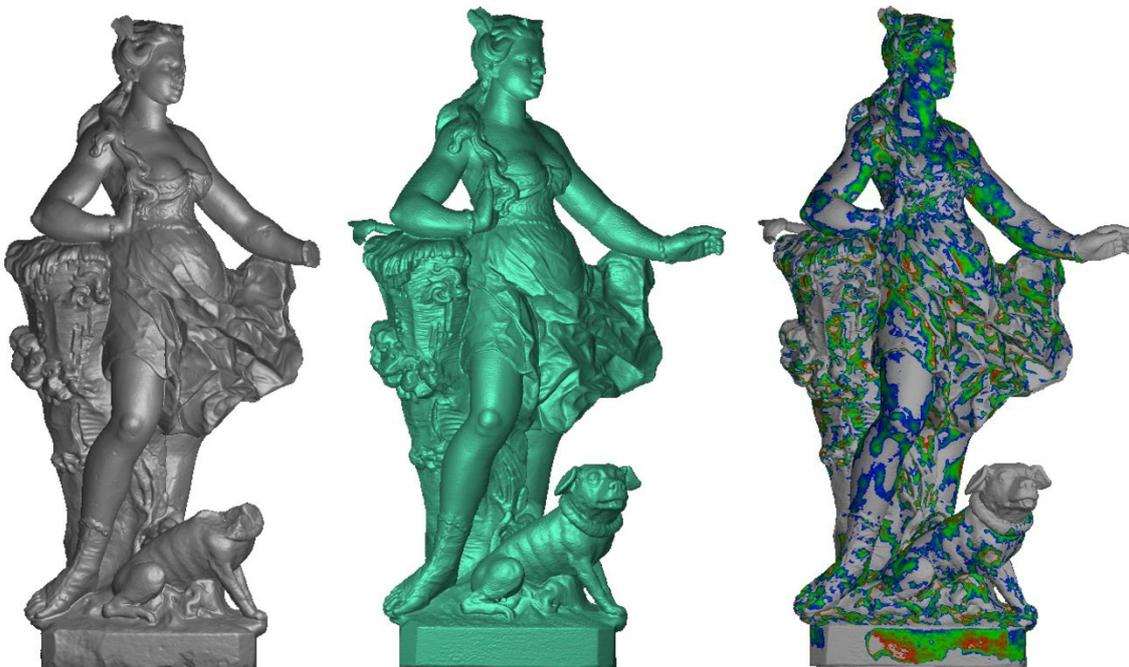


Abb. 11 Vergleich der Geometrie von virtuellen Modellen. Diana von Adam Ferdinand Tietz, Malberger Sandstein (Schloss Malberg, 18 Jh.)

©TH Köln - CICS – Lilli Beile, Maia Francx De Gelder, Filip Kozik, Jonas Schäfermeier, Peter Kozub

5. Monitoring

Die hohe Genauigkeit der 3D-Modelle erlaubt den Einsatz dieser Technologien als Monitoring-Instrument. Sowohl bei der Messung der Deformationen in der Langzeitbeobachtung durch wiederholte Aufnahme der Stellen in unterschiedlichen Zeitperioden (z.B. Rissmonitoring oder Oberflächenveränderung), bei der Betrachtung der Schadensentwicklungsprozesse (**Abb. 10**), bei der Messung der Genauigkeit von Kopien und Rekonstruktionen (**Abb. 11**), als auch bei der Messung des Materialverlustes (qualitativ und quantitativ) (**Abb. 12**).



Abb. 12 Dokumentation loser Objektteile vor dem Transport. Wappen der Familie Westerholt, Baumberger Kalksandstein (Schloss Alst bei Münster, um 1800).

©TH Köln - CICS – Lilli Beile, Filip Kozik, Peter Kozub

Die Registrierung und Auswertung der so generierten Daten ist sowohl in Verbindung mit klassisch ausgeführter Schadenskartierung (z.B. durch Flächenvergleiche bei der Entwicklung mikrobiologischer Besiedlung, Schwarzkrusten oder mit Salzen kontaminierter Bereiche) aber auch durch direkten Vergleich der Geometrien und Texturen der virtuellen Modelle aus unterschiedlichen Messkampagnen durchführbar. Dazu werden die Datensätze der Oberflächenscans aus verschiedenen Zeitpunkten übereinandergelegt und ein spezielles Programm berechnet die jeweiligen Differenzen und stellt sie in einer farbcodierten Darstellung des Modells dar.



Abb. 13 Anfertigung einer Replik im CNC-Verfahren. Gartenskulpturen von Adam Ferdinand Tietz, Malberger Sandstein, (Schloss Malberg, 18. Jh.).

©TH Köln - CICS – Lilli Beile, Maia Francx De Gelder, Filip Kozik, Jonas Schäfermeier, Peter Kozub; Malberger Schloßbote, Heft 17, S. 18.

Verschiedene 3D-Bildbearbeitungsprogrammen bieten eine Option die Oberflächenbeschaffenheit virtuell zu verstärken und dadurch die Sichtbarkeit verschiedener Elemente zu verdeutlichen. Abgesehen von den gezielten Vergleichen der gegebenen Geometrien in verschiedenen Beobachtungs- oder Bearbeitungsphasen wird dadurch z.B. die Analyse der Steinbearbeitungsspuren erleichtert. Auch die Unterscheidung zwischen den sich überlagerten Elementen ist dadurch gegeben z.B. beim Palimpsest oder architektonischen Bauritzungen.

6. Rekonstruktionen und Vervielfältigung

Die aus den digitalen 3D-Daten erstellten physischen Modelle sind mindestens so vielseitig anwendbar, wie virtuelle Modelle selbst.

Für die Herstellung von Substituten stehen sowohl eine große Auswahl von unterschiedlichen Materialien (verschiedene Kunststoffe, Kunst- und Natursteine, Metalle, Hybridstoffe, etc.) als auch verschiedene Verfahren zu Verfügung (diverse Druck- und Frästechnologien z.B. Binder Jetting (BJ), Electron Beam Melting (EBM), Fused Deposition Modeling (FDM), Fused Layer Modeling (FLM), Hybrid Processes (HP), Laser Melting (LM), Laser Sintering (LS), Material Jetting (MJ), Photopolymer Jetting (PJ), Stereolithography (SL), CNC-Fräsen).

Dabei dient der 3D-Scans als Vorlage für berührungslose Anfertigung von solchen Repliken (**Abb. 13**). So lassen sich Repliken herstellen ohne die Originalobjekte während des Prozesses bei sich zu haben und ohne die ständige Belastung am Objekt durch den Transport, Anpassung und Abnahme (**Abb. 14**).



Abb. 14 Anfertigung einer Replik im Druckverfahren. Hl. Walburga, gefasste Terrakotta (Katholische Pfarrkirche St. Walburgis, Leubsdorf/Neuwied, frühes 20. Jh.)

©TH Köln - CICS - Kathrin Bommes, Tanja Pinkale, Peter Kozub

Ebenso lassen sich in allen diesen Vervielfältigungsverfahren digital modellierte fehlende Teile anfertigen. In vielen Programmen lässt sich die berührungslose Ausarbeitung der Form der Ergänzung auf Vorlage von z.B. Bildern oder Zeichnungen leicht bewerkstelligen. Die so ausgearbeitete virtuelle Vorlage kann für reale Ergänzungen am Original dienen. Diese können sowohl in den digitalen

Verfahren hergestellt werden als auch in den traditionellen Techniken wobei die digitalen Modelle für eine steinmetzmäßige Ausarbeitung oder Gussform dienen können (**Abb. 15**).



Abb. 15 Ergänzung von Fehlstellen, Fassadenfigur von Aloysius von Gonzaga, ehemalige Jesuitenkirche St. Michael, Savonnières Kalkstein, Typ Morley (Aachen, ca. 1891-92).
©TH Köln - CICS – Jonas Schäfermeier, Peter Kozub

Ähnlich der Farbrekonstruktionen können im Vorfeld mehrerer Alternativlösungen geprüft werden ohne ständige Belastung des Originals. Die alternativen Varianten der virtuellen Rekonstruktion können dabei aus verschiedenen Perspektiven, aus unterschiedlichen Entfernungen und bei unterschiedlicher Beleuchtung betrachtet werden bevor die endgültige Entscheidung getroffen wird. Je nach verwendetem Material kann das 3D-gedruckte Teil unter UV-Licht sichtbar gemacht werden, so dass die ergänzten Teile leicht vom Original zu unterscheiden sind. Darüber hinaus lassen sich mit dieser Technologie auch Negativformen herstellen, indem die virtuellen Modelle invertiert werden.

Die in dieser Weise erzeugten Modelle können z.B. zur Herstellung von exakt an das Objekt angepasster Transport- und Aufbewahrungsverpackungen sowie Präsentationsstützkonstruktionen oder, wie bereits erwähnt, zur Herstellung von Negativ-Gussformen für eine Kopie.

Auch die Herstellung unterschiedlich skalierten Anschauungsmodellen ist in vielen Fällen sinnvoll. Vergrößerungen können zur Verdeutlichung verschiedener Phänomene dienen wie z.B. von besonderen Beschädigungen, Ritzungen oder Schriften. Kleinere Modelle sind oft sehr hilfreich bei der Transport-, Aufbau- und Ausstellungsplanung und bei der Erprobung spezieller technischer Lösungen, z.B. beim Testen von Verbindungssystemen.

RESÜMEE

Die dreidimensionale digitale Technologie entwickelte sich in den letzten Jahren immer mehr zu einem wichtigen Werkzeug in der Konservierung und Restaurierung von Steinobjekten. Ein enormer Vorteil dieser Technologie ist die absolut berührungslose Anwendung, die viele bis dato aus technischen Gründen undurchführbare Einsätze erlaubt. Der in diesem Zusammenhang implizierter äußerst behutsame Umgang mit den Originalen spricht deutlich für den Gebrauch von diesem Hilfswerkzeug in der Restaurierung. Die in dem Beitrag vorgestellten Beispiele zeigen lediglich die in dem Moment genutzten Anwendungen. Die schnelle Entwicklung in digitalem Bereich bringt aber ständig immer neue Möglichkeiten hervor.

Die 3D-Technologie muss aber in dem Restaurierungsbereich immer mit Bedacht angewendet werden. Diese Technologie ist vor allem als Hilfsmittel zu betrachten. Der Einsatz soll in erster Linie dem Schutz und der Erhaltung der originalen Kunst- und Kulturwerke dienen. Eine reine Digitalisierung der Objekte erfüllt dieser Anspruch nicht. Deswegen ist es auch entscheidend, dass die Anwendung dieser Technologie bei den restauratorischen Projekten immer von den Restauratoren begleitet werden soll.

LITERATURVERZEICHNIS

- Barta, Christian; Ulmann, Arnulf von; Herkner, Sybille: Die virtuelle Rekonstruktion mittelalterlicher Fassungen. In: *Konferenzband, Elektronische Medien & Kunst, Kultur, Historie*, 11. bis 13. Nov. 2009 in den staatlichen Museen zu Berlin am Kulturforum Potsdamer Platz. Berlin, 2009, S. 110-113.
- Beile, Lilli; Kozik, Filip: Konservierung und Restaurierung des Wappensteins der Familie Westerholt vom Haus Alst Hostmar-Leer, Alst. Unveröff. Dokumentation (Projektleitung: P. Kozub), TH Köln, CICS, Konservierung und Restaurierung von Kulturgut aus Stein, Köln, 2022.
- Beile, Lilli; De Gelder, Maia Francx; Kozik, Filip; Schäfermeier, Jonas: 3D-Scan der Tietz-Figuren in der Kapelle von Schloss Malberg. Pilotprojekt. Unveröff. Studienarbeit (Projektleitung: P. Kozub), TH Köln, CICS, Konservierung und Restaurierung von Kulturgut aus Stein, Köln, 2020.
- Bommes, Katrin; Pinkale, Tanja: Konservierung und Restaurierung der Plastik der Heiligen Walburga. Katholische Pfarrkirche St. Walburgis in Leubsdorf (Neuwied). Unveröff. Dokumentation (Projektleitung: P. Kozub, N. Underwood), TH Köln, CICS, Konservierung und Restaurierung von Kulturgut aus Stein, Köln, 2019.
- Bußmann, Alina; Kraus, Jana Lea-Marie; Schulz, Quint Thibault: Konservierung und Restaurierung des rheinischen Grabkreuzes W121F, Friedhof, Vilich (Bonn). Unveröff. Dokumentation (Projektleitung: P. Kozub), TH Köln, CICS, Konservierung und Restaurierung von Kulturgut aus Stein, Köln, 2023.
- Callieri, Marco; Dellepiane, Matteo; Cignoni, Paolo; Scopigno, Roberto: Using Digital 3D Models for Study and Restoration of Cultural Heritage Artifact. In: *Digital Imaging for Cultural Heritage Preservation: Analysis, Restoration, and Reconstruction of Ancient Artworks*, Hg. Filippo Stanco, Sebastiano Battiato, Giovanni Gallo. San Jose: CRC Press, 2017, S. 37-68.
- Deglmann, Laura; Hussein-Oglu, Rhianna; Springer, Svenja: Erfassung, Restaurierung und Konservierung von dem Grabmal der Familie Braun. Friedhof Melaten, Köln. Unveröff. Dokumentation (Projektleitung: P. Kozub, N. Underwood), TH Köln, CICS, Konservierung und Restaurierung von Kulturgut aus Stein, Köln, 2019.
- Geary, Angela: 3D Virtual Restoration of Polychrome Sculpture. In: *Digital Heritage. Applying digital imaging to cultural heritage*, Hg. Lindsay MacDonald. Amsterdam: Elsevier Publishing, 2006, S. 489-519.
- Horn, Felix: Die virtuelle Retusche – Rekonstruktion verlorener Farbschichten am 3D Modell. In: *Xi'an. Kaiserliche Macht im Jenseits*, Hg. Henriette Pleiger. Bonn: Kunst und Ausstellungshalle der Bundesrepublik Deutschland, 2006, S. 180-183.
- Kozub, Beate; Kozub, Peter: 3D Photo Monitoring as a Long Term Monument Mapping Method for the Stone Sculpture. In: *Science and Art: A Future for Stone: Proceedings of the 13th International Congress on the deterioration and conservation of stone*, Hg. John Hughes, Torsten Howind. Paisley: University of the West Scotland, 2016, S. 1031-1039.
- Kozub, Beate; Kozub, Peter: 3D Photo Monitoring of Tuff Surface Alterations of the Moai of Ahu Hanua Nua Mea. In: *9th International Conference on Easter Island and the Pacific – Cultural and Environmental Dynamics (EIPC 2015)*, Hg. Burkhard Vogt, Annete Kühlem, Andreas Mieth, Hans-Rudolf Bork. Easter Island: Rapanui Press, 2019, S. 311-318.
- Kozub, Beate; Kozub, Peter: 3D-structured Light Scanning Technology in the Field of Cultural Heritage". In: *Monument Future: Decay and Conservation of Stone. Proceedings of the 14th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*, (Set: Volume 1&2), Hg. Siegfried Siegesmund, Bernhard Middendorf. Mitteldeutscher Verl., 2020, S. 1005-1009.

- Kozub, Peter: From the Pointing Machine to the Point Cloud. Traditional and Modern Reproduction Techniques in Stone Conservation. In: *Prague-Heritages: Past and Present - Built and Social*, 28-30 June 2023, Czech Technical University, Prague | AMPS, Prague, Czech Republic, 2024, S. 627-633.
- Kozub, Peter: Anwendung von 3D-Modellen für die Visualisierung der tomographischen Ultraschallmessungen am Beispiel der Königinnenstatue aus Tell Basta. In: *Tell Basta, Archäologie in Ägypten. Ein Forschungsüberblick über die Grabung bis 2005*, Hg. Christian Tietze, DVD. Potsdam: Universität Potsdam. 2006.
- Kozub, Peter: Ultraschallmessungen an der Königinnenstatue aus Tell Basta - tomographische Aufnahme in Anbindung an das 3D Modell. In: *Potsdamer Beiträge zur Konservierung und Restaurierung*. Norderstedt: Books on Demand, 2005, S. 37-39.
- Kozub, Peter: Erfassung mikrotopographischer Veränderungen der Steinoberfläche über einen Vergleich zwei virtueller 3D-Zustandsmodelle. In: *Umgang mit Althydrophobierungen - Modellhafte Konservierung von Objekten aus durch Althydrophobierung geschädigtem Baumberger Kalksandstein sowie Entwicklung eines praxisorientierten Leitfadens*. DBU-Abschlussbericht AZ 34759/01+02, 2024, S. 311-315.
- Kozub, Peter: Weryfikacja zmian mikrotopograficznych na powierzchni kamienia poprzez porównanie wirtualnych modeli 3D stanu zachowania. Metodyka i wyniki badań. In: *Future of the Past. Conference on Innovative Research and Preservation of Cultural Heritage*, Toruń 14-15. Juni 2023. Toruń: Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika (in press).
- Kozub, Peter: Reintegration of Missing Parts on Stone Sculpture: Comparing Traditional and Modern Techniques. In: *AMPS Architecture Media Politics Society. Conference: Urban Futures-Cultural Pasts*, Barcelona 15-17. July 2024 (in press).
- Kozub Peter: The Significance of Traceological Research in the Conservation and Restoration of Stone Sculptures. The Use of Digital Methods in the Documentation and Analysis of Trace Evidence. In *Stone 2025, 15th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. Paris 2025 [Manuscript submitted for publication].
- MacDonald, Lindsay Hg.: *Digital Heritage. Applying digital imaging to cultural heritage*. Elsevier Publishing, 2006.
- Mongeon, Bridgette: *3D Technology in Fine Art and Craft. Exploring 3D Printing, Scanning, Sculpting, and Milling*. New York and London: Focal Press, Taylor & Francis Group, 2016.
- Pfeuffer, Carolin: 3D-Modellierung von Skulpturen mit Laserscan und die quantitative Erfassung der 3D-Flächenmaße von Verwitterungsphänomenen. In: *Risikoziffer. Umweltschäden an Marmor und Steinskulpturen erfassen und objektiv bewerten*, Hg. Reiner Drewello, Forschungen des Instituts für Archäologische Wissenschaften, Denkmalwissenschaften und Kunstgeschichte Bd. 12. Bamberg: Otto-Friedrich-Universität Bamberg, 2018, S. 43-63.
- Pinkale, Tanja; Bommers, Katrin; Kozub, Peter: St Walburga – Local value of polychrome terracotta figure results in conservation intervention and 3D-Scan generated replacement. In: *Monument Future: Decay and Conservation of Stone. Proceedings of the 14th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*, (Set: Volume 1&2), Hg. Siegfried Siegesmund, Bernhard Middendorf. Mitteldeutscher Verl., 2020, S. 1025-1030.
- Pinkale, Tanja: Dokumentationsmethoden zur Erfassung charakteristischer & historischer Merkmale auf Werksteinoberflächen. Am Beispiel von Drachenfels-Trachyt an den Chorkranzkapellen des Kölner Doms. Unveröff. Studienarbeit, TH Köln, CICS, Konservierung und Restaurierung von Kulturgut aus Stein, Köln, 2019.

- Reck, Karoline: Konservierung und Restaurierung der „Donna velata“ von Cesare Lapini. LETTER Stiftung Köln. Unveröff. Dokumentation (Projektleitung: P. Kozub, N. Underwood), TH Köln, CICS, Konservierung und Restaurierung von Kulturgut aus Stein, Köln, 2024.
- Schäfermeier, Jonas: Konservierung und Restaurierung der Fassadenskulptur Heiligen Aloisius von Gonzaga. Eine Steinfigur aus dem neunteiligen Figurenensemble der Fassade der ehemaligen Jesuitenkirche Sankt Michael in Aachen. Unveröff. Dokumentation (Projektleitung: P. Kozub), TH Köln, CICS, Konservierung und Restaurierung von Kulturgut aus Stein, Köln, 2022.
- Schreiber, Samuel: Bust of Gottfried Ludolf Camphausen from Johann Baptist Schreiner. Unveröff. Studienarbeit (Projektleitung: P. Kozub), TH Köln, CICS, Konservierung und Restaurierung von Kulturgut aus Stein, Köln, 2022.
- Seipt, Hendrik; Simon, Stefan; Kozub, Peter: Ultrasonic Tomography - Correlation of Ultrasonic Velocity with Strength Parameters and Exemplary Application on Historical Stone Objects using Virtual 3D-Models. In: *Proceedings of the 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 15-20.9.2008*, Hg. Jadwiga Łukaszewicz, Piotr W. Niemcewicz. Toruń: Nicolaus Copernikus University Press, 2008, S. 505-512.
- Solchenbach, Inge: Die Götter sind zurück. Die Götterfiguren des Adam Ferdinand Tietz sind als Kopien wieder zurück an ihrem alten Platz auf der Schlossterrasse. In: *Malberger Schloßbote*, No.17, 2022, S. 16-18.
- Springer, Svenja: Das Denkmal an der Ulrepforte - Untersuchung des gefassten steinernen Reliefs und Konzepterstellung. Unveröff. MA-Thesis, TH Köln, CICS, Konservierung und Restaurierung von Kulturgut aus Stein, Köln, 2020.
- Stanco, Filippo; Battiato, Sebastiano; Gallo, Giovanni: Digital Imaging for Cultural Heritage Preservation: Analysis, Restoration, and Reconstruction of Ancient Artworks. CRC Press 2017.