

Wolfram Jäger, Kay-Michael Müller, Daniel Jäger,  
Anke Eis, Toralf Burkert, Volker Stoll

# **Archäologische Aufarbeitung zerstörter Baudenkmale (ArchAuf) – Bauarchäologische Aufarbeitung von zerstörten wertvollen Kulturdenkmalen mit dem Ziel einer Anastylose**



Bundesinstitut  
für Bau-, Stadt- und  
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen  
und Raumordnung



Wolfram Jäger, Kay-Michael Müller, Daniel Jäger,  
Anke Eis, Toralf Burkert, Volker Stoll

**Archäologische Aufarbeitung  
zerstörter Baudenkmale (ArchAuf) –  
Bauarchäologische Aufarbeitung von  
zerstörten wertvollen Kulturdenkmalen  
mit dem Ziel  
einer Anastylose**

F 3230

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2021

ISBN 978-3-7388-0632-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

Endbericht

F:\2-G-JI-GmbH\0-Projekte\2017\17-4024\_PAL\03 Berichte\19-08-31-Endbericht+Leitfaden\19-12-13-Endbericht.docx

**Archäologische Aufarbeitung zerstörter Baudenkmale  
(ArchAuf)**

**Titel:**

„Bauarchäologische Aufarbeitung von zerstörten wertvollen Kulturdenkmälern mit dem Ziel einer Anastylose“

**Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
(BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung  
(BBR)**

Deichmanns Aue 31-37  
53179 Bonn

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Zukunft Bau  
Forschungsförderung des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt-  
und Raumförderung gefördert.

Aktenzeichen: SWD-10.08.187-17.50

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den  
Autoren.

**Antragsteller:**

**Jäger Ingenieure GmbH**

Büro für Tragwerksplanung

Wichernstraße 12 \* 01445 Radebeul

Tel.: (0351) 83296-0 \* Fax: 83296-50

**Bearbeiter:**

**Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger**

Dipl.-Ing. Kay-Michael Müller

Dipl.-Wi.-Ing. Daniel Jäger

Dipl.-Ing. (FH) Anke Eis

Dr.-Ing. Toralf Burkert

Dipl.-Ing. Volker Stoll

**Datum:**

30.08.2019



Dipl.-Ing. (FH) Marko Philipp  
Geschäftsführer  
Jäger Ingenieure GmbH



Prof. Dr.-Ing. W. Jäger  
Qualifizierter Tragwerksplaner  
IK Sachsen Nr. 60499



Dipl.-Ing. Kay-M. Müller



**Das Forschungsprojekt wurde weiterhin unterstützt durch:**

**WebThinker**

Max-Planck-Straße 9  
71254 Ditzingen

**Laserscanning Europe GmbH**

Gustav-Ricker-Straße 62 (Haus C1)  
39120 Magdeburg

**Capturing Reality s.r.o.**

Drienova 3  
821 01 Bratislava

**TU Dresden**

Lehrstuhl für Tragwerksplanung  
Zellescher Weg 17  
01069 Dresden

**Metallbau Borisch**

Ossietzkystraße 35  
01662 Meißen

**Robert Riess**

Ausgebildeter Bühnentechniker

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1	Ziel des Forschungsvorhabens	7
1.2	Beschreibung der zu lösenden Probleme	7
1.3	Begründung des Forschungsvorhabens	8
1.4	Ausgangsbasis für das Forschungsvorhaben	8
1.5	Forschungsabstract	9
1.6	Untersuchungsmethodik	10
<b>2</b>	<b>Recherche</b>	<b>11</b>
2.1	Methoden und Praktiken der klassischen Archäologie und der Bauarchäologie	11
2.1.1	Geschichtliche Entwicklung	11
2.1.2	Begriffe der modernen Archäologie	12
2.1.3	Methoden und Techniken in der heutigen Archäologie	13
2.1.3.1	Prospektions- und Grabungsmethoden	13
2.1.3.2	Ausgrabungen	14
2.1.3.3	Dokumentation	15
2.1.3.4	Analyse, Auswertung und Archivierung	18
2.1.4	Zusammenfassung und Übersicht	20
2.2	Grundlagen der Anastylose	21
2.3	Methoden und Praktiken bei der Enttrümmerung der Frauenkirche zu Dresden	22
2.3.1	Abstecken der Planquadrate	22
2.3.2	Ansprache und Kennzeichnung der Funde	24
2.3.3	Erste Informationsaufnahme zum Fundstück	24
2.3.3.1	Kerndatenblatt	25
2.3.4	Aufnahme der Fundsituation	26
2.3.5	Bergung und Freilegung	27
2.3.6	Zwischenlager und Fundbeschreibung	28
2.3.7	Fotografische Aufnahme von Fundstücken	28
2.3.8	Einlagerung der Funde	29
2.3.9	Fundkartierung	30
2.3.10	Verwaltung der gesammelten Informationen	30
2.3.11	Herstellung der Fundstückzeichnungen	31
2.3.12	Zusammenfassung und kritische Würdigung	32
2.4	Recherche und Beschreibung möglicher neuer Technologien	34
2.4.1	Tachymetrie	34
2.4.2	Laserscanning	35
2.4.2.1	Grundlagen des Laserscannings	35
2.4.2.2	Luftgestütztes Laserscanning (airborne laserscanning)	36
2.4.2.3	Terrestrisches Laserscanning	37
2.4.2.4	Handgeführtes Laserscanning	39

2.4.3	Photogrammetrie.....	40
2.4.3.1	Grundlagen der Photogrammetrie.....	40
2.4.3.2	Luftgestützte Photogrammetrie .....	41
2.4.3.3	Handgeführte Photogrammetrie .....	41
2.4.3.4	Stationäre Photogrammetrie .....	42
2.4.4	Weitere Technologien .....	42
2.4.4.1	Digitale Bildkorrelation .....	42
2.4.4.2	Microsoft Kinect .....	43
<b>3</b>	<b>Entwicklung einer Online-Applikation zur Entrümmern (hermine).....</b>	<b>44</b>
3.1	Vorüberlegungen, Anforderungen .....	44
3.1.1	Generelle Anforderungen .....	44
3.1.2	Zielgruppe .....	44
3.1.3	Entscheidung zu Open Source Software .....	44
3.1.4	Skalierbarkeit, plattformübergreifende Nutzung.....	45
3.1.5	Verwendete Technologien.....	45
3.1.5.1	Frontend .....	45
3.1.5.2	Backend.....	46
3.1.5.3	Server .....	46
3.1.6	Namensgebung.....	46
3.2	Funktionen .....	47
3.2.1	Modul Projekte (Projects) .....	47
3.2.2	Modul Fundstücke (Items) .....	49
3.2.3	Benutzerrollen (User) .....	53
3.3	Infrastrukturvarianten .....	55
3.3.1	Internetbasierte Infrastruktur .....	55
3.3.2	Lokale Infrastruktur .....	55
<b>4</b>	<b>Auswahl der Methoden und Technologien.....</b>	<b>56</b>
4.1	Auswahl der Methoden.....	56
4.1.1	Quellenrecherche.....	56
4.1.2	Ortsbegehung und Bestandsaufnahme .....	57
4.1.3	Erstellen eines 3D-Modells.....	58
4.1.4	Anlage des Gitternetzes .....	58
4.1.5	Kennzeichnen der Fundstücke .....	58
4.1.6	Erfassen der Fundsituation .....	59
4.1.7	Bergen der Fundstücke und Freilegen der nächsten Schicht.....	59
4.1.8	Zwischenlagerung, Fortführen der Beschreibung .....	60
4.1.9	Bauzelt, Abschließende Erfassung der Fundstücke .....	60
4.1.10	Lagern der Fundstücke .....	60
4.1.11	Informationssammlung und Verwaltung .....	60
4.1.12	Fundkartierung.....	60
4.1.13	Fundstückzeichnungen .....	61

4.2	Praktische Tests der neuen Technologien.....	62
4.2.1	Laserscanner .....	62
4.2.1.1	Lokschuppen, Neustadt Dresden (Bestandserfassung) .....	64
4.2.1.2	Mausoleum, Steinort, Polen (Bauzustandserfassung).....	65
4.2.1.3	Ungerturm, Neustadt, Sachsen (Schadenskartierung) .....	66
4.2.1.4	Burgruine, Nebra (Schadenskartierung).....	67
4.2.1.5	Ergebnis .....	68
4.2.2	Drohnenflüge .....	68
4.2.2.1	Ungerturm, Neustadt, Sachsen (Schadenskartierung) .....	69
4.2.2.2	Burgruine, Nebra (Schadenskartierung).....	70
4.2.2.3	Ergebnis .....	70
4.2.3	Handscanner.....	71
4.2.3.1	Mausoleum, Steinort, Polen (Bauzustandserfassung).....	72
4.2.4	Tablet zur Datenbanknutzung .....	72
4.3	Ablaufplan der Anastylose mit neuen Technologien .....	74
<b>5</b>	<b>Pilotprojekt .....</b>	<b>76</b>
5.1	Teilnachbau des Torbogens von Palmyra .....	76
5.1.1	Notwendigkeit .....	76
5.1.2	Planung.....	76
5.1.2.1	Steinformat für den Modellbau .....	79
5.1.2.2	Verwendeter Mörtel.....	80
5.1.2.3	Statische Berechnungen .....	80
5.1.3	Aufbau .....	81
5.1.3.1	Dokumentation.....	81
5.1.3.2	Zurechtsägen der Steine.....	82
5.1.3.3	Aufstellen des Gerüstes .....	82
5.1.3.4	Aufbau der Pfeiler .....	83
5.1.3.5	Aufbau des Bogens.....	85
5.1.3.6	Sicherung des Torbogens .....	85
5.1.4	Vorbereitung des Einsturzes .....	85
5.1.5	Durchführung des Einsturzes am 04.12.2018.....	86
5.1.5.1	Dokumentation des Einsturzes.....	86
5.2	Prospektion .....	88
5.2.1	Quellenrecherche.....	88
5.2.2	Ortsbegehung und Bestandsaufnahme .....	88
5.2.3	Erstellen eines 3D-Modells.....	88
5.2.4	Geodätische Einmessung und Anlage eines Gitternetzes .....	88
5.3	Dokumentation und Bergung.....	90
5.3.1	Aufbau der Lagerfläche .....	90
5.3.2	Datenkonfiguration des Projektes in hermine .....	91
5.3.3	Kennzeichnen der Fundstücke .....	92

5.3.4 Erfassen der Fundsituation .....	92
5.3.5 Bergung der Fundstücke und Freilegen nächste Fundschicht .....	93
5.3.5.1 Abweichende Bergungstaktik .....	94
5.3.6 Zwischenlager, Fortführung Fundbeschreibung am Fundstück .....	95
5.3.7 Erfassung der Fundstückoberfläche .....	95
5.4 Einlagerung und Archivierung .....	96
5.4.1 Lagerung der Fundstücke .....	96
5.4.2 Fundkartierung .....	96
5.4.2.1 Zuordnung durch Analyse des Einsturzhergangs .....	97
5.4.2.2 Zuordnung anhand der Geometrie .....	97
5.4.2.3 Zuordnung anhand des Materials und Farbe .....	97
5.4.2.4 Zuordnung durch besondere Merkmale .....	97
5.4.2.5 Ergebnisse der Fundkartierung .....	97
5.5 Analyse, Auswertung .....	98
5.5.1 Rekonstruktion des Einsturzhergangs .....	98
5.5.2 Erstellung Fundstückzeichnungen .....	98
5.5.3 Wiederaufbauplanung .....	100
<b>6 Zusammenfassung .....</b>	<b>101</b>
<b>7 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>103</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Ziel des Forschungsvorhabens

Syrien verfügt über einen unermesslichen Schatz an archäologischen Stätten und Denkmälern der Bau-, Zivilisations- und Kunstgeschichte. Durch den Bürgerkrieg ist eine Vielzahl dieser Denkmäler zerstört worden oder während der Kämpfe Zielscheibe gewesen. Der damit für die Weltgemeinschaft eingetretene Schaden ist riesengroß. Diese zerstörten Schätze wieder der Menschheit zuzuführen ist eine Herausforderung für die Archäologie und Denkmalpflege und eine Frage der nationalen Identität der Syrer.

Unter der Schirmherrschaft der UNESCO wird derzeit die Rettung der Baudenkmäler, die zerstört worden sind, vorbereitet. Dabei ist eine Vielzahl von Arbeiten zur Dokumentation und zur virtuellen Rekonstruktion gelaufen. Alle verfügbaren Materialien werden zusammengestellt, um nach Herstellung einer gewissen sicheren Lage den Wiederaufbau beginnen zu können. Somit rückt eine Anastylose (auch: Anastilosis) für eine Reihe von Bauwerken in den Bereich des Möglichen. Bei der Konferenz des Auswärtigen Amtes der BRD und der UNESCO im Juni 2016 zur Vorbereitung der Wiederaufbauphase [1] wurde eine derzeit bestehende, erhebliche Lücke sichtbar: Der Umgang mit den Fundstücken von der Fundlage bis zum Wiedereinsetzen in das originale Bauwerk. Mit dem Forschungsvorhaben soll dazu eine entsprechende Technologie bereitgestellt werden.

## 1.2 Beschreibung der zu lösenden Probleme

Entscheidende Informationen für eine Zuordnung eines Fundstückes zur originalen Lage sind aus der Fundlage und dem Einsturzhergang zu gewinnen. Für das Zusammensetzen werden 3D-Körper gebraucht.

Hierzu dienen die Erkenntnisse und Erfahrungen aus der archäologischen Entrümmerung der Frauenkirche zu Dresden [2] [3] [4], die als Basis fungieren und durch Einsatz neuer Technologien und Techniken auf einen aktuellen Stand gebracht werden sollten:

0. Entwurf eines generellen Datenbank- und Ablagesystems auf einer allgemein nutzbaren Software-Basis
1. Aufnahme des Fundstückes in der Fundlage elektronisch (Scan und digitales Foto) – Festhalten der Befundsituation
2. Erstsprache des Fundstückes und Anlegen des zugehörigen Datensatzes
3. Nummerierung des Fundstückes und erste Datenaufnahme und Eintragung in die Datenbank
4. Aufnahme/Scan des Fundstücks
5. Ablage des Fundstückes im speziellen Fundstückslager
6. Lagermanagement über die Fundstücksnummer, die zugleich Index in der Datenbank ist
7. Auswertung der Aufnahmen/der Scans – Herstellung eines 3D-Modells
8. Manuelle/automatische Fundstückzuordnung
9. Dokumentation des Ergebnisses
10. Darstellung der Ergebnisse
11. Beschreibung der Technologie für eine umfassende Nachnutzung

### 1.3 Begründung des Forschungsvorhabens

Seitens der BRD ist vorgesehen, einen nicht unwesentlichen Anteil an der Beseitigung der Kriegsschäden in Syrien zu übernehmen. Das Forschungsvorhaben dient der Bereitstellung einer Technologie, die bei der Befundaufnahme beginnt und bei der Rekonstruktion des Bauwerkes aus den Fundstücken endet.

**Notwendigkeit:** Die eigene Analyse im Nachgang zu der Syrien-Konferenz des AA zusammen mit der UNESCO in Berlin im Juni 2016 ergab, dass es derzeit eine erhebliche Lücke für die beschriebene Kette bei der Anastylose eingestürzter historischer Bauwerke und archäologischer Überreste gibt.

**Dringlichkeit:** Da bei einem Beginn der Aufräumarbeiten ohne weitere Vorbereitung wesentliche Informationen verloren gehen, muss bereits jetzt vorgesorgt werden, damit dann zum gegebenen Zeitpunkt die richtige, zeitgemäße Technologie sofort anwendbar vorliegt.

**Förderung der Innovation:** Durch die Anwendung der modernen Informationstechnologie wird die innovative Seite des Projektes belegt.

**Beitrag zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit:** Das Projekt trägt zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Teams in derartigen Fällen bei.

### 1.4 Ausgangsbasis für das Forschungsvorhaben

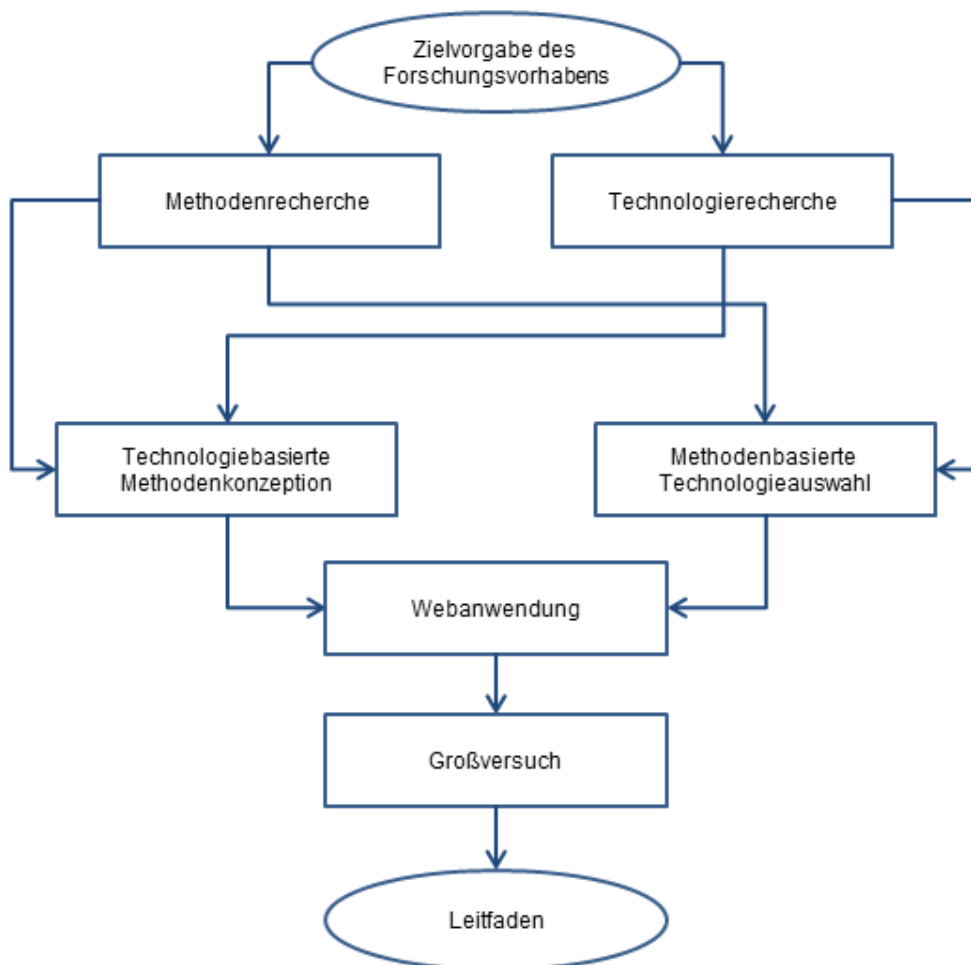
Der Antragsteller/Projektleiter Prof. Jäger war für die Planung und Durchführung der archäologischen Enttrümmerung der Frauenkirche Dresden von 1991 bis 1994 sowie für deren Auswertung und Einbindung in den Wiederaufbauprozess verantwortlich [2] [3] [4]. Die seinerzeit entwickelte Technologie beruhte auf der Anwendung der damals modernen Informationstechnologie, mit der ein Höchstmaß an Informationserfassung bei gleichzeitiger Beschleunigung des Enttrümmerungsprozesses erreicht werden konnte und musste [2]. Die Methodik ist grundsätzlich nach wie vor heute aktuell, jedoch sind die Möglichkeiten auf der Grundlage einer fast völlig revolutionierten technischen Basis potenziell gestiegen.

Vorliegen von Kenntnissen und Ergebnissen: Die seinerzeit entwickelte Abfolge von Arbeitsschritten kann nach wie vor heute angewendet werden. Sie entsprechen der grundlegenden archäologischen Arbeitsweise beim Umgang mit Funden [5]. Die gesammelten Erfahrungen stehen vollumfänglich zur Verfügung, da der gesamte Prozess der Enttrümmerung minutiös dokumentiert und archiviert worden ist. Die Dokumentation befindet sich im Archiv des Forschers.

Literaturrecherche: In Vorbereitung des Antrages wurde eine umfangreiche Recherche angestellt, die auch Randgebiete erfasst hat. Seitdem sind keine wesentlichen neuen Publikationen hinzugekommen ([6] [7] [8] [9] [10]). Die Syrienkonferenz Anfang Juni 2016 [1] gab einen Überblick über den aktuellen Stand der Vorbereitung, der sich aber i.W. auf die Dokumentation und die virtuelle Rekonstruktion aus Altunterlagen konzentriert.

### 1.5 Forschungsabstract

Der Forschungsansatz besteht darin, dass durch die Nutzung der Laserscantechnik und/oder der digitalen Fotografie Fundsituationen (auch als Befunde bezeichnet) in kürzester Zeit dauerhaft aufgenommen und abgelegt werden können und dass später die (bau-)archäologische Auswertung der Befunde und Fundstücke sowie das Einsetzen des Fundstückes in das virtuell rekonstruierte Original erfolgen können. Mit den Einzelaufnahmen der Fundstücke lassen sich diese im Rechner dreidimensional abbilden und manuell bzw. halbautomatisch wieder zum Original zusammensetzen. Dafür entscheidend ist neben der Fundsituation und -lage die Rekonstruktion des Einsturzherganges, mit der die Fundstücke schneller identifiziert werden können.



**Bild 1 Flowchart zum Ablauf der Forschung [11]**

Im Gegensatz zu archäologischen Grabungsstätten werden bei Wiederherstellungsarbeiten oft Trümmer in zeitlich kurzen Aktionen ohne großartige bauarchäologische Begleitung beräumt. Im weiteren Verlauf gehen dann oft bei der Lagerung und Umlagerung von Fundstücken Zusammenhänge verloren. Um dem entgegenzuwirken, wird eine komplette Aufnahme-, Transport- und Lagertechnologie erarbeitet und angeboten. Zum Datenmanagement wird eine Datenbank aufgebaut, in der jedes Fundstück eingespeist wird und von den Koordinaten der Fundlage bis zur identifizierten originalen Lage im Bau alle weiteren Informationen zu finden sind. Ansatzweise werden die manuelle und die virtuelle Rekonstruktion des Fundstückes im Originalbauwerk durchgeführt und die Vorgänge erläutert.

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des „Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung“ gefördert (Az.: SWD-10.08.18.7-17.50). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.



## 1.6 Untersuchungsmethodik

### **A) Erweiterte Literatur- und Technikrecherche, Recherche zur manuellen und virtuellen Rekonstruktion**

Aktualisierung der Literaturrecherche zur Archäoinformatik – Analyse der technischen Gerätebasis und Empfehlung – Analyse zur Rekonstruktion von Bauwerken, Gegenständen oder Schriftstücken

### **B) Analyse des derzeit erreichten Standes der Dokumentation und Modellierung der zerstörten Bauwerke**

In Auswertung der auf der Syrienkonferenz 2016 erlangten Informationen wird der Stand der Dokumentation und virtuellen Rekonstruktion tiefer recherchiert und zusammengefasst. Kategorisierung der Daten.

### **C) Entwurf einer Datenbank nach Abstimmung mit der Antikenverwaltung DGAM**

Auswahl des Datenbanksystems, Festlegung der Datenbankstruktur und der einzelnen Arbeitsschritte (Füllung).

### **D) Aufarbeitung der Kollapsanalyse zur Nachbildung des Einsturzherganges**

Exemplarische Durchführung einer Kollapsanalyse nach Zusammenstellung der Eingangsdaten, Fundsituation.

### **E) Untersetzung und Erprobung der Einzelschritte und der zugehörigen Technik**

Nachbildung des Einsturzes eines archäologischen Objektes und Aufarbeitung der Trümmer mit der vorgeschlagenen Technik und Technologie.

## 2 Recherche

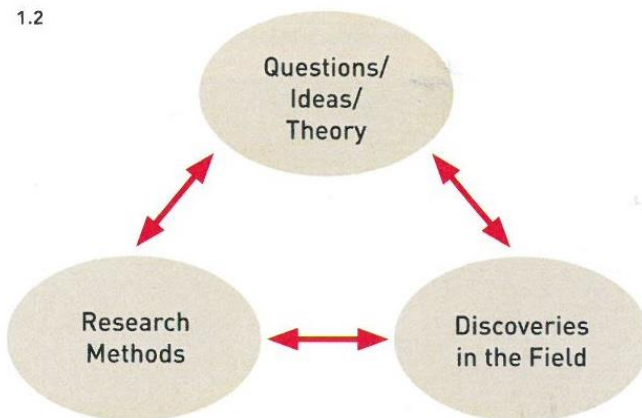
In diesem Kapitel werden zunächst die Methoden der klassischen Archäologie bzw. Bauarchäologie kurz beschrieben und untersucht. Auf ihre praktikable Anwendung bei der Enttrümmerung der Frauenkirche zu Dresden wird ausführlich eingegangen, sowie der dort verwendete Prozess behandelt und die damals, Anfang der 1990er Jahre, zur Verfügung stehenden technischen Mittel beschrieben und einer kritischen Analyse unterworfen. Neuere, heute zur Verfügung stehende Technologien werden in einem weiteren Abschnitt beschrieben.

### 2.1 Methoden und Praktiken der klassischen Archäologie und der Bauarchäologie

#### 2.1.1 Geschichtliche Entwicklung

Die Archäologie ist eine junge Wissenschaft, deren Wurzeln ungefähr 150 Jahre zurückreichen und welche, basierend auf natur- und geisteswissenschaftlichen Methoden, die kulturelle Entwicklung der Menschheit erforscht [12]. Johann Joachim Winkelmann wird oft als Begründer der klassischen Archäologie und Kunstgeschichte bezeichnet [13]. Zu seiner Zeit ging man noch davon aus, dass die menschliche Geschichte gerade einmal rund viertausend Jahre vor Christus begonnen hätte. Dies stütze man auf Thesen, welche auf den in der Bibel beschriebenen Ereignissen beruhen. Es begann ein Erkenntnisprozess, bei welchem man versuchte nicht nur die richtigen Fragen zu stellen, sondern diese auch mit den richtigen Methoden zu unterstützen. Basierend auf Entdeckungen bei Ausgrabungen konnten so Theorien bestätigt oder neue aufgestellt werden. So entstand ein Kreislauf aus Theorien, Methoden und Entdeckungen (Bild 2).

1.2



**Bild 2** Diagramm über die Beziehungen zwischen den Aspekten unseres Wissens über die Vergangenheit [5]

In Europa begann man in der Renaissance damit, Artefakte zu sammeln und zu untersuchen. Eine erste dokumentierte archäologische Ausgrabung gab es im Jahr 1784 durch Thomas Jefferson. Viele weitere folgten dann im 18. und 19. Jahrhundert nahezu überall auf der Welt ([5] S. 23).

Der eigentliche Durchbruch gelang der archäologischen Wissenschaft im 19. Jahrhundert durch die wachsende Akzeptanz der Prähistorie der Menschheit, der Evolutionstheorie, und des Dreiperiodensystems, welches die europäische Urgeschichte in Stein-, Bronze- und Eisenzeit untergliedert. Erst dadurch war es möglich wirklich wissenschaftlich vorzugehen.

In einer ersten Phase, der sogenannten „klassifizierenden historischen Phase“, befassten sich die Archäologen vor allem mit der Chronologisierung und Beschreibung der Befunde. Mit fortschreitender Verbesserung der Technik wurde dieser Prozess zunehmend einfacher, weshalb sich in den 1960er Jahren die Gruppe der neuen Archäologen formte. Diese Bewegung wollte zum einen eine Versachlichung der Archäologie vorantreiben, bei welcher naturwissenschaftliche Beweisführungen im Vordergrund stehen, als auch, dass die Archäologie nicht nur die Vergangenheit beschreiben sollte, sondern versuchen das „Warum“ zu erklären.

In den 1980er und 90er Jahren kamen Wissenschaftler dann zu dem Schluss, dass es keinen richtigen Weg gäbe, sondern es immer ein Abwägen verschiedenster Parameter sein wird, welches eine komplett objektive Behandlung eines Themas unmöglich macht. Diese interpretierende Archäologie versucht verschiedene Perspektiven vor dem Hintergrund aufzuzeigen, dass auch die Vergangenheit immer individuell und subjektiv wahrgenommen würde.

### **2.1.2 Begriffe der modernen Archäologie**

Das Hauptaugenmerk der heutigen Archäologie liegt in der Analyse von sogenannten Artefakten, unter welchen man von Menschenhand erschaffene und ortsveränderbare Gegenstände subsumiert, die dabei helfen sollen die Vergangenheit zu verstehen. Alle aus natürlichen Quellen stammende Objekte (Tierreste, Pflanzenreste, etc.) bezeichnet man als Biofakte.

Respektive dazu existieren von Menschenhand erschaffene oder durch menschliches Wirken entstandene, ortsunveränderliche Objekte, welche als Bauwerke bezeichnet werden. Darunter fallen auch Straßen und Brücken sowie Siedlungen oder Städte in ihrer Gesamtheit. Die Untersuchung dieser Objekte wird dem Teilgebiet der Bauarchäologie zugerechnet.

Die Orte, an denen man auf signifikante Spuren menschlichen Handelns trifft, bezeichnet man als Fundort. Alle Artefakte, Biofakte oder Bauwerke sind Teil eines sogenannten Befundes. Unter diesem Begriff werden zum einen die Fundumstände und zum anderen die Lage verschiedener Objekte zueinander oder im umliegenden Erdreich und seinen Schichten, aufgeführt. Der Befund wird zumeist durch die Ausgrabung zerstört, weswegen dessen exakte Dokumentation im Fokus archäologischen Handelns steht. So lässt sich seine spätere Rekonstruktion durch Dritte überhaupt erst ermöglichen.

Artefakte können sich in einem primären oder sekundären Kontext befinden, je nachdem, ob sie vom eigentlichen Fundort wegbewegt wurden oder nicht. Dabei ist es irrelevant, ob es durch menschliche oder natürliche Aktivitäten zu einer Veränderung des Fundortes kam.

Unter bestimmten Umständen ist es möglich, dass nahezu jedes Material eine sehr lange Zeitspanne überdauern kann. Organische Materialien sind dabei anfälliger für einen Zerfall ihrer Struktur als anorganische Materialien.

### 2.1.3 Methoden und Techniken in der heutigen Archäologie

Grundsätzlich lässt sich jede archäologische oder bauarchäologische Untersuchung grob in die im Folgenden aufgeführten Phasen einteilen:

1. Prospektion (Quellenrecherche, Ortsbegehungen, Luftprospektion) (Abschnitt 4)
2. Grabung (Fundfreilegung) (Abschnitt 2.1.3.2)
3. Dokumentation (Abschnitt 2.1.3.3)
4. Analyse und Auswertung (Abschnitt 2.1.3.4)

#### 2.1.3.1 Prospektions- und Grabungsmethoden

##### Quellenrecherche

Interpretation von Schrift- und Bildquellen, falls auswertbare Quellen vorhanden sind ([14] S. 48).

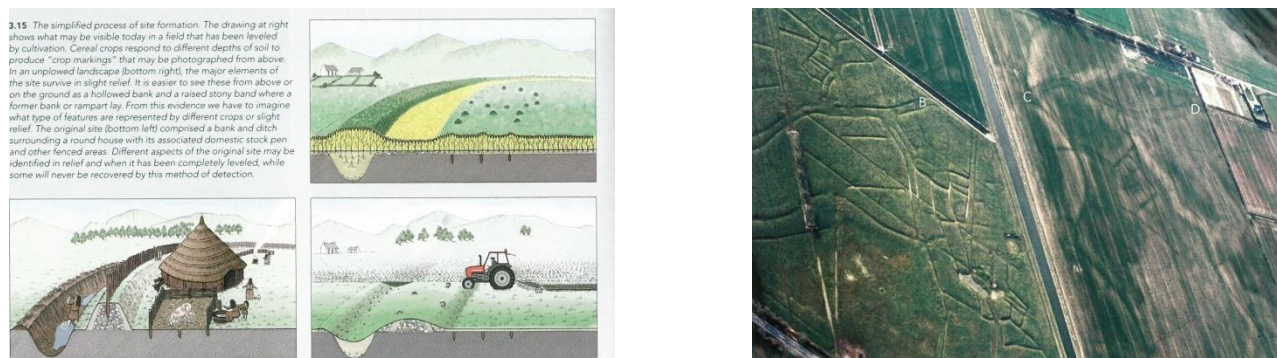
##### Oberflächenbegehungen (Surveys)

Erste Erkenntnisse über eine potentielle Ausgrabungsstätte werden durch Ortsbegehungen am Boden gewonnen. Die nötige Erfahrung vorausgesetzt, ist es zumeist möglich, überwachsene Mauerreste, künstliche Bodenerhebungen, zugeschüttete Gräben oder Löcher zu erkennen.

##### Luftbildprospektion

Eine Sonderform der Prospektion wird mit fluggestützten Techniken realisiert. Dabei lassen sich Auffälligkeiten bei Bewuchs, Schattenwurf und Bodenmerkmalen entdecken, welche von unter der Erdoberfläche liegenden Fundamenten, Gräben oder Wällen verursacht werden und vom Boden aus verborgen bleiben ([5] S. 80).

Die Luftbildprospektion kann durch Drohnen, Flugzeuge oder Satelliten erfolgen, welche entweder Kameras, Laser oder Radar nutzen, um verschieden hochaufgelöste Übersichten eines Interessengebiets zu erstellen. Die so gewonnenen Bilder geben ihre Informationen nicht von selbst preis, sondern müssen durch darauf spezialisierte Archäologen in Augenschein genommen werden (Bild 3).



**Bild 3 Theoretische und praktische Ansicht archäologischer Merkmale aus der Luft [5]**

##### Geophysikalische Prospektion

Technisch sehr aufwändig und kostenintensiv ist die Geophysikalische Prospektion. Dabei werden mit geomagnetischen oder geoelektrischen Methoden die physikalischen Eigenschaften des Untergrunds gemessen und die Messdaten in digitale Bilder umgewandelt ([14] S. 60). Da diese

Verfahren für den weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit keine Rolle spielen, soll nicht weiter auf sie eingegangen werden.

### 2.1.3.2 Ausgrabungen

Ist eine archäologisch relevante Fundstelle identifiziert, muss eine Entscheidung darüber getroffen werden, ob eine Grabung durchgeführt werden soll. Grundsätzlich werden zwei Grabungsansätze unterschieden ([15] S. 2):

- **Reliefgrabung:** Anlegen tiefer vertikaler Schnitte zur Erkennung der Schichten
- **Flächengrabung:** große horizontale Öffnung einer Schicht, um die Zusammenhänge der Artefakte in dieser ersichtlich zu machen

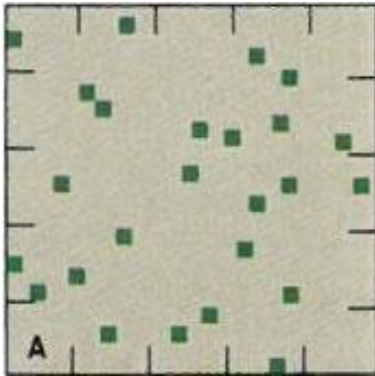
Hier schließt sich die sorgfältige Auswahl geeigneter Dokumentationsmittel für die Auswertung an, da der Befund bei einer Grabung immer zerstört wird. [16] Meistens ist es – auch vor dem Hintergrund der o.g. Zerstörung – nicht sinnvoll den gesamten Befund einer Grabungsfläche freizulegen, sondern mit wenigen Eingriffen ein Maximum an hochdetaillierten Informationen zu gewinnen.

Damit verbunden ist auch ein systematisches *mapping* aller Arbeiten. Darunter zählt nicht nur das Anlegen eines Grabungsnetzes, sondern auch die Möglichkeit einer Verortung in einem Geographic Information System (GIS). Weiterhin ist es möglich vor Beginn der destruktiven Arbeiten, weitere technische Möglichkeiten zu nutzen, um den Fundort zu untersuchen. Dazu zählen zum Beispiel das Ground Penetrating Radar (GPR) oder Metalldetektoren.

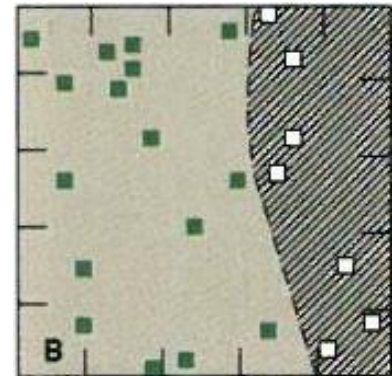
Da bei Ausgrabungen oftmals ein Mangel an Zeit und finanziellen Mitteln vorherrscht, hat man Methoden entwickelt, um aussagekräftige Stichproben nehmen zu können. Dabei unterscheidet die Archäologie in vier Hauptarten:

- a) **Einfach-Zufällige Stichprobe:** Die zu untersuchenden Bereiche werden durch rein zufällig gewählte Koordinaten im Grabungsnetz ausgewählt. Das kann jedoch dazu führen, dass in manchen Bereichen eine Häufung von Grabungspunkten auftritt, in anderen hingegen gar keine existieren.
- b) **Geschichtete Stichprobe:** Bei dieser Form der Stichprobe wird die zu untersuchende Region vorher in verschiedene Grabungskategorien geteilt (in Bild 4 durch Schraffur gekennzeichnet). Die Grabungspunkte werden prozentual über die Schichten gleichverteilt. Das unter a) benannte Problem der Ungleichverteilung bleibt jedoch im Wesentlichen innerhalb einer Schicht relevant.
- c) **Systematische Stichprobe:** Die Grabungsorte werden anhand der Rasterung des Grabungsnetzes gewählt (Bild 5). In einem definierten Abstand voneinander werden dann verschiedene Grabungen vorgenommen. Zwar wird durch dieses systematische Vorgehen das Risiko verringert, dass sich an einem Ort Grabungspunkte mehren, jedoch besteht ebenfalls die Gefahr, dass bei regelmäßig angeordneten Fundstücken diese nicht gefunden werden.
- d) **Geschichtete, nicht ausgerichtete, systematische Stichprobe:** Um der bei c) aufgeführten Fehleranfälligkeit entgegenzuwirken, wird die Methode dahingehend modifiziert, dass die Grabungsposition innerhalb des Rasterquadrats zufällig gewählt

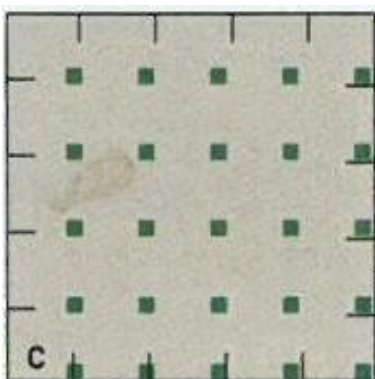
wird. Somit hat man eine generell Gleichverteilung der Grabungspunkte, deren Anordnung dennoch unregelmäßig ist.



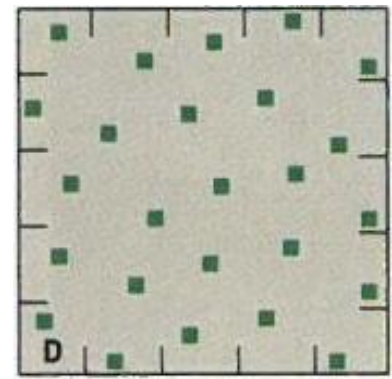
**Bild 3 Einfache zufällige Stichprobe [5]**



**Bild 4 Geschichtete Stichprobe [5]**



**Bild 5 Systematische Stichprobe [5]**



**Bild 6 Geschichtete, nicht ausgerichtete, systematische Stichprobe [5]**

Die Bergung der Artefakte aus dem Befund stellt einen kritischen Moment dar, da die meisten Bodenfunde bei der Freilegung besonders instabil sind. Jegliche physische Belastung der Objekte durch Druck, Reibung oder Erschütterung gilt es zu vermeiden. Ebenso muss das Hantieren mit frischen Funden auf ein Minimum beschränkt werden, da vermehrtes Ein- und Auspacken sowie Transportieren die Gefahr der Zerstörung oder Beschädigung in sich trägt. Alle Objekte sind je nach Material (organisch, anorganisch), Zustand (fragil, stabil) und Umgebungsbedingungen (z.B. feucht oder trocken) zu polstern und zu verpacken. Das Vorgehen sollte mit den Konservatoren oder Restauratoren im Vorfeld abgestimmt werden [17].

### 2.1.3.3 Dokumentation

Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits mehrfach erwähnt wurde, spielt bei Ausgrabungen eine exakte, möglichst erschöpfende Dokumentation eine wichtige Rolle, da der Befund nicht erhalten bleibt. In der klassischen Archäologie kommen dabei folgende Verfahren zum Einsatz:

- Geodätische Vermessung
- Zeichnerische Dokumentation
- Schriftliche Dokumentation



- Fotografische Dokumentation

Seit leistungsfähige Computer zur Verfügung stehen, werden auch photogrammetrische Messverfahren und 3D-Laserscans eingesetzt. Auf diese wird in späteren Kapiteln noch vertieft eingegangen.

Die Fülle der am Fundort oder an Objekten gewonnenen Informationen macht den Einsatz eines Dokumentationssystems erforderlich. Nach Barker sollte dieses eine Reihe von Anforderungen erfüllen:

<b>Präzision</b>	Einhaltung gewisser Maßtoleranzen je nach gewähltem Darstellungsmaßstab (1:50 bis 1:1)
<b>Lesbarkeit</b>	notwendige Abstraktion der Zeichnungen, um die Lesbarkeit zu gewährleisten
<b>Skalierbarkeit</b>	unproblematische Erweiterbarkeit, insofern die geplante Ausdehnung bzw. die geschätzte Fundanzahl überschritten wird
<b>Flexibilität</b>	einfaches Umsortieren bzw. Ergänzen der Daten
<b>Nachvollziehbarkeit</b>	allgemeinverständliche Sprache und Zeichensymbolik
<b>Objektivität</b>	interpretations- und spekulationsfreie erste Datenerfassung, deutliche Abgrenzung von Zustandsbeschreibung und Schlussfolgerung bzw. Interpretation
<b>Einheitlichkeit</b>	Einhaltung eines durchgängigen Zeichnungsstils (Layouts)
<b>Wirtschaftlichkeit</b>	effizientes Ergebnis (Vergleich von Investitionskosten und Zeitersparnis)

Tabelle 1 Anforderungen an Dokumentationssystem nach Barker ([14] S. 159 ff.)

Über das Dokumentationssystem muss im Vorfeld der Grabung entschieden werden, dieses sollte jedoch so konzipiert sein, dass das Auffinden, die Möglichkeit der Interpretation, Publikation und der Archivierung so einfach und zeitsparend wie möglich erfolgen [15].

### Geodätische Grabungsvermessung

Zur genauen Lokalisierung von Befunden und Artefakten legt man ein sinnvoll definiertes Grabungsraster an, dessen Schnittpunkte mittels geodätischer Vermessungsmethoden bestimmt und an ein übergeordnetes Koordinatensystem angebunden werden; die Rastergröße sollte sich nach den zu erwartenden Befunden richten [17]. Ebenfalls kann der exakte Fundort mit denselben Methoden kartiert werden. Die zwei am häufigsten verwendeten Verfahren sind das Polar- und das Orthogonalverfahren.

**Polarverfahren:** Vermessung mittels Tachymeter bei mindestens zwei bekannten Punkten. Das Verfahren ist sehr flexibel, Geländeunebenheiten spielen keine Rolle ([15] S. 1, 22, 37).

**Orthogonalverfahren:** Ausgehend von einer Basislinie werden die einzumessenden Punkte mit Hilfe von Winkelprisma (zur Bestimmung von Abszisse und Ordinate) und Maßband auf dieser abgesetzt. Das Verfahren ist sehr einfach, jedoch treten bei Geländeunebenheiten Abweichungen auf, da sich die Entfernungsmessung auf die Schrägdistanz bezieht.

Es gibt weiterhin Einbindeverfahren, Dreiecksverfahren sowie Vorwärts-/Rückwärtseinschneiden. Zu diesen Verfahren sei auf die einschlägige Literatur verwiesen.

### Technische Hilfsmittel zur geodätischen Grabungsvermessung nach Boekhoff

**Nivelliere:** digitales oder analoges Gerät zur Höhenbestimmung

**Distometer:** Laser-Handmessgeräte zur Bestimmung von Distanzen, z.B. zwischen zwei Wänden in Innenräumen.

**Tachymeter:** elektro-optisches Gerät zur Strecken- und Winkelbestimmung, heutzutage Standard in der Vermessung. Die meisten modernen Geräte können mit oder ohne Reflektor-Prismen eingesetzt werden. Beim Einsatz ohne Prisma wird mit Hilfe eines Laserpointers das Zielobjekt anvisiert.

**Zeichnerische Dokumentation**

Trotz Digitalfotografie, wird in der Archäologie nach wie vor die klassische Zeichnung zur Dokumentation verwendet. Diese erlaubt, durch das Betrachten des Objektes, eine Interpretation der Bedeutungszusammenhänge, wesentliche oder unwesentliche Merkmale können durch den Archäologen hervorgehoben oder in den Hintergrund gestellt werden [18]. Hilfsmittel hierbei sind Messgitter bzw. Zeichenrahmen, Schnurgitter oder Messschienen bzw. Zeichenschienen. Ebenfalls gelangen mechanische oder digitale Zeichengeräte wie z.B. Kartomat, Tachymeter oder Digitalpanthograph zum Einsatz [15].

	geeignete Befundsituation	Kosten Hardware	primäres Ergebnis
Handzeichnung	detailarm	gering	Papierzeichnung
Zeichenrahmen	detailreich, kleinflächig	gering	Papierzeichnung
Feldpantograph	detailreich, kleinflächig	gering	Papierzeichnung
Tachymetrie	detailreich, großflächig	hoch	Vektordatei
Photogrammetrie	detailreich, ebene Flächen	mäßig	Pixelbild
3D-Laserscanning	detailreich, auch uneben	sehr hoch	Punktwolke
Image Matching (SfM)	detailreich, auch uneben	mäßig	Punktwolke, texturiertes 3D-Modell

Tabelle 2 Zeichenmethoden im Vergleich [17]

**Schriftliche Dokumentation**

Die schriftliche Dokumentation einer Ausgrabung soll die Abläufe, Befunde und Artefakte möglichst genau und nachvollziehbar beschreiben. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, verwendet man standardisierte Formblätter [17]:

**Grabungstagebuch:** Verlauf der Grabungsarbeiten mit besonderen Vorkommnissen und Ereignissen wird dokumentiert ([19] S. 15).

**Fundzettel und -listen:** Beschreibung der Artefakte auf einem standardisierten Formular mit Angaben zu Maßnahmennummer, Titel der Maßnahme, Gemeinde, Flurstücknummer, Fundzettelnummer, Fläche/Schnitt, Planum/Profil, Material, Funddatum u.v.a. ([19] S. 18)

**Schichtbeschreibung:** Dokumentation einzelner Plana und Profile



Des Weiteren werden Foto-, Zeichnungs-, Fund- und Befundlisten geführt, ebenfalls mit Angaben zu Objekt, Funddatum und -ort sowie verwendeten Methoden und Geräten.

### **Fotografische Dokumentation**

Bei archäologischen Grabungen ist die Fotografie eine der wichtigsten Dokumentationsmethoden, welche ergänzend zur Zeichnung spätere Interpretationen zur Befundsituation zulässt. Von den im Folgenden aufgeführten Motiven sollten Aufnahmen angefertigt werden ([19] S. 11):

- Befunde und Befundkomplexe
- archäologische Einheiten
- besondere Funde in situ (z.B. Details)
- topografische Übersichtsaufnahmen
- Arbeitsfotos von Grabungssituationen

Die Archäologie verbindet dabei mehrere Genres der Fotografie. Während Befundfotos den wissenschaftlichen Dokumentationsaufnahmen zugeordnet werden können, lassen sich Arbeitsfotos zur Reportagefotografie und topografische Übersichtsaufnahmen der Landschaftsfotografie zuordnen.

Abhängig von Aufnahmesituation und -zweck werden die passenden Kameras und Objektive ausgewählt.

Üblich ist heutzutage der Einsatz digitaler Spiegelreflexkameras mit Sensorgröße im Vollformat (24 x 36 mm) und Wechselobjektiv. Typische Objektive sind Weitwinkel, Normalbrennweite und Teleobjektiv. Je nach Fund- oder Befundsituation muss für eine ausreichende Ausleuchtung gesorgt werden.

Professionelle Kameras bieten die Möglichkeit die Bilder im RAW-Format aufzunehmen, dieses speichert die nicht komprimierten Rohdaten des Sensors mit voller Farbtiefe und allen Bildinformationen [17]. Derzeit gibt es keinen Standard für das RAW-Format, jeder Hersteller verwendet hier eigene Formate. Alternativ können die Bilder in TIFF und JPEG konvertiert werden, dieses sind quelloffene Formate, welche von allen Computern und Bildprogrammen gelesen werden können.

#### **2.1.3.4 Analyse, Auswertung und Archivierung**

In der Archäologie ist es besonders wichtig den zeitlichen Zusammenhang zu den Funden herzustellen. Dabei gibt es zwei Grunddisziplinen. Zum einen das Bestimmen einer Abfolge von Ereignissen (relative Datierung), zum anderen die Einordnung dieser Geschehnisse in eine Epoche (absolute Datierung). Eine relative Datierung kann zum Beispiel durch vorhandene, aus dieser Zeit stammende Aufzeichnungen des Ereignisses die Anhaltspunkte liefern oder indem man davon ausgehen kann, dass die am tiefsten liegenden Schichten am ältesten sind und nach oben hin jünger werden. Dadurch lässt sich analog feststellen, dass man sich bei einer Ausgrabung immer rückwärts in der Zeit bewegt. Aber auch zu einer Zeit gängige Gestaltungsmerkmale, die sich evolutionär weiterentwickelten, können dabei helfen eine relative Datierung zu ermöglichen.

Da man die Fundstücke oder den Fundort aber so exakt wie möglich einem genauen Zeitpunkt zuordnen möchte, muss man sich anderer wissenschaftlicher Methoden bedienen. Wo sich früher zum Beispiel das Auszählen und Bestimmen von Mustern von Jahresringen als verlässlich erwies, werden heute fast ausschließlich Datierungsmethoden genutzt, die auf der Messung des Zerfalls eines radioaktiven Isotops des Kohlenstoffatoms (<sup>14</sup>C) basieren, welchem alle Organismen während ihres Lebens durch die atmosphärische Strahlung ausgesetzt sind.

Dieses in allen organischen Substanzen angelagerte Isotop beginnt seinen Zerfallsprozess mit Eintritt des Todes. Durch die vorhandene Reststrahlung lässt sich über die bekannte Halbwertszeit sehr genau feststellen, wie alt ein Fundstück ist.

Es gibt auch noch weitere sehr fortgeschrittene Methoden zur Datierung von Fundstücken wie beispielsweise Tiefseesedimentkernproben, Bohrkerne aus dem antarktischen und arktischen Eis sowie in Kernbohrungen an archäologischen Grabungsstätten enthaltene Blütenpollen, die anhand der Sedimentschichtklassifizierungen Auskunft über vergangene Umwelt- und Klimaveränderungen geben. Weiterhin zu nennen sind die Thermolumineszenz-, Elektrospin Resonanz- und Aminosäuredatierung. Jedoch leiden einigen Methoden unter eingeschränkter Präzision oder sind nur in bestimmten Szenarien oder Materialien nutzbar ([5] S. 160 ff.)

Ging es in der klassischen Archäologie vor allem um die zeitliche Einordnung der Funde, möchte die moderne Wissenschaft eine ganze Reihe weiterer Fragen sowie deren Interdependenzen beantworten, um daraus Schlussfolgerungen auf das Funktionieren und Zusammenleben menschlicher Gemeinschaften in früherer Zeit zu schließen ([5] S. 177 ff.):

- Wie war die Gesellschaft organisiert?
- Welchen Einfluss spielte die Umwelt?
- Wie haben die Menschen sich ernährt?
- Welche Werkzeuge wurden hergestellt und benutzt?
- Welchen Kontakt und Austausch gab es mit anderen Kulturen?
- Welche künstlerischen und religiösen Werke wurden hervorgebracht?
- Warum und wann änderte sich dies alles?

Neben dem „Wann?“ und „Wo?“ richtet sich der Fokus verstärkt auf die Erforschung und Interpretation des „Warum?“.

#### 2.1.3.4.1 Fundarchivierung

Die Aufbewahrung und Archivierung archäologischer Funde richtet sich – ebenso wie bei der Fundbergung – nach Material, Zustand und Umgebungsbedingungen an der Fundstelle (Abschnitt 2.1.3.2). Wichtige, zu beachtende Parameter bei der Einlagerung sind:

- Feuchtigkeit
- Temperatur
- Sauerstoffgehalt
- weitere Gase und deren Zusammensetzung
- Säuren und Laugen
- Licht

So sollen z.B. korrodierte Eisenfunde möglichst bei einer Luftfeuchte von unter 15%, organische Funde hingegen bei 55% relativer Luftfeuchtigkeit gelagert werden. Wurden letztere in feuchter Umgebung gefunden, sollen sie bei 100% Luftfeuchtigkeit oder direkt in Wasser eingelagert werden. Für anorganische Funde (Glas, Keramik, Stein) werden dieselben Parameter wie bei den organischen Funden empfohlen [17].

Die Räumlichkeiten zur Lagerung, ausgestattet mit entsprechenden Regalen, müssen gut bestückbar, trocken, frostfrei und gesichert sein. Es ist eine genaue Inventur mit Stell- oder Regalplatz zu erstellen, um unnötiges Fahren und Suchen bei der Nachbearbeitung zu vermeiden [17].

### 2.1.4 Zusammenfassung und Übersicht

Phasen	Methode	Hilfsmittel, Werkzeuge
1. Prospektion	Quellenrecherche	Literatur, Karten
	Oberflächenbegehung	
	Luftbildprospektion	Flugzeug, Hubschrauber, Kamera
	geophysikalische Prospektion	Cäsium-Magnetometer, geoelektrische Messsysteme
2. Ausgrabung	Reliefgrabung	Schaufel, Spaten, Kellen, Bürsten, Pinsel
	Flächengrabung	
	Dokumentation	siehe 3.
	Bergung	Hebezeuge, Verpackungsmaterial, Transportkisten
3. Dokumentation	geodätische Vermessung	Grabungsraster, Nivelliere, Distometer, Tachymeter (früher Theodolit), Maßband, Zollstock
	zeichnerische Dokumentation	Zeichenrahmen, Feldpantograph, Tachymeter, Photogrammetrie, 3D-Laserscanning
	schriftliche Dokumentation	
	fotografische Dokumentation	Kamera, Objektive, Stativ, Blitzlicht, Fotoleuchten
4. Analyse, Archivierung	Aufbewahrung	Räume mit passendem Klima, Regale, Kisten
	Datierung	
	Analyse	

Tabelle 3 Zusammenfassung und Übersicht

## 2.2 Grundlagen der Anastylose

Ziel der Enttrümmerung des Torbogens in Palmyra ist der Wiederaufbau nach Maßstab der Anastylose.

Mit Blick auf die Internationale Satzung für die Konservierung und Restauration von Monumenten und Sehenswürdigkeiten – auch die „Venicer Satzung 1964“ genannt – ist dahingehend laut Artikel 15 folgendes festzuhalten:

*„All reconstruction work should however be ruled out "a-priori". Only anastylosis, that is to say, the reassembling of existing but dismembered parts can be permitted. The material used for integration should always be recognizable and its use should be the least that will ensure the conservation of a monument and the reinstatement of its form.“ [20]*

Sinngemäß übersetzt:

*“Alle Rekonstruktionsarbeiten sollen von vornherein vollkommen ausgeschlossen werden. Lediglich in Form einer Anastylose, sprich, der Wiederausammenbau von existierenden aber zergliederten Teilen, ist dies gestattet. Das zum Einbau genutzte Material soll immer wahrnehmbar sein. Eine Verwendung soll sich darauf beschränken die Konservierung eines Monuments und dessen Widerinstanzsetzung seiner ursprünglichen Gestalt zu gewährleisten.“*

Die Anastylose beschreibt also eine speziell oder auch differenzierte Art der Rekonstruktion. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Verwendung vom Original vorhandener sowie erhaltener Bauteile. Zwar dürfen zur Anastylose nötige Bauteile ersetzt werden, diese müssen für den Betrachter jedoch eindeutig als solche Ergänzung sichtbar sein. Es dürfen laut Definition auch Bauteile ergänzt werden, wenn diese für den weiteren Erhalt oder die Konstruktion des Bauwerkes erforderlich sind. Neben der bereits im 19. Jahrhundert zu Teilen durch die Anastylose wieder aufgebauten Akropolis in Griechenland gab es auch in der Neuzeit Bestrebungen diesen Ansprüchen gerecht zu werden. Hier kann die Frauenkirche Dresden als Beispiel herangezogen werden.

## **2.3 Methoden und Praktiken bei der Enttrümmerung der Frauenkirche zu Dresden**

Die bei der Enttrümmerung der Frauenkirche durch das Büro Prof. Jäger entwickelte Methodologie und die während des Prozesses erworbenen Kompetenzen bilden eine der Hauptgrundlagen dieses Forschungsprojektes ([2] [3] [4]). Die Anfang der 1990er Jahre entwickelten Arbeitsabläufe mit der damals eingesetzten Technik sollen einer kritischen Betrachtung unterworfen werden und auf ihre heutige Praktikabilität untersucht werden. Die Grundpfeiler der Recherche bilden hierbei Gespräche mit den damals vor Ort arbeitenden Ingenieuren sowie die Diplomarbeit Boekhoff/Köber aus dem Jahre 2002 [15].

Der barocke Kuppelbau wurde zwischen 1726 und 1743 auf dem Gelände eines gotischen Vorgängerbaus vom Baumeister George Bähr errichtet. Im 20. Jahrhundert erfolgten mehrere Sanierungen an der ursprünglichen Kirche, die letzte in den Jahren 1937 bis 1942. Dabei wurden umfangreiche Aufmaßzeichnungen erstellt und Fotos angefertigt, was sich als glücklicher Umstand für den 50 Jahre später stattfindenden Wiederaufbau herausstellte.

Nach den Bombenangriffen auf Dresden in der Nacht vom 13. zum 14. Februar 1945 und dem dadurch verursachten Feuersturm, brannte die Kirche vollständig aus, nachdem der Brand durch ein paar nicht vermauerte Fenster ins Kircheninnere überschlagen konnte. Aufgrund der Hitzebeanspruchung kam es zu Abplatzungen an den tragenden Sandsteinsäulen, bis diese versagten und die Kirche am 15. Februar 1945 gegen 10:15 Uhr einstürzte. Über 40 Jahre prägte der Trümmerberg mit den Resten der Chorapsis und eines Treppenturmes das Bild eines der zentralen Plätze Dresdens. Oft war die Ruine in diesem Zeitraum der Grund für Diskussionen unter Architekten, Denkmalpflegern, Kunsthistorikern und ihren Widersachern. Auch wenn bereits wenige Monate nach dem Kriegsende erste Pläne für einen Wiederaufbau starteten, konnte erst nach der politischen Wende in der DDR bzw. der Wiedervereinigung der beiden deutschen Staaten der Wiederaufbau der Kirche ins Auge gefasst werden. 1993 wurde dann mit den praktischen Arbeiten zur archäologischen Rekonstruktion der Frauenkirche begonnen, welche mit der erneuten Weihe am 30. Oktober 2005 abgeschlossen wurden.

*„Unter dem Begriff der archäologischen Enttrümmerung ist die Aufarbeitung des Schuttberges der Ruine unter wissenschaftlich-archäologischen Gesichtspunkten mit dem Ziel der Erhaltung und Rettung von Originalmaterial und -substanz sowie Gewinnung von Informationen über das Bauwerk, seine Konstruktion und Gestaltung zu verstehen.“ ([2] S. 20)*

### **2.3.1 Abstecken der Planquadrate**

Über den Trümmerberg wurde in einem ersten Schritt ein Netz aus Planquadraten, bestehend aus rot-weißem Kunststoffband, mit 5x5 m Seitenlänge, gelegt. Die einzelnen Planquadrate hatten eine fortlaufende Nummerierung (Bild 7), das Gesamtgitter wurde geodätisch zum Landesnetz orientiert. Das Gitternetz wurde nicht zum Einmessen der Funde verwendet, dafür standen definierte Festpunkte zur Verfügung, stattdessen dienten die Planquadrate als Orientierungshilfen für die Arbeiten sowie die Dokumentation der Ergebnisse.

Weiterhin konnte über die vorhandene Gitterstruktur ein effizienter Arbeitsablauf koordiniert und die optimale Auslastung der zur Verfügung stehenden Ressourcen erreicht werden. Beispielsweise konnten dadurch die verschiedenartigen Tätigkeiten des Freilegens mit dem Schuttsauger, Fundstückaufnahme durch die beteiligten Architekten sowie Fundstückbergung mittels Schreitbagger parallel an verschiedenen Orten des Trümmerbergs erfolgen.

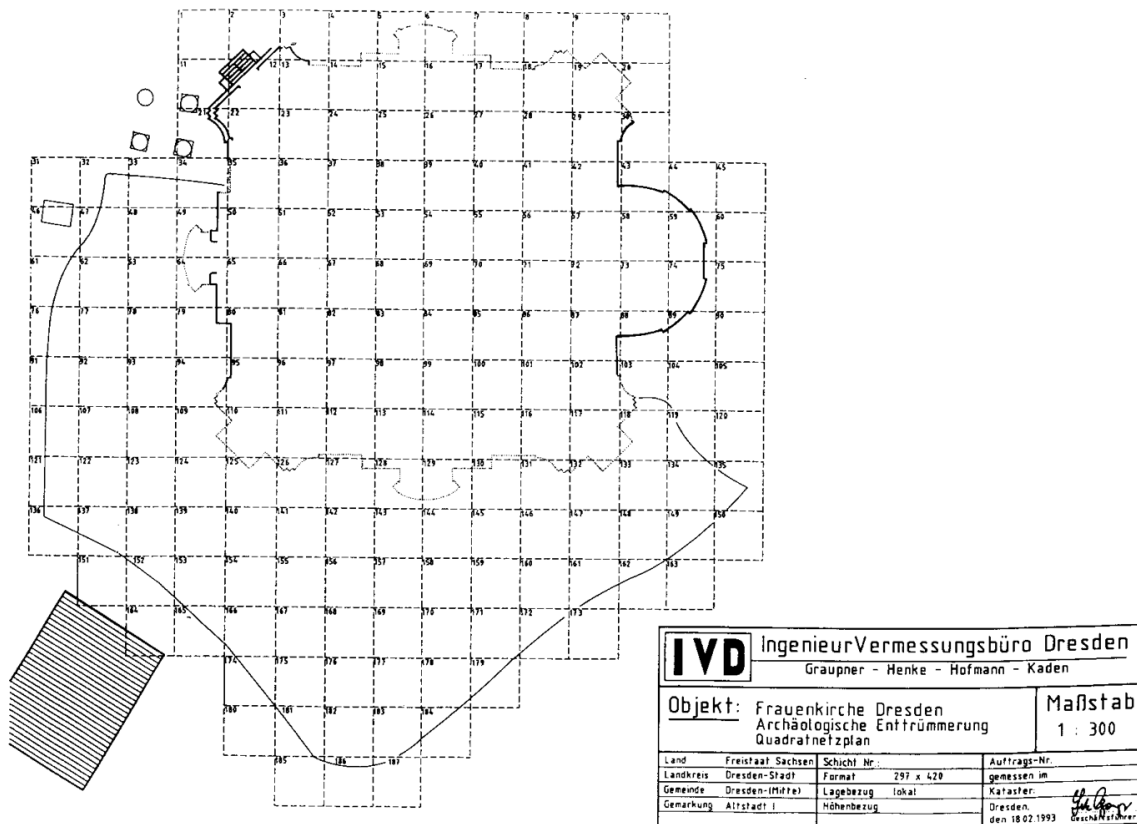


Bild 7 Trümmerberg mit nummerierten Planquadraten á 5x5 m [11]

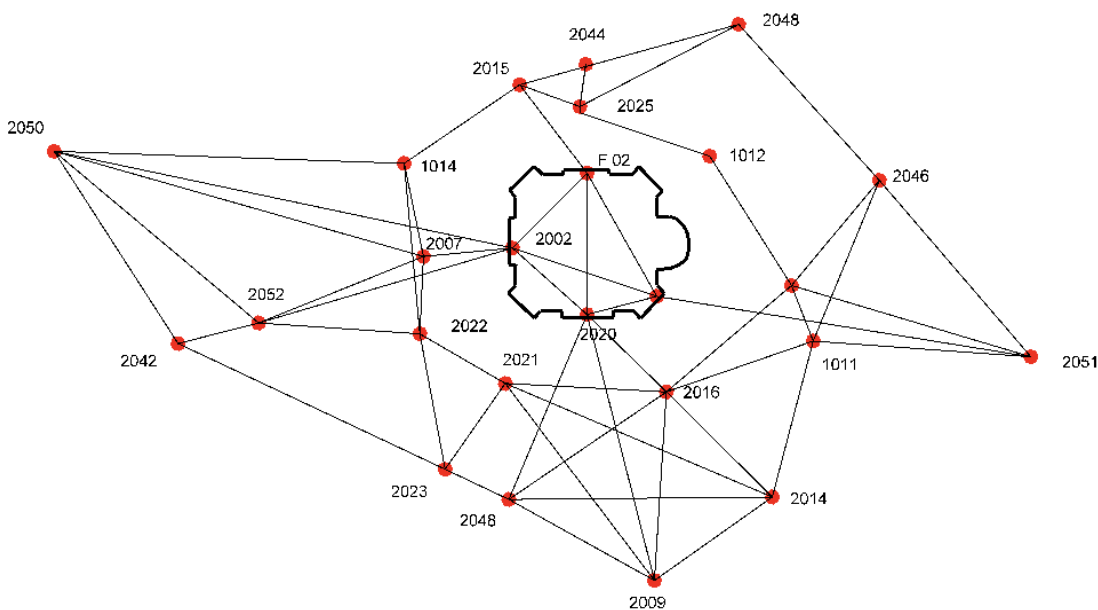


Bild 8 Einbindung der Frauenkirche ins Baulagenetz [11]

### 2.3.2 *Ansprache und Kennzeichnung der Funde*

Während des Freilegens einer Schicht waren stets ausreichend geschulte Mitarbeiter<sup>1</sup> vor Ort, welche die Entscheidung darüber trafen, ob ein Fundobjekt als Schutt, Hintermauerungsstein oder Fundstück (Oberflächen- bzw. Fassadenstein oder nichtsteinernes Fundstück) zu klassifizieren ist. Dafür wurden die Steine mit verschiedenen Farben markiert (Tabelle 4), Fundstücke erhielten eine Messingmarke mit einer vorher eingepprägten, einmaligen, laufenden Nummer. Diese Messingmarken wurden erst bei der finalen Verwendung (Einbau oder Vorlage für neu zu metzenden Stein) vom Fundstück entfernt. Die sonst übliche Markierung mittels Ölfarbe direkt auf den Steinen aufgeschriebener Zahlen wurde wegen des Risikos der Doppelvergabe von Nummern oder dem Unleserlichwerden der Schrift auf den verschiedenen Transportwegen verworfen.



**Bild 9** Messingmarke mit aufgeprägter Nummer [11]

Farbe	Klassifizierung
Rot	steinernes Fundstück, z.B. Fassadensteine
Grün	nichtsteinernes Fundstück
Gelb	Steinfundstück ohne Oberflächenmerkmale, Hintermauerungsstein
Blau	Schutt, keine Weiterverwendung

Tabelle 4 Farben zur Markierung auf dem Trümmerberg

### 2.3.3 *Erste Informationsaufnahme zum Fundstück*

Die Voridentifikation der Funde erfolgte direkt am Fundort auf dem Trümmerberg. Sie musste später einer Verifizierung unterzogen und bestätigt oder korrigiert werden. Zu dieser Erstaufnahme wurden entsprechende Formblätter verwendet, deren Information später in die sogenannten Kerndatenblätter einfluss.

<sup>1</sup> Zunächst zwei Diplomarchitekten, im fortgeschrittenen Bearbeitungsstand der Enttrümmerung bis zu vier Architekten und zwei Bildhauer.

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des „Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung“ gefördert (Az.: SWD-10.08.18.7-17.50). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Archäologische Enttrümmerung der Frauenkirche zu Dresden

TAL-Nr. 15  
Zurilog.

Auszug aus dem Kerndatenblatt

Aufnahmedatum: 22.09.93

Wischel

Planquadrat: 05-08/08-01

Seite: 1986

Fundstück-Nr.	Kurzbeschreibung Skizze	Steinhöhe [cm]	Platz im Ordnungssystem	aufzummess. Flächen							Nr. benachbarter Fundstücke	Verwendungsvorschlag Aufwand	Ansplan-Nr.	bearb.
				Schwierigkeitsgrad										
				1	2	3	4	5	6	7				
07423		52	a C TAA u fr ges 073	X	X	X	X	X	-	-	05-7424	Wiederh.	84	h
				2	1	-	-	1	-	-				
07424		58	a C TAA u fr ges 074	X	X	X	X	X	-	-	05-7423	Wiederh.	84	h
				2	1	-	-	1	-	-				
07425	Grundstücknummerverl. GT Nr. wird beim Bergbau entfernt		a C											
07426		94	a C HKA - dac - 040	X	X	X	X	X	-	-		Wiederh.	92	h
				1	2	-	-	1	-	-				
07427		90	a C TAA u fr ges 075	X	X	X	X	X	-	-		Wiederh.	84	h
				1	2	-	-	1	-	-				

Bild 10 Formblatt nach Erstaufnahme am Fundort [11]

Registriert wurde sofort die Fundstücknummer, welche jener auf der angebrachten Messingmarke entsprach (2.3.2). Weiterhin wurden folgende Informationen aufgenommen:

- eine Kurzbeschreibung und/oder Skizze
- Angaben zur Steinhöhe, dadurch ließen sich Rückschlüsse auf die Mauerwerksschicht in der Kirche ziehen, welcher der Stein entstammte
- Platz im Ordnungssystem
- Markierung der photogrammetrisch aufzumessenden Oberflächen
- eine erste Einschätzung zur Verwendung und zum Bearbeitungsaufwand

Diese Informationsaufnahme erfolgte planquadratweise, um den richtigen Kontext zu erfassen.

2.3.3.1 Kerndatenblatt

In den Kerndatenblättern wurden alle wichtigen Informationen zum Einzelfund eingetragen. Es ist an die in der Archäologie verwendeten Karteikarten angelehnt, zunächst wurden erste Informationen direkt am Fundort per Hand eingetragen. In weiteren Schritten wurden weitere Daten zum Fundstück aufgenommen, sodass am Ende folgende Daten zur Verfügung standen:

- Lokalisierung am Fundort
- Kurzbeschreibung
- Zuordnung im Bauwerk
- Material/Abmessungen/Gewicht
- Beschreibung der Oberflächen
- Verbindungsmittel/konstruktive Löcher
- Schäden

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des „Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung“ gefördert (Az.: SWD-10.08.18.7-17.50). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.



- Verwendungsvorschlag und -aufwand
- Bergedatum
- Lagerungsort und -schicht
- Verweis auf Zeichnungen, Fotos und Pläne
- Bearbeiter

Die bei der Erstaufnahme noch per Hand eingetragenen Daten wurden zu einem späteren Zeitpunkt per PC in digitale Form übertragen.

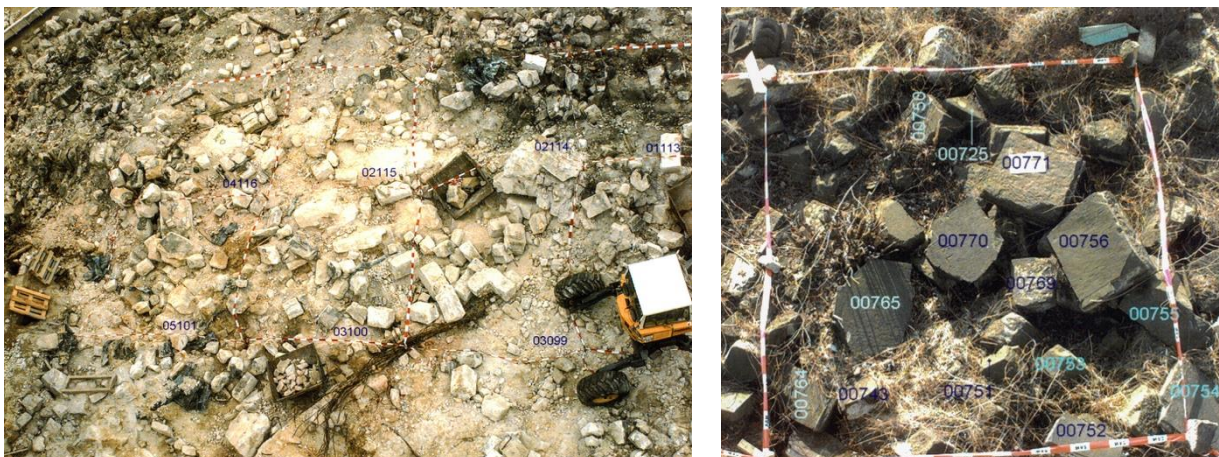
### 2.3.4 Aufnahme der Fundsituation

Von jedem Fundstück wurden auf dem Trümmerberg drei Koordinaten bestimmt, um den exakten Fundort und die Lage zu dokumentieren. Die Daten wurden mittels Tachymetertheodolit erfasst und in eine Datenbank (damals als „Koordinatenverzeichnis“ bezeichnet) am Computer übertragen. Aus dieser Datenbank wurden vereinfachte Tageskarten der einzelnen Planquadrate angefertigt, welche die o.g. drei Fundstückkoordinaten abbilden (Bild 11).

Vom Fundort und den Fundstücken wurden zur Dokumentation der Fundsituation mehrere Fotos aufgenommen:

- Großflächiges Übersichtsfoto über mehrere Planquadrate zur Einordnung in den Gesamtkontext
- Übersichtsfoto des entsprechenden 5x5 m großen Planquadrats
- Bis zu drei Fotos des einzelnen Fundstücks aus verschiedenen Perspektiven

Zusammen mit den zuvor ermittelten Fundkoordinaten lässt sich damit die Lage und Fundsituation auch zu einem späteren Zeitpunkt eindeutig rekonstruieren.



**Bild 11 Planquadrate Übersicht und Einzelfoto Planquadrat [11]**

Neben der Fundsituation wurden auf dem Trümmerberg auch baukonstruktive Informationen aufgenommen. Dies betraf die Verwendung von Steinformaten, Art und Weise der Mauerverbände sowie die Lokalisierung von Ankern.

### **2.3.5 *Bergung und Freilegung***

Nach der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Informationsaufnahme auf dem Trümmerberg folgte in einem nächsten Schritt die Bergung der Fundstücke. Dazu kam je nach Situation unterschiedliche Bautechnik zum Einsatz:

- Große Fundstücke wurden mit Hilfe von Gurten über einen von zwei stationären Turmdrehkränen geborgen
- Normale Fundstücke sind am Fundort palettisiert und ebenfalls mittels Krans vom Trümmerberg gehoben worden
- Kleinfunde hat man direkt mit der Hand geborgen
- Zusammenhängende Trümmerteile wurden teilweise vor der Bergung demontiert, in einigen Fällen unter den Blicken tausender Schaulustiger in Gänze mit einem Spezialkran geborgen
- Steine, welche nicht als Fundstücke identifiziert waren (sog. Hintermauerungssteine) lud ein Schreitbagger in einen Bauschuttcontainer

Nach der Bergung einer Fundschicht musste die darunter liegende freigelegt werden. Dies geschah mit einem Großsauger, mit welchem der Schutt (zu Sand zerstörte Steine bis zu faustgroßen Steintrümmern) abgesaugt wurde. Um ein Wegsaugen auch kleinerer Fundstücke zu vermeiden, wurde der vor dem Sauger befindliche Gesteinsgrus zunächst mit einer Harke untersucht. In stark zerstörten Arealen kam – nach Freigabe durch die Archäologen – auch ein Bagger zum Einsatz. Der abgesaugte Bauschutt wurde mit Mulden abtransportiert. Die Mitarbeiter der Baufirmen, welche mit der Bergung und Freilegung beschäftigt waren, wurden für diese Aufgaben besonders geschult und sensibilisiert.



**Bild 12      Freilegung einer Schicht [11]**

### 2.3.6 Zwischenlager und Fundbeschreibung

Nach ihrer Bergung erfolgte der Transport der Fundstücke in ein auf der Baustelle gelegenes Zwischenlager. Dort wurden weitere Merkmale erfasst, danach verbrachte man sie in ein großes Baustellenzelt zur fotografischen Aufnahme. Basierend auf dem Formblatt von der Erstaufnahme am Fundort fand eine weiterführende ausführliche Beschreibung sowie Aufnahme der Schäden und Merkmale statt. Ebenso wurde die Identifizierung der Fundstücke fortgesetzt, indem mit Hilfe von alten Fotos und Zeichnungen nach markanten Merkmalen, wie z.B. Verzierungen oder Vierungen, gesucht wurde. Alle gewonnenen Informationen wurden am Computer in das Kerndatenblatt eingegeben bzw. übertragen.



Bild 13 Zwischenlager [11]



Bild 14 Herr Rosenkranz bei Kartierarbeiten [11]

### 2.3.7 Fotografische Aufnahme von Fundstücken

Zur Erstellung von Fundstückzeichnungen mit exakter Bemaßung wurden bei der Entrümmung der Frauenkirche von jedem Fundstück photogrammetrische Bilder angefertigt.

Von den auf dem Formblatt markierten Fundstückseiten wurden je zwei Aufnahmen angefertigt. Hierbei kam eine Nikon N8008s mit elektronischem Speicherzusatz Kodak DCS200 zum Einsatz. Diese Kamera wurde ebenfalls für die Erfassung der Fundsituation auf dem Trümmerberg verwendet. Um weiterverarbeitbare Bilder zu erhalten, musste für eine gute Ausleuchtung gesorgt werden. Zu diesem Zweck wurden ebenso markante Kanten des Fundstücks mit Kreide hervorgehoben sowie eine horizontale und eine vertikale Messstrecke mit einfotografiert. War die Messstrecke nicht praktikabel, brachte man Messmarken direkt am Fundstück an und bestimmte ihren exakten Abstand zueinander.





**Bild 15 Stereobild eines Fundstücks [11]**

Mit der damaligen Technik konnten 50 Bilder angefertigt, danach mussten diese in den Computer übertragen werden. Dabei wurde sofort deren Qualität überprüft und – im Falle diese als unzureichend bewertet worden wäre – die Aufnahme wiederholt.

### 2.3.8 Einlagerung der Funde

Nach Beendigung der photogrammetrischen Aufnahmen war die Informationserfassung abgeschlossen. Die Fundstücke wurden in einem neben der Baustelle befindlichen Regallager in mehreren Etagen auf Paletten eingelagert. Der Aufbewahrungsort wurde im Kerndatenblatt vermerkt (z.B. R13/48/3).

Die geborgenen und nicht als Fundstück klassifizierten Hintermauerungssteine wurden weiter entfernt gelagert. Für sie war keine Lagerverwaltung nötig, sie wurden lediglich nach Größe und Grundformat sortiert.

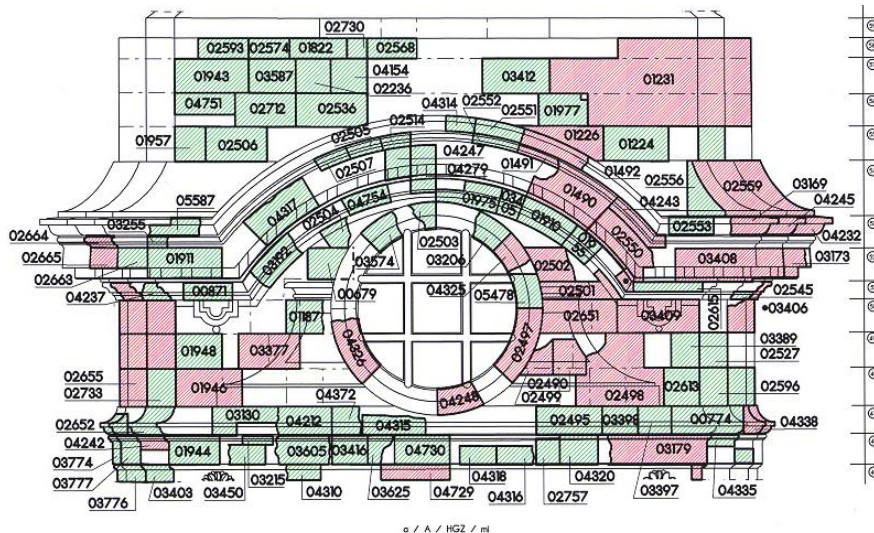


**Bild 16 Lagerplätze bei der Enttrümmerung [11]**

### 2.3.9 Fundkartierung

Um die korrekte Position der Fundstücke mit hoher Wahrscheinlichkeit feststellen zu können, musste zunächst der originale Steinschnitt auf Zeichnungen rekonstruiert werden. Dies gelang, indem man die Kieslingschen (der Architekt Arno Kiesling unterstützte ab 1933 Georg Rütth bei der bautechnischen Instandsetzung der Frauenkirche [21]) Zeichnungen der Außenansichten mit dem aus den 1920er bis -40er Jahren vorhandenen Fotomaterial abglich.

Die so entstandenen Zeichnungen im Maßstab 1:20 (auf der Baustelle wurde Maßstab 1:50 verwendet) hingen im Bauzelt, identifizierte Fundstücke wurden – je nach Wahrscheinlichkeitsgrad verschiedenfarben markiert – in diese eingetragen. Durch die Fortschreibung konnten Doppelzuordnungen vermieden werden, wurde ein Fundstück einem bereits besetzten Platz in der Zeichnung zugeordnet, musste diese Zuordnung erneut überprüft werden. Die fertigen Pläne mit den Fundstücken wurden in ein CAD-Programm zur Weiterverarbeitung der Zeichnungen übernommen.



Die Fundkartierung entspricht dem archäologischen Bearbeitungsstand vom 16.06.1994

- Wiederverwendbare Fundstücke, die ihrer Herkunft in der Fassade nach eindeutig bestimmt sind
- Wiederverwendbare Fundstücke, die eindeutig dem abgebildeten Fassadenbereich und einem gleichartigen Bauteil zugeordnet sind
- Fundstücke, die lediglich als Schablonensteine Verwendung finden können

Die Wiederverwendbarkeit der Fundstücke wurde durch die Bearbeiter entsprechend des Erkenntnisstandes nach denkmalpflegerischen und archäologischen Kriterien unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte eingeschätzt.

Die für die Fundstückskartierung verwendete Fassadenzeichnung ist eine Neubearbeitung (Büro Dr. Jäger) von Ansichtszeichnungen der Frauenkirche, welche durch die Architekten Kiesling, Pinkert und Dr. Köckerit: angefertigt wurden.

Archäologische Entrümmung der <b>Frauenkirche zu Dresden</b>		
Planinhalt: Fundkartierung	Maßstab: M 1 : 50	
<b>Südostseite Hauptgesimszone</b>	bearbeitet: Remus (LAD) Rosenkranz Thiele	
Planverfasser: Dr.-Ing. Wolfram Jäger Planungs- und Ingenieurbüro f. Bauwesen Maxim-Gorki-Str.22, 01445 Radebeul	gezeichnet: Adler	
Unterschrift:	Datum: 30.06.1994	
	Plan-Nr.: <b>38</b>	

Bild 17 Zeichnung Fundstückkartierung [11]

### 2.3.10 Verwaltung der gesammelten Informationen

Die gesammelten Informationen wurden in einer relationalen DBASE-Datenbank, welche über das Programm Paradox des Herstellers BORLAND erstellt und bedient wurde, abgelegt. Es wurde darauf geachtet, dass alle Hard- und Softwaretechnik von den einzelnen Anwendern mit PC-Grundkenntnissen bedient werden konnte, weswegen Computer mit MS-DOS bzw. Windows®

Betriebssystem und Programmen zum Einsatz kamen. Die einzelnen Kerndatenblätter wurden aus der Datenbank exportiert und im RDL-Format auf Festplatte gespeichert und ausgedruckt.

Die Bilder wurden auf CD im Kodak-Dateiformat KC2 bzw. KD2 gespeichert.

### **2.3.11 Herstellung der Fundstückzeichnungen**

Zur Anfertigung der Fundstückzeichnungen wurden Bilder, welche wie im Kapitel 2.3.7 beschrieben angefertigt wurden, in einen Computer eingelesen und mit Hilfe der Software PHIDIAS zueinander orientiert. Die dadurch entstandenen maßstabsgerechten Bilder wurden in ein CAD-Programm geladen und alle Linien und wichtigen Merkmale mit dem Cursor abgezeichnet. Die Anfertigung der Zeichnungen basierte auf einem zuvor erstellten Schraffuren- und Linienkatalog.

Mit dieser Methode konnten innerhalb von vier Jahren Fundstückzeichnungen von ca. 1800 der über 8500 Fundstücke angefertigt werden.



### 2.3.12 Zusammenfassung und kritische Würdigung

Im Folgenden eine tabellarische Übersicht über die einzelnen Arbeitsphasen während der Archäologischen Enttrümmerung der Frauenkirche, die angewandten Methoden und die dabei eingesetzten technischen Hilfsmittel.

Phasen	Methode	Hilfsmittel, Werkzeuge
<b>1. Prospektion</b>	Quellenrecherche	Fotos, Zeichnungen, Augenzeugenberichte
	Ortsbegehung und Bestandsaufnahme	Zeichenblock, Kamera, Messwerkzeuge
	Geodätische Einmessung	Tachymeter
	Anlage eines Gitternetzes	rot-weißes Plastikband
<b>2. Dokumentation und Bergung</b>	Kennzeichnen der Fundstücke	Schlagbohrmaschine, vorgeprägte Messingplaketten, Hammer / Schraubendreher, Farbspray, Formblätter
	Erfassen der Fundsituation	Kamera, Tachymeter, Polygonausrüstung
	Bergung der Fundstücke	Turmdrehkräne, Schreitbagger Menzi Muck 6000T, Manipuliergreifer (gepolsterte Backen), Lastgurte, Industriesauger, Paletten, Gabelstapler
	Freilegen nächste Fundschicht	
	Zwischenlager, Fortführung Fundbeschreibung am Fundstück	Formblätter
	Bauzelt, photogrammetrische Erfassung der Fundstücke	Kameras, Kamerastative, drehbarer Spezialtisch mit Maßeinteilung, Hebezeug über dem Messtisch, Passpunktmarken
<b>3. Einlagerung und Archivierung</b>	Einlagerung und Archivierung der Fundstücke in ein Hochregallager	Regallager, Gabelstapler, Paletten
	Lagerung der nicht als Fundstücke klassifizierten Steine	Gabelstapler, Paletten
	Informationssammlung und -verwaltung	Datenbanken (Software), Computer und Datenträger (CD-ROM / DAT-Streamerkassetten)
<b>4. Analyse, Auswertung</b>	Fundkartierung in den Zeichnungen	Steinschnittzeichnungen / historische Fotos zur Fundkartierung
	Erstellung Fundstückzeichnungen	Software für Photogrammetrische Auswertung, CAD-Software
	Wiederaufbauplanung	

Tabelle 5 Arbeitsphasen und Hilfsmittel bei der Enttrümmerung der Frauenkirche Dresden

Mit den beschriebenen Methoden und Hilfsmitteln konnte der 22.000 Kubikmeter [22] umfassende Trümmerberg, der durch mittelbare Kriegseinwirkung zerstörten Kirche, zwischen Januar 1993 und Mai 1994 vollständig geräumt und die Fundkartierung abgeschlossen werden. Für das Vorhaben einer archäologischen Enttrümmerung dieses Ausmaßes ist das eine extrem kurze Zeitspanne. Bezogen auf die angewandten Maßnahmen bestätigte sich dadurch, dass das gewählte Vorgehen zielführend und effizient war.

Im Rahmen der Erstellung dieses Forschungsberichts konnten dennoch einige Probleme identifiziert werden, deren Ursprung vor allem im Einsatz der damals noch sehr jungen Digitaltechnik zu sehen ist:

- **Dateiformate Bilder:** Die digitalen Bilder in den proprietären Kodak-Formaten KC2 und KD2 lassen sich derzeit (Stand Juli 2019) an heutigen Computern nicht mehr öffnen, da dafür spezielle Software nötig war, die auf aktuellen Betriebssystemen nicht mehr läuft und deren Entwicklung irgendwann eingestellt wurde. Der Zugriff ist nur noch über eine VM (Virtual Machine) möglich, über die das damals gängige Windows 3.1 ausgeführt werden kann.
- **Dateiformate Datenbanken und Kerndatenblätter:** Auch diese sind aus demselben Grund wie die Bilder nicht mehr einfach zugänglich. Allerdings wird in der Firma des Autors aus diesem Grund extra ein alter PC vorgehalten. Alle Kerndatenblätter sind zudem auf Papier ausgedruckt und archiviert.  
Es ist weiterhin möglich die Datenbanken über einen „Paradox dBase Access Reader“ [23] auszulesen und zu exportieren. Selbst mit Passwort „verschlüsselte“ Datenbanken können mit dem Hersteller-Master-Passwort „nx66ppx“ geöffnet werden [24].
- **Die photogrammetrische Erfassung:** Diese ist zur Herstellung der Fundstückzeichnungen zu hinterfragen, da während einer vierjährigen Dauer die Daten von nur 1800 von 8500 Steinen so bearbeitet werden konnten. Es ist zu überprüfen, ob das an der damals verwendeten Software oder Hardware lag.
- **Ortsgebundene Arbeiten:** Da es in den Jahren 1993/94 noch kein frei zugängliches Internet im heutigen Sinn gab, fanden alle Arbeiten zur Auswertung und Analyse direkt vor Ort statt. Alle Experten (Architekten, Denkmalpfleger, Archäologen) mussten aus diesem Grund immer vor Ort anwesend sein.

Aus den aufgeführten Problematiken ergeben sich Anforderungen an zukünftig einzusetzende Technologien, welche im weiteren Verlauf der Arbeit untersucht werden sollen.



## 2.4 Recherche und Beschreibung möglicher neuer Technologien

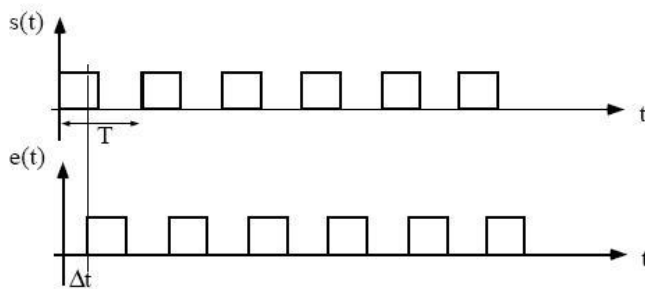
### 2.4.1 Tachymetrie

Tachymetrie ist eine Methode einer Entfernungsmessung von einem Standort zu einem Objekt mit Hilfe eines Lichtstrahls. Die Messung kann dabei auf zwei unterschiedliche Methoden erfolgen.

Die erste Möglichkeit besteht darin, dass ein Lichtstrahl als Impuls zu einem Objekt entsandt, von diesem reflektiert und die Zeit dieses Vorgangs gemessen wird. Da die Geschwindigkeit des Lichts als physikalische Größe bekannt ist, lässt sich aus der benötigten Zeit die Entfernung zum Objekt bestimmen. Dabei wird die Lichtgeschwindigkeit mit der Zeit multipliziert und dann Gemäß untenstehender Gleichung halbiert, da die gemessene Dauer dem Hin- und Rückweg des Lichtstrahls entspricht, aber nur eine Strecke den korrekten Abstand zum Objekt abbildet. Nachteil dieses Verfahrens ist der kurze Zeitraum, in dem die Messung erfolgen muss, was lediglich Genauigkeiten im Zentimeterbereich zulässt [25].

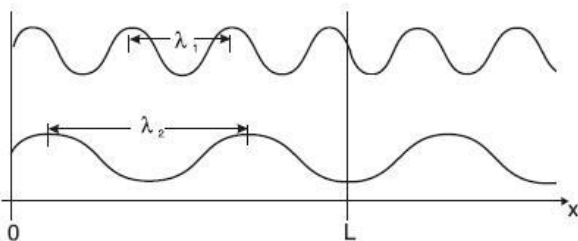
$$d = \frac{c * \Delta t}{2}$$

Bei der zweiten Methode wird ein Lichtstrahl mit einer festen Frequenz dauerhaft zu einem Objekt entsandt, von diesem reflektiert und die Phasenverschiebung beim Wiedereintreffen gemessen (Bild 18).



**Bild 18** Darstellung einer Phasenverschiebung

Um die Genauigkeit und Eindeutigkeit zu erhöhen sowie etwaige Interferenzen auszugleichen, werden meist nicht nur ein, sondern mehrere Lichtstrahlen unterschiedlicher Frequenzen zeitgleich entsandt und nicht nur die Phasenverschiebung des jeweiligen Laserstrahls gemessen, sondern auch die Phasenverschiebung der Modulationen zueinander (Bild 19, [25] [26]).



**Bild 19** Darstellung der Phasenverschiebung zweier Modulationen zueinander

Tachymetrie wird vor allem in der ingenieurtechnischen Vermessung angewandt. Also immer dort, wo die Lage von vorher genau definierten Fixpunkten zueinander wichtig ist. Das können zum Beispiel Messpunkte im Landeskoordinatensystem sein, oder aber bestimmte vorher gekennzeichnete Messpunkte innerhalb und außerhalb eines Gebäudes.



**Bild 20 Fester Vermessungspunkt [27], Messpunkt innerhalb eines Gebäudes [28]**

## **2.4.2 Laserscanning**

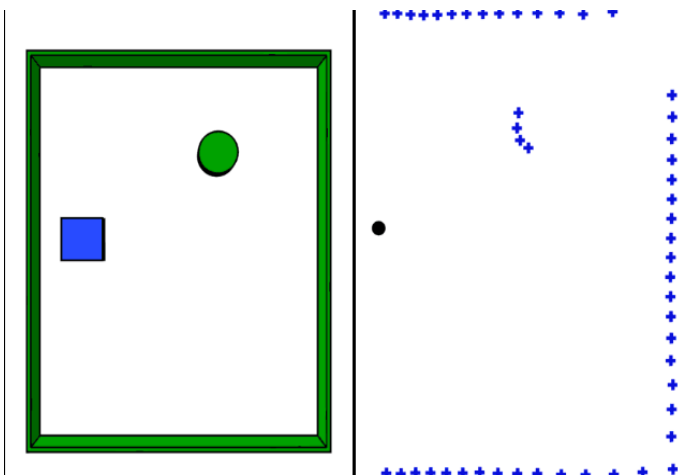
### 2.4.2.1 Grundlagen des Laserscannings

Laserscanning oder Laser-Abtastung ist ebenso wie die Tachymetrie eine Methode zur Entfernungsmessung mit Hilfe eines Lichtstrahls von einem Standort zu einem Objekt. Die physikalischen Grundlagen teilt sich die Tachymetrie mit dem Laserscanning.

Laserscanning hat sich in den letzten Jahren als hilfreiches Werkzeug bei Ingenieuren und Architekten erwiesen – ob als terrestrisches System auf einem Stativ für Aufnahmen von höchster Präzision oder über Kopf befestigt an Drohnen und Flugzeugen für großflächige Luftaufnahmen für Archäologie, Landwirtschaft oder Straßenbau.

Zusätzlich können mit den erfassten Werten weitere Informationen verknüpft werden. Dazu gehören zum Beispiel Reflektionswerte, aus Fotografien extrahierte Farbinformationen oder Koordinaten zur Lagebestimmung eines Punktes.

Unterschieden werden muss auch in Systeme, bei denen der Benutzer bestimmte Punkte anvisiert und diese einmisst (vgl. Tachymeter) oder solche, bei dem der Laserscanner Punkte in einem vom Benutzer festgelegten Bereich und Raster abtastet (vgl. 3D-Laserscanner). Ersteres hat den Vorteil, dass nur benötigte Punkte erfasst werden und die Anzahl der Punkte datensparsamer sind. Nachteilig ist die wesentlich niedrigere Informationsdichte die dadurch erreicht werden kann. Dem entgegenstehend ist ein Nachteil der zweiten Methode die große Datenmenge die dadurch erzeugt wird, von Vorteil die hohe Informationsdichte. Es ist zu beachten, dass der Punktabstand der gemessenen Punkte zueinander mit größerer Distanz zunimmt (Bild 21).

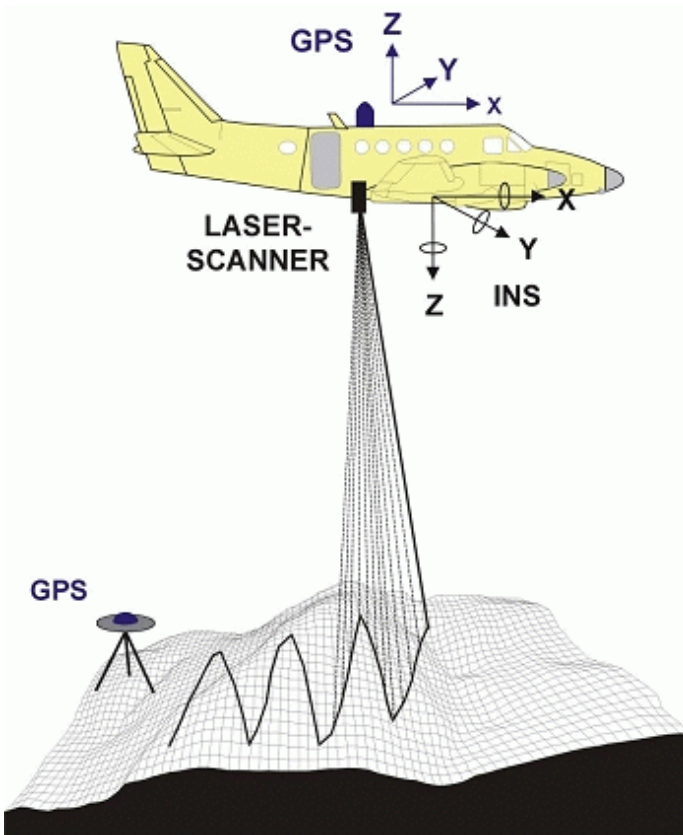


**Bild 21 Darstellung des Punktabstandes in Abhängigkeit zur Objektentfernung [29]**

Mit wenigen Ausnahmen (handgeführte Laserscanner), sind die Messungen nicht von der Belichtung der Objekte abhängig. So können erhöhte Umgebungshelligkeiten oder direkter, starker Lichteinfall minimalen Einfluss auf die gemessenen Reflektionswerte haben. Eine Messung der Entfernung zu einem bestimmten Punkt ist durch das genutzte Lichtspektrum bei Laserscannern aber selbst bei absoluter Dunkelheit möglich.

#### 2.4.2.2 Luftgestütztes Laserscanning (airborne laserscanning)

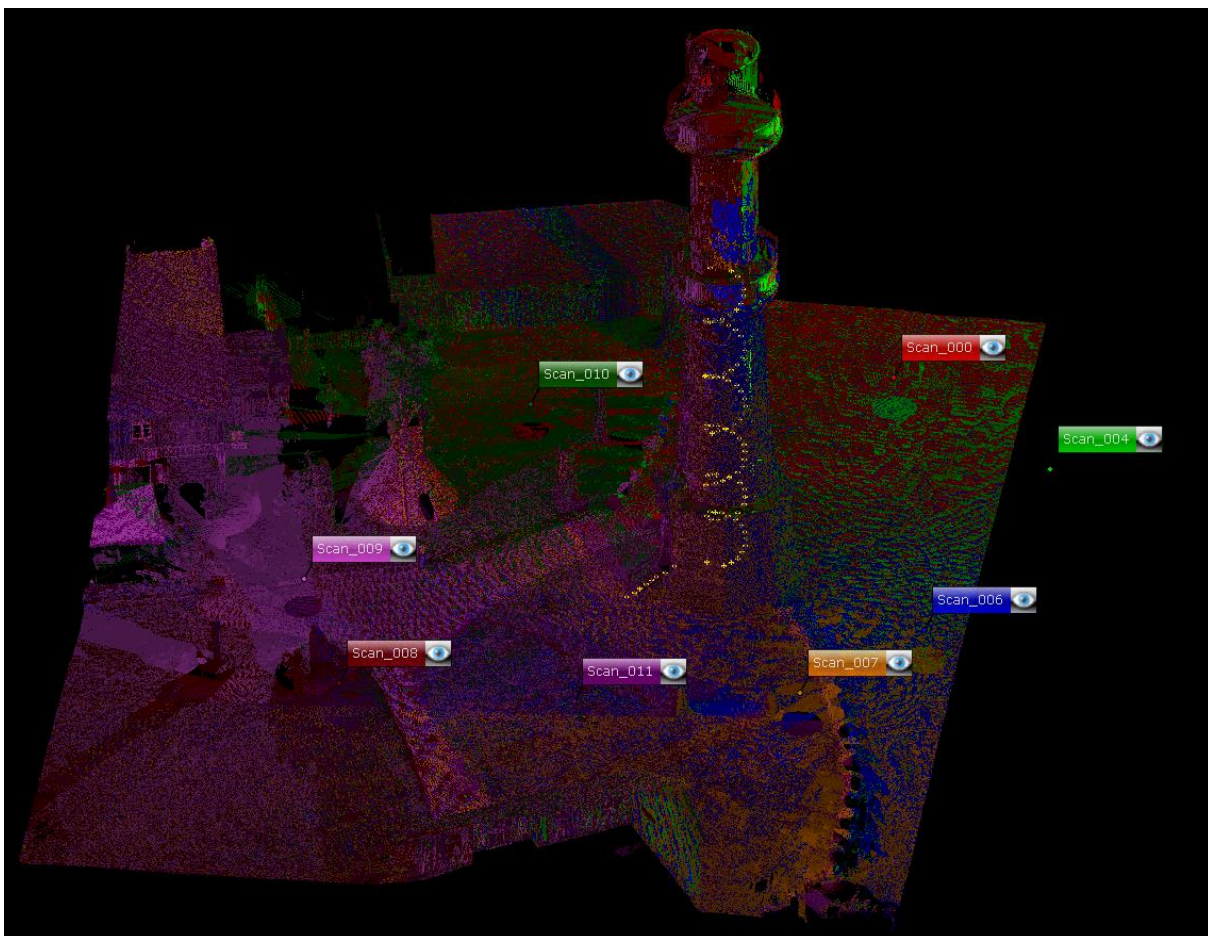
Beim luftgestützten Laserscanning wird ein Laserscanner an der Unterseite eines Flugzeuges, Hubschraubers oder Drohne befestigt. Damit befliegen wird dann ein Gelände während der Messung, wodurch ein zickzackartiges Bild erzeugt wird (Bild 19). Durch die Verknüpfung der Scandaten mit GPS-Informationen sowie den Instrumenteninformationen des Flugzeugs können die gemessenen Punkte in einem kartesischen Koordinatensystem verortet werden. Durch diese Methode können in kurzer Zeit sehr große Flächen erfasst und zum Beispiel für topologische Karten oder zur Bestandserfassung von großen Gebieten genutzt werden.



**Bild 22 Prinzip luftgestütztes Laserscanning [30]**

### 2.4.2.3 Terrestrisches Laserscanning

Der bevorzugte Anwendungsbereich des terrestrischen Laserscanning liegt bauartbedingt beim Erfassen von Momentzuständen von Oberflächen, welche im weitesten Sinne um den Scanner herum angeordnet sind (Räume, Fassaden, Gelände). Es ist nicht dazu geeignet, einen Körper per se abzubilden, sondern nur verschiedene Sichten auf einen Körper, die man zusammensetzen kann (Bild 23).



**Bild 23 Aus Standpunkten zusammengesetzter Gesamtscan, Faro SCENE [11]**

Respektive dazu ist er sehr gut geeignet die Geometrie von innerhalb eines Körpers zu erfassen (vgl. Innenräume). Die Scanpunktwolken können je nach Hersteller nicht nur als dreidimensionale Wolken, sondern auch in einer zweidimensionalen vereinfachten Ansicht dargestellt werden (Bild 24).





**Bild 24** Flächenhafte Darstellung eines Scans, Faro SCENE [11]

#### 2.4.2.4 Handgeführtes Laserscanning

Beim handgeführten Laserscanning misst nicht direkt ein Lichtstrahl, sondern vielmehr werden für den Menschen nicht sichtbare Lichtspektren genutzt, um Messpunkte mit Hilfe von Triangulation zu bestimmen. Dafür wird ein Muster auf die zu messende Fläche projiziert und eine Fotografie, mit der dann auf der Oberfläche verzerzten Projektion korreliert, um die Entfernung der Punkte zueinander bestimmen zu können. Dieser Vorgang findet in einem vom Gerät abhängigen Intervall statt, sodass eine Vielzahl solcher Einzelbilder entsteht. Diese müssen dann softwareseitig anhand von geometrischen oder anderen spezifischen Merkmalen miteinander zu einem Gesamtmodell zusammengeführt werden.



**Bild 25** Lichtmuster, sichtbar gemacht durch eine Spezialkamera [31]

### 2.4.3 Photogrammetrie

#### 2.4.3.1 Grundlagen der Photogrammetrie

Das Prinzip der Photogrammetrie lässt sich im Grunde auf die geometrische Methode der Triangulation zurückführen. Durch die Projektion eines Gegenstandes auf zwei Flächen aus unterschiedlichen Blickrichtungen (Photographien) lässt sich über gemeinsame Punkte auf den beiden Projektionsflächen die Position dieser Punkte in einem kartesischen Koordinatensystem bestimmen (Bild 26). Diese gemeinsamen Punkte werden gemeinhin als Features bezeichnet. Diese Features lassen sich durch verschiedene Softwareprodukte automatisch ermitteln und deren Position zueinander bestimmen. Die gefundenen Punkte werden zudem üblicherweise mit den in den Fotografien hinterlegten Farbinformationen gespeichert. Die Punktdichte ist dabei vor allem abhängig von der Qualität, Auflösung und Anzahl der Fotografien [32].

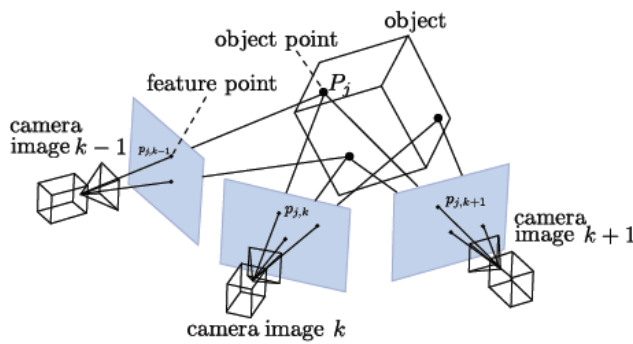


Bild 26 Schematische Darstellung Photogrammetrie [33]

Vorteil dieser Erfassung von Objekten ist vor allem der Kostenfaktor, da mittlerweile nahezu jede Smartphone-Kamera qualitativ ausreichende Bilder liefert, um „alltagstaugliche“ photogrammetrische 3D-Modelle von Objekten oder Gebäuden erstellen zu können. Im professionellen Kontext werden meist spezielle Kameras, deren Spezifikationen sehr genau bekannt sind, genutzt, um das Messergebnis zu verbessern. Die Einsatzgebiete der Photogrammetrie reichen von großflächigen Modellen (Google Maps) über die Archäologie bis hin zur Erstellung von fotorealistischen Computerspielwelten (Battlefield 1, EA DICE, 2016). Ebenso mannigfaltig stellt sich die Verfügbarkeit von Softwarelösungen dar. Zum Nachteil gereicht ist der Photogrammetrie, dass die erstellten Modelle in der Regel keinerlei Maßstab besitzen und diese durch feste Messpunkte, deren Lage zueinander bekannt ist, skaliert werden müssen. Leider ist die Photogrammetrie nicht dazu geeignet die Kubatur von Innenräumen zu erfassen, sie ist vor allem darauf ausgelegt die Geometrie von Körpern exakt darzustellen. Auch schwierige Lichtverhältnisse können die Möglichkeiten der Photogrammetrie stark einschränken.



**Bild 27 Darstellung der Kameraanordnung einer Rekonstruktion, COLMAP [11]**

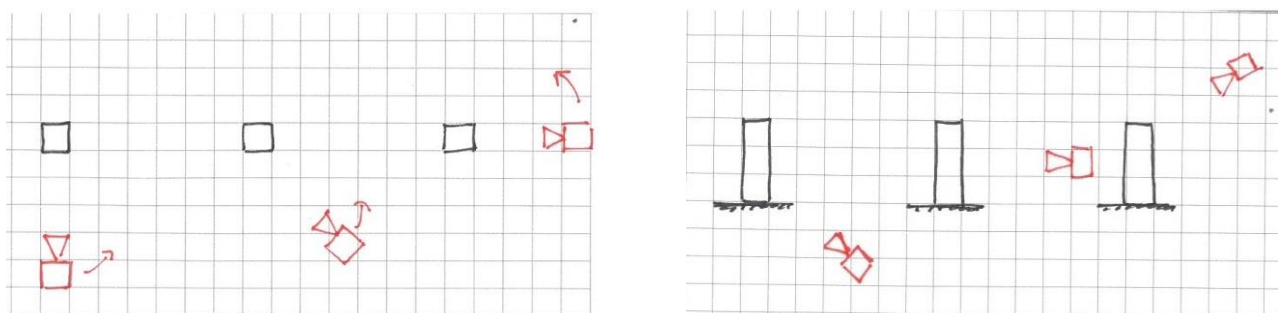
#### 2.4.3.2 Luftgestützte Photogrammetrie

Um besonders große oder schwer zugängliche Bereiche erfassen zu können, ist es möglich Bilder mit Hilfe von Drohnen oder gar Flugzeugen sowie Satelliten zu erfassen. Die Prinzipien bleiben dabei die gleichen. Jedoch ändert sich die absolute Auflösung der Punkte (Punkte pro Zentimeter) mit zunehmender Entfernung zum Objekt, sollte die Auflösung sich nicht proportional erhöhen.

#### 2.4.3.3 Handgeführte Photogrammetrie

Die Aufnahmen werden von verschiedenen Standpunkten gemacht. Dabei geht man in Runden um das Objekt herum. Jedes Foto sollte das vorherige zu mindestens 30% überlappen. Eine höhere Überlappung der Aufnahmen sorgt für ein leichteres Zusammenfügen der Bilder.

Nachdem eine Runde um das Objekt abgeschlossen ist, ist es je nach Größe und Art des Objekts nötig weitere Runden um das Objekt herum aufzunehmen. Dies dient dazu, um durch die unterschiedlichen Blickwinkel auch die Bereiche des Objekts zu erfassen, welche bei einer „einfachen Umrundung“ verschattet geblieben wären (Bild 28).



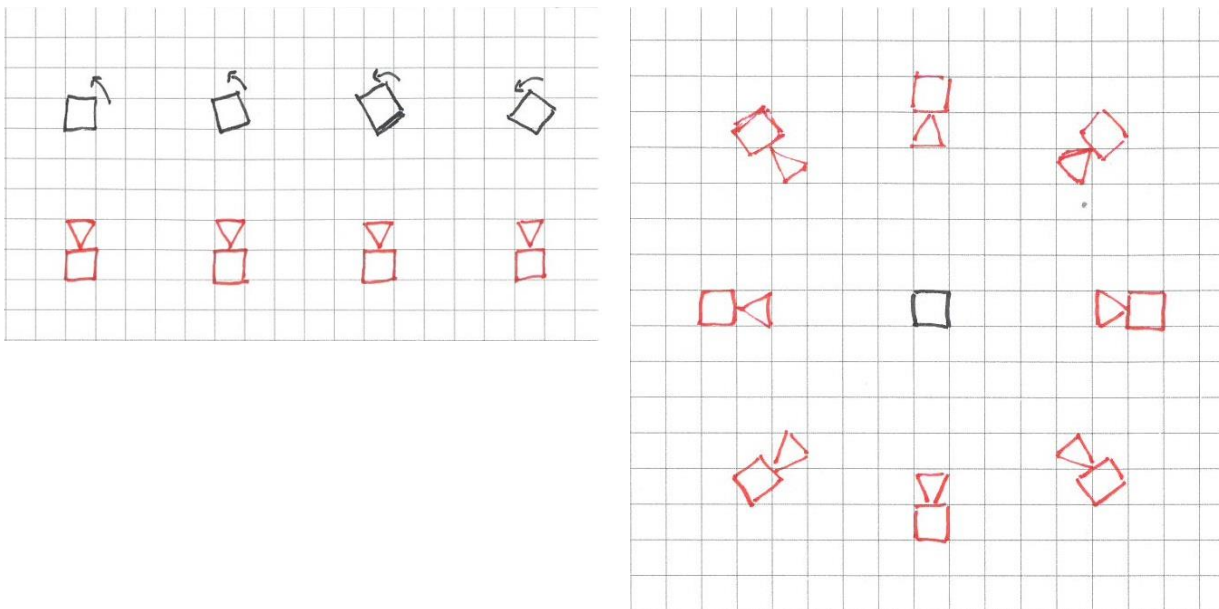
**Bild 28 Darstellung verschiedener horizontaler und vertikaler Blickwinkel auf das Objekt [11]**



Wie im Abschnitt 2.3.7 beschrieben, können in das Bild horizontale und vertikale Maßstäbe einfotografiert werden, die später eine Kalibrierung der Aufnahmen ermöglichen. Die Skalierung des Modells kann aber auch durch zwei beliebige händisch herausgemessene Punkte am Objekt selbst vorgenommen werden. Meist dient dazu die gemessene Höhe vom Boden bis hin zum höchsten Punkt des Objektes, da sich dies bei kleinen als auch sehr großen Objekten mit einfachen Mitteln messen lässt.

#### 2.4.3.4 Stationäre Photogrammetrie

Die stationäre Photogrammetrie teilt sich in zwei weitere Unterbereiche. Zunächst gibt es die stationäre Photogrammetrie mit nur einer stationär angebrachten Kamera und einem meist um die Z-Achse auf einem Drehteller rotierenden Messobjekt (Bild 29, links). Eine weitere Variante besteht in einem stationärem Messobjekt, welches von mehreren, ebenfalls stationären Kameras gleichzeitig erfasst wird (Bild 29, rechts). In beiden Fällen erfolgt die Aufnahme des Objektes wie auch bei der handgeführten Photogrammetrie (Abschnitt 2.4.3.3) aus verschiedenen hohen Blickwinkeln auf das Objekt (Bild 28, rechts).



**Bild 29** Schematische Darstellung einer statischen Kamera vor einem rotierenden Objekt (links) und der Aufnahme eines statischen Objekts durch eine Vielzahl statischer Kameras (rechts) [11]

### 2.4.4 Weitere Technologien

Neben der klassischen Photogrammetrie und dem Laserscanning gibt es noch eine Vielzahl von Subsystemen oder hybride Formen anderer Technologien. Auch diese galt es – zumindest kurz – zu erfassen und ihren Nutzen abzuschätzen.

#### 2.4.4.1 Digitale Bildkorrelation

Die digitale Bildkorrelation (englisch „digital image correlation“ oder kurz DIC) ist ein kamerabasiertes Verfahren zur berührungslosen Messung von Objekten und deren Verformungen oder Bewegungen. Es wird überwiegend zur Materialprüfung und in der experimentellen Mechanik eingesetzt [34]. Es wurde durch die Mithilfe eines Forschungsprojektes an der TU Dresden ermöglicht, ein „3D-Stereo Digital Image Correlation System“ zu untersuchen. Die Grundprinzipien

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des „Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung“ gefördert (Az.: SWD-10.08.18.7-17.50). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

dieser Technologie basieren auf der Photogrammetrie in Verbindung mit der Möglichkeit, durch das Erfassen von einer Vielzahl von Momenten, einen Verlauf eines Ereignisses dreidimensional abzubilden. Um die Messung zu ermöglichen muss vorher per Hand auf die Oberfläche ein zufälliges Punktmuster (Speckles) aufgebracht werden. Die Skalierung erfolgt mittels einer speziellen Schablone, die von der Software verarbeitet werden kann.

Im Verlauf der Untersuchung wurde klar, dass das Anwendungsprofil dieser Technologie einen zeitlich begrenzten Vorgang wie die Bewegung von einem Punkt zu einem anderen oder einer Vibration zu erfassen, keine oder nicht genügend Schnittpunkte mit den Anforderungen bei einer Anastylose aufweist. Daher wird dieses System im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht weiterverfolgt.

#### 2.4.4.2 Microsoft Kinect

Mit der Einführung des Kinect-Sensors im Jahr 2010 [36] reagierte Microsoft auf den von der Spieleindustrie losgetretenen Trend der Bewegungssteuerung. Als erstes Gerät seiner Art ermöglichte die spezielle Kamera das Spielen ohne Controller. Der 3D-Sensor und das verbaute Mikrofon reagierten ausschließlich auf Körpereinsatz und Sprachbefehle. Eine revolutionäre Technologie, die auch außerhalb der Spielebranche für Aufsehen sorgte und später unter anderem im medizinischen Bereich zum Einsatz kam. Trotzdem blieb der große Erfolg des Kinect-Sensors aus und sieben Jahre nach Erscheinen des ersten Modells stellte Microsoft die Produktion ein.

Die Kinect kann mit der Hilfe von zwei zueinander definierten Kameras über geometrische Gesetzmäßigkeiten Körper abbilden. Es liegt also auch der Kinect die Photogrammetrie als Ausgangstechnologie zu Grunde. Kinect wurde konzipiert, um den Ist-Zustand eines Körpers, aber auch dessen Bewegungen zu erfassen und zu deuten. Es ist durch clevere Algorithmen jedoch möglich geworden, auch größere, ruhende Körper zu erfassen.

### **3 Entwicklung einer Online-Applikation zur Enttrümmerung (hermine)**

Aufgrund der im Nachhinein – nach fast 30 Jahren – entdeckten Probleme bei der Zugänglichkeit zu den archivierten Dokumentationsmaterialien (Datenbanken, digitale Kerndatenblätter, Bilder), wird der Fokus der Arbeit zunächst auf die Entwicklung einer für derartige Projekte maßgeschneiderten – „hermine“ getauften – Software gelegt. Diese wird später im Rahmen des Feldversuches auf ihre Praktikabilität überprüft.

#### **3.1 Vorüberlegungen, Anforderungen**

Vor der Entwicklung eines Softwareprojektes muss Klarheit über alle zu betrachtenden Parameter, Umgebungsvariablen und Zielgruppe (Anwender) herrschen. Auf dieser Basis wird die Entscheidung der zu verwendenden Technologie und Hardwareanforderungen getroffen. Nur so kann gewährleistet werden, dass alle Anforderungen erfüllt werden können.

##### **3.1.1 Generelle Anforderungen**

Die Software soll während des gesamten Arbeitsprozesses eingesetzt werden, weswegen folgende generelle Anforderungen an sie gestellt werden:

- Registrierung der eingemessenen Gitterstruktur und der einzelnen Planquadrate
- Registrierung des Nummernraums für die Fundstücknummern, Überprüfung der Eineindeutigkeit (keine Nummer darf doppelt vergeben werden, kein Fundstück unter mehreren Nummern registriert werden)
- Fundstückdaten müssen eingegeben, gespeichert, editiert und ausgegeben werden können
- Die Daten der Fundsituation müssen eingegeben, gespeichert, editiert und ausgegeben werden können
- Die Ortsdaten der Fundstücke müssen über alle Prozesse (Fund, Bergung, Zwischenlagerung, Lagerung, Einbau) registriert werden und lückenlos nachvollziehbar sein
- Die Verknüpfung mit und die Zuordnung zu anderen Datenquellen (Bilder, Zeichnungen, Scans) muss gewährleistet sein
- Lagerverwaltung der geborgenen und kartierten Fundstücke

##### **3.1.2 Zielgruppe**

Die Zielgruppe, die durch die Software angesprochen werden soll, ist sehr groß. Vor allem Forscher, Archäologen, Restauratoren und Bauausführende sollen sich für ihren Einsatz bei Enttrümmerungs- und Anastylosearbeiten entscheiden. Damit von vornherein eine Nutzung auf internationaler Ebene möglich ist, wird das User Interface (Benutzeroberfläche) auf Englisch gestaltet.

##### **3.1.3 Entscheidung zu Open Source Software**

Aus dem Interesse heraus, die Weiterentwicklung zu ermöglichen und nicht von kommerziellen Anbietern bezüglich Aktualisierung und Verfügbarkeit abhängig zu sein, wurde frühzeitig die Entscheidung getroffen, dass die Software im Rahmen einer Open Source-Lizensierung frei nutzbar sein soll.

Nach Recherche verschiedener Lizenzmodelle für Open Source Produkte wurde hermine unter AGPL-3-only [37] lizenziert. Diese Lizenz sieht vor, dass hermine frei (frei wie in Freiheit, nicht frei wie in kostenlos) von allen genutzt und sogar verkauft werden darf – egal, ob privat oder kommerziell – unter der Voraussetzung, dass sobald eine Veränderung am Source-Code vorgenommen wird, dieser ebenfalls für die Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden muss. Das ist, im Gegensatz zur „normalen“ GPL-Lizenz auch der Fall, falls das Angebot lediglich als Web-Applikation gehostet wird. Damit ist es zwar nicht ausgeschlossen, dass ein Drittanbieter hermine unter anderem Namen kommerziell vertreibt – es ist aber ausgeschlossen, dass hermine von einem Drittanbieter verändert wird, ohne dass die Allgemeinheit von diesen Veränderungen profitiert und diese auch ohne etwas dafür zu bezahlen, nutzen kann. Dieses Verfahren ist auch als Copyleft bekannt.

So wie hermine als Open Source-Applikation zur Verfügung gestellt wird, werden zu ihrer Entwicklung konsequent Open Source-Technologien eingesetzt, welche im Abschnitt 3.1.5 aufgeführt werden.

### **3.1.4 Skalierbarkeit, plattformübergreifende Nutzung**

Weitere Ansprüche werden durch die Skalierbarkeit an die Software gestellt. Je nachdem wie groß das zu bearbeitende Trümmerfeld ist, sollen viele Mitarbeiter gleichzeitig darauf zugreifen und mit hermine arbeiten können. Aus diesem Grund kommen ausschließlich Technologien zum Einsatz, welche die Nutzerzahl nicht schon von vornherein limitieren.

Das Thema der Skalierbarkeit berührt auch die Nutzung auf verschiedenen Geräten. Sowohl im Außeneinsatz auf handlichen Tablets als auch auf Bildschirmen von Laptops oder Festrechnern muss die komplette Funktionalität gewährleistet sein.

Durch die Nutzbarkeit auf verschiedenen Geräten wird auch ein weiteres wichtiges Thema berührt: die Interoperabilität über verschiedene Betriebssysteme hinweg. Zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit kommen auf Tablets vor allem Android- und iOS-Betriebssysteme, auf Laptops und Festrechnern hingegen Windows, macOS und verschiedene Linux-Distributionen zum Einsatz.

Sich von vornherein auf ein bestimmtes Betriebssystem oder einen konkreten Hersteller zu beschränken, kann zu ungewollten Abhängigkeiten führen. Die Applikation sollte daher unabhängig von solchen Faktoren bleiben, weswegen entschieden wurde, hermine in Webtechnologien zu erstellen, welche über verschiedene Browser unabhängig vom Betriebssystem funktionieren.

### **3.1.5 Verwendete Technologien**

Zur Entwicklung und zum Betrieb von hermine kommen folgende Software und Technologien zum Einsatz:

#### **3.1.5.1 Frontend**

Zur Gestaltung der Benutzeroberfläche und Darstellung der Inhalte im Browser wird das Bootstrap-Framework verwendet [38].

Dieses beruht – wie jede Webseite – auf der textbasierten Auszeichnungssprache HTML (derzeit HTML5).

Mittels der Stylesheet-Sprache CSS (Cascading Style Sheets) werden die HTML-Elemente zur Darstellung im Browser formatiert (z.B. Höhe, Breite und Farbe eines Formulareingabefeldes).

Beide Sprachen werden vom World Wide Web Consortium (W3C) standardisiert und ständig weiterentwickelt [39]. Aktuell gibt es keine Alternative zur Darstellung von Inhalten in Webbrowsern.

Zur Vermeidung eines erhöhten Datenaufkommens durch ständig neues Laden der Seiten (z.B. bei Dateneingaben in Formulare) kommt das AJAX-Konzept (Asynchronous JavaScript and XML) zum Einsatz. Dieses wird von der verwendeten Scriptsprache AngularJS gesteuert.

### 3.1.5.2 Backend

Die Applikation hermine wurde in der Scriptsprache PHP programmiert, welche heutzutage hauptsächlich für die Erstellung dynamischer Webanwendungen genutzt wird. Sie wird als freie Software unter PHP-Lizenz verbreitet [40].

Die zugrundeliegende relationale Datenbank basiert auf der Datenbanksprache SQL („Structured Query Language“).

### 3.1.5.3 Server

Das System ist generell konzipiert für einen Apache Webserver mit MariaDB-SQL-Datenbank [41]. Andere Serversysteme und SQL-basierte Datenbanksysteme sind aber ebenfalls möglich, sofern sie PHP unterstützen.

Damit die Applikation hermine in einer Webumgebung läuft, werden folgende serverseitige Softwarekomponenten benötigt:

1. Für Server mit Linux-Betriebssystem: LAMP = **L**inux, **A**pache, **M**ariaDB, **P**HP
2. Für Server mit Windows-Betriebssystem: XAMPP = **X**-Plattform, **A**pache, **M**ariaDB, **P**HP, **P**erl

Das Programmpaket XAMPP kann auf der Seite [www.apachefriends.org](http://www.apachefriends.org) kostenlos heruntergeladen werden [42].

## 3.1.6 Namensgebung

Der Name sollte sowohl die Möglichkeiten widerspiegeln, für die das Web-Frontend eingesetzt werden kann, als auch leicht zu merken sein. In Anlehnung an diverse Open Source-Produkte wie zum Beispiel GIMP (GNU Image Manipulation Programm) sollte ein prägnantes Akronym entwickelt werden. Um es noch einfacher zu machen, sollte dieses Akronym ein eigenständiges Wort – ein Apronym – ergeben, wie es beispielsweise bei ELSTER (**E**lektronische **S**teuer**E**Rklärung) der Fall ist.

Schließlich entwickelte sich der Name „hermine“, welcher für „**h**eritage-**e**xpedition, **r**ubble-**m**anagement & intuitive **n**ametag **e**xcavation“ steht. Zu Deutsch in etwa: (Kultur-)Erbe-Expedition, Trümmer-Verwaltung & Intuitive Namensschild(-basierte) Ausgrabung.

### 3.2 Funktionen

Im Hinblick auf die Skalierbarkeit des Systems wurde zunächst ein Framework entwickelt, zu welchem sich weitere Funktionen als Modul (bzw. Addon oder Plugin) hinzufügen lassen. Im Folgenden werden die derzeit verfügbaren Module und ihre Funktion beschrieben.

#### 3.2.1 Modul Projekte (Projects)

Im Modul Projekte können neue Projekte angelegt sowie vorhandene Projekte importiert oder exportiert werden. Die Daten eines Systems, welches lokal für ein spezifisches Projekt aufgesetzt worden ist (z.B. bei Vor-Ort-Arbeiten ohne Internetanbindung), kann später in das „globale“ System eingespielt werden (siehe 0).

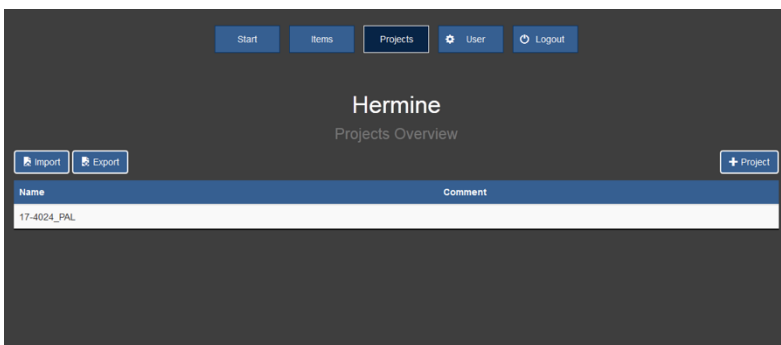


Bild 30 Übersicht Modul Projekte [11]

Jedem Projekt müssen beim Anlegen ein individueller Name sowie eine optionale weiterführende Bezeichnung gegeben werden. Dem Benutzer wird visuell verdeutlicht, wenn eine Eingabe mangelhaft ist.

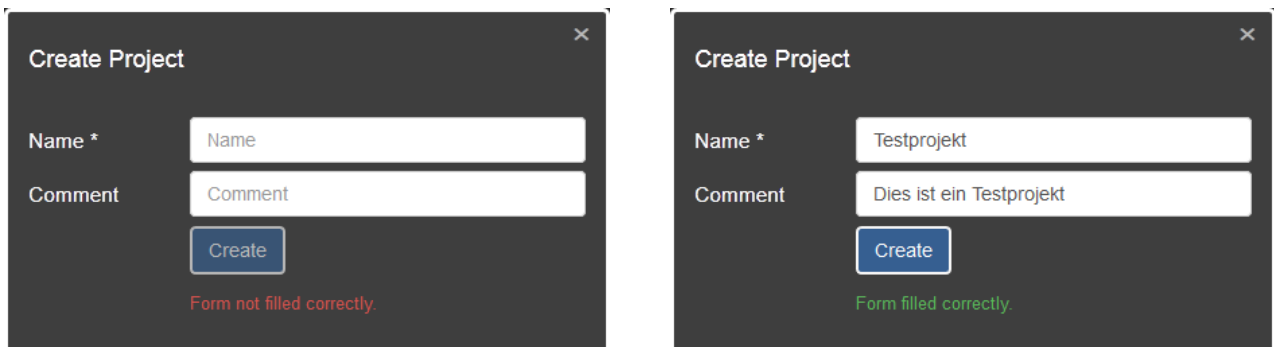
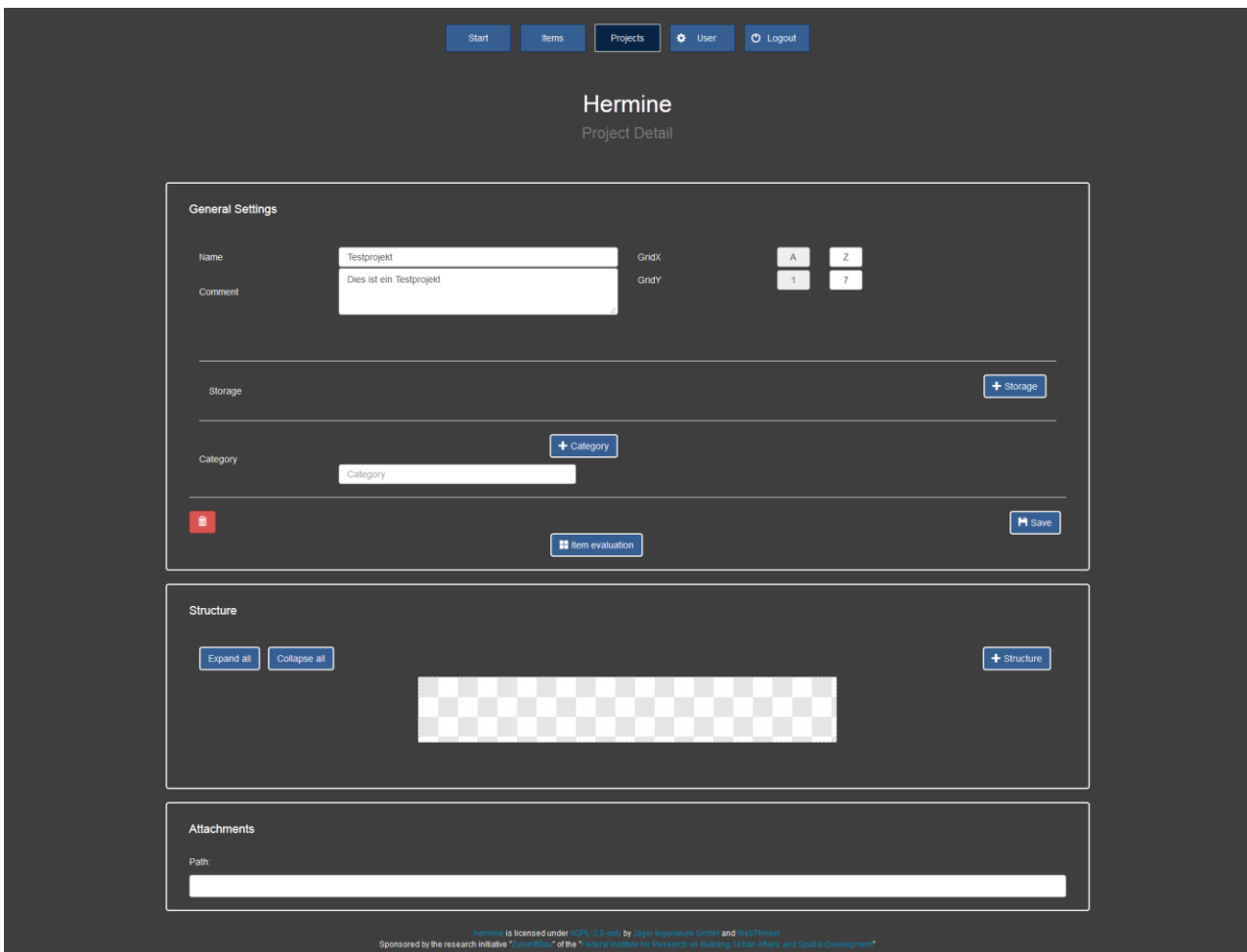


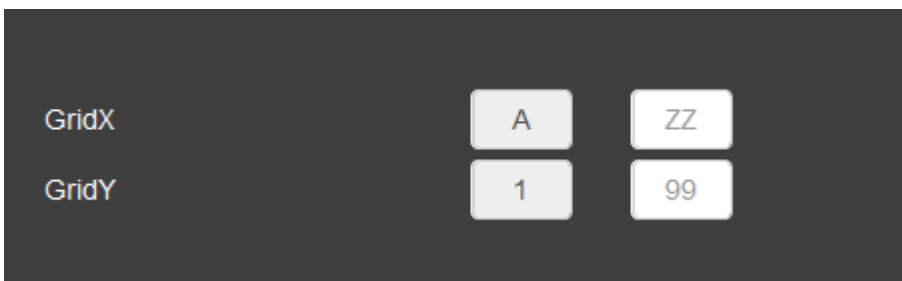
Bild 31 Anlegen eines neuen Projektes [11]

Nach dem Bestätigen der Eingaben wird man auf die Verwaltungsseite des Projektes weitergeleitet.



**Bild 32 Projektverwaltungsseite [11]**

In jedem Projekt wird die maximale Größe des Grabungsnetzes festgelegt. Dieses kann von A1 bis ZZ99 reichen. Damit hat man in alphabetischer Richtung 702 Rastermöglichkeiten, in numerischer Richtung bis zu 99 Teilungen für ein Grabungsnetz zur Verfügung. Dies entspricht einer Auflösung von nahezu 70.000 möglichen Zellen. Es ist dem Benutzer nach Anlegen des ersten Fundstückes nicht mehr möglich, diese Eingabe zu ändern.



**Bild 33 Eingabe des Grabungsnetzes [11]**

Ebenso werden auf dieser Seite die verschiedenen Lager- bzw. Zwischenlagerstandorte angelegt. Ist ein Lagerplatz innerhalb einer Einheit belegt, kann dieser Lagerstandort nicht mehr gelöscht

werden. Erst wenn alle Lagerplätze wieder frei sind, kann ein Lagerplatz durch das Löschen aller Eingaben im Namensfeld und durch das Speichern des Projekts gelöscht werden. Andernfalls bleibt das Namensfeld ausgegraut und deaktiviert. Ist ein Fundstück einem Lagerplatz zugeordnet, kann man sich eine Übersicht ausgeben lassen über den verwendeten Lagerplatz.

ID	Name	Creator	Comment	Category	Grid	Structure	Storage	
57	001	Kay-Michael Müller		mapped	E2	- right pillar	1.3.0	🗑️
58	002	Kay-Michael Müller		mapped	F1	- right pillar	2.3.1.0	🗑️
60	012	Kay-Michael Müller	G1	mapped	G2	- right pillar	1.2.5.0	🗑️
64	005	Kay-Michael Müller		mapped	F2	- right pillar	1.1.2.0	🗑️
65	044	Kay-Michael Müller		mapped	F5	- right pillar	1.4.2.0	🗑️
68	011	Kay-Michael Müller		mapped	G2	- right pillar	1.2.1.0	🗑️
72	015	Kay-Michael Müller		mapped	D2	- right pillar	1.4.1.0	🗑️
73	019	Kay-Michael Müller		mapped	E4	- right pillar	1.3.1.0	🗑️
76	023	Kay-Michael Müller		mapped	F4	- right pillar	1.1.1.0	🗑️
80	040	Kay-Michael Müller		mapped	F4	- right pillar	1.1.3.0	🗑️
81	041	Kay-Michael Müller		mapped	F4	- right pillar	1.2.2.0	🗑️
86	039	Kay-Michael Müller		mapped	F4	- right pillar	1.3.2.0	🗑️
88	024	Kay-Michael Müller		mapped	F4	- right pillar	1.1.4.0	🗑️
89	022	Kay-Michael Müller		mapped	E4	- right pillar	1.2.3.0	🗑️
90	021	Kay-Michael Müller		mapped	E4	- right pillar	1.2.4.0	🗑️
93	030	Kay-Michael Müller		mapped	E5	- right pillar	1.1.5.0	🗑️
94	031	Kay-Michael Müller		mapped	E5	- right pillar	1.4.3.0	🗑️
96	034	Kay-Michael Müller		mapped	E5	- right pillar	1.4.4.0	🗑️
97	028	Kay-Michael Müller		mapped	E5	- right pillar	1.4.5.0	🗑️
98	026	Kay-Michael Müller		mapped	E5	- right pillar	1.3.4.0	🗑️
99	027	Kay-Michael Müller		mapped	E4	- right pillar	1.3.5.0	🗑️
100	054	Kay-Michael Müller		mapped	F3	- right pillar	2.4.1.0	🗑️
101	060	Kay-Michael Müller		mapped	F4	- right pillar	2.4.2.0	🗑️
102	059	Kay-Michael Müller		mapped	F5	- right pillar	2.3.2.0	🗑️
103	032	Kay-Michael Müller		mapped	F5	- right pillar	2.2.1.0	🗑️
118	013	Kay-Michael Müller		mapped	E9	- arch	2.2.2.0	🗑️
119	025	Kay-Michael Müller		mapped	E10		2.1.1.0	🗑️
126	042	Kay-Michael Müller		mapped	E7	- right pillar	2.2.3.0	🗑️
129	047	Kay-Michael Müller		mapped	E6	- right pillar	2.1.2.0	🗑️
130	046	Kay-Michael Müller		mapped	E6	- right pillar	2.1.3.0	🗑️
132	067	Kay-Michael Müller		mapped	E10	- arch	2.4.3.0	🗑️
134	066	Kay-Michael Müller		mapped	E6	- right pillar	2.4.4.0	🗑️
135	065	Kay-Michael Müller		mapped	E10	- arch	2.3.3.0	🗑️
138	068	Kay-Michael Müller		mapped	E10	- arch	2.3.4.0	🗑️
146	077	Kay-Michael Müller		mapped	E13	- left pillar	2.2.4.0	🗑️
147	079	Kay-Michael Müller		mapped	F13	- left pillar	2.1.4.0	🗑️
148	076	Kay-Michael Müller		mapped	E14	- left pillar	2.4.5.0	🗑️

Bild 34 Übersicht über die Lagerplatzbelegung [11]

### 3.2.2 Modul Fundstücke (Items)

Das Modul Fundstücke gibt einen Überblick darüber, welche Fundstücke bereits erfasst wurden und bietet die Möglichkeit selbige zu erstellen oder auch zu löschen. Dabei macht es einen Unterschied, mit welcher Benutzerrolle man angemeldet ist. Ein normaler User, dem in den Benutzerrollen (3.2.3) ein Projekt zugewiesen wurde, wird direkt zu der Fundstückübersicht des jeweiligen Projekts umgeleitet (Bild 35). Ein Benutzer mit erhöhten Benutzerrechten hingegen kann



zunächst aus einer Liste aller angelegten Projekte wählen, welche Fundstücke ihm angezeigt werden sollen (Bild 36).

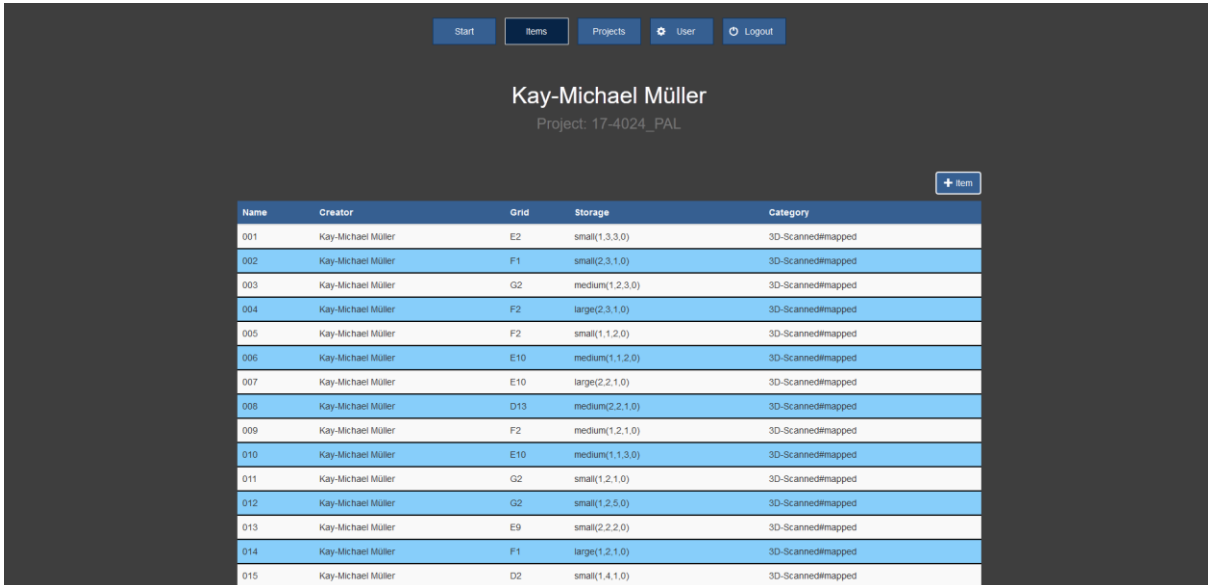


Bild 35 Eingangsansicht für Standardbenutzer [11]

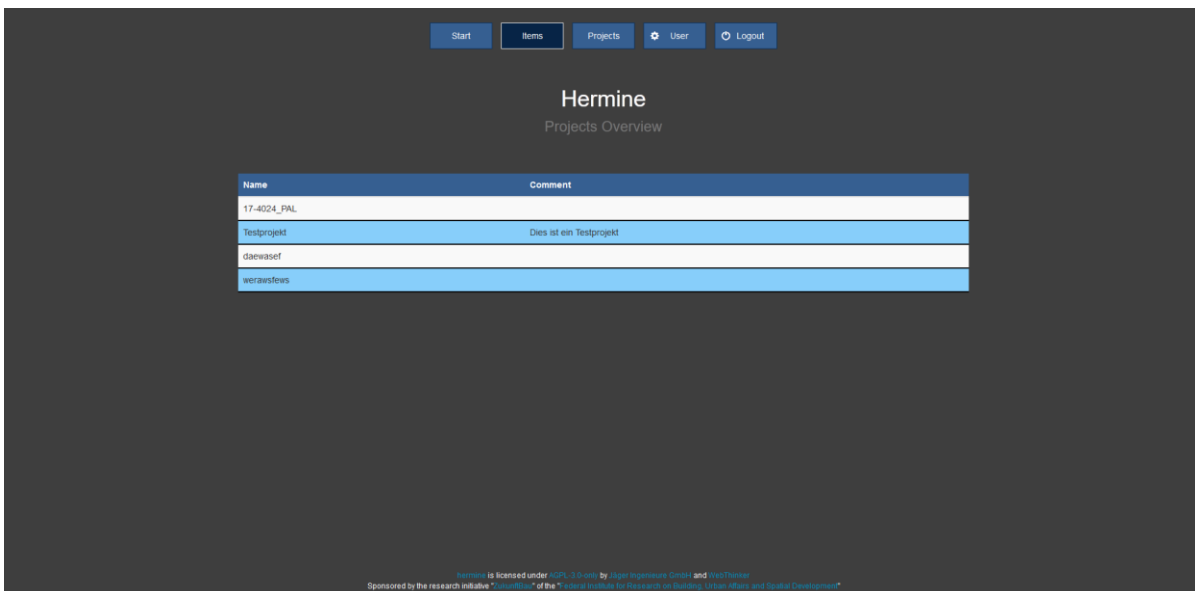


Bild 36 Eingangsansicht für Benutzer mit erhöhten Rechten [11]

Wählt man ein Projekt aus, wird man ebenfalls zu der jeweiligen Fundstückübersicht weitergeleitet. Dort besteht einerseits die Möglichkeit ein neues Fundstück anzulegen oder ein bereits erstelltes Fundstück zu öffnen.

Entschließt man sich dazu ein neues Fundstück zu erstellen, öffnet sich eine Eingabemaske, in der man zunächst den Namen (verpflichtend) und einen Kommentar (optional) vergeben kann. Danach wird man auf die Übersichtsseite des Fundstücks weitergeleitet. Diese teilt sich in die drei

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des „Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung“ gefördert (Az.: SWD-10.08.18.7-17.50). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Abschnitte Informationen zum Fundstück, dem Fundstück zugehörige Dateien und automatisch erstelltes Änderungsprotokoll (Bild 37).

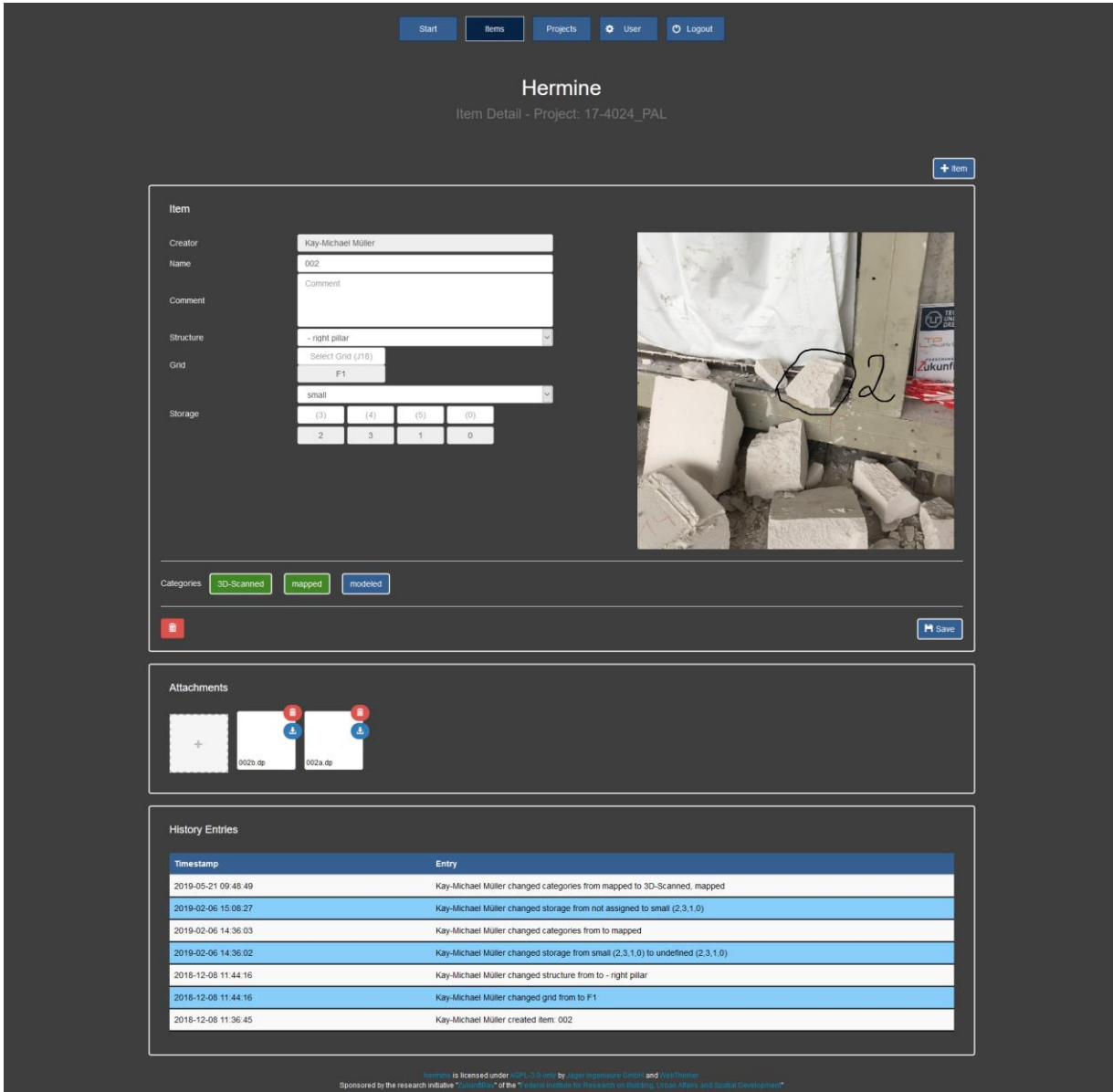
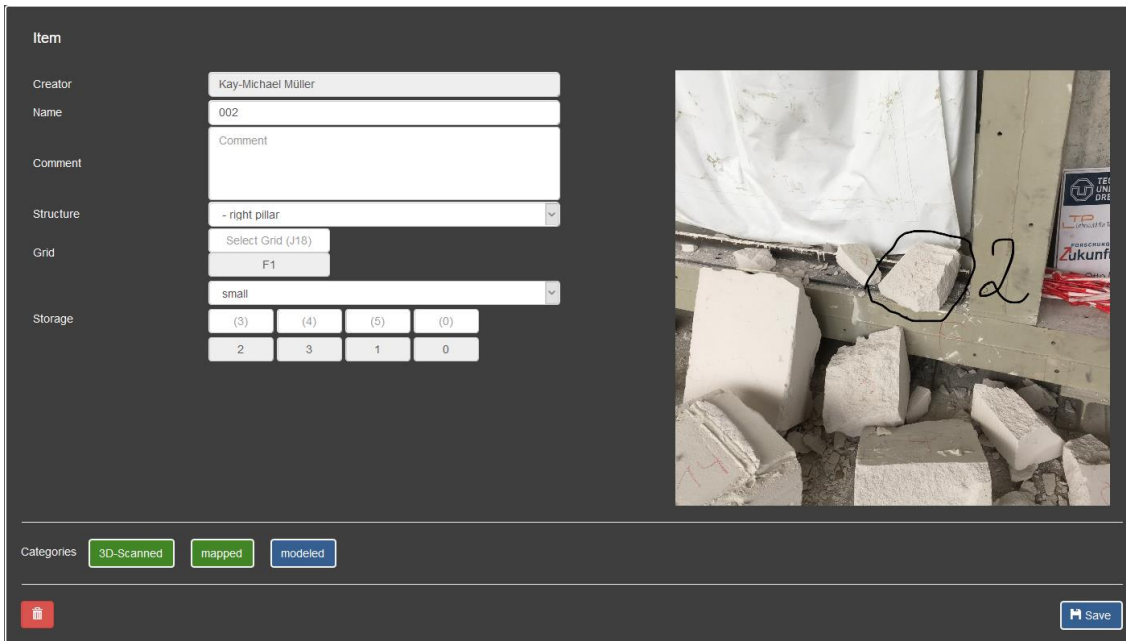


Bild 37 Übersicht zum Fundstück 002 [11]

Die allgemeinen Informationen sind vom Bearbeiter auszufüllen und beinhalten die zuvor im Projekt festgelegten Möglichkeiten der Zuordnung zu einem Fundort (Grid), einem Lagerort (Storage), einem Teil des Gebäudes (Structure) und etwaigen Kategorien (Categories). Des Weiteren kann ein erstes Übersichtsbild zur visuellen Identifikation verknüpft werden. Dieses kann entweder hochgeladen werden oder beim Aufruf von einem Smartphone oder Tablet aus auch direkt mit der Kamera aufgenommen werden. Sind die Informationen ausgefüllt, können diese mit einem Klick auf das Diskettensymbol gespeichert werden. Ebenfalls kann hier auch das Fundstück gelöscht werden (Bild 38).



**Bild 38 Allgemeine Informationen zum Fundstück 002 [11]**

Unter den Anhängen können beliebig viele Dateien zu dem Fundstück hochgeladen werden. Das können weitere Bilder, 3D-Modelle oder Pläne sein, die das individuelle Fundstück betreffen (Bild 39).



**Bild 39 An das Fundstück 002 angehangene Dateien [11]**

Innerhalb des automatisch angelegten Protokolls werden sämtliche Änderungen am Datensatz erfasst. Das beinhaltet die durchgeführte Aktion, die exakte Uhrzeit sowie den Nutzer, der diese Änderung gespeichert hat (Bild 40).

History Entries	
Timestamp	Entry
2019-05-21 09:48:49	Kay-Michael Müller changed categories from mapped to 3D-Scanned, mapped
2019-02-06 15:08:27	Kay-Michael Müller changed storage from not assigned to small (2,3,1,0)
2019-02-06 14:36:03	Kay-Michael Müller changed categories from to mapped
2019-02-06 14:36:02	Kay-Michael Müller changed storage from small (2,3,1,0) to undefined (2,3,1,0)
2018-12-08 11:44:16	Kay-Michael Müller changed structure from to - right pillar
2018-12-08 11:44:16	Kay-Michael Müller changed grid from to F1
2018-12-08 11:36:45	Kay-Michael Müller created item: 002

**Bild 40 Das Änderungsprotokoll zum Fundstück 002 [11]**

Auch kann direkt aus dieser Maske heraus ein weiteres Fundstück angelegt werden, sodass es nicht nötig ist erst zur Übersicht zurückzuspringen.

### 3.2.3 Benutzerrollen (User)

Das Modul der Benutzerrollen unterscheidet ebenfalls Nutzer mit eingeschränkten oder erweiterten Rechten. Als normaler Benutzer wird man zu seiner persönlichen Einstellungsseite weitergeleitet, auf der man lediglich seinen Klarnamen ändern und ein neues Passwort vergeben kann (Bild 41).

**Bild 41 Konfigurationsmöglichkeiten für Benutzer mit eingeschränkten Rechten [11]**

Auf administrativer Ebene bekommt der Benutzer zunächst eine Übersicht angezeigt mit allen zur Verfügung stehenden Benutzern sowie mit der Option weitere Benutzer anzulegen (Bild 42).

Name	Username	Status
Hermine	hermine	✓
Kay-Michael Müller	kamü	✓
Maik Ertler	maer	✓

**Bild 42 Benutzerübersicht für Anwender mit erweiterten Rechten [11]**

Beim Erstellen eines neuen Benutzers erscheint wie schon bei den Fundstücken ein Formular, welches auszufüllen ist. Dazu gehören Vor- und Nachname, ein initiales Passwort (das vom Nutzer

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des „Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung“ gefördert (Az.: SWD-10.08.18.7-17.50). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

geändert werden sollte) sowie die Aktivierung des Benutzers und der Option, ob dieser administrative Rechte erhalten soll. Der Username wird aus den ersten beiden Buchstaben des Vornamens und Nachnamens automatisch gebildet (Bild 43).

**Bild 43 Formular zum Erstellen eines neuen Benutzers [11]**

Hat man einen Benutzer angelegt, kann man als Administrator weitere Feineinstellungen vornehmen, um zu entscheiden worauf der einzelne Benutzer Zugriff haben darf. Dabei unterteilen sich die Zugriffsrechte (Permissions) auf die drei Module User, Items und Projects. In jedem Modul lässt sich aus vier Stufen der Zugriffsberechtigung wählen: Worker, Supervisor, Administrator, Framework-Administrator. Des Weiteren lässt sich auf dieser Seite auch ein Standardprojekt für die Mitarbeiter einstellen, die bei dem Modul „Items“ lediglich die Rechte eines „Worker“ besitzen.

**Bild 44 Formular zum Vergeben der Benutzerrechte [11]**

Welche Rechte ein eingeschränkter oder administrativer Benutzer in den jeweiligen Arealen besitzt, wurde in diesen bereits beschrieben.

### 3.3 Infrastrukturvarianten

#### 3.3.1 Internetbasierte Infrastruktur

Da hermine als Datenbanksoftware zur Verwaltung mehrerer Enttrümmerungsprojekte konzipiert wurde, sollte diese auf einen aus dem Internet erreichbaren Webserver aufgesetzt werden. Diese Installation von hermine kann folglich von allen Orten, die über eine Internetverbindung verfügen, und somit von Akteuren weltweit genutzt werden. Darüber hinaus kann diese Installation als „Mutterschiff“ fungieren, um Projekte aus lokalen Installationen (3.3.2) zu importieren sowie zu koordinieren.

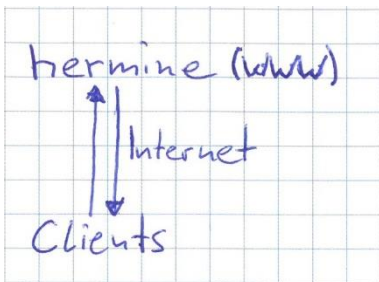


Bild 45 Schematische Netzwerktopologie (Internet) [11]

Hinweis: Es sollte stets darauf geachtet werden, dass die Speicherung redundant erfolgt und regelmäßige Backups der Projekte erfolgen.

#### 3.3.2 Lokale Infrastruktur

Sollte in einem Projektraum keine Verbindung zum Internet hergestellt werden können, ist es mit einfachster Hardware (dedizierter Laptop oder RaspberryP) möglich, eine lokale Infrastruktur aufzubauen, in welcher hermine funktionsfähig ist. Der lokale Server wird dabei in ein aufzubauendes W-LAN-Netzwerk integriert, über welches anschließend mit weiteren Geräten (Tablets, PCs, Laptops) zugegriffen werden kann. Nach erfolgter abgeschlossener Enttrümmerung und Eingabe aller benötigten Datensätze, kann das Projekt aus der lokalen Installation exportiert und wie in 3.2.1 beschreiben in die „Mutterschiff“-Installation importiert werden.

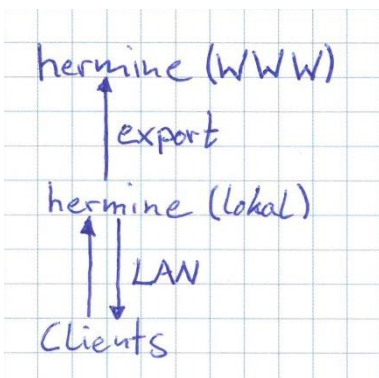


Bild 46 Schematische Netzwerktopologie (LAN<sup>2</sup>) [11]

<sup>2</sup> Local Area Network – Lokales Netzwerk

## 4 Auswahl der Methoden und Technologien

Generell soll nach den in der Archäologie anerkannten vier Phasen Prospektion, Ausgrabung, Dokumentation und Analyse/Archivierung vorgegangen werden. Diese stellen ein in der Fachwelt anerkanntes Vorgehen dar, welches in Deutschland beispielsweise durch den *Verband der Landesarchäologen in der Bundesrepublik Deutschland* empfohlen wird.

Der seinerzeit für die Enttrümmerung der Frauenkirche zu Dresden entwickelte Ablauf hält sich eng an die oben genannten Phasen. Im Rahmen der Anastylose eines Bauwerkes werden diese allerdings um eine fünfte erweitert: die Wiedererrichtung des Bauwerkes, ohne die durch die vorangegangene Zerstörung (z.B. durch Kriegseinwirkung oder Naturkatastrophen) entstandenen Wunden zu beseitigen. Im Gegenteil: das Ereignis soll sichtbar bleiben, so wie auch die vorangegangenen Zeiten ihre Spuren am Bauwerk hinterlassen haben.

### 4.1 Auswahl der Methoden

#### 4.1.1 Quellenrecherche

So wie seinerzeit vor der Enttrümmerung der Frauenkirche sollen in einem ersten Schritt alle verfügbaren Quellen zum unzerstörten Bauwerk gesichtet werden:

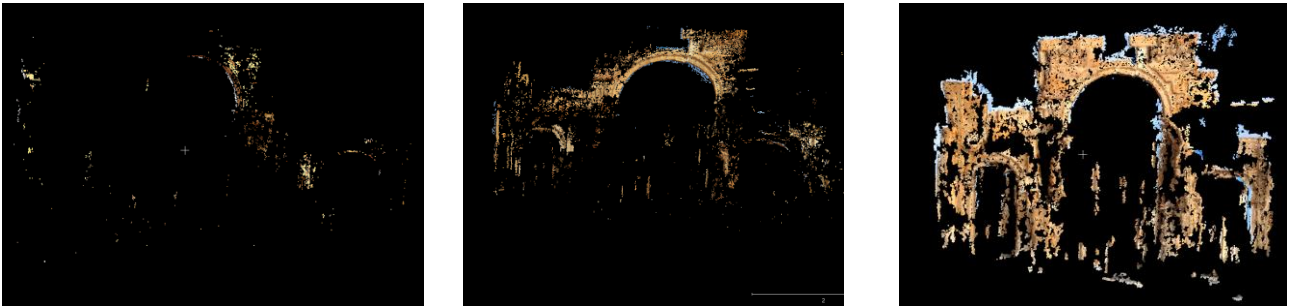
- Fotos und Zeichnungen aus Archiven
- Grabungsberichte aus früherer Zeit
- Berichte, Dokumentationen und Zeichnungen von früheren Sicherungsmaßnahmen
- Augenzeugenberichte zum Einsturzhergang
- Internetrecherche z.B. zu touristischen Bildern in sozialen Netzen wie flickr.com oder kommerziellen Bilddatenbanken wie shutterstock.com oder istockphoto.com

**Technischer Fortschritt:** Zur Zeit der Enttrümmerung der Frauenkirche lagen die meisten Medien in analoger Form vor (Fotos auf Fotopapier, Film-Negativ oder als Dia; Zeichnungen auf Papier oder Pergament). Sie mussten manuell gefunden, gesichtet und vervielfältigt oder weiterverarbeitet werden, z.B. durch Abzeichnen von Details auf transparentem Papier o.ä., was einen erheblichen Zeitaufwand nach sich zog.

Heutzutage stehen die meisten Medien in digitaler oder digitalisierter Form zur Verfügung, auch die Recherche ist durch Suchmaschinen – seien sie im Internet oder lokal in einem Archiv installiert – bedeutend schneller und einfacher.

Aus vorhandenen digitalen Bildquellen lässt sich mit spezieller Software wie COLMAP oder VisualSfM bereits ein 3D-Modell des Bauwerks generieren, ohne dass dafür Experten mit Spezialausrüstung vor Ort gewesen sein müssen. Einzig das Vorhandensein ausreichenden Bildmaterials kann hierbei ein limitierender Faktor sein (Bild 47).





**Bild 47** Ergebnisse aus photogrammetrischer Rekonstruktion durch VisualSfM (v.l.n.r.: 5 Bilder, 15 Bilder, 30 Bilder als Grundlage) [11]

#### 4.1.2 Ortsbegehung und Bestandsaufnahme

Auch in der heutigen Zeit müssen Ortsbegehungen erfolgen, um einen Eindruck vom Ausmaß der Zerstörung zu erhalten und eine erste Dokumentation der Ausgangsfundsituation vorzunehmen.

Kamera und Messgeräte werden weiterhin zu den Werkzeugen gehören, allerdings soll die Bestandsaufnahme gleich mittels 3D-Laserscanner und per Drohnenflug erfolgen, um diesen Zustand möglichst genau zu dokumentieren. Dies sollte zeitnah erfolgen, damit die Trümmerteile in ihrer ursprünglichen Lage nach dem Einsturz, bevor sie verändert werden, aufgenommen sind. Aus der Erfahrung weiß man, dass die ursprüngliche Situation nach einem Einsturz oftmals in kurzer Zeit teilweise verändert wird, z.B. um verschüttete Straßen und Wege wieder befahrbar zu machen.

Bei großflächigen Arealen stößt die Erstbestandsaufnahme mittels Laserscanner oder Drohnenflügen an ihre Grenzen. Zur Erfassung wäre in so einem Fall der Einsatz von Satelliten vorstellbar. Kommerzielle Anbieter können derzeit Bilder aus dem Orbit mit einer Auflösung von 30 cm Seitenlänge pro Bildpunkt liefern. Mittels photogrammetrischer Verfahren lassen sich aus solchen Bildern ebenfalls 3D-Ansichten generieren – dies lässt sich eindrucksvoll an manchen von Google Maps per Satellit fotografierten Städten nachvollziehen.



**Bild 48** 3D-Darstellung des Kolosseums in Rom in Google Maps



Für die vorliegende Arbeit wurde die Aufnahme über Satellit nicht weiter verfolgt, da einerseits im Rahmen der Untersuchungen kein praktikables Anwendungsfeld gegeben war und andererseits die hochauflösenden Bilder speziell eingekauft werden müssen und preislich bei ca. 1.000 Euro pro Bild liegen.

#### 4.1.3 Erstellen eines 3D-Modells

Aus den Daten der Quellenrecherche und der Ortsbegehung wird am Computer ein 3D-Modell des Bauwerks erstellt und bemaßt. Dies kann mit jeder 3D-fähigen, am Markt verfügbaren CAD-Software (beispielsweise SketchUp, Blender, Nemetschek Allplan oder Revit) bewerkstelligt werden. Da Blender die einzige aufgeführte Open Source-Software ist, sollte bei Verwendung eines anderen Programms von Anfang an auf die Verwendung nichtproprietärer Dateiformate wie z.B. das STL-Dateiformat geachtet werden [43]. Das so erstellte 3D-Modell wird später zur Fundkartierung benötigt.

#### 4.1.4 Anlage des Gitternetzes

Neben dem mit rot-weißem Plastikband über den Trümmern abgesteckten und eingemessenem Gitternetz wird am Computer ein digitales Gitter erzeugt und über photogrammetrisch entzerrte Bilder des Areals oder Pläne gelegt. Dieses digitale Gitter dient als Referenz, wenn später am Fundort die schichtweise Abtragung erfolgt. Das rot-weiße Band dient nur noch als optische Orientierung für die mit der Enttrümmerung Beschäftigten, jedoch nicht mehr als Referenz auf Scans oder Fotos.

#### 4.1.5 Kennzeichnen der Fundstücke

Aus praktikablen Gründen soll wie an der Frauenkirche die Metallmarke (Messingplakette mit eingestanzter Nummer) zur Kennzeichnung der Fundstücke verwendet werden. In Erwägung gezogen wurden ebenfalls folgende digitale Markierungen:

- Strichcode
- QR-Code (*Quick Response*)
- RFID-Transponder (*Radio-Frequency IDentification*)



Bild 49 v.l.n.r.: Barcode, QR-Code, RFID-Transponder

Strichcode und QR-Code sind maschinenlesbar, man benötigt dafür einen Scanner (Strichcode) bzw. ein Smartphone oder Tablet mit Kamera (QR-Code). Beim Strichcode wird eine 13-stellige Nummer eindimensional codiert. Der QR-Code ist ein zweidimensionales Feld mit maximal 177 x 177 Elementen, mit welchen sich 7089 Dezimalziffern und 4296 alphanummerische Zeichen codieren lassen. Zur Auslesung müssen beide Markierungen sichtbar sein. Sie werden normalerweise auf Papier gedruckt, dieses lässt sich leider nicht dauerhaft am Fundstück befestigen und kann durch Witterungseinflüsse zerstört werden. Auch die Nutzung von Plexiglas-Einstecktaschen o.ä. kann das o.g. Problem nicht auf befriedigende Art und Weise lösen, da diese zerkratzen oder beim Bergen der steinernen Fundstücke zerbrechen können.

Bei RFID-Transpondern sind die Informationen auf einem Mikrochip mit umgebener Antenne gespeichert. Durch Induktion eines elektrischen Feldes mittels der Antenne des RFID-Readers wird der Chip aktiviert und sendet die gespeicherten Daten. Einfache, nicht wieder beschreibbare RFID-Transponder kosten derzeit zwischen 0,30 und 1€ pro Stück, die erforderlichen Lesegeräte (RFID-Reader) zwischen 1.000 und 5.000 € pro Gerät. Bei RFID spielt die Sichtverbindung zwischen Transponder und Lesegerät keine große Rolle, marktübliche HF-Systeme (**H**igh **F**requency) lassen sich in einem Abstand bis zu 1,5 Metern auslesen.

Da die RFID-Transponder kleine Mikrocomputer sind, sind sie sehr anfällig gegenüber Stößen und Witterungseinflüssen, auch stellt die Anbringung an die Fundstücke die gleichen Probleme wie bei Strichcode oder QR-Code dar.

Alle drei Markierungsverfahren kennzeichnet, dass sie codierte Informationen speichern, welche von Menschen nicht ohne technische Hilfsmittel ausgelesen und interpretiert werden können.

Aus diesem Grund und durch die Anfälligkeit gegenüber mechanischen Einwirkungen in einem Baustellenumfeld und Witterungseinflüsse sollen die bewährten und robusten Messingplaketten mit eingestanzter Nummer wieder zum Einsatz kommen.

Die Erstansprache der Fundstücke soll anstatt mit Hilfe von Formblättern mittels Tablet erfolgen, auf welchem die Software-Applikation hermine läuft. Alle Informationen vom Fundstück werden sofort zentral gespeichert und es entstehen keine Informationsbrüche beispielsweise durch „Abtippen“ der Fundblätter an einem stationären PC zu einem späteren Zeitpunkt.

#### **4.1.6 Erfassen der Fundsituation**

Bei der Enttrümmerung der Frauenkirche wurden von jedem Planquadrat in jeder Schicht folgende Arbeiten zur Erfassung der Fundsituation durchgeführt (siehe auch Abschnitt 2.3.4):

- Übersichtsfotos aus einer erhöhten Position (Krankorb) vom jeweiligen Planquadrat und den benachbarten Planquadraten
- Einmessung der Lage der Fundstücke durch Bestimmung der exakten Position dreier Punkte an jedem Stein mittels Tachymetertheodolit und Polygonausrüstung

Diese Technologien sollen zukünftig nicht mehr zum Einsatz kommen, da sie sehr zeitaufwändig sind. Stattdessen wird die Fundsituation in den jeweiligen Planquadraten und Schichten per Drohnenflug und 3D-Laserscanner dokumentiert. Damit die genaue Lage der einzelnen Fundstücke erfasst und später rekapituliert werden kann, ist es wichtig, dass genügend vermessungstechnische Anschlusspunkte auf dem zu erfassenden Gebiet definiert werden und während der ganzen Beräumung zur Verfügung stehen. Diese Festpunkte werden vorzugsweise genutzt, um die Einzelscans eines Planquadrates aus verschiedenen Richtungen zu einem 3D-Modell zusammenzusetzen.

Die so entstandenen Modelle und Bilder werden direkt in die Software-Applikation hermine eingepflegt.

#### **4.1.7 Bergen der Fundstücke und Freilegen der nächsten Schicht**

Dies betrifft manuelle Arbeiten der Beräumung von Fundstücken und Schutt mit mechanischen Hilfsmitteln (Krane, Bagger, Greifer, Industriesauger usw.). Es werden keine technischen oder methodischen Änderungen zum Vorgehen bei der Enttrümmerung der Frauenkirche empfohlen. Wie damals müssen die Beschäftigten sensibilisiert und geschult werden, um keine Fundstücke weiter zu beschädigen oder falsch zu deklarieren.

#### **4.1.8 Zwischenlagerung, Fortführen der Beschreibung**

Nach der Bergung wird der markierte und in der Software registrierte Stein (Fundstück) zur weiteren Bearbeitung an dafür vorgesehenen Plätzen zwischengelagert. Dies ist der Moment, an welchem das Fundstück zum ersten Mal von allen Seiten sichtbar und nicht wie am Fundort an der Auflageseite im Schutt verborgen ist. Dadurch lassen sich weitere – bis dahin eventuell verborgene – Merkmale wie z.B. tatsächliche Größe, wahrer Zustand, Vorhandensein weiterer Zierelemente oder optischer Auffälligkeiten identifizieren. Diese sollen am Zwischenlagerplatz mit dem Tablet aufgenommen und mittels der Software hermine dokumentiert werden.

#### **4.1.9 Bauzelt, Abschließende Erfassung der Fundstücke**

Vom Zwischenlager werden die Fundstücke in das Bauzelt oder an einen ähnlichen Platz transportiert. Statt der fotografischen Erfassung aus mehreren Winkeln soll dort die Kubatur mit einem Hand(laser)scanner aus allen Richtungen aufgenommen und ein 3D-Modell jedes Steins am Computer erstellt werden. Die Nutzung eines Messtisches mit Referenzmarken sowie eines Hebezeugs zur Bewegung der Fundstücke wird empfohlen. Mit dem vollständig dreidimensional gescannten Fundstück und den vorher während der Entrümmung aufgenommenen Informationen zu Fundort und -lage sowie Bildern, ist die Fundaufnahme abgeschlossen.

#### **4.1.10 Lagern der Fundstücke**

Nach der Erfassung werden die Fundstücke in einem Hochregallager eingelagert. Über die Software hermine kann der exakte Lagerplatz für jedes Fundstück registriert und später wieder abgerufen werden.

#### **4.1.11 Informationssammlung und Verwaltung**

Dieser Punkt aus der Abfolge der Bearbeitung bei der Frauenkirche Dresden ist an dieser Stelle obsolet geworden. Die Informationssammlung und Verwaltung erfolgt als begleitender Prozess über den gesamten Ablauf eines Anastyloseprojektes, beginnend bei Prospektion/Quellenrecherche bis hin zur Auswertung/Wiederaufbauplanung. Wie in den vorangegangenen Kapiteln mehrfach aufgeführt, kommt dazu die Softwareapplikation hermine zum Einsatz, des Weiteren ein Server oder FTP-Server zur Speicherung von Bildern bzw. den Punktwolken der 3D-Laserscans. Die Notwendigkeit zur Quelloffenheit aller Formate wurde aus den in Abschnitt 2.3.11 beschriebenen Erfahrungen im Abschnitt 3.1.3 erschöpfend behandelt.

#### **4.1.12 Fundkartierung**

Die Fundstückkartierung wird nicht mehr auf Basis ausgeplotteter Zeichnungen und anhand von Papierfotos und Lupe durchgeführt, sondern erfolgt direkt am Computer.

Dabei werden die als 3D-Modell vorliegenden Einzelscans der Steine im 3D-Modell des Bauwerks aufgrund von optischen und maßlichen Merkmalen verglichen und zugeordnet. Ist das Fundstück eindeutig zuordbar, wird dies im Gebäudemodell vermerkt bzw. markiert und mit der Fundstücknummer ein Verweis auf die Datenbank hermine hinterlegt.

Für diese Arbeit können ebenfalls Fotos der Fundstücke mit Bildern des Bauwerks verglichen werden, um eine weitere Referenz für die Zuordnung z.B. bei Nichteindeutigkeit aufgrund von Beschädigungen zu gewinnen.

Diese Arbeit muss durch Experten, welche einen denkmalpflegerischen oder archäologischen Hintergrund haben durchgeführt werden. Neben der möglichst fehlerfreien, exakten Zuordnung, treffen diese ebenso die Entscheidung zur Weiterverwendung der Fundstücke (z.B. Wiedereinbau, Vorlage für neuen Stein, Hintermauerungsstein usw.) im Rahmen der Wiederaufbauplanung.

#### **4.1.13 Fundstückzeichnungen**

Wenn detailreiche Pläne einzelner Fundstücke benötigt werden, kann die Punktwolke aus den 3D-Scans in ein CAD-Programm geladen und die Zeichnung in diesem erstellt werden.

## 4.2 Praktische Tests der neuen Technologien

### 4.2.1 Laserscanner

Um sich mit dem Gerät und verschiedener Software vertraut zu machen, wurde dieser in unterschiedlichen Szenarien eingesetzt. Es wurden zwecknahe aber auch eher zweckfremde Projekte bearbeitet, um die Leistungsfähigkeit über alle Disziplinen hinweg zu untersuchen. Dabei blieb die verwendete Hardware die gleiche, Anforderungen und die genutzte Software wurden jeweils passend für das Projekt ausgewählt.



**Bild 50 Bam, Iran (Foto: Babak Sedighi)**

Auf archäologischen Grabungsstätten sind i.d.R. größere Bereiche zusammenhängend zu erfassen und über den Grabungsfortschritt zu verfolgen. Die Laserscan-Technik stellt dabei eine effiziente Unterstützung dar.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist geprüft worden, inwiefern diese Technik für die Erfassung von archäologischen Grabungsstätten geeignet ist. Dazu dienten Objekte, die für das Team des Projektes einfach erreichbar waren.





**Bild 51 Tahkt-e Soleyman, Iran, Reste des westlichen Iwans [44]**



**Bild 52 Palmyra – Ausmaß der Zerstörung [45]**

#### 4.2.1.1 Lokschuppen, Neustadt Dresden (Bestandserfassung)

##### Eckdaten zum Projekt



Scandauer	20 Stunden
Anzahl Scanstandpunkte	192 Stück
Größe der Projektpunktwolke (5 mm Punktdichte)	970 Millionen Punkte
Verwendete Software	FARO Scene 7.1, Scalypso

Eines der ersten Projekte, bei welchem der Laserscanner zum Einsatz kam, war ein alter Lokschuppen im Norden Dresdens. Zu diesem existierten keine Bestandspläne, die dem qualitativen Anspruch einer heutigen Werkplanung gerecht werden konnten. Deshalb wurde uns die Erfassung des gesamten Bestandsgebäudes anvertraut.

Das Projekt startete mit einer kurzen Vor-Ort-Begehung. Zu dieser Begehung wurden skizzenartige Grundrisspläne angefertigt, um die ungefähre Anzahl benötigter Scans und damit die Arbeitszeit erfassen zu können. Außerdem wurden weitere Vorbereitungsmaßnahmen, wie das Entfernen von störendem Bewuchs, besprochen.

Für das Zusammensetzen der einzelnen Scans wurde die Herstellersoftware FARO Scene in der Version 7.1 genutzt. Dies war bei diesem Projekt nötig, da ein Großteil der Scans ohne die Zuhilfenahme sogenannter Zielmarken beziehungsweise Zielkugeln erfasst wurde. Ermöglicht wurde dies durch eine Technologie, die FARO „cloud-to-cloud“ nennt. Vereinfacht gesagt, sucht der Algorithmus nach ähnlichen Geometrien innerhalb der Punktwolken und nähert sich so durch eine Vielzahl von Iterationen an das bestmögliche Ergebnis an.

Die so aneinandergefügten Scans können dann weiter über die Software verarbeitet werden. Zum Beispiel kann man sich aus der erstellten Punktwolke orthogonale Bilder erzeugen und diese skaliert in einer DWG ausgeben lassen. Selbige kann man in seine CAD-Software importieren und in dieser mit Hilfe der skalierten Rastergrafiken nachzeichnen.

Ein weitaus komfortablerer Weg erschloss sich uns durch Scalypso. Ist die Punktwolke einmal erstellt, ist es möglich innerhalb von Scalypso in dieser zu navigieren und beliebige Punkte oder sogar ganze Geometrien direkt ins CAD zu übertragen. Dies erhöhte nicht nur die Genauigkeit des gesamten Projektes, es sorgte auch für ein ressourcensparendes Arbeiten, da heutige CAD-Anwendungen leider nur gering für das optimierte Darstellen von Punktwolken ausgelegt sind.

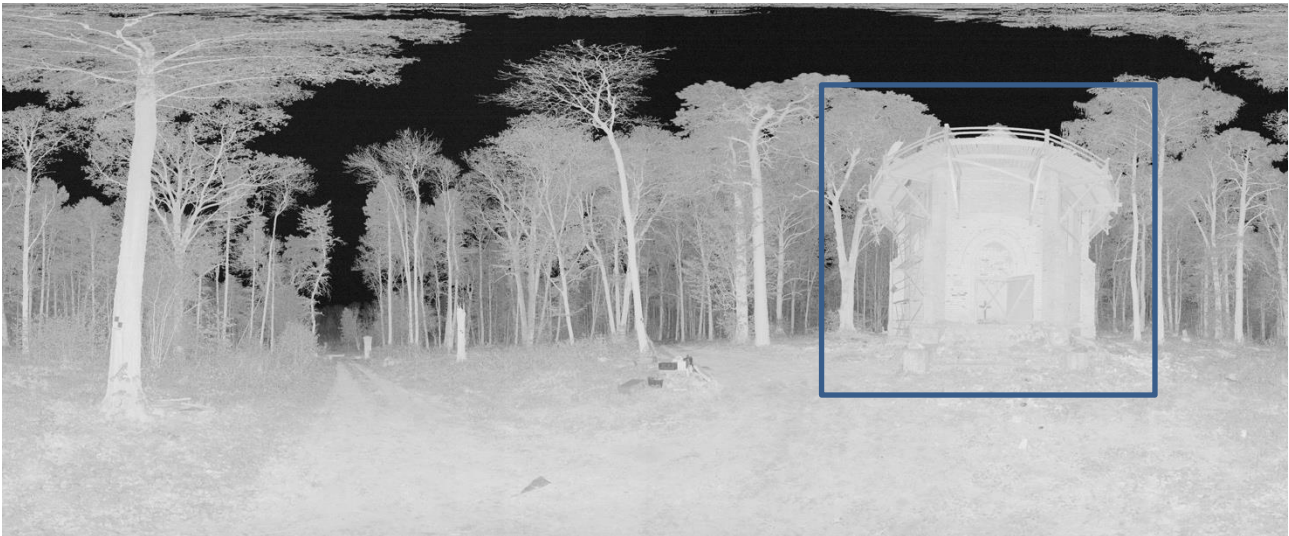
Ergebnis des Projektes war ein IFC-konformes 3D-Modell, aus dem anschließend verschiedene Ansichten, Schnitte und Grundrisse erstellt wurden.



Durch die Größe des Objektes war es hervorragend dazu geeignet, die Leistungsfähigkeit des 3D-Scanners auf die Probe zu stellen. Außerdem konnte man durch die Vielzahl an Scans auch Optimierungen im Arbeitsablauf ausarbeiten. Ebenfalls hat man dadurch ein Gespür dafür bekommen, wie viel Zeit bestimmte Scansituationen in Anspruch nehmen.

#### 4.2.1.2 Mausoleum, Steinort, Polen (Bauzustandserfassung)

##### Eckdaten zum Projekt



Aufnahmedauer	12 Stunden
Anzahl Scanstandpunkte	50 Stück
Größe der Projektpunktwolke (1 mm Punktdichte)	820 Millionen
Verwendete Software	PointCab 3.8

Das Mausoleum der Familie Lehndorff, inmitten Masuren nahe einem Dorf namens Steinort gelegen, ist seit ein paar Jahren von der Zerstörung bedroht gewesen. Es fehlte die komplette Dacheinkleidung und der Dachstuhl drohte bereits auseinanderzufallen. Durch vielseitige Hilfe wurde es ermöglicht das Mausoleum vor dem Verfall zu schützen, einen neuen Dachstuhl zu errichten und diesen gegen Regenwasser abzudichten. Zur Erfassung des Bauzustandes und als Dokumentation der Arbeiten wurde ein dementsprechend detaillierter Scan erstellt, der später dazu dienen kann, Pläne oder weitere statische Berechnungen abzuleiten.

Anders als der Lokschruppen war dieses Gebäude wesentlich kleiner und benötigte nur einen Bruchteil der Scans, um jede Ecke des Gebäudes vollständig zu erfassen. Ein weiterer wichtiger Unterschied besteht darin, dass bei diesem Projekt eine Vielzahl von Zielmarken und Zielkugeln zum Einsatz kamen. Nötig war dies vor allem, um Bezüge zwischen innen und außen herstellen zu können, aber auch, weil das Gebäude umgeben ist von großen Bäumen, deren Äste sich im Wind durchaus merklich bewegen. Das macht eine Anordnung der Scans zueinander mit Hilfe der cloud-to-cloud Technologie sehr langwierig, da vorher aus jedem Scan die Bäume entfernt werden müssten.

Wie man außerdem sehen kann, erreicht dieses im Vergleich sehr viel kleinere Gebäude eine fast genauso große Punktwolke wie das Lokschruppenprojekt. Das liegt zum einem an der höheren Punktdichte (1mm statt 5mm) und zum anderen daran, dass von vornherein mit höheren Auflösungen gescannt wurde. Die höheren Auflösungen wurden aus Sicherheitsgründen gewählt, um zu gewährleisten, dass alle Zielmarken und Zielkugeln hinterher auch in ausreichend hoher Auflösung gescannt worden sind.

#### 4.2.1.3 Ungerturm, Neustadt, Sachsen (Schadenskartierung)

##### Eckdaten zum Projekt



Aufnahmedauer	5 Stunden
Anzahl Scanstandpunkte	38 Stück
Größe der Projektpunktwolke (5 mm Punktdichte)	160 Millionen
Verwendete Software	FARO Scene 7.1

Der Ungerturm im sächsischen Neustadt, gelegen mitten in einem Wald, ist ein zweiteiliges Gebäude, das aus einem historischen Sockel aus Natursteinmauerwerk und auf einer zu DDR-Zeiten aufgesetzten Stahlbetonergänzung besteht. Der Turm ist insgesamt circa 33 m hoch und hat mit starker Rissbildung im Erdgeschoss zu kämpfen. Wir wurden damit beauftragt die Ursachen zu ermitteln und Vorschläge für eine Sanierung zu unterbreiten.

Durch den Einsatz unseres Laserscanners konnten wir feststellen, dass der Turm eine leichte Schiefelage in die Hauptwindrichtung aufwies, was sich auch im Rissbild widerspiegelte. Das ist möglich durch ein in den Scanner eingebautes Inklinometer, welches die Neigung des Scanners während des Scans erfasst und den Scan somit genau „in Waage“ ausrichten kann.

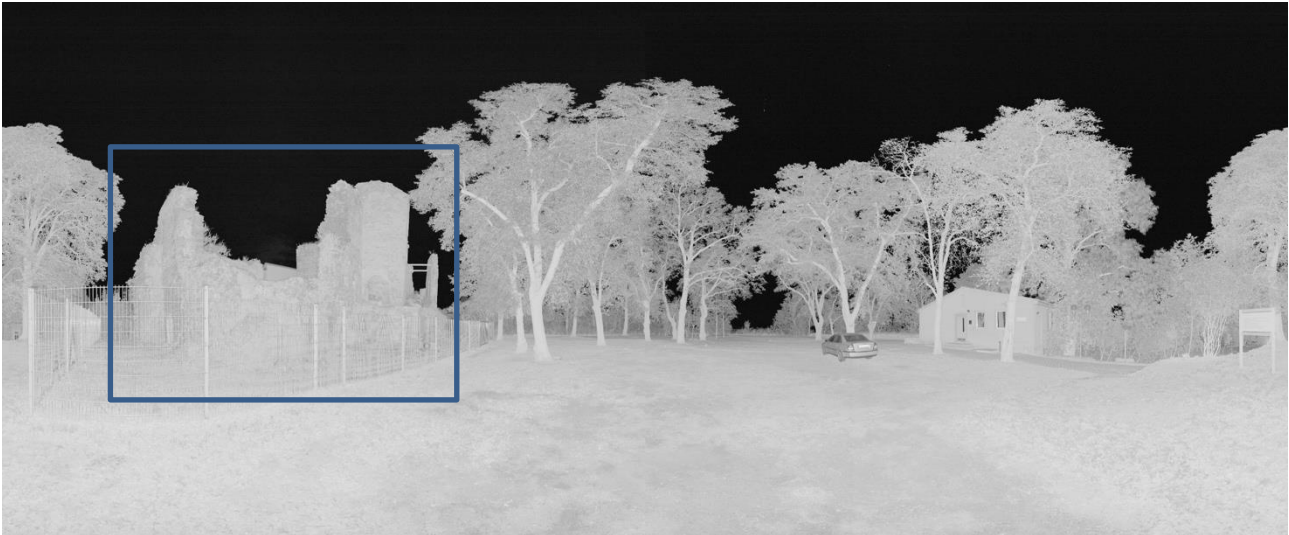
Problematisch bei diesem Projekt war die Höhe Turms. Um in 33 m Höhe eine noch vertretbare Auflösung (5 mm) zu erreichen, war es erforderlich dementsprechend hochauflösende Scans vom Boden durchzuführen. Dabei gilt zu beachten, dass man den höchsten Punkt eines Gebäudes immer über die Hypotenuse scannt. Bei einem Scanabstand von 20 Metern und einer Turmhöhe von 33 Metern ist der entfernteste zu scannende Punkt also rund 39 m entfernt. Die Scanauflösung wird am Scanner selbst mit mm/10m angegeben. Man musste in diesem Fall also mit 1-1,5mm/10m scannen, um in der 4-fachen Entfernung eine Auflösung von 4-6 mm zu erreichen.

Weitere Probleme ergaben sich durch vorbeikommende Besucher der dort ansässigen Gastwirtschaft, welche sich zeitweilig direkt vor den Scanner stellten, um nach dessen Funktion zu fragen und die Messung deshalb wiederholt werden musste.

Herausfordernd war außerdem die nach oben führende Wendeltreppe. Zwar konnte diese in einer sehr geringen Auflösung gescannt werden, es benötigte jedoch eine Vielzahl an Standpunkten um eine genügend große Überlappung der Scans gewährleisten zu können. Deshalb wurden die Scans im Abstand einer viertel Wendelung gemacht.

#### 4.2.1.4 Burgruine, Nebra (Schadenskartierung)

##### Eckdaten zum Projekt



Aufnahmedauer	7 Stunden
Anzahl Scanstandpunkte	54 Stück
Größe der Projektpunktwolke (1 mm Punktdichte)	180 Millionen
Verwendete Software	FARO Scene 7.1

Die Burgruine inmitten von Nebra sollte von uns erfasst werden, da es bei diesem Bauwerk aufgrund mangelhafter Mauerwerkssanierung in den 1990er Jahren zu starken Beschädigungen gekommen ist. Zu dieser Zeit wurde das Mauerwerk mit einem Zementmörtel verpresst, der jedoch langfristig dafür Sorge trug, dass das Mauerwerk regelrecht von innen heraus auseinandergedrückt wird. Das führte zu starker Rissbildung und ausbeulenden Wänden.

Zur Kartierung des Schadens und zur Erfassung der derzeitigen Geometrie – sollte es zu einem Einsturz kommen – wurde auf Bitten eines beteiligten Diplomanden ein Laserscan erstellt. Hier wurden sowohl Zielkugeln, als auch das cloud-to-cloud Verfahren angewandt.

Schwierigkeiten gab es bei diesem Bauwerk vor allem durch den starken Bewuchs, der nicht entfernt werden konnte. Deshalb war es nicht möglich, das Bauwerk an manchen Stellen aus einem für das Scannen günstigen Winkel zu erfassen. Zur Erläuterung: Der Winkel, in dem der Laserstrahl auf die Oberfläche auftritt, bestimmt seine innere Genauigkeit. Vergleichbar ist dieses Phänomen mit dem Lichtkegel einer Taschenlampe. Leuchtet man orthogonal auf ein Objekt, ist der Lichtkegel kreisrund und das Licht konzentriert. Leuchtet man schräg auf eine Fläche, bildet sich auf dieser ein elliptischer Lichtkegel ab, der wesentlich größer ist. Genauso verhält es sich mit dem Laserstrahl, der auf eine Oberfläche auftritt, auch wenn dieser um ein Vielfaches kleiner ist, als der einer Taschenlampe.

Kompensiert werden konnte dieser innere Fehler jedoch durch einen Scan aus großer Entfernung mit entsprechend hoher Auflösung, an dem die Detailscans ausgerichtet werden konnten. Somit ist der interne Messfehler zwar vorhanden, mittelt sich jedoch auf die gesamte Gebäudelänge aus.

#### 4.2.1.5 Ergebnis

Im Ergebnis ist festzustellen, dass der Laserscanner in allen eingesetzten Projekten technisch und zweckmäßig einwandfrei funktionierte – sowohl in verschiedenen klimatischen Umgebungen (innerhalb der vom Hersteller zulässigen Temperaturbereiche) als auch in unterschiedlichen stark belichteten Szenarien (starke Sonneneinstrahlung oder nahezu keine Umgebungshelligkeit).

Es ist jedoch bei jedem Scanprojekt vorher zu überlegen, welche und wie viele Blickwinkel benötigt werden, und wie man am datensparsamsten, aber mit ausreichend hoher Auflösung scannt. Weiterhin muss je nach Umgebungsvariablen entschieden werden, welches Ziel die Scans verfolgen. Das hat Auswirkungen darauf, ob und welche Zielmarken oder Zielkugeln zu verwenden sind, und beeinflusst die Wahl geeigneter Software. Da zum Beispiel nur FARO Scene das Zusammensetzen der Einzelscans mit cloud-to-cloud unterstützt, wäre es in anderen Programmen sehr umständlich und nicht zielführend die Scans anhand von händisch zu bestimmenden Punkten zueinander zu orientieren, wenn ohne Zielmarken oder Zielkugeln gearbeitet wurde.

Weiterhin ist festzustellen, dass es in den seltensten Fällen praktikabel erscheint Farbscans anzufertigen. Nicht nur steigt damit die zu speichernde Datenmenge um einen nicht unerheblichen Faktor (RGB-Werte in den Scans, hochauflösende Bilder), auch ist der zusätzliche Informationsgewinn meist gering und hat seinen größten Vorteil womöglich in der Außenwirkung. Dafür verdoppelt oder verdreifacht sich bei einer mittleren Scanauflösung die einzuplanende Scanzeit.

Nicht verwendet werden kann der Scanner außerhalb der vom Hersteller zulässigen Temperaturbereiche sowie bei Regen, Schneefall oder aufgewirbeltem Staub, da Laserstrahlen durch die in der Luft befindlichen Partikel abgelenkt werden und Messungengenauigkeiten nach sich ziehen könnten.

#### 4.2.2 Drohnenflüge

Um sich mit dem Gerät und verschiedener Software vertraut zu machen, wurde diese in verschiedenen Szenarien eingesetzt. Dabei blieb die verwendete Hardware die gleiche, Anforderungen und die verwendete Software wurden jeweils passend für das Projekt gewählt.

Bei der eingesetzten Drohne handelt es sich um die DJI Phantom 3 Standard. Sie ist preislich und technisch im mid-price Segment angesiedelt und wurde in der Produktlinie bereits von einem neueren Modell abgelöst. Für das Gerät sprach jedoch das sehr gute Preis-Leistungs-Verhältnis. Sie bietet einen 1/2.3" CMOS-Sensor von Sony, der mit maximal 3000x4000 Bildpunkten (12 Megapixel) auflösen kann. Das entspricht in etwa der 10-fachen FullHD-Auflösung und ist vollkommen ausreichend für photogrammetrische oder dokumentarische Aufgaben. Videos nimmt sie mit maximal 2704x1520 Bildpunkten bei 30 Bildern pro Sekunde auf, was ebenfalls einer ausreichend hohen Auflösung entspricht.



#### 4.2.2.1 Ungerturm, Neustadt, Sachsen (Schadenskartierung)

##### **Eckdaten zum Projekt**



Aufnahmedauer

40 Minuten

Anzahl der verwendeten Bilder

38 Bilder

Verwendete Software

Perspective Image  
Correction

Bei der Befliegung des Ungerturms wurde die Drohne eingesetzt, um möglichst orthogonale Aufnahmen aller Seiten zu erzeugen und diese später für eine grafische Schadenskartierung zu nutzen. Beim Befliegen wurde kein Video erstellt, aus dem die Einzelbilder extrahiert wurden, sondern einzelne, spezifische Bilder gemacht mit der Einzelbildfunktion. Da diese Bilder aufgrund der Linse und der nicht ganz exakten Ausrichtung zum Gebäude leicht perspektivisch verzerrt waren, wurden diese mit Hilfe des Tools „Perspective\_Image\_Correction“ bereinigt. In einem ersten Schritt also die Verzerrung der Linse korrigiert und in einem zweiten Schritt die perspektivische Verzerrung, sodass das Bild orthogonal ausgerichtet erscheint.

Ursprünglich war angedacht aus den Einzelbildern eine gesamte Achsenansicht des Turms zusammenzufügen, was aber nicht möglich war, da sich Bereiche durch die verschiedenen Perspektiven unterschiedlich darstellen. Deshalb wurden die orthogonalen Gesamtansichten aus der Punktwolke des Laserscanning generiert.

Das Hauptproblem beim Anfertigen der Aufnahmen stellten nahestehende Bäume dar. Nur mit äußerster Vorsicht und aufgrund der guten, windstillen Wetterlage war es möglich jeden Bereich des Gebäudes zu befliegen – teilweise unterhalb von Baumkronen, teilweise darüber ohne Sichtverbindung zur Drohne.

#### 4.2.2.2 Burgruine, Nebra (Schadenskartierung)

##### Eckdaten zum Projekt



Aufnahmedauer	10 Minuten
Anzahl der verwendeten Bilder	146 Bilder
Größe der Projektpunktwolke (1 mm Punktdichte)	7 Millionen
Verwendete Software	COLMAP

Auch bei diesem Projekt war eines der Hauptprobleme: Wie erfasst man die oberen Teile des Gebäudes mit einem terrestrischen Laserscanner? Es ist zwar durchaus technisch möglich, die oberen Bereiche zu scannen (Aufstellen eines Gerüstes), jedoch ist der dafür zu betreibende Aufwand nicht rechtfertigungswürdig. Aufgrund dessen wurde auch hier erneut die Drohne eingesetzt, um die Mauerkronen der noch stehenden Wände zu erfassen.

Es wurden mehrere Überflüge vollzogen, die jeweils circa 10 Minuten in Anspruch nahmen. Einige erfolgten aus weiterer Entfernung, um die Gesamtheit des Gebäudes zu erfassen, andere wurden für spezifische Bauteile (z.B. der rechteckige Turm) angefertigt, um für den Fall gerüstet zu sein, dass detailliertere Aufnahmen benötigt werden.

#### 4.2.2.3 Ergebnis

Eine moderne und wendige Kameradrohne wie die Phantom 3 ist dazu geeignet Bilder oder Videos aufzunehmen, die für photogrammetrische Zwecke oder zur Dokumentation genutzt werden können. Dank eingebautem GPS-Sensor und anderer Helfer, welche die Manövrierfähigkeit der Drohne erhöhen, kann man mit ihr schnell und effizient auch große Volumen aufnehmen. Vor eine besondere Herausforderung jedoch ist der Pilot gestellt, wenn die Hilfssysteme einmal nicht zur Verfügung stehen. So ist das Befliegen im Innenraum ohne GPS nur bedingt möglich und bedarf einiger Flugstunden mit der Drohne. Deshalb wird empfohlen die Drohne nur im Außenbereich bei dementsprechend großen Trümmerfeldern zu verwenden, die nicht von terrestrischen Standpunkten aus überschaut werden können. Ebenso ist die maximale Verbindungsreichweite zwischen Drohne und Fernbedienung zu beachten. Bricht diese Verbindung ab, droht je nach Konfiguration der Drohne das Verbleiben schwebend in der Luft, Landung oder Rückflug zum Startpunkt einhergehend mit möglicher Kollision oder Absturz. Nicht

gefliegen werden kann bei zu starken Windböen, Regen oder Schneefall, da die Funkverbindung zur Drohne nicht gesichert ist oder es zu unvorhersehbaren Flugmanövern des Gerätes kommen kann. Als unstartbar gilt die Drohne außerhalb des empfohlenen Temperaturbereiches des Herstellers, was sich als Sicherheitsfunktion der Drohnen-Firmware<sup>3</sup> erweist, da Temperatur die Kapazität des Akkumulators negativ beeinflussen kann.

Die auf dem Markt befindliche Software zur Photogrammetrie ist ebenfalls sehr gut ausgereift. Hersteller wie Agisoft oder Capturing Reality bieten proprietäre Software, die ein Plus an Benutzerfreundlichkeit und Geschwindigkeit bietet. Freie und quelloffene Software wie zum Beispiel VisualSfM oder COLMAP benötigen zwar etwas mehr Fachkenntnis, Eigeninitiative und Zeit des Anwenders, die Ergebnisse sind aber keineswegs denen der kommerziellen Software unterlegen. Fast jeder Software liegen die gleichen Algorithmen und Programmbibliotheken zugrunde, weswegen die Wahl der Software von jedem Nutzer selbst erwogen werden sollte. Jede Anwendung bietet neben den proprietären Speicheroptionen auch immer gängige Formate an, die dem Industriestandard entsprechen (z.B. \*.e57).

### **4.2.3 Handscanner**

Zum Zeitpunkt des Forschungsprojektes gab es eine überschaubare Anzahl verfügbarer Hand(laser)scanner, allen voran die Produkte von FARO und Leica. Auf dem Besuch einer Fachmesse im Rahmen dieses Projektes konnten mehrere Produkte getestet und in Augenschein genommen werden. Allen Handlaserscannern gemein war ihr Aufbau aus zwei grundlegenden Modulen: zum einen den mit der Hand zu führenden Laserscanner und zum anderen einen durch Kabel verbundenen Rechner/Tablet. Dieser Aufbau erschwerte die Konzentration auf das Scannen, da auch fortwährend das Zweitgerät gehalten werden musste bzw. eine zweite Person notwendig machte, um das Gerät hinterherzutragen. Des Weiteren ließ die Performance der Scanner beim Probieren der von den Herstellern zur Verfügung gestellten Testobjekten zu wünschen übrig. Stets musste darauf geachtet werden, den Scankopf in gleichmäßigem Abstand und langsamer gleichmäßiger Geschwindigkeit zum Objekt zu bewegen.

Eine Alternative stellte der Hersteller DotProduct LLC mit dem DPI-8X dar. Dieses Gerät setzt sich im Wesentlichen ebenfalls aus dem Scankopf und einem Tablet zusammen, wobei diese aber in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht sind und der Scanner somit einhändig geführt werden kann. Eine weitere Besonderheit ist, dass der Scankopf keine Eigenentwicklung des Herstellers ist, sondern eine von PrimeSense hergestellte Sensorbank, die der Spielesteuerung „Kinect“ von Microsoft verwandt ist. Die RD 1.08 Sensorbank ist ausgestattet mit einer 3D-Tiefenkamera<sup>4</sup>, einer RGB-Bildkamera<sup>5</sup> sowie einem Infrarotlichtprojektor<sup>6</sup>. Angeschlossen wird die Sensorbank über USB2 an ein NVIDIAshield-Tablet. Auf diesen installiert ist die vom Hersteller zur Verfügung gestellte Software Phi.3D. Diese Software stellt die Verbindung zwischen Tablet und Sensor her und steuert alle Abläufe, die zum Erfassen von Scans nötig sind.

---

<sup>3</sup> Das ist eine festintegrierte Software zur Komponentensteuerung.

<sup>4</sup> Zur Erfassung verschiedener Ebenen in der Tiefe

<sup>5</sup> Zum Erfassen der Farbinformation

<sup>6</sup> Skalierung der Punktwolke anhand von projiziertem, statischen Speckle-Muster (Vergleich 2.4.4.1)



#### 4.2.3.1 Mausoleum, Steinort, Polen (Bauzustandserfassung)

##### Eckdaten zum Projekt



Aufnahmedauer	10 Minuten
Anzahl der von Phi.3D generierten Frames	151 Frames
Größe der Projektpunktwolke (1 mm Punktdichte)	8,7 Millionen, RGB
Verwendete Software	Phi.3D, CloudCompare

Bei der Sanierung des Mausoleums in Steinort mussten regelmäßig – zur Dokumentation und zur Planung weiterer Arbeitsschritte – Bauzustände der oberen Mauerkronen erfasst werden. Da der Einsatz des terrestrischen Laserscanners zwar möglich gewesen wäre, aber der Aufwand erheblich höher, entschieden wir uns den Handscanner zu verwenden. Dieser erwies sich beim Aufstieg auf das Gerüst und beim Scannen als wesentlich praktikabler. Einzig anzumerkendes Manko war die Notwendigkeit, dass die Aufnahmen in den frühen Morgen- bzw. Abendstunden erfolgen mussten. Die zu scannenden Flächen wären sonst durch Sonnenlicht deutlich überbelichtet worden und ein Scannen deshalb nicht möglich. Das Ergebnis aus den schnell erstellten Scans war durchaus ergiebig. So wurden am gezeigten Ausschnitt 38 Millionen Messpunkte erfasst. Diese wurden dann zur Datenreduktion auf die oben genannten und dargestellten 8,7 Millionen Punkte bei einer Punktdichte von 1 Millimeter heruntergerechnet. Weitere Probleme können durch stark reflektierende Oberflächen oder zu geringe Lichtverhältnisse entstehen, bei denen der Scanner ebenfalls keine Messpunkte erfassen kann.

#### 4.2.4 Tablet zur Datenbanknutzung

Im Gegensatz zur Entrümmung bei der Frauenkirche sollten keine Kerndatenblätter zur Erstaufnahme der Fundstücke genutzt, sondern die Daten direkt in die Datenbank aufgenommen werden. Dadurch erübrigt sich der Zwischenschritt einer Aufnahme in Papierform, mindert

Informationsverlust aufgrund verlorener Schriftstücke oder unleserlicher Handschrift und zeitgemäßer Datenaufnahme wird somit entsprochen. Daten sind sofort verfügbar und können verwaltet werden. Geeignet sind Tablets ab 10 Zoll, um eine gute Lesbarkeit und Handhabbarkeit zu gewährleisten.



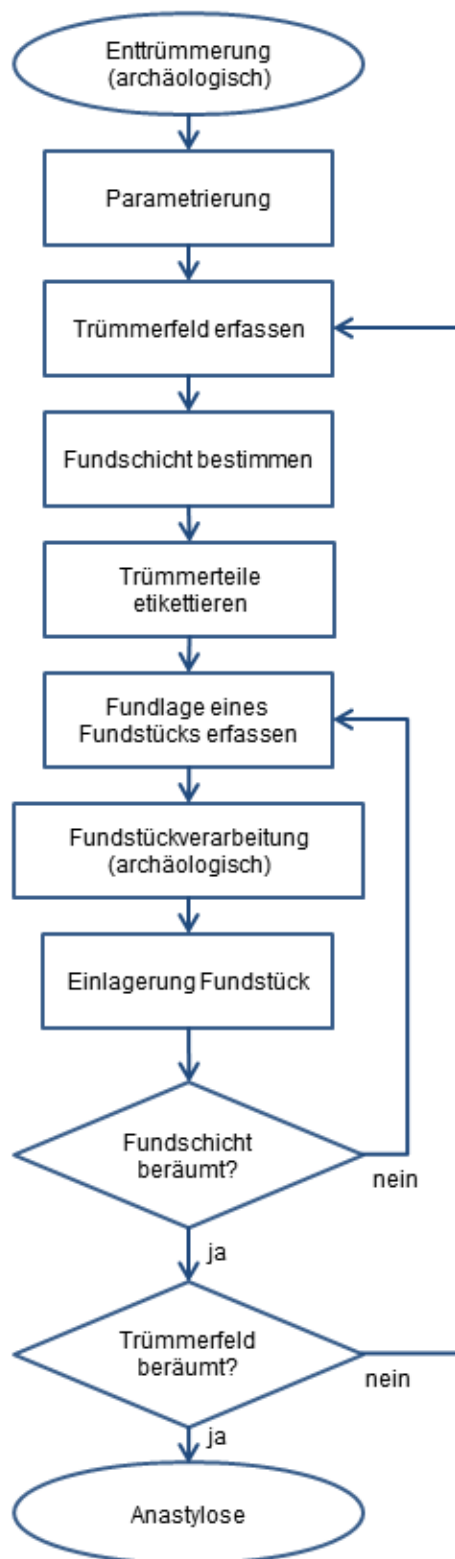
**Bild 53** Symbolbild Tabletbenutzung [11]

### 4.3 Ablaufplan der Anastylose mit neuen Technologien

Phasen	Methode	Hilfsmittel, Werkzeuge	
1. Prospektion	Quellenrecherche	Augenzeugenberichte, Zeichnungen, Internetrecherche, digitale Fotos, erstes 3D-Modell aus photogrammetrischer Software	Prozessbegleitende Informationssammlung und -verwaltung mit der Software hermine
	Ortsbegehung und Bestandsaufnahme	Kamera, Messwerkzeuge, 3D-Laserscanner, Drohnenfotografie, Satellitenbilder	
	Erstellen eines 3D-Modells	3D-fähige Software, Daten aus Quellenrecherche und Ortsbegehung	
	Geodätische Einmessung und Anlage eines Gitternetzes	Tachymeter, rot-weißes Plastikband, GPS, digitales Gitternetz auf photogrammetrisch entzerrtem Übersichtsbildern	
2. Dokumentation und Bergung	Kennzeichnen der Fundstücke	Schlagbohrmaschine, vorgeprägte Messingplaketten, Hammer/Schraubendreher, Farbspray, Tablet, Kamera	
	Erfassen der Fundsituation	Drohnenfotografie, 3D-Laserscanner	
	Bergung der Fundstücke und Freilegen nächste Fundschicht	Turmdrehkräne, Bagger, Manipuliergreifer (gepolsterte Backen), Lastgurte, Industriesauger, Paletten, Gabelstapler	
	Zwischenlager, Fortführung Fundbeschreibung am Fundstück	Tablet	
	Bauzelt, exakte Erfassung der Fundstückoberfläche	drehbarer Spezialtisch mit Maßeinteilung, Hebezeug über dem Messtisch, Passpunktmarken, Hand(laser)scanner, Computer	
3. Einlagerung und Archivierung	Lagerung der Fundstücke in einem Hochregallager	Regallager, Gabelstapler, Paletten Registrierung in Software	
	Lagerung der nicht als Fundstücke klassifizierten Steine	Gabelstapler, Paletten	
	Fundkartierung	historische Fotos, 3D-Modelle der Fundstücke, 3D-Modell des Bauwerks vor der Zerstörung	
4. Analyse, Auswertung	Erstellung Fundstückzeichnungen	3D-Modelle der Fundstücke, CAD-Software	
	Wiederaufbauplanung		

Tabelle 6 Überarbeiteter Ablaufplan

Entrümmung  
(archäologisch)



**Bild 54** Darstellung der Bergung als Flussdiagramm [11]

## **5 Pilotprojekt**

### **5.1 Teilnachbau des Torbogens von Palmyra**

#### **5.1.1 Notwendigkeit**

Im Rahmen des Forschungsprojekts sollte die Praxistauglichkeit der Enttrümmerung mit den überarbeiteten Technologien ermittelt werden. Da ein Pilotprojekt aufgrund der andauernden angespannten politischen Lage in Syrien nicht möglich war, wurde entschieden einen Teil des zerstörten Torbogens von Palmyra schematisiert (siehe 5.1.2.1) nachzubauen, diesen einstürzen zu lassen und zu enttrümmern.

#### **5.1.2 Planung**

Um den Modellbau zu planen sollte ein 3D-Modell erstellt werden. Dazu gab es bereits im Winter 2011 einige Unternehmen, die sich mit der digitalen Rekonstruktion beschäftigt und diverse 3D-Modelle erstellt haben.<sup>7,8,9</sup> Leider blieben alle Anfragen zur Bereitstellung des Modells unbeantwortet, sodass eigene Bestrebungen angestellt wurden ein 3D-Modell anzufertigen. Als Grundlage sollten dazu eine möglichst große Anzahl an Fotografien dienen, welche bereits in digitaler Form vorliegen. Dazu wurde vor allem das World Wide Web als Quelle genutzt. Anhand 30 dieser Bilder konnte mit Hilfe der freien Open Source-Software VisualSfM<sup>10</sup> eine Punktwolke mit immerhin 50.000 Punkten erzeugt werden (Bild 55).

---

<sup>7</sup> <https://arck-project.org/>

<sup>8</sup> <http://digitalarchaeology.org.uk/>

<sup>9</sup> <http://iconem.com/en/>

<sup>10</sup> <http://ccwu.me/vsfm/>



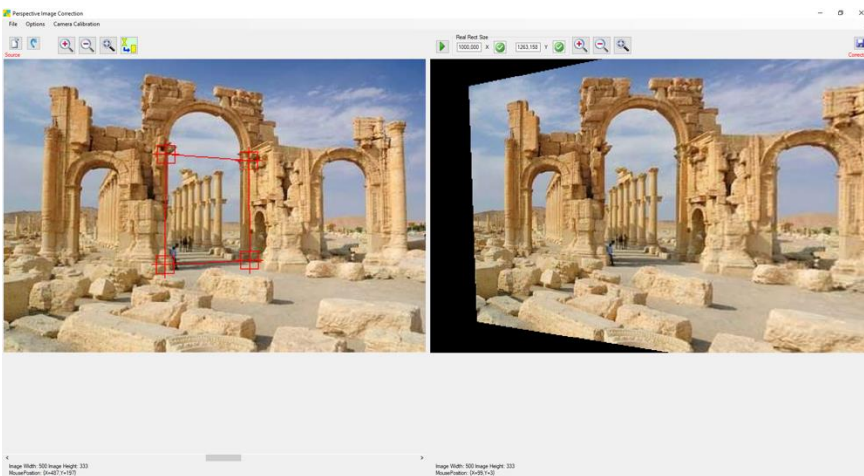


**Bild 55 Mit VisualSfM erstellte Punktwolke, dargestellt in CloudCompare [11]**

Auch wenn die Anzahl der Punkte, die aus der geringen Anzahl der Bilder erzeugt werden konnte, erstaunlich ist, war das recherchierte Bildmaterial nicht ausreichend, um ein wirklich abbildendes 3D-Modell aus der Punktwolke zu generieren. Jedoch diente es vor allem zur Überprüfung der Proportionen. Die ungefähren Maße des Torbogens wurden über eine zweidimensionale Maßstabsüberprüfung durchgeführt. Dazu wurde ein Bild ausgewählt, auf dem eine Person möglichst in der räumlichen Ebene des Torbogens stand und als Maßstabsfigur diente. Das Bild wurde mit Hilfe des Programms „Perspective Image Correction“<sup>11</sup> zunächst entzerrt (Bild 56).

---

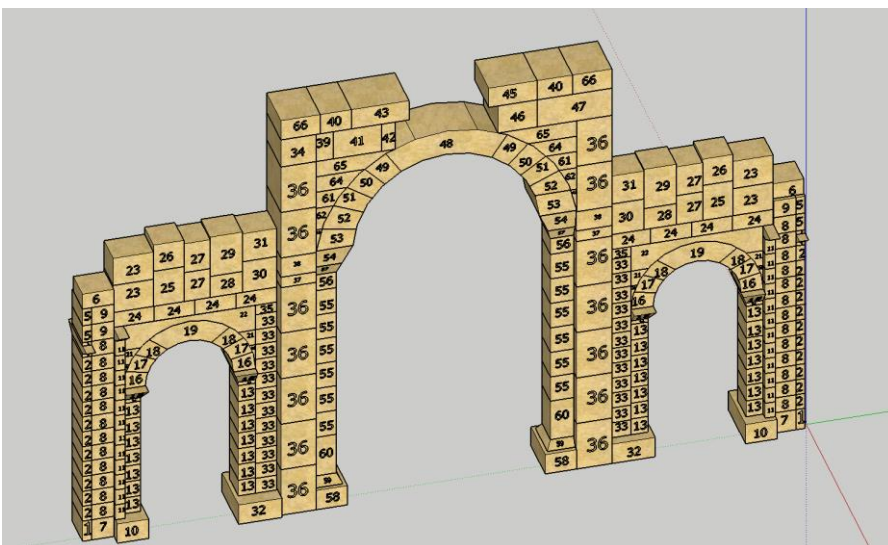
<sup>11</sup> <https://sourceforge.net/projects/perspectiveimg/>



**Bild 56 Bildverzerrung mit Hilfe der Software Perspective Image Correction [11]**

In dieser nahezu orthogonalen Ansicht konnte nun die im Bild befindliche Person durch Übereinanderstellen zum Vermessen des Torbogens genutzt werden. Dabei ergaben sich Abmessungen des mittleren Torbogens von etwa zwölf Meter Höhe und neun Meter Breite.

In einem ersten Versuch wurde mit Hilfe von Sketchup<sup>12</sup> ein Modell entwickelt, welches eine relativ hohe Anzahl an Einzelsteinen enthielt (Bild 57).



**Bild 57 Erstes Sketchup-Modell eines Teils des Torbogens [11]**

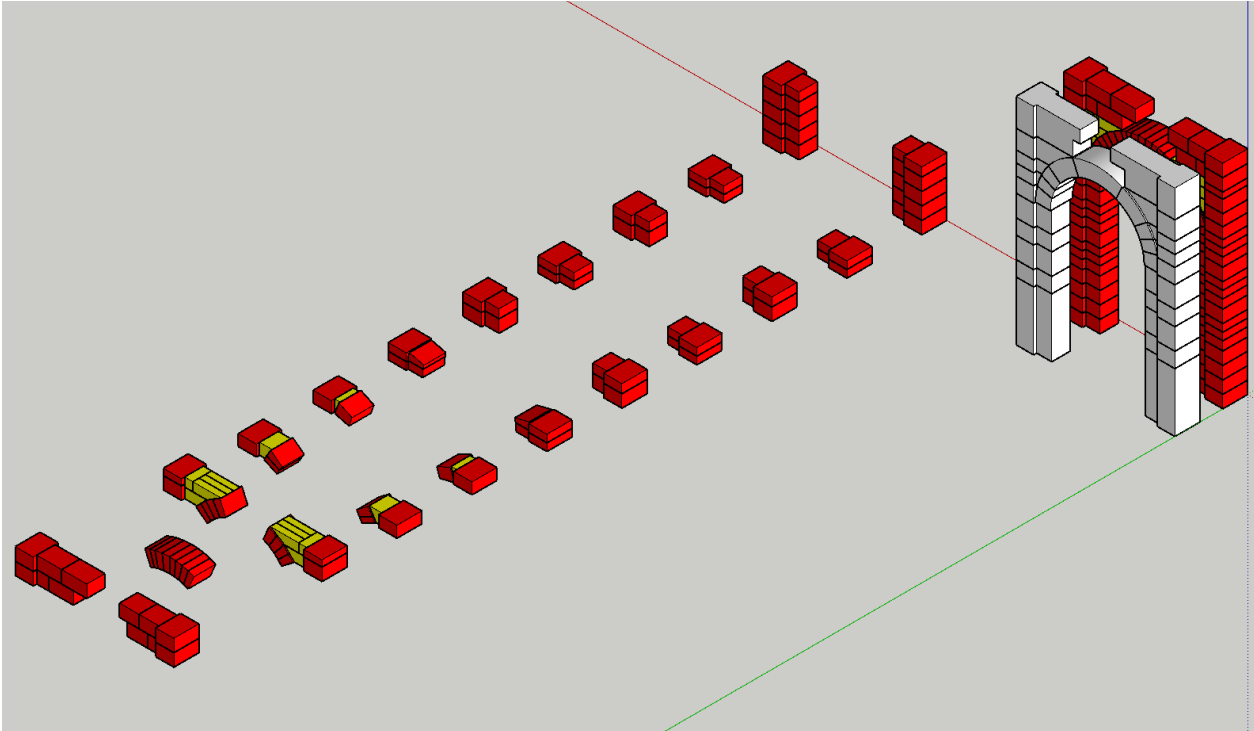
Dieses Modell wurde aufgrund seiner Komplexität und des zur Verfügung stehenden Steinformates aber (siehe 5.1.2.2) verworfen. Ebenfalls wurde davon abgesehen das Modell im originalen Maßstab zu errichten, da ein Modell dieser Größe weder aus organisatorischer, noch aus arbeitssicherheitstechnischer Sicht vertretbar gewesen wäre. Stattdessen wurde ein stark

<sup>12</sup> Software zur Erstellung dreidimensionaler Modelle

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des „Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung“ gefördert (Az.: SWD-10.08.18.7-17.50). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.



vereinfachtes Tormodell im Maßstab 1:4 entworfen, welches Maße von rund vier Meter Höhe und drei Meter Breite besaß und auf den Maßen des Steinformats aufbaute (Bild 58).



**Bild 58 Vereinfachtes Torbogenmodell, M 1:4 [11]**

Der Torbogen wurde dabei so konzipiert, dass die im weißen Modell dargestellten Steinstrukturen durch Verkleben (siehe 5.1.2.2) der Modellsteine nachempfunden werden (einzelne Blockstrukturen links im Bild).

#### 5.1.2.1 Steinformat für den Modellbau

Da zur Beantragung des Forschungsprojektes kein Pilotprojekt vorgesehen war, wurde versucht die anfallenden Kosten so gering wie möglich zu halten. Um die Wirtschaftlichkeit unseres Forschungsprojektes zu steigern und nachhaltig zu agieren, wurden die Steine für den Bau des Modells aus Restbeständen und wiederverwerteten Steinen des Forschungsprojektes „Faserbewehrtes Kellermauerwerk (FBKM) – SWD-10.08.18.7-15.46“ organisiert.

Die Porenbetonsteine der Firma YTONG wiesen dabei folgende Eigenschaften auf [46]:

- Bezeichnung: PP4 499x365x249 4-0.50
- Länge: 499 mm
- Breite: 365 mm (Wanddicke)
- Höhe: 249 mm
- Gewicht: 22,7 kg/Stück



**Bild 59 PP4 499x365x249 4-0.50**

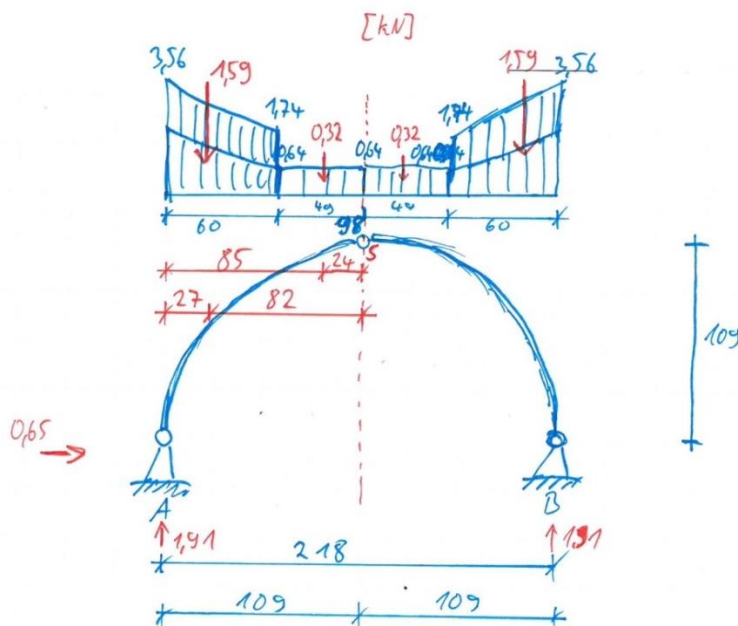
5.1.2.2 Verwendeter Mörtel

Als Mörtel wurde passender Ytong Dünnbettmörtel der Mörtelklasse 10 gem. DIN EN 998-2 verwendet:

*Dieser Dünnbettmörtel eignet sich besonders zur Herstellung von Mauerwerk aus Porenbetonplansteinen. Die Normdruckfestigkeit nach 28 Tagen beträgt mind. 10N/mm<sup>2</sup>. Fugendicken werden im Bereich 1-3mm hergestellt. [46]*

5.1.2.3 Statische Berechnungen

Um die Standsicherheit des Modells gewährleisten zu können wurden die Bogen- sowie Auflagerkräfte berechnet. Die Rechnung erfolgte handschriftlich und unter schematisierten Bedingungen. Dabei wurden alle Grenzwerte eingehalten, sodass absolut sicher war, dass der Aufbau stabil ist.



**Bild 60 Handschriftliche Berechnung der Bogenkräfte [11]**

### **5.1.3 Aufbau**

Der Aufbau erfolgte in mehreren Stufen. Dieser wird in den folgenden Unterabschnitten noch näher erläutert. Zunächst wurden die Einzelsegmente der Steine zurechtgesägt. Diese wurden auf Paletten sortiert zwischengelagert. Dann wurden die zwei Pfeiler des Torbogens aufgemauert. Unter den ersten Steinen der Pfeiler wurde mit Beton eine Sauberkeitsschicht hergestellt, die dafür Sorge trug, dass die Konstruktion in Waage steht und gegen Verrutschen in horizontaler Ebene gesichert ist. Parallel zum Mauern der Pfeiler wurde eine Hilfskonstruktion auf Holz hergestellt zur temporären Unterstützung beim Mauern des eigentlichen Torbogens. Auf diesen wurden dann weitere Elemente aufgemauert, welche die notwendige Masse eingebracht haben um die horizontalen Schubkräfte des Bogens zu überdrücken. Bis zum Einsturz wurde die Konstruktion durch Spanngurte und Paletten vor einem versehentlichen Einsturz durch Fremdeinwirkung geschützt.

#### **5.1.3.1 Dokumentation**

Der gesamte Aufbau des Torbogens wurde von einem Studenten der TU Dresden begleitet. Dieser fertigte Fotografien mit Hilfe einer professionellen Kamera in regelmäßigen Abständen aus demselben Blickwinkel an, sodass diese beim schnellen Abspielen wie in Zeitraffer dargestellt werden könnte. Nach dem erfolgten Aufbau des Torbogens wurde der Ist-Zustand des Modells mit Hilfe des Laserscanners erfasst. Dazu wurden um den Torbogen herum Zielkugeln positioniert und dieser aus sechs Positionen hochauflösend eingescannt.

Dies ist eine durchaus realistische Vorgehensweise, da heutzutage immer mehr Gebäude gescannt werden, um zukünftig Punktwolken zur Verfügung zu haben und diese nutzen zu können (wie nach dem Brand der Kathedrale Notre-Dame de Paris geschehen) (Bild 61).



**Bild 61 Punktwolke der Kathedrale Notre-Dame de Paris [35]**





**Bild 63 Gerüst für den Aufbau des Torbogens [11]**

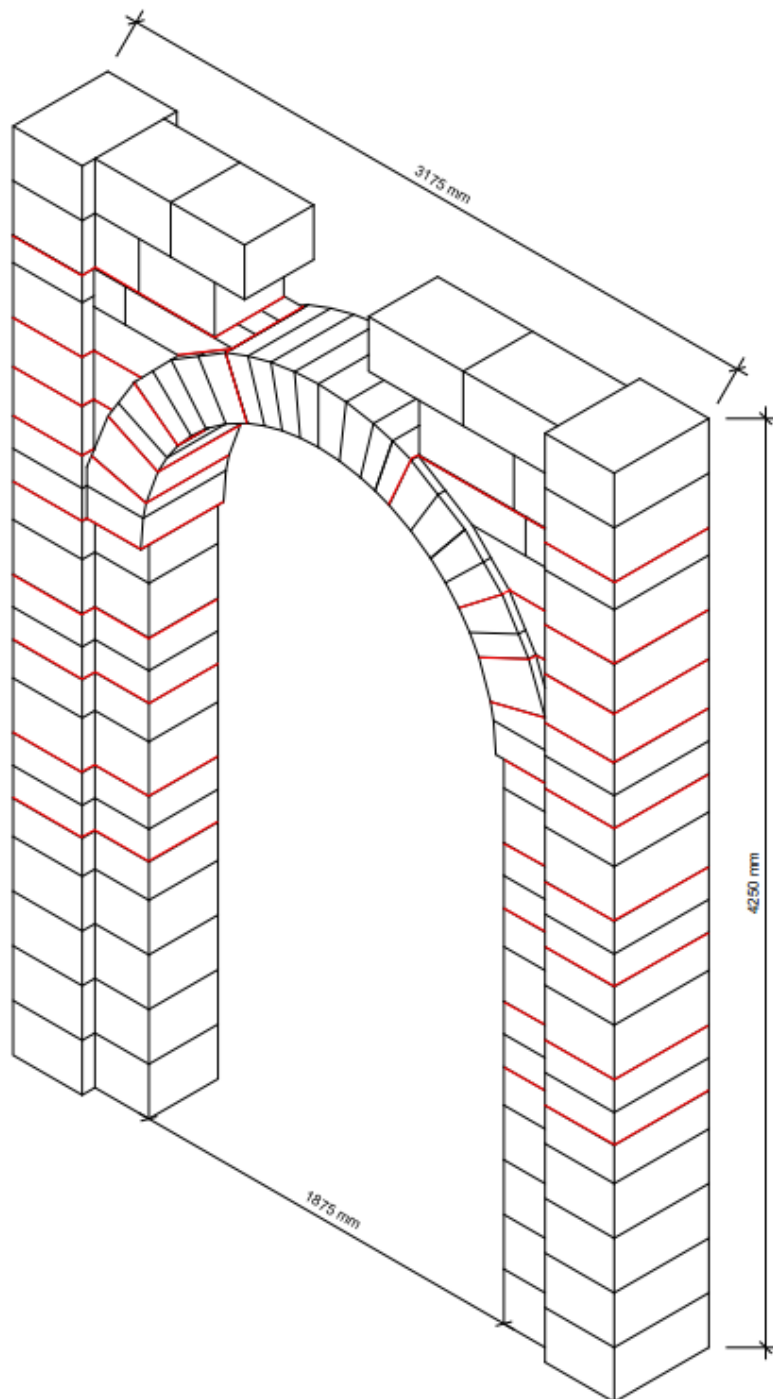
#### 5.1.3.4 Aufbau der Pfeiler

Wie bereits in Abschnitt 5.1.3 erwähnt, wurde die erste Schicht Steine auf eine Sauberkeitsschicht aus Zement gesetzt, damit diese ohne zu verrutschen und gerade montiert werden konnten. Nach einer kurzen Antrockenphase von etwa zwei Stunden konnte begonnen werden die Pfeiler aufzumauern. Um die Struktur wie in Bild 58 nachempfinden zu können, wurden nur die Fugen vermörtelt, welche die Steinmodule zusammenfassten.



**Bild 64 Aufbau der Bogenpfeiler [11]**

Die in Bild 65 rot markierten Fugen blieben dabei vollkommen unvermörtelt. Es wurden aber vereinzelt Folien eingebracht, um das Verkleben des Mörtels durch herablaufenden Mörtel in den Stoßfugen zu vermeiden.



**Bild 65 Darstellung der unvermörtelten Fugen [11]**



### 5.1.3.5 Aufbau des Bogens

Zunächst wurde eine halbrunde Hilfskonstruktion aus Holz gebaut, um die Form des Bogens abzubilden (Bild 66). Diese Konstruktion wurde unter Nutzung weiterer Steine auf Höhe der Kämpfer positioniert. Anschließend wurde der Bogen entlang der Hilfskonstruktion aufgemauert. Nach Aushärten des Torbogens erfolgte das Aufmauern weiterer Steine oberhalb des Bogenstiches, um (wie in 5.1.2.3 beschrieben) die horizontale Bogenkraft zu überdrücken. Nach Aushärtung der zusätzlichen Aufmauerung wurde die Hilfskonstruktion mit Hilfe eines Gabelstaplers vorsichtig entfernt.



**Bild 66 Aufbau des Bogenteils [11]**

### 5.1.3.6 Sicherung des Torbogens

Da zwischen Aufbau des Torbogens und des herbeigeführten Einsturzes Zeit verstrich, in welcher der Bogen unbeaufsichtigt blieb, musste dieser vor einem versehentlichen Einsturz gesichert werden. Dazu wurde zum einen in Höhe der Kämpfer ein umringender horizontaler Spannungsgurt angebracht, zum anderen ein weiterer über dem Torbogen, um diesen gegen Umkippen in Längsrichtung zu sichern. An den Fußpunkten der Pfeiler wurden mit Hilfe von Schraubzwingen je zwei Holzpaletten fixiert, um mögliche Anpralllasten abzufangen.

## 5.1.4 Vorbereitung des Einsturzes

Mit der Unterstützung eines Bühnentechnikers und der Spezialisten der Jäger Ingenieure wurde besprochen wie ein Einsturz herbeigeführt werden könnte und verschiedene Einsturzscenarien warfen bereits vor dem Aufbau eine Debatte auf.

Die Idee, eine Sprengung durchzuführen, wurde aus Sicherheitsaspekten und dem damit verbundenen Aufwand jedoch verworfen. Außerdem stand die Diskussion im Raum, ob der Bogen mittels einer Anpralllast zum Einsturz zu bringen sei, z.B. anhand eines an der Hallendecke angebrachten großen Pendels mit Gewicht am Ende – allerdings war hier ein unbeabsichtigter und unvorhersehbarer Pendelausschlag nicht wegzudenken bzw. warf sich die Frage auf, ob die Deckenkonstruktion der Halle durch Trümmerteile, welche das Pendel eventuell erfassen könnten, in Mitleidenschaft gezogen wird. In der Mitte des Pfeilers Zugkräfte anzusetzen, die zum Einknicken der Pfeiler führen, war die bevorzugte Variante, welche dann auch zur Ausführung gelangte. Auch hier gab es Überlegungen wie man diese Zugkräfte generieren könnte – durch menschliche Kraft, Ziehen mit Hilfe eines Gabelstaplers oder anderer Fahrzeuge – aber in Rücksprache mit einem Bühnentechniker wurde entschieden, diese mittels zweier Seilzüge und Umlenkrollen zu übertragen.







**Bild 68** Der Einsturzhergang in Bildern [11]

## **5.2 Prospektion<sup>16</sup>**

### **5.2.1 Quellenrecherche**

Da dies bereits in 5.1.2 beschrieben wurde und sowohl Fotos und Videos des Einsturzhergangs als auch Augenzeugenberichte der Anwesenden vorhanden sind, soll an dieser Stelle darauf verzichtet werden. Weitere Methoden der Quellenrecherche wurden außerdem in 4 und 4.1.1 benannt.

### **5.2.2 Ortsbegehung und Bestandsaufnahme**

Nach Einsturz des Torbogens und Verabschiedung der geladenen Gäste wurde der Trümmerberg mittels eines initialen Laserscans erfasst. Dazu wurden (wie schon beim Scan des aufgebauten Torbogens) sechs Scanpositionen genutzt, um den Trümmerberg von allen Seiten aufzunehmen. Zudem wurden weitere Bilder und Videos aus dem Nahbereich angefertigt und der Trümmerberg mit Hilfe der Drohne festgehalten.

### **5.2.3 Erstellen eines 3D-Modells**

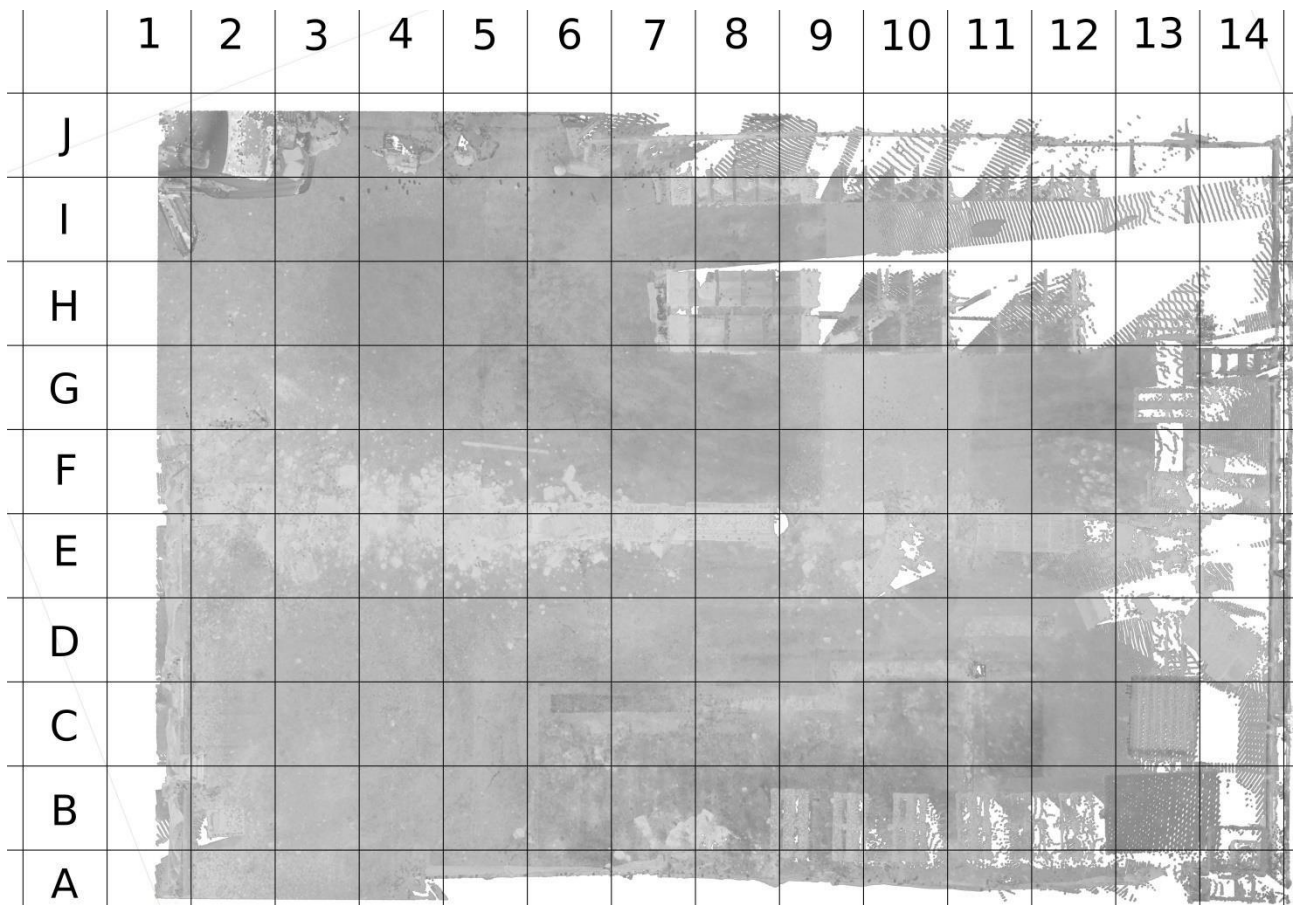
Das 3D-Modell wurde zur Planung des Aufbaus erzeugt, wird aber normalerweise auf Basis der Daten von 5.1.3.1 respektive 5.2.1 erstellt.

### **5.2.4 Geodätische Einmessung und Anlage eines Gitternetzes**

Eine geodätische Einmessung erfolgte nicht, da es sich um einen Feldversuch handelt, der innerhalb einer Halle stattgefunden hat. Deshalb war es nicht nötig das lokale Koordinatensystem in ein globales einzumessen. Jedoch musste aber wie bei jeder archäologischen Aufarbeitung ein lokales Koordinatensystem in Form eines Grabungs-/Gitternetzes angelegt werden. Als Ursprung des Grabungsnetzes diente der Eckpunkt eines auf dem Boden verankerten Doppel-T-Trägers eines anderen Versuchsaufbaus. Orthogonal zu diesem Punkt wurde ein zweidimensionales quadratisches Gitternetz über den Trümmerberg gelegt. Jedes Quadrat besaß eine Kantenlänge von 120 cm. Dargestellt wurde dieses am Boden mit Hilfe von Kreidemarkierungen, später wurde zur Erhöhung der Genauigkeit das Grabungsnetz digital über den gesamten Trümmerberg gespannt, um die Fundorte überprüfen zu können (Bild 69).

---

<sup>16</sup> Prospektion meint das Aufsuchen und Erkunden archäologischer Stätten am Boden.



**Bild 69 Über das Trümmerfeld gelegtes digitales Gitternetz [11]**



## 5.3 Dokumentation und Bergung

### 5.3.1 Aufbau der Lagerfläche

Um die Fläche geordnet enttrümmern zu können, war es nötig ein Lagersystem zu entwickeln, in welches die Fundstücke einsortiert werden konnten. Nach einer ersten Begehung wurden dabei vier verschiedene Größen möglicher Fundstücke identifiziert, welche auf Basis gängiger Kleidergrößen unterteilt wurden: S, M, L, XL. Für die ersten drei wurde jeweils ein Lagerregal aufgebaut, wobei mit zunehmender Größe der Fundstücke die Lagerkapazität abnimmt. Die Fundstücke der Größe XL wurden mit Hilfe eines Gabelstaplers auf auf dem Boden stehende Holzpaletten abgelegt.

Es gibt dementsprechend 4 durch Buchstaben differenzierte Lager, deren einzelne Lagerplätze jeweils durch einen dreistelligen Zahlencode unterschieden werden. S 1-4-5 beschreibt demnach Lager „small“, Reihe 1, Zeile 4, Platz 5.



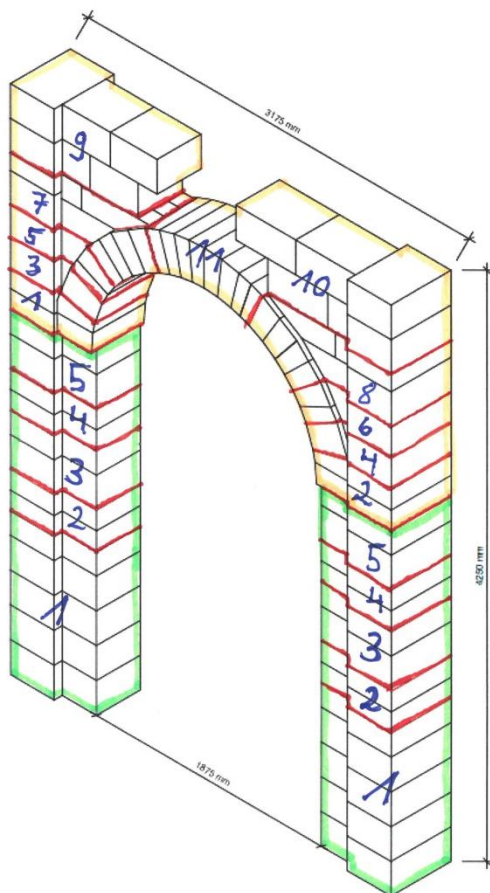
**Bild 70 Die drei Lagerbereiche S, M und L [11]**



### 5.3.2 Datenkonfiguration des Projektes in hermine

Die technischen Abläufe in der Software wurden bereits ausreichend in 3.2 erläutert und können dort nachvollzogen werden. Anbei eine kurze Auflistung der erfolgten Eingaben in die Software:

1. Anlegen des Projektes und Vergabe interner Projektnummer 17-4024\_PAL
2. Festlegung des Grabungsnetzes, welches von A1 bis J8 reicht
3. Anlegen der Lagerplätze:
  - „small“ 1-1-1 bis 3-4-5 (60 Lagermöglichkeiten)
  - „medium“ 1-1-1 bis 3-3-4 (36 Lagermöglichkeiten)
  - „large“ 1-1-1 bis 3-3-3 (27 Lagermöglichkeiten)
  - „extra-large“ 1-10 (10 Lagermöglichkeiten)
  - „Zwischenlager“ (1 Lagerplatz)
4. Kategorien anlegen:
  - „3D-scanned“ (für gescannte Modelle)
  - „modeled“ (für modellierte 3D-Modelle)
  - „mapped“ (Fundort wurde am 3D-Modell überprüft)
5. Gebäudestruktur (Bild 71) anlegen: Zuordnung zum Torbogen – Unterteilung Torbogen
  - „linke Stütze“ (5 Steine)
  - „rechte Stütze“ (5 Steine)
  - „Bogen“ (11 Steine)
6. Anlegen verschiedener Benutzer: „kamü“ als Worker, „maer“ als Worker
7. als Administrator diente hermine als Standardkonto



**Bild 71 Hierarchische Gebäudestruktur [11]**

### 5.3.3 Kennzeichnen der Fundstücke

Zur jeweiligen Fundschicht gehören die Trümmerteile, welche geborgen werden können, ohne die Fundsituation anderer Trümmerteile zu verändern. Nach Bestimmung der ersten Fundschicht werden alle Fundstücke dieser Schicht durch Abringen der Fundstückmarke angesprochen. Hierbei fanden Messingmarken Anwendung, welche von 001-100 nummeriert sind und jeweils nur einmal (um eine Doppelnennung zu vermeiden) existieren und daher auch willkürlich vergeben werden können. Die Markierung wird mittels eines zu setzenden Dübels und einer Schraube gewährleistet.



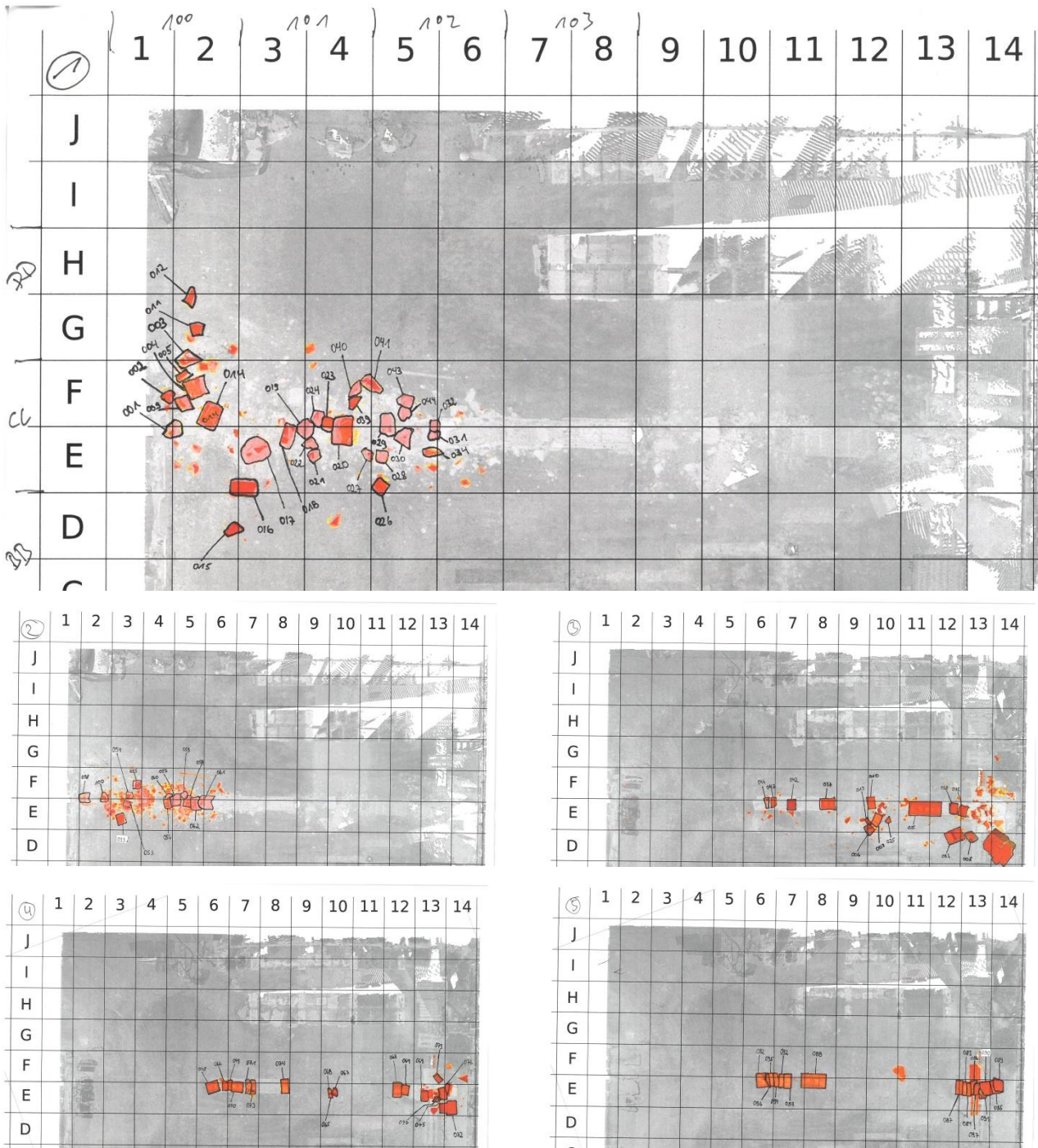
Bild 72 Fundstücke mit angebrachten Fundstückmarken [11]

### 5.3.4 Erfassen der Fundsituation

Nachdem alle Fundstücke mittels Fundstückmarke gekennzeichnet wurden, muss die Fundsituation dieser aufgezeichnet werden. Anschließend wird die erste Fundschicht nochmals komplett mit dem Laserscanner von mehreren Standpunkten erfasst. Von einer Befliegung mit einer Drohne wurde abgesehen, da das Trümmerfeld relativ klein war und sich der Einsatz des Laserscanners als praktikabler und effizienter erwies. Des Weiteren wurde jedes Fundstück einzeln fotografisch in seiner Fundsituation erfasst und in der Datenbank von hermine angelegt (siehe 3.2.2). Das erstellte Bild wird zur visuellen Identifikation genutzt. Weiterhin wurden in der Datenbank der Fundort (Koordinate im Grabungsnetz) und schriftliche Angaben zum Trümmerteil erfasst. In den „History Entries“ wurden die Uhrzeit und der Nutzer, welcher den Eintrag getätigt hat, hinterlegt.

### 5.3.5 Bergung der Fundstücke und Freilegen nächste Fundschicht

Die Bergung kleiner oder mittelgroßer Fundstücke konnte per Hand von einer Person erfolgen; größere Trümmerteile wurden unter Zuhilfenahme eines Gabelstaplers bewegt und zum Zwischenlager zur weiteren Verarbeitung gebracht. Nachdem die Fundschicht abgetragen ist, wiederholt sich der Ablauf ab 5.3.3 bis alle Trümmerteile beräumt sind.



**Bild 73 Schicht- und Schrittfolge der Enttrümmerung [11]**



5.3.5.1 Abweichende Bergungstaktik

Nachdem die Lagerflächen aufgebaut waren, musste zügig mit der Entrümmung begonnen werden, da einige Trümmerteile in einer Durchfahrt für Fahrzeuge zu liegen kamen (Bild 73 – Grafik 1 und 2). Deswegen wurde in diesem Bereich eine etwas abgewandelte Methodik der Entrümmung angewandt. Die vorher geplante Reihenfolge „Erstidentifikation – 3D-Scan – Zweitidentifikation – Lagerung“ wurde in diesem Teilbereich um eine Zwischenlagerung vor dem 3D-Scan erweitert, um die Beräumung zu beschleunigen. Dies wäre auch ein denkbares Vorgehen im Katastrophenfall.

Entrümmung  
(pragmatisch)

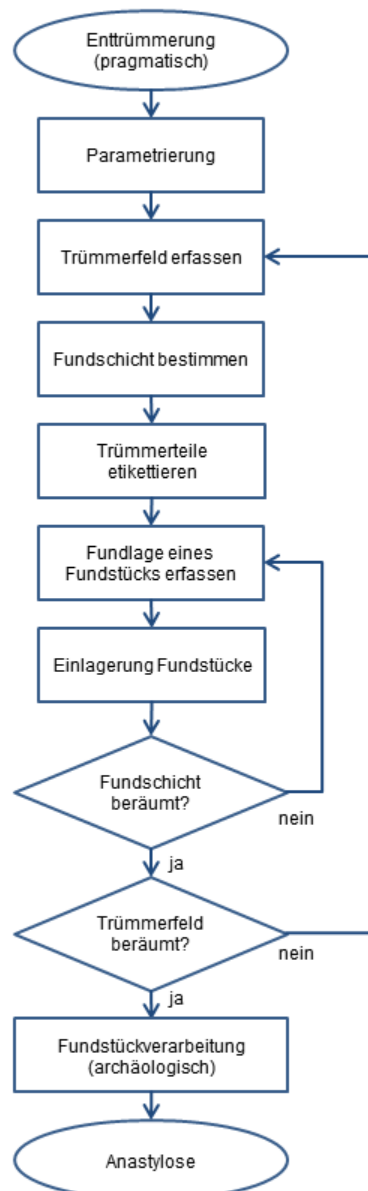


Bild 74 Alternativer Ablaufplan zur Entrümmung [11]

### 5.3.6 Zwischenlager, Fortführung Fundbeschreibung am Fundstück

Das Zwischenlager befand sich aufgrund der kleinen Räumlichkeiten an anderer Stelle in der Halle und in der Datenbank wird stets erfasst, welche Fundstücke sich in selbigem befinden. Zwischenlagerplätze waren nicht genauer definiert, d.h. es war ein ungeordnetes Lager. Anhand des Fundortes und der Geometrie des Fundstückes wurden hier teilweise erste Vermutungen angestellt, zu welchem Teil des Torbogens dieses Fundstück gehören könnte (Pfeiler links, Pfeiler rechts, Bogen). Aus diesem Zwischenlager galt es die Fundstücke zu entwenden, um sie dann photogrammetrisch aufzunehmen.

### 5.3.7 Erfassung der Fundstückoberfläche

Bei diesem Versuch wurde die Oberfläche durch ein photogrammetrisches Verfahren erfasst, dazu diente der Handscanner DotProduct LLC mit dem DPI-8X<sup>17</sup> (4.2.3). Jedes Fundstück wurde auf einen dafür bereitgestellten Tisch positioniert und je nach Komplexität allseitig in verschiedenen Positionen (oben, unten, seitlich) aufgenommen. Sobald der Scan eines Fundstücks abgeschlossen war, wurde dieser Schritt durch Aktivieren der Kategorie „3D-scanned“ in hermine festgehalten. Die einzelnen Rohscans werden anschließend zu den „Attachments“ hochgeladen. Die Genauigkeit der Scans liegt dabei im (Sub-)Millimeterbereich. Pro Fundstück sind (nach einer Eingewöhnungsphase im Umgang mit dem Scanner und hermine) weniger als fünf Minuten anzusetzen. Die Dateigröße der Scans bewegt sich im Bereich von 5-50 Megabyte, was der Bildgröße moderner Kameras entspricht. Mit einer Akkuladung konnten so bis zu 30 Fundstücke ohne Unterbrechung aufgenommen werden.

Auftretende Probleme stellten lediglich die Lichtverhältnisse dar, da der Scanner eine ausreichende, jedoch nicht zu starke Ausleuchtung des Objekts benötigt – idealerweise schattenlose Lichtverhältnisse.

Nach der Erfassung durch den Handscanner werden die Fundstücke zunächst in das endgültige Lager verbracht.



**Bild 75 Scannen der Fundstücke [11]**

<sup>17</sup> <https://www.dotproduct3d.com/dpi8x.html>

## 5.4 Einlagerung und Archivierung

### 5.4.1 Lagerung der Fundstücke

Am wie in 5.3.1 beschrieben aufgebauten Lager erfolgte die Entgegennahme des Fundstückes und anhand seiner Größe die Zuweisung eines Lagerplatzes, welcher wiederum in hermine durch einen Mitarbeiter erfasst wird. Der Transport der Fundstücke erfolgt je nach Größe wie bereits in 5.3.5 beschrieben.

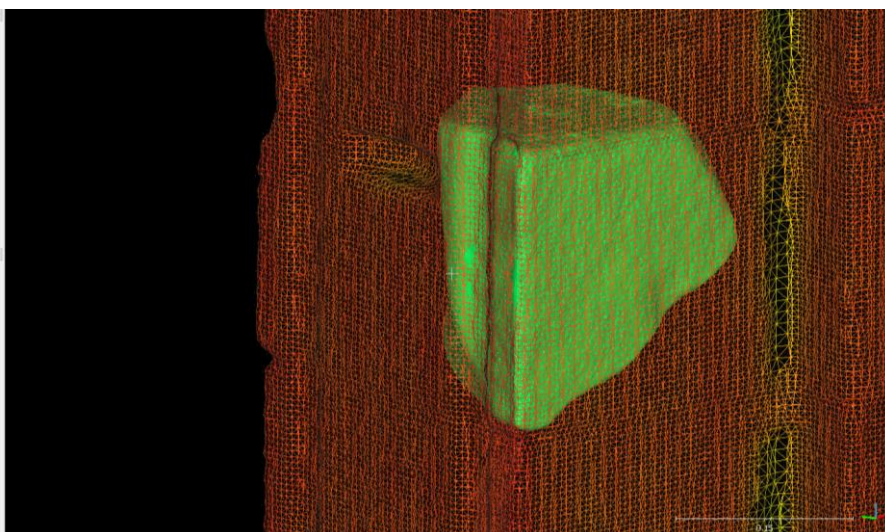
Die nicht als Fundstück klassifizierten Trümmerteile gelangten als Schutt an einem zentralen Platz zur Ablage.



**Bild 76 Einlagerung der Fundstücke [11]**

### 5.4.2 Fundkartierung

Fundkartierung stellt den Versuch dar, die Fundstücke möglichst genau einer Position im Gebäude zuordnen zu können. Dazu können je nach Gebäude verschiedene Indikatoren des Fundstückes und des Gebäudes genutzt werden. Im Pilotprojekt wurde zum einen das Wissen zum Einsturzhergang sowie die Geometrien der Fundstücke in Verbindung mit dem 3D-Modell und zum anderen das Vorhandensein von Mörtelresten an den Fundstücken genutzt, um diese zu orientieren und zu verorten. Zugeordnete Fundstücke wurden dann im 3D-Modell eingefügt.



**Bild 77 Zugeordnetes Fundstück im Bereich des rechten Pfeilers [11]**



#### 5.4.2.1 Zuordnung durch Analyse des Einsturzhergangs

Dank des vorhandenen Videomaterials des Einsturzes konnte am PC nachvollzogen werden, wo welche Bauteile des Torbogens in etwa zu suchen waren. Das Abspielen in Zeitlupe oder Springen von Bild zu Bild ermöglichte und unterstützte diese Vorgehensweise. Da es im Pilotprojekt eine überschaubare Anzahl von Bauteilen gibt – bei größeren Gebäude jedoch die Verfolgung herabstürzender Bauteile auch im Videomaterial erschwert ist – kann man den hier herbeigeführten Einsturz als Idealfall bezeichnen. Normalerweise stehen keine Aufnahmen statischer Kameras, sondern eher verwackelte und willkürliche Aufnahmen eines Mobiltelefons zur Verfügung.

#### 5.4.2.2 Zuordnung anhand der Geometrie

Im Pilotprojekt gibt es zwei wesentliche geometrische Merkmale, in denen sich die Bauteile unterscheiden: zum einen die Quaderform und zum anderen die Bogenform. Das liefert erste Erkenntnisse darüber, ob die Teile eher aus dem oberen Bereich des Gebäudes oder aus den Torpfeilern stammen. Natürlich kann es noch unzählige weitere Formen geben, welche jedoch in diesem Pilotprojekt nicht relevant sind. Die Geometrie bezieht sich hierbei nicht nur auf die Zuordnung Gebäudemodell zu Fundstück, sondern auch von Fundstück zu Fundstück – eventuelle Bruchkanten oder Ornamente geben Aufschluss über die Zuordbarkeit zueinander.

#### 5.4.2.3 Zuordnung anhand des Materials und Farbe

Da alle Bauteile aus demselben Material bestanden und auch in der Farbe nicht variierten, konnten diese Eigenschaften nicht zur Zuordnung beitragen. Normalerweise gilt es zwischen Naturstein, Holz, Glas, Metall, Bemalung, Intarsien oder anderen handwerklichen Ausfertigungen zu differenzieren.

#### 5.4.2.4 Zuordnung durch besondere Merkmale

Anklebende Mörtelreste gaben hier Hinweise auf die Orientierung im Bauteil, da die vermörtelten Flächen bekannt waren. Weitere mögliche (hier jedoch nicht zutreffende) Merkmale können Moosbewuchs an der Wetterseite, Ausbleichungen an der Sonnenseite, Materialabweichungen durch frühere Ergänzungen/Nachbesserungen/Reparaturen oder Markierungen von Handwerksbetrieben darstellen.

#### 5.4.2.5 Ergebnisse der Fundkartierung

Durch die oben genannten Methoden konnte eine Vielzahl der geborgenen Fundstücke der Gebäudestruktur zugeordnet werden.

## 5.5 Analyse, Auswertung

### 5.5.1 Rekonstruktion des Einsturzhergangs

In einer physikalischen Simulation soll der Einsturzhergang, wie auch damals bei der Frauenkirche, nachempfunden werden. Dieses Verfahren ist rein iterativer Natur – das heißt man versucht sich durch verschiedene Parameter so genau wie möglich an die Realität anzunähern. Das bedeutet aber auch, dass es bei fehlenden Daten über den eigentlichen Einsturzhergang ein rein spekulativer Prozess bleibt, der durch ingenieurstechnisches Wissen unterstützt werden muss. Ein automatisches Zurückrechnen aus den erfassten Trümmerteilen ist mit derzeitigem Stand der Technik nicht zielführend.

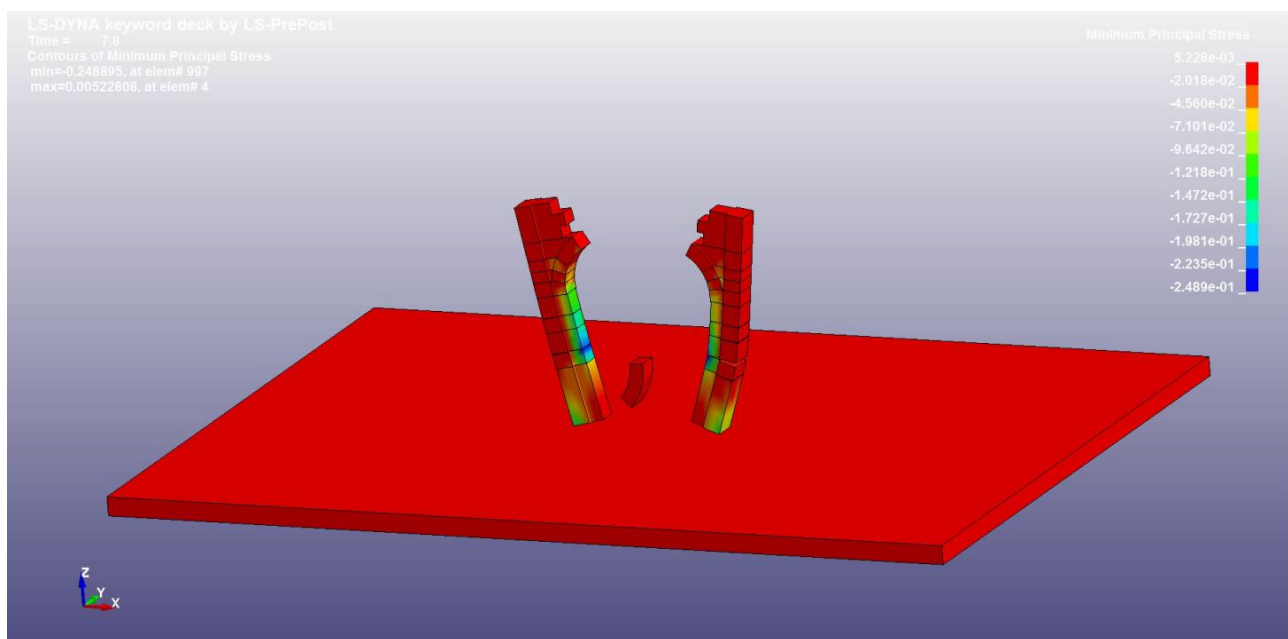


Bild 78 Animation zum Einsturzhergang [11]

### 5.5.2 Erstellung Fundstückzeichnungen

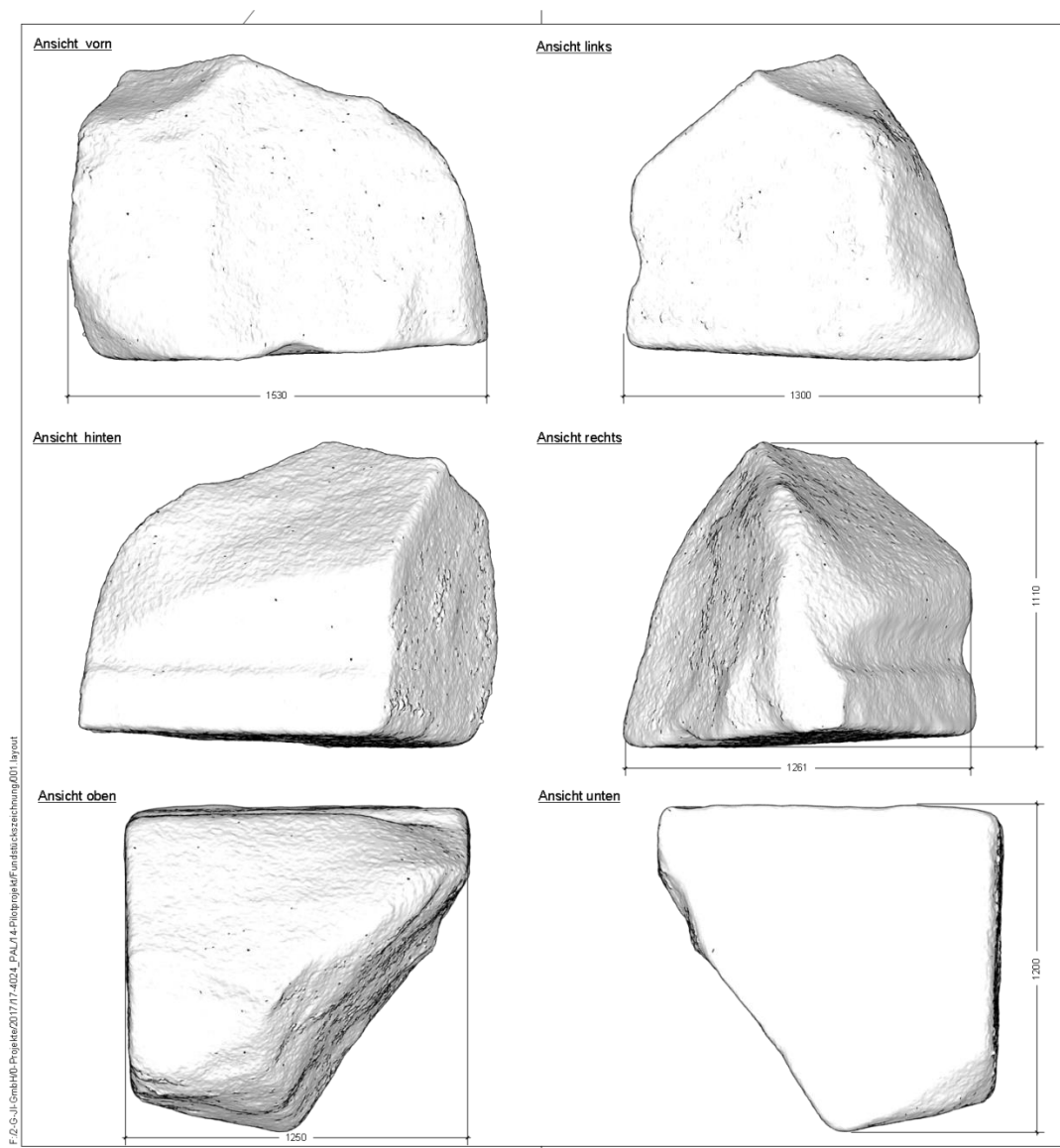
Die zwei (oder mehr) vorhandenen Rohscans im Format \*.dp zum jeweiligen Fundstück werden aus hermine heruntergeladen und im Programm CloudCompare<sup>18</sup> über gemeinsame zu definierende Punkte in den Punktwolken und in einem optimierenden Schritt zusammengefügt. Die dabei erzeugte Punktwolke wird auf eine Punktdichte von 1 mm verringert und im Format \*.e57 gespeichert. Anschließend wird jene Punktwolke zu einem Modell vermascht<sup>19</sup> unter Zuhilfenahme von Poisson Surface Reconstruction<sup>20</sup>, welches im Format \*.ply abgelegt wird. Dateigrößen fertiger Punktwolken und des Modells sind fundstückgrößenabhängig und belaufen sich auf 5-50 MB. Im nächsten Schritt erfolgt das Importieren in das Programm Sketchup, wo sowohl Ausrichtung des Modells als auch Definition der verschiedenen Ansichten und Schnitte stattfindet, um dann

<sup>18</sup> <https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=Introduction>

<sup>19</sup> Meint das Verbinden von Punkten zu Flächen, die in ihrer Gesamtheit eine dreidimensionale Oberfläche ergeben.

<sup>20</sup> Spezielle Art der Vermaschung, bei der die Punkte unter Berücksichtigung ihrer Ausrichtung trianguliert werden.

wiederum im Programm Trimble Layout<sup>21</sup> dem Plan hinzugefügt zu werden. Ansichten und Schnitte können im Plan selbst mit weiteren Informationen wie Kommentaren oder Bemaßung versehen werden. Die Ausgabe der Pläne erfolgte im pdf/a-Standard<sup>22</sup>. Die Dateien aller Zwischenschritte werden ebenfalls durch hermine bereitgestellt, indem sie zu den „Attachments“ des jeweiligen Fundstückes hochgeladen werden. Diese Pläne können gemeinsam mit dem Modell an Restauratoren, Steinmetze oder andere Handwerksbetriebe ausgeliefert werden, um dort eine Rekonstruktion oder Restauration planen und ausführen zu können.



**Bild 79** Planausschnitt einer Fundstückzeichnung [11]

<sup>21</sup> <https://www.sketchup.com/de/products/layout>

<sup>22</sup> Dieses Format dient zur digitalen Langzeitarchivierung von Dokumenten nach ISO-zertifizierten Eigenschaften.

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des „Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung“ gefördert (Az.: SWD-10.08.18.7-17.50). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

### 5.5.3 Wiederaufbauplanung

Ein Ingenieur mit entsprechendem Kenntnisstand bedient sich einer Farbkodierungstabelle wie in 2.3.9, anhand welcher er Fundstücke im 5.4.2 erstellten Modell farblich markiert. Hierbei kommt folgendes Schema zur Anwendung:

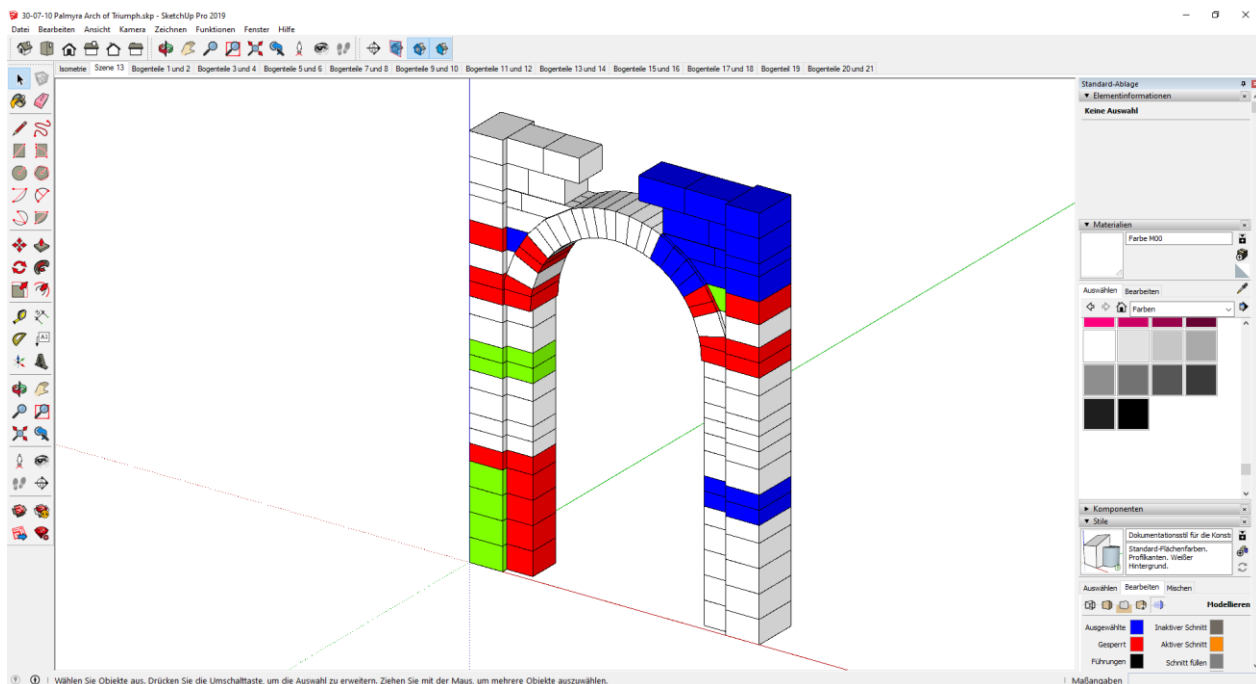
Blau – Fundstücke, die lediglich als Schablonensteine Verwendung finden können

Rot – wiederverwendbare Fundstücke, die ihrer Herkunft in der Fassade nach eindeutig bestimmt sind

Grün –wiederverwendbare Fundstücke, die eindeutig dem abgebildeten Fassadenbereich und einem gleichartigen Bauteil zugeordnet sind

Alle nicht farblich markierten Steine bedürfen einer Neuherstellung, da diese entweder nicht zugeordnet werden konnten oder der Beschädigungsgrad zu hoch war.

Im Pilotprojekt wurde vom Wiederaufbau aus organisatorischen und ökonomischen Gründen abgesehen, es wären aber weitere Schritte notwendig gewesen wie beispielsweise das Erstellen von Werkplänen für alle zu reparierenden oder neu herzustellenden Bauteile; weiterhin eine Auseinandersetzung im Sinne einer Anastylose wie man Ergänzungen des wiederaufgebauten Torbogens vom Originalmaterial absetzt; außerdem bauliche Anpassungen, um die Standsicherheit zu erhöhen oder im ursprünglichen Bauwerk vorhandenen Baumängel zu beseitigen.



**Bild 80 Darstellung der zu Bauteilen zugeordneten Fundstücke im 3D-Modell [11]**

## **6 Zusammenfassung**

Ausgehend von der Syrien-Konferenz im Auswärtigen Amt im Juni 2016 stellte sich heraus, dass eine erhebliche Lücke beim Ablauf einer für die Anastylose vorbereitenden Enttrümmerung klafft. Um diese zu schließen sollte die Prozesskette, welche vom Team Professor Jäger während der Enttrümmerung der Frauenkirche Dresden 1991-94 stattgefunden hat, durch den Einsatz zeitgemäßer Technologien reformiert werden. Die bei den Arbeiten an der Frauenkirche gesammelten Erfahrungen und sich herausstellenden Probleme lieferten aufgrund der hervorragenden Dokumentation des gesamten Vorgangs eine wichtige Grundlage für das Pilotprojekt. Es konnten nicht nur die damals genutzten Dokumente gesichtet, sondern auch die damals beteiligten Mitarbeiter befragt werden.

Das Forschungsprojekt startete mit einer grundlegenden Recherche der sowohl damals verwendeten also auch modernen Methoden und Technologien. Dabei stellte sich heraus, dass die bei der Enttrümmerung der Frauenkirche angewandten Methoden und Arbeitsabläufe noch immer in der heutigen (Bau-)Archäologie Anwendung finden, durch die zur Verfügung stehenden Technologien allerdings besser unterstützt werden. In der weiteren Abfolge wurden sowohl technologiebasierte Methoden als auch Technologien, welche durch Methoden unterstützt werden, konzipiert. Auf Grundlage dieser wechselseitigen Beeinflussung und daraus gezogenen Erkenntnissen fußt die Wahl der Entwicklung einer neuen Arbeitsweise.

Im Bereich der Quellenrecherche wurden die Möglichkeiten um die Nutzung der Internetrecherche erweitert und im World Wide Web verfügbare Ressourcen ausgeschöpft. Die Dokumentationsmöglichkeiten bei Ortsbegehung und Bestandsaufnahme wurden um die Hilfsmittel 3D-Laserscanning, Drohnenfotografie und Satellitenaufnahmen ergänzt. Eine neu hinzugefügte Methode stellt das zeitnahe Aufbauen eines 3D-Modells vor Beginn der Enttrümmerungsarbeiten auf Basis der aus Quellenrecherche und Ortsbegehung gesammelten Daten dar. Weiterhin revolutioniert wurde das Erfassen der Fundsituation und der Fundstücke an sich unter Zuhilfenahme von Drohnen, Laserscannern und Hand(laser)scannern. Die primär herauszustellende Erneuerung stellt die prozessbegleitende Informationssammlung und -verwaltung mit der Software hermine dar. Gegenüber vorherigen Methoden garantiert diese die fortlaufende, lückenlose und parallele Dokumentation aller Arbeitsschritte und nicht nur eine punktuelle Zustandsaufnahme des Ablaufes. Nahezu alle Tätigkeiten können nach kurzer Einweisung der Bearbeiter ausgeführt werden, ohne dass hierfür besondere Fachkenntnisse nötig sind.

Ein nicht unerheblicher Zeitaufwand ergab sich aus der Konzeption der zu erfüllenden Anforderungen und der angestrebten Nutzerfreundlichkeit, um mit hermine ein Werkzeug zu schaffen, welches nicht nur im Rahmen dieses Forschungsprojektes, sondern auch zur Nutzung in realen Szenarien und für jedwede Dokumentation von Enttrümmerungsarbeiten Anwendung finden kann. Um die Nutzbarkeit weiter zu stärken wurde hermine zudem als freie und kostenlose Open Source-Software lizenziert. Dabei wurde ein Lizenzmodell gewählt, unter dem ein sogenanntes Copyleft Anwendung findet, welches zwar nicht davor schützt, dass die App unter anderem Namen vertrieben wird, jedoch garantiert, dass jegliche Änderung am Source Code ebenfalls öffentlich zugänglich gemacht werden muss. Nicht nur die Applikation an sich, sondern auch alle darin verwendeten oder zum Betreiben notwendigen Elemente sind durch Open Source-Lösungen umgesetzt worden. Somit besteht eine vollkommene Unabhängigkeit von Opt-In-Effekten wie sie bei proprietärer Software bedingt sind. Generell erweist sich die Verwendung quelloffener Software in allen Schritten der Enttrümmerung und Dokumentation als möglich. Die Leistungsfähigkeit proprietärer Software war im Nutzungsbereich jedoch höher, was teilweise der Herstellerfähigkeit geschuldet war, Hardware mit eigener Software optimaler bestücken zu können. Die Bearbeitung der Punktwolken kann beispielsweise durchgängig mit CloudCompare oder die

Fundstückaufnahme über photogrammetrische Verfahren und damit durch COLMAP oder VisualSfM abgewickelt werden.

Die Leistungsfähigkeit aller Komponenten wurde in einem praxisnahen Umfeld verifiziert. Das durchgängige Erfassen der Fundsituation und aller Arbeitsschritte in hermine erwies sich als überaus nützlich, da jederzeit Rückschlüsse auf den Arbeitsablauf und aktuellen Stand gezogen werden konnten. Da das Trümmerfeld schichtweise als Punktwolke erfasst wurde, offerierte dies mannigfaltige Möglichkeiten für die spätere Auswertung. Das Erfassen der Fundstücke mittels Handscanner ging reibungslos vonstatten und die im Nachhinein erstellten Modelle erwiesen sich als äußerst hilfreich bei der Rekonstruktion und der Fundkartierung. Jedoch besteht auch hier noch Optimierungspotential, um den Zwischenschritt des Tätigens mehrerer Aufnahmen und das daraus geschuldete Zusammensetzen der Rohscans zu vermeiden. Infrage käme hierfür der Einsatz eines hochschwarzen Materials<sup>23</sup> als Scanhintergrund, da somit das zu scannende Objekt in seiner Gänze und allseitig festgehalten werden kann und dabei keine das Scanobjekt umgebenden Strukturen miterfasst werden.

Wie in 5.3.5.1 erwähnt, kann es jederzeit zu unvorhergesehenen Ereignissen kommen, welche ein flexibles Handeln erfordern – dadurch konnte die Leistungsfähigkeit und Flexibilität der Arbeitsweise im Pilotprojekt unter Beweis gestellt werden. Bis auf von Herstellerseite für die technischen Hilfsmittel vorgegebene Beschränkungen (Wetter, Temperatur) warfen sich keine problematischen Faktoren auf, die eine Enttrümmerung nach Maßgaben der Forschung negativ beeinflusst hätten.

Vorstellbar wäre, dass die bisher manuell erfolgte Verarbeitung aller erfassten Datensätze (Zusammenfügen der Scans, Fundkartierung, 3D-Modellerstellung) unter Zuhilfenahme von ausreichender Rechenkapazität und Künstlicher Intelligenz eine Automatisierung erfahren könnte. Dass der im Pilotprojekt erarbeitete Leitfaden Anklang in internationalen Gremien findet und zum Standardwerk für Enttrümmerung avanciert, wird angestrebt. Wünschenswert ist die Akzeptanz und Fortschreibung von hermine als internationale Datenbank für bereits erfolgte und zukünftig zu erfolgende Enttrümmerungen. Der damit einhergehende Archivgedanke und die Funktion der Applikation als Wissens- und Informationsspeicher bezüglich bedeutender Weltkulturerbestätten unterstreichen den Globalisierungsgedanken.

---

<sup>23</sup> <https://de.wikipedia.org/wiki/Vantablack>



## 7 Literaturverzeichnis

- [1] FOLLOW-UP TO THE IMPLEMENTATION OF THE UNESCO ACTION PLAN FOR THE EMERGENCY SAFEGUARDING OF SYRIA'S CULTURAL HERITAGE INTERNATIONAL EXPERTS MEETING, BERLIN, 2-4 JUNE 2016. Veranstaltet vom Auswärtigen Amt der BRD in Zusammenarbeit mit der UNESCO.
- [2] Jäger, W.: Bericht über die archäologische Enttrümmerung 1993/94. In: Die Dresdner Frauenkirche. Jahrbuch zu ihrer Geschichte und zu ihrem archäologischen Wiederaufbau. Gesellschaft zur Förderung des Wiederaufbaus der Frauenkirche Dresden e.V. (Hrsg.). Verlag Hermann Böhlau. Weimar 1995. S. 11-64.
- [3] Jäger, W.: The Methodology of Archaeological Recovery of the Remains of the Frauenkirche Dresden in 1993/1994. In: Proceedings of the workshop for the Reconstruction of the Cathedral of Noto nad the Dresden Frauenkirche (Seminario internazionale su: Ricorstruendo la cattedrale di Noto e la Frauenkirche di Dresda), Noto 2000. Kapitel 11.
- [4] Jäger, W.: Das Prinzip der archäologischen Enttrümmerung und des archäologischen Wiederaufbaus. In: Die Frauenkirche zu Dresden. Werden, Wirkung, Wiederaufbau. Stiftung Frauenkirche Dresden (Hrsg.). Michael Sandstein Verlag. Dresden 2005. S. 225-243.
- [5] Renfrew, C.; Bahn, P.: Archaeology: Theories, Methods and Practice – Seventh Edition, United Kingdom: Thames & Hudson Ltd., 2016.
- [6] Kirch, S.: Archäoinformatik – Digitale Archäologie. Informationstechnologien und Visualisierungstechniken in der Archäologie. Digital Humanities. Seminararbeit SS 2010. Universität Duisburg-Essen, Angewandte Kognitions- und Medienwissenschaften (Master), Duisburg 2010.
- [7] Rinne, Ch.: Archäoinformatik in der Ausbildung – Vorbereiten statt nachbereiten digitaler Daten. Christian-Albrechts-Universität Kiel, Institut für Ur- und Frühgeschichte. [Online]. [https://www.archaeologie.sachsen.de/download/Rinne\\_AI\\_RoundTable2010.pdf](https://www.archaeologie.sachsen.de/download/Rinne_AI_RoundTable2010.pdf) [Zugriff am 01. Juni 2019].
- [8] „Guide: Methoden/Computeranwendungen @ Archäologie Online“. [Online]. Available: <https://www.archaeologie-online.de/links/85/89/more2.php>. [Zugriff am 01. Februar 2019].
- [9] „Sektion 5: Neue Medien in Denkmalpflege und Archäologie – Berlin.de“. [Online]. Available: <https://www.berlin.de/jahrestagung-landesdenkmalpfleger/programm/dienstag-3-6-14/sektion-5/>. [Zugriff am 02. Februar 2019].
- [10] Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege: Archäologie und Informationssysteme. Vom Umgang mit archäologischen Fachdaten in Denkmalpflege und Forschung. Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen 42. Winghart, S. (Hrsg.). Hameln 2013.
- [11] eigene Darstellung/Archivbild
- [12] „Archäologie“. Wikipedia – Die freie Enzyklopädie. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Arch%C3%A4ologie> [Zugriff am 23. Mai 2019].
- [13] Haupt, K.-W.: Johann Winkelmann – Begründer der klassischen Archäologie und modernen Kunstwissenschaft. Weimarer Verlagsgesellschaft in der Fourier Verlag GmbH. Weimar 2014.
- [14] Barker, P.: Techniques of Archaeological Excavation. Bath Press Ltd., Bath 1998.
- [15] Boekhoff, B.; Kößer, T.: Moderne Informationstechnologien in der Bauarchäologie. Diplomarbeit. Technische Universität Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl für Tragwerksplanung. Dresden 2002.

- [16] „Befund (Archäologie)“. Wikipedia – Die freie Enzyklopädie. [Online]. Available: [https://de.wikipedia.org/wiki/Befund\\_\(Arch%C3%A4ologie\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Befund_(Arch%C3%A4ologie)) [Zugriff am 02. Februar 2019].
- [17] „Verband der Landesarchäologen: Grabungstechnikerhandbuch“ [Online]. Available: <http://www.landesarchaeologen.de/verband/kommissionen/grabungstechnik/grabungstechnikerhandbuch/> [Zugriff am 01. Februar 2019].
- [18] Schlosske, R.: Die zeichnerische Dokumentation. [Online]. Available: [http://www.archaeologie.sachsen.de/download/Die\\_zeichnerische\\_Dokumentation1.pdf](http://www.archaeologie.sachsen.de/download/Die_zeichnerische_Dokumentation1.pdf). [Zugriff am 26. Juni 2019].
- [19] Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.): Vorgaben zur Dokumentation archäologischer Ausgrabungen in Bayern. [Online]. Available: [http://www.blfd.bayern.de/medien/dokuvorgaben\\_august\\_2016.pdf](http://www.blfd.bayern.de/medien/dokuvorgaben_august_2016.pdf). [Zugriff am 23. Mai 2019].
- [20] ICOMOS: International Charter for the Conservation and Restoration of Monuments and Sites (The Venice Charter 1964). [Online]. Available: [https://www.icomos.org/charters/venice\\_e.pdf](https://www.icomos.org/charters/venice_e.pdf). [Zugriff am 23. Mai 2019].
- [21] Jäger, H.-J.; Jäger, W.: Bautechnische Instandsetzungen der Dresdner Frauenkirche in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Teil 2: 1937-42. In: Mauerwerk Kalender 2016. Baustoffe – Sanierung – Eurocode-Praxis. Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin 2016. S. 83-113.
- [22] Rosenkranz, D.: Die archäologische Enttrümmerung der Frauenkirche zu Dresden – Chronik des ersten Schrittes zum Wiederaufbau. Bericht Ingenieurbüro Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger. Radebeul 1994.
- [23] „Download Joomla Components, Delphi Application“. [Online]. Available: <http://www.sportamok.com/development/download-components/delphi/paradox-dbase-setup.exe> [Zugriff am 25. Juni 2019].
- [24] Sateli, B.: Open Paradox db without password | Delphi Programming | FANDOM powered by Wikia. [Online]. Available: [https://delphi.fandom.com/wiki/Open\\_Paradox\\_db\\_without\\_password](https://delphi.fandom.com/wiki/Open_Paradox_db_without_password) [Zugriff am 23. Mai 2019].
- [25] „Elektrooptische Entfernungsmessung“. Wikipedia – Die freie Enzyklopädie. [Online]. Available: [https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrooptische\\_Entfernungsmessung](https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrooptische_Entfernungsmessung). [Zugriff am 11. Februar 2019].
- [26] „FARO Product Info“. [Online]. Available: <https://faro.app.box.com/s/cb0h13r2a1zx77smfpze8scnfb2e6c55/file/341438467217>. [Zugriff am 11. Februar 2019].
- [27] Apel, D.: Messpunkt. [Online]. Available: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Berliner\\_Mittelpunkt.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Berliner_Mittelpunkt.JPG) [Zugriff am 19. Juni 2019].
- [28] „Willkommem im Laserscanning-Europe-Shop“. [Online]. Available: [shop.laserscanning-europe.com](http://shop.laserscanning-europe.com). [Zugriff am 14. August 2018].
- [29] Mike1024: Wikimedia Commons. [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Mike1024> [Zugriff am 19. März 2019].
- [30] „Stadt Wien – Offizielle & aktuelle Infos und Services der Wiener Stadtverwaltung“. [Online]. Available: <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/stadtvermessung/images/als-technologie-kl.jpg> [Zugriff am 11. Februar 2019].

- [31] „FARO Product Info“. [Online]. Available: <https://faro.app.box.com/s/g98sn16ih0nmgp1b0yd8z4uu7bkkudpz/file/314135744862>. [Zugriff am 11. Februar 2019].
- [32] Kraus, K.: Photogrammetrie. Verlag de Gruyter. Berlin 2004.
- [33] Hauser, K.: Vergleich von 3D-Scans und Photogrammetriedaten. [Online]. Available: <http://pille.iwr.uni-heidelberg.de/~hausdorff01/begriffe.html>. [Zugriff am 11. Februar 2019].
- [34] „Digitale Bildkorrelation/DIC (Digital Image Correlation)“. [Online]. Available: <http://www.isi-sys.com>. [Zugriff am 02. Februar 2019].
- [35] „Historian uses lasers to unlock mysteries of Notre Dame Cathedral“. [Online]. Available: <https://www.nationalgeographic.com/news/2015/06/150622-andrew-tallon-notre-dame-cathedral-laser-scan-art-history-medieval-gothic/> [Zugriff am 16. April 2019].
- [36] „3D-Scan mit Windows 10. Scannen mit Kinect. Microsoft Kinect“. [Online]. Available: <https://developer.microsoft.com/de-de/windows/hardware/3d-print/scanning-with-kinect>. [Zugriff am 28. Februar 2019].
- [37] „GNU und die Freie-Software-Bewegung“. [Online]. Available: <https://www.gnu.org/licenses/agpl.txt> [Zugriff am 28. Mai 2019].
- [38] „Bootstrap – The most popular HTML, CSS, and JS library in the world“. [Online]. Available: <https://getbootstrap.com/> [Zugriff am 15. Juli 2019].
- [39] „Web Design and Applications – W3C“. [Online]. Available: <https://www.w3.org/standards/webdesign/>. [Zugriff am 15 Juli 2019].
- [40] „PHP“. Wikipedia – Die freie Enzyklopädie. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/PHP> [Zugriff am 22. Juli 2019].
- [41] „Welcome! – The Apache HTTP Server Project“. [Online]. Available: <https://httpd.apache.org/> [Zugriff am 15. Juli 2019].
- [42] „XAMPP Installers and Downloads for Apache Friends“. [Online]. Available: <https://www.apachefriends.org/de/index.html> [Zugriff am 15. Juli 2019].
- [43] „STL-Schnittstelle“. Wikipedia – Die freie Enzyklopädie. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/STL-Schnittstelle> [Zugriff am 04. Juni 2019].
- [44] „Takht-e Soleyman World Heritage Site (photos)“. [Online]. Available: <https://persiadigest.com/en/news/3147/takht-e-soleyman-world-heritage-site-photos> [Zugriff am 10. Juni 2019].
- [45] „Palmyra vor und nach dem Krieg – Easyvoyage“. [Online]. Available: <https://www.easyvoyage.de/aktuell/palmyra-68619> [Zugriff am 30. Juli 2019].
- [46] Erler, M.: Textile Bewehrung in der Lagerfuge von gemauerten Kellerwänden zur Erhöhung der Tragfähigkeit gegen Erddruck. Technische Universität Dresden, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Dresden 2018.