

NICOLE KASPAREK UND JAN SCHNEIDER

PILOTPROJEKT „DIGIGLUE“

ENTWICKLUNG EINES PROTOTYPISCHEN ASSISTENZSYSTEMS ZUR DIGITALEN REPOSITION VON WANDMALEREIFRAGMENTEN ALS BEGLEITER DER RESTAURIERUNG AM BEISPIEL DER PROVINZIALRÖMISCHEN FUNDE AUS DEM EUROPÄISCHEN KULTURPARK BLIESBRUCK-REINHEIM

PROJEKTHISTORIE

Auf deutscher Seite des Europäischen Kulturparks Bliesbruck-Reinheim wurden in den vergangenen Jahren tausende Fragmente verschiedenfarbig bemalten römischen Wandputzes gefunden. Die sehr gut erhaltenen Wandmalereiteile entstammen einer römischen Villa und lassen eine komplexe Dekoration erahnen.

Bergung, Transport und Lagerung sowie erste Versuche, die Fragmente händisch zu sortieren und zu größeren Segmenten zusammenzufügen, haben den Fundstücken bereits zugesetzt und Materialverluste insbesondere im Bereich des Mörtelgrundes zur Folge. Es stellte sich daher schnell die Frage, wie in der Praxis schonend mit einem derart umfangreichen Fundkomplex umzugehen ist. Dabei bestand ein wesentliches Ziel neben der Sicherung des offensichtlich hochwertigen Materials auch in der Durchführung einer restauratorischen und wissenschaftlichen Bearbeitung des Fundkomplexes, ohne dabei die fragilen Fundstücke weiter in Mitleidenschaft zu ziehen.

Der Zufall half bei einer Lösung. Auf Einladung des Saarländischen Museumsverbandes stellten im Frühjahr 2018 das Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK und die MFB MusterFabrik Berlin GmbH gemeinsam bei einem Workshop im Saarland unter dem Motto „Kulturgüter sichern: Neuartige Digitalisierungs- und Rekonstruktionstechnologien für die Region Saar-Lor-Lux“ verschiedene Möglichkeiten zur digitalen Rekonstruktion von beschädigtem Kulturgut vor. In nachfolgenden Gesprächen mit Mitarbeitern des Europäischen Kulturparks Bliesbruck-Reinheim [EKP] und des Landesdenkmalamtes Saarland [LDA] wurde die Problemstellung der fragmentierten bemalten Wandputzfragmente diskutiert und ein Vororttermin im EKP für den Sommer 2018 vereinbart. Bei der Begehung des Fundplatzes und der Besichtigung des Magazins wurde dann die Projektidee zur Entwicklung eines neuartigen Systems zur digitalen Wiederherstellung der Wandputzfragmente geboren.

Ende 2019 wurde die MusterFabrik im Rahmen eines Forschungsprojekts vom LDA Saarland mit der Entwicklung eines prototypischen Systems zur Digitalisierung und zum virtuellen Puzzeln der Putzfragmente beauftragt. Zielsetzungen dieses auf 18 Monate ausgelegten Projekts waren die Entwicklung eines 2,5-D-Scanners sowie eines computergestützten Assistenzsystems zum digitalen Handling und zur interaktiven

digitalen Reposition von 2,5-D-Objekten. Forschungspartner war neben dem LDA Saarland und der MusterFabrik das Fraunhofer IPK.

Die Entwicklungsarbeiten wurden im Sommer 2021 erfolgreich abgeschlossen. Im Herbst 2021 wurde das prototypische Assistenzsystem vor Ort in Reinheim installiert und wird dort seitdem von Mitarbeitern des EKP eigenständig betrieben.

DER FUNKOMPLEX IM EUROPÄISCHEN KULTURPARK BLIESBRUCK-REINHEIM

Im saarländischen Bliesgau beheimatet liegt heute der grenzüberschreitende deutsch-französische „Europäische Kulturpark Bliesbruck-Reinheim“, der für Besucher mit großflächig rekonstruierten Bereichen die keltische und römische Epoche des Saarlandes anschaulich präsentiert.



Abbildung 1: Übersichtsplan der Anlage des Europäischen Kulturparks
© EKP

Die ältesten Berichte über archäologische Funde aus dem Ort Reinheim stammen bereits aus dem Jahr 1760. Erste „Grabungen“ erfolgten dann im frühen 19. Jahrhundert an der Stelle, an der später die römische Villa freigelegt werden sollte, aus deren Bereich die Wandmalereien des DigiGlue-Projekts stammen. Aber erst mit der Auffindung des „Fürstinnengrabes“ aus der Frühlatènezeit [um 370 v.Chr.] wurde der Ort 1954 berühmt.



Abbildung 2: Funde der Fürstin
© Stiftung Saarländischer Kulturbesitz, Foto: Hans-Georg Merkel

Seit 1987 werden in Reinheim kontinuierlich archäologische Ausgrabungen durchgeführt, begleitet durch das Landesdenkmalamt Saarland.



Abbildung 3: Anlage Bliesbruck [links] und Villa Reinheim [rechts]
© EKP

Auf deutscher Seite befinden sich die Überreste einer römischen Villa, die wohl vom 1. Jh. bis zu einem Brand im 4. Jh. n. Chr. existierte; im französischen Bliesbruck liegt der dazugehörige Vicus, die Siedlung, die eine Belegung zwischen der Mitte des 1. Jh. n. Chr. sogar bis zum Anfang des 5. Jh. aufweist. Die Siedlung besaß städtische Merkmale und erstreckte sich über eine Fläche von 16 ha. Bis heute wurden in Bliesbruck zwei Handwerkerviertel, eine Thermenanlage, eine Brunnenanlage, eine Markthalle und Teile eines Marktplatzes freigelegt.

Die gallorömische, so genannte „Axialhofvilla“ von Reinheim erstreckte sich über eine Fläche von 7 ha und besaß einen herrschaftlichen Wohnbereich mit einem Hauptgebäude mit den Ausmaßen 80 x 62 m² und ein sich anschließendes längliches Hofareal mit zahlreichen Wirtschaftsgebäuden. Das Hofareal bestand aus zwei Reihen zu je sechs, mit Mauern verbundenen Gebäuden und besaß eine Länge von ca. 300 m und eine Breite von 135 m. Der Bereich des Hofareals wird bis heute weiter ausgegraben und teilrekonstruiert.



Abbildung 4: Grabungssituation der Wandmalerei [links] und Detail der Wandmalereischicht [rechts]
© EKP

Die Villa erlebte wohl mehrere Bauphasen. Ihr Baubeginn erfolgte um die Mitte des 1. Jh. n. Chr. und erreichte bereits zum Ende des 1. Jh. ihre heutigen Ausmaße. Um 150 n. Chr. wurde die Anlage neu geplant. Bereits im Jahr 2013 fand sich bei den Ausgrabungen neben dem Hauptgebäude in einem ungestörten Bereich römischer Bauschutt mit einer mächtigen Schicht von Wandmalereifragmenten, der wohl von dieser Umbauphase zeugt.

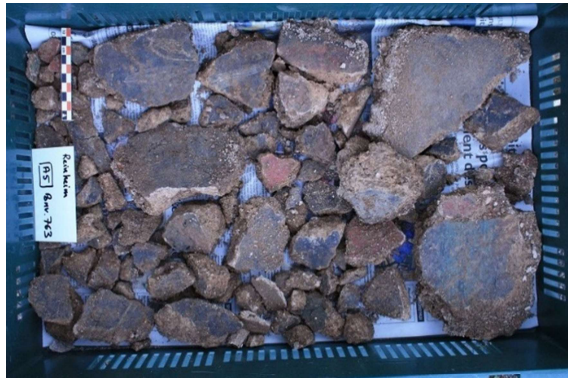


Abbildung 5: Kiste mit Bruchstücken [links] und Blockbergung [rechts]
© EKP

Die Wandmalereischicht hat, soweit man bis jetzt sagen kann, eine Stärke von ca. 30 cm und erstreckt sich über eine Fläche von ca. 20 Quadratmetern. Der Wandputz wurde hier hinter dem Hauptgebäude vermutlich zum Geländeausgleich beim Umbau entsorgt. Die qualitativ hochwertige Wandmalerei umfasst bis heute ca. 12.000 Fragmente und ist noch nicht vollständig geborgen.



Abbildung 6: v.l.n.r.: Reinigung, Rollwagen mit Einschubtableaus, quadrantenweise Trennung
© EKP & Michel Frenzel, Conservation Départementale d'Archéologie

Bei der Bergung wurden die Putzstücke bereits quadrantenweise getrennt in der Hoffnung, anpassende Stücke aus den gleichen oder benachbarten Quadranten bei der späteren Bearbeitung leichter zu finden. Teilweise konnten zusammenhängende Fragmente auch en bloc geborgen werden.

Die Wandmalereifragmente wurden nach der Bergung mit Wasser gereinigt. Die Trocknung des Fundmaterials erfolgte auf gelochten Blechtableaus, weiterhin natürlich quadrantenweise getrennt.

Zusammengehörige Stücke wurden mit Vinylharz [Mowilith 50] geklebt. Zum Stabilisieren der Mörtelschicht wurde die Acrylharz-Dispersion Acril 33 in 10%er Lösung per Spritzenauftrag verwendet. Die Malschicht selbst erfuhr keine weitere Behandlung, d.h. auch Kalkablagerungen wurden belassen.

Der Zustand der Malschicht ist sehr gut und insbesondere die großformatigen Bruchstücke lassen schon jetzt eine komplexe Dekoration erahnen. Neben Stücken mit monochromen Farbgebungen in Weiß, Schwarz, Rot, Ockergelb, Grün oder Blau sind auf vielen Fragmenten Muster, vegetabile und figürliche Darstellungen zu erkennen (vgl. Abbildung 7).



Abbildung 7: Zusammengefügte Fragmente
© LDA Saarland

Die Datierung der Wandfassungen reicht mit einer möglichen Kandelaberdekoration von der zweiten Hälfte des 1. Jahrhunderts bis in das 2. Jahrhundert und vielleicht darüber hinaus: solange die Dekorationen nicht rekonstruiert werden können, bleibt eine endgültige Datierung hypothetisch. Es bleibt auch vorerst unklar, ob es sich um eine oder mehrere Wandfassungen handelt und aus welchem Hausbereich sie stammen können.



Abbildung 8: Sandbett mit zusammengeführten Fragmenten
© LDA Saarland

Der Mörtelgrund, der den Fragmenten in unterschiedlicher Stärke noch anhaftet, ist von weiß-beiger Farbe, von der Struktur her sehr fein und qualitativ hochwertig, jedoch fragil. Die Oberfläche des darauf aufgetragenen Putzes wurde für die Bemalung optimal geglättet. Die Bemalung, die auf der noch feuchten Putzoberfläche ausgeführt wurde, zeichnet sich neben dem reichen Farbspektrum durch exakten und sehr guten Auftrag aus. Besonders die Fragmente mit Resten figürlicher Bemalung zeugen durch mehrschichtigen Farbauftrag und damit optischer Modellierung des Bildes ebenfalls von hoher Qualität.

„DigiGlue“ –

EIN 2,5-D-SYSTEM ZUR DIGITALEN WIEDERHERSTELLUNG DER PUTZFRAGMENTE

Ende 2019 hat das Landesdenkmalamt Saarland die MFB MusterFabrik Berlin GmbH mit der Entwicklung einer prototypischen Lösung zur digitalen Wiederherstellung der römischen Wandputzfragmente beauftragt. Dabei bestanden die übergeordneten Ziele des unter dem Namen „DigiGlue“ / „Digitales Kleben“ geführten Projekts in der Entwicklung eines Systems, das möglichst bestandsschonend mit den fragilen und brüchigen Artefakten umgeht, um diese nicht [weiter] zu beschädigen. Zudem sollte das System möglichst einfach durch die Fachanwender vor Ort bedienbar und derart mobil ausgelegt sein, dass es nicht nur unter Laborbedingungen, sondern direkt vor Ort in der Nähe des Fundorts, der Depots, Werkstätten, etc. eingesetzt werden kann.

Ein weiteres übergeordnetes Ziel bestand darin, auf eine vollständige 3-D-Verarbeitung der Fragmente zu verzichten, da bei dieser zum einen sehr große Datenmengen anfallen und zum anderen Algorithmik und Systembedienung recht komplex werden können.

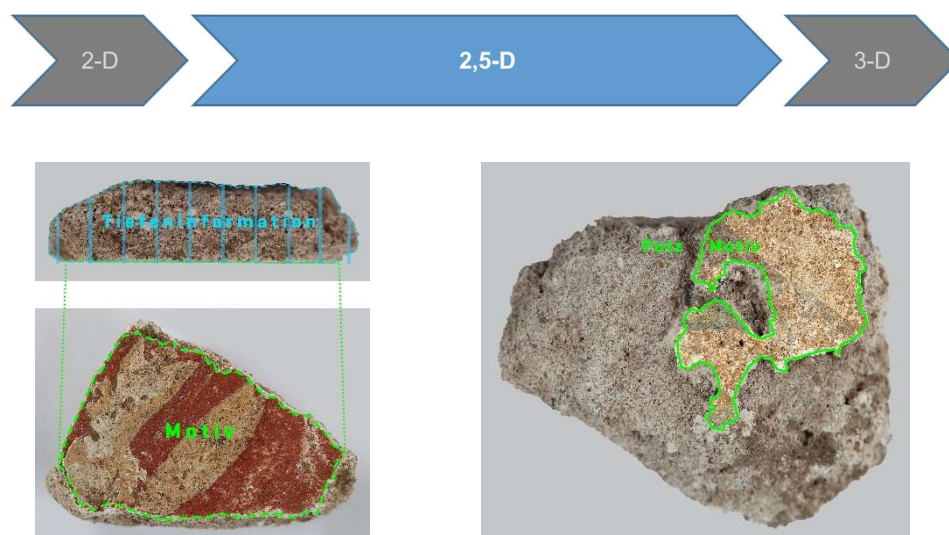


Abbildung 9: „2,5-D“: 2-D-Verarbeitung unter Berücksichtigung von Tiefeninformation [▲ „0,5-D“]
© MusterFabrik Berlin

Es wurde daher von der MusterFabrik ein 2,5-D-Ansatz verfolgt, der algorithmisch zwischen einer klassischen 2-D-Verarbeitung – wie man sie bspw. bei Papierfragmenten anwendet – und einer klassischen 3-D-Verarbeitung liegt. Dies ist im vorliegenden Fall möglich, da es sich bei den Putzfragmenten zwar um dreidimensionale Objekte handelt, diese jedoch eine plane Fläche aufweisen, welche zudem das zu puzzlende Motiv enthält. Das bedeutet, dass eine Rekonstruktion der Motivflächen prinzipiell auf die Problemstellung eines 2-D-Puzzles reduziert werden könnte. Damit aber Übergänge zwischen Motiv und Putzflächen automatisch detektiert und ausgewertet werden können (vgl. Abbildung 9), wird zusätzlich Tiefeninformation, d.h. eine 3-D-Aufnahme der erhabenen Putzseite der Fragmente benötigt. Damit ist der gewählte 2,5-D-Ansatz also ein 2-D-Puzzle unter Berücksichtigung von Tiefeninformation, welche durch den Anteil 0,5-D angezeigt wird.

Das im Rahmen des Projekts entwickelte DigiGlue-System umfasst folgende Prozessschritte:

1. Automatisierte Digitalisierung der Putzfragmente
2. Automatische 2,5-D-Verarbeitung der Digitalisate mit Methoden der Bildverarbeitung und Mustererkennung zum Generieren von digitalen Zwillingen der Putzfragmente
3. Interaktive Weiterverarbeitung der digitalen Zwillinge in einem Software-Assistenzsystem; mit dem Ziel, diese – wenn passend – wieder zusammenzusetzen.

Diese drei Prozessschritte sind im Folgenden beschrieben.

AUTOMATISIERTE DIGITALISIERUNG DER PUTZFRAGMENTE

Der von der MusterFabrik entwickelte automatisierte 2,5-D-Scanner [vgl. Abbildung 10] ermöglicht eine bestandsschonende, detailgetreue und zeiteffiziente 2,5-D-Digitalisierung der fragilen Putzfragmente. Die digitalen Abbilder der Fragmente sind farb- und geometrietreu sowie schatten- und reflexionsfrei und werden automatisch und pixelgenau aus den so genannten Rohscans ausgeschnitten. Das Ausschneiden beinhaltet sowohl das Freistellen der äußeren Fragmentumrandung als auch das Maskieren aller Bildbereiche der Motivflächen.



Abbildung 10: Außenansicht des 2,5-D-Scanners; links: CAD-Modell mit Umhausung; rechts: Systemkomponenten
[orange Markierung: Hubtür zum Öffnen und Schließen des Scanners]

© MusterFabrik Berlin

Für die Digitalisierung werden die Putzfragmente kopfüber, also mit der Motivseite nach unten auf eine etwa mittig im Scanner montierte, kratzfeste Glasplatte gelegt. Eine Fixierung der Fragmente ist aufgrund ihres Eigengewichts in der Regel nicht erforderlich. In einem automatisch ablaufenden Prozess werden dann in einem einzelnen Scandurchgang Farbbilder von Vorder- und Rückseite der Fragmente sowie ein 3-D-Scan des Putzkörpers der Rückseite erfasst¹, d.h. die Fragmente müssen während der Aufnahme nicht bewegt werden.

Abbildung 11 zeigt einen Ausschnitt aus dem Inneren der Digitalisierungseinheit. Die Glasplatte, auf die die Fragmente zur Aufnahme gelegt werden, ist zweigeteilt. Außen befindet sich ein fest montierter Rahmen, an den beidseitig diverse Kalibrier- und Farbmuster aufgebracht sind. Auf diesem Rahmen liegt eine kleinere Glasplatte, die den eigentlichen, etwa 30 x 30 cm² umfassenden Aufnahmebereich darstellt². Diese innere Glasplatte ist als „Opferplatte“ ausgelegt ist und kann im Falle von Beschädigungen (Kratzer o.ä.) einfach ausgetauscht werden.



Abbildung 11: Innenansicht des 2,5-D-Scanners; links: Aufnahmebereich; rechts: Stabilisierungsvorrichtung
© MusterFabrik Berlin

Weisen Fragmente einen großen Putzüberhang auf, kann es vorkommen, dass sie nach dem Einlegen zur Seite kippen und damit ihre Motivebene nicht mehr plan auf der Glasplatte aufliegt. Zur Stabilisierung dieser „kippligen“ Fragmente können im Scanner verbaute Kunststoffseilen über den Aufnahmebereich gezogen und die Fragmente damit fixiert werden. In Abbildung 11 rechts ist diese simple und sehr materialschonende Vorrichtung exemplarisch dargestellt.

Bei der Digitalisierung von Kulturgütern ist neben einer akkuraten Bildaufnahme die Erfassung von Metainformationen essentiell, welche bspw. Angaben zum Fundort oder zur Fundsituation sowie Angaben zur Klassifikation oder inhaltlichen Beschreibung der zu digitalisierenden Fragmente enthalten können. Diese Informationen können den Fragmenten im Digitalisierungsprozess in Form von so genannten Metadaten mitgegeben werden. Die Metadatenvergabe erfolgt dabei über entsprechende Eingabemasken

¹ Neben den erforderlichen 3-D-Scans werden auch Farbaufnahmen der Fragmentrückseiten erstellt, da diese bspw. Linienmuster oder vergleichbare Texturen des Mauerwerks oder auffällige Bestandteile des Mörtels enthalten können. Diese Informationen können – gemeinsam mit den i.d.R. aussagekräftigeren Motivmerkmalen der Fragmentvorderseiten – hilfreich im Repositionsprozess sein.

² Per Definition ist der im Rahmen des Projekts entwickelte Scanner auf die Digitalisierung von Fragmenten mit einer maximalen horizontalen Ausdehnung von etwa 30 x 30 cm² und einer maximalen Tiefe von etwa 10 cm ausgelegt.

[vgl. Abbildung 12] und kann auf Fragmentebene und/oder über die Definition von so genannten Scanjobs für ganze Chargen oder Konvolute erfolgen.

Das LDA Saarland hat im Rahmen des Projekts einen spezifisch auf die vorliegende Aufgabenstellung zugeschnittenen, aber gleichzeitig doch möglichst generisch gehaltenen Metadatensatz definiert, der bei der Digitalisierung der römischen Wandputzfragmente Anwendung findet. Systemintern ist die Implementierung der Metadatenvergabe jedoch bewusst so flexibel ausgelegt, dass sie bei Bedarf sowohl hinsichtlich der Struktur als auch der Attribute der Metadaten sehr einfach an andere Aufgabenstellungen angepasst werden kann.

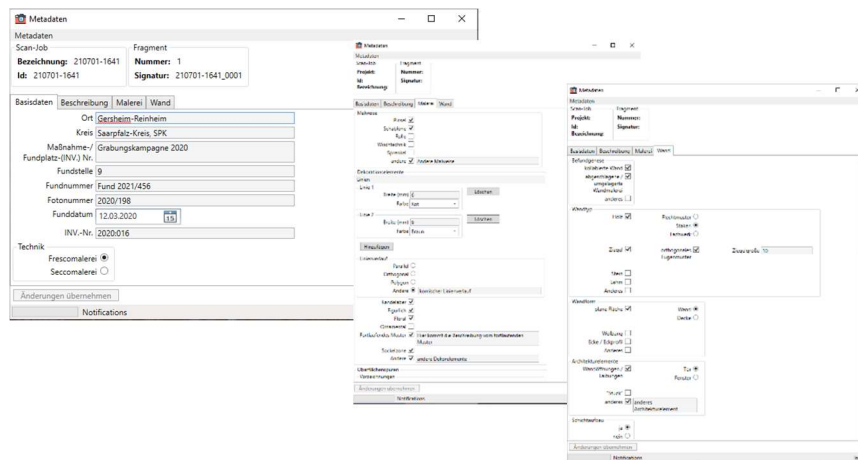


Abbildung 12: Erfassung von Metadaten bei der Digitalisierung
© MusterFabrik Berlin

AUTOMATISCHE 2,5-D-VERARBEITUNG DER DIGITALISATE

Nach der Digitalisierung der Einzelbilder eines Fragments – je ein Farbbild von Vorder- und Rückseite sowie ein 3-D-Bild der Rückseite – müssen diese in *eine* digitale Repräsentation überführt werden. Die Fusion der Einzelbilder, bei der auch die Skalierung der drei Aufnahmesysteme auf eine einheitliche Auflösung von knapp 400 dpi angepasst wird, erfolgt automatisch und umfasst die folgenden, in Abbildung 13 und Abbildung 14 exemplarisch dargestellten Prozessschritte:

- [1] Rektifizieren der Rohscans inkl. Eliminieren von Verzeichnungen
- [2] Ausschneiden der Fragmente aus den Rohscans
- [3] Pixelgenaues Freistellen der Fragmentfläche
- [4] Pixelgenaues Freistellen der Motivfläche
- [5] Berechnen der Tiefeninformation aus der 3-D-Aufnahme der Rückseite
- [6] Generieren einer Heatmap der Tiefeninformation
- [7] Herstellen der Deckungsgleichheit von Vorder- und Rückseitenbildern

Zunächst müssen die Vorder- und Rückseitenbilder der Fragmente gemäß ihrer kleinsten umfassenden Rechtecke aus den Rohscans ausgeschnitten werden. Dabei werden die Fragmentbilder zudem rektifiziert und leichte tonnen- und kissenförmigen Verzeichnungen herausgerechnet, die bei nicht-telezentrischen Objektiven insbesondere an den Bildrändern auftreten können.

Damit mit den Fragmenten im Sinne digitaler Zwillinge virtuell interagiert werden kann, müssen die Objekte pixelgenau freigestellt, d.h. der nicht zum Objekt gehörende Hintergrund maskiert werden. Zudem müssen die Putzbereiche der Vorderseitenbilder detektiert und analog zum Scanhintergrund ebenfalls maskiert werden. Dies resultiert in einer oder mehreren pixelgenau freigestellten Motivflächen je Fragment, welche im Folgeprozess bei der Reposition der Fragmente eines der wesentlichen Puzzlemerkmale darstellen.

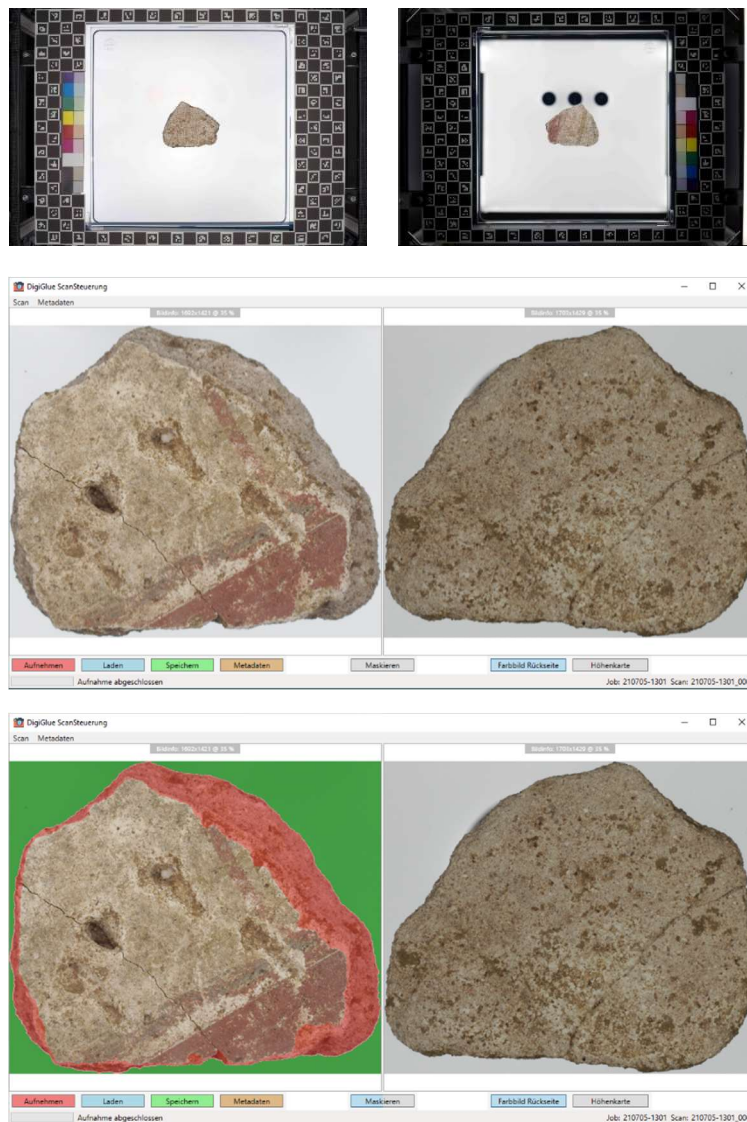


Abbildung 13: Prozessschritte der automatischen 2,5-D-Verarbeitung;
v.o.n.u.: Rohscans; ausgeschnittene Fragmente; freigestellte Motiv- und Putzflächen
© MusterFabrik Berlin

Abbildung 13 illustriert die Anwendung der Prozessschritte [1] bis [4]. In der Abbildung ganz oben dargestellt sind die Rohscans der beiden Farbkameras für die Vorder- und Rückseitenaufnahmen: links oben der Rohscan der Rückseite, noch mit tonnenförmiger Verzeichnung an den Bildrändern und rechts oben das bereits verzeichnungsfreie Bild der Vorderseite. Der mittlere Teil von Abbildung 13 zeigt einen Screenshot der Scanner-Steuerungssoftware nach Anwendung der Prozessschritte [1] und [2] mit den rechteckig ausgeschnittenen Fragmentbildern. Der untere Teil von Abbildung 13 zeigt das Ergebnis der Prozessschritte [3] und [4] exemplarisch anhand der Vorderseitenaufnahme. Grün maskiert sind alle Bildbereiche, die nicht zum Fragment, sondern zum Scanhintergrund und rot maskiert sind alle Bildbereiche, die nicht zum Motiv, sondern zum Wandputz der Fragmentvorderseite gehören.

Im nächsten Prozessschritt [5] muss aus den räumlichen Daten der Putzoberfläche, welche mittels Streifenlichtprojektion von der 3-D-Kamera abgetastet wird, die Tiefeninformation berechnet werden. Etwaige Lücken in der 3-D-Aufnahme, die aus möglichen Verdeckungen insbesondere an den Fragmenträndern resultieren können, werden dabei durch Interpolation geschlossen. Nach Abschluss dieses Prozessschritts liegt für jeden Bildpunkt der Fragmentvorderseite die zugehörige Tiefeninformation der Fragmentrückseite vor. Aus dieser Tiefeninformation wird dann in Prozessschritt [6] die so genannte Heatmap generiert, bei der es sich um eine Falschfarbendarstellung zur Visualisierung der jeweiligen Tiefe („Dicke“) eines Fragments bezogen auf seine Motivebene handelt. Dafür wird in der Heatmap jeder Bildpunkt der Fragmentrückseite entsprechend seines Abstands zur Glasplatte des Scanners – die Motivebene – mit einem Farbwert kodiert. Die dabei verwendeten Farbtöne entsprechen denen gängiger Wärmebilder und reichen von Blau über Cyan, Grün, Gelb, Orange nach Rot. Bildbereiche minimaler Tiefe sind dabei mit Blau und Bildbereiche maximaler Tiefe mit Rot gekennzeichnet.

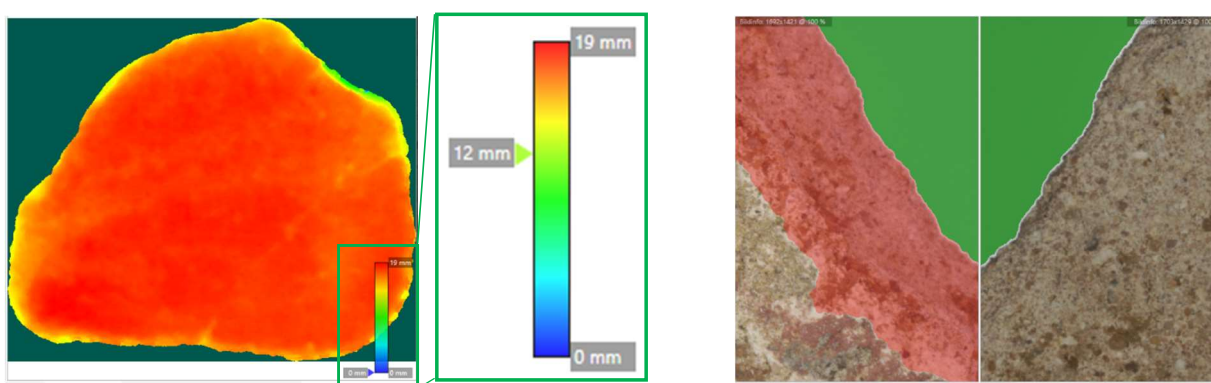


Abbildung 14: Prozessschritte der automatischen 2,5-D-Verarbeitung
v.l.n.r.: Heatmap der Rückseite; zugehörige Tiefenskala (vergrößert); Deckungsgleichheit Vorder- und Rückseite
© MusterFabrik Berlin

Abbildung 14 illustriert den Vorgang. In der Abbildung links dargestellt ist ein Screenshot der Scanner-Steuerungssoftware mit aktivierter Heatmap für die Fragmentrückseite. Die Heatmap wird dabei immer auf den Wert maximaler Tiefe („auf die dickste Stelle“) eines Fragments normiert. Bewegt man den

Mauszeiger über die Heatmap, wird der entsprechende Tiefenwert unter dem Mauszeiger ausgegeben – im vorliegenden Fall hat das Fragment eine maximale „Dicke“ von 19 mm und der Mauszeiger befindet sich an einer Bildposition mit einer „Dicke“ von 12 mm [vgl. die mittig in Abbildung 14 dargestellte Vergrößerung der Heatmap-Skala].

In einem finalen Prozessschritt [7] werden alle Einzelbilder – Farbbilder von Vorder- und Rückseite, Maskenbilder von Vorder- und Rückseite sowie Heatmap – deckungsgleich ausgerichtet [vgl. gezoomten Bildausschnitt in Abbildung 14 rechts]. Damit steht nach Abschluss der automatischen Bilddatenfusion für jedes Putzfragment ein vollwertiger 2,5-D-Zwilling für die digitale Folgeverarbeitung zur Verfügung, mit denen analog zur realen Welt interagiert werden kann, indem die Zwillinge bspw. auf einer digitalen Arbeitsfläche frei platziert, bewegt, rotiert und von beiden Seiten betrachtet werden.

SOFTWARE-ASSISTENZSYSTEM ZUM DIGITALEN HANDLING DER 2,5-D-OBJEKTE

Im Rahmen des DigiGlue-Projekts wurde von der MusterFabrik ein Software-Assistenzsystem zum digitalen Handling von Wandputzfragmenten entwickelt, welche vorab mit dem im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen 2,5-D-Scanner digitalisiert wurden. Das Assistenzsystem wird auf einem so genannten Puzzle-PC, der per Netzwerk mit dem Scanner verbunden ist, ausgeführt.

Das Software-Assistenzsystem ist vergleichbar mit einem digitalen Arbeitstisch, der dem Bediener viele Tools zur Verfügung stellt, um automatisiert aus tausenden von Fragmenten vermeintliche Rekonstruktionskandidaten nach diversen Gesichtspunkten herauszufiltern und diese dann – wenn tatsächlich passend – interaktiv digital zusammenzusetzen. Werden zwei oder mehr Fragmente zu einer neuen Rekonstruktion verklebt, entsteht im System ein neues Bauteil, welches dann wiederum mit weiteren Fragmenten und/oder Rekonstruktionen gepuzzelt werden kann. Dadurch reduziert sich im Gesamtprozess sukzessive die Menge der zu verarbeiten Bauteile, bis am Ende eine oder mehrere finale Rekonstruktionen entstanden sind.

Das Assistenzsystem ist damit zum einen ein Werkzeug für den Fachanwender, das der automatisierten Klassifikation und Strukturierung großer Mengen digitalisierter 2,5-D-Objekte dient. Zum anderen eröffnet das Assistenzsystem überhaupt erst die Möglichkeit, die Wandputzfragmente im erforderlichen Umfang und mit vertretbarem Aufwand wieder zusammenzusetzen. Denn erst durch das digitale Handling können die fragilen Objekte mühelos verschoben, rotiert, umgedreht oder [gleichzeitig] von beiden Seiten betrachtet werden. Ein Vorgang, der mit den Originalen in der realen Welt nur mit großem Aufwand und ab einer bestimmten Anzahl von Bauteilen so gut wie gar nicht mehr handhabbar ist.

ARBEITEN MIT DIGITALEN WORKSPACES

Das Assistenzsystem beinhaltet eine oder mehrere [sehr] große digitale Arbeitsflächen, die so genannten Workspaces [vgl. Abbildung 15]. In jedem Workspace können theoretisch beliebig viele Objekte gleichzeitig angezeigt und bearbeitet werden. Dabei kann der Bediener stufenlos in die Objektmengen hineinzo-

men, bis einzelne Fragmente und Rekonstruktionen mit hoher Detailschärfe sichtbar sind³. Zur Navigation innerhalb großer Arbeitsmengen kann der jeweils dargestellte Bildausschnitt des Workspaces verschoben und skaliert werden.

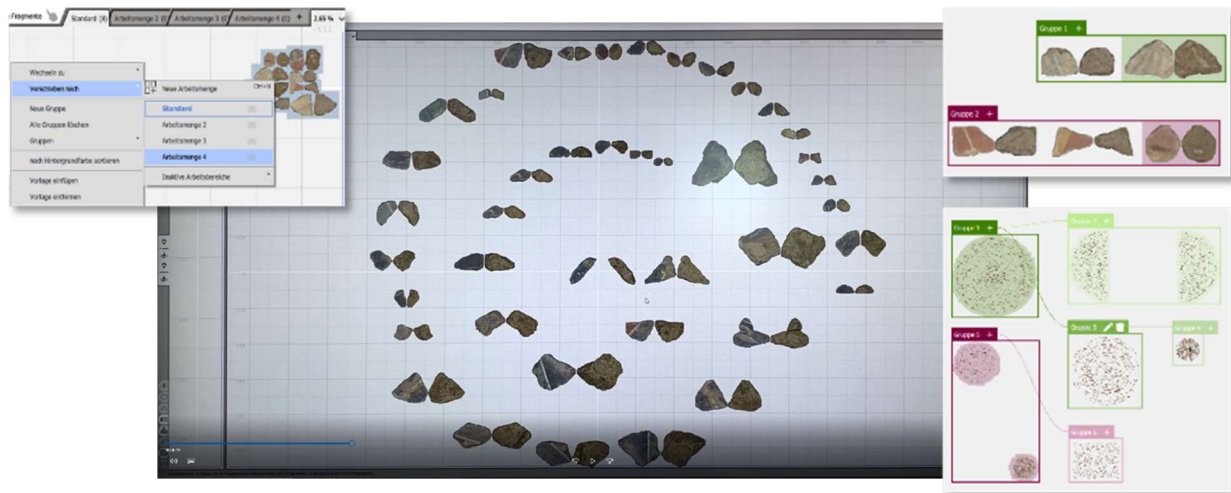


Abbildung 15: Digitale Arbeitsflächen des 2,5-D-Assistenzsystems
Mitte: Screenshot eines Workspaces; links: Bildung von Arbeitsmengen; rechts: Gruppieren von Fragmenten
© MusterFabrik Berlin

Jeder Workspace ist mit „seiner“ Arbeitsmenge verknüpft, wobei jede Arbeitsmenge eine beliebige Anzahl von Fragmenten und Rekonstruktionen enthalten kann (vgl. Screenshot in Abbildung 15 links). Innerhalb der einzelnen Arbeitsmenge können Gruppen definiert werden, in denen Fragmente und Rekonstruktionen mit jeweils ähnlichen Eigenschaften zusammengefasst und – bei Bedarf – hierarchisch gegliedert werden können. So kann der Bediener innerhalb eines Workspaces bspw. alle Fragmente mit einer bestimmten dominierenden Motivfarbe in einer Gruppe zusammenfassen und innerhalb dieser Gruppe dann Untergruppen bilden, die alle Fragmente mit dieser Motivfarbe und weiteren Eigenschaften wie bspw. Linienmustern mit jeweils unterschiedlichen Farbtönen beinhalten (vgl. Screenshots in Abbildung 15 rechts).

Zur einfachen Ausrichtung von Fragmenten und Rekonstruktionen können eine oder mehrere Vorzugsrichtungen je Objekt definiert werden, bspw. an Farbübergängen oder entlang von Linienmustern (vgl. Abbildung 16 links). Innerhalb eines Workspaces, einer Gruppe oder Untergruppe oder einer Selektion von Objekten können dann bei Bedarf alle entsprechend gekennzeichneten Objekte „mit einem Klick“ in einem 90°-Multiwinkel gedreht und damit so angeordnet werden, dass besser ersichtlich wird, welche Teile zusammenpassen könnten und welche nicht.

Das Assistenzsystem bietet zudem die Möglichkeit der Vermaßung von Objekten (vgl. Abbildung 16 rechts). So können bspw. die Abmessungen von Fragmenten und Rekonstruktionen oder einzelne Muster

³ Der maximal verfügbare Detailgrad der Darstellung ist dabei nur durch die bei der Digitalisierung erzielte Auflösung von knapp 400 dpi beschränkt.

wie Linien, Ornamente o.ä. auf den Vorder- und Rückseitenbildern auf den Millimeter genau interaktiv ermittelt und bei Bedarf in die Metadaten der entsprechenden Objekte übernommen werden.

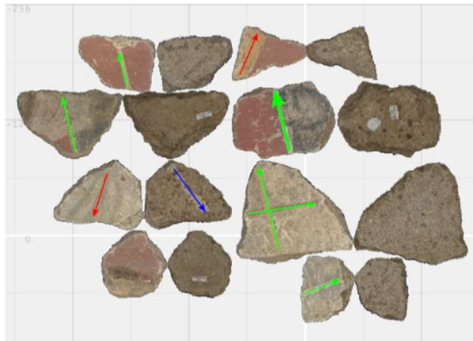


Abbildung 16: Definition von Vorzugsrichtungen [links] und Vermaßung von Objekte [rechts]
© MusterFabrik Berlin

Über ihre Metadaten können Objekte dann wiederum einzeln oder en bloc selektiert und an die Folgeverarbeitung übergeben werden, bspw. zum Gruppieren oder Puzzeln. Für diesen Zweck werden die entsprechenden Metadaten in einer speziellen Ansicht des Assistenzsystems ausgewählt und alle Fragmente und Rekonstruktionen, die diese Metadaten tragen, daraufhin im Workspace selektiert (vgl. Abbildung 17 links).

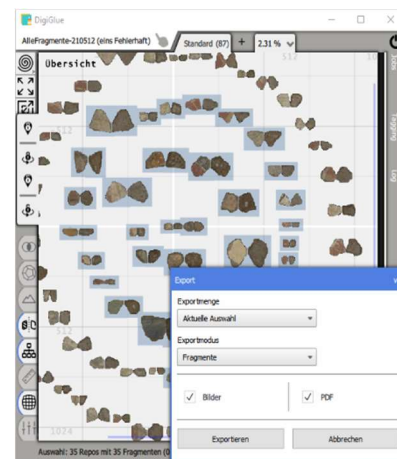
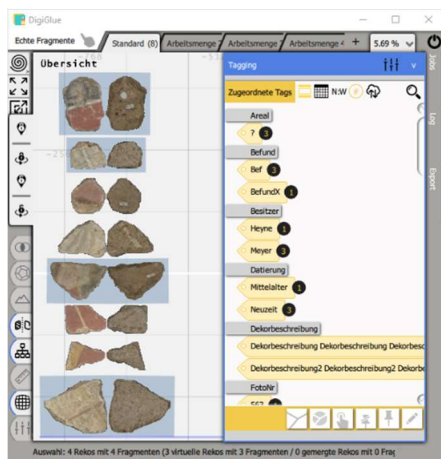


Abbildung 17: Selektion von Objekten anhand ihrer Metadaten [links] und Export von Bildern und PDFs [rechts]
© MusterFabrik Berlin

Arbeitsmengen oder Selektionen von Fragmenten und Rekonstruktionen können zudem exportiert werden (vgl. Abbildung 17 rechts). Dabei ist zum einen der Export von Vorder- und Rückseitenbildern im TIF- oder JPG-Format möglich, bspw. für eine Web-Darstellung. Zum anderen können Bilder und Metadaten gemeinsam als eine Art „Steckbrief“ im PDF-Format abgespeichert werden (vgl. Abbildung 18).

Dies kann einerseits der Dokumentation und digitalen Archivierung dienen oder andererseits – im Falle von Rekonstruktionen – auch als „Bauanleitung“ für das physische Zusammensetzen der Originale ver-

kann es hilfreich sein, sich zunächst auf das Motiv zu konzentrieren und alle Putzflächen auszublenden. Dafür bietet das Assistenzsystem die Möglichkeit, die Putzflächen der Vorderseitenbilder stufenlos transparent oder, wie auch bei Bedarf die Putzrückseitenbilder, komplett auszuschalten. Analog dazu kann die Anzeige der Vorderseitenbilder komplett deaktiviert werden, um – im Falle aussagekräftiger, bspw. Linienmuster beinhaltender Putztexturen – das Hauptaugenmerk beim Puzzeln auf die Rückseitenbilder zu richten. Zur Verifikation des Passverhaltens können zudem anstelle der Farbbilder der Rückseiten die zugehörigen Heatmaps zur Visualisierung der Putzdicken eingeblendet oder verschiedene Optionen bei der Darstellung der Überlagerung der Bruchkanten ausgewählt werden (vgl. Abbildung 19 rechts oben).

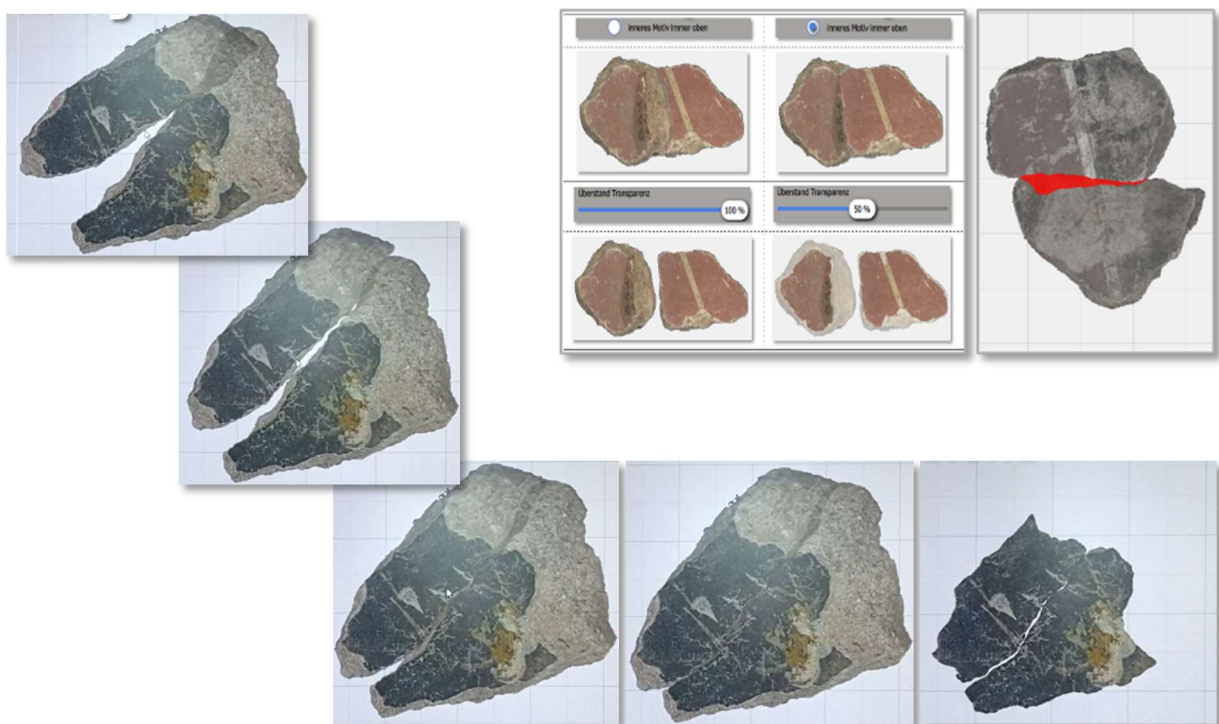


Abbildung 19: Feinausrichten einer Paarung [Sequenz] und Optionen zur Überlagerung von Bruchkanten [oben]
© MusterFabrik Berlin

REPOSITIONIEREN MIT TEMPLATES

Bei der Vorsortierung und Suche vermeintlich passender Puzzlepartner sowie beim Feinausrichten und digitalen Verkleben von Rekonstruktionen steht das flexible Verschieben von Bauteilen zwischen verschiedenen Workspaces sowie das freie Positionieren und Bewegen von Bauteilen an beliebigen Stellen eines Workspaces im Vordergrund. Ab dem Prozesszeitpunkt, an dem eine vage Vorstellung vom Rekonstruktionsergebnis bzw. der ungefähren [relativen] Anordnung einzelner Motivelemente in einem vermeintlichen Zielbild entsteht, kann es jedoch zielführender sein, einzelne Bauteile und Rekonstruktionen an bestimmten Positionen zu fixieren.

Zu diesem Zweck stellt das Assistenzsystem die Möglichkeit zur Verfügung, Fragmente und Rekonstruktionen im Workspace zu verankern (vgl. Abbildung 20 links). Verankerte Objekte werden bei der Selektion von Fragmenten und Rekonstruktionen nicht berücksichtigt, so dass ihre Ausrichtung und Position im

Workspace unveränderlich ist⁴. Verankerte Objekte bzw. die durch sie definierten Wandbereiche können damit als Ausgangspunkt für eine Vervollständigung dienen, an die im Repositionsprozess sukzessive weitere Teile angebaut werden können.



Abbildung 20: Verankern von Objekten [links] und Einblenden eines Zielbildes im Workspace [mitte-rechts]
© MusterFabrik Berlin

Zur Unterstützung des Bedieners ist in einzelnen Workspaces die Hinterlegung von Zielbildern, so genannten Templates möglich, in die dann systematisch „hineingepuzzelt“ werden kann. Bei den Templates kann es sich bspw. entweder um [rektifizierte] Aufnahmen des Wandzustands vor der Fragmentierung [vgl. Abbildung 20, fiktive Darstellung] oder um vom Fachanwender erstellte Skizzen vermeintlicher Wandgrundrisse oder vermuteter wiederkehrender Muster handeln [vgl. Abbildung 21]. Insbesondere die Kennzeichnung nicht zu puzzelnder Wandflächen im Bereich von Türöffnungen oder Fensteraussparungen sowie die Unterlegung wiederkehrender Linien- und Ornamentmuster können wichtige Hilfestellungen bei der digitalen Reposition darstellen.

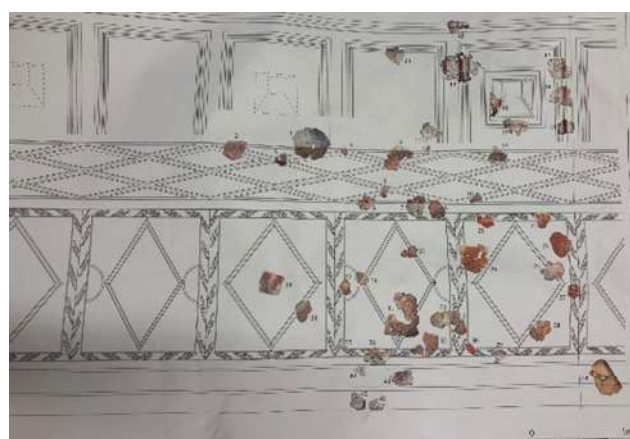


Abbildung 21: Template mit Grundriss und wiederkehrenden Mustern [schematische Darstellung]
© LDA Saarland

⁴ Die Verankerung von Objekten sowie die Verankerung einzelner Bauteile innerhalb verankerter Rekonstruktionen kann bei Bedarf jederzeit deaktiviert werden, so dass die entsprechenden Objekte im Anschluss wieder selektierbar und dementsprechend wieder frei positionierbar sind.

AUSBLICK

Das DigiGlue-System wurde im Herbst 2021 im Europäischen Kulturpark Bliesbruck-Reinheim [EKP] installiert. Die ersten Ergebnisse sind äußerst zufriedenstellend. Seit Aufnahme des Wirkbetriebs im Frühjahr 2022 wurden bis dato etwa 1.600 Fragmente digitalisiert und bereits einzelne Teilrekonstruktionen gebildet⁵.

Mit der Inbetriebnahme des DigiGlue-Systems werden seitens der Anwender zudem die gemeinsam im Entwicklungsprojekt definierten Workflows am Gerät evaluiert. Erst in der Routine des Wirkbetriebs können einzelne Parameter zur Optimierung der Workflows identifiziert und damit die Voraussetzungen zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Gesamtprozesses geschaffen werden. Hier beweist sich das Konzept des Projektes als Prototyp einer fortschreitenden Entwicklung als zielführend, da parallel zum Betrieb über die Perspektiven unmittelbar diskutiert werden kann. Nur so können Betriebs- und Arbeitsabläufe stetig optimiert werden, da technische und inhaltliche Weiterentwicklung sich gegenseitig bedingen. Hierzu gehören auch Zielstellungen künftiger Anwendungsfelder wie eine Erweiterung auf andere Malereikonvolute oder Materialgruppen.

Ganz oben auf der Wunschliste steht dabei eine zusätzliche Automatisierung des DigiGlue-Assistenzsystems durch eine automatische Auswertung beispielsweise von Farbmerkmalen der einzelnen Malereifragmente. Beim Basismodell erfolgt die Farbsegmentierung derzeit durch Abfrage der manuell eingegebenen Metadaten; zukünftig könnte das System dem Anwender hier automatisch Vorschläge unterbreiten.

Eine andere wünschenswerte Weiterentwicklung wäre, DigiGlue mit zusätzlichen Lumineszenzen zur nicht-invasiven und berührungsfreien Untersuchung der Maleroberflächen auszustatten. Wird momentan zwar mit römischer Wandmalerei gearbeitet, so ist das Gerät doch auch für Fragmente beispielsweise mittelalterlicher Malerei genauso geeignet. Die Untersuchung von mittelalterlicher Malerei erfolgt allgemein schon standardmäßig auch mittels spektraler Verfahren wie UV-Reflexions- oder Infrarotaufnahmen, die Hinweise zur Entstehung und Maltechnik liefern können⁶.

Da zukünftig auch an einen Standortwechsel von DigiGlue in andere Bundesländer oder über Grenzen hinweg gedacht wird, sind das Landesdenkmalamt des Saarlandes und die MFB MusterFabrik Berlin sehr am Austausch mit den Fachkolleginnen und -kollegen interessiert. Ziel soll es sein, anhand der vorliegenden Technik in den jeweiligen Projekten Grenzbereiche auszuloten und darauf aufbauend perspektivisch in Kooperationen gemeinsame Weiterentwicklungen zu realisieren.

⁵ Stand Juli 2022

⁶ Hier darf auf den aktuellen Artikel von Roland Lenz und Annette T. Keller hingewiesen werden: Photo-induzierte Lumineszenzen an Wandmalereien-Multispectral Imaging in der Praxis, in: Bildgebende Verfahren- Trends und Fallbeispiele zur zerstörungsfreien Untersuchung und Erhaltung von Kulturerbe, „Ich sehe was, was Du nicht siehst“, Beiträge des 14. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin/Brandenburg, Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums 61 [2021], 37-57

AUTOREN

NICOLE KASPREK, LDA LANDESDENKMALAMT DES SAARLANDES

Dipl. Rest. [FH] Nicole Kasparek studierte Restaurierung für archäologisches Kulturgut an der HTW Berlin. Nach ihrem Abschluss 1998 begann sie als Restauratorin am Rheinischen Landesmuseum Trier zu arbeiten, mit dem Schwerpunkt Restaurierung archäologischer Metalle. Neben der Mitarbeit an den vielen Ausstellungen des Museums war sie federführend an der Koordination der großen Landesausstellung „Konstantin der Große-Herrscher des römischen Imperiums“ 2007 beteiligt. Im Jahr 2009 übernahm Nicole Kasparek die Leitung der Restaurierungswerkstatt am Landesdenkmalamt des Saarlandes. Sie zeichnet seitdem konservatorisch verantwortlich für die Gesamtheit der archäologischen Funde des Saarlandes und die archäologische Sammlung des Museums für Vor- und Frühgeschichte, Stiftung Saarländischer Kulturbesitz.

n.kasparek@denkmal.saarland.de - www.denkmal.saarland.de

JAN SCHNEIDER, MFB MUSTERFABRIK BERLIN GMBH

Dipl.-Ing. Jan Schneider studierte Elektrotechnik an der TU Berlin und war im Anschluss viele Jahre am Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK tätig. Dort leitete er u.a. Projekte im Themengebiet der automatisierten virtuellen Rekonstruktion. Ein neuartiges, von ihm konzeptuell entworfenes und mitentwickeltes computergestütztes Rekonstruktionssystem wurde 2013 mit dem europäischen EARTO-Innovationspreis [European Association of Research and Technology Organisations] ausgezeichnet.

Seit 2020 ist Jan Schneider Entwicklungsleiter in der MFB MusterFabrik Berlin GmbH, einem jungen Unternehmen, das sich dem Erhalt und der Wiederherstellung von beschädigtem Kulturgut verschrieben hat. Die MusterFabrik ist ein Spezialist für die Entwicklung automatisierter IT-Systeme zur digitalen Konservierung von Kulturgütern sowie zur Wiederherstellung beschädigter Objekte. Für diesen Zweck entwickelt die MusterFabrik einerseits automatisierte Spezialscanner, mit deren Hilfe große Mengen fragiler Objekte gleichzeitig bestandsschonend und sehr performant digitalisiert werden können. Andererseits entwickelt die MusterFabrik Software-Assistenzsysteme zur Visualisierung, Annotierung, Rekonstruktion und Reposition großer Mengen digitalisierter Objekte.

Eines der aktuellen Anwendungsfelder der MusterFabrik ist bspw. die Wiederherstellung fragmentierter Archivbestände des Kölner Stadtarchivs, dessen Gebäude im Jahr 2009 eingestürzt ist. Hierfür hat die MusterFabrik die Scantechnik und ein Rekonstruktions-Assistenzsystem entwickelt, welche derzeit in Köln von den Mitarbeitern des Stadtarchivs zur digitalen Rekonstruktion der fragmentierten Archivalien eingesetzt werden.

jan.schneider@musterfabrik-berlin.de - www.musterfabrik-berlin.de