

Abschlussbericht

Augmented Reality als Rekonstruktionswerkzeug der Bauforschung.  
Interdisziplinäre Methodenentwicklung in den Mixed Realities am  
Beispiel der römischen Weltkulturerbestätten Triers

Dr.-Ing. Clemens Brünenberg



# 1. Allgemeine Angaben

- DFG-Geschäftszeichen: BR 6202/1-1
- Antragsteller: Dr.-Ing. Clemens Brünenberg
- TU Darmstadt  
Fachbereich Architektur  
Fachgebiet Klassische Archäologie  
El-Lissitzky-Str. 1  
64287 Darmstadt
- Augmented Reality als Rekonstruktionswerkzeug der Bauforschung. Interdisziplinäre Methodenentwicklung in den Mixed Realities am Beispiel der römischen Weltkulturerbestätten Triers
- Förderungs- / Berichtszeitraum: 01.11.2019 – 31.01.2022
- Liste der wichtigsten Publikationen aus diesem Projekt:
  - a) Brünenberg, C., Kim, M., Augmented Reconstruction in den Trierer Barbarathermen. Ein immersiver und kollaborativer Rekonstruktionsansatz für die archäologische Bauforschung, in: Funde und Ausgrabungen im Bezirk Trier 53, 2021 (Wiesbaden 2022), 52-60.
  - b) Andere Veröffentlichungen:
    - i. Brünenberg, C., Augmented Reconstruction. Interdisziplinäre Methodenentwicklung in den Mixed Realities für die historische Bauforschung. Vortragsmitschnitt auf der 28. Tagung des Arbeitskreises deutscher und polnischer Kunsthistoriker und Denkmalpfleger, 21.-23. Oktober 2021, Hochschule Mainz. Abrufbar unter <https://visuell-digital.de/>
    - ii. Brünenberg, C., Augmented Reconstruction. Projekttrailer abrufbar unter [https://www.archaeologie.architektur.tu-darmstadt.de/50\\_jahre\\_klassische\\_archaeologie/transit\\_startseite.de.jsp](https://www.archaeologie.architektur.tu-darmstadt.de/50_jahre_klassische_archaeologie/transit_startseite.de.jsp)

## 2. Arbeits- und Ergebnisbericht

### Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Im Projekt wurde als hauptsächliche Zielsetzung verfolgt, virtuelle 3D-Rekonstruktionen verlorener und vergangener Zustände historischer Gebäude erstmals mit dem heute erhaltenen Baubestand zu verknüpfen. Der technologische Zugang dieser neuartigen dreidimensionalen Rekonstruktionsmethodik für die historische Bauforschung und deren Nachbardisziplinen basierte auf den immersiven Techniken der Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR). Dabei wurden die Prämissen zugrunde gelegt, dass die Rekonstruktion über diesen Ansatz direkt am Objekt durchgeführt wird und die entstehenden Rekonstruktionsmodelle als Kommunikationsmedium zur interdisziplinären Erforschung der gebauten Umwelt dienen. Der Mehrwert an dieser Methode liegt dabei in der unmittelbaren Verbindung von realem und virtuellem Objekt sowie in der dezidiert vorgesehenen Möglichkeit, die virtuelle Rekonstruktion kollaborativ zu entwickeln.

Die Ausgangsfragen gliederten sich in zwei thematische Komplexe, einen methodischen und einen technischen. Methodisch sollten folgende Fragen bearbeitet werden:

*Wie verläuft die disziplinäre und interdisziplinäre Kommunikation über das fragmentierte, architektonische Objekt mithilfe dieses Ansatzes (M1)?*

*Ist eine Veränderung der Raumwahrnehmung durch diese Methodik erkennbar (M2)?*

*Welche Herausforderungen, Hindernisse und Grenzen gibt es dabei von Seiten der Benutzer\*innen?*

*Wie können sich die Feldforschung (M4) und Baudenkmalpflege (M5) mit dieser Methodik verändern?*

Durch die explizite Verwendung neuartiger Technologie stellten sich hier folgende Fragen:

*Wie kann die Interaktion mit virtuellen Hologrammen im realen Raum umgesetzt werden (T1)?*

*Wie können Modelle im Raum verankert, referenziert, gespeichert und geladen werden (T2)?*

*Welche Herausforderungen, Hindernisse und Grenzen gibt es dabei von Seiten der App-Entwicklung (T3)?*

Zur Umsetzung der Zielsetzung und Fragestellungen wurde die Stand-Alone-App *Augmented Reconstruction* für die AR-Brille Holo Lens 2 von Microsoft erarbeitet und erprobt. Für die App waren verschiedene Basiselemente des Modellierens vorgesehen, so z.B. einfache Manipulationen von Elementen (Bewegen, Drehen, Skalieren), Verankerungsmöglichkeiten im realen Raum und die Möglichkeit, vor Ort aufgenommene Bauteile in den Rekonstruktionsprozess zu integrieren. Zentral dabei war die Erarbeitung eines kollaborativen Arbeitsansatzes, mit dem die interdisziplinären Nutzer\*innengruppen während des Rekonstruierens zusammenarbeiten können. Dadurch sollten sich nicht nur Arbeitsabläufe optimieren, sondern vielmehr hat diese Kernfunktion den Zweck, die App *Augmented Reconstruction* als Werkzeug in der Generierung von Raum- und Konstruktionswissen in einem frühen Stadium der Bauwerkserforschung einzusetzen. Das vor Ort entstandene 3D-Modell sollte demnach als Kommunikationsmedium in genau diesen Forschungen behandelt werden.

Zur Weiterverarbeitung der Modelle nach den Forschungen vor Ort sollte ein Austauschmodul zwischen der AR und der VR entwickelt werden, das es ermöglicht, die Modelle auch standortunabhängig weiterzubearbeiten.

Die Erprobung und Weiterentwicklung der App *Augmented Reconstruction* war hauptsächlich an den Welterbestätten Triers geplant: Den Barbarathermen als fragmentiert erhaltenes Fallbeispiel, das neben dem Rekonstruktionsansatz gleichzeitig den Entwicklungsspielraum für Fragen zur Bau- und Bodendenkmalpflege zuließ, sowie der Porta Nigra als nahezu komplett erhaltenem Fallbeispiel. Hier sollten anhand vorhandener 3D-Rekonstruktionsmodelle die Möglichkeiten der Weiterverwendung innerhalb der App ausgelotet werden.

Das hier beschriebene Projekt hat starken Pilotcharakter, da mit diesem Ansatz grundsätzlich neue Arbeitsweisen mit ebenso neuer Technologie verknüpft werden sollten. Insbesondere die Verknüpfung der Rekonstruktion mit dem Forschungsobjekt und der kollaborative Ansatz könnten dabei eine große Wirkmacht für die interdisziplinäre Forschung zu vergangenen und verlorenen Bauzuständen haben.

## Entwicklung der durchgeführten Arbeiten

### *Darstellung der allgemeinen Organisationsabläufe im Projekt*

Die Arbeiten wurden am 01. November 2019 aufgenommen. Bereits im Vorfeld wurden die drei für die Projektarbeiten vorgesehenen studentischen Hilfskräfte (SHK) ermittelt. Neben einer erfolgreichen Initiativbewerbung konnten zwei SHK per Ausschreibung angeworben werden. Arbeitsbeginn und -tätigkeit der im Projekt tätigen SHK lässt sich wie folgt aufschlüsseln:

Lucas Cornelius (Architektur), 11/2019 – 10/2021, Tätigkeit: Erstellung der Bestandsmodelle in den Barbarathermen, Erstellung von Grundkörpern für die App *Augmented Reconstruction*, Hilfestellungen bei der Entwicklung der App, Test der AR-Anwendung

Sarah Cheikh-Ali (Architektur), 01/2020 – 10/2021, Tätigkeit: Erstellung der Bestandsmodelle in den Barbarathermen, Hilfestellungen bei der Entwicklung der App, Test der AR-Anwendung

Mahmoud Mhana (Informatik), 02/2020 – 12/2021, Tätigkeit: Programmierung, Entwicklung und Debugging der App *Augmented Reconstruction* in Unity

Zur Klärung programmatischer wie organisatorischer Fragen wurden wöchentlich stattfindende Treffen der gesamten Projektgruppe festgelegt, die in den ersten Projektmonaten an der TU Darmstadt stattfanden und ab März 2020 pandemiebedingt in den virtuellen Raum verlegt wurden. Im ersten Projektjahr wurde die Struktur der wöchentlichen Treffen mit einem kurzen Statusbericht vonseiten aller Projektbeteiligten fortgeführt, im zweiten Projektjahr änderte sich der Turnus auf ein virtuelles Treffen im zweiwöchentlichen Rhythmus. Trotz leicht verbesserter Pandemielage ab Sommer 2021 wurden die Projekttreffen weiterhin virtuell durchgeführt, um einerseits die digitalen Fortschritte im Projekt mit den digitalen Möglichkeiten virtueller Treffen zu verknüpfen und andererseits unnötig lange Anfahrtszeiten vonseiten der Projektbeteiligten zu vermeiden.

Nach einer Einarbeitungszeit für die SHKs wurde in Abhängigkeit von den gewünschten methodischen Effekten mit der detaillierten Konzeption der App *Augmented Reconstruction* begonnen. Dafür wurden zunächst mehrere Ablaufdiagramme erstellt, Minimal- und Maximallösungen aufgezeigt und Prioritäten in der Integration der gewünschten Funktionen erstellt. Zur besseren Projektstruktur wurden vor allem für die Entwicklung von *Augmented Reconstruction*, aber auch für das Gesamtprojekt in Bezug auf die methodischen wie technischen Fragestellungen Milestones gesetzt. Diese gliederten sich in 7 Teile:

- a) Festlegung der verwendeten Software, Programmier- und Arbeitsumgebung im ersten Projektmonat nach Komplettierung der Projektgruppe
- b) Ausarbeitung der methodischen und technischen Konzeption bis März 2020
- c) Nach Eintreffen der AR-Brille Holo Lens 2: Festlegung der softwarebezogenen Bedarfe und Abschluss der allgemeinen Tests bis Sommer 2020 (Fragestellung T1); erste Kampagne in Trier mit Bauaufnahme und Brillentest
- d) Release der ersten Testversion bis zum Ende des ersten Projektjahres: Integration der ersten Objekte und Manipulationswerkzeuge sowie des Kollaborationstools (Fragestellung M1-2)
- e) Release der zweiten Testversion bis April 2021: Debugging, Weiterentwicklung des Codes, Integration der räumlichen Verankerung der Objekte (Fragestellung T2); zweite Kampagne in Trier mit Bauaufnahme und ersten Modellierungen (Fragestellung M1-5)
- f) Release der dritten Testversion bis August 2021: Debugging, Weiterentwicklung des Codes, Weiterentwicklung der Manipulationswerkzeuge, Integration von Managementwerkzeugen (Löschen von Objekten, Speichern/Laden); dritte Kampagne in Trier mit weiteren Modellierungen (Fragestellung M1, M4-5)
- g) Release der letzten Testversion bis Ende der beantragten Projektlaufzeit Oktober 2021: Debugging, Integration aller gewünschten Werkzeuge

Das Einsetzen der weltweiten Pandemie und deren Auswirkungen in Deutschland ab Mitte März 2020 nahm Einfluss auf die Entwicklung des Projektes sowie die gesetzten Milestones, so dass die zu Projektbeginn gesteckten Milestones angepasst werden mussten. Das Erreichen der Projektziele wurde durch

die Gewährung einer dreimonatigen kostenneutralen Laufzeitverlängerung ermöglicht, das Ende des Projektes verschob sich dadurch von Ende Oktober 2021 auf Ende Januar 2021. Im Folgenden werden die Ausarbeitung der App *Augmented Reconstruction* und die angepassten Feldarbeiten in der Projektlaufzeit beschrieben und pandemiebedingte wie organisatorische, bzw. programmatische Abweichungen erläutert.

#### *Darstellung des Aufbaus, der Gliederung und Entwicklung von Augmented Reconstruction*

Mit dem Beginn des Projektes wurden alle für das erste Projektjahr relevanten und bewilligten Geräte beschafft. Diese umfassten die Workstation inkl. Monitor und Zubehör, den Laptop für die Feldarbeiten, die Kamera nebst Objektiv sowie eine Drohne für die SfM-Modellierung des Bestandes in den Barbarathermen und eine VR-Brille. Bei der Beschaffung des zentralen Arbeitsgegenstandes zur Entwicklung der App und der Methodik, der AR-Brille Holo Lens 2 von Microsoft, kam es zu erheblichen Verzögerungen. Zur Zeit der Antragseinreichung (April 2019) war der offizielle Release der Hardware von Microsoft für Mai desselben Jahres angekündigt. Dieser verzögerte sich aufgrund technischer Entwicklungen bis zum endgültigen Verkaufsstart in den USA am 07. November 2019. Der deutsche Verkaufsstart wurde auf frühestens Frühling 2020 terminiert. Aus diesen Gründen entschied sich die Projektleitung, das bereits erhältliche Modell XR10 der Firma Trimble zu beschaffen, eine Holo Lens 2 mit integriertem Bauhelm. Dies erwies sich im Laufe des Projektes mehrfach als Vorteil, da das Equipment sowohl für den Außenbereich als auch explizit für Baustellen tauglich ist. Aufgrund der in der Frühzeit der Pandemie stockenden Lieferketten wurde die Hardware schließlich erst Ende April 2020, ein halbes Jahr nach Projektbeginn, geliefert.

In der Zwischenzeit wurden die Milestones (a) und (b) abgeschlossen. Als Umgebungsplattform zur Entwicklung der App wurde Unity gewählt, die Grundfunktionalität des Arbeitens in der Augmented Reality wurde über das Mixed Reality Toolkit (MRTK, Microsoft) abgedeckt, alle weiteren Klassen wurden in C++ programmiert. Diese Entscheidungen fielen vor allem aufgrund der Flexibilität, die Unity in der Appentwicklung bietet sowie aufgrund der Vorerfahrungen der eingestellten SHK M. Mhana. Die Daten- und Kommunikationsstruktur im Projekt bildete sich auf mehreren Ebenen ab. Allgemeine Projektdaten, SfM-Modellierungen und Bilddaten wurden über das Cloudsystem des Fachbereichs Architektur an der TU Darmstadt der Projektgruppe zugänglich gemacht und systembedingt einmal wöchentlich gespiegelt. Zum Austausch der App-Stände, des Codes und der Unityumgebung wurde *TortoiseGit* verwendet. Die Kommunikation, Aufgabenverteilung und Projekttagbuchführung wurde über Trello verwaltet. Dies erwies sich vor allem ab der Pandemiezeit als überaus praktikabel. Im Projekt wurde nicht mehr auf das Ende 2021 am Fachbereich Architektur eingeführte Cloudsystem Nextcloud umgestellt, das alle beschriebenen Funktionalitäten vereint. Für Folgeuntersuchungen böte sich dieses universitätsgehostete System jedoch an.

Die Funktionen und das *Graphical User Interface* (GUI) der App *Augmented Reconstruction* selbst wurde möglichst einfach und allgemeinverständlich in drei strukturelle Ebenen gegliedert: Das Hauptmenü, die Bibliothek mit Bauteilen und die Arbeitsebene. Im Hauptmenü werden alle organisatorischen Dinge angeboten wie neue Szenen zu erstellen, alte Szenen zu laden und Modelle zu im- oder exportieren. Das Bibliotheksmenü erscheint nach der Erstellung einer neuen Szene oder dem Laden einer alten Szene. In der Bibliothek sind alle im Projekt, bzw. in der App vorhandenen Bauteile gespeichert und mit einem Vorschaubild versehen. Die Bauteilbibliothek wird derzeit nicht in der App direkt verwaltet, sondern über Unity. Dort werden neue Instanzen für Bauteile, bzw. allgemeiner gefasst 3D-Modelle, erstellt und mit der nächsten Aktualisierung in die App integriert. Die 3D-Modelle wiederum generieren sich aus einfachen Baukörpern wie Quadern, Zylindern und Kugeln und spezialisierten, allgemeingültigen Bauteilen sowie SfM-Modellen des Bestands. Die Allgemeingültigkeit der Bauteile bezog sich im vorliegenden Projekt auf thermenspezifische und römische Bauteile wie Hypokaustpfeiler, Tubuli, allgemeine Säulenordnungen und andere wiederkehrende, normierte Bauteilformen. Die Zukunftsperspektive der Anwendung ist allerdings, die Bauteilbibliothek deutlich zu erweitern, so dass ein aussagekräftigeres Formenspektrum zugrunde liegt und über Befunde vor Ort erweitert werden kann. Die Grundkörper wie spezialisierten Bauteile wurden von den SHKs in Rhino modelliert, die SfM-Modelle in Agisoft Metashape erstellt. Alle Modelle wurden als FBX-Dateien exportiert. Dieses offene Dateiformat findet ebenso Verwendung in *Augmented Reconstruction*.

Im Folgenden soll der Entwicklungsprozess der App skizzenhaft geschildert werden. Alle Haupt- und Zwischenreleases wurden versioniert und dokumentiert und stehen im Datenrepositorium der TU Darmstadt (siehe unten) zur Verfügung.

Bis zur Lieferung der tatsächlichen Hardware Ende April 2020 konnten Softwaretests bereits mit dem von Microsoft zur Verfügung gestellten AR-Emulator in Unity durchgeführt werden. Ab Mai 2020 schlossen sich erste intensive Praxistests mit der Holo Lens 2 an. Trotz des vorhandenen Emulators, einer Vorgängerversion der Brille sowie verschiedener Ankündigungsvideos wurden erst dadurch die genauen Spezifikationen wie Sichtfeld, Polygonkapazität, Interaktion mit der realen Umgebung und genauere Softwareumgebung verlässlich ermittelt. Die Tests zur Entwicklung der im Projekt skizzierten Methodik umfassten vor allem die Be- und Auslastung der Brille mit SfM-Modellen im internen Speicher sowie die Stabilitäts- und Praktikabilitätstests mit großen SfM-Modellen über externe Server mittels *Holographic Remoting* (Fragestellung M3). Während letztere zwar visuell beeindruckend ist, ist die Verwendung hochauflösender Modelle über Cloudserver oder lokale Workstations in der anvisierten Feldarbeit wenig zielführend. Umso erfreulicher waren die Testergebnisse mit intern verwendeten SfM-Modellen. Hier konnten Modelle mit bis zu 800.000-1.000.000 Polygonen mit nur einer leichten, nicht beeinträchtigenden Latenz verwendet werden. Da die meisten in der Rekonstruktion verwendeten Modelle allerdings bedeutend geringere Polygonanzahlen aufweisen (z.B. bei einem Quader mit sechs Polygonen könnten über 100.000 Quader genutzt werden, bevor es zu größeren Einschränkungen käme), konnte der Milestone (c) soft- und hardwareseitig bereits im Mai 2020 positiv abgeschlossen werden. Im direkten Anschluss wurden im Juni 2020 erste Tests mit dem noch nicht operablen Vorläufer der App *Augmented Reconstruction* erstellt, um den Abgleich zwischen Emulatortests und der Runtimeumgebung auf der Brille herzustellen (AugRec Versionen 0.0.1.0 bis 0.0.6.0). Mit der Version 0.0.6.0 gab es schließlich eine erste auf der Holo Lens 2 lauffähige App, mit der ein vorgefertigter Quader angezeigt werden konnte.

Von Juli bis November 2020 wurden schließlich neben kleineren Änderungen am GUI der App die unterschiedlichen Klassen zur Interaktion und Manipulation von holografischen Objekten im realen Raum programmiert. Aufgrund der Verzögerungen in der Brillenbeschaffung konnte dieser Milestone (d) nicht wie anvisiert Ende Oktober fertiggestellt werden, eine erste komplett operable Version 1.0.0.0 der App *Augmented Reconstruction* konnte jedoch Anfang Dezember 2020 erstellt und an der Darmstädter Stadtmauer getestet werden (siehe unten). Diese App-Version umfasste mehrere spezialisierte Bauteile sowie alle Manipulationswerkzeuge in einer ersten einfachen Version. Die Bauteile konnten frei im Raum platziert und über die *Bounding Boxes* der Modelle bewegt, gedreht und skaliert werden.

In der Folge der nächsten Monate Anfang 2021 wurde der Fokus zunächst auf verschiedene Varianten der präzisen Referenzierung und Platzierung der erstellten Szene gelegt. Als praktikabelste Variante erwies sich die Verwendung zuvor generierter QR-Codes einer Größe von ca. 20x20 cm. Zur korrekten und präzisen Referenzierung, bzw. Speicherung der Rekonstruktionsszene müssten diese QR-Codes temporär während den Forschungsarbeiten oder dauerhaft am, bzw. in der Nähe des Untersuchungsobjektes ähnlich zu Vermessungspunkten angebracht werden. In der App selbst wurde eine Schnittstelle zur Umgebungserkennung der Holo Lens 2 integriert, die zur Verortung des QR-Codes kurzfristig aktiviert werden kann. Eine langfristige Aktivierung, die einen Arbeitsschritt ersparen würde, wurde erprobt, jedoch verworfen, da diese sowohl zu Problemen in der Hologrammerkennung der Bauteile als auch zu erheblicher Akkureduzierung führte. Daneben wurde vorwiegend an der Stabilität der Modellierwerkzeuge und der holografischen Modelle selbst gearbeitet. Die Ergebnisse, gleichzusetzen mit Milestone (e), mündeten im Mai 2021 in der zweiten operablen Version 1.1.0.0 von *Augmented Reconstruction*. Diese umfasst neben der Szenenreferenzierung eine wesentlich stabilere Arbeitsumgebung als noch in der ersten Version. Rekonstruktionstests sowie weitere Funktionstests der App und Brille wie Reichweitentests, Höhentests, etc. wurden pandemiebedingt im Außenbereich des Fachbereichs Architektur der TU Darmstadt durchgeführt.

Bis zum letzten größeren Release der App vor dem Projektende konzentrierten sich die Arbeiten im Wesentlichen auf die Verbesserung der Manipulationswerkzeuge. Während diese bisher prinzipiell einsetzbar, aber wenig präzise waren, wurden auch hier wieder verschiedene Varianten der präziseren Bearbeitung der Bauteile erarbeitet. Dabei spielten vor allem zwei Faktoren eine wesentliche Rolle:

Eine möglichst einfache Menüführung, die das enge Sichtfeld durch die Brille nicht noch mehr einschränkte, sowie ein hoher Grad an Präzision. Besonders wichtig ist dies bei den Bearbeitungsschritten des Drehens und Skalierens der Objekte. Die Entscheidung fiel schließlich auf eine Kombination aus Schiebereglern und iterativen Schritten. In beiden Bearbeitungsprozessen ist dabei jede Achse einzeln ansprechbar, um einen hohen Grad an Präzision des 3D-Modellierens im realen Raum zu gewährleisten. Diese dritte operable Version 1.2.0.0 der App wurde gemäß Milestone (f) im November 2021 fertiggestellt und in den Barbarathermen ausgiebig getestet. Kleinere Bugs wurden in den verbleibenden Monaten der verlängerten Projektlaufzeit bis Ende Januar 2022 behoben und die letzte veröffentlichte Version der App 1.2.2.0 dokumentiert.

In der Entwicklung der App *Augmented Reconstruction* gab es bis zur letzten Version 1.2.2.0 diverse Abweichungen vom ursprünglichen Konzept, die teilweise auf pandemiebedingte Verzögerungen, vor allem aber auf softwaretechnischen Anpassungsbedarf während der Entwicklung zurückzuführen sind. Im werkzeugbezogenen Teil der App wurde dabei auf die Integration von Bool'schen Operationen (Vereinigung, Differenz, Schnitt von Objekten) verzichtet, da sich diese als nicht operabel genug in der AR-Umgebung der Holo Lens 2 erwiesen. Im organisatorischen Teil der App konnten bis zum letzten Release auf verschiedene Managementfunktionen wie Ebeneneinteilungen, Sortierfunktionen, etc. nicht mehr umgesetzt werden. Diese für die intuitive Benutzung der App sinnvollen Funktionen sind für die Arbeiten an der App nach Projektende geplant. Weiterhin konnte die letzte Version 1.2.2.0 nicht in Gänze bis Projektende einem intensiven Debugging unterzogen werden, weswegen kleinere Fehler im Handling der App noch vorhanden sind. Auch hier wird die Arbeit daran fortgesetzt. Dabei ist festzuhalten, dass durch den neuartigen methodischen wie technischen Ansatz des Projektes in der Beantragung und Planung der Zeitbedarf für die Programmierarbeiten an der App selbst nur grob beziffert werden konnte. Dies lag vor allem daran, dass es für diese Tätigkeiten in der Mixed Reality, insbesondere in der Umgebung der Holo Lens 2 bei der Beantragung noch unzureichende Erfahrungswerte in den Fachcommunities gab. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass das Arbeitsprogramm mit den beantragten Kräften und Kompetenzen trotz der geschilderten Verzögerungen sehr gut bewältigt werden konnte, die Gesamtstruktur der Appentwicklung und deren inhaltlicher Detailtiefe mit einem stärkeren Gewicht auf eine zusätzliche Stelle aus der Informatik sicherlich weiter und umfangreicher hätte ausgefüllt werden können. Dies wird in der geplanten Folgeuntersuchung (siehe dort unter „Darstellung der erreichten Ergebnisse“) weitaus stärker berücksichtigt.



Augmented Reconstruction. Modellierung eines Pfeilers in den Barbarathermen in Trier. Am rechten Bildrand erkennt man die Schieberegler zum Skalieren aller drei Achsen.

Entgegen der ursprünglichen Konzeption konnten allerdings auch Weiterentwicklungen verzeichnet werden. So ist vor allem die relativ einfach zu handhabende QR-Codierung für die Referenzierung der Szenen genauso zu nennen wie die Integration basaler Hardwarefunktionen wie dem Umgebungsscan.

Die größte Änderung am Gesamtkonzept ergab sich schließlich nahezu zeitgleich mit dem Projektende. Seit dem ersten Quartal 2022 kann, trotz fehlender Bestätigung von offizieller Seite, mit einiger Sicherheit davon ausgegangen werden, dass Microsoft die Entwicklung reiner AR-Brillen aller Voraussicht nach nicht weiterverfolgen wird. Somit würde einer der wenigen Hersteller dieser Brillen diesen Zweig verlassen. Gleichzeitig wurde jedoch bekannt, dass mehrere Firmen (darunter Apple und ein Joint Venture aus Microsoft und Samsung) am baldigen Release von sog. See-Through-Brillen, bzw. Video-AR-Brillen arbeiten. Zur Einordnung dieser Entwicklung für das hier skizzierte Projekt siehe Abschnitt *Anwendungsperspektiven und Folgeuntersuchungen* unter „Darstellung der erreichten Ergebnisse“.

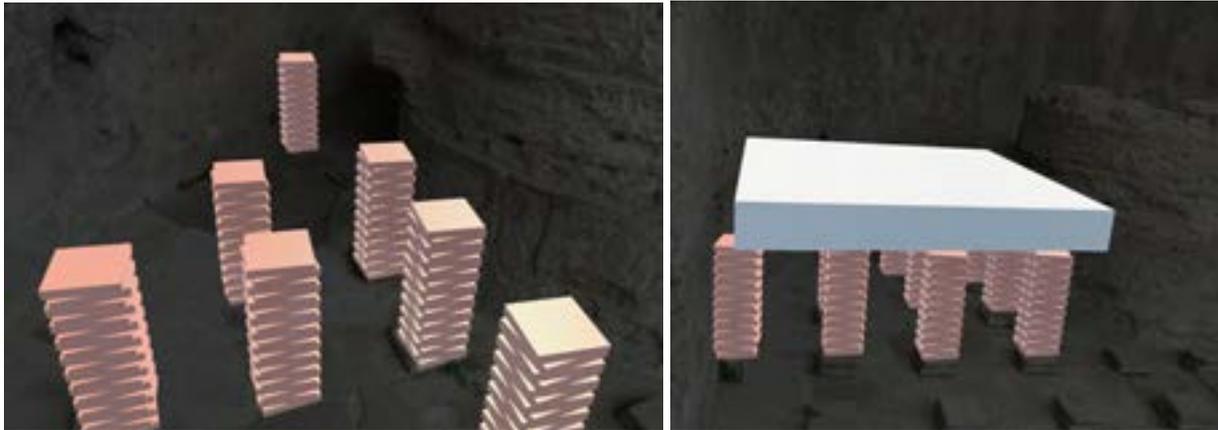
#### *Darstellung der durchgeführten Feldarbeiten*

Laut Projektkonzeption waren insgesamt drei Feldarbeitskampagnen von ein bis zwei Wochen Dauer in Trier geplant. Eine erste Vorbereitungsreise für diese Kampagnen fand Ende Januar unter Beteiligung von C. Brünenberg, M. Kim, L. Cornelius und S. Cheikh-Ali statt. Zusammen mit K.-U. Mahler, Kooperationspartner des Projektes im Rheinischen Landesmuseum Trier, wurden die geplanten Arbeiten in den Barbarathermen abgesprochen und gemeinsame Ziele des Projektes sowie mögliche Potentiale der App *Augmented Reconstruction* für die historische Bauforschung, Baudenkmalpflege und Archäologie diskutiert. Die Feldarbeiten waren ursprünglich für Sommer 2020 sowie Frühjahr und Sommer 2021 terminiert. Aufgrund der pandemiebedingten Dienstreiseverbote an der TU Darmstadt mussten deutliche Änderungen in der Durchführung der Feldarbeiten vorgenommen werden. Alle Tests der ersten Versionen der App *Augmented Reconstruction* wurden daher unter Einhaltung der jeweils geltenden Regelungen zum Infektionsschutz in Darmstadt selbst durchgeführt. Die Arbeiten in Trier mussten zunächst auf ein unbekanntes Datum verschoben werden.

Dementsprechend wurden vor allem die ersten Vorarbeiten mit der AR-Brille im Mai 2020 weitestgehend allein von C. Brünenberg im Homeoffice innerhalb der wöchentlich stattfindenden virtuellen Projekttreffen durchgeführt. Die erste operable App-Version 1.0.0.0 wurde im Dezember 2020 von C. Brünenberg und M. Kim an der mittelalterlichen Stadtmauer in Darmstadt intensiv getestet. Dabei wurden insbesondere die methodischen Fragestellungen M2-M4 betrachtet und einem ersten Praxistest unterzogen. Neben einem Bugreport und schriftlichen Aufzeichnungen zu den Auswirkungen dieses neuen methodischen Ansatzes auf die Raumwirkung und die Feldforschung wurde hier und in allen weiteren Feldversuchen vor allem ein Video-Log geführt, um die auf der Brille durchgeführten Aktionen visuell sicht- und abbildbar zu machen. Alle entstandenen Videos sind auf der der Homepage des [Fachgebiets Klassische Archäologie der TU Darmstadt](#) einsehbar.

Die Tests zur zweiten Version 1.1.0.0 der App wurde aufgrund der anhaltend schlechten Pandemiesituation im Mai 2021 ebenso in Darmstadt getestet. Durchgeführt wurde dies im Außenbereich des Fachbereichs Architektur an der TU Darmstadt. Im Gegensatz zu den vorherigen, rein funktionalen Tests wurde hier erstmals eine bauliche Struktur modelliert. Die entstandene Bogenstruktur sollte ebenso vor allem der Funktionsweise der App und deren erhoffter Änderung in der Raumwahrnehmung (Fragestellung M2/M3 sowie T1-3) dienen.

Nach der allgemeinen Verbesserung der pandemischen Lage im Sommer 2021 konnten schließlich im August 2021 erste Feldarbeiten in Trier durchgeführt werden. Die Arbeiten wurden unter Leitung von C. Brünenberg von L. Cornelius und S. Cheikh-Ali durchgeführt, M. Kim übernahm die weiteren Praxistests mit der App *Augmented Reconstruction*. Aufgrund des deutlich verzögerten Beginns der Feldtätigkeiten wurde zusammen mit den Kooperationspartnern des Rheinischen Landesmuseums Trier beschlossen, sich in der Bauaufnahme auf die erhaltenen Servicegänge im Untergeschoss der Thermenanlage zu konzentrieren. Von insgesamt zehn Gangabschnitten und zwei Heizräumen konnten in dieser Kampagne drei Abschnitte sowie beide Heizräume dokumentiert und ausgewertet werden. Weiterhin wurden die Substruktionen des zentralen Tepidariums mit in die Bauaufnahme eingeschlossen. Die Auswahl auf diese speziellen Teile der Gesamtanlage begründete sich darin, dass die Original-



Augmented Reconstruction. Teilrekonstruktion des Hypokaustums der Stabianer Thermen in Pompeji.

substand insbesondere in den Gängen und Heizräumen noch sehr gut erhalten war und somit direkt an diese mit der virtuellen Rekonstruktion angeschlossen werden konnte. Gleichzeitig schließen sich sowohl in den Gängen als auch in den Tepidariumssubstruktionen Tunnelsystem für das Abwasser an, deren genauer Verlauf und Erforschung noch ein Forschungsdesiderat darstellt. Die Praxistests mit der App *Augmented Reconstruction* wurden vor allem in einem der beiden aufgenommenen Heizräume durchgeführt, um den bereits in Darmstadt aufgenommenen Fragestellungen zur Praktikabilität der App in der Feldforschung, der Machbarkeit des methodischen Ansatzes und der veränderten Raumwahrnehmung weiter nachzugehen.

Im Anschluss an die erste Kampagne in Trier reiste C. Brünenberg nach Berlin, um dort mit den Kooperationspartnern des Architekturreferats an der Zentrale des Deutschen Archäologischen Instituts den Fortgang der Entwicklungen an der App und die Integration der bestehenden Rekonstruktionsmodelle der Porta Nigra zu besprechen. Aufgrund der pandemiebedingten Verzögerungen bei den Feldarbeiten wurde beschlossen, diese Modelle zunächst nicht in die App zu integrieren, dies aber im Laufe des Jahres 2022 nach Abschluss der Projektlaufzeit nachzuholen.

Eine zweite Feldforschungskampagne wurde in Trier schließlich zu Beginn der kostenneutralen Verlängerung im November 2021 durchgeführt. L. Cornelius und S. Cheikh-Ali nahmen die sieben ausstehenden Gangabschnitte auf, die im August 2021 umgeplanten, projektierten Arbeiten konnten innerhalb der drei zur Verfügung stehenden Tage erfolgreich abgeschlossen werden. Gleichzeitig wurden von C. Brünenberg und M. Kim die Rekonstruktionsarbeiten mit der App *Augmented Reconstruction* weitergeführt. Dabei standen vor allem die Tests der neu integrierten präzisen Manipulationswerkzeuge im Vordergrund. Im Anschluss an die Feldarbeiten wurden die Ergebnisse des Projektes in methodischer wie technischer Hinsicht auf dem zweitägigen Forschungskolloquium des Rheinischen Landesmuseums Trier vorgestellt und diskutiert.

Aufgrund der ab März 2020 durch die Pandemie veränderten Voraussetzungen wurden im Laufe des Frühjahrs 2021 neben Trier weitere Case Studies für den Praxistest der App und Methodik evaluiert. Bei der Auswahl waren diejenigen Kriterien wichtig, die nicht in Trier selbst erfüllt werden konnten: Die Durchführung eines Praxistests während einer laufenden Ausgrabung sowie die Erprobung des kollaborativen Ansatzes in einem laufenden Forschungsprojekt mit möglichst vielen interdisziplinären Partnern. Zutreffend war dies in Pompeji (Stabianer Thermen, Projekt „Entwicklung der Badekultur in Pompeji: Stabianer Thermen“, Projektleitung Prof. Dr. M. Trümper, FU Berlin, [GEPRIS-Link](#)) und Ostia (Casa delle Ierodule, Projekt „The ‘Case a Giardino’ in Ostia - archaeological context and virtual archaeology“, Projektleitung Dr. P. Ruggendorfer, Österreichische Akademie der Wissenschaften, [FWF-Link](#)). In beiden Projekten ist C. Brünenberg als Kooperationspartner involviert. Der methodische Test in Pompeji wurde von C. Brünenberg und M. Kim während der Feldarbeitskampagne der Berliner Kolleg\*innen im September 2021 durchgeführt. Dabei wurde testweise ein Abschnitt der Hypokaustanlage des Männercaldariums der Stabianer Thermen rekonstruiert. Gleichzeitig konnten die Mauerzüge mehrerer tagesaktuell ausgegrabener Fundamente kollaborativ rekonstruiert werden.

### *Vorträge und Workshops während der Projektlaufzeit*

C. Brünenberg, „Augmented Reconstruction. Bauhistorische Methodenentwicklung zur 3D-Rekonstruktion vor Ort“, Onlinevortrag am Architekturreferat an der Zentrale des Deutschen Archäologischen Instituts, „Werkstattgespräch über 3D-Modelle als Werkzeuge in der Denkmalpflege und im Kulturerhalt“, 17.12.2020

C. Brünenberg, „Augmented Reconstruction. On Introducing a new Reconstruction Method for Cultural Heritage Sites Using Mixed Realities“, Onlinevortrag auf der Tagung „Digital Approaches to Art History and Cultural Heritage“, University of Oxford and Durham University, 04.03.2021

C. Brünenberg, „Augmented Reconstruction. Interdisziplinäre Methodenentwicklung in den Mixed Realities für die historische Bauforschung“, Vortrag auf der Tagung „Visualisierung historischer Zustände im digitalen Zeitalter – Chancen und Risiken für Kunstgeschichte und Denkmalpflege“, Hochschule Mainz, 26.10.2021

C. Brünenberg, M. Kim, „Augmented Reconstruction. Virtuelle Live-Rekonstruktion an den Barbarathermen in Trier“, Vortrag im Archäologischen Kolloquium des Rheinischen Landesmuseums Trier, 04.11.2021

### *Vorträge und Workshops nach Ende der Projektlaufzeit, akzeptierte Paper*

C. Brünenberg, (TU Darmstadt) M. Kim (HS Mannheim), G. Kozicz (TU Graz), Workshop „Visualisierung von Metadaten historischer Architektur“, 03.-05.05.2022, Rheinisches Landesmuseum Trier / TU Darmstadt. Das Ziel des Workshops ist der Abgleich der technisch-methodischen Struktur der Projekte „Augmented Reconstruction“ (TU Darmstadt, DFG) und „Chambra Architecture“ (TU Graz, FWF) im Hinblick auf die Verwendung von 3D-Modellen als heuristische Forschungswerkzeuge. Der Workshop wurde bereits im Frühjahr 2020 im Rahmen der strategischen Partnerschaft der Universitäten Darmstadt und Graz gestellt und musste pandemiebedingt mehrfach verschoben werden.

C. Brünenberg, „Augmented Reconstruction. Entwicklung einer feldbasierten 3D-Rekonstruktion zur interdisziplinären Zusammenarbeit in Bauforschung und Archäologie“, Vortrag im Workshop „Neues Sehen. Aktuelle Ansätze der Digitalen Archäologie in der Objekt- und Bildwissenschaft“, Universität Trier, 21.05.2022

C. Brünenberg, „Augmented Reconstruction. Interdisziplinäre Methodenentwicklung für die historische Bauforschung“, Vortrag auf der 52. Tagung für Ausgrabungswissenschaft und Bauforschung der Koldewey-Gesellschaft, Straßburg, 26.05.2022 (Publikation für 2023 geplant)

## **Darstellung der erreichten Ergebnisse**

### *Darstellung der erreichten Ergebnisse in Hinblick auf die technischen Fragestellungen und Umgang mit den erzielten Forschungsdaten*

Trotz der zuvor geschilderten Verzögerungen und Anpassungen in der App-Entwicklung konnten für nahezu alle technisch konnotierten Fragestellungen Lösungen, bzw. Lösungsansätze gefunden werden. Als eine der erwartbar großen Hürden aus technischer Sicht stellte sich die Fragestellung zur Interaktion mit virtuellen Hologrammen im realen Raum (T1) heraus. Dabei konnte nicht von bisher bekannten AR-Anwendungen ausgegangen werden, die zum überwiegenden Teil auf die reine Visualisierung vormodellierter Hologramme ausgelegt sind. So sind beispielsweise auch in der explizit auf die Anwendung im architektonischen und konstruktiven Bereich ausgelegte AR-Anwendung *TrimbleConnect*, die mit dem hier verwendeten Holo Lens 2-Modell XR10 mitgeliefert und intensiv getestet werden konnte, keine Modellierwerkzeuge vorgesehen. Vielmehr verläuft auch in dieser Spezialanwendung die Erstellung der Modelle über konventionelle Methoden (in diesem Falle Erstellung in SketchUp, danach Upload auf die Brille). Nicht nur aus diesem Blickwinkel ist die Entwicklung der im vorliegenden Projekt entwickelten App *Augmented Reconstruction* trotz kleinerer Abweichungen und Unfertigkeiten in der letzten Version als gelungen und überaus zufriedenstellend zu bewerten. Die grundlegenden Ziele, namentlich die Modellierung virtueller Modelle im realen Raum, wurden erstmals in einer architekturbezogenen App umgesetzt und vollumfänglich erreicht. Ebenso ist es möglich, die virtuellen Modelle im

realen Raum zu verankern und somit Szenen wiederherstellen und weiterhin bearbeitbar zu machen. Diese basalen Elemente der dreidimensionalen Modelliertätigkeit bilden die entscheidende technische Grundlage für jegliche Rekonstruktionsarbeiten in der Augmented Reality.

Herausforderungen und Hindernisse wurden im Projekt vor allem durch die Neuartigkeit der verwendeten AR-Technologie spürbar. Wo für viele andere MR-Technologien (z.B. jegliche VR-Anwendungen) bereits auf weitreichende Expertise, Fachpersonal oder Foren zurückgegriffen hätte werden können, fehlte für die Anwendung und Entwicklung von Apps für die Holo Lens 2 schlicht solche Expertise. Diese wurde im Rahmen des Projektes weitreichend erarbeitet und dokumentiert. Derzeit läuft die Veröffentlichung der Dokumentation als Glossar über die Webseiten des Fachgebiets Klassische Archäologie.

Alle Versionen von *Augmented Reconstruction* inkl. der erarbeiteten Klassen sind mit einer CC-BY-Lizenz über TU-GitLab sämtlichen Nutzer\*innen mit GitHub-Authentifizierung frei zugänglich.

#### *Darstellung der erreichten Ergebnisse in Hinblick auf die methodischen Fragestellungen*

Über die ab dem zweiten Projektjahr und bis zum Projektende im Januar 2022 regelmäßig an den verwendeten Case Studies durchgeführten Praxistests konnte die neuartige Methodik des 3D-Rekonstruierens im Feld erarbeitet und für verschiedene Anwendungsszenarien auf ihre Durchführbarkeit, Praktikabilität und Zukunftsfähigkeit überprüft. Dabei ist insbesondere für die Feldforschung der historischen Bauforschung und ihrer Nachbardisziplinen (Fragestellungen M4/5) ein fundamentaler Fortschritt zu verzeichnen. Hier waren stets Begehung, Dokumentation, Analyse und Erforschung untrennbar mit dem tatsächlichen Forschungsgegenstand, dem architektonischen Objekt selbst, verbunden, die 3D-Rekonstruktion jedoch grundsätzlich getrennt davon. Mit dem vorliegenden methodischen Ansatz wird nun dieser letzte entscheidende Schritt zum bauhistorischen Verständnis eines Gebäudes ebenso wie die vorherigen Schritte direkt mit diesem verknüpft. Die 3D-Rekonstruktion dient dabei als Arbeits- und Kommunikationswerkzeug interdisziplinärer Forschung (Fragestellung M1). Insbesondere bei fragmentiert erhaltenen Gebäudezuständen wie antiker Architektur spielt die gemeinsame Sprache und Terminologie eine wichtige Rolle. So ist es für das gemeinsame Verständnis wichtig, dass in disziplinären wie interdisziplinären Forscher\*innengruppen über dieselbe Mauer, dieselbe Höhe, dieselbe Rekonstruktionsidee etc., d.h. die selbe bauliche Situation gesprochen wird. Mit dem methodischen Ansatz der *Augmented Reconstruction* wird eine Rekonstruktionsdiskussion nicht nur in einem frühen Stadium der Forschung möglich, sondern ermöglicht es auch, die Rekonstruktion gemeinsam in einem tatsächlich kollaborativen Prozess durchzuführen. Insbesondere die in Pompeji durchgeführten Tests, in denen deutsche Bauforscher\*innen und Archäolog\*innen mit italienischen und englischen Archäolog\*innen zusammen an den Rekonstruktionen arbeiteten, zeigte das Potential des Ansatzes auf, Raum bereits während laufenden Feldforschungen konkreter wahrzunehmen (Fragestellung M2). Dabei fielen zwei Punkte besonders auf: Durch die abstrakt weiß (abgewählt) und rot (angewählt) gehaltenen Modelle, die insbesondere auch in der Visualisierung historischer Kontexte verwendet werden, blieb die Barriere zwischen realer und virtueller Umgebung intakt. Gleichzeitig konnte festgestellt werden, dass von nahezu allen Tester\*innen sämtliche virtuellen Bauteile als reale Barriere wahrgenommen wurde, d.h. die platzierten Modelle wurden während des Durchlaufens des untersuchten Areals stets umrundet und nicht durchschritten. Dieses zunächst nicht erwartete Verhalten führt letztlich noch zu einer stärkeren und deutlicheren Raumwahrnehmung, da dadurch die virtuellen Bauteile trotz fehlender Texturen als Teil der realen Umgebung aufgenommen werden.

Herausforderungen, Hindernisse und Grenzen (Fragestellung M3) konnten im Hinblick auf den methodischen Ansatz vor allem von technologischer Seite festgestellt werden. Die größte Herausforderung stellte gleichermaßen für die Projektgruppe, bestehend aus erfahrenen 3D-Modellierpersonen, wie für die interdisziplinär zusammengesetzte, unerfahrene Tester\*innengruppe die Interaktion mit den virtuellen Modellen in der realen Umgebung dar. Hindernisse und Grenzen lagen vor allem in den Sichtfeld- und Interaktionsgrenzen der Brille selbst. So können Bauteile nur in einem Radius von ca. 5 Metern bewegt werden, was gerade bei größeren Rekonstruktionskomplexen zu Schwierigkeiten führen könnte. Allerdings werden genau diese Hindernisse in der technologischen Abkehr von reinen AR-Brillen zu sog. See-Through-Brillen überwunden, wodurch eine deutliche Stärkung der Projektergebnisse in technischer wie methodischer Hinsicht zu erwarten ist.

## *Anwendungsszenarien und Folgeuntersuchungen*

Die möglichen Szenarien wurden im Laufe des Projektes bewusst von der Anwendung in der historischen Bauforschung auf ihr Potential in anderen Bereichen getestet und erweitert. Zentral ist dabei immer noch die Anwendung in der historischen Bauforschung, sehr enge Berührungspunkte gibt es in der Bau- und Bodendenkmalpflege und Archäologie. Insbesondere die veränderten Möglichkeiten der Raumwahrnehmung können für alle Disziplinen gewinnbringend sein, für denkmalhistorische Fragestellungen sind darüber hinaus genauso der kollaborative, in diesem Falle auch partizipative Ansatz von großem Nutzen wie die komplett noninvasive Herangehensweise. Verschiedene Realrekonstruktionsszenarien können getestet, diskutiert, gemeinsam entwickelt werden. Gleichzeitig ist eine Vermittlung der Arbeitsweisen in der historischen Bauforschung, Denkmalpflege und Archäologie an Bürger\*innen möglich.

Mit dem vorliegenden Pilotprojekt konnte bereits gezeigt werden, dass sich mit dem Ansatz, die 3D-Rekonstruktion an das physische Untersuchungsobjekt zu knüpfen, große Potentiale insbesondere in der Raumwahrnehmung und interdisziplinären Architekturforschung ergeben. Gleichzeitig scheint es eine Festlegung in der technologischen Entwicklung zu geben, die sog. See-Through-Brillen reinen AR-Brillen vorzieht. Dies würde für die Weiterführung des erarbeiteten Ansatzes mehrere Vorteile bringen. Technische Einschränkungen wären aufgehoben, gleichzeitig wäre die Entwicklungsumgebung für AR und VR dieselbe. Während im vorliegenden Projekt vor allem die technische und methodische Machbarkeit nachgewiesen wurde, müssten Folgeuntersuchungen zeigen, dass dies für konkrete bauhistorische und archäologische Fragestellungen und Untersuchungen auch anwendbar und zukunftsfähig ist. Dafür ist vom Antragsteller derzeit eine konkrete Folgeuntersuchung in Vorbereitung, in der mit einer weiter ausgearbeiteten Methodik und verbesserten App konkrete Fragen zur Abhängigkeit von Technik und Konstruktion römischer Thermen erforscht werden sollen.

## **Projektmitarbeiter\*innen und Kooperationspartner\*innen im In- und Ausland**

Die Projektarbeitsgruppe setzte sich aus Dr.-Ing. Clemens Brünenberg (Antragsteller, TU Darmstadt, Historische Bauforschung), Prof. Dr.-Ing. Martin Kim (HS Mannheim, Kommunikation im Raum), Prof. Dr. Franziska Lang (TU Darmstadt, Klassische Archäologie) Sarah Cheikh-Ali (TU Darmstadt, SHK Architektur), Lucas Cornelius (TU Darmstadt, SHK Architektur) und Mahmoud Mhana (TU Darmstadt, SHK Informatik) zusammen. Enge Zusammenarbeit bestand in den Feldarbeiten und Anwendungstests mit dem Rheinischen Landesmuseum Trier. Enge inhaltliche Diskussionen gab es mit Dr. Karl-Uwe Mahler und Dr. Marcus Reuter (Rheinisches Landesmuseum Trier) sowie Claas von Barga (Architekturreferat, DAI). Weitere Zusammenarbeit gab es mit dem Kompetenzzentrum VirtualEngineering Rhein-Neckar der Hochschule Mannheim. Hier konnte im zweiten Projektjahr die CAVE zur austauschenden Nutzung zwischen AR und VR benutzt werden.

Kooperationen zum Anwendungstest bestanden mit Prof. Dr. Monika Trümper (FU Berlin, Institut für Klassische Archäologie / Projekt "Entwicklung der Badekultur in Pompeji: Stabianer Thermen") und Dr. Gabriel Zuchtriegel (Parco Archeologico di Pompei).

## **Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses im Zusammenhang mit dem Projekt**

Die methodischen und technischen Ergebnisse des Projektes werden den Hauptteil der Habilitationsschrift des Antragsstellers umfassen. Diese wird im ersten Quartal 2023 am Fachbereich Architektur der TU Darmstadt eingereicht. Weiterhin wird die Bachelorthesis *Reconstructure* von Lucas Cornelius (SHK Architektur) im Sommersemester 2022 auf den Ergebnissen des Projektes aufbauen und die Rekonstruktionskomponente um parametrische Ansätze erweitern.

### 3. Zusammenfassung

Das Projekt „Augmented Reality als Rekonstruktionswerkzeug der Bauforschung. Interdisziplinäre Methodenentwicklung in den Mixed Realities am Beispiel der römischen Weltkulturerbestätten Triers“ verfolgte das Ziel, virtuelle 3D-Rekonstruktionen verlorener und vergangener Zustände historischer Gebäude erstmals mit dem heute erhaltenen Baubestand zu verknüpfen. Dies erfolgte über die Nutzung der neuartigen Technologie der Augmented Reality (AR). Über die Verknüpfung und Visualisierung der Rekonstruktion mit dem realen Bestand erhöht sich die Wahrnehmung des gebauten Raumes deutlich, wodurch die direkt vor Ort erstellbare 3D-Rekonstruktion als Kommunikationsmedium in der interdisziplinär ausgelegten Architekturforschung fungiert. Dabei wird die Rekonstruktion in einem kollaborativen Prozess durch die beteiligten Expert\*innen diskutiert und erstellt.

Anwendungsmöglichkeiten dieses neuartigen methodischen Ansatzes finden sich in nahezu allen Forschungsfeldern, die sich mit historischer Architektur beschäftigen wie der historischen Bauforschung, Architekturgeschichte, Archäologie und Kunstgeschichte. Gleichzeitig finden sich wichtige Anknüpfungspunkte über die nicht-invasive und kollaborative, bzw. partizipative Arbeitsweise zur Bau- und Bodendenkmalpflege.

Die verschiedenen Entwicklungsstände der App *Augmented Reconstruction* wurden hauptsächlich an den Barbarathermen in Trier getestet und weiterentwickelt. Darüber hinaus fanden Praxistests während laufenden Ausgrabungstätigkeiten in den Stabianer Thermen in Pompeji statt.

In der Projektlaufzeit wurde als Kern der methodischen Umsetzungsidee eine App für die AR-Brille Holo Lens 2 von Microsoft entwickelt und getestet. Mit dieser App ist es möglich, einfache virtuelle Bauteile wie Quader oder Zylinder im realen Raum zu platzieren und zu bearbeiten, z.B. drehen, skalieren und bewegen. Über eine erweiterbare Bauteilbibliothek findet der projektübergreifende und interdisziplinäre Austausch statt. Weiterhin können neu gefundene, eingescannte oder bereits bestehende Bauteile wie Kapitelle, Gesimse, etc. hinzugefügt und direkt in der Rekonstruktion verwendet werden. Der kollaborative Austausch mit weiteren Wissenschaftler\*innen während der Rekonstruktion erlaubt eine breite Diskussion der Forschungsergebnisse in einem frühen Stadium der Forschungen. Die veränderte Raumwahrnehmung durch die virtuellen Hologramme im realen Raum wurde in zahlreichen Praxistests mit verschiedenen Testgruppen deutlich. Nahezu alle Testpersonen sahen die virtuell hinzugeschalteten Modelle trotz der schlicht weißen Farbgebung als Teil der realen Umgebung und konnten beispielsweise nicht durch diese laufen. Die durch virtuelle Inhalte angereicherte, reale Umgebung wurde dadurch stark anders wahrgenommen, verlorene Gebäudezustände am realen Objekt erfahrbar gemacht. Die Auswirkungen auf die Forschungen zu und mit Architektur sind mit dem neuartigen Ansatz der *Augmented Reconstruction* als sehr hoch einzustufen, was durch Folgeuntersuchungen zu prüfen wäre.

Einblicke in die Funktionsweisen der App sowie deren Entwicklungsstufen sind als Videos auf den Webseiten des [Fachgebiets Klassische Archäologie](#) des Fachbereichs Architektur an der TU Darmstadt einzusehen.