

# GRAB Y

Florian Sövegjarto | 2023

**Augmentierte Präsentation historischer Architektur  
am Beispiel des Grabes von Meret Neith in Abydos.**

**„Ein König ohne Königin ist undenkbar.“**

Flinders Petrie



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



## DIPLOMARBEIT

### **Augmentierte Präsentation historischer Architektur am Beispiel des Grabes von Meret Neith in Abydos.**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung

**Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Ferschin**

E259.1

Digitale Architektur und Raumplanung, Institut für Architekturwissenschaften

von

**Florian Sövegjarto**

00627844

Wien, am 30.05.2023

florian@sovegjarto.at



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Kurzfassung

Die Vermittlung von historischer Architektur war bis vor wenigen Jahren auf zweidimensionale Dokumente wie Schriften, Plandarstellungen, Fotografien und Filmaufnahmen beziehungsweise einfache Modelle beschränkt. Vor allem Relikte, die aufgrund ihrer Beschaffenheit nicht mehr zugänglich sind, stellen die archäologische Forschung vor die Herausforderung, das Wissen zu konservieren und zu vermitteln.

Das Ziel dieser Arbeit ist, Möglichkeiten der Vermittlung der Architekturgeschichte anhand neuer Technologien und digitaler Darstellungsmethoden zu entwickeln, um die Ergebnisse und Erkenntnisse der Forschungsarbeiten für den Laien verständlicher und besser nachvollziehbar zu gestalten. Seit die computerunterstützte Darstellung eine neue Methodik der Erzählung beziehungsweise Erläuterung ermöglicht, können historische Bauwerke verständlicher präsentiert werden.

Einleitend wird die Methodik der digitalen Erstellung eines dreidimensionalen Modelles von der Datenaufnahme, der Bearbeitung und der Berechnung mittels Fotogrammetrie erläutert. Durch eine korrekte Skalierung, Farbdarstellung und Texturierung liefert diese Methodik ein digitales Abbild des Gegenstands oder Gebäudes. Dieses 3D-Modell kann sowohl in CAD-Programmen zur weiteren Plandarstellung weiterverwendet werden, in neuartigen Darstellungsanwendungen wie Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) und Mixed Reality (MR) implementiert werden oder auch zur Erstellung eines haptischen Modells herangezogen werden. Die Kombination von digitalen Inhalten mittels Mixed Reality und realen Objekten ermöglicht die Umsetzung von zeigemäßen, spannenden und eindrucksvollen Präsentationsmethoden.

Zur Umsetzung des vorangegangenen theoretischen Teils dient eine Ausgrabungskampagne eines alten ägyptischen Grabes mit der Bezeichnung Grab Y in Abydos, das der Königin Meret Neith zugeschrieben wird, welches fotogrammetrisch aufgenommen und digitalisiert wurde.

Schlagwörter:

Fotogrammetrie, 3D Druck, Mixed Reality, Präsentationsmethodik



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Abstract

The representation of historical architecture was limited until a few years ago to two-dimensional documents such as writings, plan drawings, photographs, and film recordings, as well as simple models. Especially relics that are no longer accessible due to their condition present a challenge for archaeological research to preserve and convey knowledge.

The goal of this work is to develop possibilities for conveying architectural history using new technologies and digital representation methods in order to make the results and findings of research more understandable and comprehensible to the layperson. Since computer-assisted representation allows for a new methodology of storytelling or explanation, historical buildings can be presented in a more comprehensible way.

Initially, the methodology of digitally creating a three-dimensional model is explained, including data acquisition, processing, and calculation using photogrammetry. Through correct scaling, color representation, and texturing, this methodology provides a digital copy of the object or building. This 3D model can be further used in CAD programs for plan representation, implemented in novel visualization applications such as virtual reality (VR), augmented reality (AR), and mixed reality (MR), or used to create a haptic model. The combination of digital content through mixed reality and real objects enables the implementation of demonstrative, exciting, and impressive presentation methods.

To implement the preceding theoretical part, an excavation campaign of an ancient Egyptian tomb, known as Tomb Y in Abydos, attributed to the queen named Meret Neith, was used as an example. It was recorded and digitized using photogrammetry.

keywords:

photogrammetrie, 3D print, mixed reality, presentation methodology





Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Erklärung zur geschlechterneutralen Formulierung

Aufgrund der einfacheren Lesbarkeit wird gegebenenfalls auf eine geschlechterneutrale Differenzierung verzichtet.  
Unabhängig von der inhaltlichen Gestaltung sei vorausgesetzt, dass beide Geschlechter selbstverständlich als gleichwertig erachtet werden.



Abb.1: Wüstenrand entlang Abydos, Ägypten

## Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>12</b>
<b>Fotogrammetrie in der Architektur</b>	<b>14</b>
Fotogrammetrie.....	16
Funktionsgrundlage .....	17
Arbeitsablauf.....	19
Belichtungsmanagement.....	20
Farbmanagement .....	21
Messskalen .....	22
Marker (coded target).....	23
Anwendung der Fotogrammetrie in der Architektur .....	26
Anwendung der Fotogrammetrie in der Archäologie.....	28
<b>Augmented Reality in der Architektur</b>	<b>30</b>
Augmented Reality (AR).....	32
Augmented Reality in der Architektur .....	34
Augmented Reality in der Bauphase .....	37
<b>Digitale Fertigung   3D-Druck</b>	<b>38</b>
3D-Druck - Theorie und Funktionsweise .....	40
Datenaufbereitung.....	42
3D-Druck Software.....	43
SLA-Druck in der Architektur .....	44
<b>Digitales Museum</b>	<b>46</b>
Digitales Museum.....	48
Auswirkungen auf die Museumsbesucher .....	49

Audioguides .....	50
Interaktive Touchscreens .....	51
Digitale Projektionen .....	52
Digitale & interaktive VR-Projektionen.....	54
Virtual Reality (VR) .....	57
Anwendung von Augmented Reality in Museen .....	58

## **Pilgerstätte Abydos 62**

Abydos .....	65
Tempel Sethos I und Osireion .....	66
Die Königsgräber in Umm el-Qaab.....	70

## **Meret Neith | Grab Y 72**

Digitalisierung des Grabes von Meret Neith .....	76
Digitalisierungsteam der TU Wien.....	79
Fotogrammetrische Datenaufnahme .....	80
YKK-1   Kammer eins .....	88
YKK-2   Kammer zwei.....	90
YKK-3   Kammer drei.....	92
YKK-4   Kammer vier .....	94
YKK-5   Kammer fünf .....	96
YKK-6   Kammer sechs .....	98
YKK-7   Kammer sieben .....	100
YKK-8   Kammer acht.....	102
YKK   Hauptkammer .....	104
Planliche Darstellung des Grabes Y .....	106

## **Modellbau 3D-Druck 114**

Vergleich FDM-Druck und SLA-Druck .....	117
FDM-Druck   Testdrucke .....	119
FDM Dual Extruder Druck   Testdrucke .....	120
Datenaufbereitung ChituBox Pro .....	126
Testdrucke.....	131
Fehldrucke und deren Ursachen .....	132
Präsentationssockel.....	134

## **Mobile Applikation 140**

Echtzeit Render Programme .....	142
Unity .....	144
Vuforia .....	148
Model Target Generator .....	148

## **Conclusio 162**

## **Quellenverzeichnisse 168**

Literaturverzeichnis .....	170
Onlinequellen .....	173
Abbildungsverzeichnis.....	174
Programmquellen .....	187
Museums Applikation Quellen .....	187

## **Beilage Grabungstagebuch 188**

## Einleitung

Die fortschreitende Digitalisierung stellt eine revolutionäre Ära für die Dokumentation, die Erhaltung und Präsentation unseres kulturellen Erbes dar. Archäologische Stätten, Zeugnisse vergangener Zivilisationen und Kulturen sind von unschätzbarem Wert für unser Verständnis der menschlichen Geschichte. Doch diese wertvollen, geschichtlichen Zeitdokumente sind oft bedroht durch natürliche Verwitterung, menschliche Interventionen und andere unvermeidbare Umstände. In diesem Kontext nimmt die Bedeutung der Digitalisierung und somit einer nachhaltigen digitalen Konservierung von Kulturgütern stetig zu und eröffnet völlig neue Perspektiven und Möglichkeiten zur Erforschung und Präsentation dieser wichtigen Zeugnisse unserer Geschichte.

Eine der großen Herausforderungen in der Archäologie ist der dauerhafte Erhalt von und die Zugänglichkeit zu Stätten. Viele Fundorte, die Einblicke in längst vergangene Zivilisationen gewähren, sind durch Witterungseinflüsse wie Regen und Hitze, aber auch durch Kriege oder Vandalismus wie Plünderungen stark gefährdet. Um diese wertvollen Kulturgüter zu schützen, werden diese häufig nach wissenschaftlichen Untersuchungen wieder zugeschüttet. Dies schützt die Stätten zwar vor weiterer Zerstörung, macht sie aber gleichzeitig für zukünftige Forschungen und Besichtigungen unzugänglich.

In diesem Kontext bietet die Digitalisierung eine vielversprechende Lösung. Sie ermöglicht es, detaillierte und dauerhafte digi-

tales Abbilder von archäologischen Stätten und Artefakten zu erstellen, die für zukünftige Forschungen und Präsentationen zur Verfügung stehen, unabhängig von den physischen Bedingungen der Originale. Mit Hilfe moderner Technologien wie 3D-Scanning und Fotogrammetrie können archäologische Funde und Ausgrabungsstätten in hoher Auflösung und mit großer Detailgenauigkeit digital erfasst und reproduziert werden. Diese digitalen Abbilder eröffnen neue Möglichkeiten der Analyse und Darstellung, die mit den physischen Objekten selbst nicht und nur erschwert möglich wären.

Darüber hinaus eröffnen Technologien wie Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) völlig neue Möglichkeiten für die Präsentation und Vermittlung von Kulturgütern. Sie ermöglichen immersive Erfahrungen, die den Betrachter auf eine Weise in die Welt der Archäologie eintauchen lassen, die mit traditionellen Methoden nicht umsetzbar ist. Dies ermöglicht eine tiefere Auseinandersetzung mit dem kulturellen Erbe und fördert ein besseres Verständnis und eine stärkere Wertschätzung für unsere gemeinsame Geschichte.

Ein eindrucksvolles Beispiel für die Möglichkeiten der Digitalisierung in der Archäologie ist die Rekonstruktion des Grabes der Königin Meresankh III. [Giza Project-Abteilung, 2019]. in Ägypten. Das Grab, eine wichtige archäologische Stätte aus dem Alten Reich, wurde mit Hilfe von 3D-Scanning und Fotogrammetrie

vollständig digital erfasst. Die auf diese Weise erstellte digitale Kopie ermöglicht es Forschern und Besuchern, das Grab in all seinen Details zu erkunden, auch wenn sie physisch nicht vor Ort sein können. Zudem bietet die digitale Präsentation die Möglichkeit, zusätzliche Informationen und Kontexte zu integrieren, die ein tieferes Verständnis der archäologischen Stätte ermöglichen.

Die vorliegende Masterarbeit hat das Ziel, die Herausforderungen und Möglichkeiten, die die Digitalisierung und die technologischen Fortschritte im Bereich der Kulturgutvermittlung mit sich bringen, zu untersuchen und zu diskutieren. Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt daher auf der Untersuchung und Bewertung moderner Technologien und deren Anwendungsmöglichkeiten im Kontext der Kulturgütervermittlung. Insbesondere wird die Anwendung der Fotogrammetrie als Methode zur Erstellung von Daten und die Nutzung von Augmented Reality (AR) zur Visualisierung und Vermittlung von archäologischen Stätten in den Mittelpunkt gestellt. Die Fotogrammetrie bietet das Potenzial, realistische, dreidimensionale Modelle von Kulturgütern zu erstellen, die dann in virtuellen Umgebungen präsentiert werden können. AR wiederum ermöglicht es, diese Modelle in die reale Welt einzubinden und so ein immersives Erlebnis zu schaffen, das die Vermittlung von Kulturerbe maßgeblich unterstützt.

Der zentrale Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Beitrag zur nachhaltiger Wissensvermittlung im digitalen Zeitalter. In einer Zeit, in der die Digitalisierung zunehmend in alle Bereiche unseres Lebens vordringt, bietet die Anwendung moderner Technologien im Bereich der Kulturgutvermittlung eine Reihe von Möglichkeiten, um Wissen und Verständnis über unser kulturelles Erbe auf innovative und nachhaltige Weise zu fördern.

Zudem wird diese Arbeit neue Wege aufzeigen, wie unser Kulturgut erhalten und präsentiert werden kann. Mit der Anwendung moderner Technologien können wir nicht nur traditionelle Methoden der Darstellung und Vermittlung von Kulturgütern ergänzen, sondern auch neue, innovative Ansätze entwickeln, die das Interesse und das Engagement des Publikums wecken und so zu einem besseren Verständnis und einer erhöhten Wertschätzung unseres kulturellen Erbes beitragen.

Die in dieser Arbeit diskutierten Technologien und Methoden werden konkret anhand einer Fallstudie dargestellt. Die Ausgrabungen am Grab der Königin Meret Neith in Abydos, Ägypten, dienen als praktisches Beispiel, um die Anwendung und den Nutzen von Fotogrammetrie und AR im Kontext der archäologischen Forschung und Vermittlung zu demonstrieren. Dieses Beispiel veranschaulicht, wie die Digitalisierung und der Einsatz moderner Technologien neue Perspektiven und Möglichkeiten für die Erforschung und Vermittlung des kulturellen Erbes eröffnen können.

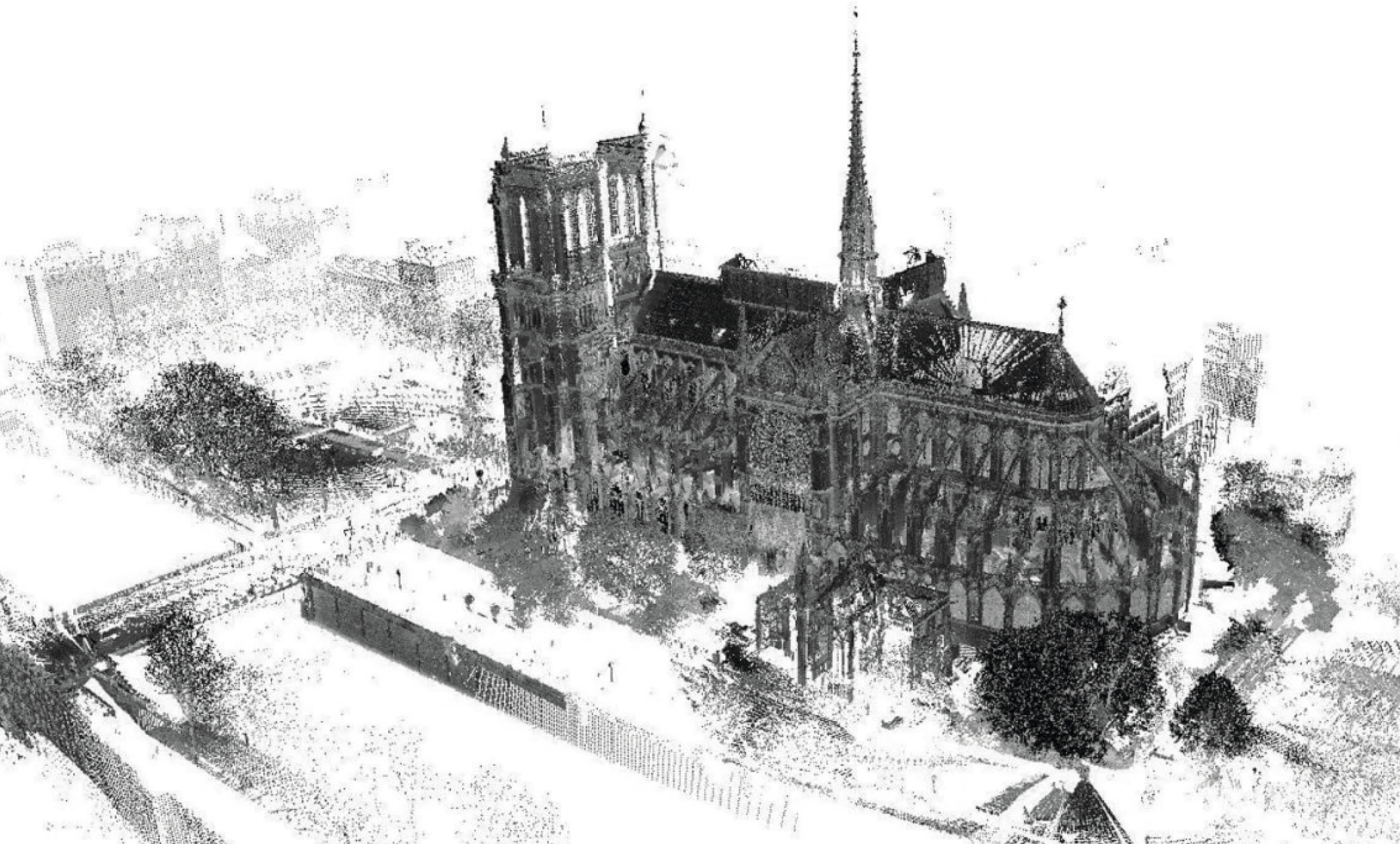


Abb.2: Punktwolke für den Wiederaufbau der Notre Dame, Paris



# FOTOGRAMMETRIE IN DER **ARCHITEKTUR**



## Fotogrammetrie

Die Geschichte der Photogrammetrie begann im 19. Jahrhundert, als zum ersten Mal die Möglichkeiten der Fotografie genutzt wurden, um Messungen durchzuführen und präzise Karten zu erstellen. Der Begriff Fotogrammetrie wurde erstmals vom französischen Ingenieur Aimé Laussedat im Jahr 1867 verwendet. Laussedat gilt auch als Gründer der Fotogrammetrie, weil er sich frühzeitig mit der Verwendung von Fotografien zur Erstellung von topografischen Karten befasste [Kraus, 1994].

Die Bezeichnung Fotogrammetrie (engl. photogrammetry) stammt aus dem Griechischen und ist eine Zusammensetzung aus drei Wörtern: „photos“ (Licht), „gramma“ (geschrieben) und „metron“ (messen). Wörtlich übersetzt bedeutet Fotogrammetrie also „das Messen mit Licht“ [Luhman et al., 2013].

Die Fotogrammetrie wurde besonders wichtig für geologische und topografische Untersuchungen und in der Kartografie. Insbesondere bei der Erstellung von Karten unzugänglicher Gebiete erwies sie sich als besonders nützlich. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelte sich die Fotogrammetrie weiter durch die Nutzung der Luftbildfotografie während des Ersten und Zweiten Weltkriegs. Flugzeuge wurden eingesetzt, um detaillierte Aufnahmen von feindlichem Territorium zu machen, die dann analysiert und zur Erstellung von Karten und zur Planung von Operationen verwendet wurden [Schenk, 2005].

Die Entwicklung der digitalen Technologie in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts und Anfang des 21. Jahrhunderts hat die Fotogrammetrie erheblich erweitert und verbessert. Mit dem Beginn der Digitalfotografie und speziellen Computerprogrammen wurde die Fotogrammetrie immer genauer und zugänglicher [Luhmann et al., 2013]. Heutzutage wird sie in einer Vielzahl von Bereichen eingesetzt, von der Archäologie und Denkmalpflege, der Architektur bis hin zur Erstellung von 3D-Modellen für Computerspiele und Filme [Remondino et al., 2014]. Dank der jüngsten Entwicklungen in der Drohnentechnologie konnte das Potential der Fotogrammetrie durch die Vereinfachung der Luftbilddaufnahmen erweitert werden.

Eine grundlegende Kenntnis in Mathematik, Geometrie und Fotografie ist unumgänglich für die praktische Umsetzung der Fotogrammetrie. Mittlerweile ist die Verarbeitung und Interpretation der gesammelten Daten durch benutzerfreundliche Programme automatisiert. Die weiteren Abschnitte behandeln den Gebrauch und die Funktionsvielfalt der Fotogrammetrie, verzichten jedoch auf eine detaillierte Erklärung der angewandten mathematischen und geometrischen Prozesse. Weitere Einblicke in die Thematik der Fotogrammetrie und deren Grundlagen bietet die Literatur „Photogrammetrie Band 1, Grundlagen und Standardverfahren“ von Karl Kraus [Kraus, 1994].

## Funktionsgrundlage

Das menschliche Auge besitzt die Fähigkeit, Informationen über die Tiefe aus stereoskopisch erfassten Bildern zu extrahieren und zu interpretieren. Dabei wird das beobachtete Element auf der Netzhaut mit einer festgelegten Differenz dargestellt, die dann im Gehirn mittels Triangulation verarbeitet wird. Darüber hinaus ist es möglich, auch mit nur einem Auge Raum und Tiefe zu erfassen. Hierbei nutzt das Auge verschiedene Hilfsmittel wie die Verlagerung des Fokus, Reflexionen und Schatten sowie die relative Größe von Objekten, deren Dimensionen uns bekannt sind. Diese Hilfsmittel ermöglichen es uns, räumliche Tiefe und Abmessungen zu bewerten und einzuschätzen, selbst wenn nur eine einäugige Sicht verfügbar ist [Torres et al., 2012].

In der Fotogrammetrie wird ein ähnlicher Ansatz verfolgt, jedoch mit Hilfe von Kameras und speziellen Algorithmen. Die Idee besteht darin, ein Objekt mit einer Vielzahl von Bildern aus unterschiedlichen Perspektiven zu erfassen. Dabei ist es wichtig, dass der sogenannte „Schnittwinkel“, also der Winkel zwischen den Sichtlinien von zwei verschiedenen Aufnahmepunkten, die denselben Punkt im Raum erfassen, ausreichend groß ist [Jagemann, 2015]. Fotogrammetrische Algorithmen identifizieren auffällige Punkte in den Bildern und erstellen Verknüpfungen zwischen diesen Punkten über mehrere Bilder hinweg. Je mehr Abbildungen und je mehr markante Punkte, desto besser kann die Software das dreidimensionale Modell des Objekts erstellen.

Die Auflösung der Fotografien spielt hierbei eine entscheidende Rolle für die Rekonstruktion der Kamerapositionen. Bei zu niedriger Auflösung ist eine Rekonstruktion von Objekten zwar möglich, allerdings mit geringerer Detailgenauigkeit. Um die Erkennung von markanten Punkten in den Bildern zu verbessern, sollte eine möglichst hohe Tiefenschärfe eingestellt werden. Zudem sollte, wenn möglich, ein niedriger ISO-Wert eingestellt werden. Der ISO-Wert bestimmt die Lichtempfindlichkeit des Kamerasensors und eine zu hohe Einstellung kann zur Bildung von Artefakten führen, insbesondere in dunklen Bildbereichen kann bei einem zu hohen ISO-Wert ein Bildrauschen entstehen, was die Qualität der resultierenden Punktwolke erheblich beeinträchtigen kann. Je nach Beleuchtungsverhältnissen kann ein niedriger ISO-Wert jedoch notwendig sein [Jagemann, 2015].

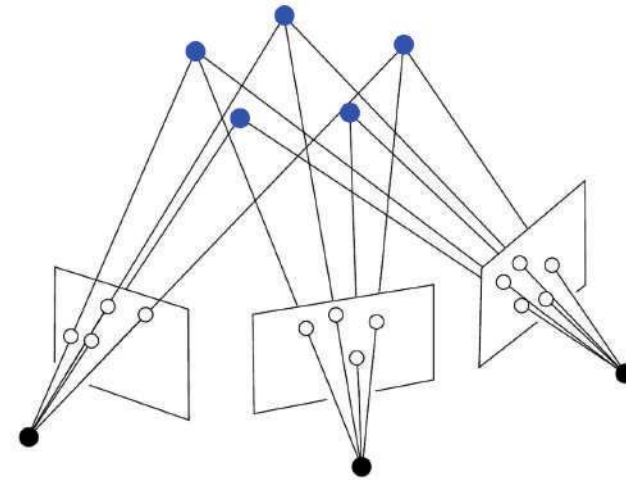


Abb.3: Darstellung der Sichtlinien von Punkten aus drei Perspektiven

Die Fotogrammetrie erfordert präzise Techniken und Strategien, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

Beim Fotografieren von **Fassaden** und großen Flächen ist es von entscheidender Bedeutung, die Kameraposition so zu wählen, dass das Objektiv orthogonal (rechtwinkelig) zur Fassade ausgerichtet ist. Bei der Veränderung des Bildausschnitts ist es zwingend erforderlich, eine ausreichende Bildüberlappung von 60% bis 80% zu gewährleisten. Es gilt zu beachten, dass eine Veränderung der Blickrichtung auf das Objekt von einer einzigen Position aus nicht ausreichend ist, um eine qualitativ hochwertige fotogrammetrische Berechnung zu ermöglichen.

Für die Aufnahme von **Objekten** ist es ratsam, eine Kameraposition zu wählen, die das gesamte Objekt umkreist und dabei orthogonal zum Zentrum des Objekts ausgerichtet ist. Die Bildqualität und die fotogrammetrische Auswertung werden verbessert, je geringer die Winkelverschiebung zwischen den aufeinanderfolgenden Kamerapositionen ist. Bei einigen Objekten kann es notwendig sein, die Position des Objekts mehrfach zu ändern, um beispielsweise die Unterseite aufzunehmen.

Die Aufnahme von **Räumen** erfordert eine systematische Vorgehensweise. Es ist empfehlenswert, Räume stets von der am weitesten entfernten Seite zur gegenüberliegenden Seite zu fotografieren, um die maximalen Bildinformationen und größtmögliche Überlappung sicherzustellen. Die Kamera sollte orthogonal zur Wand ausgerichtet sein. In den Ecken des jeweiligen Raums sollte eine kreisförmige Abwicklung des Raumverlaufs aufgenommen werden, um eine genaue Modellierung des Raums zu gewährleisten.<sup>1</sup>

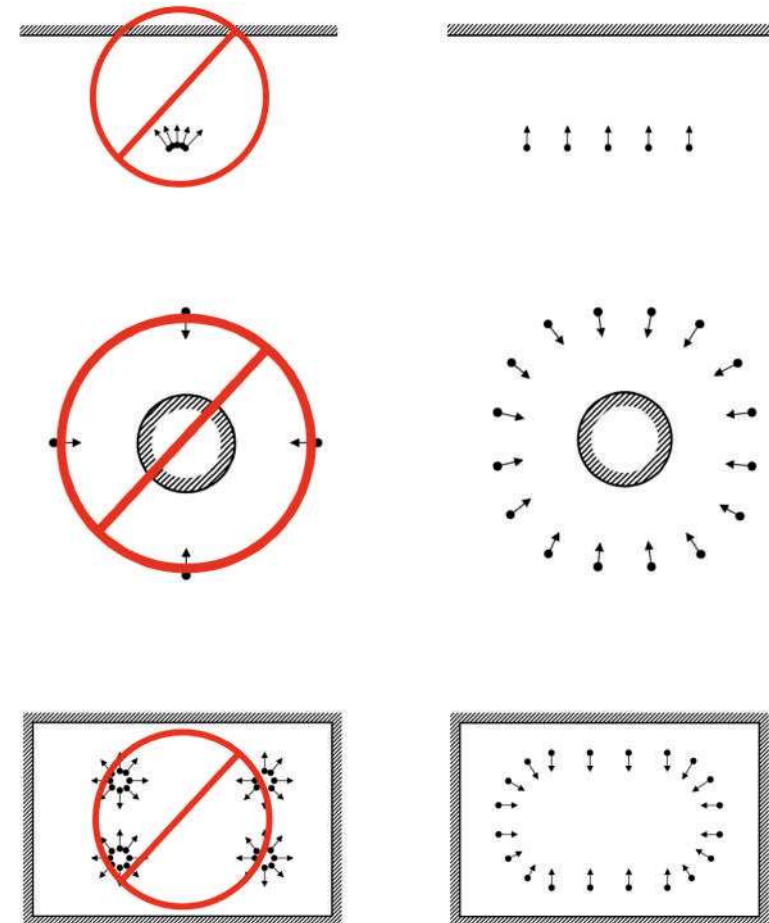


Abb.4: Nützliche Tipps zur richtigen Datenerfassung bei der Fotogrammetrie

# Arbeitsablauf

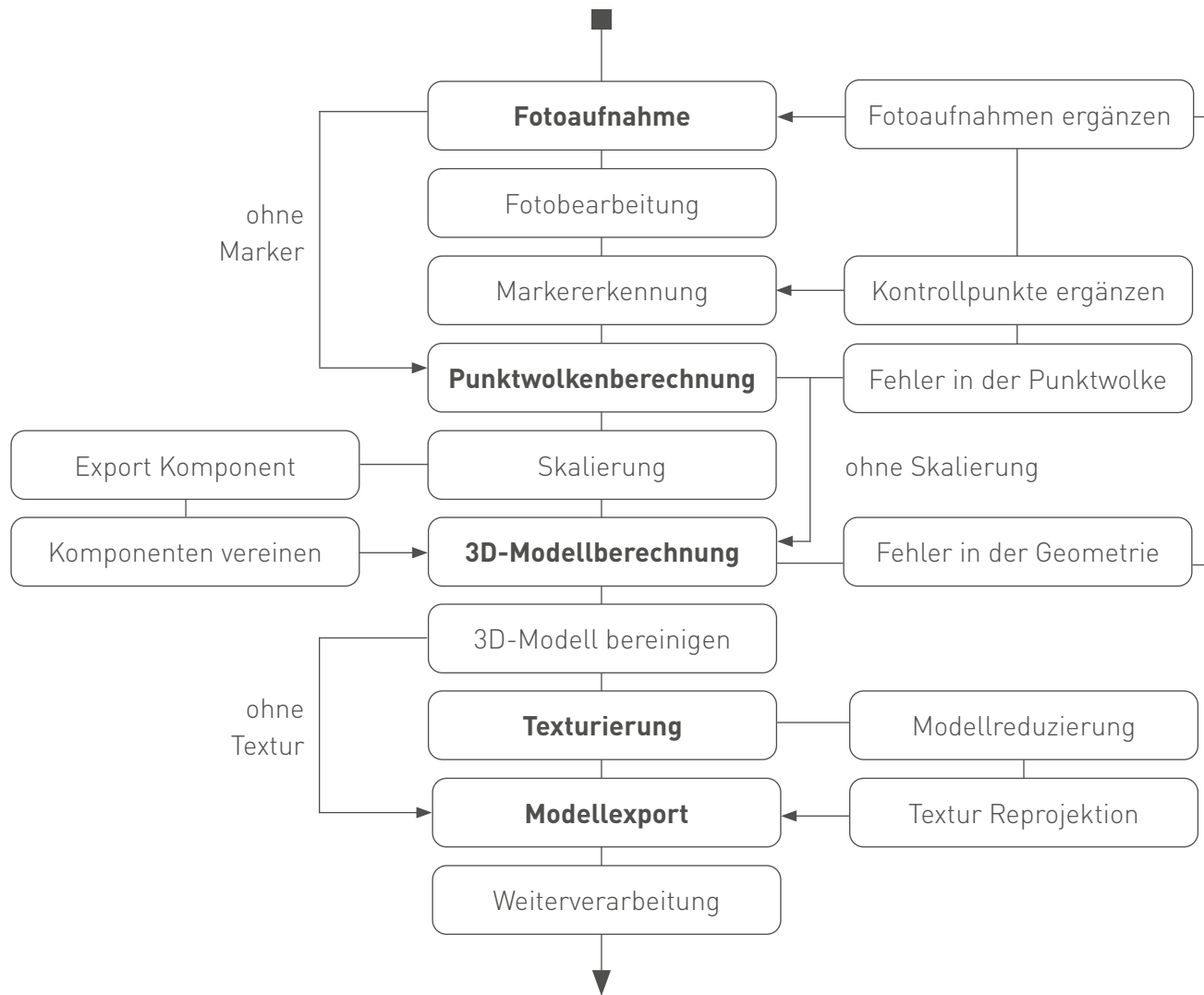


Abb.5: Darstellung des Arbeitsablaufs einer fotogrammetrischen Berechnung

## Belichtungsmanagement

Ein wichtiger Aspekt der Belichtung in der Fotogrammetrie ist die Gleichmäßigkeit bei der Erstellung von fotogrammetrischen Modellen. Wenn die Belichtung zwischen den Aufnahmen variiert, kann dies zu Farbabweichungen führen, die die Genauigkeit der Modelle beeinträchtigen können. Um dies zu vermeiden, sollten alle Aufnahmen mit der gleichen Belichtungssituation angefertigt werden. Störende Parameter wie Schatten und Spiegelungen bringen nicht nur unschöne Ergebnisse in der Textur, sondern führen auch oft zu falsch berechneten Geometrien im 3D-Objekt. Deshalb ist darauf zu achten, dass kein direktes Einzellicht (z.B. die Sonne) zur Zeit der Aufnahme das Objekt belichtet und harte Schatten erzeugt. Im Freien liefert das diffuse Licht an einem bewölkten Tag die besten Voraussetzungen für eine Aufnahme ohne direkten Schattenwurf [Kövé, 2019]. In Regionen mit wenig Bewölkungsgrad ist es daher notwendig, die zu fotografierenden Bereiche manuell abzuschatten (z.B. mittels Sonnensegel) oder in der Nacht mit Kunstlicht auszuleuchten.

Bei der Aufnahme von Innenräumen oder kleineren Objekten in einem Fotostudio ist auf eine ausreichende, gleichmäßige Belichtung zu achten. Bei Objekten kann dies zum Beispiel eine speziell für Fotografie konzipierte Lichtbox sein, deren künstlich angestrahlte Seitenteile das Licht gleichmäßig auf das Objekt werfen. Durch zusätzliche Polarisationsfilter vor dem Objektiv oder den Lichtquellen, können hierbei Spiegelungen auf der Oberfläche des Objektes rausgefiltert werden [Jagemann, 2015].



Abb.6: Fotobox mit Kunstlicht zur fotogrammetrischen Aufnahme



Abb.7: Reduzierung der Spiegelung durch Polarisationsfilter

## Farbmanagement

Wie beim menschlichen Sehen, nimmt der Sensor einer Kamera die Reflexion des Lichtes auf verschiedenen Materialien und Oberflächenbeschaffenheiten auf. Glatte und helle Objekte reflektieren das Licht mehr als matte und dunkle. Das reflektierte Licht liefert hierbei auch Informationen der eigenen Lichtfarbe mit, das je nach Lichtquelle unterschiedlich sein kann. Zum Beispiel wird bei einem Sonnenuntergang das kurzwellige blaue Licht im Farbspektrum von der Atmosphäre zerstreut, sodass hauptsächlich mehr rötliches Licht ins Auge kommt [Ashe, 2014]. Um diese unterschiedlichen Faktoren der reflektierten Lichtfarbe der Objekte zu korrigieren, muss bei der Aufnahme eine Referenzfarbe mit aufgenommen werden. In der Fotografie werden üblicherweise geeichte Colorchecker verwendet.

Ein Colorchecker besteht aus einer Vielzahl kleiner farbiger Farbflächen und Graustufen, die derselben Lichtsituation wie das Objekt ausgesetzt sind. Die Verwendung eines ColorCheckers ermöglicht es, die Farbgenauigkeit und -konsistenz der Fotografien zu überprüfen und zu verbessern. Dies ist besonders nützlich bei der Verwendung von professionellen Kameras, die eine hohe Farbgenauigkeit erfordern. Der Colorchecker ermöglicht auch, die Farbtemperatur und die Belichtungszeit zu korrigieren. Bei der Fotogrammetrie wird zu Beginn der color checker vor das Objekt gehalten und eine Referenzaufnahme erstellt [Liedtke; 2019]. Hierbei ist zu beachten, dass sämtliche Kameraeinstellungen wie Blende und Verschlusszeit die gesamte Zeit der weiteren foto-

grammetrischen Aufnahme unverändert bleiben, da ansonsten eine spätere Farbkorrektur nicht mehr möglich ist. Sollten sich die Lichtverhältnisse bei einer längeren Aufnahme verändern, ist es erforderlich, mehrmals den Colorchecker abzulichten. Nach der Aufnahme wird die Fotografie mit einer speziellen Software verarbeitet, die die Farben der Farbfelder erkennt und die Farbwerte der Farben in der Fotografie mit den Referenzwerten des Colorcheckers vergleicht und ein Farbprofil für die korrekte Farbdarstellung der Aufnahmen erstellt.



Abb.8: Colorchecker Passport 2 der Firma X Rite

## Messskalen

In der Fotogrammetrie wird die Genauigkeit der Messungen durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Zur Gewährleistung einer möglichst genauen und präzisen Vermessung von Objekten in der Punktwolke ist es notwendig, die Größenverhältnisse der Objekte im Bild zu kennen. Hierbei werden Messskalen als Referenzobjekte eingesetzt. Eine Messskala ist ein Objekt mit bekannten Abmessungen, das in den Aufnahmen platziert wird und als spätere Referenzgröße zur Skalierung dient.

Es gibt verschiedene Arten von Skalen, die in der Fotogrammetrie verwendet werden können. Dazu gehören beispielsweise speziell angefertigte Latten mit präzisen Markierungen oder auch einfachere Objekte mit bekannten Abmessungen wie etwa ein Lineal. Die Auswahl der Skala hängt von den Anforderungen der Anwendung und der Genauigkeit der Messungen ab. Desweiteren können auch Marker, sogenannte coded target, zur Skalierung verwendet werden. Durch das Messen der Abstände der Marker, zum Beispiel mit einem Maßband oder einem Distanzmessgerät, ist es nach der Aufnahme möglich, eine korrekte Skalierung in der Software durchzuführen. Eine Messskala kann in der Fotogrammetrie auch verwendet werden, um den Einfluss der Linsenverzerrung zu minimieren. Durch die Platzierung der Messskala in verschiedenen Positionen im Bild können die Parameter der Linsenverzerrung ermittelt und korrigiert werden [Luhmann et al., 2020].



Abb.9: Messskalen zur korrekten Skalierung des Objekts



Abb.10: Coded target auf einer Stange mit fixem Abstand, Abydos

## Marker (coded target)

In komplexen und detailarmen fotogrammetrischen Szenen kann es vorkommen, dass die Punktwolke nicht korrekt oder in mehreren Teilen (Komponenten) berechnet wird. Zur Verbesserung der Bildausrichtung in der Fotogrammetrie Software können manuell zusätzliche Details in Form von Farbstrichen oder Farbsprays hinzugefügt werden, insbesondere, wenn die exakte Textur des Objekts nicht erforderlich ist und die Geometrie ausreichend für die Aufnahme ist.

In der Denkmalpflege und Archäologie spielt die korrekte Darstellung der Textur eine wichtige wissenschaftliche Rolle. Die Verwendung von automatischen Kontrollpunkten (automatic tie points, ATPs) mittels spezieller Marker die bei der Aufnahme mit abgelichtet werden, kann eine effizientere Berechnung der Punktwolke ermöglichen.

Gängige Fotogrammetrieprogramme wie Reality Capture [Reality Capture, 2023] oder Metashape [Metashape, 2023] ermöglichen die Erstellung und Exportierung solcher Marker. Die Marker werden durch den Kontrast von weißen und schwarzen Flächen auf den Fotoaufnahmen automatisch als Kontrollpunkte erkannt und in den Prozess zur Berechnung der Punktwolke integriert. Die beiden am häufigsten verwendeten Markerfamilien sind kreisförmige (circular) und quadratische (square) Marker.

Um zu vermeiden, dass beim Erkennen von Markern fehlerhafte Kontrollpunkte erzeugt werden, ist es von wesentlicher Bedeutung, dass die Marker eindeutig und unverwechselbar sind um . Im Speziellen soll hier die Markerfamilie „(square) AprilTag“

näher erläutert werden, da ihr komplexes Schwarz-Weiß-Muster eine hohe Sicherheit in Bezug auf Einzigartigkeit gewährleistet [Christensen, 2022].

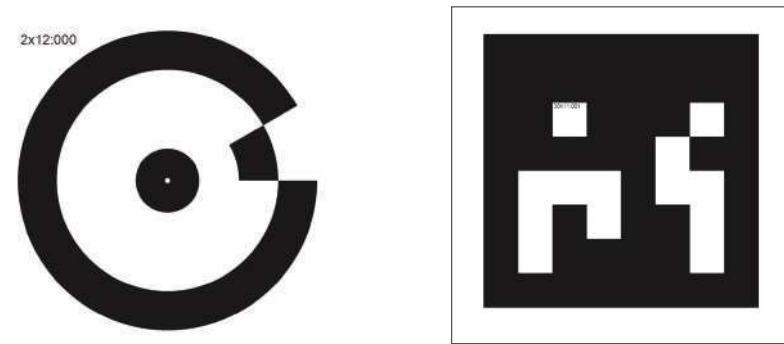


Abb.11: Links: circular, dual ring, 12-bit Rechts: square, april tag, 36h11

### AprilTags

AprilTags bestehen aus einer umlaufenden weißen und einer umlaufenden schwarzen Umrandung. Durch die Ermittlung der Eckpunkte und deren Diagonalen, wird der Mittelpunkt des Markers definiert, der dann später in der Software als Kontrollpunkt erkannt wird. Im Inneren der schwarzen Umrandung befindet sich ein Rastermuster, das eine unterschiedliche Anzahl an Einzelflächen haben kann. Die Flächen des Rasters werden hier als „bit“ bezeichnet, da diese entweder schwarz (1) oder weiß (0) dargestellt sind. Die bit-Anzahl des Markes ist ebenfalls in der genauen Bezeichnung abzulesen (z.B. 36h11:001).



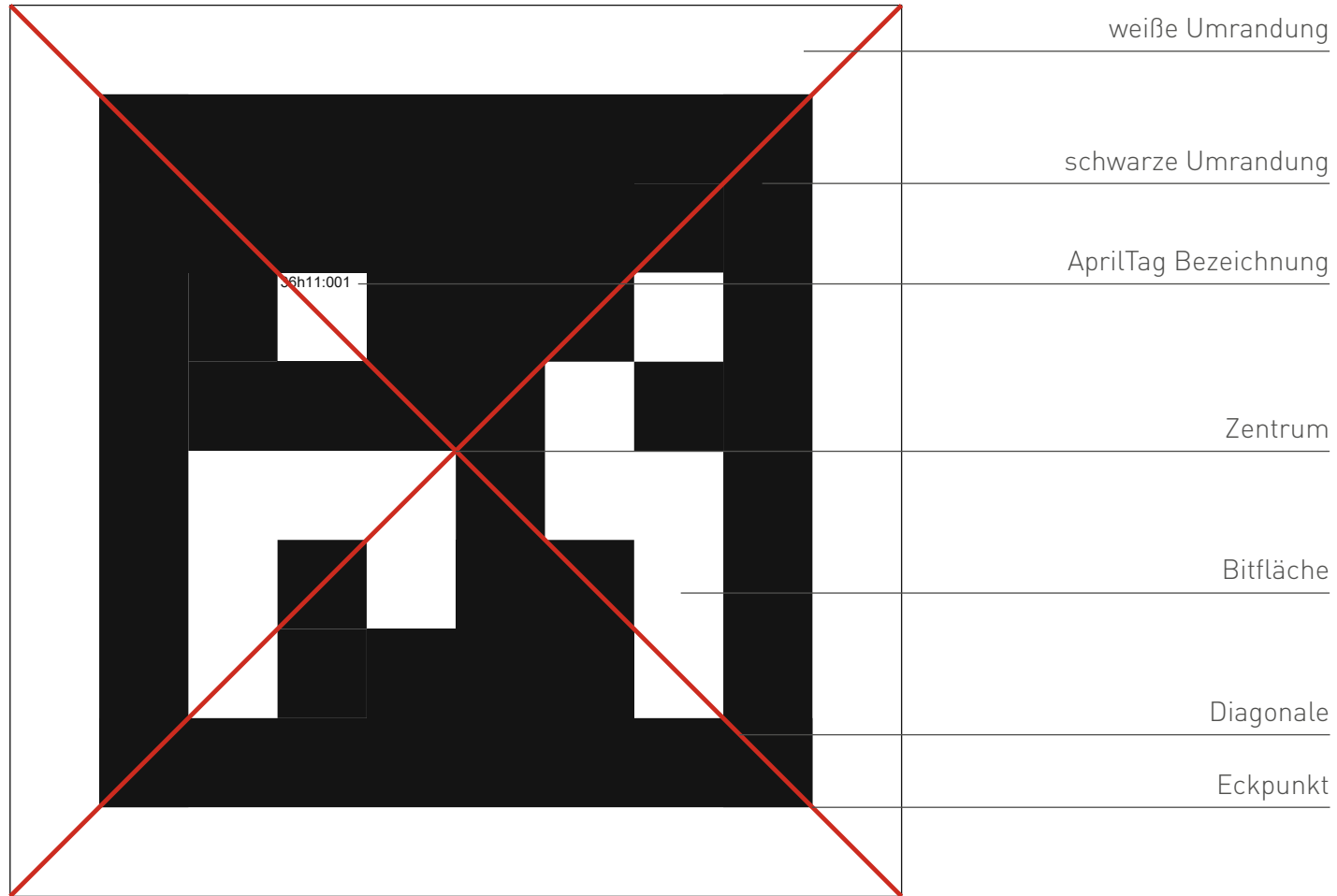
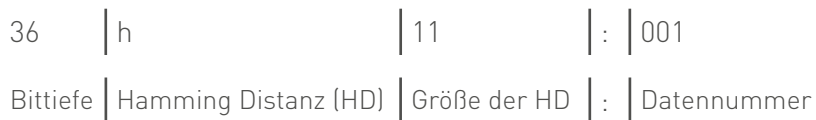


Abb.12: Aufbau eines square, AprilTag, 36h11

36h11:001 Bezeichnungserklärung:



Die Zahl 36 steht hierbei für ein 6x6 Raster mit 36 Bitflächen. Je größer die Bitanzahl ist, umso größer ist die Anzahl der unterschiedlichen Marker-Möglichkeiten.

16 Bit =  $2^{16}$  = 65.536 Möglichkeiten  
 36 Bit =  $2^{36}$  = 68.719.476.736 Möglichkeiten

Das „h“ in der Bezeichnung steht für die sogenannte Hamming-Distanz. Diese gibt vor, wie viele einzelne Bits sich an derselben Position des Markers unterscheiden müssen.

z.B.: 4Bit  
 h1: 0001 h2: 0001 h4: 0001  
       0000       0100       1110

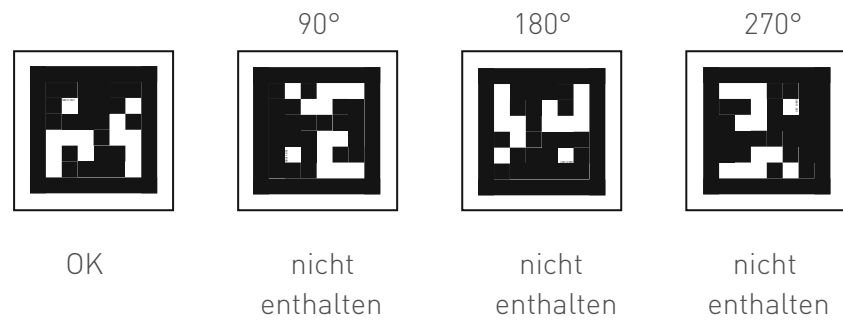
Ein 36h11:001 Marker hat eine Hamming-Distanz von 11, das bedeutet, dass zumindest 11 der 36 Bitflächen unterschiedlich sind. Die Möglichkeiten mit einem geringeren Wert werden entfernt. Durch diese Unterscheidungskriterien wird die Wahrscheinlichkeit einer falschen Zuordnung des Markers nahezu ausgeschlossen.

sen. Jedoch wird die Anzahl der Möglichkeiten drastisch reduziert, was vor Beginn der fotogrammetrischen Aufnahme bedacht werden sollte.

square AprilTag 16h05 = 30 einzigartige Marker  
 (aus vormals 65.536 Möglichkeiten)

square AprilTag 36h11 = 587 einzigartige Marker  
 (aus vormals 68.719.476.736 Möglichkeiten)

Da bei der fotogrammetrischen Aufnahme Fotos von allen Seiten aufgenommen werden können, werden die um 90°, 180° und 270° gedrehten Versionen sowie gespiegelte Varianten ausgenommen, um eine falsche Kontrollpunktzuordnung zu vermeiden.



Die letzte Zahl in der Bezeichnung besteht aus der fortlaufenden Datennummer, die bei der Zuordnung in der Software automatisch erkannt wird [Christensen, 2022].

## Anwendung der Fotogrammetrie in der Architektur

Eine der wichtigsten Anwendungen der Fotogrammetrie in der Architektur ist die Erstellung von 3D-Modellen von Gebäuden sowie orthografische Darstellungen von Gebäudeteilen. Mit Hilfe von diesen digitalen Abbildern können Plandarstellungen wie Grundrisse, Schnitte und Fassadenpläne abgeleitet werden und für die weitere Planung wie zum Beispiel für Renovierungs- und Restaurierungsarbeiten herangezogen werden.

Im Vergleich zur traditionellen Handvermessung ist eine fotogrammetrische Bestandsaufnahme wesentlich schneller und kosteneffizienter durchzuführen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Nachbearbeitung und Berechnung der aufgenommenen Abbildungen erhebliche Rechenleistung und somit eine für diese Arbeiten vorgesehene PC-Hardware benötigt wird. Fotogrammetrie kann die geometrischen Eigenschaften eines Objekts genauer ermitteln und zusätzliche Informationen wie Material, Beschaffenheit und Zustand des Objekts durch bildhafte Darstellung der Textur liefern [Luhmann et al., 2020]. Im Bereich der Sicherheit bietet Fotogrammetrie ebenfalls Vorteile, da sie aus der Ferne durchgeführt werden kann. Dies ist besonders relevant für schwer zugängliche, gefährliche oder fragile Bereiche [Kersten et al., 2017]. Im Gegensatz zu einer üblichen Aufnahme mittels Handaufmaß ist die fotogrammetrische Aufnahme weniger fehleranfällig hinsichtlich vergessener Maße, da durch die Erzeugung einer skalierten Punktwolke die Möglichkeit besteht, bestimmte Maße zu einem späteren Zeitpunkt aus dem digita-

len Abbild zu messen. Weiters können die Ergebnisse, die mittels Fotogrammetrie erzeugt werden, für die Erstellung von Modellen für Architekturwettbewerbe oder von virtuellen Rundgängen durch Gebäude verwendet werden. Trotz vieler Vorteile gibt es Umstände, wie sehr kleine Räume oder wenn nur sehr einfache Messungen benötigt werden, in denen traditionelle Handaufmaße geeigneter sein könnten. Ein Beispiel der fotogrammetrischen Aufnahme eines Gebäudes sind die Fassadenbildpläne des Schlosses Johannisburg in Aschaffenburg, Deutschland. Als Ergebnis entstanden Pläne mit insgesamt 26.000 m<sup>2</sup> Grundrisse, 16.000 m<sup>2</sup> Gebäudeschnitte, 7.000 m<sup>2</sup> Dachflächen und 15.000 m<sup>2</sup> Bildpläne für alle Fassaden als Grundlage für die Planung und die nachfolgende Ausschreibung aller Gewerke.<sup>2</sup>



Abb.13: Einsatz eines Hexakopters, Schloss Johannisburg in Aschaffenburg



Abb.14: Fotogrammetrische Aufnahme der Fassaden, Schloss Johannisburg in Aschaffenburg, Deutschland

## Anwendung der Fotogrammetrie in der Archäologie

Die Fotografie spielt in der Archäologie schon seit langem eine große Rolle bei der Dokumentation und Aufzeichnung von Ausgrabungsstätten. Aber auch zur Analyse von Größen und Abmessungen mittels im Foto hinterlegter Skalen spielt die bildliche Dokumentation eine wichtige Rolle. Eine Weiterentwicklung der Fotografie in der Archäologie ist die Fotogrammetrie und ein daraus resultierendes 3D-Modell.

Die Fotogrammetrie ermöglicht eine weitaus genauere und hochauflösendere Bestandsaufnahme und erlaubt zu einem späteren Zeitpunkt stattfindende wissenschaftliche Bearbeitungen der Objekte und Ausgrabungsstätten. Dies bietet Archäologen die Möglichkeit, die Funde genauer zu untersuchen und ihre Form, Beschaffenheit, Größe und Farbe besser zu verstehen und diese in ihren Analysen und Berichten zu berücksichtigen. Die Fotogrammetrie hat in der Archäologie in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Die entstehenden virtuellen Modelle erlauben es Archäologen und Forschern die erfassten Objekte und Strukturen aus verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten, detailliert zu analysieren und zu überwachen. Hierbei kann die Technologie helfen, Schäden an Funden und Strukturen frühzeitig zu erkennen und geeignete Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn es darum geht, die Ergebnisse von Ausgrabungen für die Nachwelt zu erhalten und sie anderen Forschern und Interessierten zugänglich zu machen. Fotogrammetrie kommt in der Archäologie in mehreren Anwendungsgebieten zum Einsatz:

### **Dokumentation von archäologischen Stätten:**

Fotogrammetrie kann dazu verwendet werden, archäologische Stätten, Gräber und Gebäude zu dokumentieren und ihre genaue Lage und Struktur zu erfassen.

### **Vermessung von Gelände und Strukturen:**

Mittels Fotogrammetrie können Archäologen Gelände und Strukturen vermessen, um genaue Pläne und Karten zu erstellen. Dies ist besonders nützlich bei der Dokumentation von Grabungsstätten, da es den Archäologen hilft, ihre Arbeit besser zu organisieren und zu planen.

### **Analyse von Fundstücken:**

Fotogrammetrie kann auch zur Analyse von Fundstücken und Artefakten verwendet werden. Später können Archäologen Details und Merkmale wie Farbe, Schäden und Material von Fundstücken genauer untersuchen und dokumentieren.

### **Rekonstruktion von archäologischen Stätten:**

Mithilfe von Fotogrammetrie kann auch versucht werden, archäologische Ausgrabungen zu rekonstruieren. Durch die Erstellung und der Analyse von 3D-Modellen kann in manchen Fällen eruiert werden, wie diese Stätten in der Vergangenheit ausgesehen haben könnten.

### **Erhaltung von archäologischen Stätten:**

Fotogrammetrie dient auch dazu, archäologische Ausgrabungsstätten zu erhalten. Indem diese in digitale Modelle umgewandelt werden, können sie für die Nachwelt bewahrt werden und zugleich reduziert sich die Besucherzahl auf der Stätte selbst, was

dazu beitragen kann, die Zerstörung und Abnutzung der Örtlichkeiten zu verringern. Weiters können die Ergebnisse unabhängig von der archäologischen Stätte betrachtet werden und zum Beispiel in Museen ausgestellt werden [Westerhaus, 2018].

### Rekonstruktion der Kulturdenkmäler in Palmyra, Syrien

Als Beispiel für eine digitale Rekonstruktion von archäologischen Stätten dient die Stadt Palmyra in Syrien, die durch Krieg und Zerstörung schwer beschädigt wurde. Unter anderem wurden das römische Theater und der Bel-Tempel einer der wichtigsten Sakralbauten des 1. Jahrhunderts nach Christus im Osten, zerstört<sup>3</sup>. Durch den Einsatz von Drohnen, Fotos, die von Touristen, Wissenschaftlern und Archäologen bereit gestellt wurden und der Technik der Fotogrammetrie konnte eine detaillierte Abbildung der antiken Stadt erstellt werden, die als Grundlage für den Wiederaufbau dient. Ein Grundstein der Datenbeschaffung lag in der öffentlichen Fotobeschaffung über vorhandene Onlineresourcen. So konnten geeignete Abbildungen aus verschiedenen Blickwinkeln gesammelt werden und für die fotogrammetrische Berechnung herangezogen werden [Wahbeh u. Nebiker, 2016].

Das Projekt wurde von der Non-Profit-Organisation Arch/k Project und der UNESCO in Zusammenarbeit mit der syrischen Regierung und weiteren internationalen Partnern durchgeführt. Ziel war es, die historischen Monumente der Stadt zu bewahren und den Wiederaufbau der Stadt zu erleichtern.<sup>4</sup>



Abb.15: Rekonstruktion des römischen Theaters, Palmyra, Syrien

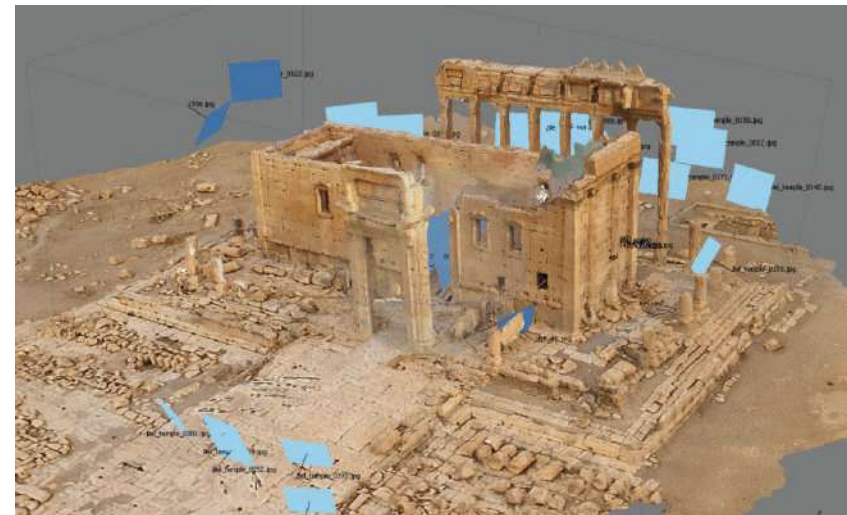


Abb.16: Rekonstruktion des Bel-Tempels, Palmyra, Syrien



Abb.17: Sehen, was gar nich da ist. AR Brille vom Hersteller MagicLeap.

# AUGMENTED REALITY IN DER ARCHITEKTUR



## Augmented Reality (AR)

Augmented Reality (AR), oder erweiterte Realität, ist eine Technologie, die digitale Informationen mit der realen Welt verbindet. Sie bietet Anwendern ein interaktives Erlebnis ihrer realen Umgebung, die durch digitale Informationen über die Umgebung ergänzt wird. Anders als bei der virtuellen Realität, die eine vollständig computergenerierte Umgebung erstellt, überlagert die AR die reale Welt mit virtuellen Elementen. Der Begriff „Augmented Reality“ wurde erstmals 1992 von Tom Caudell, einem Forscher bei Boeing, verwendet, um eine Technologie zu beschreiben, die ursprünglich zur Vereinfachung der Verkabelung in Flugzeugen eingesetzt wurde [Caudell et al., 1992].

Augmented Reality (AR) funktioniert durch das Überlagern von digitalen Informationen in Form von 3D Objekten, Abbildungen, Videos, Audioquellen oder anderen digitalen Daten auf die reale Umgebung, um ein umfassend erweitertes Erlebnis zu schaffen. Zunächst erfasst ein Gerät wie ein Smartphone, Tablet oder eine AR-Brille die reale Welt mithilfe einer eingebauten Kamera oder integrierter Sensoren. Diese erfassten Daten werden dann von der Software auf dem Gerät verarbeitet und übernommen. Die Software verwendet Algorithmen zur Bilderkennung, um die Szenen zu analysieren. Sie erkennt bestimmte Muster, Formen oder Marker, um zu bestimmen, wo und wie die digitalen Informationen in der realen Welt platziert werden sollen [Carmignia, 2011]. Sobald die Software die Szene analysiert hat, überlagert sie die digitalen Informationen auf das Echtzeitbild der realen Welt. Die-

ser Prozess erforderte eine leistungsfähige Hard - und Software, um in Echtzeit durchgeführt werden zu können. Das Ergebnis ist eine erweiterte Ansicht der Realität, die dem Benutzer durch das Display des Geräts präsentiert wird. Die digitalen Informationen können interaktiv sein und sich in Echtzeit ändern oder vom Anwender geändert werden.

### **Tragbare, in der Hand gehaltene Geräte (handheld):**

Diese Systeme verwenden tragbare Geräte wie Smartphones oder Tablets, um Augmented Reality-Erlebnisse bereitzustellen. Bei dieser Variante wird die Kamera des Geräts verwendet, um die physische Welt zu erfassen, während der Bildschirm dazu genutzt wird, um digitale Elemente in die reale Umgebung einzufügen. Diese Art von AR ist weit verbreitet, da viele Anwender bereits die benötigte Hardware besitzen. Ein Beispiel für handheld AR sind AR-Spiele und Applikationen, die auf Smartphones verfügbar sind, wie beispielsweise „Pokémon Go“ [Schmalstieg u. Höllerer, 2016].

### **Auf dem Kopf getragene Geräte (head-mounted)**

Diese Art von AR-Systemen umfasst Geräte wie AR-Brillen oder Helme, die die Benutzer auf ihrem Kopf tragen. Diese Geräte verwenden Kameras oder Sensoren, um die Umgebung zu erfassen, und kleine Displays in den Brillen, um digitale Informationen in das Sichtfeld des Benutzers einzufügen. Ein Beispiel für ein head-mounted AR-System ist die Microsoft HoloLens, die

holographische Bilder in die Umgebung des Benutzers einfügt. [Billinghurst u. Duenser, 2012].

### **Räumlich projizierte Darstellungen (spatial):**

Bei dieser Art von AR-Systemen werden Projektoren verwendet, um digitale Informationen direkt auf physische Oberflächen in der Umgebung zu projizieren. Im Gegensatz zu handheld- und head-mounted-Systemen benötigen spatial AR-Systeme nicht notwendigerweise, dass der Benutzer ein Gerät trägt oder hält. Stattdessen werden die digitalen Elemente direkt in den Raum eingefügt, was zu einem natürlicheren und möglicherweise immersiveren Erlebnis führen kann. Ein Beispiel für spatial AR ist die Verwendung von Projektionen, um realistische Effekte zu erzeugen [Bimber u. Raskar, 2005].

Augmented Reality (AR) hat sich in zahlreichen Anwendungsbereichen der Bildung, Medizin, Kunst, Immobilien- und Bauindustrie bewährt [Kaufmann, 2019]. Aufgrund ihrer Interaktivität und Darstellung kann sie Informationen zugänglich und verständlich machen und Lernprozesse verbessern. Im Bildungssektor kann AR beispielsweise dazu verwendet werden, Schülern und Studierenden ein tieferes Verständnis komplexer Konzepte zu vermitteln. Ein Beispiel dafür ist die Darstellung menschlicher Anatomie in 3D, die Medizinstudierenden hilft, verschiedene Körperteile und Systeme zu verstehen. In der Industrie wiederum wird AR zur

Verbesserung von Fertigungsprozessen wie Wartung und Reparatur sowie zur Schulung von Mitarbeitern eingesetzt. AR kann beispielsweise verwendet werden, um komplexe Montageanweisungen zu visualisieren oder um den Zustand von Maschinen in Echtzeit zu überwachen [Gavish et al., 2015].

Augmented Reality (AR) kann verschiedene Tracking-Methoden nutzen, die jeweils unterschiedliche Technologien verwenden, um die Position und Ausrichtung eines AR-Geräts im Verhältnis zur realen Welt zu bestimmen. Markerbasiertes Tracking bzw. Markerloses Tracking beruht auf der Verwendung von Target Marker, um die räumliche Position zu erfassen. Einige AR-Anwendungen nutzen GPS (Global Positioning System), um die Position des AR-Geräts zu verfolgen. Dies ist besonders nützlich für AR-Anwendungen im Freien, verfügt jedoch nur über eine begrenzte Genauigkeit und ist in Innenräumen aufgrund möglicher GPS-Störungen nur begrenzt einsetzbar [Hollerer et al., 2003].

## Augmented Reality in der Architektur

In der Architektur kann Augmented Reality zur Visualisierung von Gebäuden und zur Überprüfung der Raumaufteilung genutzt werden. Sie ermöglicht es Architekten und Designern, virtuelle Modelle von Gebäuden in einer realen Umgebung zu betrachten, bevor diese tatsächlich gebaut werden. Dies kann dazu beitragen, den Entwurf zu verbessern und Probleme frühzeitig zu erkennen, bevor Baupläne umgesetzt werden. AR kann auch eingesetzt werden, um Kunden, Investoren und behördlichen Verantwortlichen ein besseres Verständnis über Entwurf und Raumaufteilung zu vermitteln. Benutzer können mit virtuellen Elementen interagieren und Änderungen in Echtzeit vornehmen, um verschiedene Planungsszenarien und Entwurfsstudien zu testen und zu überprüfen. Diese Interaktivität kann es Planern ermöglichen, effektivere und effizientere Planungsentscheidungen zu treffen.

Weiters ist die Verwendung von AR ein nützliches Instrument in der Stadtplanung. Sie kann genutzt werden, um virtuelle, städtebauliche Konzepte in die reale Welt einzufügen und somit eine verbesserte, interaktive Erfahrung zu schaffen. Dabei kann AR in verschiedenen Phasen der Stadtplanung eingesetzt werden, wie z.B. bei der Bestandsaufnahme, der Planung und der Kommunikation mit entscheidenden Gremien.<sup>5</sup>

Darüber hinaus kann Augmented Reality auch während der Bau-phase genutzt werden, um sicherzustellen, dass das Gebäude den ursprünglichen Plänen entspricht und um Probleme frühzeitig erkennen, die während des Baus auftreten können [Schrantz et al.,2022].



Abb.18: AR Installation der Fa.Liebherr zur Darstellung des Bauablaufs



Abb.19: iPad mit der iOS Anwendung „Liebherr AR Experience“



Abb.20: Augmented Reality im Entwurfsprozess anhand eines Modells



Abb.21: Überprüfung der Leitungsführung für spätere Installationen mittels Augmented Reality und der App Gamma AR | Porr AG

## Augmented Reality in der Bauphase

Neben der Planungsphase spielt BIM (building information modelling) auch in der Ausführungsphase während des Baus eine immer größere Rolle. Durch die Darstellung und den verknüpften Informationsgehalt eines 3D BIM Modells, ist es den ausführenden Firmen auf der Baustelle möglich, effizienter und genauer die Angaben seitens der Fachplaner auf der Baustelle umzusetzen. Da das digitale Modell bereits für die Planung eine essentielle Rolle spielt, ist der Weg des Modells auf die Baustelle eine naheliegende Weiterentwicklung. Spezielle Programme für Tablets und Smartphones bieten über eigens hergestellte Plattformen und Cloudlösungen relativ unkomplizierte Möglichkeiten der Darstellung des BIM-Modells auf der Baustelle.

Unternehmen wie Trimble und Microsoft haben bereits speziell für die Baustellen entwickelte Produkte - wie den AR Helm Trimble XR10, in ihrem Produktportfolio. Diese head mounted AR Brillenlösung bringt den Vorteil von mehr Bewegungsfreiheit und freien Händen auf der Baustelle mit sich.

Ein wichtiger Punkt der Darstellung/Überlagerung des Modells mit dem Rohbau ist eine korrekte Überlagerung, Positionierung und Skalierung. Suboptimale Lichtverhältnisse und meist gräuliche Oberflächen mit wenig Kontrast können eine richtige Positionierung auf der Baustelle stören und stellen große Herausforderungen an das verwendete Trackingsystem. Weiters erschwert das Voranschreiten der Baustelle ein kontinuierliches Tracking. Fixpunkte, die während der Rohbauphase platziert und eingerichtet wurden, sind womöglich während der Ausbauphase

nicht mehr vorhanden. Auch muss sichergestellt werden, dass beim Herumwandern und Positionswechsel der Person ein Verdrücken des 3D-Modells mit der realen Umgebung vermieden wird [Schranz et al.,2022].

Augmented Reality wird im Bauwesen eine bedeutende Rolle in der Zukunft spielen. Diese Technologie bietet eine Vielzahl von potenziellen Anwendungsmöglichkeiten (Use-Cases) auf Baustellen. Für eine effektive Nutzung ist allerdings eine präzise Verfolgung des virtuellen Modells von entscheidender Bedeutung.



Abb.22: Trimble XR10 AR Helm mit der Microsoft Hololens 2

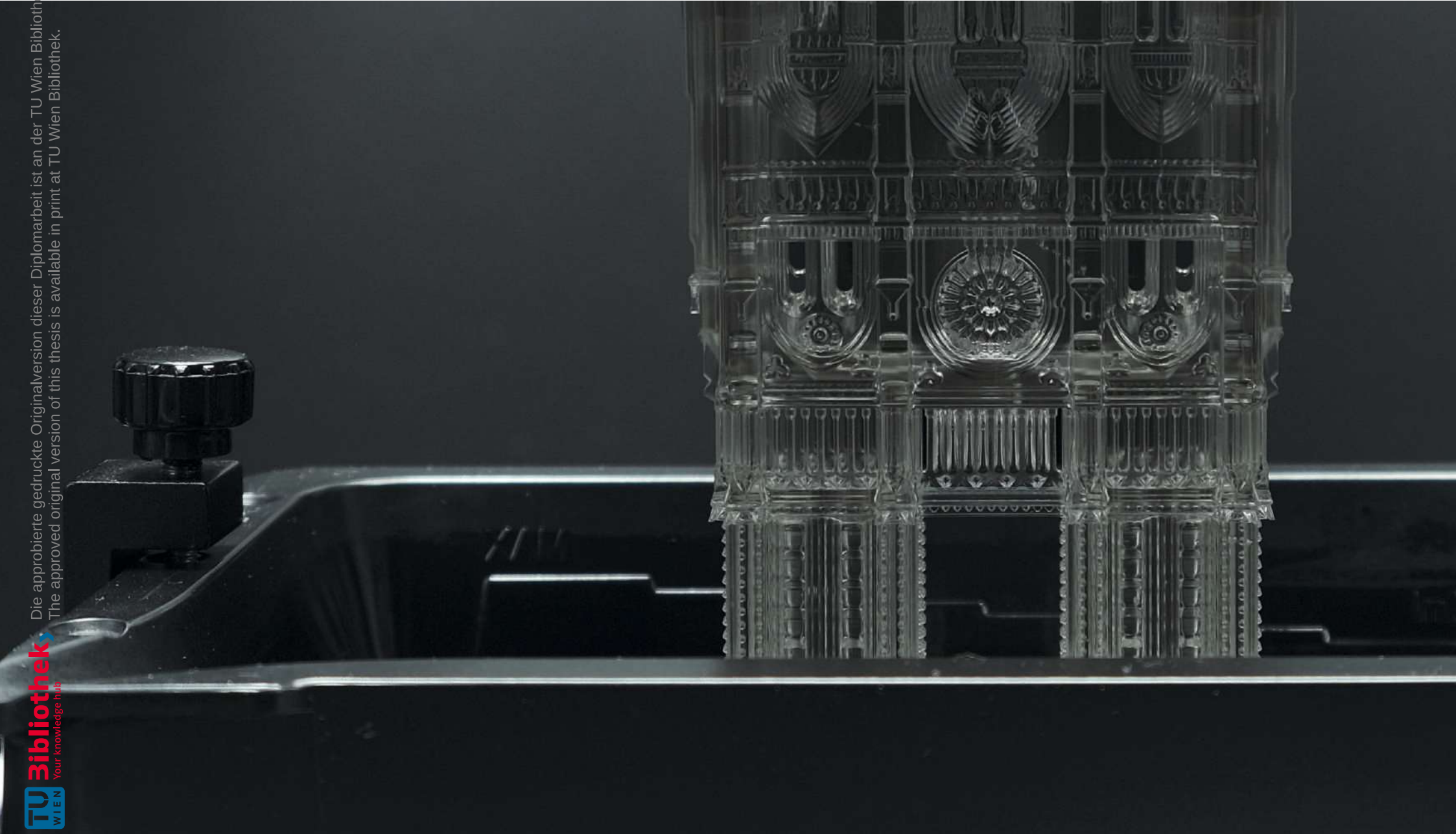


Abb.23: Kunstharzdruck, Kathedrale Notre-Dame de Paris



# DIGITALE FERTIGUNG 3D-DRUCK



### 3D-Druck - Theorie und Funktionsweise

Durch das Voranschreiten der digitalen Fertigung und Planung, haben sich die Nachfrage und der Markt im Bereich des 3D-Drucks stetig vergrößert [Fastermann, 2014]. Für Unternehmen ist es möglich, in kurzer Zeit digitale Entwürfe schnell und kostengünstig auszudrucken, auf ihre Eignung zu testen und gegebenenfalls abzuändern. Durch die rasche Weiterentwicklung der Hersteller von 3D-Druckern und die sinkenden Gerätepreise, ist der 3D-Druck mittlerweile auch in viele Branchen und Bereichen ein beliebtes Werkzeug zur Umsetzung von Ideen und Nachbildungen geworden.

Das Grundprinzip des 3D-Drucks ist die additive Fertigung, eine Schicht-für-Schicht-Auftragung des Materials, mit der sämtliche Formen möglich sind. Im Gegensatz zur subtraktiven Fertigung, wie CNC-Fräsen oder Laserschneiden, bei dem einem Material Teile entfernt werden, wird beim 3D-Druck Material zugeführt, miteinander verschmolzen und ausgehärtet [Gibson et al., 2014].

Je nach Einsatzkriterium gibt es verschiedene Verfahren im 3D-Druck. Dies können zum Beispiel Kriterien wie Oberflächenbeschaffenheit, Materialien, Bauraumgröße, Bauweisen oder Druckgeschwindigkeit sein.

Die gängigsten Technologien sind die FDM - Fused Deposition Modeling, SLA - Stereolithografie und SLS - Selektives Lasersintern Druckverfahren. Diese drei Methoden unterscheiden sich

grundlegend in der Art des Ausgangsmaterials und dessen Verarbeitung.

Während beim FDM-Druck erhärtetes Material mittels Heizquelle an den Schmelzpunkt gebracht wird und verflüssigt aufgetragen wird, wird bei der Stereolithografie (SLA) flüssiges Material mittels Lichtquellen erhärtet und so Schicht für Schicht aufgebaut. Beim SLS - Verfahren wird wiederum ein Pulver versintert und zu einem Objekt verschmolzen. <sup>6</sup>

FDM - hartes Material wird geschmolzen und wieder abgekühlt

SLA - flüssiges Material wird ausgehärtet

SLS - Pulver wird mittels Laser gesintert

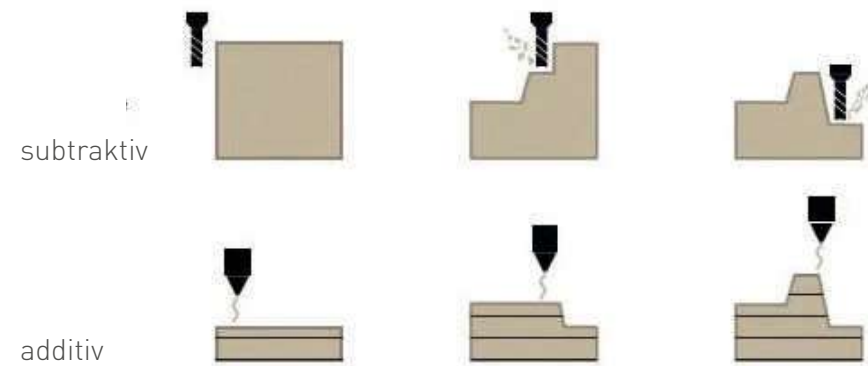
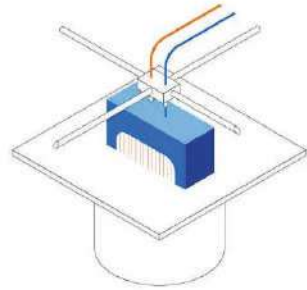


Abb.24: Schemadarstellung der subtraktiven- und der additiven Fertigung

FDM

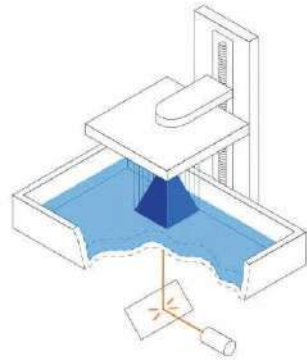
**FDM - Schmelzschichtung**

- schmilzt und extrudiert Thermoplast Filamente
- niedriger Einstiegs- und Materialpreis
- geringe Auflösung und Genauigkeit

Einsatzmöglichkeiten:

einfache Konzeptnachweismodelle, einfache Prototypenentwicklung

SLA

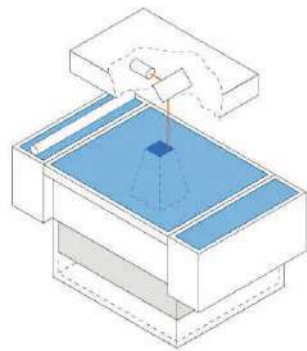
**SLA - Stereolithografie**

- Laser/LCD Display härtet Photopolymer-Kunstharze
- hohe Auswahl an vielseitigen Materialien
- hohe Auflösung und Genauigkeit, feine Details

Einsatzmöglichkeiten:

funktionales Prototyping, Modell-, Formen- und Werkzeugbau

SLS

**SLS - selektives Lasersintern**

- Laser sintert Kunststoffpulver
- geringe Kosten in der Produktion
- keine Stützstrukturen notwendig
- ausgezeichnete mechanische Eigenschaften (ähnlich Spritzgussteilen)

Einsatzmöglichkeiten:

funktionales Prototyping, Produktion für die Endverwendung

[Formlabs, 2023]

Abb.25: 3D Drucktechnologien für Kunststoffe

## Datenaufbereitung

Für den 3D-Druck wird vorab ein digitales Modell benötigt. Dieses kann in einer CAD Software selbst erstellt oder mit einem Laserscanner bzw. mittels Fotogrammetrie erstellt werden. Das gängigste Format für den Datei export ist das STL-Exportformat. Die Ursprungsbezeichnung stammt aus der Fertigung der Stereolithografie, da diese eine der ersten 3D-Druck Verfahren war. STL-Dateien werden von sämtlichen herkömmlichen 3D-Druckerprogrammen unterstützt.

Beim Export wird die Oberflächengeometrie des vorhandenen Modells in geometrische Figuren (Tessellierung) geteilt und je nach Einstellung vereinfacht.<sup>7</sup> Um später keine Probleme mit der korrekten Größe des gedruckten Objektes zu bekommen, muss beim Exportieren aus dem CAD Programm auf die richtige Skalierung geachtet werden (mm/cm/m/zoll/...).

Bevor eine Datei für den 3D-Druck vorbereitet wird, sind einige wichtige Schritte zu beachten. Zunächst sollte die Datei auf Fehler und Störungen überprüft werden, um sicherzustellen, dass sie ordnungsgemäß verarbeitet und bereit für den Druck ist. Vor allem ist darauf zu achten, dass die Oberfläche keine Lücken aufweist. Man spricht dabei von einem sogenannten wasserdichten 3D-Modell [Fastermann, 2014]. Bei fehlerhaften Modellen, die Löcher in der Außenhülle (Mesh) aufweisen, kann es zu Komplikationen in der Berechnung und somit zu einem Misserfolg des 3D-Druckvorgangs führen. Durch genaues Konstruieren, Über-

prüfen und Reparieren des 3D-Modells, können solche Fehler forab vermieden werden.

Ein weiterer Punkt, der zu beachten ist, ist die die Ausrichtung der Normalvektoren (normals) der Oberfläche. Diese können nämlich fälschlicherweise nach innen statt nach außen gedreht sein. Normalvektoren werden in der Regel als Vektoren definiert, die senkrecht zur Oberfläche eines 3D-Modells stehen. Diese Vektoren zeigen in die Richtung, in der die Oberfläche nach außen zeigt.<sup>8</sup> Ein Modell kann zwar richtig geschlossen (wasserdicht) sein, jedoch führen falsch ausgerichtete Normalvektoren ebenfalls zu Fehlern bei der Druckberechnung. Mit speziellen Programmen wie Meshlab [Meshlab, 2023], Meshmixer [Meshmixer, 2023] und Netfabb [Netfabb, 2023] ist es möglich, 3D-Dateien zu überprüfen, auftretende Fehler zu lokalisieren und zu reparieren.

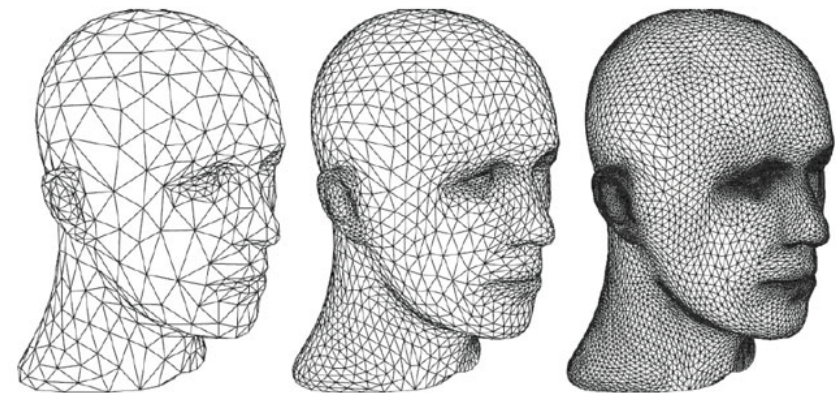


Abb.26: Darstellung der Tessellierung in unterschiedlichen Qualitätsstufen

## 3D-Druck Software

Spezielle Programme für den 3D Druck sind wichtige Bestandteile für den Druckprozess von 3D-Modellen. Die Software ermöglicht es, das Modell in Schichten zu schneiden um daraus eine Druckdatei zu generieren, die der 3D-Drucker lesen, und somit schichtweise aufbauen kann. Die Schichten bilden die Basis für die Druckqualität und -geschwindigkeit, und können in den Softwareeinstellungen an verschiedenen Parametern angepasst werden.

In der Regel bieten solche Programme Einstellungen für die Schichthöhe, die Druckgeschwindigkeit, die Düsentemperatur (FDM), die Belichtungszeit (SLA) und die Fülldicke. Diese Parameter können angepasst werden, um ein optimales Verhältnis zwischen Druckqualität und -geschwindigkeit zu erreichen. Eine weitere Möglichkeit ist die automatische Erstellung von Stützstrukturen. Diese Stützstrukturen werden in der Regel aus dem gleichen Material wie das Modell gedruckt, sind jedoch so gestaltet, dass sie während des Druckprozesses entfernt werden können, ohne das Modell zu beschädigen.

Es gibt unterschiedliche Programme für 3D-Drucker auf dem Markt, sowohl Open-Source-Software als auch kommerzielle Software. Einige der bekanntesten kostenlose Programme sind Cura [Cura, 2023], Chitubox [Chitubox, 2023], Slic3r [Slic3r, 2023] und PrusaSlicer [PrusaSlicer, 2023]. Die Wahl der Software hängt von den individuellen Anforderungen und Präferenzen ab.<sup>9</sup>

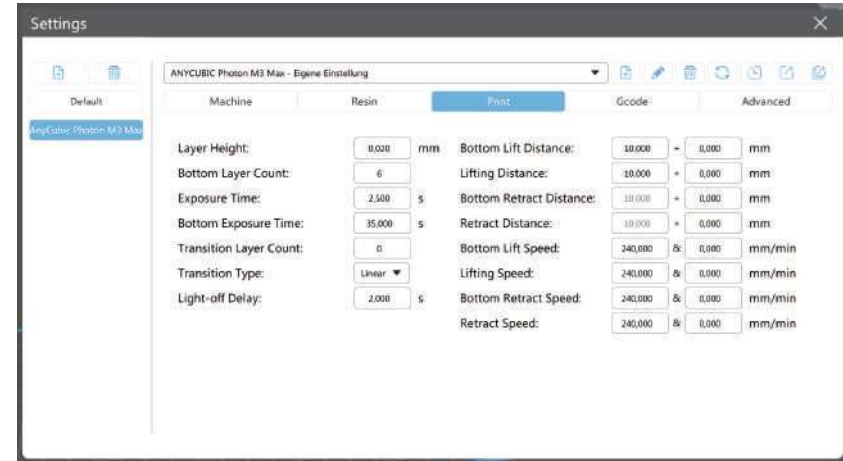


Abb.27: Diverse Einstellungen für den Druck eines SLA-Druckes, Chitubox

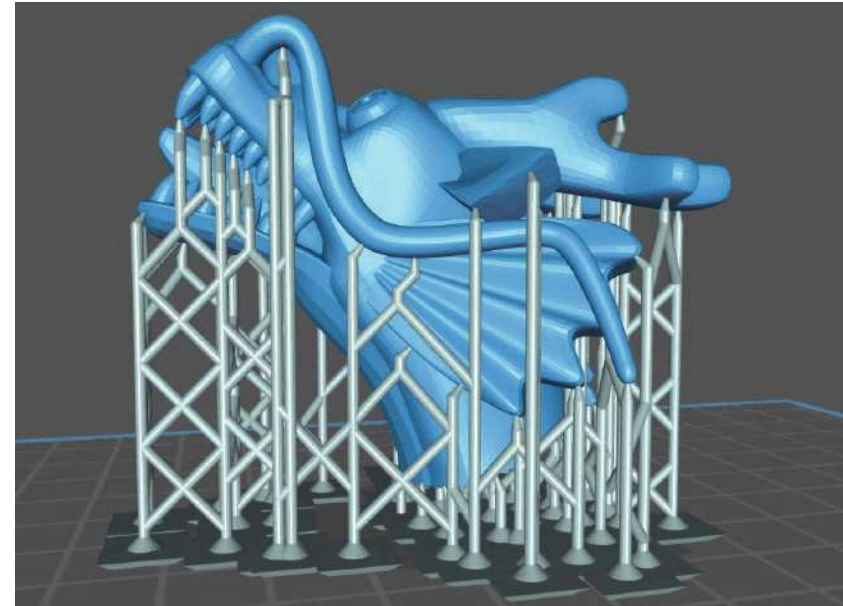


Abb.28: 3D-Modell (blau) und die generierte Stützstruktur (grau), Chitubox

## SLA-Druck in der Architektur

Der Einsatz von 3D-Druck in der Architektur bietet zahlreiche Vorteile gegenüber herkömmlichen Arbeitsabläufen beim Modellbau. Einer der wichtigsten Vorteile besteht darin, dass komplexe Designs schnell und einfach von Personen ohne handwerkliche Erfahrung gedruckt werden können. Dies ermöglicht es Architekten und Designern, ihr kreatives Potenzial voll auszuschöpfen und komplexe Designs zu erstellen, die zuvor im Modellbau nicht möglich waren.

Insbesondere der im vorigen Kapitel beschriebene SLA-3D-Drucker bietet aufgrund seiner hohen Oberflächenqualität und feinen Details ideale Voraussetzungen für Architekturanwendungen. Mit diesem Drucker können Architekten detaillierte und realistische Modelle von Gebäuden, Landschaften oder anderen Architekturelementen erstellen. Dies ermöglicht es ihnen, das Design vor der tatsächlichen Konstruktion zu optimieren und mögliche Probleme im Voraus zu lösen.

Insgesamt bietet der 3D-Druck in der Architekturbranche eine effektive Möglichkeit, die Designmethodik zu optimieren und die Kreativität der Designer zu fördern.

Architekturmodelle werden üblicherweise aus einer Vielzahl von Materialien und Bauteilen zusammengesetzt. 3D-Drucker helfen dabei, diese Bauteile in so wenige Einzelteile wie möglich zu teilen.

Ein limitierender Faktor im Bereich des 3D-Drucks ist das Druckvolumen. Die Verwendung von Druckern mit großem Bauvolumen kann kostenintensiv in der Anschaffung beziehungsweise kann eine größere Bauplattform zu einer Beeinträchtigung der Oberflächenqualität führen. Für Architekturmodelle wird das Modell häufig in kleinere Teile aufgeteilt, um die Größe der Gebäudehülle zu berücksichtigen. Diese Teile können dann durch chemische Bindung oder mechanische Montage (Zusammenstecken) einfach miteinander verbunden werden. Aufgrund der hohen Präzision des Drucks können die einzelnen Teile nahtlos ineinander übergehen und ein qualitativ hochwertiges Modell ergeben. [Formlabs, 2018]

Bei der Teilung der Druckdatei sollten folgende Punkte beachtet werden, um die ideale Schnittstelle zu definieren:

- Notwendigkeit, Innen- bzw. Außendetails zu zeigen
- Leichtigkeit der Aufteilung (am besten lässt sich das Modell entlang des Teils mit der geringsten Komplexität aufteilen)
- Notwendigkeit, einen bestimmten Teil des Programms zu zeigen: Einheitstypologie, Struktur, Grundriss

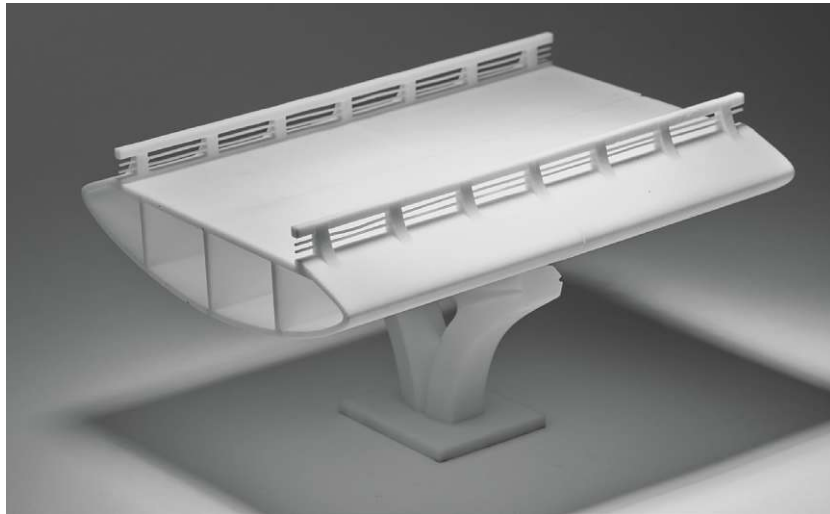


Abb.29: Brückenmodell von T.Y. Lin International



Abb.30: Modell eines Wohnhauses von LaneyLA w

### Aufteilung nach Segmenten

Eine gängige Methode zur Aufteilung von Modellen in Einzelsegmente der Druckdatei ist ein geradliniger Schnitt. Ein Beispiel dafür ist die dargestellte Aufteilung eines Brückenmodells (links). Jedes Stützelement passt in eine passende Aussparung in einer Bodenplatte, ohne dass Klebstoff benötigt wird. Es empfiehlt sich, jedem Teil eine eindeutige Kennung zuzuweisen, vor allem bei der Montage von Modellen mit einer großen Anzahl von Teilen, um ein leichtes Zusammensetzen zu ermöglichen.

### Aufteilung nach räumlichen Programmen

Durch die Aufteilung des Gebäudes in einzelne Raumprogramme ist eine Demontage und Umstrukturierung im Entwurfsprozess anhand des Modells möglich. Volumkörper können unterschiedlich verbunden und der Entwurf überprüft werden.

### Aufteilung nach Struktur

Einige Modelle eignen sich dazu, nach ihren strukturellen Komponenten getrennt, anstatt als einzelner Block ausgedruckt oder entlang einer Naht aufgeteilt zu werden. Diese Technik funktioniert normalerweise für Modelle, die nicht durch geradlinige Formen gekennzeichnet sind. Die Unterteilung kann hier zum Beispiel in Form von Stützen, Fahrspuren, Geländer und Tragseilen einer Brücke sein. [Formlabs, 2018]



Abb.31: Wandprojektionen im Nationalmuseum von Katar



# DIGITALES MUSEUM





Abb.32: AR-basierte Installation, NRW-Forum Düsseldorf

## Digitales Museum

Digitale Technologien spielen seit den letzten Jahren eine zunehmend wichtige Rolle in Museen und anderen Kultureinrichtungen. Die Verwendung von digitalen Technologien hat Museen geholfen, ihre Sammlungen und Inhalte auf neue und interaktive Weise zu präsentieren, um Besucher zu faszinieren und zu Interaktionen zu motivieren.

Die Verwendung von neuartigen Technologien in Museen begann in den 1990er Jahren, als viele Institutionen ihre Ausstellungsstücke und Sammlungen digitalisierten um diese auch online zu veröffentlichen. Diese ersten digitalen Inhalte waren jedoch häufig begrenzt für Anwender und boten wenig Möglichkeiten zur Interaktion oder Information für den Besucher. Im Laufe der Jahre entwickelte sich die digitale Technologie jedoch erheblich weiterentwickelt, und Museen haben begonnen, verschiedene Technologie in immer kreativerer und effektiverer Weise zu nutzen, um Besuchern personalisierte Erlebnisse zu bieten. Ein Beispiel dafür ist die Verwendung von Audioguides oder interaktiven Touchscreens, die ermöglichen, tiefer in ein Thema einzutauchen und mehr über bestimmte Exponate zu erfahren. Auf teilweise spielerische Art können Besucher hier zusätzliche Einblicke zu den Ausstellungsstücken gewährt werden.

Ein weiteres Beispiel ist die Verwendung von Virtual Reality (VR), die es Besuchern ermöglicht, in eine virtuelle Welt einzutauchen und historische Ereignisse oder Orte auf neue und immersive

Weise zu erleben. Im Gegensatz zur Virtual Reality (VR) ermöglicht Augmented Reality (AR) virtuelle Ausstellungsstücke und Informationen in die reale Welt zu integrieren und so einzigartige und faszinierende Erlebnisse zu schaffen. [Marty, 2011]

## Auswirkungen auf die Museumsbesucher

Im Jahr 2016 veröffentlichte das Journal of Museum Education einen Artikel mit dem Titel „Innovative and Effective Digital Installations in Museums“. Die in dem Artikel angeführte Studie beschäftigt sich mit den Möglichkeiten und Herausforderungen bei der Gestaltung von digitalen Installationen in Museen. Sie ergab, dass digitale Installationen dazu beitragen können das Interesse und die Aufmerksamkeit der Besucher zu steigern.

Die Studienteilnehmer wurden in zwei Gruppen unterteilt: Eine Gruppe besuchte das Museum ohne digitale Installationen, während die andere Gruppe das Museum mit digitalen Installationen besichtigte. Vor und nach ihrem Museumsbesuch wurden alle Teilnehmer gebeten, einen Fragebogen auszufüllen, der sich auf ihre Erfahrungen und ihr erworbenes Wissen bezog. Der Fragebogen enthielt Fragen zur Gesamterfahrung im Museum, zur Wahrnehmung der Exponate und zur Einschätzung der digitalen Installationen.

Die Studienergebnisse zeigten, dass die Teilnehmer, die das Museum mit digitalen Installationen besuchten, ein gesteigertes Interesse und eine erhöhte Aufmerksamkeit aufwiesen im Vergleich

zu den Teilnehmern, die das Museum ohne digitale Installationen besuchten. Zudem stellte sich heraus, dass die Besucher der zweiten Gruppe ein besseres Verständnis der Ausstellungsinhalte hatten.

Es wurde jedoch betont, dass digitale Installationen nicht als Ersatz für herkömmliche Ausstellungsstücke angesehen werden sollten, sondern als eine sinnvolle Ergänzung. Die Installationen sollten so gestaltet sein, dass sie die Exponate unterstützen und die Besucher ermutigen, diese genauer zu betrachten [Grohe et al, 2016].

## Audioguides

Audioguides gibt es in verschiedenen Formen, von tragbaren Geräten bis hin zu mobilen Apps auf Smartphones oder Tablets. Einige Museen bieten die Möglichkeit, Audioguides gegen Aufpreis auszuleihen und sie am Eingang des Museums oder an bestimmten Stationen zu holen. Sie können in verschiedenen Sprachen angeboten werden, um von Besucher aus unterschiedlichen Ländern genutzt zu werden. In neueren Museen wird dies auch über eine eigene APP angeboten, die mittels QR Code heruntergeladen und auf dem eigenen Smartphone oder Tablet abgespielt werden kann. Dies setzt jedoch voraus, dass die Besucher eigene Headsets bei sich tragen. Die Audioguides oder Apps enthalten Audioaufnahmen, die von Kuratoren oder Experten eingesprochen wurden und den Besuchern zusätzliche Informationen zu den Exponaten, Kunstwerken oder Objekten liefern.

Weiters können sich die Besucher durch den Audioguide oder durch die App in ihrem eigenen Tempo durch die Ausstellung führen lassen und je nach Interesse bestimmte Bereiche überspringen oder genauer untersuchen. Eine Studie der National Gallery in London ergab beispielsweise, dass die durchschnittliche Besuchsdauer der Besucher, die einen Audioguide nutzen, um 30% höher war als die derjenigen, die keinen Audioguide nutzen [Falk u. Dierking, 1997].



Abb.33: Audioguides im Metropolitan Museum of Art in New York



Abb.34: Leihheadsets für einen Audioguide im Museum Yad Vashem in Israel

## Interaktive Touchscreens

Touchscreens können auf verschiedene Weise gestaltet sein, von einfachen Text- oder Bildanzeigetafeln bis hin zu interaktiven Anwendungen, die den Besuchern ein immersives Erlebnis bieten. Ein Vorteil von interaktiven Touchscreens in Museen ist, dass sie die Besucher dazu ermutigen, aktiv teilzunehmen, zu lernen und zu entdecken, anstatt nur passiv zuzusehen.

Der Einsatz von interaktiven Touchscreens in Museen hat sich in den letzten Jahren stark verbreitet, da sie den Besuchern eine vielfältige Möglichkeit bieten, um mehr über Ausstellungstücke oder Themen zu erfahren. Zum Beispiel können Besucher in einem Kunstmuseum mit einem interaktiven Touchscreen mehr über den Künstler, die Techniken und die Geschichte des Kunstwerks herausfinden. In einem naturhistorischen Museum können Besucher einen interaktiven Touchscreen verwenden, um mehr über die Herkunft und Lebensweise von Tieren zu erfahren. (MuseumNext)

Oft werden interaktive Touchscreens auch spielerisch dazu verwendet, um das Wissen der Besucher mittels Rätsel oder Quiz abzufragen. Eine der größten Herausforderungen ist es, sicherzustellen, dass die Touchscreens robust und zuverlässig sind, da sie von vielen verschiedenen Besuchern benutzt werden. Weiters ist darauf zu achten, dass die Installationen einfach und intuitiv zu bedienen sind, um sicherzustellen, dass Anwender diese ohne Probleme und Vorwissen nutzen können.



Abb.35: Touchscreen für Museen, infoAktiv



Abb.36: Multitouch Tisch, „Deck 50“, Naturhistorisches Museum Wien

## Digitale Projektionen

Bei Projektionsinstallationen werden Bilder, Videos oder Animationen auf Wände, Decken oder andere Oberflächen wie einem Modell projiziert, um eine visuell beeindruckende Darstellung zu schaffen. Die Technologie kann auch genutzt werden, um den Raum in eine andere Welt oder Zeit zu transformieren und ein Gefühl von Eintauchen in die Interaktion zu schaffen.

In jüngerer Zeit haben Projektionsinstallationen in Museen auch von der Kombination mit Augmented Reality profitiert, um noch interaktiver und immersiver zu sein. Durch die Kombination von Projektionsinstallationen mit AR-Technologie können Besucher beispielsweise mit virtuellen Elementen innerhalb der Projektion interagieren oder zusätzliche Informationen und Kontexte in Echtzeit erhalten [Borowiecki u. Navarro, 2018].



Abb.37: Projektoren an der Decke, Nationalmuseum von Katar



Abb.38: Unprojiziertes Modell von Doha



Abb.39: Modell mit digital projizierter Information



Abb.40: Digitale Darstellung der Stadtentwicklung von Doha, Nationalmuseum von Katar in Doha

## Digitale & interaktive VR-Projektionen

Eine interaktive VR-Projektion ermöglicht den Museumsbesuchern nicht nur das reine Betrachten der Darstellungen, sondern auch eine Interaktion und Steuerung.

Im Museum Carnuntum (in Bad Deutsch-Altenburg, Österreich) hatten Besucher im Rahmen einer interaktiven Ausstellung die Möglichkeit, nicht nur Darstellungen zu betrachten, sondern diese auch zu steuern und mit den Inhalten zu interagieren. Ein herausragendes Beispiel dieser Art von Ausstellung war die VR-Projektion des Forums in Carnuntum, die im Jahr 2006 präsentiert wurde. Die Visualisierung wurde auf einer 2m x 6m großen Leinwand dargestellt und war Teil der Jubiläumsausstellung „Adler & Druidenstab“. Die Projektion basierte auf Informationen und Erkenntnissen aus der Prospektion der archäologischen Stätte durch den Einsatz von geomagnetischen Messungen und Georadar. In einem ersten Schritt wurde eine 3D-Rekonstruktion des Forums erstellt. Dabei wurden verschiedene Elemente des Forums wie Säulen, Mauern und Gebäude, mithilfe von Computerprogrammen modelliert. Die Projektion der VR-Darstellung des Forums in Carnuntum bot den Besuchern ein immersives Erlebnis, bei dem sie nicht nur als passive Betrachter agierten, sondern auch aktiv in die Darstellung eingreifen konnten. Durch im Raum verteilte Lautsprecher wurden Gespräche und Konversationen in lateinischer Sprache, mit deutschen Untertiteln, integriert. Die Besucher konnten somit die lateinischen Dialoge in Echtzeit verfolgen und sich dadurch ein noch besseres Bild von der Atmosphäre des Forums machen [Ferschin, 2021].



Abb.41: 3D-Rekonstruktion des Forums



Abb.42: Forum, Blick auf die Tempelanlage

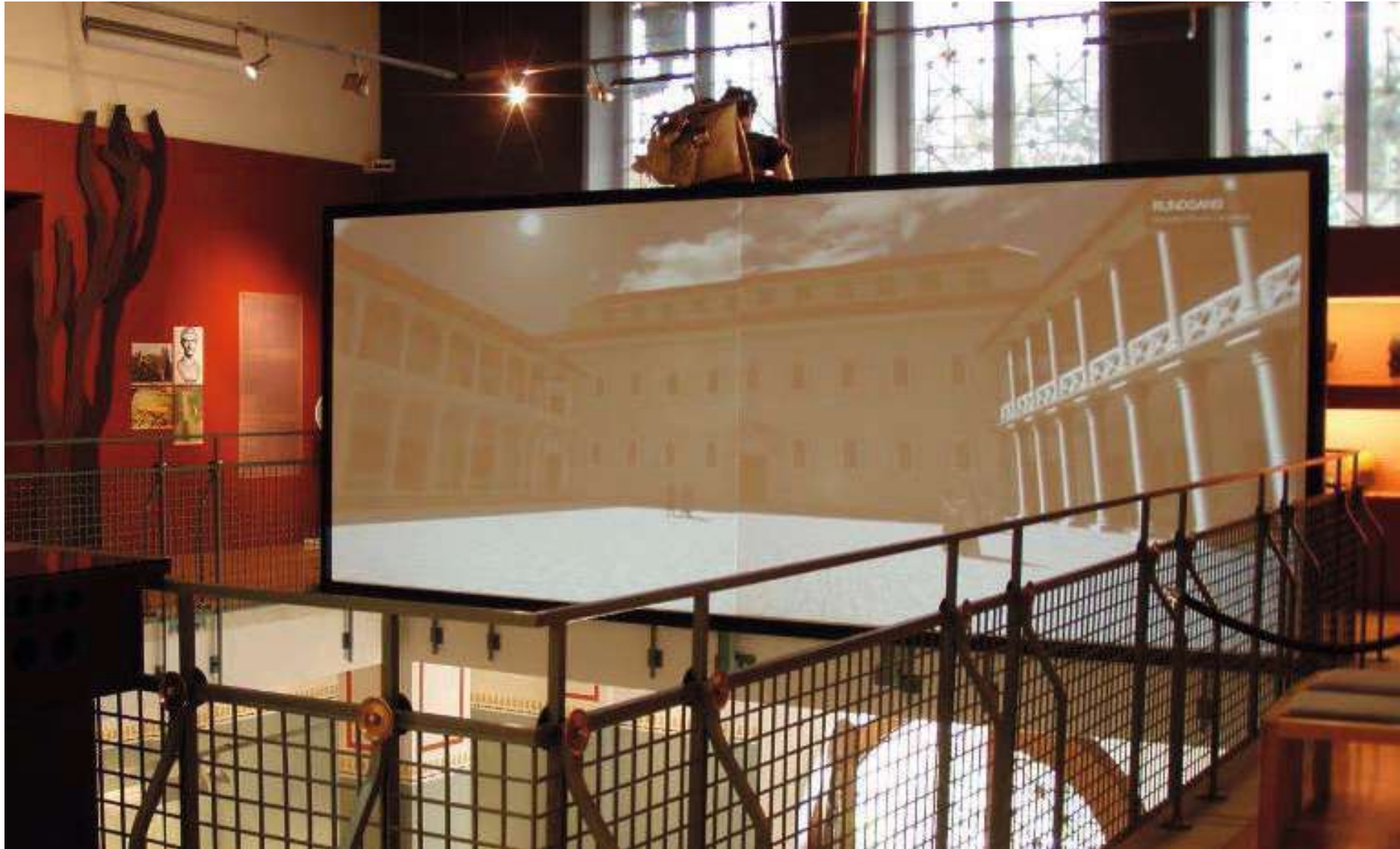


Abb.43: Großprojektion und interaktive Virtual Reality-Visualisierung des Forums innerhalb der Ausstellung „Legionsadler & Druidenstab“, Museum Carnuntinum, Österreich





Abb.44: Ausschnitt einer VR-Applikation der Grabstätte von Königin Meret Neith in Abydos (Ägypten), Sara Treccarichi Scavuzzo

## Virtual Reality (VR)

Mithilfe von Virtual Reality können Museen ihre Besucher in eine digitale, virtuelle Welt versetzen, die eine lebensechte Erfahrung bietet und es ihnen ermöglicht, die Geschichte und die Objekte aus einer völlig neuen Perspektive zu erleben. Zum Beispiel kann in einem historischen Museum mit Hilfe von VR-Technologie in die Vergangenheit geeist und die Ereignisse miterlebt werden, die in der damaligen Zeit stattgefunden haben [Matchar, 2017]. VR kann auch dabei helfen, Objekte und Kunstwerke in Museen auf einer neuartige Weise zu präsentieren, die mit herkömmlichen analogen Methoden nicht möglich wäre. So können 3D-Modelle von antiken Skulpturen oder Ausgrabungsgegenstände erstellt werden, die Besucher dann aus verschiedenen Blickwinkeln betrachten und mit ihnen interagieren können.

Eine weitere Möglichkeit, VR in Museen einzusetzen, besteht darin, virtuelle Führungen durch die Ausstellungen anzubieten. Auf diese Weise können Personen das Museum erkunden, ohne physisch anwesend zu sein. Dies kann in Zeiten von Einschränkungen durch Schließungen aufgrund von Pandemien oder Museumsumbauten von Vorteil sein.

Ein wichtiges Element für die Implementierung von Virtual Reality in einem Museum ist die Hardware, einschließlich der VR-Brillen und des dazugehörigen Zubehörs. Es gibt verschiedene Arten von VR-Headsets, die für unterschiedliche Anforderungen und Budgets geeignet sind. Die bekanntesten Hersteller von VR-Hardware sind Meta (vormals Facebook), HTC, HP und Sony.



Abb.45: Modell mit digital projizierter Information



Abb.46: Besucher tauchen in eine virtuelle Welt ein

## Anwendung von Augmented Reality in Museen

In den letzten Jahren haben sich Museen auf der ganzen Welt bemüht, ihre Besuchererfahrung durch den Einsatz neuer Technologien zu verbessern. Eine der neuesten Technologien, die in Museen eingesetzt wird, ist Augmented Reality. AR ist eine Entwicklung, die es den Benutzern ermöglicht, digitale Informationen auf reale Umgebungen zu projizieren. In Museen ermöglicht Augmented Reality den Besuchern, zusätzliche Informationen und Kontext zu Ausstellungsstücken zu erhalten und interaktive Erlebnisse zu schaffen. Die Verwendung von AR in Museen kann auch dazu beitragen, das Interesse der Besucher zu erhöhen, indem sie ihnen ein einzigartiges und unterhaltsames Erlebnis bietet. AR-Technologie kann auf verschiedene Weise in Museen eingesetzt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, AR-Brillen, Smartphones oder Tablets zu verwenden, um digitale Informationen auf die reale Umgebung zu projizieren. Eine andere Möglichkeit besteht darin, spezielle AR-Installationen zu schaffen, die den Besuchern ein interaktives Erlebnis bieten. Beispiele für AR-Installationen in Museen sind AR-gestützte Audioguides, AR-basierte interaktive Karten und AR-gestützte Führungen (Robin de Peyer, 2014).

Ein Beispiel für ein Museum, das AR-Technologie einsetzt, ist das lettische Nationalmuseum. Die eigene Museums-App enthält Informationen über die Sammlungen des Museums. Die Besucher können damit Audioführungen, virtuelle Ausstellungen und andere digitale Inhalte auf ihren Smartphones oder Tablets ange-

zeigt bekommen. Die Funktionen der App umfassen unter anderem einen interaktiven Museumsplan, der es einem ermöglicht, sich innerhalb des Museums zurechtzufinden sowie detaillierte Informationen zu den Kunstwerken und Künstlern in den Ausstellungen.<sup>10</sup>



Abb.47: Lettisches Kunstmuseum - eine App führt durch die Ausstellung

## Vorteile:

Augmented Reality bietet Museen einige Vorteile. Zum einen kann den Besuchern ein interaktives und immersives Erlebnis geboten werden, das sie tiefer in die Ausstellung eintauchen lässt. Zum Beispiel kann AR den Besuchern ermöglichen, historische Ereignisse oder Architektur aus verschiedenen Blickwinkeln und Zeitachsen zu betrachten und zu verstehen. AR kann auch dabei helfen, Ausstellungsstücke besser zu verstehen, indem es ihnen zusätzliche Informationen oder Kontext diesen gezeigt wird.

Ein weiterer Vorteil von AR ist, dass es Museen oder Kulturstätten die Möglichkeit gibt, ihre Ausstellungen auf innovative Weise zu präsentieren und zu zeigen. AR kann genutzt werden, um Ausstellungsstücke lebendiger und interessanter zu gestalten und so das Interesse der Besucher zu erhöhen. Augmented Reality kann auch helfen, Exponate zugänglicher zu machen, indem virtuelle Touren durch die Räumlichkeiten angeboten werden.

AR kann insbesondere für jüngere Zielgruppen attraktiv sein, da sie oft eine größere Affinität zu neuen Technologien haben. Sie kann dazu beitragen, junge Besucher für Museen zu begeistern und ihnen ein einzigartiges und unterhaltsames Erlebnis zu bieten. Weiters trägt sie dazu bei, den Lerneffekt und das nachhaltige Wissen zu verbessern [Geroimenko, 2021].

## Nachteile:

Obwohl AR viele Vorteile für Museen bietet, gibt es auch einige Herausforderungen bei der Integration von AR-Technologien. Eine dieser Herausforderungen ist, dass die AR-Technologie noch nicht weit verbreitet ist und viele Besucher möglicherweise nicht über die erforderlichen Geräte verfügen, um AR zu nutzen. Dies setzt voraus, dass die Museen eigene Leihgeräte zur Verfügung stellen. AR-Installationen sind oft aufwendig und teuer, insbesondere wenn es darum geht, spezielle AR-Brillen oder Geräte zu kaufen oder zu mieten. Dies kann für kleinere Museen mit begrenztem Budget eine Herausforderung darstellen.

Eine weiteres Problem besteht darin, dass AR-Technologie manchmal als störend empfunden werden kann. Einige Besucher möchten möglicherweise die Ausstellung einfach analog durchwandern, ohne zusätzliche Gegenstände verwenden zu müssen. Andere Besucher können Schwierigkeiten haben, die AR-Technologie zu verwenden oder zu verstehen, was zu Frustration führen kann.

Die Installation und Wartung von AR-Geräten und -Software kann kompliziert sein und erfordert oft spezialisiertes technisches Wissen, um sicherzustellen, dass alles reibungslos funktioniert. Die Verwendung von AR-Technologie in Museen kann auch technische Probleme verursachen. Beispielsweise kann es Schwierigkeiten mit der Verbindung von Geräten geben oder die AR-Anwendung kann instabil sein. Das kann dazu führen, dass Besucher enttäuscht sind und die Attraktivität des Museums beeinträchtigt wird [Geroimenko, 2021].

## Carnuntum-App, Österreich

In den letzten Jahren hat die Verwendung von Augmented Reality dazu beigetragen, das Erlebnis der Besucher zu verbessern und ihnen zu ermöglichen, die Geschichte und Architektur von Carnuntum (Österreich) auf interaktive und immersive Weise zu erkunden. Die Carnuntum App wurde vom Archäologischen Park Carnuntum entwickelt. Die App bietet verschiedene AR-Erfahrungen an verschiedenen Orten innerhalb des Parks, einschließlich des Amphitheaters, der Thermen und des Stadtviertels. Durch die Nutzung von AR-Technologie können Besucher virtuelle Rekonstruktionen von Gebäuden und Denkmälern sehen, wie sie während der Römerzeit ausgesehen haben (Carnuntum App, 2023).

## Revivre-APP, Frankreich

Das Naturhistorische Museum in Paris hat ein Projekt namens Revivre ins Leben gerufen, das eine Reihe von Exponaten mit Hilfe von Augmented Reality zum Leben erweckt.

Die Besucher können mit der Revivre-App auf ihren Smartphones oder Tablets bestimmte Tierpräparate im Museum scannen und sehen, wie sich das Tier in seiner natürlichen Umgebung bewegt. Dazu wurden 3D-Animationen und Audioaufnahmen von Tieren in freier Wildbahn erstellt und in die AR-Anwendung integriert [Charlotte Coates, 2022], [Revivre App, 2023].



Abb.48: AR in-situ Darstellung in Carnuntrum



Abb.49: Ausgestorbene Tierarten in der Revivre App

## Smartify-App, mehrere Museen

Die Smartify-App ist eine mobile Anwendung, die es Benutzern ermöglicht, Kunstwerke in Museen und Galerien auf der ganzen Welt zu erkunden und mehr darüber zu erfahren. Die App nutzt Bilderkennung, um Kunstwerke zu identifizieren und detaillierte Informationen darüber zu liefern. Sobald ein Kunstwerk gescannt wurde, kann der Benutzer eine Vielzahl von Informationen abrufen wie den Namen des Künstlers, das Datum und die Technik des Kunstwerks sowie zusätzliche Informationen über die Bedeutung und Geschichte des Kunstwerks. Die Smartify-App ist in verschiedenen Sprachen verfügbar und hat Partnerschaften mit Museen auf der ganzen Welt, darunter das Rijksmuseum in Amsterdam, die National Gallery in London und das Metropolitan Museum of Art in New York City [Smartify App, 2023].

## Story of the Forest, Singapur

„Story of the Forest“ ist eine interaktive Installation im Museum, die auf 69 chinesischen Tuschezeichnungen aus dem 17. Jahrhundert basiert. Die Besucher können durch eine virtuelle Waldlandschaft wandern und die animierten Zeichnungen erleben. Die Installation nutzt moderne Technologien wie Projektionen und künstliche Intelligenz, um eine immersive Erfahrung zu schaffen und wird durch Audioeffekte und Musik verstärkt [Story of the Forest, 2023].



Abb.50: Informationen über ein Gemälde via AR App



Abb.51: Projezierte Tuschezeichnungen



Abb.52: Wüsengebirge mit Blick Richtung Wadi, Abydos

# PILGERSTÄTTE ABYDOS





Mittelmeer

Alexandria

Israel

Jordanien

Kairo

Nil

Saudi-Arabien

Libyen

Ägypten

Assiut

Sohag

Abydos

Luxor

Rotes Meer

Assuan

Abu Simbel

Sudan

## Abydos

Abydos, eine im Verwaltungsbezirk Sohag liegende Stadt, gilt als eine der bedeutendsten archäologischen Stätten in Ägypten. Sie war einer der wichtigsten Orte für die Verehrung des Gottes Osiris und ein wichtiger Pilgerort für Totenprozessionen im alten Ägypten. Abydos liegt in etwa 500 km südlich von Kairo und 160 km nördlich von Luxor, wo sich das Tal der Könige befindet. Es liegt nicht direkt am Nilufer, sondern 15 km westlich der am Nil liegenden Stadt El-Balyana am Rande der Sahara. Charakteristisch in dieser Gegend sind die zahlreichen, aus roten Ziegeln erbauten, Häuser der heutigen Bevölkerung. Mit Löchern in den Wänden und halbfertigen Geschossen würde man meinen, dass sich hier jedes Haus noch im Bau befindet. In einer Gegend, wo jedoch kaum Niederschlag und meist moderate Temperaturen herrschen, ist dies eine ausreichende und bewährte Bauart. Herausstechen die meist in hellem weiß gehaltenen und mit farbigen Lichtern geschmückten Minarette der Moscheen. Wo es möglich ist, werden durch geschickt angelegte und vom Nil gespülte Kanalanlagen Flächen zum Ackeranbau bewirtschaftet.

Tagesbesucher sind meist Teil einer Bus- oder Nilreisegruppe und bleiben auf dem Weg nach oder von Luxor für einen kurzen Zwischenstopp in Abydos stehen, um die Totentempel Sethos I und den im Anschluss befindlichen Osireion, ein Tempel, der zu Ehren des ägyptischen Totengottes Osiris erbaut wurde, zu besichtigen.

Abb.53: Lageplan der ägyptischen Stadt Abydos

## Der Nil

Der Nil gilt schon seit langer Zeit als Lebensader der Ägypter. Von Süden beginnend schlängelt sich der mit etwa 6.500 km längste Fluss der Welt durch das gesamte Land, bis er im Norden in das Mittelmeer mündet. Durch sein Wasser entstanden mit der Zeit fruchtbare Böden, die als Nahrungsquelle für frühe Ansiedlungen dienten. Eine Großzahl der ägyptischen Tempelanlagen und historischen archäologischen Stätten liegen nahe des Nils und zeigen uns noch heute die alten Strukturen der frühen Geschichte des Landes.

## Tempel Sethos I und Osireion

Die Tempelanlage wurde von Sethos I., Sohn von Ramses I, in Auftrag gegeben. Der Tempel ist dem Gott Osiris gewidmet und diente als Ort der Bestattung und Verehrung des Pharaos nach seinem Tod. Er befindet sich im Zentrum von Abydos und teilt die Stadt in zwei Hälften. Im Norden führt ein weitläufiger, terrassenartiger Vorplatz, auf dem einige Überreste des früheren Eingangsportals zu sehen sind, Richtung dem zur Wüste hin orientierten Haupttempel. Im Tempelinneren befinden sich mehrere Säulenhallen mit imposanten Wandinschriften und Darstellungen von rituellen Handlungen in der ägyptischen Geschichte. Der Tempel ist bekannt für seine aufwendigen Reliefs und Inschriften, die die militärischen Siege und die Regierungsgeschäfte von Sethos I. abbilden. Auffallend sind die mit der Zeit etwas verblassten, jedoch ungewohnt farbenfrohen, Malereien an den Wänden. Durch den Tod von Setos I vor der Fertigstellung wurde der Tempel von dessen Sohn Ramses II vollendet. 2004 wurde die Anlage umfangreich restauriert und wieder zugänglich gemacht. Südlich des Tempels Sethos I. befindet sich das im Jahr 1902 durch die britischen Ägyptologin Margaret Alice Murray und den britischen Ägyptologen Flinders Petrie entdeckte Osireion. Im Gegensatz zum Totentempel des Sethos I. wurde das Osireion aus schmucklosen riesigen Granitblöcken, die eine Länge von bis zu 3 Meter aufweisen, in den Untergrund gebaut. Die damalige Überdeckung des Hügelgrabes ist heute nicht mehr vorhanden, sodass das Osireion nach oben hin offen ist. Ägyptologen gehen davon aus, dass in diesem Tempel Opfergaben während der Prozessionen, die in dieser Umgebung zu Ehren des Totengott Osiris stattfanden, dargeboten wurden [O'Connor, 2011].



Abb.54: Relief im Totentempel Sethos I, Abydos, Ägypten



Abb.55: Osireion, Abydos, Ägypten



Abb.56: Totentempel Sethos I, Abydos, Ägypten



Abb.57: Blick über teilweise freigelegte Gräber in Umm el-Qaab, Abydos, Ägypten

# KÖNIGSGRÄBER UMM EL-QAAB

## Die Königsgräber in Umm el-Qaab

Umm el-Qaab ist eine archäologische Stätte 1100 m südöstlich von Abydos. Sie ist bekannt als das Grabfeld der frühen Pharaonen und enthält die Gräber von mehreren früheren Herrschern aus der 1. Dynastie (um 3000 v.Chr.). Die Königsgräber wurden im 19. Jahrhundert vom französischen Archäologen Émile Amélineau entdeckt, der vor allem im Bereich des Friedhofs mit der Bezeichnung „U“ tätig war und später vom britischen Archäologen William Flinders Petrie weiter ausgegraben und dokumentiert [Wilkinson, 1999]. Die frühen Gräber in Umm el-Qaab waren einfach gestaltet und wurden aus Lehmziegeln gebaut, während spätere Gräber in der 1. Dynastie aus Stein gebaut wurden und komplexere architektonische Merkmale aufwiesen. Weiters konnte durch Funde während den Grabungen die Entwicklung der Hieroglyphenschrift zu dieser Zeit dokumentiert werden.

Die Grabanlage zeichnet sich durch ein weitläufiges Scherbenmeer aus zerbrochenen Tontöpfen und Schalen aus, die als Opfergaben während den späteren Prozessionen in der 19. Dynastie zu Ehren des Totengott Osiris mitgebracht wurden [Petrie u. Griffith, 1901].

Abb.58: Lageplan der Königsgräber von Umm el-Qaab  
Friedhof U mit 650 Einzelgräbern aus prädynastischer Zeit  
Friedhof B mit den Gräbern von Irh-Hor, Ka, Narmer  
Gräber von Djer (O), Peribsen (H), Wadji (Z), Adjib (X), Meret Neith (Y), Dewen (T), Semerchet (U), Qa´a (Q), Chasechemui (V)  
[Müller, 2006]

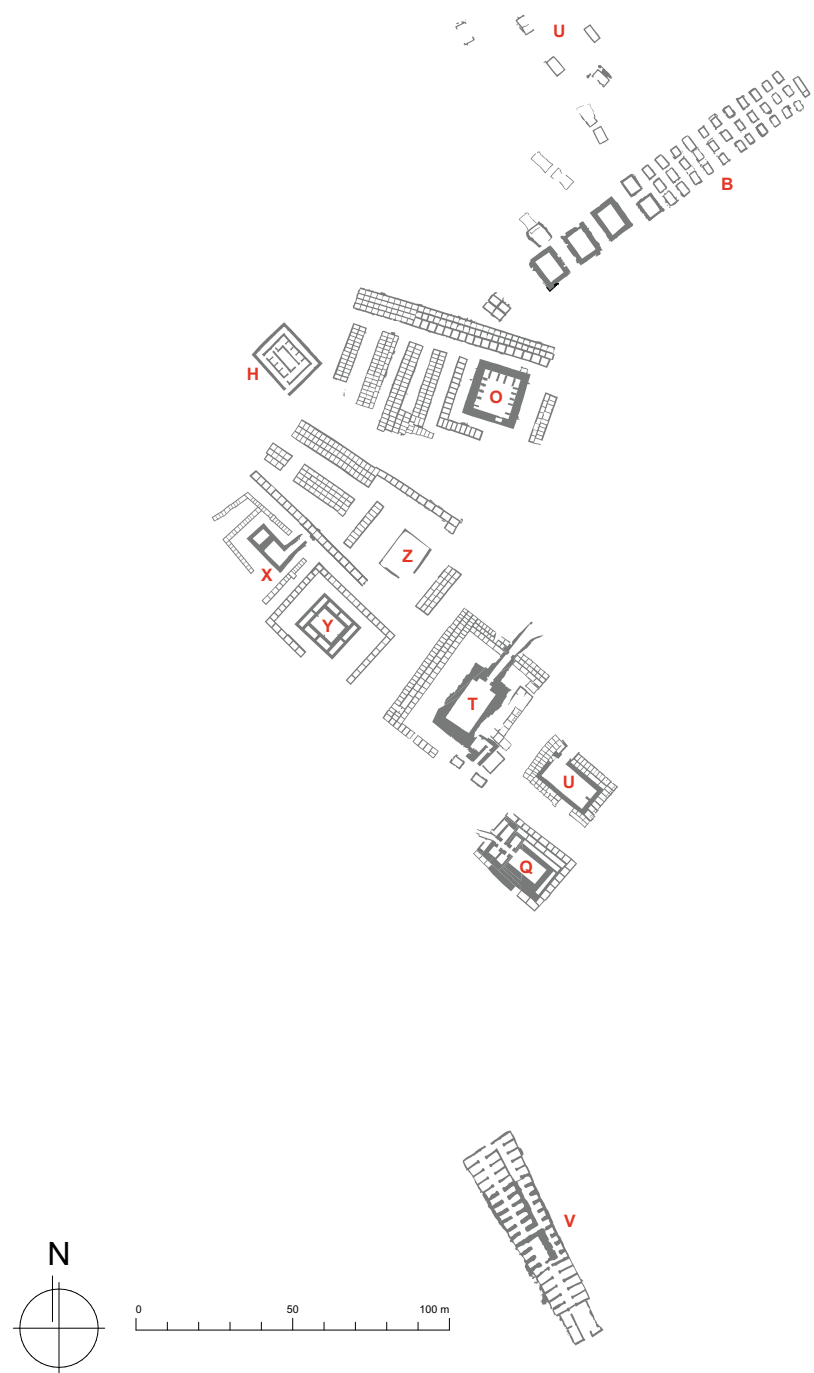




Abb.59: Petrie Flinders bei Ausgrabungen in Umm el-Qaab, Abydos

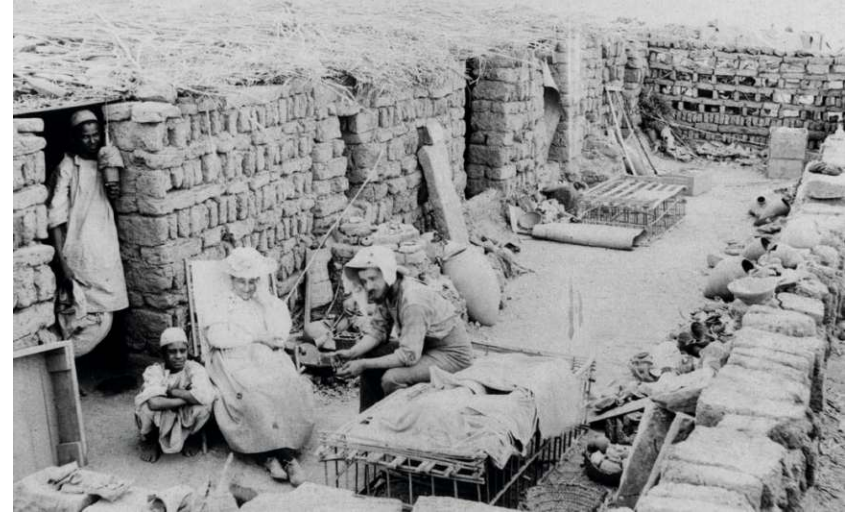


Abb.60: Flinders und Hilde Petrie in Abydos



Abb.61: Grab O (Djer) Umm el-Qaab, Abydos



Abb.62: Grab T (Dewen) Umm el-Qaab, Abydos





Abb.63: Grab Y von Königin Meret Neith in Abydos, Ägypten mit der freigelegten Hauptkammer



# MERET NEITH GRABY

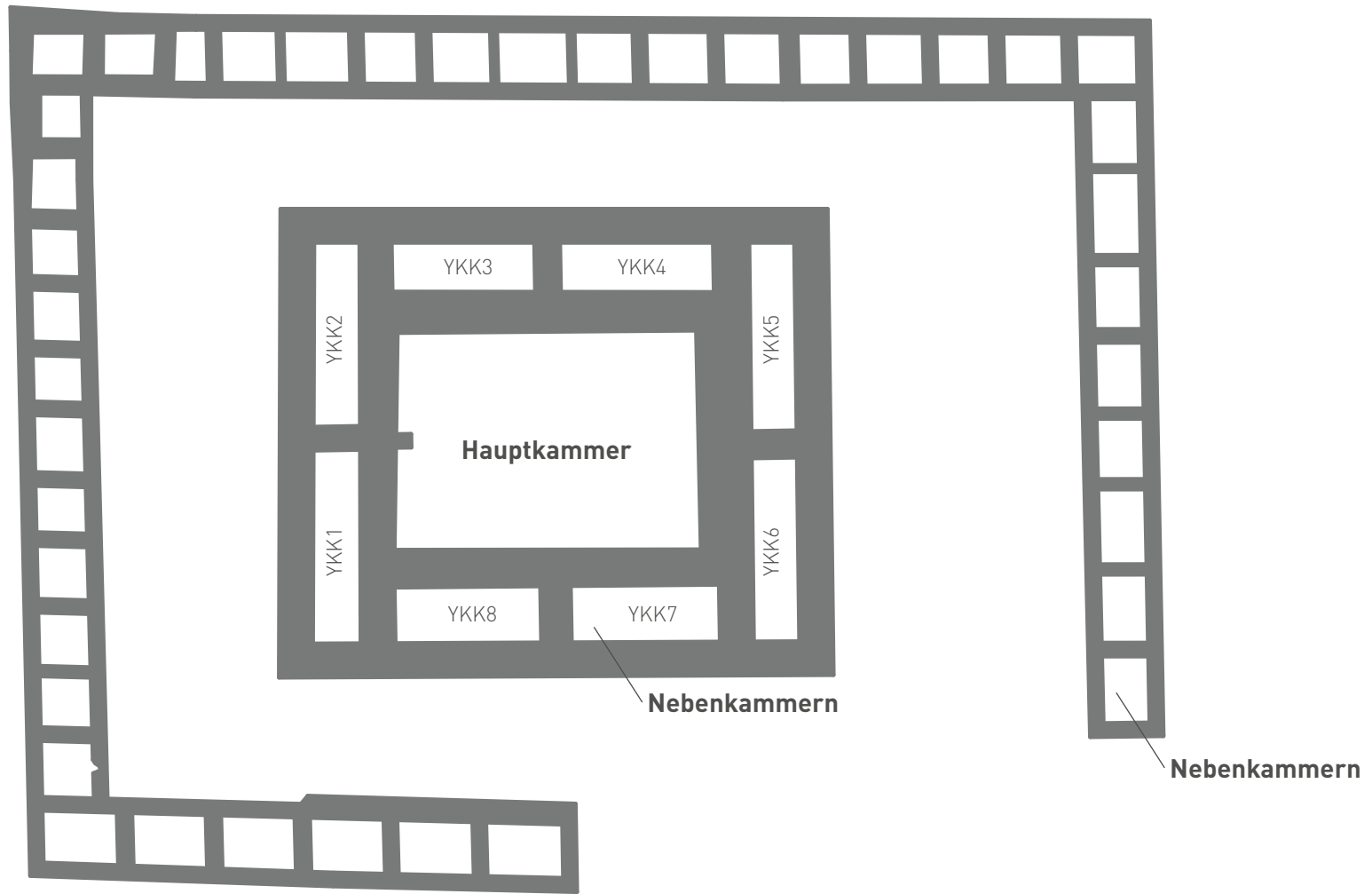
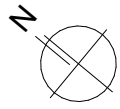


Abb.64: Schemagrundriss Grab Y, grafische Aufbereitung der Grundrisskizzen von Flinders Petrie, M 1:200

## Meret Neith, Grab Y

Am Anfang des 20. Jahrhundert wurde das Grab mit der Bezeichnung Y von Flinders Petrie in einer dreiwöchigen Kampagne ausgegraben und erforscht. Es wird als einziges Grab in Umm el-Qaab einer weiblichen Herrscherin namens Meret Neith (Merneith) zugeschrieben. Meret Neith war eine Königin des Alten Ägypten, die während der 1. Dynastie herrschte. Es wird angenommen, dass sie die Frau des Königs Djet und die Mutter von Den, dem ersten Pharao der 2. Dynastie war [Tyldesley, 2006]. Ihr Grab enthält viele wichtige Artefakte, darunter eine Stele, auf der sie als „Königin des Südens und des Nordens“ bezeichnet wird und die heute im Ägyptischen Museum in Kairo aufgestellt ist. Weiter gibt es Anzeichen dafür, dass sie als Regentin während der Regierungszeit ihres Sohnes Den tätig war [Dodson, 2016].

Grab Y liegt in unmittelbarer Nähe zum Grab des König Dewen (Den), das bereits in früheren Kampagnen des Deutschen Archäologischen Institutes ausgegraben wurde und im Gegensatz zu den anderen Grabanlagen in Umm el-Qaab nicht wieder mit Sand überdeckt wurde.

Das Grab von Meret Neith besteht aus einer Hauptkammer mit den Maßen 9,05 m x 6,42 m, die von acht, direkt angebauten Nebenkammern umschlossen ist. Mit einem Abstand zur Hauptkammer gibt es einen Ring aus 41 weiteren Nebenkammern, in denen königliche Bedienstete begraben wurden, um der Königin in der Totenwelt zu dienen. Die Dicke der Außenwände beträgt an der stärksten Stelle 125 cm.

## „Ein König ohne Königin ist undenkbar.“

Flinders Petrie

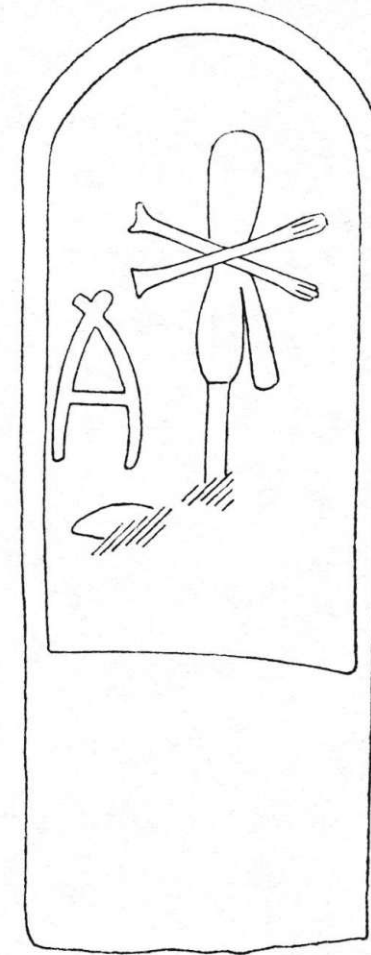


Abb.65: Grabstele der Königin Meret Neith aus Abydos, nach Emery

## Digitalisierung des Grabes von Meret Neith

Die Ausgrabung und Dokumentation des Grabes von Meret Neith wurde in bisher zwei Kampagnen in den Jahren 2021 und 2022 in einer Kooperation zwischen dem Deutschen Archäologischen Institut, der Universität Wien und der Technischen Universität Wien durchgeführt. Insgesamt umfasst das Projekt fünf Kampagnen, wobei eine davon als Museumskampagne konzipiert ist, um Artefakte beziehungsweise Funde, die dem Grab Y zugeschrieben werden und in Museen ausgestellt sind, ebenfalls zu dokumentieren und zu digitalisieren.

Die Gesamtprojektleitung und die Grabungsleitung in Abydos seitens der Universität Wien wird von Frau Christiana Köhler durchgeführt. Weitere Teammitglieder bei den vorangegangenen Kampagnen waren Friederike Junge (Ägyptologisches Institut Wien), Amber Hood (Universität Lund) sowie Studenten der Ägyptologie an der Universität Wien.

Für die digitale Aufnahme und fotogrammetrische Rekonstruktion des Grabes von Meret Neith ist ein Team der Technischen Universität Wien zuständig. In den bereits abgeschlossenen Kampagnen 2021 und 2022 wurden Teammitglieder aus verschiedenen Fachbereichen zusammengestellt. Dieses umfasste Projektleiter Peter Ferschin, Professor am Institut für Digitale Architektur und Raumplanung an der TU Wien, Karl-Johann Mayer (Fotograf), Bálint István Kovács (Programmierung, Computerwissenschaften) sowie Sara Treccarichi und Florian Sövegjarto (Studierender des Lehrgangs Master Architektur).

Die Arbeiten bei den ersten beiden Kampagnen wurden vom Grabungshaus des Deutschen Archäologischen Institut (DAI) durchgeführt, in dem auch sämtliche Artefakte dokumentiert, katalogisiert und gelagert wurden. Das Grabungshaus befindet sich in etwa fünf Autominuten von der Grabungsstelle des Grab Y entfernt zwischen der Stadt Abydos und der Grabanlagen in um el-Qaab. Wegen der großen Hitze in der Wüste, die oftmals bis zu 45° betragen kann, beschränkten sich die Arbeiten auf der Ausgrabung meist auf die Vormittagsstunden.

Aufgrund der Beschaffenheit und der sensiblen Lehmziegelstruktur des Grabes war es notwendig, die Datenaufnahme für die Digitalisierung des Grabes von Meret Neith parallel zum Fortschritt der Ausgrabungstätigkeiten der Ägyptologen durchzuführen. Nach der Entfernung und Siebung der sogenannten Halde, der schützenden Sandschicht über dem Grab, und der Freilegung der Kammern wurden diese nach und nach fotogrammetrisch aufgenommen und dokumentiert. Während der Grabungsphase wurden Zwischenschritte von Funden in situ, der ursprünglichen Position, aufgenommen, um später eine digitale Lage der Funde einzutragen.



Abb.66: Freilegung der Mauerkronen



Abb.67: Einmessen der Höhenlage der Mauerkronen



Abb.68: Siebung der sogenannten Halde



Abb.69: Digitalisierungsteam der TU Wien, v.l.n.r. Sara Treccarichi Scavuzzo, Peter Ferschlin, Bálint István Kovács, Florian Sövegjarto (Verfasser), Karl-Johann Mayer



## **Digitalisierungsteam der TU Wien**

### **Peter Ferschin**

Projektleiter Digitalisierung und Visualisierung, GCD Institut, TU Wien

### **Bálint István Kovács**

PhD Student im Fachgebiet Computerwissenschaften, GCD Institut, TU Wien

### **Karl-Johann Mayer**

Fotograf, GCD Institut, TU Wien

### **Sara Treccarichi Scavuzzo**

Masterstudentin Architektur, TU Wien

### **Florian Sövegjarto** (Verfasser)

Masterstudent Architektur, TU Wien



## Fotogrammetrische Datenaufnahme

Bevor mit der Datenaufnahme am Grab selbst begonnen wurde, wurden verschiedene Aufnahmetechniken, Materialtests sowie ein Test der vorhandenen technischen Geräten durchgeführt. Dies beinhaltete Testaufnahmen mit einer Sony Spiegelreflexkamera sowie einem iPhone 12 Max Pro und einem iPhone 13 Pro. Vorab wurden hierbei Modelle mit 1TB Speicherplatz gewählt, um eine hohe Speicherkapazität zu gewährleisten. Wichtig war, dass die erstellten Fotos scharf dargestellt waren und kein Bildrauschen oder Unschärfe aufwiesen. Durch die kleine Bauart der Smartphones und der schnellen Aufnahmegeschwindigkeit wurden diese im Rahmen des Projekts zur Datenaufnahme herangezogen.

Die Aufnahme der Einzelkammern des Grab Y erfolgte in mehreren Etappen. Je nach Fortschritt der Ausgrabung seitens der Ägyptologen und Grabungsarbeiter wurden Aufnahmen von Zwischenschichten, die interessante archäologische Informationen wie Keramikgefäße insitu (original Position beim Auffinden) aufwiesen, aufgenommen. Nach dem Entfernen der kompletten Sandschicht einer Kammer wurde diese in einem Zuge komplett aufgenommen. Dies beinhaltete sämtliche Wände, Wandvertiefungen, Artefakte, Mauerkronen sowie die Bodenflächen. Die Aufnahme einer Nebenkammer dauerte in etwa zwei bis drei Stunden, sodass an einem Aufnahmetag maximal eine oder zwei Kammern erfasst werden konnten.

Zwischen den Aufnahmen der einzelnen Kammern wurden bereits erste Berechnungen des 3D-Modells erstellt, um die praktizierte Technik der Datenaufnahme zu überprüfen und gegebenenfalls nachzuschärfen.

An den jeweils letzten Tage der Kampagnen wurden nochmals sämtliche vorhandenen Mauerkronen von den Grabungsarbeitern gereinigt und zusätzlich in einem Schritt fotogrammetrisch aufgenommen. Dies beinhaltete auch Fotos aus höheren Blickwinkeln und mit größeren Bildausschnitten. Diese Abbildungen haben wir mithilfe eines Hochstatives aus bis zu 10 Metern Höhe angefertigt. Da diese Fotos lediglich für das bessere Zusammenetzen der Daten vorgesehen waren, konnten diese ohne besondere Beschattungsmaßnahmen durchgeführt werden.

**Kampagne I:** 16.10.2021 - 06.11.2021 (20 Tage in Abydos)

Datenaufnahme der Nebenkammern YKK5, YKK6, YKK7 und YKK8.

Aufnahme von Funden (z.B.: Vasen, Gefäße, Perlen, Lehmverschlüsse)

**Kampagne II:** 02.04.2022 - 17.05.2022 (13 Tage in Abydos)

Datenaufnahme der Nebenkammern YKK1, YKK2, YKK3, YKK4 sowie der Hauptkammer YKK.

Aufnahme von Funden (z.B.: Vasen, Gefäße, Perlen, Lehmverschlüsse)

**Kampagne III:** 02.04.2023 - 17.04.2023 (13 Tage in Abydos)

Datenaufnahme weiterer Nebenkammern

**Kampagne IV:** geplant Durchführung im Herbst 2023

## Ablauf der Datenaufnahme der Grabungskampagnen in Abydos

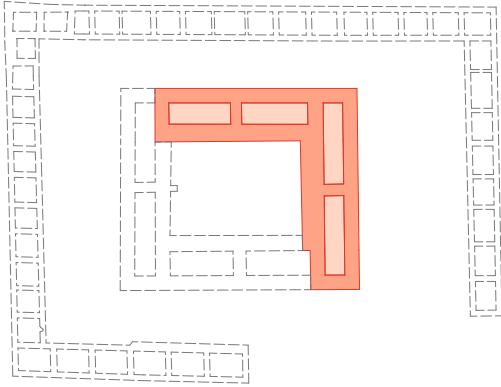


Abb.70: Datenaufnahme Kampagne 1

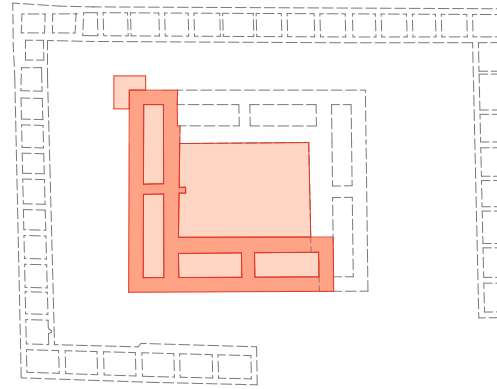


Abb.71: Datenaufnahme Kampagne 2

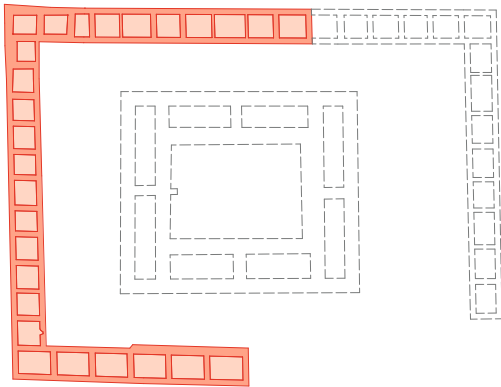


Abb.72: Datenaufnahme Kampagne 3

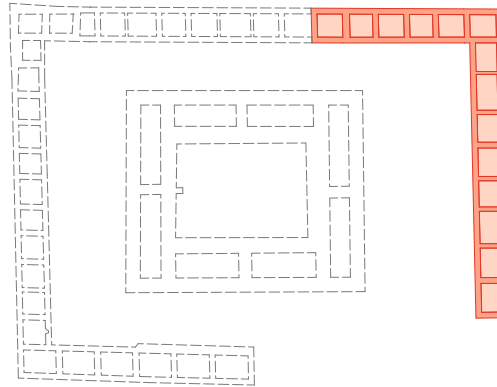


Abb.73: geplante Datenaufnahme Kampagne 4

## Beschattungsstrategie

Zur Vermeidung von Schatten durch die direkte Sonneneinstrahlung, wurden weiße Beschattungssegel aus Leintüchern in verschiedenen Größen verwendet. Diesbezüglich wurden verschiedene Stoffe und Materialien auf ihre Durchlässigkeit und Diffusität getestet, um das am besten geeignete Material für die Beschattung zu finden. In der ersten Kampagne wurden hierbei weiße Leintücher verwendet, da die mitgebrachten Folien sich in der Wüste als nicht geeignet herausstellten. Durch die einzelnen Bereiche, die gemeinsam fotogrammetrisch aufgenommen wurden, war es notwendig, mit der Beschattung dem Sonnenverlauf zu folgen und einen möglichst großen Bereich abdecken zu können. Hierbei musste auf eine exakte Koordination zwischen den Fotografen und den Helfern, die das Beschattungssegel positionierten, geachtet werden. Aufgrund der Dimension der Hauptkammer YKK bei der zweiten Kampagne, wurde ein flächenmäßig größeres Beschattungssegel verwendet als bei der ersten Kampagne. Dies ermöglichte eine schnellere und effizientere Aufnahme der Grabkammer.

An der Ausgrabungsstätte lagen die Temperaturen im Schatten meistens zwischen 35° und 40° Celsius. Das war insbesondere die Aufnahmegерäte (iPhone 12 Pro Max und iPhone 13 Pro) eine Herausforderung. Bei längerer Nutzung erwärmten sich die Geräte ziemlich schnell, sodass diese nicht mehr verwendet werden konnten. Um dem entgegenzuwirken, wurde eine Rotation der Geräte durchgeführt, sodass immer ein Gerät abkühlen konnte.



Abb.74: Testaufnahmen mit Beschattungstuch, ColorChecker und Marker



Abb.75: Beschattung der Nebenkammer YKK-5



Abb.76: Beschattungssegel für eine großfläche Abschattung des Grabes



Abb.77: Unterschiedliche Marker für die spätere Modellberechnung



Abb.78: ColorChecker und Marker mit fixem Abstand, Testaufnahmen



Abb.79: 36h11 AprilTag an den seitlichen Mauern der Hauptkammer



Abb.80: Platzierte Marker bei der Datenaufnahme

## Marker

Um ein reibungsloses Zusammensetzen (aligning) und eine korrekte Skalierung bei der fotogrammetrischen Berechnung sicherzustellen, wurden Marker in den Kammern ausgelegt und in den Fotoaufnahmen abgebildet. Diese Marker werden von fotogrammetrischen Programmen automatisch erkannt und ermöglichen eine präzise Positionierung der Aufnahmen im digitalen Raum. Um sicherzustellen, dass die Marker später nicht auf der Textur erscheinen, wurde für jede Kammer in einem zweiten Durchgang ohne Marker nochmals fotografiert. Dieser Schritt war notwendig, dass die Textur der Kammern später frei von störenden Elementen ist und eine korrekte Darstellung der Oberfläche ermöglicht wird. Im Zuge der ersten Kampagne wurden Marker von verschiedenen Marker-Familien verwendet, was sich später als nicht sehr effizient herausstellte, da die Erkennung der Marker in den Fotos mehrmals durchlaufen werden musste. Während der zweiten Kampagne wurde deshalb darauf geachtet, dass jeder Marker aus der selben Familie stammt und im digitalen Gesamtmodell keine mehrfache Anwendung eines Markers vorkommt. Hierbei wurden 36h11 Square AprilTags verwendet, die vor der Kampagne auf Hartschaumplatten gedruckt wurden.

Um später einen Überblick der verwendeten Marker zu haben, wurde bei jeder Verwendung eines Markers notiert, bei welcher Kammer und an welchem Tag dieser zum Einsatz kam. Dies war ein wichtiger Schritt, um eine präzise und konsistente Positionierung der Aufnahmen beim „aligning“ zu gewährleisten.

## Farbkalibrierung

Bei der Datenaufnahme für die Fotogrammetrie wurde besonderen Wert auf eine korrekte Farbwiedergabe gelegt. Hierfür wurde ein ColorChecker der Marke XRite verwendet, der insgesamt 24 Farbfelder besitzt. Vor jeder Aufnahme und vor jedem Wechsel der Lichtsituation wurde der ColorChecker ins Bild gehalten und eine Referenzaufnahme gemacht. Daraus ergaben sich Fotos für die Farbkalibrierung der Datenaufnahme. Mithilfe dieser Referenzfotos konnte sicherstellen werden, dass die Farben der Textur korrekt wiedergegeben wurden. Dies war besonders wichtig, da die korrekte Farbwiedergabe für die spätere Analyse und Auswertung der Daten eine entscheidende Bedeutung darstellte.

Zu erwähnen ist, dass sich das Umgebungslicht in den Morgenstunden besonders schnell geändert hat, sodass auch zwischen durch mehrmals ein Foto mit dem ColorChecker erstellt werden musste.

Die Kombination aus Marker-Positionierung und Farbkalibrierung gewährleistet eine hohe Genauigkeit und Konsistenz der fotogrammetrischen Daten. Dies ist entscheidend für die weiteren Analysen und Auswertungen und ermöglichen, exakte Ergebnisse zu erzielen.

## Fotogrammetrische Berechnung

Für die Erstellung des 3D-Modells wurden insgesamt 35.000 Fotos angefertigt. Diese wurden seperart den jeweiligen Kammern zugewiesen und in eigene Ordnerverzeichnisse gespeichert, um eine spätere Verwechslung der Kammern zu verhindern. Um eine korrekte Farbwiedergabe der Textur zu gewährleisten, wurden die Abbildung mit einem Fotobearbeitungsprogramm namens lightroom kalibriert und erneut abgespeichert.

Da die gesamte Berechnung der Punktwolke und des anschließenden 3D-Modells sehr viel Rechenleistung sowie eine lange Berechnungsdauer benötigt hätte, wurde das Grab in insgesamt 9 Teilen, den sogenannten Komponenten (components) berechnet. Zuerst wurden die Fotos der jeweiligen Kammern in das Programm Reality Capture (Epic) geladen und in weiterer Folge mit dem Erkennen (detecting) der Marker begonnen. Hierbei wird im Programm die Marker Familie, die erkannt werden soll, ausgewählt und ein automatischer Durchlauf gestartet. Bei der Verwendung von mehreren unterschiedlichen Marker Familien muss dieser Prozess mehrmals wiederholt werden. Aus diesem Grund wurden bei der zweiten Kampagne nur die Marker der Reihe Square April Tag 36 h11 verwendet. Nach dem Durchlauf und dem Erkennen der Marker wurde der Prozess zur Erstellung der Punktwolke gestartet. Hierbei erstellte das Programm aufgrund der Bildinformationen der verschiedenen Blickwinkel und den Merkmalen (Features) der Bildpunkte in den Fotos eine räumliche Struktur. Durch die Verwendung der AprilTag Marker konnte dieser Prozess aufgrund einer schnelleren Berechnung

stark verkürzt werden. Um zu vermeiden, dass bei den nächsten Arbeitsschritten die Marker eine falsche Geometrie oder Farbe der Textur verfälschen, wurden die Abbildungen auf denen Marker ersichtlich sind, für die nächsten Prozesse, dem Berechnen des 3D-Modells und der Erstellung der Textur, deaktiviert. Aus diesem Grund wurden bei der Datenaufnahme auch Fotos ohne Marker erstellt.

Bei der Erstellung des digitalen Abbildes errechnete Reality Capture aus der Punktwolke ein sogenanntes „mesh“, eine dreidimensionale Figur, die in Dreiecken aufgelöst ist. Anschließend wurde das 3D-Modell von Artefakten und unsauberen Kanten bereinigt. Aus dem farbkorrigierten Fotoquellen wurde im letzten Arbeitsschritt eine Textur für das Mesh generiert. Da aufgrund der hohen Polygonanzahl, also der guten Qualität, die die Ergebnisse aufwiesen, wurden hierbei mehrere 16k UV-Darstellungen generiert. Eine UV-Map ist ein 2D-Bild, das als Textur auf die Oberfläche eines 3D-Modells oder einer 3D-Form projiziert wird. Das „U“ und das „V“ repräsentieren hierbei die horizontalen und vertikalen Achsen der 2D-Texturkoordinaten [Hughes et al., 2013]. Die gesamten Arbeitsschritte benötigten ungefähr 8 bis 12 Stunden Berechnungszeit sowie etwa 4 Stunden Arbeitszeit pro Nebenkammer (Komponent).

Anschließend wurden alle neun Einzelkomponenten in einer Gesamtdatei zusammengeführt und ein 3D-Modell der bis zu diesem Zeitpunkt aufgenommenen Grabanlage erstellt. Dieser Vor-



Abb.81: Ergebnis der Punktwolkenberechnung YKK-2

gang benötigte sehr viel Rechenleistung, was wiederum mehrere Tage in Anspruch nahm. Die Gesamtzeit der fotogrammetrischen Berechnung und der Texturieren betrug in etwa 76,5 Stunden. [Scavuzzo, 2022] Als daraus resultierendes 3D-Modell konnte ein Mesh mit insgesamt 285 Millionen Polygonen und einer Textur mit 81 UV-Maps erstellt werden.

Für eine genauere Analyse des digitalen Abbildes des Grabes wurden zusätzliche orthografische Projektionen der Wand- und Bodenschichten erstellt. Diese wurden im Maßstab 1:1 für weitere Untersuchungen an die Ägyptologen übermittelt. Da die enorme Größe des Datenmodells und somit die im originalen Maßstab vorhandenen orthografischen Darstellungen zu zahlreichen Programmabstürzen führten, wurden die Ergebnisse auf ein Zehntel der Pixelauflösung reduziert. Auf den folgenden Seiten sind 1:1 Ausschnitte der jeweiligen Kammern dargestellt. Der Ausschnitt zeigt jeweils einen 130mm x 180mm großen Teilbereich der Orthofotos. In den verkleinerten Darstellungen ist die Position des Ausschnitts mit einem roten Rechteck verortet.

Für die Berechnung der Komponenten der Nebenkammern wurde folgendes PC Setup verwendet:

Windows 11, AMD Ryzen 9 5900X 12-Core Processor mit 3,70 Ghz, 64,0 GB Arbeitsspeicher, NVidia GTX 1080 TI Grafikkarte



# YKK-1



## YKK-1 | Kammer eins

Aufnahmedatum:	11.04.2022   Kampagne 2	
Fotos:	4979 registriert	
Kontrollpunkte:	6	
Bildpunkte:	Nordwand	75k px * 30k px
	Ostwand	30k px * 36k px
	Südwand	75k px * 30k px
	Westwand	30k px * 36k px
	Boden	75k px * 35k px

### Archäologischer Report:

Die Kammer Y-KK1 misst 5,39m x 1,38m mit einer Tiefe von 2,15m. Sie enthielt lockeren gelben Sand und nur sehr wenige Artefakte. Am Boden, der auf der Westseite teilweise erhalten geblieben war und aus Schlamm bestand, konnten keine Gefäßspuren festgestellt werden. Es befand sich ein großer Stein im Bereich der Nordwand. An den Wänden gab es nur sehr wenige Gefäßspuren. Es gab jedoch Fragmente von Tongefäßen, die zur Lagerung von Bier eingesetzt wurden. In Bodennähe der Ostwand konnte man erkennen, dass diese Wand auf einer Schicht aus Füllmaterial erbaut wurde. Dies würde darauf hindeuten, dass die Trennwand zwischen der Kammer Y-KK1 und Y-KK2 später als die Hauptwände erbaut wurde [Köhler, 2022].



Nordwand



Ostwand



Südwand



Westwand



Boden



Abb.83: Orthografische Projektionen YKK-1, M = 1:50

# YKK-2



## YKK-2 | Kammer zwei

Aufnahmedatum:	09.04.2022   Kampagne 2	
Fotos:	2739 registriert	
Kontrollpunkte:	7	
Bildpunkte:	Nordwand	66k px * 29k px
	Ostwand	29k px * 29k px
	Südwand	66k px * 29k px
	Westwand	29k px * 29k px
	Boden	54k px * 15k px

### Archäologischer Report:

Die Kammer Y-KK2 misst 5,13m x 1,20m mit einer Tiefe von 2,10m. Diese Kammer wurde von Günter Dreyer und seinem Team 2011 teilweise geräumt bis zu einer Ablagerung von Tongefäßen, die von Petrie zurückgelassen wurden. Bei den Plünderungen im Zuge der Aufstände 2011 wurden zahlreiche Tongefäße aus dem Boden gerissen und zerstört. Dank der SCA-Inspektoren wurden die Töpfe anschließend wieder in die Kammer gelegt und wieder aufgefüllt. Daher enthielt die obere Schicht aus Füllmaterial große Mengen an Tongefäßen aus der Spätzeit, darunter eine weitere Schicht aus intakten und fragmentierten Gefäßen aus der 1. Dynastie und kegelförmigen Lehmversiegelungen. Darunter kam eine scheinbare Primärablagerung von Tongefäßen, einschließlich intakter und vollständiger Töpfe für Wein und Gefäßversiegelungen. Die Gefäße befanden sich aufrecht nebeneinander im Zentrum des Raums. Bei drei von ihnen war die Versiegelung intakt. Die Gefäße wurden vor Ort aufgezeichnet, vollständig geborgen und zum Grabungshaus gebracht, wo sie sorgfältig von ihrem Inhalt befreit, gezeichnet und fotografiert wurden [Köhler, 2022].

Abb.84: 1:1 Ausschnitt YKK-2 Boden, Originalgröße



Nordwand



Ostwand



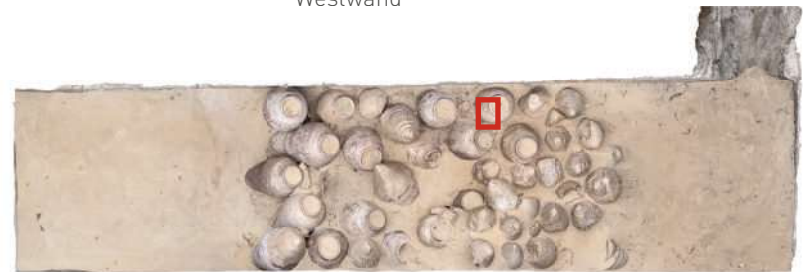
Südwand



Westwand



Boden



Zwischenschicht



Abb.85: Orthografische Projektionen YKK-2, M = 1:50

# YKK-3

## YKK-3 | Kammer drei

Aufnahmedatum:	04.11.2021   Kampagne 1	
Fotos:	2350 registriert	
Kontrollpunkte:	12	
Bildpunkte:	Nordwand	27k px * 17k px
	Ostwand	49k px * 27k px
	Südwand	27k px * 17k px
	Westwand	49k px * 27k px
	Boden	42k px * 14k px

### Archäologischer Report:

Die Kammer Y-KK3 misst 4,03m x 1,28m mit einer Tiefe von 2,02m. Diese Kammer wurde 2011 von Dreyers Team teilweise geräumt und anschließend wieder aufgefüllt. Sie enthielt feinen gelben Sand. Nur die oberen Teile der Wände zeigten Branderscheinungen, während das untere Niveau und der Boden nicht dem Feuer ausgesetzt waren. Überreste von Lehm auf dem Boden im nordöstlichen Eck deuten darauf hin, dass diese Kammer einen Lehm Boden hatte.

Es wurde eine bemalte, kursive Hieroglypheninschrift an der Nordwand dieser Kammer entdeckt, die bereits von Dreyer erwähnt wurde. Sie besteht aus drei Zeichen, einem zylindrischen Gefäß, einer Kobra und einer gehörnten Vipern-Schlange.

Weiters wurde verbranntes Holz unter den Lehmziegel der Dachkonstruktion entdeckt [Köhler, 2022].

Abb.86: 1:1 Ausschnitt YKK-3 Ostwand, Originalgröße



Westwand



Nordwand



Ostwand



Südwand



Boden



Abb.87: Orthografische Projektionen YKK-3, M = 1:50

# YKK-4

## YKK-4 | Kammer vier

Aufnahmedatum:	04.11.2021   Kampagne 1	
Fotos:	1581 registriert	
Kontrollpunkte:	10	
Bildpunkte:	Nordwand	27k px * 25k px
	Ostwand	57k px * 25k px
	Südwand	27k px * 25k px
	Westwand	57k px * 25k px
	Boden	45k px * 26k px

### Archäologischer Report:

Die Kammer Y-KK4 misst 4,31m x 1,38m mit einer Tiefe von 1,96m. Ihre Wände zeigen nur begrenzte Branderscheinungen an der Oberseite. Der obere Teil der westlichen Wand ist jedoch ziemlich beschädigt und schlecht erhalten. Die Kammer enthielt losen gelben Sand und zeigte in etwa 30 cm über dem Boden eine Ablagerung von etwa 5 verschiedenen Töpfergefäßen oder deren Fragmente. Ein Gefäß stand aufrecht und hatte noch Überreste von geknoteten Schnüren sowie einem massiven, konkaven Lehmverschluss erhalten, der auch Abdrucke von Siegeln trug [Köhler, 2022].

Abb.88: 1:1 Ausschnitt YKK-4 Westwand, Originalgröße



Westwand



Nordwand



Ostwand



Südwand



Boden



Zwischenschicht



Abb.89: Orthografische Projektionen YKK-4, M = 1:50



# YKK-5



## YKK-5 | Kammer fünf

Aufnahmedatum:	28.10.2021   Kampagne 1	
Fotos:	1418 registriert	
Kontrollpunkte:	9	
Bildpunkte:	Nordwand	70k px * 25k px
	Ostwand	25k px * 25k px
	Südwand	70k px * 23k px
	Westwand	23k px * 25k px
	Boden	55k px * 14k px

### Archäologischer Report:

Die Kammer Y-KK5 misst 5,35m x 1,24m mit einer Tiefe von 1,89m. Alle Wände und der Boden waren stark verbrannt, die Wände waren rot ge-  
 feuert und der Boden war eine verhärtete, schwarze sandige Masse. Un-  
 gefähr 20-30 cm über dem Boden befand sich im Zentrum der Kammer  
 eine Töpferablagerung mit fünf sehr gut erhaltenen und teilweise intak-  
 ten Gefäßen, die auf der Seite oder auf dem Kopf lagen. Auffalend war,  
 dass die Unterseiten der Gefäße schwarz verbrannt waren, was darauf  
 hindeutet, dass sie ursprünglich im verbrannten Boden gestanden haben  
 [Köhler, 2022].

Abb.90: 1:1 Ausschnitt YKK-5 Boden, Originalgröße



Nordwand



Ostwand



Südwand



Westwand



Boden



Zwischenschicht



Abb.91: Orthografische Projektionen YKK-5, M = 1:50

# YKK-6



## YKK-6 | Kammer sechs

Aufnahmedatum:	04.11.2021   Kampagne 1	
Fotos:	1581 registriert	
Kontrollpunkte:	10	
Bildpunkte:	Nordwand	27k px * 25k px
	Ostwand	57k px * 25k px
	Südwand	27k px * 25k px
	Westwand	57k px * 25k px
	Boden	45k px * 26k px

### Archäologischer Report:

Die Kammer Y-KK6 misst 5,30m x 1,21m mit einer Tiefe von 2,00m. Sie ist auf allen Seiten und auf dem Boden stark verbrannt. Sie enthielt losen, rötlich verbrannten Sand und zerbrochene Keramik. Der Boden besteht aus verhärtetem schwarzem Sand mit zahlreichen kleinen Mulden von mindestens 43 ursprünglich abgelegten Gefäßen. Im westlichen Teil bildeten sie bis zu vier parallele Reihen von Gefäßen [Köhler, 2022].

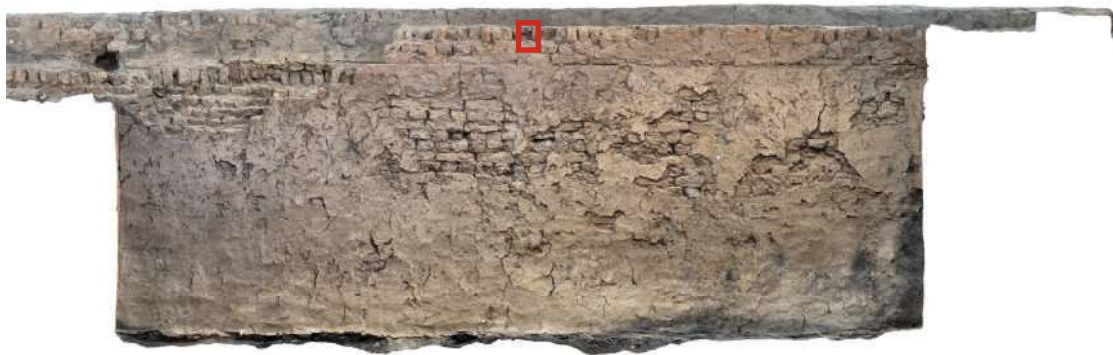
Abb.92: 1:1 Ausschnitt YKK-6 Südwand, Originalgröße



Nordwand



Ostwand



Südwand



Westwand



Boden



Abb.93: Orthografische Projektionen YKK-6, M = 1:50

# YKK-7



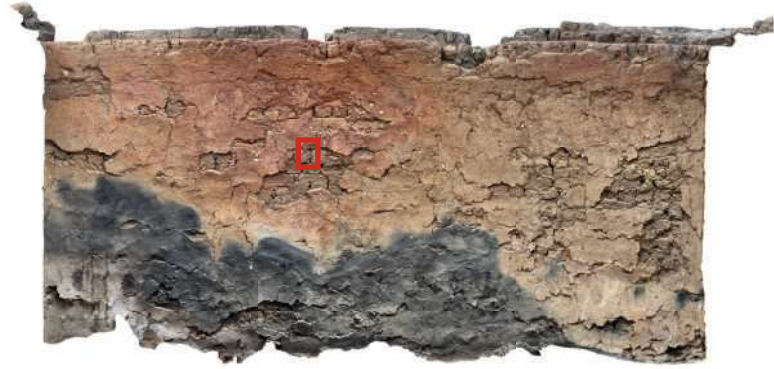
## YKK-7 | Kammer sieben

Aufnahmedatum:	30.10.2021   Kampagne 1	
Fotos:	3433 registriert	
Kontrollpunkte:	12	
Bildpunkte:	Nordwand	27k px * 30k px
	Ostwand	51k px * 27k px
	Südwand	27k px * 30k px
	Westwand	51k px * 27k px
	Boden	47k px * 15k px

### Archäologischer Report:

Die Kammer Y-KK7 misst 4,33m x 1,45m mit einer Tiefe von 2,11m. Sie ist auf allen Seiten und am Boden stark verbrannt, enthielt lockeren Sand und viele verbrannte Trümmer. Über dem Boden befand sich eine Ablagerung von etwa 14 großen Bruchstücken von verbrannten Tongefäßen die zur Weinlagerung verwendet wurden. Einige davon standen aufrecht in Bodenvertiefungen, andere wiederum lagen auf dem Boden. Es gab mindestens 32 Vertiefungen für Keramikgefäße. Weiters konnten wir flache, kreisförmige Vertiefungen an den senkrechten Wänden beobachten, was darauf hindeutet, dass es in diesem Raum möglicherweise zwei Schichten von Töpferwaren gab [Köhler, 2022].

Abb.94: 1:1 Ausschnitt YKK-7 Westwand, Originalgröße



Westwand



Nordwand



Ostwand



Südwand



Boden



Zwischenschicht



Abb.95: Orthografische Projektionen YKK-7, M = 1:50

# YKK-8

## YKK-8 | Kammer acht

Aufnahmedatum:	10.04.2022   Kampagne 2	
Fotos:	3160 registriert	
Kontrollpunkte:	6	
Bildpunkte:	Nordwand	27k px * 30k px
	Ostwand	51k px * 27k px
	Südwand	27k px * 30k px
	Westwand	51k px * 27k px
	Boden	47k px * 15.k px

Die Kammer Y-KK8 misst 4,15 x 1,39 m und ist 2,13 m tief. Sie enthielt hauptsächlich gelbfarbenen Sand und eine ungewöhnliche Anzahl zylindrischer Keramikgefäße und deren Bruchstücke. Die Kammer hatte eine niedrige Trennwand aus 4-5 unregelmäßigen, unvermörtelten Schichten aus Lehmziegeln, Keramikgefäßen und ihren Bruchstücken, die wahrscheinlich sekundär ist. Darunter zeigte der Boden eine interessante Bodeneinlagerung im nördlichen zwei Drittel der Kammer. Es gab mindestens 47 tiefe Eindrücke von Keramikgefäßen und eine Anzahl von Keramikbodenfragmenten, die noch in-situ in ihnen platziert waren. Der gehärtete sandige Boden um sie herum war mit einer dunklen öligen/fettigen Substanz getränkt, die sich im Sonnenlicht verflüssigte und immer noch einen intensiven Geruch hatte. Es ist möglich, dass diese Substanz von verschüttetem Gefäßinhalt stammt, da festgestellt werden konnte, dass viele der zylindrischen Gefäße und Bruchstücke aus dieser Kammer ebenfalls die gleiche Art von Substanz enthielten [Köhler, 2022].



Westwand



Nordwand



Ostwand



Südwand



Boden



Abb.97: Orthografische Projektionen YKK-8, M = 1:50



YKK



## YKK | Hauptkammer

Aufnahmedatum: 07-11.04.2022 | Kampagne 2

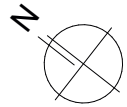
Fotos: 17023 registriert

Kontrollpunkte: 12

### Archäologischer Report:

Die Hauptkammer Y-KK misst 9,05 x 6,42 m und ist 2,76 m tief. Die oberen Füllschichten bestanden aus relativ klarem Sand mit wenigen Artefakten. Nach unten hin änderte sich das Füllmaterial und es war möglich, verschiedene stratigraphische Einheiten zu identifizieren, die offensichtlich von Petries Ausgrabungen vor 120 Jahren stammen. Zum Beispiel gab es einen großen Haufen dunkleren Sandes mit zahlreichen organischen Einschlüssen in der nordwestlichen Ecke der Kammer, der auch erhebliche Mengen an Tierknochen enthielt. In der Nähe der südöstlichen Ecke, genau an der Stelle, an der Petrie es in-situ fotografiert hatte, wurde der obere hintere Teil von Meret-Neiths zweiter Kalksteinstele gefunden, der aufrecht gegen die Ostwand gelehnt war, etwa 2,50 m von der Ecke entfernt. Ein weiteres Fragment, von der unteren Vorderseite mit einigen der hieroglyphischen Zeichen ihres Namens teilweise erhalten, wurde in der Nähe, näher zum Zentrum der Kammer, in 2,81 m Entfernung von der Südwand und 2,75 m von der Ostwand gefunden. Beide Fragmente wurden geborgen und zur weiteren Untersuchung und Konservierung in das Magazin der Mission gebracht [Köhler, 2022].

Abb.98: 1:1 Ausschnitt YKK Boden, Originalgröße



Boden



Abb.99: Orthografische Projektion YKK Hauptkammer, M = 1:50

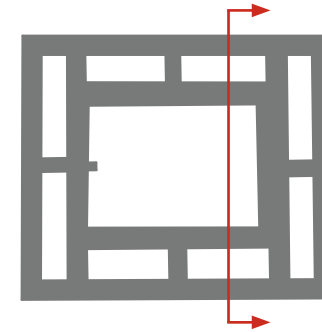
## Planliche Darstellung des Grabes Y

Das 3D-Modell der Grabstätte der Königin Meret Neith ist von großem Nutzen für fortlaufende archäologische Untersuchungen. Die orthogonalen Wanddarstellungen, die in den vorangegangenen Seiten erläutert wurden, fungieren als Basis für zusätzliche wissenschaftliche Analysen und Darstellungen. Es besteht zudem die Möglichkeit, zusätzliches Planmaterial aus dem 3D-Modell zu extrahieren und zu verwenden.

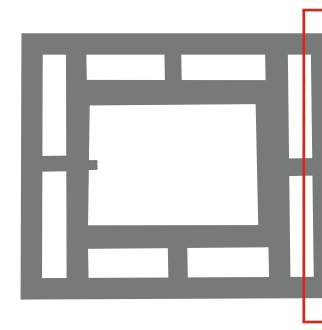
Durch die Anwendung von Schnittebenen innerhalb des Modells können räumliche Verbindungen und die unterschiedlichen Ebenen beziehungsweise Tiefen der einzelnen Kammern visualisiert werden. Ägyptologen nutzen diese Schnitte und Wandansichten als transparente Überlagerungen und können dadurch in einem separaten Programm die Strukturen der verschiedenen Materialien hervorheben und nachzeichnen. Ebenfalls können hier auf geeignete Weise Rückschlüsse auf die Bauart und zeitliche Abfolge der Entstehung des Grabes geschlossen werden.

Ohne ein solches digitales Modell müsste diese Arbeit vor Ort mittels Skizzen oder Nachzeichnungen durchgeführt werden, was während der Ausgrabung erhebliche Zeit in Anspruch nehmen würde. Die Digitalisierung dieser Prozesse bietet daher einen erheblichen Vorteil in Bezug auf Effizienz und Genauigkeit der wissenschaftlichen Arbeit.

Schnitt 1



Schnitt 2



Schnitt 3

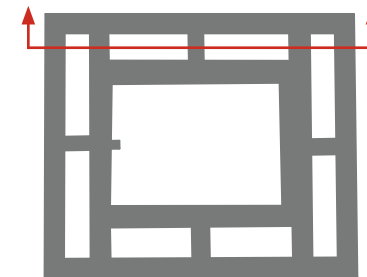


Abb.100: Schnittdarstellungen



Abb.101: Wandansichten M 1:100, Grab Y, Umm el-Qaab, Abydos, Stand nach der ersten Kampagne 10/2021, E. Christiana Köhler

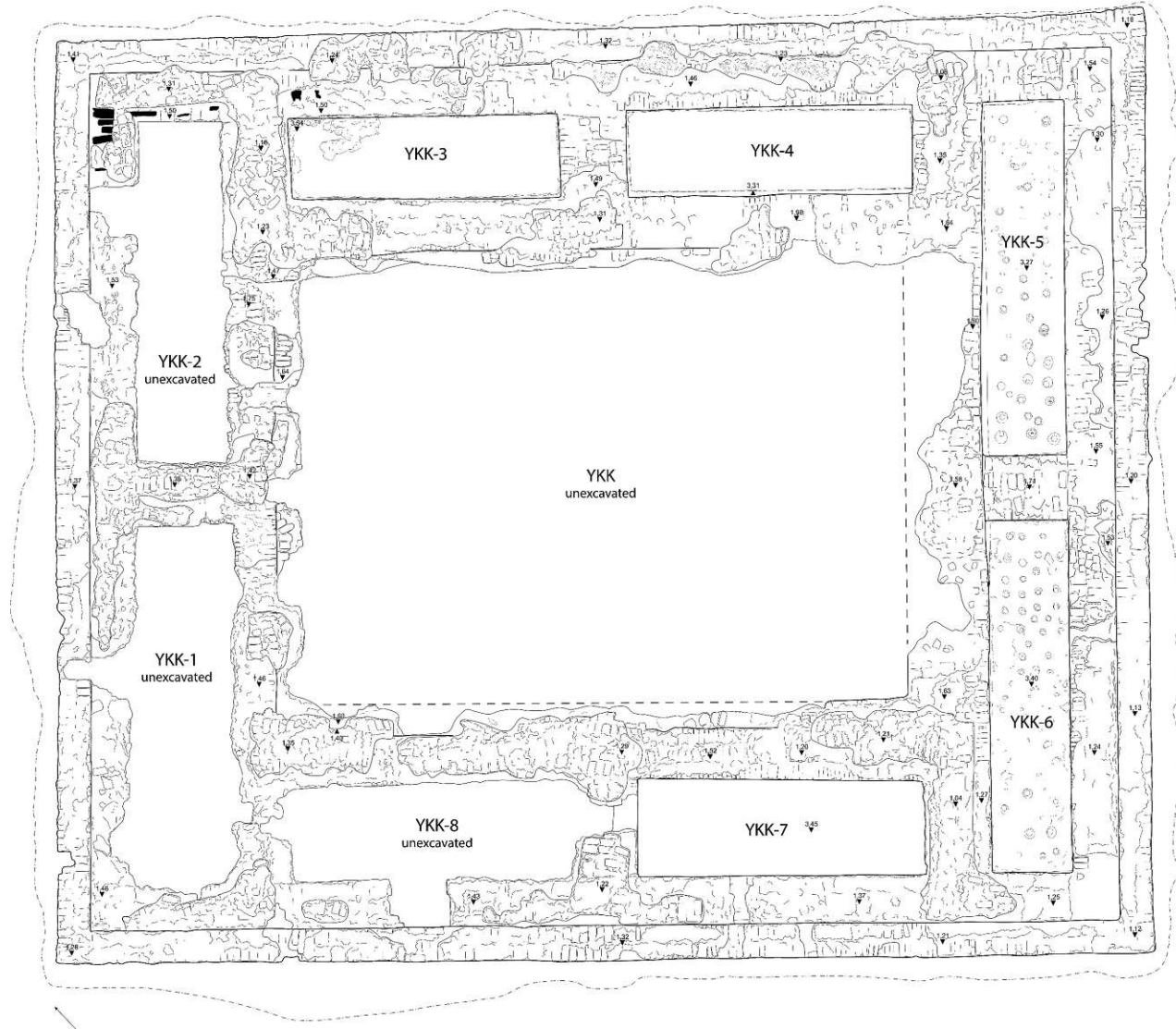
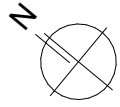


Abb.102: Grundriss M:100, Grab Y, Umm el-Qaab, Abydos, Stand nach der ersten Kampagne 10/2021, E. Christiana Köhler

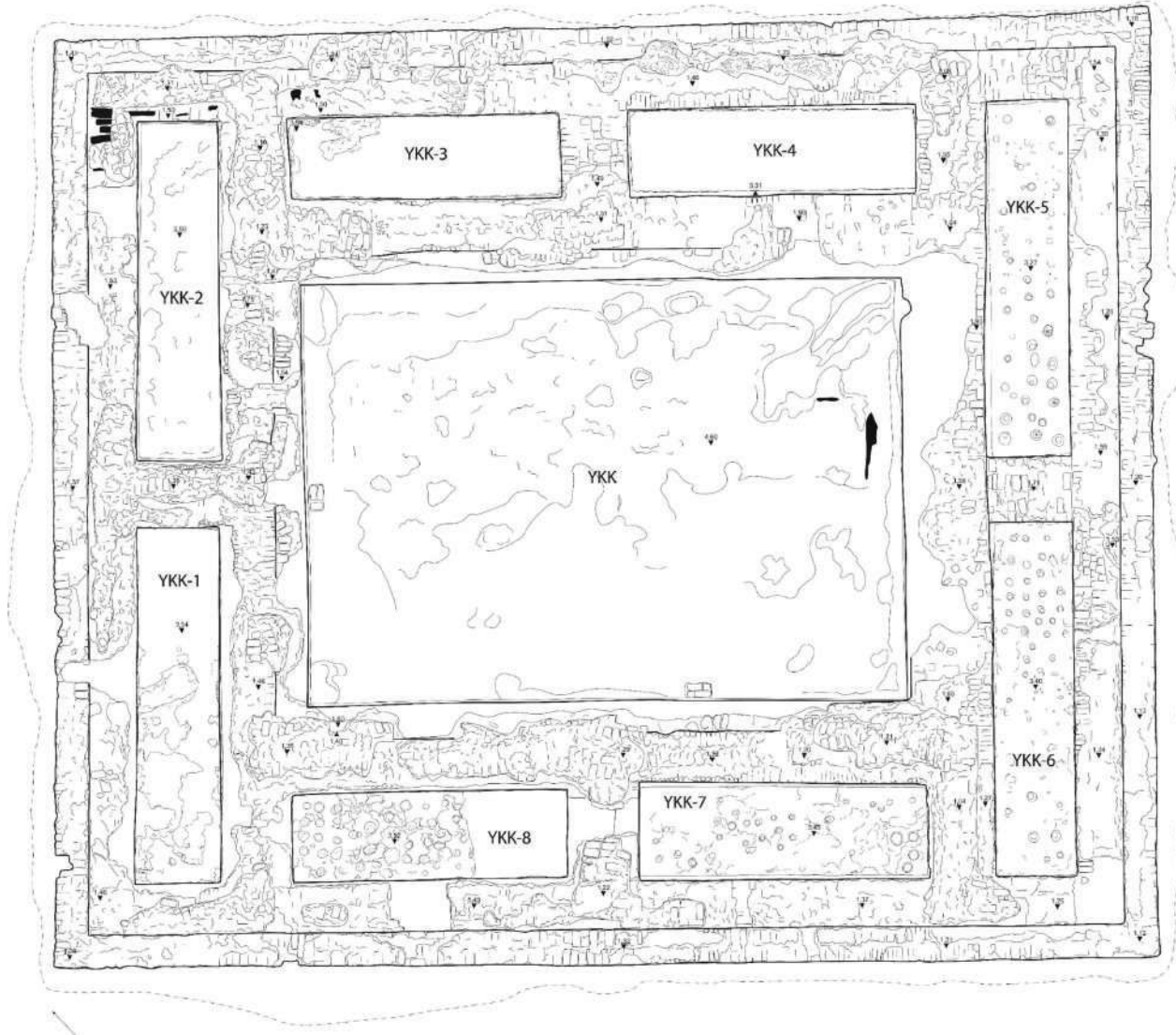
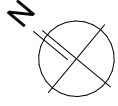


Abb.103: Grundriss M 1:100, Grab Y, Umm el-Qaab, Abydos, Stand nach der zweiten Kampagne 04/2022, E. Christiana Köhler

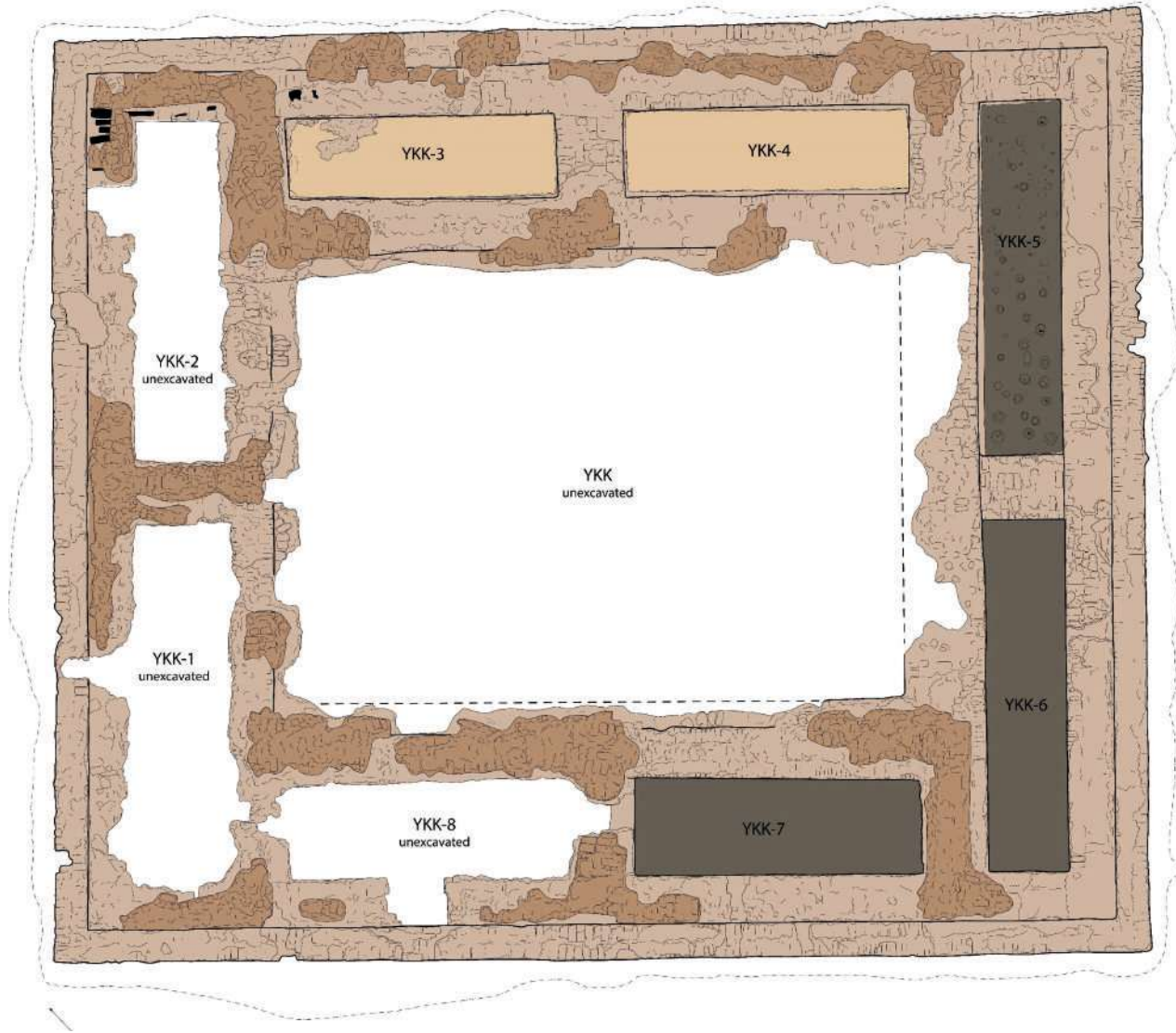
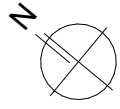


Abb.104: Analyse der Materialien des Grabes M 1:100, Stand nach der ersten Kampagne 10/2021, E. Christiana Köhler



Abb.105: Rendering YKK-2, Keramikgefäße in-situ, (Sara Treccarichi Scavuzzo. 2022)





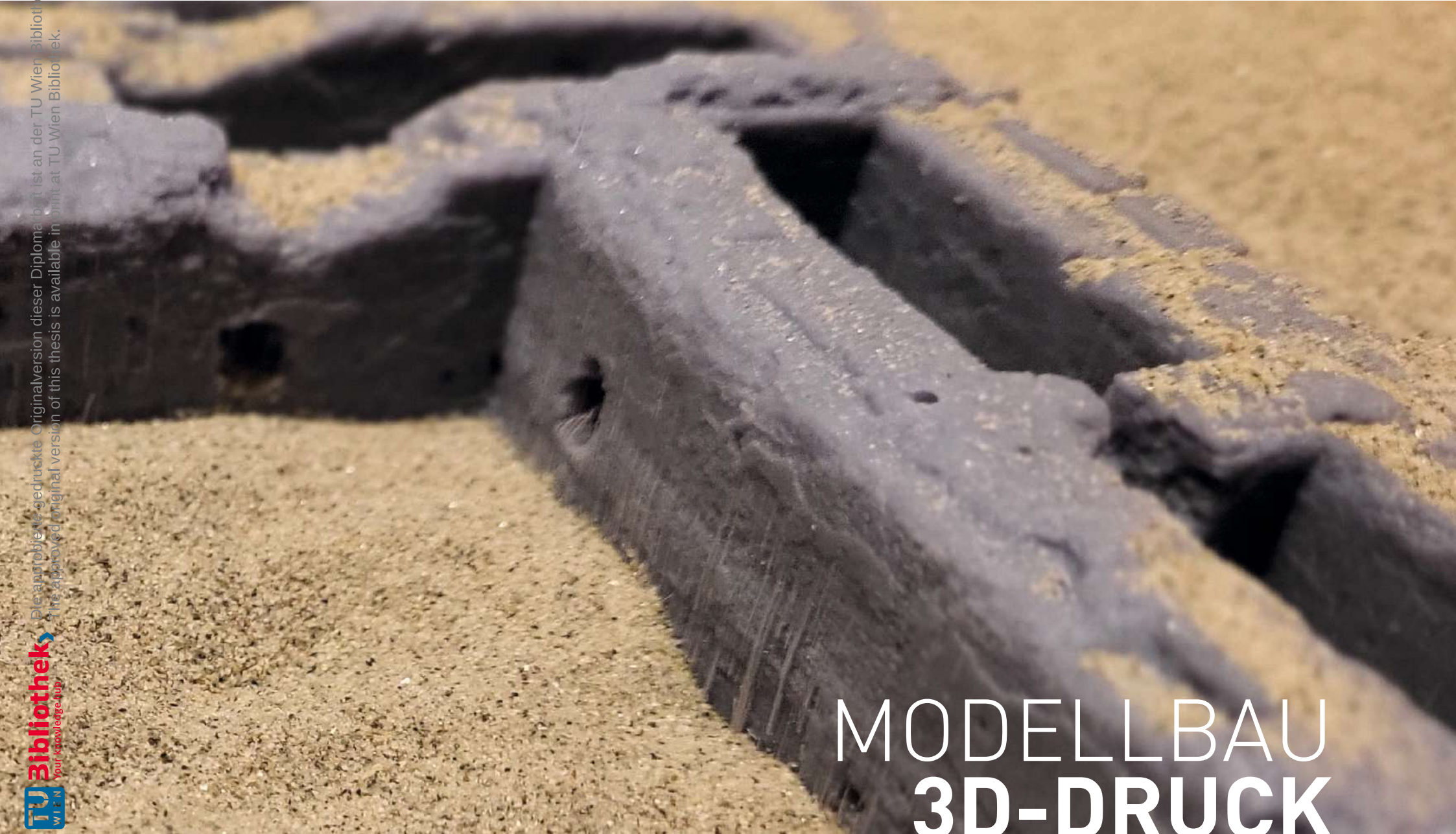
Abb.106: Rendering YKK | Hauptkammer mit anschließenden Nebenkammern, Blickrichtung von Südwest, [Sara Treccarichi Scavuzzo. 2022]



Abb.107: Rendering YKK | Hauptkammer mit anschließenden Nebenkammern, Blickrichtung von Südost, (Sara Treccarichi Scavuzzo. 2022)



Abb.108: Testdruck des Grabes im Maßstab 1:100



# MODELLBAU 3D-DRUCK

## Modellbau 3D-Druck

Die Auswahl des passenden 3D-Druckverfahrens für den Druck des Grabes wurde durch eine Reihe von Testdrucks getroffen. Besonders Augenmerk wurde dabei Wert auf die Druckqualität gelegt, um sicherzustellen, dass das aus der fotogrammetrischen Aufnahme gewonnene digitale Modell seine optisch hohe Genauigkeit beibehält. Der Detailgrad eines 3D gedruckten Objekts wird maßgeblich von der Schichthöhe bestimmt, die bei den beiden evaluierten Druckverfahren – dem Fused Deposition Modeling (FDM) und dem Stereolithografie (SLA) – auf bis zu 20 Mikrometer (0,02 mm) reduziert werden kann.

Obwohl beide Verfahren eine vergleichbare minimale Schichthöhe bieten, gibt es grundlegende Unterschiede in Bezug auf die Druckgeschwindigkeit. Beim SLA-Druckverfahren wird die gesamte Schicht auf einmal durch Belichtung des Resins erstellt. Ein Zyklus, bestehend aus Belichtung, Anheben und Absenken, dauert in der Regel etwa 15-20 Sekunden. Da aufgrund der geringeren Schichthöhe weniger Material belichtet werden muss, kann insgesamt sogar Druckzeit eingespart werden. Im Gegensatz dazu ist beim FDM-Druckverfahren die Breite der Filamentbahn bei einer geringeren Schichthöhe weniger breit, sodass für jede Schicht mehr Druckwege zurückgelegt werden müssen. Dies führt zu einer längeren Druckdauer im Vergleich zum SLA-Verfahren bei gleicher Einstellung der Schichthöhe.

Insgesamt bietet der Druck mit Kunstharz aufgrund seiner schnelleren Druckgeschwindigkeit bei besserer Qualität Vorteile gegenüber dem FDM-Druck. Diese Faktoren haben dazu beigetragen, dass das SLA-Druckverfahren für dieses Projekt ausgewählt wurde.



Abb.109: Testdruck SLA Druck Verfahren

## Vergleich FDM-Druck und SLA-Druck

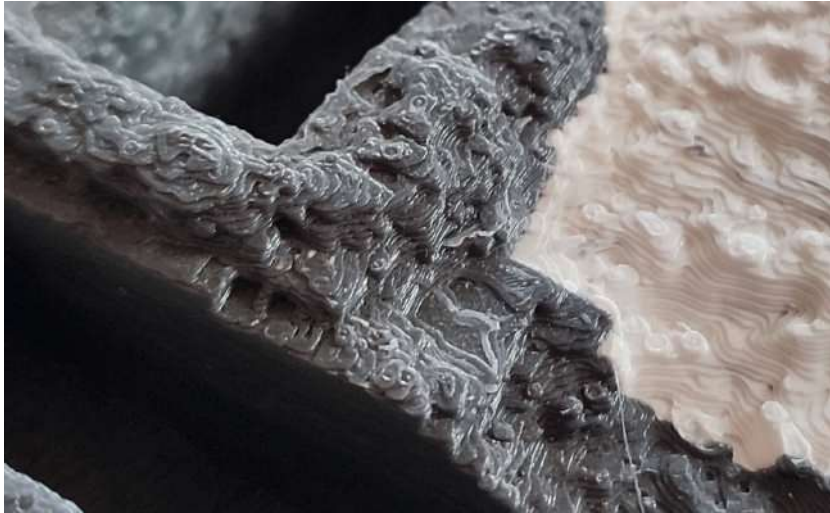


Abb.110: Testdruck FDM Detail der Mauerkrone im Maßstab 1:100

### FDM

Schichthöhe 0,15mm , Druckzeit 22 Stunden

Die einzelnen Schichten sind sehr deutlich zu erkennen und lassen die Mauerkrone ein wenig diffus wirken. Ein Erkennen von einzelnen Ziegelstrukturen und Verbänden ist nicht möglich.

### Errechnete Druckzeit

Bei einer Schichthöhe von 50 $\mu$  (=0,05mm) und 30% infill:  
19 Tage und 6 Stunden



Abb.111: Testdruck SLA Detail der Mauerkrone im Maßstab 1:100

### SLA

Schichthöhe 0,05mm, Druckzeit 16 Stunden

Durch die geringere Layerhöhe sind einzelne Details besser zu erkennen. Vor allem im Bereich der Wandansichten kann hier deutlich zwischen der Putzstruktur und den Lehmziegeln unterschieden werden. Es ist sogar möglich, die Ziegelverbände daraus abzulesen und zu analysieren.

### Errechnete Druckzeit

Bei einer Schichthöhe von 50 $\mu$  (=0,05mm) und 30% infill:  
16 Stunden



Abb.112: YKK-5 mit Mauerkronen



Abb.113: YKK-5 Mittelschicht mit Keramik in-situ

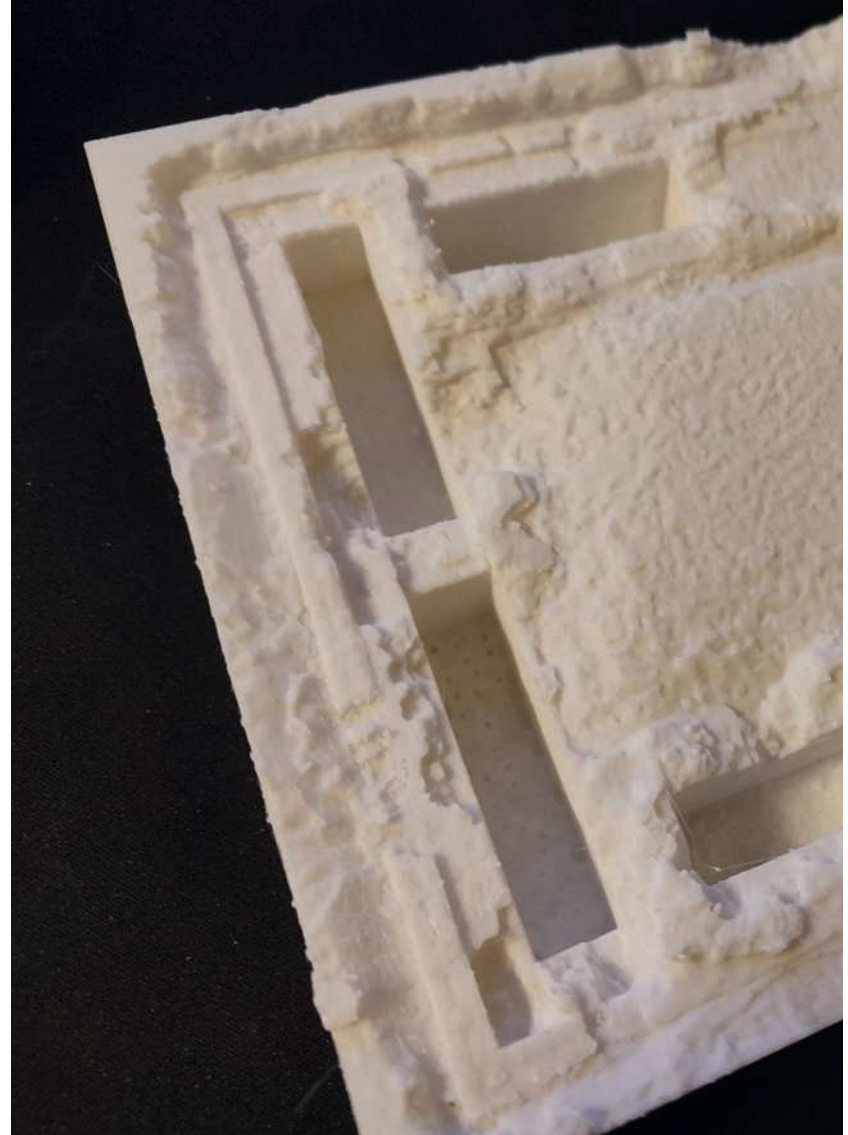


Abb.114: Testdruck, Zwischenstrand nach der ersten Kampagne

## FDM-Druck | Testdrucke

Nachdem die ersten fotogrammetrischen Berechnungen durchgeführt wurden, wurden die 3D-Objekte in einer Slicer-Software weiterverarbeitet. Um die Ergebnisse des detaillierten digitalen Modells haptisch greifbar zu machen, wurden die Objekte anschließend mithilfe eines FDM-Druckers ausgedruckt.

Als erster Schritt wurde eine einzelne Kammer (YKK-5) im Maßstab 1:50 gedruckt. Durch diesen Versuchsdruck konnte das Modell hinsichtlich verschiedener Parameter wie Schichtbarkeit, Versatz der Schichten und Ausprägung kleiner Details untersucht und überprüft werden. Zusätzlich wurde die mittlere Schicht der Kammer fünf gedruckt, um die Passgenauigkeit und Materialausdehnungen zu kontrollieren. Dieser Schritt war wichtig, um die Qualität des Druckprozesses und die Genauigkeit des Modells sicherzustellen.

Um die Druckzeit erheblich zu reduzieren und den Materialverbrauch zu minimieren, wurden die Modelle nicht als massive Volumskörper, sondern als ausgehöhlte Objekte mit einer 30%igen Infillstruktur gedruckt. Die Infillstruktur dient als innere Stützstruktur, auf der die nächsten Schichten aufgebaut werden. Diese Herangehensweise brachte mehrere Vorteile mit sich: Zum einen konnte ein Großteil des Materials (Filament) eingespart werden, zum anderen traten im Objekt weniger Materialspannungen zwischen den Schichten auf. Dadurch wurden Fehler oder Verformungen beim Abkühlen und Erhärten des Materials größtenteils verhindert.



Abb.115: Schnitt durch die Kammer YKK-5, Wandansicht mit Putzstruktur



## FDM Dual Extruder Druck | Testdrucke

Einige Hersteller im Bereich der FDM-Drucktechnologie haben sich darauf spezialisiert, mehrfarbige Druckmöglichkeiten anzubieten. Diese Drucker, die als Dual- oder Multi-Extruder bezeichnet werden, verfügen über zwei oder mehr Extruder mit Druckdüsen.

Beim Modellbau des Grabes von Meret Neith bestand die grundlegende Idee des zweifarbigen Druckes darin, einen Kontrast zwischen den Graboberflächen (schwarz) und den Sandflächen (weiß) zu schaffen. Dadurch sollten die Kanten der Farbübergänge für ein präziseres und stabileres Tracking in der AR Anwendung gewährleistet werden. Diesbezüglich wurde die digitale Datei des Grabes in zwei separate Bereiche unterteilt. Anschließend wurden diese Bereiche einzeln in die Slicer Software importiert und jedem Modell ein spezifischer Druckkopf mit den entsprechenden Einstellungen für die verwendeten Filamente zugewiesen. Während des Druckvorgangs arbeitet der Drucker zunächst mit einer Düse, um die Schicht aufzutragen, bevor er zur anderen Düse wechselt, um die Ebene zu vervollständigen. Dieser Vorgang wird für alle Schichten kontinuierlich wiederholt. Eines der Hauptprobleme, das bei diesem Prozess auftreten könnte, ist das sogenannte Stringing. Hierbei handelt es sich um dünne Fäden, die aufgrund von Restmaterial an der Düse über das Modell gezogen werden und dementsprechend unerwünschte Oberflächenstrukturen verursachen können. Um solche Effekte zu minimieren, ist es wichtig, die Druckparameter und die Filamentführung sorgfältig zu überwachen und gegebenenfalls anzupassen.

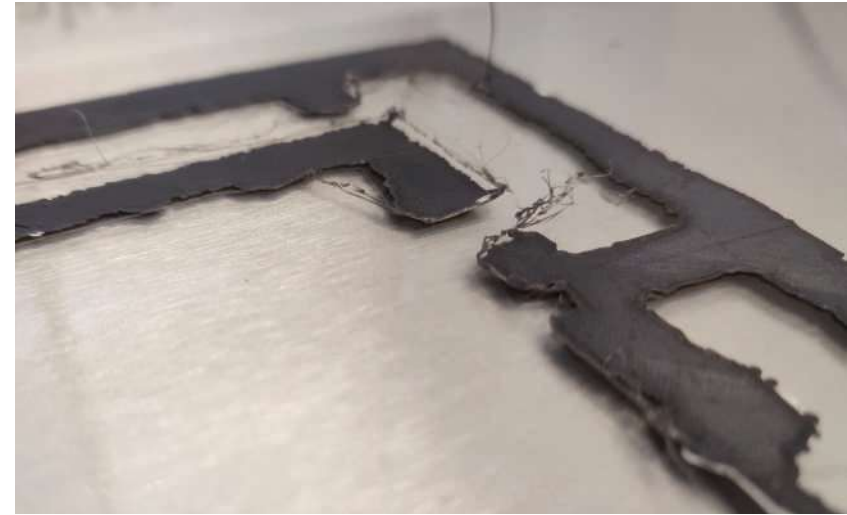


Abb.116: Druckfehler durch Ablösen von der Bauplattform



Abb.117: Testdruck mit 30% Infill zur Materialreduktion



Abb.118: Testdruck mit den Ultimaker S5 Dual Extruder FDM, YKK-5 und YKK-6 nach der ersten Kampagne

## SLA Drucker

in Verwendung: Anycubic Photon M3 Max



Abb.119: Anycubic Photon M3 Max

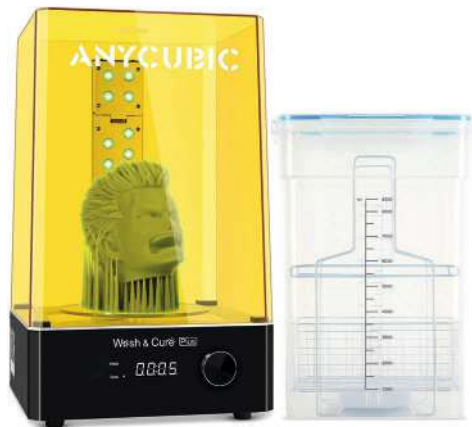


Abb.120: wash & cure Station Anycubic

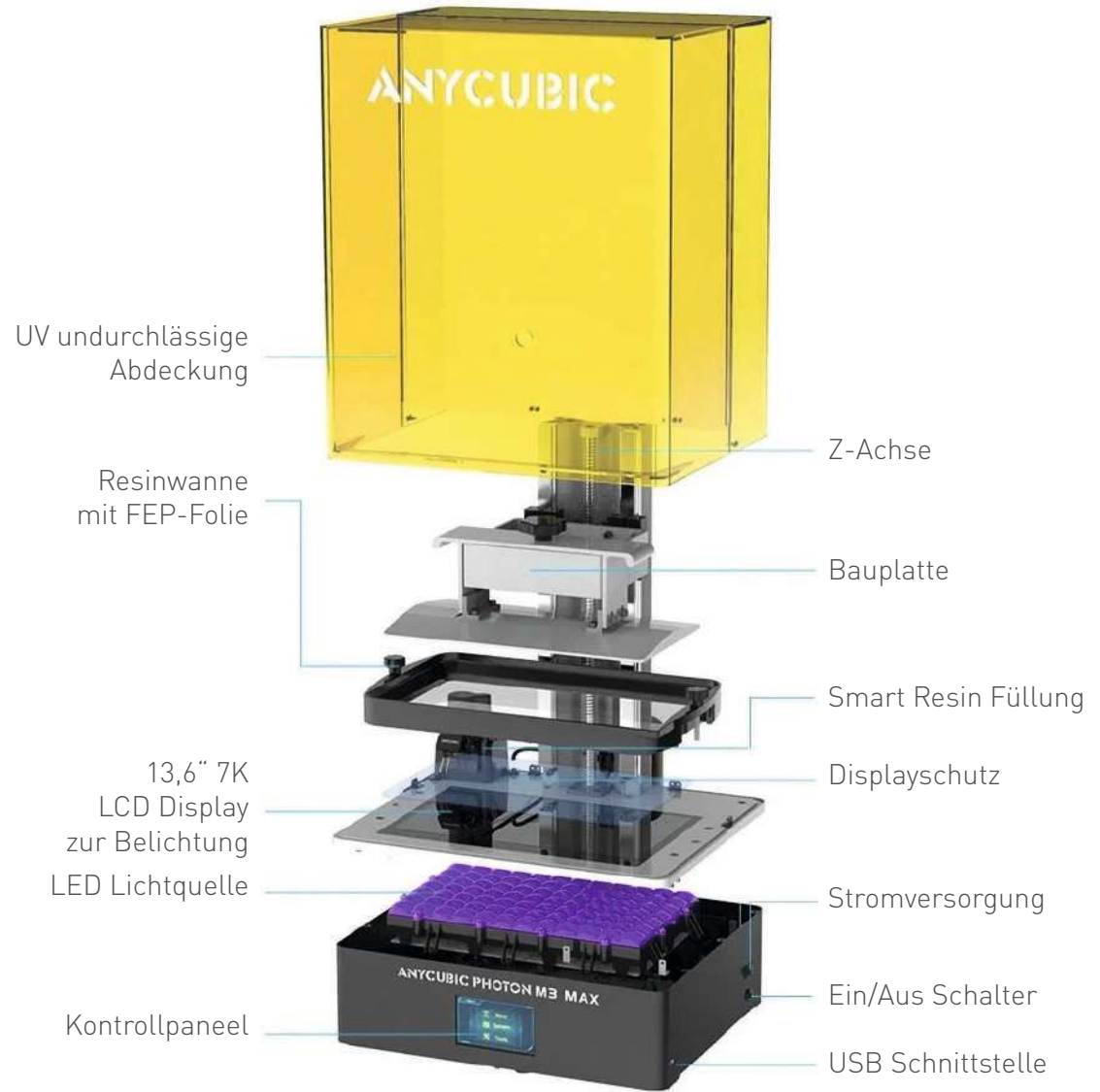


Abb.121: Aufbau des verwendeten SLA-Druckers, Anycubic Photon M3 Max

## Kunstharz

In Verwendung: Phrozen Aqua Red-Clay 8K

Um ein optimales Ergebnis bei der Erstellung des dreidimensional gedruckten Modells des Grabes zu erzielen, ist es unerlässlich, die Schichtdicke des verwendeten 3D-Druckmaterials so gering wie möglich zu halten. Dies ermöglicht eine präzise Wiedergabe feiner Details wie Ziegelverbände oder Putzstrukturen, die für ein akkurates und realistisches Modell erforderlich sind. Diesbezüglich gibt es speziell entwickelte Kunstharztypen, die die gewünschte hohe Auflösung und Präzision, die für die detailgetreue Darstellung solch komplexer Strukturen notwendig ist, liefern. Darüber hinaus sollte das Erscheinungsbild des fertigen Modells eine dem tatsächlichen Grab ähnelnde, tonartige Farbgebung aufweisen. Dies kann entweder durch die Zugabe und gründliche Durchmischung von Farbpigmenten in Pulverform zu hellen Harzen oder durch den Einsatz von speziell entwickelten, vorgefertigten Harzfarbtönen erreicht werden. Die Verwendung solcher farbiger Harze ermöglicht die Erstellung eines realistischeren und visuell ansprechenderen Modells, das die natürlichen Eigenschaften und das Erscheinungsbild des Originalgrabs nachahmt.

Bei der Verwendung von Kunstharz für den 3D-Druckprozess ist es wichtig, auf optimale Verarbeitungsbedingungen zu achten. Dazu gehören die Verarbeitung des Resins bei Raumtemperatur (ungefähr 22°C) sowie ein gründliches Durchschütteln vor dem Gebrauch, um eine gleichmäßige Viskosität und optimale Druckbedingungen zu gewährleisten.



Abb.122: Für den Druck ausgewähltes Kunstharz, Phrozen Aqua Red-Clay 8K

## Druckeinstellungen

Die nachstehenden Druckeinstellungen wurden durch den Einsatz von Kalibrierungsobjekten sowie Testdrucken des Grabes in diversen Maßstäben und Ausführungen mit dem zuvor erwähnten Kunstharz Aqua Red-Clay 8K des Herstellers Phrozen ermittelt und optimiert. Die Werte können je nach verwendetem Drucker und Kunstharz variieren.

Englisch	Deutsch	Wert
Layer height	Schichthöhe:	0,050 mm
Bottom Layer Count	Boden Schichtanzahl:	8
Exposure Time	Belichtungszeit:	2,500 s
Bottom Exposure Time	Boden Belichtungszeit:	50,000 s
Transition Layer Count	Übergangsschichten:	6
Transition Type	Übergangstyp:	linear
Light off delay	Verzögerung der Lichtabschaltung:	10,000 s
Bottom Lift Distance	Boden Hebeabstand:	12,000 s
Lifting Distance	Hebeabstand:	10,000 s
Bottom Lift Speed	Boden Hebegeschwindigkeit:	60,000 mm/min
Lifting Speed	Hebegeschwindigkeit:	225,00 mm/min
Bottom Retract Speed	Boden Absenkgeschwindigkeit:	170,00 mm/min
Retract Speed	Absenkgeschwindigkeit:	240,000 mm/min

## Begriffserklärung<sup>12</sup>

### Schichthöhe

Dicke jeder gedruckten Schicht

### Boden Schichtanzahl

Anzahl der Schichten die zu Beginn des Druckes länger belichtet werden, um eine höhere Verbindung und bessere Haftung an der Bauplattform zu gewährleisten.

### Belichtungszeit

Die Zeit, in der die normalen Schichten von der Lichtquelle beleuchtet werden.

### Boden Belichtungszeit

Die Zeit, in der die Bodenschichten von der Lichtquelle beleuchtet werden. Eine Erhöhung der Belichtungszeit der ersten Schichten ist hilfreich, um die Haftfestigkeit zwischen dem Druckmodell und der Druckplattform zu erhöhen.

### Übergangsschichten

Die Anzahl der Übergangsschichten zwischen den Bodenschichten und den normalen Druckschichten. Beim Drucken in Übergangsschichten wird die Belichtungszeit mit zunehmender Anzahl der Druckschichten abnehmen

### Übergangstyp

Art der Interpolierung der Belichtungszeit bei den Übergangsschichten.

### Verzögerung der Lichtabschaltung

Mit der Verzögerung der Lichtabschaltung wird die Mindestzeit für einen Bewegungszyklus festgelegt, einschließlich Anheben, Absenken und Warten. Auf diese Weise kann indirekt die Wartezeit zum Beruhigen des Resins bestimmt werden. Insbesondere am Rand des Druckbereichs könnte es sonst vorkommen, dass das Harz während der Belichtung durch das Eintauchen in den Resintank noch in Bewegung ist.

### Boden Hebeabstand / Hebeabstand

Beschreibt die Distanz, die die Druckplattform jedes Mal von der Druckoberfläche angehoben wird. Wenn dieser Wert zu klein ist, besteht die Gefahr, dass das Druckobjekt an der FEP-Folie haften bleibt und nicht abgelöst wird.

### Boden Hebegeschwindigkeit / Hebegeschwindigkeit

Beschreibt die Geschwindigkeit, mit der sich die Druckplattform jedes Mal von der Druckoberfläche entfernt.

### Boden Absenkgeschwindigkeit / Absenkgeschwindigkeit

Beschreibt die Geschwindigkeit, mit der sich die Druckplattform jedes Mal in die ursprüngliche Position zur Belichtung des nächsten Layers begibt.

[Chitubox, 2023]

## Datenaufbereitung ChituBox Pro

Als Slicer Software für den Modelldruck wurde das Programm ChituBox in der Pro Variante verwendet. Im Gegensatz zur kostenlosen Variante beinhaltet die Pro Variante zahlreiche Möglichkeiten zur Bearbeitung und Druckdatenvorbereitung.

Dies beinhaltet Funktionalitäten wie die Reparatur des 3D-Objekts hinsichtlich der Wasserdichtigkeit und der korrekten Ausrichtung der Normalvektoren nach außen. Ein 3D-Modell mit Löchern und falsch ausgerichteten Normalvektoren kann im schlimmsten Fall zu Fehlern und in der Folge zu Abbrüchen beim 3D-Druck führen. Weiters bietet die Software Standardfunktionen wie Skalieren, Drehen und Spiegeln. Um Gewicht und Material zu sparen, ist es möglich, Massive Körper mit einem Hohlraum gedruckt werden. Hierbei können eine Außenwanddicke sowie ein sogenanntes Infill (Struktur im Inneren des Modells, die als Stützstruktur fungiert) definiert werden. Die optimale Wanddicke und der Infill-Grad variieren je nach Modell. Für das Grab von Meret Neith wurde eine Wanddicke von 1,8 mm und ein 30% Infill gewählt, um das beste Verhältnis zwischen Materialverbrauch und Stabilität zu gewährleisten.

ChituBox Pro ermöglicht außerdem das Teilen von 3D-Modellen direkt in der Software, falls diese die Größe der Bauplattform überschreiten. Die Abmessungen des Grabes im Maßstab 1:50 betragen 287mm x 332mm x 89mm und übersteigen damit die maximale Größe der Bauplattform des verwendeten SLA-

Druckers mit den Maßen 298mm x 164mm x 300mm. Daher war es notwendig, das Grab in vier separate Druckteile zu unterteilen und einzeln zu bearbeiten [Chitubox, 2023].

Ein wesentlicher Faktor für die erfolgreiche Druckausrichtung besteht darin, so wenig Pixel wie möglich pro Schicht zu belichten. Eine große ebene Fläche in einer Schicht kann dazu führen, dass die Haftung des belichteten Materials an der FEP-Folie zu stark ist, wenn die Bauplattform angehoben wird, und die Schicht an der Folie anstatt auf der Bauplattform haftet. Dies führt zwangsläufig zu fehlerhaften Belichtungen der weiteren Schichten und somit zu einem fehlerhaften Druckergebnis.

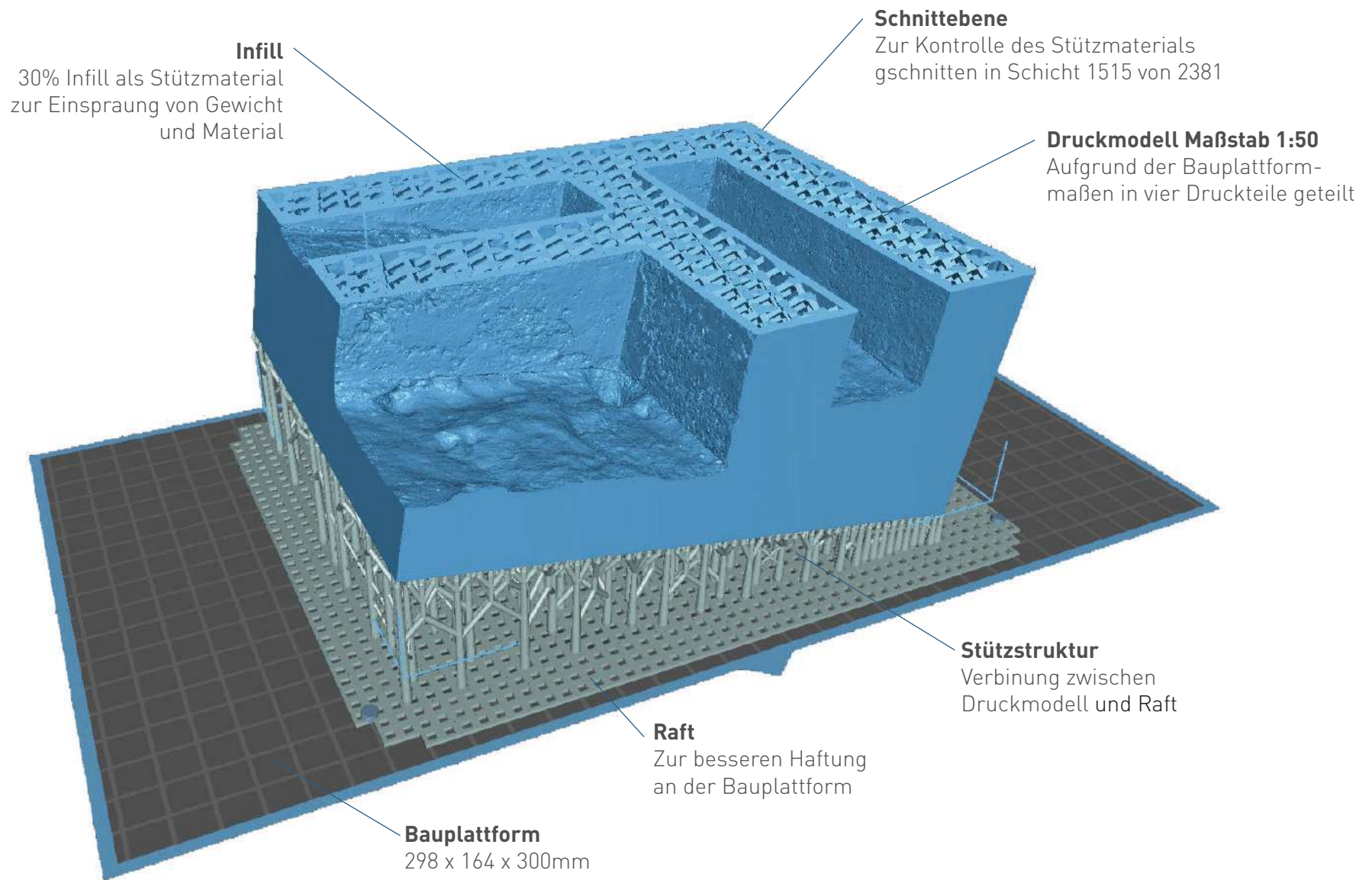


Abb.123: Druckmodell im Programm ChituBox Pro





Abb.124: Testdruck, Modell des Grabes von Meret Neith im Maßstab 1:100



Abb.125: Testdruck im Maßstab 1:50, geteiltes Modell für Schnittflächentest

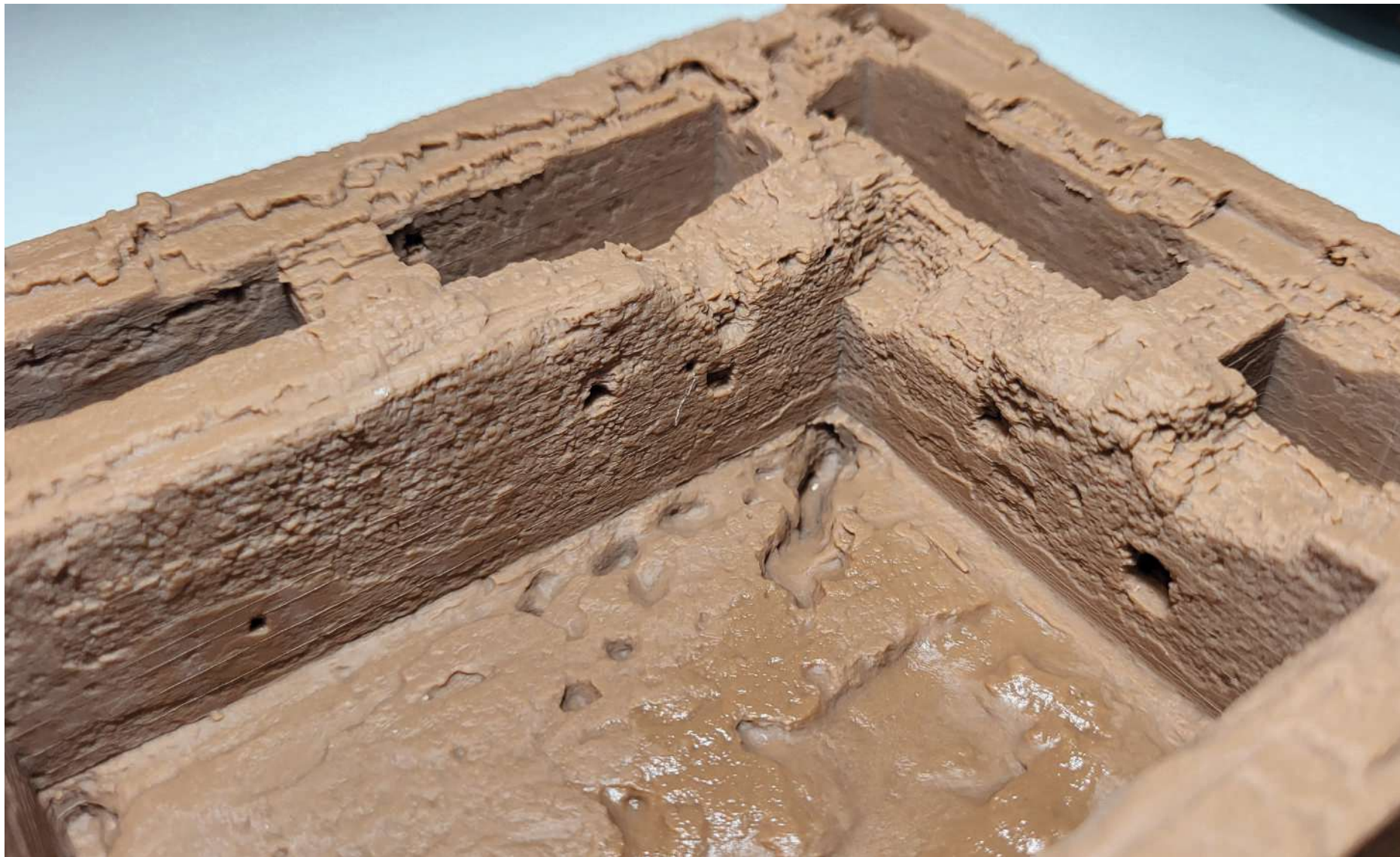


Abb.126: Testdruck, Modell des Grabes von Meret Neith im Maßstab 1:100

## Testdrucke

Leider kam es zunächst zu vielen Fehldrucken aufgrund falscher Einstellungen. Daher war es notwendig, sich schrittweise durch Testdrucke an die geeigneten Einstellungen wie Wandstärke, Infill, Neigungswinkel, Belichtungszeit und sonstige Parameter heranzutasten. Durch diesen Prozess wurden die optimalen Einstellungen ermittelt, um qualitativ hochwertige Druckergebnisse zu erzielen und weitere Fehldrucke zu minimieren. Mit den ermittelten Einstellungen verliefen die weiteren Testdrucke im Maßstab 1:100 erfolgreich. Vorteilhaft war, dass das gesamte Modell 1:100 auf die Bauplatzform passte und in einem Durchgang gedruckt werden konnte. Schon in diesem Maßstab war die Genauigkeit des Kunstharzdrucks ersichtlich.

Anschließend wurden weitere Testdrucke im Maßstab 1:50 durchgeführt, welcher auch für das endgültige Modell vorgesehen war. Dabei lag der Fokus darauf, die optimale Trennung und Ausrichtung der Druckobjekte auf der Bauplatzform zu ermitteln, um störende Artefakte von entfernten Stützstrukturen zu vermeiden. Diese Stützstrukturen wurden entlang der Y-Achse des Grabes ausgerichtet. Weiters wurden die Einzelteile um 5° gekippt, um ein besseres Ablösen von der Bauplatzform zu ermöglichen.

Nach Fertigstellung des erfolgreichen Drucks wurden die Teile in einem 6-Liter-Isopropanoltank für 10 Minuten gewaschen, um überschüssiges, noch flüssiges Resin zu entfernen. Anschließend wurden die Teile in der Wash & Cure Station mittels UV-Beleuchtung für 10 Minuten weiter ausgehärtet.

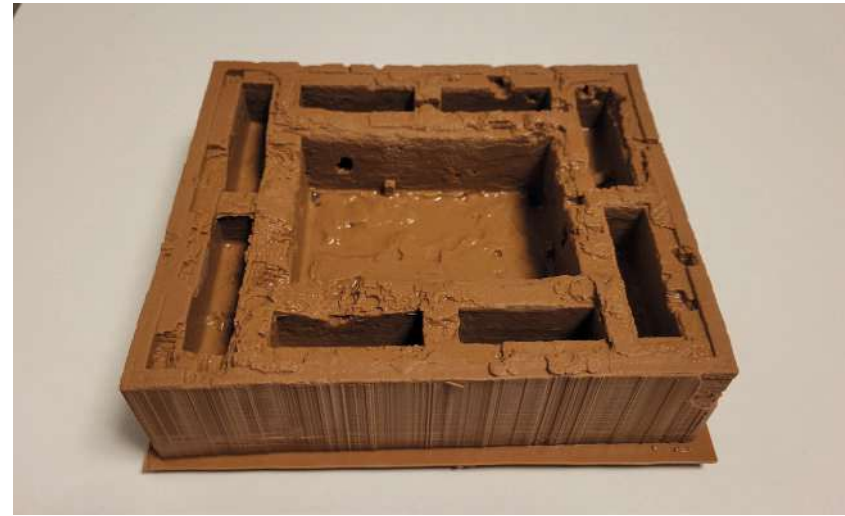


Abb.127: Modell des Grabes von Meret Neith im Maßstab 1:100

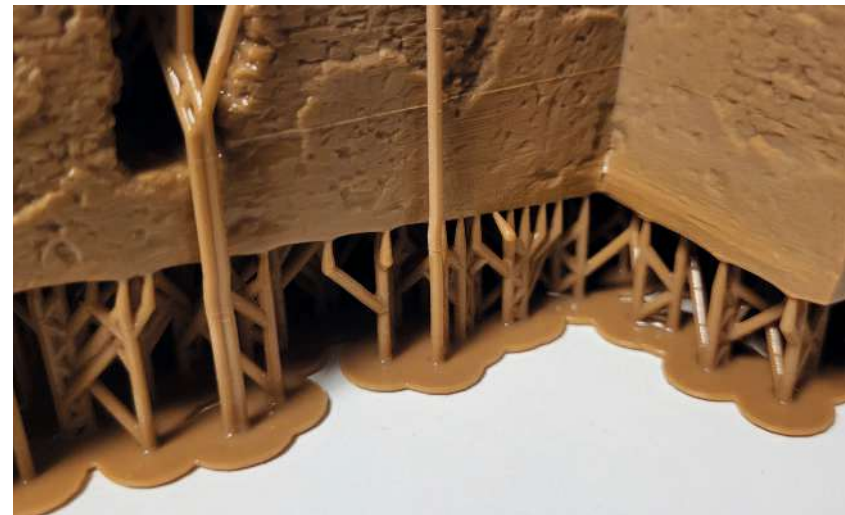


Abb.128: Testdruck mit Stützstruktur im Maßstab 1:50

## Fehldrucke und deren Ursachen

### Materialverzug (warping)

Warping ist ein häufiges Problem beim 3D-Druck. Es entsteht, wenn sich Teile des gedruckten Objekts während des Abkühlungsprozesses (FDM-Druck) oder durch ungleichmäßigen Aushärten (SLA-Druck) verformen. Diese Schrumpfung bzw. Materialverzug führen dazu, dass sich die Ecken oder Kanten des Objekts sich vom Druckbett abheben und verziehen. Dadurch entstehen unerwünschte Verformungen und Unregelmäßigkeiten auf der Oberfläche des gedruckten Objekts. Um warping zu vermeiden, müssen diverse Parameter in den Einstellungen vorgenommen werden. Dies betrifft vor allem die Belichtungszeit, die Stützstrukturen, die Schichtdicke sowie die Raum- und Materialtemperatur, die während des Druckvorgangs angepasst werden.

### Smart Resin Nachfüllung

Bei längeren Drucken kann es passieren, dass während des Druckvorgangs Kunstharz nachgefüllt werden muss. Sobald die FEP-Folie nicht mehr komplett mit Resin überdeckt ist, kann dieses nicht an den richtigen Stellen belichtet werden, was zwangsläufig zu Fehldrucken führt. Manche SLA-Drucker besitzen deswegen eine automatische Resinnachfüllung. Diese Funktion ermöglicht es, während des Druckvorgangs automatisch frisches Harz in den Resintank nachzufüllen, um einen kontinuierlichen Druckvorgang zu gewährleisten und das Risiko des Harzmangels während des Druckens zu minimieren.

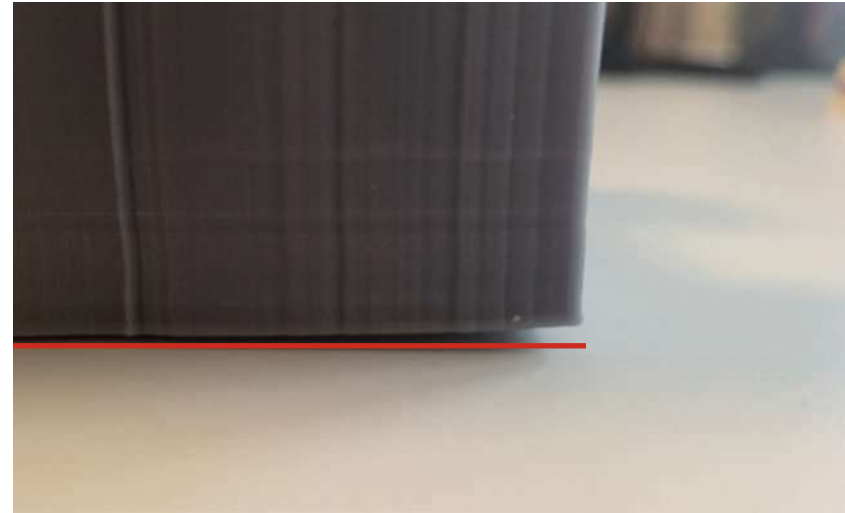


Abb.129: Typischer Materialverzug beim 3D-Druck

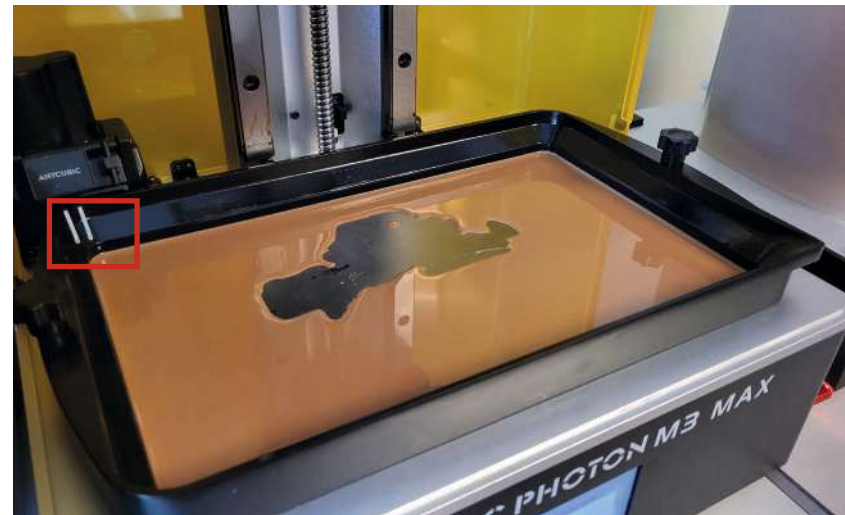


Abb.130: Zu wenig Kunstharz im Mittelbereich des Resinbehälters

## Abgerissene Stützstrukturen

Fehlende Stützstrukturen treten auf, wenn diese zu unterdimensioniert sind oder falsch platziert wurden. Ebenso können eine falsche Belichtungszeit oder Verunreinigungen an der Bauplatte Ursache eines Missglückten Druckvorgangs sein. Zwangsläufig bedeuten fehlende Strukturen nicht immer einen Fehldruck - je nach Position ist aber ein Nacharbeiten (z.B. an der Druckunterseite) notwendig. Weiters entsteht während des Druckprozesses eine Schichthaftung zwischen dem Druck und der FEP-Folie. Wenn die Bauplatte nach oben fährt, um zur nächsten Schicht überzugehen kann diese Kraft zu hoch sein, und die Stützstrukturen abreißen. Um die Haftung zu reduzieren, ist es notwendig, so wenig wie möglich gleichzeitig belichtete Flächen in einer Schicht zu haben. Dies kann durch das Neigen des Druckes bewerkstelligt werden.

## Fehlende Teile

Wenn zu wenig Stützstrukturen platziert wurden, kann das zu fehlenden Bereichen der Endoberfläche führen. Hierbei verbindet sich der Bereich der ausgehärteten Schicht nicht mit dem Hauptteil des Druckes bzw. die wenigen vorhandenen Stützen können das Gewicht der Schichten nicht tragen und reißen ab. Dies kann verhindert werden, wenn unter parallelen Bereichen des Modells zur Bauplattform vermehrt Stützstrukturen in ausreichender Dicke gesetzt werden und die Schichtdicke der Außenhaut erhöht wird.

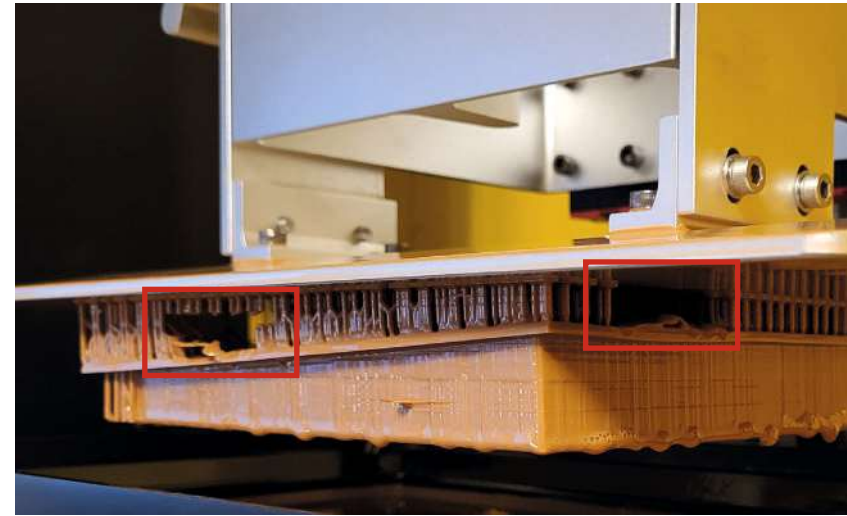


Abb.131: Abgerissene Stützstrukturen



Abb.132: Fehlende Teile im Druck aufgrund einer zu geringen Stützstruktur

## Präsentationssockel

Das Konzept der Modellpräsentation besteht darin, das Modell so zu zeigen, wie das Grab während der Ausgrabung zu sehen war. Lediglich die freigelegten Mauerkronen und ausgegrabenen Kammern, die im Sand eingebettet sind, sind sichtbar. Das Modell selbst wird in einer quadratischen Box präsentiert, die entweder auf einem weißen Sockel zur Ausstellung oder auf einem Tisch platziert werden kann. Die Höhe des Sockels von 85 cm wurde unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Körpergröße von Erwachsenen Personen und einer bequemen Handhaltung bei der Bedienung des Tablets festgelegt.

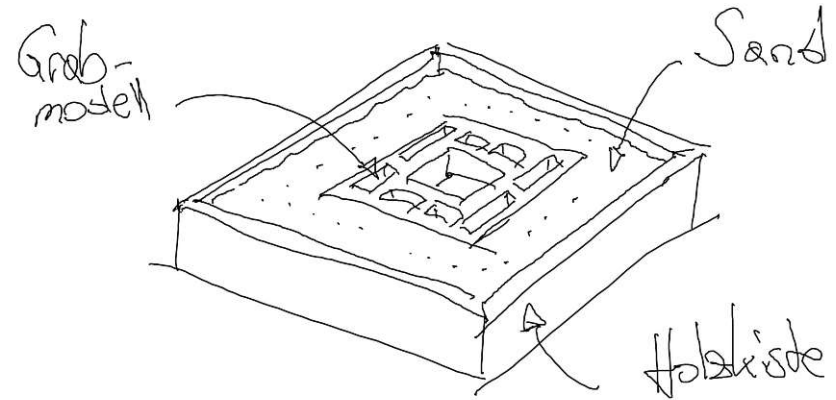
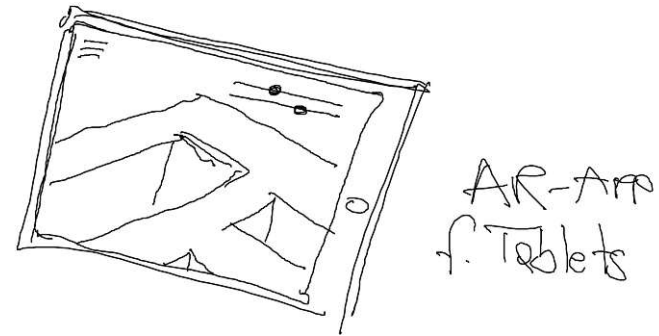
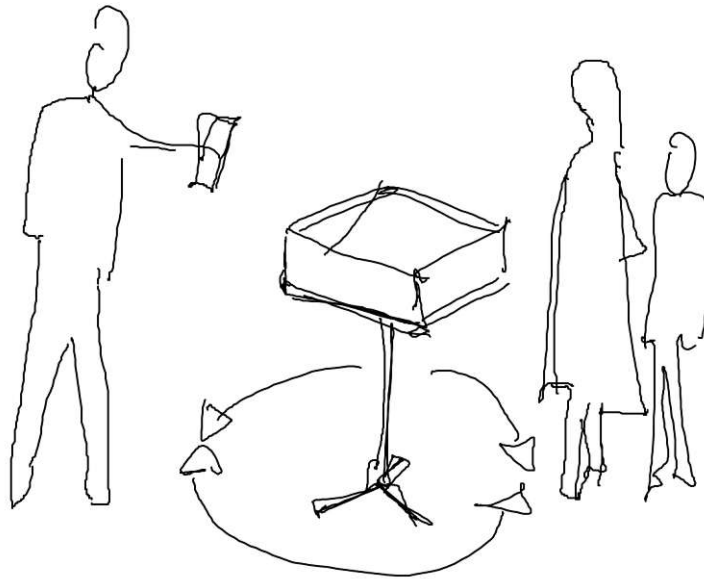


Abb.133: Skizzenhafte Ideen der Präsentation des Modells

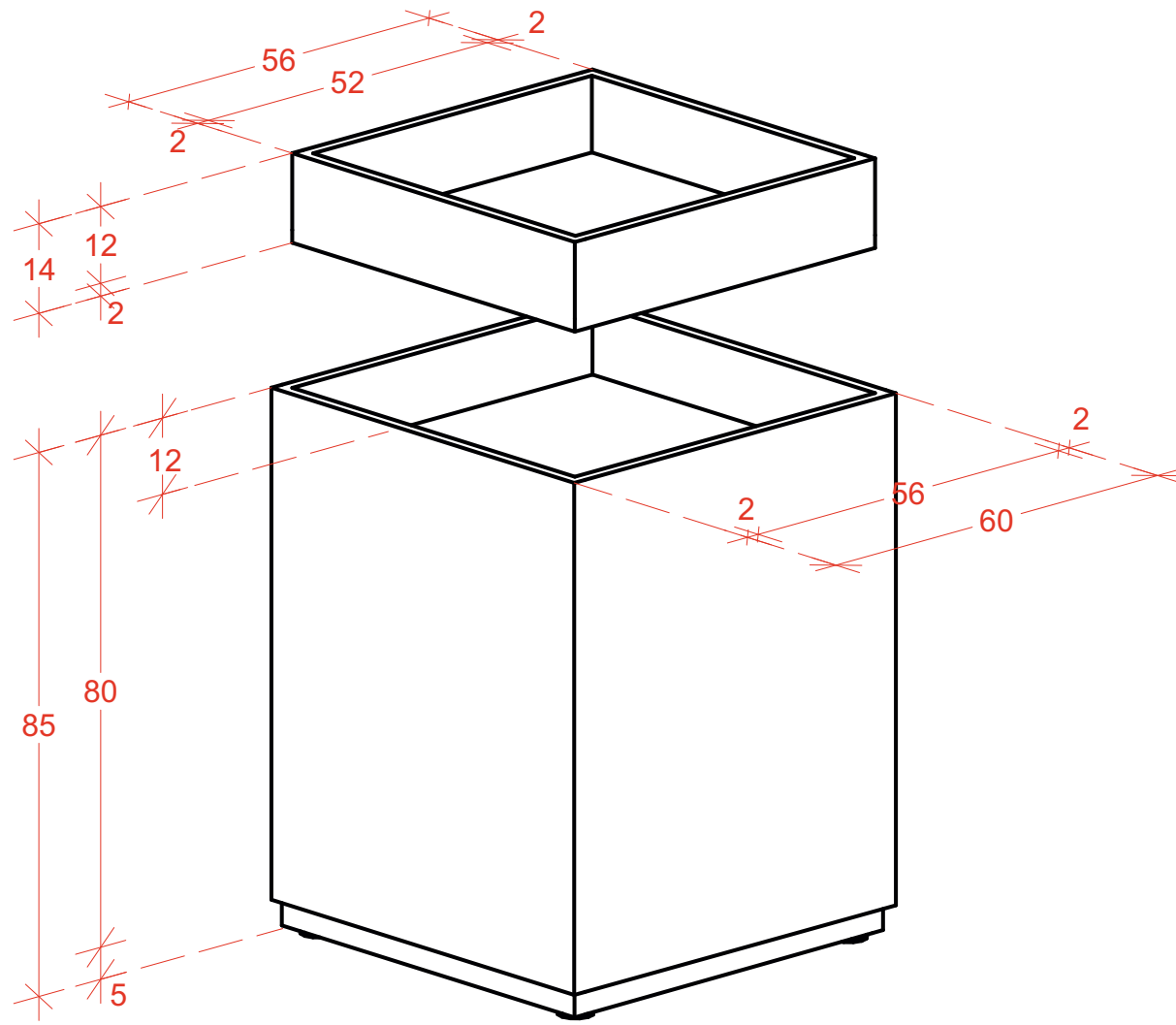


Abb.134: Konstruktionszeichnung des Sockels





Abb.135: Ausstellungs Modell im Maßstab 1:50 auf Präsentationssockel



Abb.136: Im Sand eingebettes Modell



Abb.137: Modell Draufsicht



Abb.138: Detailaufnahme der Süd-Ost Ecke



Abb.139: Modellfoto mit AR Applikation am Tablet



# MOBILE APPLIKATION

## Echtzeit Render Programme

Game-Engines und Echtzeit-Renderprogramme haben die Spieleentwicklung und digitale Medienproduktion für Applikationen grundlegend verändert. Dabei handelt es sich um Programme, die dazu dienen, interaktive und immersive 3D-Umgebungen in Spielen, Simulationen und Applikationen zu erstellen. Game Engines bieten eine Reihe von Entwicklungstools, die zur Erstellung von Spielen und Anwendungen verwendet werden können, und kümmern sich um viele technische Aspekte. Sie werden oft in mehreren Spielen verwendet, was es den Spielehersteller ermöglicht, sich auf den kreativen Teil des Spiels zu konzentrieren, anstatt jedes Mal ein Spiel und Funktion von Grund auf neu zu programmieren.

Zwei der bekanntesten Game-Engines sind Unity [Unity, 2023] und die Unreal Engine von Epic Games [Unreal Engine, 2023]. Sie ermöglichen nicht nur die Erstellung von Spielen, sondern auch von interaktiven Applikationen und Simulationen. Beide bieten ähnliche Möglichkeiten wie Echtzeit-Renderprogramme und gehen in vielen Aspekten wie zum Beispiel in der Virtual Reality und Augmented Reality sogar noch darüber hinaus.

Game Engines stellen eine Vielzahl von Schlüsselkomponenten und Funktionen zur Verfügung, die den Kern der Spieleentwicklung bilden. Eine dieser Komponente ist die sogenannte Rendering-Engine, die für die Darstellung von 2D- oder 3D-Grafiken auf dem Bildschirm verantwortlich ist. Sie erzeugt verschiedene

Effekte, wie Beleuchtung, Schatten, Reflexionen und mehr, und trägt damit entscheidend zur visuellen Wahrnehmung des Spiels bei.

Die Physik-Engine ist ein weiteres wesentliches Element, das physikalische Interaktionen und Effekte im Spiel simuliert, wie Gravitation und Kollisionen zwischen Objekten. Parallel dazu kümmert sich die Audio-Engine um die Wiedergabe von Soundeffekten und Musik, die zur Stimmung und Atmosphäre des Spiels beitragen [Akenine-Möller et al, 2018].

In der heutigen Zeit ist auch die Implementierung von künstlicher Intelligenz (KI) in Spielen von großer Bedeutung. Game Engines bieten hierfür geeignete Tools, beispielsweise für das Verhalten von Nicht-Spieler-Charakteren, den sogenannten NPCs [Russell, u. Norvig, 2009]. Die Eingabeverwaltung ist ein weiteres grundlegendes System, das die Verarbeitung von Interaktionen über verschiedene Eingabegeräte wie Tastatur, Maus, Gamepad oder Touchscreen ermöglicht. Weiters beinhalten Game Engines in der Regel vorgefertigte Animationssysteme, die es ermöglichen, Animationen für Charaktere und andere Objekte in der 3D Umgebung zu erstellen und zu verwalten.

Mit der Unreal Engine 5 hat Epic Games zwei bemerkenswerte Neuerungen implementiert. „Lumen“ ist ein dynamisches globales Beleuchtungssystem, das realistischere Lichteffekte und

Schatten in Echtzeit bietet, wodurch die Immersion und Qualität der visuellen Darstellung verbessert wird. Dies ermöglicht auch eine effizientere Bearbeitung der Beleuchtung ohne vorab berechnete Lichtkarten [Epic Games, 2021]. „Nanite“ hingegen ist eine Mikropolygon-Geometrie-Technologie, die extrem detaillierte 3D-Modelle in Echtzeit darstellt. Sie ermöglicht die Verwendung von Modellen mit Millionen von Polygonen, ohne Leistungseinbußen, was zu einer großen Detailgenauigkeit in Spielen und anderen interaktiven Anwendungen führt [Epic Games, 2021].

In letzter Zeit spielen Game Engines eine wesentliche Rolle bei der Entwicklung von Augmented Reality (AR) Anwendungen. Sie stellen die vorhin erwähnten Werkzeuge und Funktionen zur Verfügung, um 3D-Modelle und Umgebungen zu erstellen um diese in die echte Welt zu projizieren. Die Rendering-Engine erzeugt die virtuellen Objekte, die dann in die Kameraansicht des Geräts eingefügt werden. Die Physik-Engine sorgt dafür, dass diese Objekte in einer realistischen Weise mit der echten Welt interagieren können, beispielsweise wenn sie auf eine Oberfläche platziert oder durch den Raum bewegt werden. Wichtige Vertreter von Game Engines, wie Unity und Unreal Engine, bieten zudem spezielle AR-Entwicklungskits an, die den Prozess der AR-Entwicklung erleichtern. Diese Entwicklungskits, wie zum Beispiel ARKit für Unity, liefern zusätzliche Funktionen speziell für Augmented Reality, wie Bilderkennung (Image Targeting), Flächenverfolgung und 3D-Objekterkennung (Model Targeting).<sup>13</sup>

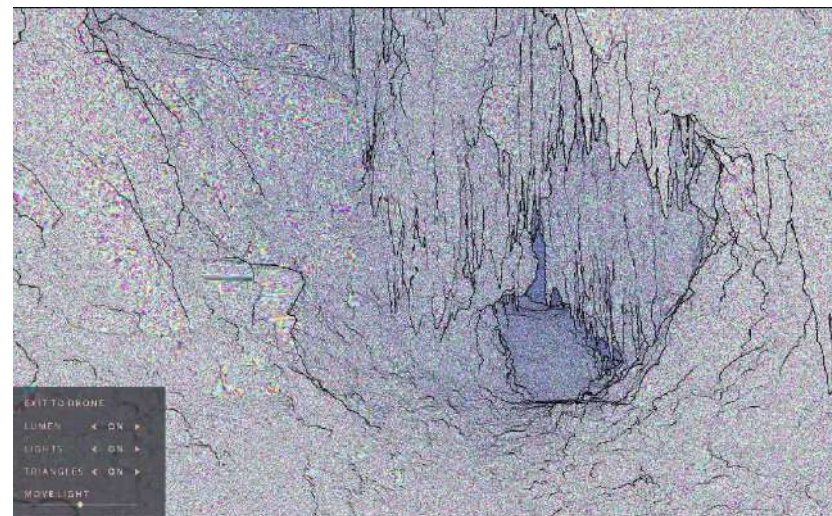


Abb.140: Darstellung der Polygone in der Unreal Engine



Abb.141: Programmierung einer Charakteranimation in Unity



## Unity

Bei der Umsetzung der AR-Applikation viel die Wahl auf Unity, da diese mit der Vuforia Softwareplattform [Vuforia,2023] eine benutzerfreundliche Umsetzung von Tracking Möglichkeiten bietet, sowie eine große Benutzergemeinschaft hat. Als umfassendes Entwicklungswerkzeug ermöglicht Unity Entwicklern die Kreation immersiver virtueller Erlebnisse, die von Spielen bis hin zu Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR) Anwendungen reichen. Dabei können diese Anwendungen flexibel auf einer Vielzahl von Plattformen einschließlich Android, iOS, macOS, Windows und Linux erstellt und bereitgestellt werden.

Die Stärken von Unity liegen in seinen vielfältigen Funktionen und Systemen, die gemeinsam ein leistungsfähiges Werkzeug für die Erstellung von digitalen Inhalten darstellen. Das Grafiksystem, eines der zentralen Elemente der Unity Engine, hat sich im Laufe der Jahre erheblich weiterentwickelt und kann nun fotorealistische Darstellungen in Echtzeit erstellen (Echtzeitrenderprogramm). Das Physiksystem, ein weiteres Kernelement, ermöglicht realistische Simulationen von Bewegungen und Interaktionen, einschließlich Effekte wie Gravitation und Kollisionen zwischen unterschiedlichen Elementen [Pirker & Gütl, 2015]. Zusätzlich bietet Unity eine Reihe von Tools zur Anpassung der Steuerung, zur Erstellung benutzerfreundlicher Oberflächen, zur Bearbeitung von Audio und zur Unterstützung von Netzwerkfunktionen, die beispielsweise die Erstellung von Multiplayer-Spielen oder die Synchronisation von Spielsitzungen ermöglichen [Pirker u. Gütl, 2015].

Unity ist darauf ausgelegt, die Integration und Arbeit mit 3D-Modellen zu erleichtern. 3D-Modelle, die in externen Modellierungsprogrammen erstellt wurden, können importiert und in der Szene platziert werden, wobei sie mit Materialien versehen und animiert werden können. Hierbei wird der Workflow durch den Einsatz von Skripten und Plugins vereinfacht [Unity, 2023]. Die Programmierung in Unity wurde zugänglicher gemacht durch das Konzept des „Visual Scripting“, bei dem die Programmierung über grafische Schnittstellen durchgeführt werden. Dies ist besonders hilfreich für Künstler, Designer und Anfänger, die möglicherweise nicht die nötigen Programmierkenntnisse haben.<sup>14</sup>

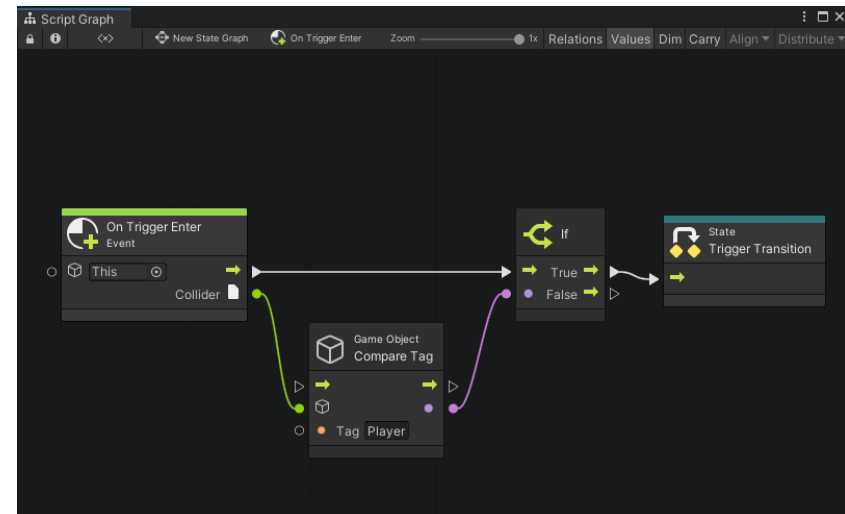


Abb.142: Darstellung von „Visual Scripting“ in Unity

dungen. Unity bietet eine Reihe von Vorlagen für AR-Projekte, die bereits grundlegende Funktionen enthalten und einfach an die spezifischen Anforderungen eines Projekts angepasst werden können [Unity Technologies, 2021]. Die AR-Implementierung in Unity wird hauptsächlich durch verschiedene AR-Software Development Kits, den sogenannten SDKs, bereitgestellt, wie ARKit für iOS, ARCore für Android und Vuforia für plattformübergreifende Lösungen [Kress & Cummings, 2017]. Diese SDKs bieten wichtige Funktionen für AR-Anwendungen, wie beispielsweise das Erkennen und Verfolgen von Oberflächen, Gesichtern und Bildern, das Verankern von virtuellen Objekten in der realen Welt und vieles mehr. Unity bietet zudem ein hohes Maß an Flexibilität und Kontrolle über diese Funktionen, so dass Entwickler ihre AR-Szenen genau nach ihren Anforderungen gestalten können [Robert, 2013].

Mit Unity können Entwickler 3D-Modelle und andere digitale Inhalte erstellen oder importieren, sie mit interaktiven Skripten versehen und sie dann in AR-Szenen einfügen, die mit der realen Welt interagieren. Diese AR-Szenen können dann auf eine Vielzahl von Plattformen und Geräten verteilt werden, dank der plattformübergreifenden Fähigkeiten von Unity. Ein wesentlicher Aspekt bei der Entwicklung von AR-Anwendungen in Unity ist auch die Benutzerinteraktion. Unity bietet umfangreiche Tools und APIs, mit denen Entwickler intuitive und ansprechende Benutzeroberflächen und Interaktionen erstellen können, von einfachen Berührungs- und Gestensteuerungen bis hin zu komplexeren

Interaktionen wie der Erkennung und Verfolgung von Handbewegungen [Wagner, 2020].



Abb.143: Handtracking zur Navigation durch die AR Anwendung

Insgesamt bietet Unity Entwicklern eine robuste und flexible Plattform für die Erstellung von hochwertigen AR-Anwendungen. Durch die Kombination von leistungsstarken AR-SDKs, fortschrittlichen Rendering-Techniken, intuitiven Interaktionswerkzeugen und der breiten Plattformunterstützung, ermöglicht Unity den Entwicklern die Erstellung von AR-Applikationen.

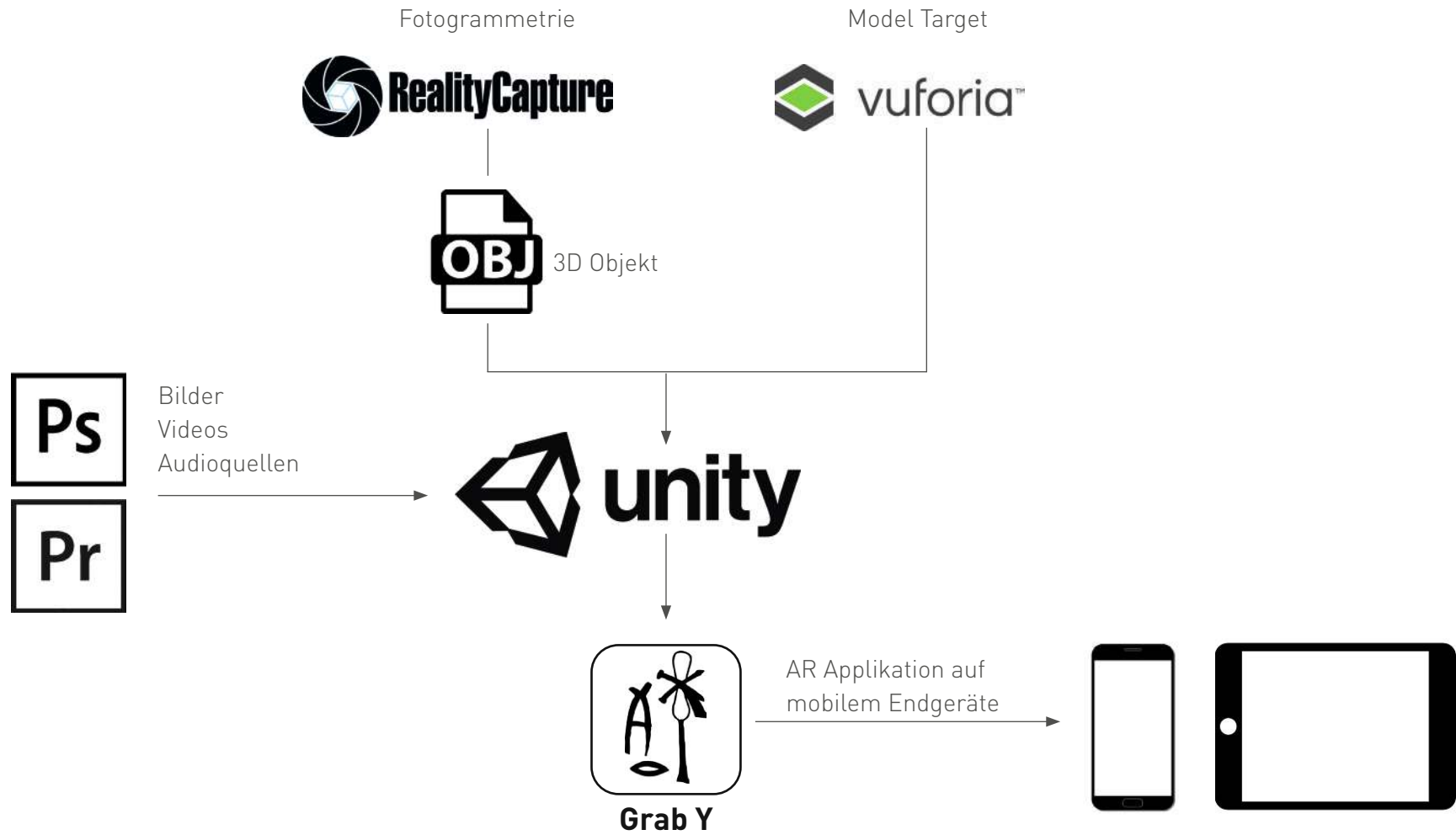


Abb.144: Arbeitsablauf der verwendeten Programme

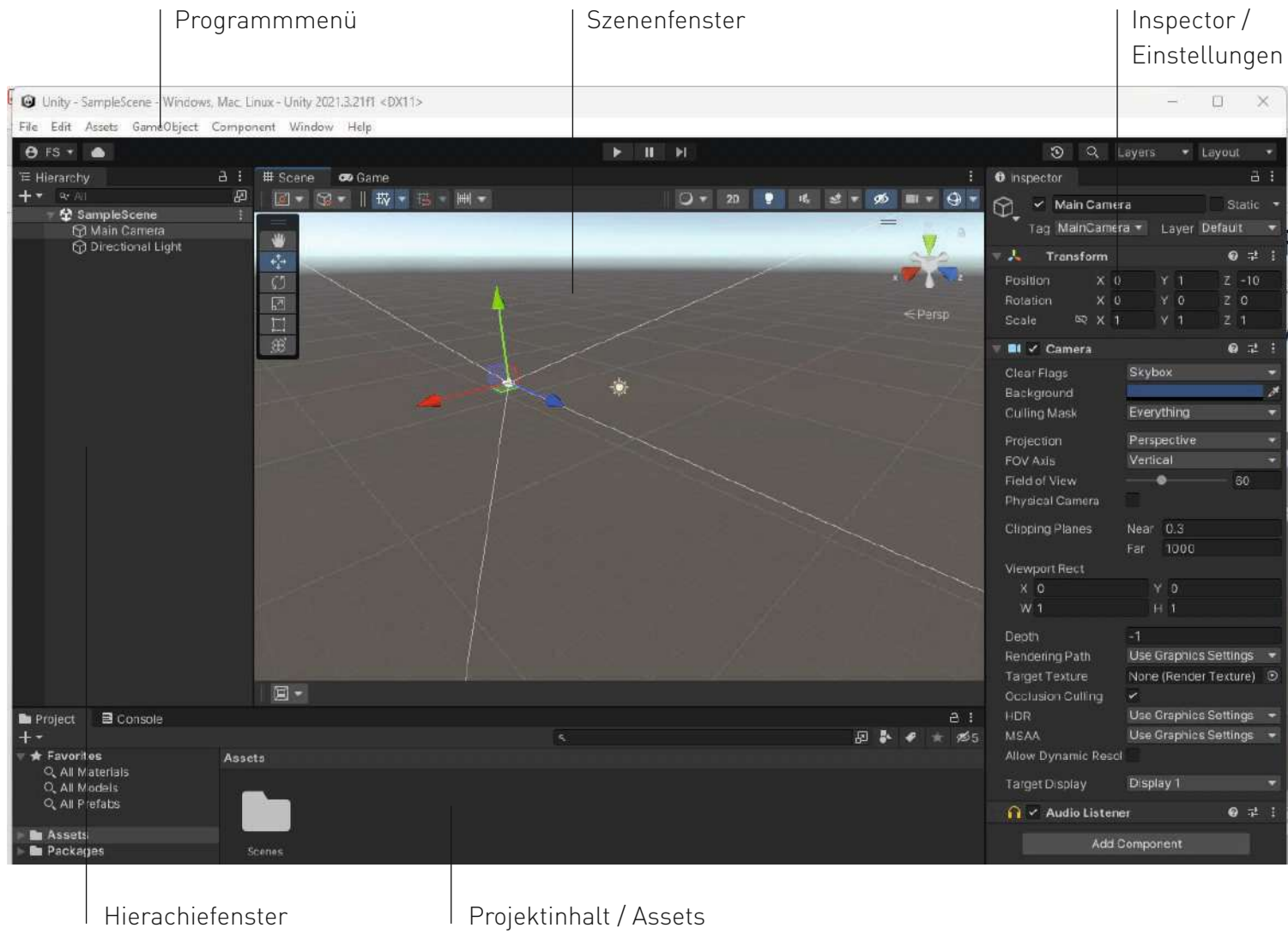


Abb.145: Hauptfenster Unity Software

## Vuforia

Für die augmentierung einer Unity Scene gibt es vorgefertigte SDKs. Vuforia [Vuforia, 2023] bietet hier eine ausgereifte Lösung, augmentierungen mittels Markern in die reale Welt zu platzieren. Bei markerbasierten AR-Anwendungen fungieren reale Elemente, wie Bilder oder kleine Objekte, als Anhaltspunkte für virtuelle Ergänzungen. Markerlose AR-Ansätze hingegen basieren auf standort- oder positionsbezogenen Informationen wie GPS-Daten, Beschleunigungsmessern, Gyroskopen und komplexen Bildverarbeitungsalgorithmen. <sup>15</sup>

Weiters bietet das Programm verschiedene Arten von Markern, darunter VuMarks, die von den Usern selbst entworfen und ins Programm hochgeladen werden können. Hierbei wertet das Programm die Features (markante Punkte) des Markers aus und bewertet diese betreffend ihrer Tauglichkeit für eine AR Szene. VuMarks können neben codierte Darstellungen (z.B. QR Codes) auch aus bildlichen Darstellungen/Fotos bestehen. Neben VuMarks ermöglicht Vuforia die Arbeit mit weiteren Informationsauslösern, um eine Vielzahl von AR-Erfahrungen zu ermöglichen. Eine besonders immersive Verwendung von Vuforia ist die augmentierung auf realen Objekten wie zum Beispiel Gebäude, Schilder oder Modelle. Hierbei wird kein zusätzlicher zweidimensionaler Marker benötigt um die augmentierung in der Realen Welt zu platzieren. Vuforia bietet dafür ein eigenes Programm namens Model Target Generator, das die Herstellung von Model Targets Packages für den Unity import in eine AR Szene erstellt.

## Model Target Generator

Der Modell-Target-Generator von Vuforia ist eine Software, die die Integration von 3D-Modellen realer Objekte in Augmented Reality Anwendungen ermöglicht. Dadurch können AR-Erlebnisse basierend auf dem Erscheinungsbild und der Form von Objekten erstellen, ohne sich auf 2D-Bildererkennung (z.B. Fotos/Abbildungen) oder Marker angewiesen zu sein. Dies erweitert nicht nur die Möglichkeiten der AR-Technologie, sondern öffnet auch Türen für zahlreiche Anwendungen bei denen Marker als störend empfunden werden können. <sup>16</sup>

Mithilfe Algorithmen von Vuforia können 3D-Modelle realer Objekte, im vorliegenden Fall das 3D Modell des Grabes, das für den 3D-Druck herangezogen wurde, präzise und effizient erkannt und verfolgt werden. Zuerst wird ein 3D Modell (z.B. als OBJ) in den Model Target Generator importiert und Einstellungen wie die korrekte Größe, die Farbdarstellung sowie die Ausrichtung des Objektes definiert. Da die OBJ Datei des Grabes eine für das Model Target Tracking zu große Polygonanzahl aufwies, wurde es direkt im Programm von Vuforia auf unter 200.000 Dreiecksflächen reduziert.

Einerseits ist es möglich, entweder die erforderlichen Informationen extrahiert und sämtliche Informationen für ein Target generiert, das in Vuforia AR Anwendungen verwendet werden kann.

**Model Target erstellen**

Name	Last Modified	Status	Guide Views	Configured for Training
Kiste2	Jan 29, 2023	Guide views set	GuideView_0000	Yes
Kiste2_Copy	Jan 30, 2023	Target generated	GuideView_0001	No
chamer2	Jan 30, 2023	Guide views set	GuideView_0000	Yes
230403_modeltarget...	Apr 8, 2023	Guide views set	GuideView_0000	Yes
230408_Abydos_Y...	Apr 8, 2023	Guide views set	GuideView_0000	Yes

**Menüleiste**

How to Use | Getting Started | Model Target Tips | Support

**Model Target Training**

Training Sets | Sign Out

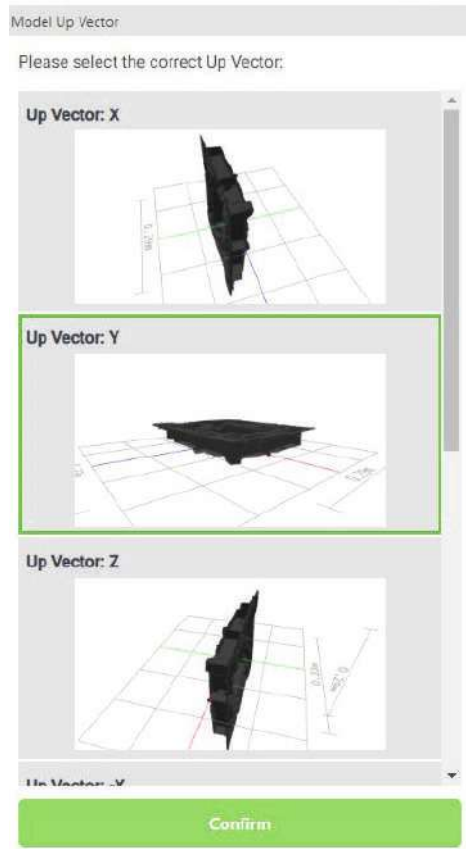
Create Database | 12 of trainings remaining

- Kiste2 | Export
- chamer2 | Export
- 230403\_modeltarget\_part1 | Export
- 230408\_Abydos\_Y\_ModelTarget | Export

bereits angelegte Model Targets

fertig gestellte Training Sets zum Exportieren

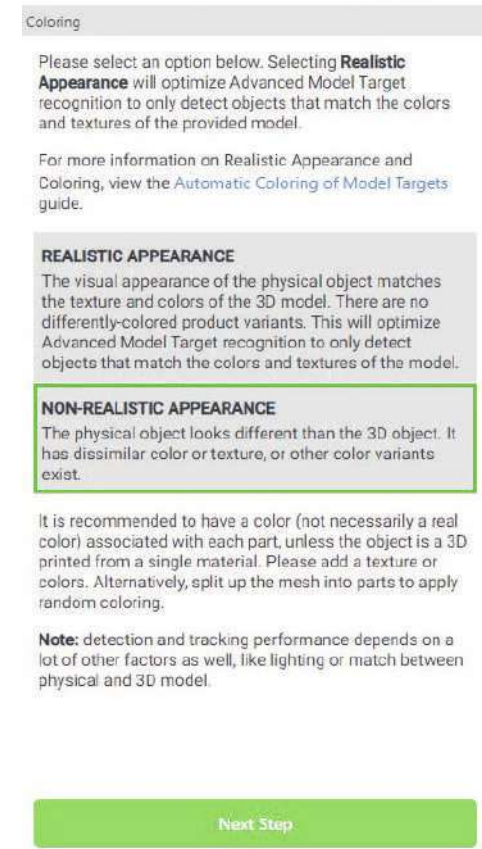
Abb.146: Hauptfenster des Model Target Generators von Vuforia



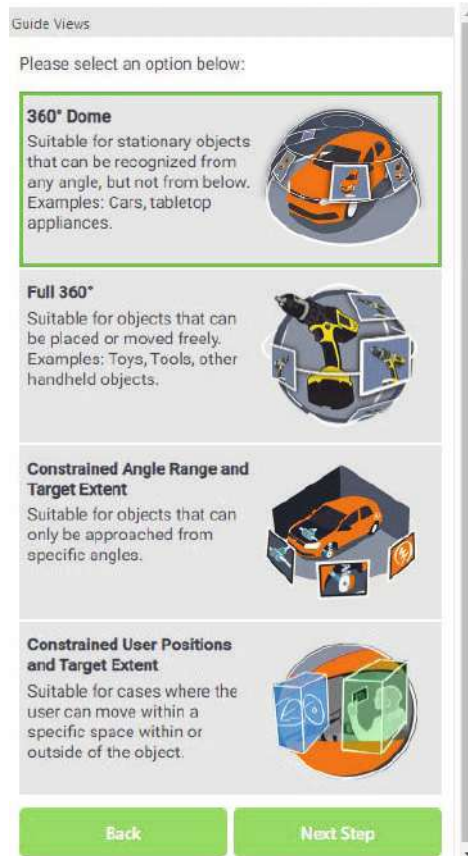
Einstellung der Ausrichtung der Vektoren um die Lage der Model Targets in der Unity Applikation zu definieren. Da Unity mit einer Y Achse nach oben arbeitet, wird beim Grab UP-Vector Y ausgewählt.



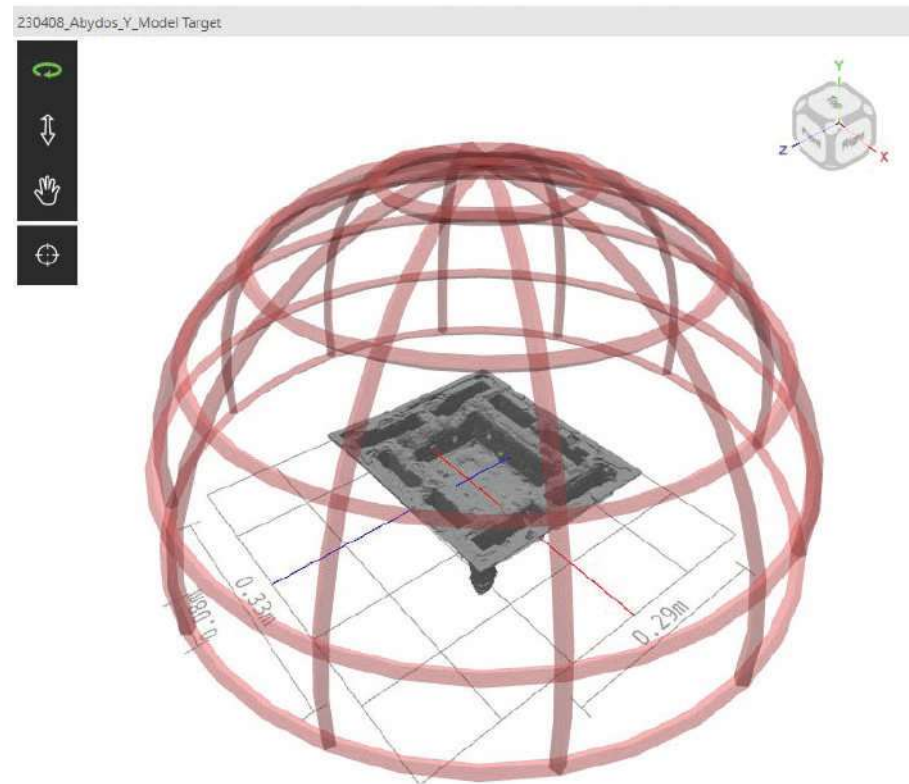
Einstellung der Einheit und somit der Größe des Model Target. Das Model des Grabes ist im Maßstab 1:50 und wurde somit vorab als skaliertes OBJ in das Programm geladen.



Einstellung der Farbe des Erscheinungsbildes des Model Targets in der realen Welt. Da das 3D Modell in einem Farbton gedruckt wurde, wurde die Option „non-realistic appearance“ ausgewählt.



Einstellung der zu erwartenden Blickrichtungen der AR Anwendung. Beim Modell des Grabes wurde 360° Dome gewählt, da eine AR Projektion von einem tieferen Winkel ausgeschlossen wurde.



Darstellung des 360° Dome, der den Tracking Bereich des Model Targets in der AR Anwendung sowie die Anzeige der tatsächlichen Skallierung in der realen Welt anzeigt.

Abb.147: Screenshots aus dem Model Target Generator von Vuforia



## Grab Y Applikation

Das Hauptziel der AR-Anwendung für die Grabanlage von Königin Meret Neith bestand darin, die erstellten digitalen Elemente in eine reale Umgebung einzufügen, diese mit zusätzlichen digitalen Informationen zu ergänzen und auf das 3D gedruckte Modell zu projizieren. Die Anwendung soll den Nutzern die Flexibilität bieten, selbst zu bestimmen, welche Darstellungen und Informationen sie eingeblendet haben möchten.

Eines der Kernelemente ist die Darstellung der Textur, also die Darstellung der Oberfläche in den tatsächlichen Farben des Grabes, die während der fotogrammetrischen Aufnahme und der Erstellung des 3D-Modells erzeugt wurde. Darüber hinaus sollen nützliche Informationen wie Bezeichnungen, Kammernummierungen, Orientierung und Elemente wie Zwischenschichten der in situ gefundenen Keramik oder fotogrammetrisch erfasste Objekte dargestellt werden können.

Um diese Elemente korrekt auf das im Maßstab 1:20 mit einem 3D-Drucker erstellte Modell übertragen zu können, wurde die 3D-Datei in den zuvor beschriebenen Model Target Generator von Vuforia geladen und trainiert. Faktoren wie Größe, Achsenausrichtung und geplanter Blickwinkel des Tablets wurden im Programm definiert und durch algorithmenbasierte Berechnungen antrainiert, um ein genaues Tracking des Modells zu ermöglichen.

Die Implementierung des Targets in die mobile Anwendung ermöglichte eine digitale Überlagerung der Elemente in der Arbeitsumgebung und lieferte eine erste Vorschau der späteren Darstellung. Elemente wie die Grabkammer, Zwischenschichten und Artefakte wurden als OBJ-Dateien in den sogenannten Asset-Ordner geladen und in die digitale Umgebung anhand des Model Target ausgerichtet. Die mit Reality Capture erstellten Texturen wurden ebenfalls in das Programm geladen und den jeweiligen Objekten zugeordnet.

Um die Interaktion der Nutzer mit den verschiedenen Elementen zu erleichtern, wurde ein Menü auf der rechten Seite der Anwendung erstellt. Es enthält Schalter (Buttons), die das Ein- und Ausblenden oder Umschalten der augmentierten Darstellung ermöglichen. Zusätzlich wurde eine kurze Videodokumentation der ersten beiden Ausgrabungskampagnen in die Anwendung integriert, mit eigenen Video-Buttons für Start, Stopp, Vorwärts und Rückwärts.

Für die Präsentation der Anwendung des Grabes von Meret Neith wurde ein Samsung Galaxy Tab S8+ verwendet. Das Ausgabegerät muß innerhalb Unity spezifiziert werden um eine Anpassung gerätespezifischer Parameter zu ermöglichen. Dazu gehören zum Beispiel die Displayauflösung, die Darstellungsproportion sowie Hardware Spezifikationen.



Abb.148: Unity Szene mit sämtlichen eingeblendeten Inhalten

Nach dem Start der Applikation auf dem Tablet wird nach dem erfolgreichem Model Target Tracking die digitale Textur sowie die Bezeichnung des Grabes auf das 3D-Modell projiziert. Die Menüleiste auf der rechten Seite, ist während der gesamten Handhabung durch die App eingeblendet und dient zur Navigation.

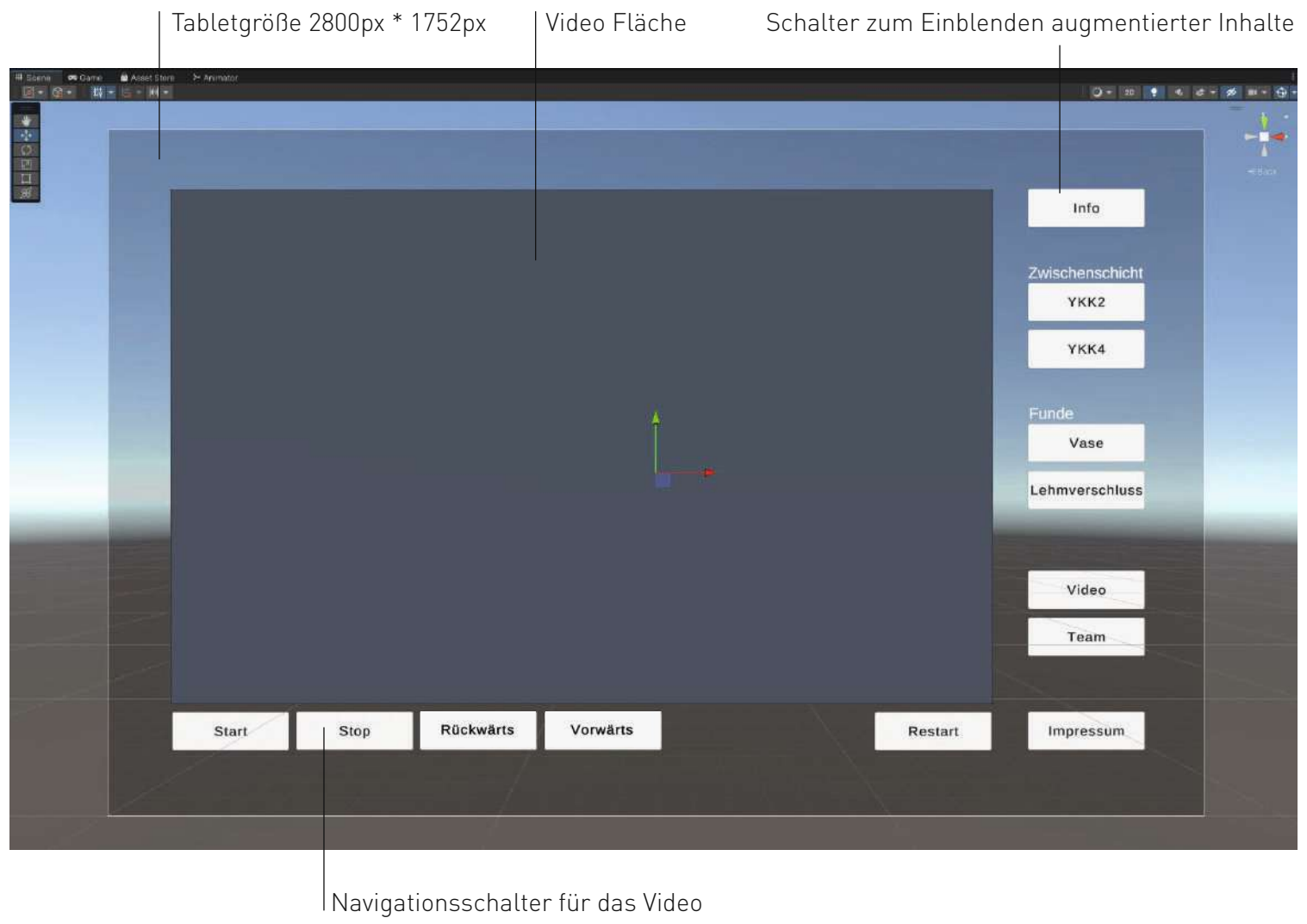


Abb.149: Unity Tabletoberfläche mit Navigationsmenü



Abb.150: Darstellung der Textur des Grabes mittels Model Target Tracking

Nach dem Start der Applikation auf dem Tablet wird nach dem erfolgreichem Model Target Tracking die digitale Textur sowie die Bezeichnung des Grabes auf das 3D-Modell projiziert. Die Menüleiste auf der rechten Seiten, ist während der gesamten Handhabung durch die App eingeblendet und dient zur Navigation.



Abb.151: Zusätzliche Information über das Grab

Durch das Aktivieren über die Info Schaltfläche werden zusätzliche Informationen, wie die Bezeichnungen der einzelnen Kammern aber auch die Orientierung des Grabes dargestellt.



Abb.152: Darstellung der Zwischenschichte YKK-2 und YKK-4

Da von einigen Kammern fotogrammetrische Aufnahmen der Zwischenschichten angefertigt wurden, sind diese in der Applikation zum Ein- und Ausblenden implementiert.



Abb.153: Darstellung eines Lehmverschlusses in der Originalgröße

Archäologische Funde, die während der Ausgrabung dokumentiert wurden, können im Originalmaßstab in der Applikation dargestellt werden. Beispielhaft wurde ein Lehmverschluss und eine Vase in die App implementiert.



Abb.154: Dokumentationsfilm mit separaten Navigationsschalter

Im Laufe der ersten zwei Kampagnen wurde ein Dokumentationsfilm der Ausgrabung angefertigt, der innerhalb der Applikation abgespielt werden kann. Dieser wird jedoch, aufgrund einer besseren Darstellung, nicht auf die reale Umgebung augmentiert, sondern in einem eigenem Fenster abgespielt. Zur Navigationen durch das Video dienen Schaltflächen, die mit der Videoquelle verknüpft sind.





Abb.155: Darstellung des Digitalisierungsteam in der Applikation

Über den Schaltfläche „Team“ wird eine Darstellung des Digitalisierungsteam der Technischen Universität Wien eingeblendet. Dieses ist mit transparentem Hintergrund dargestellt, um das dahinterliegende Grab nicht zu verdecken. Es ist zu beachten, dass die Darstellung der Teammitglieder im Vergleich zum Grab vergrößert dargestellt wird, um eine optimale Sichtbarkeit sicherzustellen.



Abb.156: Darstellung der AR-Applikation auf dem Tablet



Abb.157: Eine Wandrelief des ägyptischen Gottes Thoth aus dem Tempel von Ramses II. , Abydos, Ägypten



# CONCLUSIO

## Conclusio

Die Zielsetzung dieser Arbeit liegt darin, Menschen die Möglichkeit zu bieten, kulturelle Stätten, die aufgrund ihrer geografischen Lage oder ihres sensiblen Zustands für eine breite Masse unzugänglich sind oder durch Zerstörung und Vandalismus nicht mehr existieren, näher zu bringen und erlebbar zu machen.

Die fotogrammetrische Datenaufnahme des Grabes von Königin Meret Neith in der abgelegenen Wüstenregion nahe Abydos, stellte viele Herausforderungen dar. Insbesondere die große Hitze sowie der feine Wüstensand setzten den verwendeten Geräten zu. Verschiedene in Wien entwickelte Ideen und Tests erwiesen sich unter den extremen Bedingungen der Wüste als nicht geeignet. Insbesondere die Systemkamera (Sony-Alpha 7C) stellte sich während der Aufnahme auf der Ausgrabungsstätte als nicht praktikabel dar, während sich die mitgeführten Smartphones, ein iPhone 12 Pro Max und ein iPhone 13 Pro, aufgrund der kompakteren Bauweise als benutzerfreundlicher und vielseitiger erwiesen, und somit eine effizientere Aufnahme der Kammern gewährleisteten. Als problematisch stellte sich jedoch die große Datenmenge auf den iPhones dar, da die Bildberechnung während des Fotografierens um bis zu 10 Minuten zeitlich hinerher lag, was ein Kontrollieren des Bildausschnitts und der Bildschärfe erschwerte. Weiters mussten die Abbildungen täglich mittels Kabelverbindung auf die Datenträger und Sicherungsfestplatten gespielt werden, da die Smartphones keine Möglichkeit boten auf wechselbare SD-Karten zu speichern.

Die enorme Datenmenge der Aufnahmen sowie der erstellten Videos erforderten ausreichend große Speichermedien. Dadurch entstand die Notwendigkeit eines komplexeren Datenmanagements, da nicht die kompletten Daten gleichzeitig auf einer Festplatte gespeichert werden konnten, sondern auf mehreren Datenträgern verteilt werden mussten.

Während der fotogrammetrischen Aufnahme war es notwendig, eine angemessene Beschattung sicherzustellen, um unerwünschte Schattenwürfe der Sonne auf den Texturen zu vermeiden. Verschiedene Arten von Textilien wurden zu diesem Zweck vorab auf Tauglichkeit getestet. In der ersten Kampagne (November 2021) stellte die geringe Größe des Beschattungstuches eine Herausforderung dar, da die im Schatten liegenden Bereiche für die Fotografie nicht allzu groß waren und das Beschattungstuch sehr oft neu ausgerichtet werden musste. Aus diesem Grund wurde in der zweiten Kampagne (April 2022) ein 6m x 6m großes Beschattungstuch verwendet, das mithilfe von Seilen über dem Grabareal gespannt wurde. Diese Vorgangsweise erwies sich als praktikabel für die Größe des Grabes. Marker, die vorab in Österreich auf Hartschaumplatten gedruckt wurden, zeigten sich auch unter den extremen Hitzebedingungen als geeignet. Bei der ersten Kampagne kam es allerdings zu Problemen durch die doppelte Verwendung einiger Marker, was die spätere Berechnung in der Fotogrammetriesoftware erschwerte. Durch Deaktivierung dieser doppelten Marker bei bestimmten Berechnungsvorgängen ließen sich diese Schwierigkeiten jedoch lösen. Für die Berech-

nung der zweiten Kampagne war eine detaillierte Dokumentation, welche Marker in welcher Kammer und zu welchem Zeitpunkt genutzt wurden, sehr nützlich. Dies erlaubte es auch, die Marker, die zur Skalierung verwendet wurden, genau zu dokumentieren und die gemessenen Abstände festzuhalten.

Die in Abydos aufgenommenen Abbildungen und Informationen wurden dann zur fotogrammetrischen Berechnung weiterverarbeitet. Hier erwies sich vor allem die Aufteilung in Teilbereiche (Komponenten) bei der Berechnung als ein großer Vorteil betreffend der Berechnungszeit. Während die Berechnung der einzelnen Kammern und der späteren Zusammensetzung der Teilbereiche zu erfolgreichen Ergebnissen führte, war eine Berechnung der 35.000 Abbildungen auf einmal durch Überlastung der Fotogrammetrie-Software nicht möglich. Das Ergebnis ist ein detailreiches, digitales Modell des Grabes mit einer Größe von 285 Millionen Dreiecken. Da dies für die weitere Bearbeitung der Wandansichten und für den 3D-Druck des Modells eine zu große Datenmenge darstellte, musste die Polygonanzahl des 3D-Objekts reduziert werden. Da der 3D-Druck im Maßstab 1:50 geplant wurde, änderte das jedoch wenig in der späteren Genauigkeit der Modellauflösung. Die Wahl des SLA-Druckverfahren erwies sich nach zahlreichen Tests als weitaus geeigneter um die Struktur und Bauweise des Grabes genauer darzustellen. Ebenfalls konnte dadurch die Gesamtdruckzeit erheblich reduziert werden. Aufgrund der geringeren Bauplattform bei diesem Druckverfahren, musste das Modell jedoch in vier Einzelteilen gedruckt werden.

Die Genauigkeit und die Oberflächenstruktur des 3D-Drucks erwies sich als geeignet für ein Model Target Tracking in der Augmented-Reality-Applikation. Durch die unterschiedliche Struktur und Bauweise der Mauerkronen werden die augmentierten Inhalte stabil und positionsgenau auf das gedruckte Modell überlagert.

Die entstandenen Darstellungen der Wandansichten, das fertige Modell des Grabes sowie die dazugehörige AR-Applikation bilden eine Basis zur weiteren wissenschaftlichen Erforschung und Analyse des Grabes. Erste Überlegungen zur Rekonstruktion wurden seitens der beteiligten Ägyptologen auf der Grundlage der bislang verfügbaren Daten bereits vorgenommen. Für zukünftige Museumseinrichtungen sind die Möglichkeiten, die sich aus der Integration dieser Technologien ergeben, vielfältig. Durch AR können Besucher das Grab nicht nur visuell erfassen, sondern auch mit ihm interagieren. Sie können virtuelle Schichten und Anmerkungen sehen, die zusätzliche Informationen zu bestimmten Artefakten, Inschriften oder architektonischen Merkmalen des Grabes liefern. Dieses erhöhte Maß an Interaktivität und Immersion kann den Besuchern ein tieferes Verständnis und eine größere Wertschätzung für das Grab und die darin enthaltene Geschichte und Kultur vermitteln.

Nach Abschluss der letzten Kampagne können das vorhandene Modell und die AR-App erweitert werden um die gesamte Grabanlage der Königin Meret Neith darzustellen.

## Förderstellen und Institutionen

Das Projekt „Die Visualisierung einer altägyptischen Königin - Das Grab der Königin Meret Neith der 1. Dynastie in Abydos“ - wird vom österreichischen Wissenschaftsfonds (FWF) unter der Nummer I 4688-G und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) - Projekt Nummer 434209459 sowie durch das Deutsche Archäologische Institut in Kairo, die Universität Wien und die Technische Universität Wien, finanziert.

**FWF**

Der Wissenschaftsfonds.

**DFG**

Deutsche  
Forschungsgemeinschaft

German Research Foundation



universität  
wien



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

## Danksagung

Danke

... an **Peter Ferschin, Bálint István Kovács, Karl-Johann Mayer** und **Sara Treccarichi Scavuzzo** vom Digitalisierungsteam der Technischen Universität Wien für die hervorragende Zusammenarbeit und die gemeinsamen Erfahrungen bei den Grabungskampagnen in Abydos.

... an **Christiana Köhler** und **Friederike Junge** vom Institut für Ägyptologie der Universität Wien sowie **Amber Hood** von der Universität Lund für die Zusammenarbeit und die Expertise aus Sicht des Forschungsgebiets der Ägyptologie.

... an meine Mutter **Maria Sövegjarto** für ihre Hilfe und Unterstützung während meines Architekturstudiums sowie der Anfertigung des großen Beschattungstuchs für die fotogrammetrischen Aufnahmen.

... an meine Frau **Roswitha Linke-Sövegjarto** die mich mit ihrer geduldigen und liebevollen Art immer wieder dazu ermuntert und bestärkt hat, diese Arbeit zu verfassen.

... an meine Geschwister **Delia Hess** und **Lisa Sövegjarto** sowie Wegbegleiter **Holger Neuberger** und **Andrea Holzapfel** für ihre Hilfe und Unterstützung in all diesen Jahren - und es waren viele Jahre.

... an **Herbert Halbritter** und **Heidemarie Hillerbrand** für die Flexibilität hinsichtlich des Arbeitseinsatzes, um genügend Zeit für die Fertigstellung dieses Projekts zu haben.





Abb.158: Scherben von Opfergefäße, Umm el-Qaab, Abydos, Ägypten



# QUELLEN VERZEICHNISSE

## Literaturverzeichnis

- Akenine-Moller, T., Haines, E., & Hoffman, N. (2018).** Real-time rendering, fourth edition (4. Aufl.). London, England: CRC Press.
- Ashe, T. P. (2014).** Color management & quality output: Working with color from camera to display to print: (The digital imaging masters series). Oxford, England: Focal Press.
- Bimber, O., & Raskar, R. (2009).** Spatial augmented reality: Merging real and virtual worlds. Natick, MA, USA: A K Peters.
- Carmigniani, J., & Furht, B. (2011).** Augmented reality: An overview. In Handbook of Augmented Reality (S. 3–46). New York, NY: Springer New York.
- Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo, P., Damiani, E., & Ivkovic, M. (2011).** Augmented reality technologies, systems and applications. Multimedia Tools and Applications, 51(1), 341–377. doi:10.1007/s11042-010-0660-6
- Caudell, T. P., & Mizell, D. W. (1992).** Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes.
- Christensen, E. (2022).** Photogrammetry's Best, Least Used Tool (part one). Abgerufen von <https://www.youtube.com/watch?v=rh6xZ5sb31M>
- Coates, C. (2022).** How Museums are using Augmented Reality. Abgerufen 8. März 2023, von [www.museumnext.com](http://www.museumnext.com) website: <https://www.museumnext.com/article/how-museums-are-using-augmented-reality/>
- Dodson, A. M. (2016).** The royal tombs of ancient Egypt. Barnsley, England: Pen & Sword Books.
- Eckstein, G. (1980).** Photogrammetrische Vermessungen bei archäologischen Ausgrabungen. Abgerufen von <https://journals.ub.uni-heidelberg.de/index.php/nbdpfbw/article/view/15584/9451>
- Fastermann, P. (2014).** 3D-Drucken Wie die generative Fertigungstechnik funktioniert. Weisbaden: Springer Vieweg.
- Ferschin, P. (2021).** Jahresschrift der österreichischen Gesellschaft für Archäologie - Jahrgang 44.
- formlabs.com. (2018).** 3D-Druck von Architekturmodellen: Leitfaden für Strategien und Workflows.
- Gavish, N., Gutiérrez, T., Webel, S., Rodríguez, J., Peveri, M., Bockholt, U., & Tecchia, F. (2015).** Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks. Interactive learning environments, 23(6), 778–798. doi:10.1080/10494820.2013.815221
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2014).** Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. New York, NY, USA: Springer.
- Giza Project-Abteilung. (2019).** Grabmal der Königin Meresankh III. Abgerufen 10. Mai 2023, von Digital Giza website: <https://giza.mused.org/de/>
- Hollerer, T., Feiner, S., & Pavlik, J. (2003).** Situated documentaries: embedding multimedia presentations in the real world. Digest of Papers. Third International Symposium on Wearable Computers. IEEE Comput. Soc.

- Hughes, J. F., Van Dam, A., & McGuire, M. (2013).** Computer graphics: Principles and practice. Addison-Wesley Professional.
- Isokoski, P., Joos, M., Spakov, O., & Martin, B. (2009).** Gaze controlled games. *Universal Access in the Information Society*, 8(4), 323–337. doi:10.1007/s10209-009-0146-3
- Jagemann, E. (2015).** Nahbereichsfotogrammetrie als Methode zur archäologischen Funddokumentation und -analyse. Freie Universität Berlin, Berlin.
- Kals, H. (2019).** Bauaufnahme und Echtzeitvisualisierung historischer Gebäude, Angewandte Photogrammetrie und Virtual Reality am Beispiel von Schloss Waldenfels. Technische Universität Wien, Wien.
- Kaufmann, H. (2019).** Virtual and Augmented Reality
- Köhler, E. C. (2022).** Final Report on the Fall 2021 and Spring 2022 season of archaeological fieldwork at Abydos - Umm el-Qaab. **Kaufmann, H. (2019).** Virtual and Augmented Reality
- Kövr, O. (2019).** Using photogrammetry and augmented reality in architectural visualization. A mixed reality exhibition of the Otto Wagner Pavilion at the Karlsplatz, Vienna. Technische Universität, Wien.
- Kraus, K. (1994).** Photogrammetrie: Grundlagen und Standardverfahren (5. Aufl.). Dümmler, F.
- Kress, B. C., & Cummings, W. J. (2017).** Optical architecture of HoloLens mixed reality headset. In B. C. Kress, W. Osten, & H. P. Urbach (Hrsg.), *Digital Optical Technologies 2017*. SPIE.
- Langer, A. (2021).** 3D-Rekonstruktion von Betonoberflächen mit Methoden der Nahbereichsfotogrammetrie. Leibniz Universität Hannover.
- Leimer, A. (2018).** Anwendung von Virtual Reality in der Planungspraxis. Technische Universität Wien, Wien.
- Liedtke, A. (2019).** Photogrammetrie Asset Erstellung. Welche Möglichkeiten bietet Texture-Delighting mittels HDRI? Hochschule der Medien Stuttgart, Stuttgart.
- Ller, T. A.-M., Haines, E., & Hoffman, N. (2019).** Real-Time Rendering (3. Aufl.). London, England: CRC Press.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Boehm, J. (2020).** Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. Boston: De Gruyter.
- Mehler-Bicher, A., & Steiger, L. (2022).** Augmented Reality: Theorie Und Praxis. doi:10.1515/9783110756500
- Müller, R. (2006).** Umm el Qaab – Ein prädynastischer Königsfriedhof.
- O'Connor, D. (2011).** Abydos: Egypt's first pharaohs and the cult of Osiris. London, England: Thames & Hudson.

- Petrie, W. M. F., & Griffith, F. L. (1901).** Royal tombs of the earliest dynasties: Pt. 2. London, England: Egypt Exploration Society.
- Pirker, J., & Gütl, C. (2015).** Educational Gamified Science Simulations. In Gamification in Education and Business (S. 253–275). Cham: Springer International Publishing.
- Remondino, F., El-Hakim, S., Girardi, S., Rizzi, A., Benedetti, S., & Gonzo, L. (2014).** 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry.
- Remondino, Fabio, Spera, M. G., Nocerino, E., Menna, F., & Nex, F. (2014).** State of the art in high density image matching. The Photogrammetric Record, 29(146), 144–166. doi:10.1111/phor.12063
- Robert, K., Zhu, D., Huang, W., Alem, L., & Gedeon, T. (2013).** MobileHelper: Remote guiding using smart mobile devices, hand gestures and augmented reality. SIGGRAPH Asia 2013 Symposium on Mobile Graphics and Interactive Applications. New York, NY, USA: ACM.
- Rontsinsky, M. (2012).** Echtzeit-Rendering-Techniken für die Planung und Visualisierung von Architektur-Projekten : interaktive und virtuelle Rekonstruktion des Semper-Depots in Wien. Technische Universität Wien, Wien.
- Russell, S., & Norvig, P. (2009).** Artificial intelligence: A modern approach (3. Aufl.). Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson.
- Scavuzzo, S. T. (2022).** Immersive Experience of Ancient Architectural Heritage and Related Historical Events. Technische Universität Wien, Wien.
- Schenk, T. (2005).** Introduction to Photogrammetry.
- Schmalstieg, D., & Hollerer, T. (2016).** Augmented reality: Principles and practice. Addison-Wesley Professional.
- Schranz, Urban, Kaufmann, Schönauer, Rattenberger, O'Brien, Ozeraitis, Jaritz. (2022).** Einsatz von Augmented Reality zur Abnahme und Qualitätssicherung auf Baustellen.
- Shi, C. (2019).** Application of Photogrammetry and Virtual Reality at Building Redevelopment in Existing Contexts. Technischen Universität Wien, Wien.
- Snaveley, N., Seitz, S. M., & Szeliski, R. (2006).** Photo tourism: Exploring photo collections in 3D. ACM Transactions on Graphics, 25(3), 835–846. doi:10.1145/1141911.1141964
- Stefan Niedermair, B. (2012).** Augmented reality on mobile devices for architectural visualisation. Technische Universität, Wien.
- Torres, J. C., de Haro, J., & Romo, C. (2012).** 3D Digitization using Structure from Motion.
- Tyldesley, J. (2006).** Chronicle of the queens of Egypt: From early dynastic times to the death of Cleopatra. London, England: Thames & Hudson.
- Urban, H., Irschik, T., Schranz, C., & Schönauer, C. (2020).** Augmented Reality im Bauwesen: Teil 2 – Baustellentaugliches Trackingsystem/Augmented Reality in Civil Engineering: Part 2 – site-compatible tracking system. Der Bauingenieur, 95(12), 501–508. doi:10.37544/0005-6650-2020-12-67

**Wagner, J. (2020).** Unity für Anfänger:innen. Abgerufen von <https://www.skillshare.com/de/user/gaminganddevelopment>

**Wahbeh, W., & Nebiker, S. (2016).** Kombination unterschiedlicher Photogrammetrischer Ansätze zur Rekonstruktion zerstörter Kulturdenkmäler. Bern: Publikationen der DGPF.

**Wang, X., & Schnabel, M. A. (2010).** Mixed Reality In Architecture, Design, And Construction. Dordrecht, Niederlande: Springer.

**Westerhaus, M. (2018).** Digital photogrammetry and 3D modeling in archaeology: A basic guide. Oxford: Oxford University Press.

**Wilkinson, T. A. H. (1999).** Early dynastic Egypt. Abingdon, UK: Taylor & Francis.

**Wolf, P. R., DeWitt, B. A., & Wilkinson, B. E. (2014).** Elements of Photogrammetry with Application in GIS (4. Aufl.). New York, NY, USA: McGraw-Hill Professional.

## Onlinequellen

- 1 <https://www.agisoft.com/> (01.05.2023)
- 2 <https://www.fpk.de/projekt-beispiel-architektur-photogrammetrie-schloss-johannisburg/> (012.03.2023)
- 3 <https://www.khanacademy.org/humanities/ancient-art-civilizations/palmyra2/ancientpalmyra/a/temple-of-bel-palmyra> (012.03.2023)
- 4 <https://arck-project.org/> (23.05.2023)
- 5 [https://www.bayika.de/de/aktuelles/meldungen/2021-08-25\\_Augmented-Reality-in-der-Stadtplanung.php](https://www.bayika.de/de/aktuelles/meldungen/2021-08-25_Augmented-Reality-in-der-Stadtplanung.php) (05.02.2023)
- 6 <https://formlabs.com/blog/additive-manufacturing-vs-subtractive-manufacturing/> (08.02.2023)
- 7 <https://www.sculpteo.com/de/3d-lernzentrum/erstellung-einer-druckbaren-3d-datei/was-ist-eine-stl-datei/>
- 8 <https://www.youtube.com/watch?v=M3lyoNtAgnA> (08.02.2023)
- 9 <https://all3dp.com/de/1/3d-slicer-software-3d-drucker/>(07.03.2023)
- 10 <https://www.cube.lv/projects/lnmm-app> (07.03.2023)
- 11 <https://manual.chitubox.com/en-US/docs/chitubox-pro/latest/setting-up/configure-print-parameters> (28.03.2023)
- 12 <https://manual.chitubox.com/en-US/docs/chitubox-pro/latest/setting-up/configure-print-parameters> (28.03.2023)

## Abbildungsverzeichnis

Abb.1: Wüstenrand entlang Abydos, Ägypten Florian Sövegjarto, 22.10.2021 .....	10
Abb.2: Punktwolke für den Wiederaufbau der Notre Dame, Paris Andrew Tallon, 28.02.2023.....	14
Abb.3: Darstellung der Sichtlinien von Punkten aus drei Perspektiven Amadeus Langer, 2021 .....	17
Abb.4: Nützliche Tipps zur richtigen Datenerfassung bei der Fotogrammetrie Agisoft PhotoScan, 16.04.2023.....	18
Abb.5: Darstellung des Arbeitsablaufs einer fotogrammetrischen Berechnung Florian Sövegjarto, 25.05.2023.....	19
Abb.6: Fotobox mit Kunstlicht zur fotogrammetrischen Aufnahme Florian Sövegjarto, 05.04.2022.....	20
Abb.7: Reduzierung der Spiegelung durch Polarisationsfilter <a href="https://incas-training.de/blog/photogrammetrie-eine-faszinierende-methode-um-3d-objekte-zu-erzeugen/">https://incas-training.de/blog/photogrammetrie-eine-faszinierende-methode-um-3d-objekte-zu-erzeugen/</a> , 24.05.2023.....	20
Abb.8: Colorchecker Passport 2 der Firma X Rite <a href="https://www.xrite.com/de/categories/calibration-profiling/colorchecker-classic-family/colorchecker-passport-photo-2">https://www.xrite.com/de/categories/calibration-profiling/colorchecker-classic-family/colorchecker-passport-photo-2</a> , 12.03.2023 .....	21
Abb.9: Messskalen zur korrekten Skalierung des Objekts Mateusz Janiszewski, 2020 .....	22
Abb.10: Coded target auf einer Stange mit fixem Abstand, Abydos Florian Sövegjarto, 18.10.2021.....	22
Abb.11: Links: circular, dual ring, 12-bit Rechts: square, april tag, 36h11 Florian Sövegjarto, Reality Capture, 05.12.2022 .....	23
Abb.12: Aufbau eines square, AprilTag, 36h11 Florian Sövegjarto, Reality Capture, 05.12.2022 .....	24

Abb.13: Einsatz eines Hexakopters, Schloss Johannisburg in Aschaffenburg <a href="https://www.fpk.de/projekt-beispiel-architektur-photogrammetrie-schloss-johannisburg/">https://www.fpk.de/projekt-beispiel-architektur-photogrammetrie-schloss-johannisburg/</a> , 24.05.2023.....	26
Abb.14: Fotogrammetrische Aufnahme der Fassaden, Schloss Johannisburg in Aschaffenburg, Deutschland FPK Ingenieurgesellschaft mbH, 14.03.2023 .....	27
Abb.15: Rekonstruktion des römischen Theaters, Palmyra, Syrien <a href="https://sketchfab.com/blogs/community/cultural-heritage-spotlight-reconstructing-destruction-palmyra-arck/">https://sketchfab.com/blogs/community/cultural-heritage-spotlight-reconstructing-destruction-palmyra-arck/</a> , 15.03.2023 .....	29
Abb.16: Rekonstruktion des Bel-Tempels, Palmyra, Syrien <a href="https://sketchfab.com/blogs/community/cultural-heritage-spotlight-reconstructing-destruction-palmyra-arck/">https://sketchfab.com/blogs/community/cultural-heritage-spotlight-reconstructing-destruction-palmyra-arck/</a> , 15.03.2023 .....	29
Abb.17: Sehen, was gar nich da ist. AR Brille vom Hersteller MagicLeap. <a href="https://www.jamestown.de/news/die-visuelle-revolution/">https://www.jamestown.de/news/die-visuelle-revolution/</a> , 02.03.2023 .....	30
Abb.18: AR Installation der Fa.Liebherr zur Darstellung des Bauablaufs <a href="https://www.wirtschaftszeit.at/site/assets/files/62124/liebherr_ar_inatura_01.-detail.jpg">https://www.wirtschaftszeit.at/site/assets/files/62124/liebherr_ar_inatura_01.-detail.jpg</a> , 26.02.2023 .....	34
Abb.19: iPad mit der iOS Anwendung „Liebherr AR Experience“ <a href="https://lirp.cdn-website.com/03e2479f/dms3rep/multi/opt/Liebherr_1000x500-960w.jpg">https://lirp.cdn-website.com/03e2479f/dms3rep/multi/opt/Liebherr_1000x500-960w.jpg</a> , 26.02.2023 .....	34
Abb.20: Augmented Reality im Entwurfsprozess anhand eines Modells <a href="https://unitydevelopers.co.uk/how-architects-are-using-vr-and-ar-in-their-design-process">https://unitydevelopers.co.uk/how-architects-are-using-vr-and-ar-in-their-design-process</a> , 02.03.2023 .....	35
Abb.21: Überprüfung der Leitungsführung für spätere Installationen mittels Augmented Reality und der App Gamma AR   Porr AG <a href="https://i2k8e4w8.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2022/03/porr-ag-on-site-using-gamma-ar.jpg">i2k8e4w8.rocketcdn.me/wp-content/uploads/2022/03/porr-ag-on-site-using-gamma-ar.jpg</a> , 02.04.2023 .....	36
Abb.22: Trimble XR10 AR Helm mit der Microsoft Hololens 2 <a href="https://www.microsoft.com/en-us/d/trimble-xr10-with-hololens-2/8smjj5mx7zt7?activetab=pivot:overviewtab">www.microsoft.com/en-us/d/trimble-xr10-with-hololens-2/8smjj5mx7zt7?activetab=pivot:overviewtab</a> , 02.04.2023.....	37
Abb.23: Kunstharzdruck, Kathedrale Notre-Dame de Paris Adobe Stock, 20.02.2023 .....	38
Abb.24: Schemadarstellung der subtraktiven- und der additiven Fertigung Peter Berube, 2021.....	40
Abb.25: 3D Drucktechnologien für Kunststoffe <a href="https://formlabs.com/ch/blog/3D-drucktechnologie-vergleich-fdm-sla-sls/">https://formlabs.com/ch/blog/3D-drucktechnologie-vergleich-fdm-sla-sls/</a> , 10.03.2023 .....	41



Abb.26: Darstellung der Tesselerung in unterschiedlichen Qualitätsstufen <a href="https://computergraphics.stackexchange.com">https://computergraphics.stackexchange.com</a> , 12.01.2023 .....	42
Abb.27: Diverse Einstellungen für den Druck eines SLA-Druckes, Chitubox Florian Sövegjaro, 09.03.2023 .....	43
Abb.28: 3D-Modell (blau) und die generierte Stützstruktur (grau), Chitubox <a href="https://www.chitubox.com/en/article/support/howto/chitubox-free/installation/54">https://www.chitubox.com/en/article/support/howto/chitubox-free/installation/54</a> , 09.03.2023 .....	43
Abb.29: Brückenmodell von T.Y. Lin International Formlabs, 08.03.2023 .....	45
Abb.30: Modell eines Wohnhauses von LaneyLA w Formlabs, 08.03.2023 .....	45
Abb.31: Wandprojektionen im Nationalmuseum von Katar Florian Sövegjarto, 17.02.2023.....	46
Abb.32: AR-basierte Installation, NRW-Forum Düsseldorf <a href="https://www.monopol-magazin.de/nextmuseum">https://www.monopol-magazin.de/nextmuseum</a> Katja Illne, 09.03.2023 .....	48
Abb.33: Audioguides im Metropolitan Museum of Art in New York Jackie Neale, 20.02.2023.....	50
Abb.34: Leihheadsets für einen Audioguide im Museum Yad Vashem in Israel <a href="http://www.yadvashem.org/de/visiting/audio-guide.html">www.yadvashem.org/de/visiting/audio-guide.html</a> , 20.02.2023 .....	50
Abb.35: Touchscreen für Museen, infoAktiv <a href="http://infoaktiv.co.uk">infoaktiv.co.uk</a> , 20.02.2023 .....	51
Abb.36: Multitouch Tisch, „Deck 50“, Naturhistorisches Museum Wien Ars Electronica Futurelab, 20.02.2023.....	51
Abb.37: Projektoren an der Decke, Nationalmuseum von Katar Florian Sövegjarto 20.02.2023.....	52
Abb.38: Unprojiziertes Modell von Doha Florian Sövegjarto 20.02.2023.....	52

Abb.39: Modell mit digital projizierter Information Florian Sövegjarto 20.02.2023.....	52
Abb.40: Digitale Darstellung der Stadtentwicklung von Doha, Nationalmuseum von Katar in Doha Florian Sövegjarto 20.02.2023.....	53
Abb.41: 3D-Rekonstruktion des Forums Peter Ferschin, 2006 .....	54
Abb.42: Forum, Blick auf die Tempelanlage Peter Ferschin, 2006 .....	54
Abb.43: Großprojektion und interaktive Virtual Reality-Visualisierung des Forums innerhalb der Ausstellung „Legionsadler & Druidenstab“, Museum Carnuntinum, Österreich Museum Carnuntinum, 2006 .....	55
Abb.44: Ausschnitt einer VR-Applikation der Grabstätte von Königin Meret Neith in Abydos (Ägypten), Sara Treccarichi Scavuzzo Sara Treccarichi Scavuzzo, 2022.....	56
Abb.45: Modell mit digital projizierter Information Städel Museum, 08.03.2023 .....	57
Abb.46: Besucher tauchen in eine virtuelle Welt ein Lucrezia Carnelos – unsplash.com/license, 20.02.2023.....	57
Abb.47: Lettisches Kunstmuseum - eine App führt durch die Ausstellung www.cube.lv/projects/lnmm-app, 08.03.2023 .....	58
Abb.48: AR in-situ Darstellung in Carnuntrum <a href="https://jtorrejon.artstation.com/projects/qAArDy">https://jtorrejon.artstation.com/projects/qAArDy</a> , 08.03.2023 .....	60
Abb.49: Ausgestorbene Tierarten in der Revivre App <a href="https://www.mnhn.fr/en/experience/revivre-extinct-animals-in-augmented-reality">https://www.mnhn.fr/en/experience/revivre-extinct-animals-in-augmented-reality</a> , 08.03.2023 .....	60
Abb.50: Informationen über ein Gemälde via AR App <a href="https://smartify.org/">https://smartify.org/</a> , 08.03.2023.....	61
Abb.51: Projizierte Tuschezeichnungen <a href="https://www.tickets.com/de/Blog/interaktives-Museum/">https://www.tickets.com/de/Blog/interaktives-Museum/</a> , 08.03.2023 .....	61

Abb.52: Wüsengebirge mit Blick Richtung Wadi, Abydos Florian Sövegjarto, 13.04.2022.....	62
Abb.53: Lageplan der ägyptischen Stadt Abydos Florian Sövegjarto, 25.10.2021.....	65
Abb.54: Relief im Totentempel Sethos I, Abydos, Ägypten Florian Sövegjarto, 22.10.2021.....	66
Abb.55: Osireion, Abydos, Ägypten Florian Sövegjarto, 22.10.2021.....	66
Abb.56: Totentempel Sethos I, Abydos, Ägypten Florian Sövegjarto, 22.10.2021.....	67
Abb.57: Blick über teilweise freigelegte Gräber in Umm el-Qaab, Abydos, Ägypten Bálint István Kovács, 18.10.2021.....	68
Abb.58: Lageplan der Königsgräber von Umm el-Qaab Florian Sövegjarto, 21.03.2023.....	70
Abb.59: Petrie Flinders bei Ausgrabungen in Umm el-Qaab, Abydos <a href="https://fitz-cms-images.s3.eu-west-2.amazonaws.com/petrie-at-abydos.jpg">https://fitz-cms-images.s3.eu-west-2.amazonaws.com/petrie-at-abydos.jpg</a> , 21.03.2023.....	71
Abb.61: Grab O (Djer) Umm el-Qaab, Abydos <a href="https://i.pinimg.com/originals/94/14/50/9414506cd8dcb23efe3266252a27dbc1.jpg">https://i.pinimg.com/originals/94/14/50/9414506cd8dcb23efe3266252a27dbc1.jpg</a> , 21.03.2023.....	71
Abb.60: Flinders und Hilde Petrie in Abydos <a href="https://www.archaeology.wiki/wp-content/uploads/2013/06/petrie-abydos.jpg">https://www.archaeology.wiki/wp-content/uploads/2013/06/petrie-abydos.jpg</a> , 21.03.2023.....	71
Abb.62: Grab T (Dewen) Umm el-Qaab, Abydos E.C.Köhler , 21.03.2023 <a href="https://i.pinimg.com/originals/94/14/50/9414506cd8dcb23efe3266252a27dbc1.jpg">https://i.pinimg.com/originals/94/14/50/9414506cd8dcb23efe3266252a27dbc1.jpg</a> , 21.03.2023.....	71
Abb.63: Grab Y von Königin Meret Neith in Abydos, Ägypten mit der freigelegten Hauptkammer Florian Sövegjarto, 11.04.2022.....	72
Abb.64: Schemagrundriss Grab Y, grafische Aufbereitung der Grundrisszeichnungen von Flinders Petrie, M 1:200 Florian Sövegjarto, 10.03.2023.....	74

Abb.65: Grabstele der Königin Meret Neith aus Abydos, nach Emery <a href="https://www.doriswolf.com/wp/die-hochkultur-des-matriarchats/das-matriarchale-konigtum-in-egypten-und-mesopotamien/">https://www.doriswolf.com/wp/die-hochkultur-des-matriarchats/das-matriarchale-konigtum-in-egypten-und-mesopotamien/</a> , 21.03.2023 .....	75
Abb.66: Freilegung der Mauerkronen Karl-Johann Mayer, 10.10.2021 .....	77
Abb.67: Einmessen der Höhenlage der Mauerkronen Karl-Johann Mayer, 02.10.2021 .....	77
Abb.68: Siebung der sogenannten Halde Karl-Johann Mayer, 02.10.2021 .....	77
Abb.69: Digitalisierungsteam der TU Wien, v.l.n.r. Sara Treccarichi Scavuzzo, Peter Ferschin, Bálint István Kovács, Florian Sövegjarto (Verfasser), Karl-Johann Mayer E.C. Köhler , 02.11.2021 .....	78
Abb.70: Datenaufnahme Kampagne 1 Florian Sövegjarto, 10.03.2023 .....	81
Abb.72: Datenaufnahme Kampagne 3 Florian Sövegjarto, 10.03.2023 .....	81
Abb.73: geplante Datenaufnahme Kampagne 4 Florian Sövegjarto, 10.03.2023 .....	81
Abb.71: Datenaufnahme Kampagne 2 Florian Sövegjarto, 10.03.2023 .....	81
Abb.74: Testaufnahmen mit Beschattungstuch, ColorChecker und Marker Peter Ferschin, 21.10.2021 .....	82
Abb.75: Beschattung der Nebenkammer YKK-5 Peter Ferschin, 28.10.2021 .....	82
Abb.76: Beschattungssegel für eine großflächige Abschattung des Grabes Peter Ferschin, 09.04.2022 .....	83
Abb.77: Unterschiedliche Marker für die spätere Modellberechnung Florian Sövegjarto, 31.10.2021 .....	84

Abb.79: 36h11 AprilTag an den seitlichen Mauern der Hauptkammer Florian Sövegjarto, 06.04.2022 .....	84
Abb.78: ColorChecker und Marker mit fixem Abstand, Testaufnahmen Florian Sövegjarto, 18.10.2021 .....	84
Abb.80: Platzierte Marker bei der Datenaufnahme Florian Sövegjarto, 06.04.2022 .....	84
Abb.81: Ergebnis der Punktwolkenberechnung YKK-2 Florian Sövegjarto, 25.10.2022 .....	87
Abb.82: 1:1 Ausschnitt YKK-1 Nordwand, Originalgröße Florian Sövegjarto, 03.03.2022.....	88
Abb.83: Orthografische Projektionen YKK-1, M = 1:50 Florian Sövegjarto, 03.03.2022.....	89
Abb.84: 1:1 Ausschnitt YKK-2 Boden, Originalgröße Florian Sövegjarto, 16.08.2022.....	90
Abb.85: Orthografische Projektionen YKK-2, M = 1:50 Florian Sövegjarto, 16.08.2022.....	91
Abb.86: 1:1 Ausschnitt YKK-3 Ostwand, Originalgröße Florian Sövegjarto, 24.11.2022.....	92
Abb.87: Orthografische Projektionen YKK-3, M = 1:50 Florian Sövegjarto, 24.11.2022.....	93
Abb.88: 1:1 Ausschnitt YKK-4 Westwand, Originalgröße Florian Sövegjarto, 24.02.2022.....	94
Abb.89: Orthografische Projektionen YKK-4, M = 1:50 Florian Sövegjarto, 24.02.2022.....	95
Abb.90: 1:1 Ausschnitt YKK-5 Boden, Originalgröße Florian Sövegjarto, 22.01.2022.....	96

Abb.91: Orthografische Projektionen YKK-5, M = 1:50 Florian Sövegjarto, 22.01.2022.....	97
Abb.92: 1:1 Ausschnitt YKK-6 Südwand, Originalgröße Florian Sövegjarto, 09.01.2022.....	98
Abb.93: Orthografische Projektionen YKK-6, M = 1:50 Florian Sövegjarto, 09.01.2022.....	99
Abb.94: 1:1 Ausschnitt YKK-7 Westwand, Originalgröße Florian Sövegjarto, 03.03.2022.....	100
Abb.95: Orthografische Projektionen YKK-7, M = 1:50 Florian Sövegjarto, 03.03.2022.....	101
Abb.96: 1:1 Ausschnitt YKK-7 Südwand, Originalgröße Florian Sövegjarto, 23.53.2022.....	102
Abb.97: Orthografische Projektionen YKK-8, M = 1:50 Florian Sövegjarto, 23.53.2022.....	103
Abb.98: 1:1 Ausschnitt YKK Boden, Originalgröße Florian Sövegjarto, 23.53.2022.....	104
Abb.99: Orthografische Projektion YKK Hauptkammer, M = 1:50 Florian Sövegjarto, 23.3.2023.....	105
Abb.100: Schnittdarstellungen Florian Sövegjarto, 23.3.2023.....	106
Abb.101: Wandansichten M 1:100, Grab Y, Umm el-Qaab, Abydos, Stand nach der ersten Kampagne 10/2021, E. Christiana Köhler E. Christiana Köhler, 2022.....	107
Abb.102: Grundriss M:100, Grab Y, Umm el-Qaab, Abydos, Stand nach der ersten Kampagne 10/2021, E. Christiana Köhler E. Christiana Köhler, 2022.....	108
Abb.103: Grundriss M 1:100, Grab Y, Umm el-Qaab, Abydos, Stand nach der zweiten Kampagne 04/2022, E. Christiana Köhler E. Christiana Köhler, 2022.....	109

Abb.104: Analyse der Materialien des Grabes M 1:100, Stand nach der ersten Kampagne 10/2021, E. Christiana Köhler E. Christiana Köhler, 2022.....	110
Abb.105: Rendering YKK-2, Keramikgefäße in-situ, (Sara Treccarichi Scavuzzo. 2022) Sara Treccarichi Scavuzzo, 2022.....	111
Abb.106: Rendering YKK   Hauptkammer mit anschließenden Nebenkammern, Blickrichtung von Südwest, (Sara Treccarichi Scavuzzo. 2022) Sara Treccarichi Scavuzzo, 2022.....	112
Abb.107: Rendering YKK   Hauptkammer mit anschließenden Nebenkammern, Blickrichtung von Südost, (Sara Treccarichi Scavuzzo. 2022) Sara Treccarichi Scavuzzo, 2022.....	113
Abb.108: Testdruck des Grabes im Maßstab 1:100 Florian Sövegjarto, 25.01.2023.....	114
Abb.109: Testdruck SLA Druck Verfahren Florian Sövegjarto, 25.03.2022.....	116
Abb.110: Testdruck FDM Detail der Mauerkrone im Maßstab 1:100 Florian Sövegjarto, 14.06.2022.....	117
Abb.111: Testdruck SLA Detail der Mauerkrone im Maßstab 1:100 Florian Sövegjarto, 25.03.2023.....	117
Abb.112: YKK-5 mit Mauerkronen Florian Sövegjarto, 18.01.2022.....	118
Abb.113: YKK-5 Mittelschicht mit Keramik in-situ Florian Sövegjarto, 25.03.2022.....	118
Abb.114: Testdruck, Zwischenstrand nach der ersten Kampagne Florian Sövegjarto, 25.03.2022.....	118
Abb.115: Schnitt durch die Kammer YKK-5, Wandansicht mit Putzstruktur Florian Sövegjarto, 25.03.2022.....	119
Abb.116: Druckfehler durch Ablösen von der Bauplattform Florian Sövegjarto, 25.03.2022.....	120

Abb.117: Testdruck mit 30% Infill zur Materialreduktion Florian Sövegjarto, 25.03.2022.....	120
Abb.118: Testdruck mit den Ultimaker S5 Dual Extruder FDM, YKK-5 und YKK-6 nach der ersten Kampagne Florian Sövegjarto, 14.06.2022.....	121
Abb.119: Anycubic Photon M3 Max Maxwww.anycubic.com/ , 08.03.2023 .....	122
Abb.120: wash & cure Station Anycubic www.anycubic.com/ , 08.03.2023 .....	122
Abb.121: Aufbau des verwendeten SLA-Druckers, Anycubic Photon M3 Max www.anycubic.com/ , 08.03.2023 .....	122
Abb.122: Für den Druck ausgewähltes Kunstharz, Phrozen Aqua Red-Clay 8K https://phrozen3d.com/ , 28.03.2023 .....	123
Abb.123: Druckmodell im Programm ChituBox Pro ,Florian Sövegjarto, 24.01.2022.....	127
Abb.124: Testdruck, Modell des Grabes von Meret Neith im Maßstab 1:100 Florian Sövegjarto, 25.03.2023.....	128
Abb.125: Testdruck im Maßstab 1:50, geteiltes Modell für Schnittflächentest Florian Sövegjarto, 25.03.2023.....	129
Abb.126: Testdruck, Modell des Grabes von Meret Neith im Maßstab 1:100 Florian Sövegjarto, 14.06.2022.....	130
Abb.127: Modell des Grabes von Meret Neith im Maßstab 1:100 Florian Sövegjarto, 25.03.2022.....	131
Abb.128: Testdruck mit Stützstruktur im Maßstab 1:50 Florian Sövegjarto, 25.03.2022.....	131
Abb.129: Typischer Materialverzug beim 3D-Druck Florian Sövegjarto, 24.01.2022.....	132



Abb.130: Zu wenig Kunstharz im Mittelbereich des Resinbehälters Florian Sövegjarto, 24.01.2022.....	132
Abb.131: Abgerissene Stützstrukturen Florian Sövegjarto, 25.03.2023.....	133
Abb.132: Fehlende Teile im Druck aufgrund einer zu geringen Stützstruktur Florian Sövegjarto, 25.03.2023.....	133
Abb.133: Skizzenhafte Ideen der Präsentation des Modells Florian Sövegjarto, 19.03.2023.....	134
Abb.134: Konstruktionszeichnung des Sockels Florian Sövegjarto, 19.03.2023.....	135
Abb.135: Ausstellungs Modell im Maßstab 1:50 auf Präsentationssockel www.zweischrittweiter.at, 02.05.2023.....	136
Abb.136: Im Sand eingebettes Modell www.zweischrittweiter.at, 02.05.2023.....	137
Abb.137: Modell Draufsicht www.zweischrittweiter.at, 02.05.2023.....	138
Abb.138: Detailaufnahme der Süd-Ost Ecke www.zweischrittweiter.at, 02.05.2023.....	139
Abb.139: Modellfoto mit AR Applikation am Tablet www.zweischrittweiter.at, 28.04.2023.....	140
Abb.140: Darstellung der Polygone in der Unreal Engine Epic Game, 23.05.2023 .....	143
Abb.141: Programmierung einer Charakteranimation in Unity learn.unity.com, 23.05.2023 .....	143
Abb.142: Darstellung von „Visual Scripting“ in Unity docs.unity3d.com/Packages/com.unity.visualscripting@1.7/manual/vs-transitions.html, 22.05.2023 .....	144

Abb.143: Handtracking zur Navigation durch die AR Anwendung <a href="https://aracom.de/microsoft-hololens/">https://aracom.de/microsoft-hololens/</a> , 22.05.2023 .....	145
Abb.144: Arbeitsablauf der verwendeten Programme Florian Sövegjarto, 22.05.2023.....	146
Abb.145: Hauptfenster Unity Software Florian Sövegjarto, 18.04.2023.....	147
Abb.146: Hauptfenster des Model Target Generators von Vuforia Florian Sövegjarto, 18.04.2023.....	149
Abb.147: Screenshots aus dem Model Target Generator von Vuforia Florian Sövegjarto, 18.04.2023.....	151
Abb.148: Unitty Szene mit sämtlichen eingebelndeten Inhalten Florian Sövegjarto, 22.04.2023.....	153
Abb.149: Unity Tabletoberfläche mit Navigationsmenü Florian Sövegjarto, 2.04.2023.....	154
Abb.150: Darstellung der Textur des Grabes mittels Model Target Tracking Florian Sövegjarto, 22.04.2023.....	155
Abb.151: Zusätzliche Inforamtion über das Grab Florian Sövegjarto, 22.04.2023.....	156
Abb.152: Darstellung der Zwischenschichte YKK-2 und YKK-4 Florian Sövegjarto, 22.04.2023.....	157
Abb.153: Darstellung eines Lehmverschlusses in der Originalgröße Florian Sövegjarto, 22.04.2023.....	158
Abb.154: Dokumentationsfilm mit seperatan Navigationsbuttons Florian Sövegjarto, 22.04.2023.....	159
Abb.155: Darstellung des Digitalisierungsteam in der Applikation Florian Sövegjarto, 22.04.2023.....	160

Abb.156: Darstellung der AR-Applikation auf dem Tablet Florian Sövegjarto, 23.05.2023.....	161
Abb.157: Eine Wandrelief des ägyptischen Gottes Thoth aus dem Tempel von Ramses II. , Abydos, Ägypten Florian Sövegjarto, 22.10.2021 .....	162
Abb.158: Scherben von Opfergefäße, Umm el-Qaab, Abydos, Ägypten Karl-Johann Mayer, 02.10.2021 .....	168
Abb.159: Blick vom Grabungshaus Richtung Umm el-Qaab Florian Sövegjarto , 13.04.2022 .....	188
Abb.160: Teilweise freigelegte Mauerkronen des Grab Y Karl Mayer , 03.10.2021 .....	190
Abb.161: Dachterrasse auf dem Grabungshaus Florian Sövegjarto , 25.10.2021 .....	191
Abb.162: Vergrößertes Beschattungstuch, Aufnahme von YKK-7 Florian Sövegjarto , 03.11.2021 .....	192
Abb.163: Fotogrammetrische Aufnahme eines Tongefäßes Karl Mayer , 25.10.2021 .....	193
Abb.164: Fotogrammetrische Aufnahme eines Lehmverschlusses Karl Mayer , 25.10.2021 .....	193
Abb.165: Bálint István Kóvacs beim Einstellen des Hochstativs Florian Sövegjarto , 21.10.2021 .....	194
Abb.166: Marker mit Hilfe von Kisten und Klebebändern Florian Sövegjarto , 02.11.2021 .....	195
Abb.167: Verteilte Kistenmarker für die Übersichtsfotos Florian Sövegjarto , 02.11.2021 .....	195
Abb.168: Teambesprechung über die ersten digitalen Ergebnisse Florian Sövegjarto , 04.11.2021 .....	196

## Programmquellen

Reality Capture, 202	<a href="http://www.capturingreality.com">www.capturingreality.com</a>
Metashape, 2023	<a href="http://www.agisoft.com">www.agisoft.com</a>
Unity, 2023	<a href="http://www.unity.com">www.unity.com</a>
Unreal, 2023	<a href="http://www.unrealengine.com">www.unrealengine.com</a>
Vuforia, 2023	<a href="http://www.ptc.com">www.ptc.com</a>
Model Target Generator, 2023	<a href="http://developer.vuforia.com/downloads/tool">developer.vuforia.com/downloads/tool</a>
Lightroom, 2023	<a href="http://www.adobe.com/at/products/photoshop-lightroom">www.adobe.com/at/products/photoshop-lightroom</a>
Netfabb, 2023	<a href="http://www.autodesk.de/products/netfabb">www.autodesk.de/products/netfabb</a>
Meshmixer, 2023	<a href="http://meshmixer.com">meshmixer.com</a>
Meshlab, 2023	<a href="http://www.meshlab.net">www.meshlab.net</a>
Chitubox, 2023	<a href="http://www.chitubox.com">www.chitubox.com</a>
Cura, 2023	<a href="http://ultimaker.com/software/ultimaker-cura">ultimaker.com/software/ultimaker-cura</a>

## Museums Applikation Quellen

Carnuntum App, 2023	<a href="http://www.carnuntum.at/de/carnuntumapp">www.carnuntum.at/de/carnuntumapp</a>
Revivre App, 2023	<a href="http://www.mnhn.fr/en/experience">www.mnhn.fr/en/experience</a>
Smartify App, 2023	<a href="http://smartify.org">smartify.org</a>
Story of the Forrest, 2023	<a href="http://www.nhb.gov.sg">www.nhb.gov.sg</a>



Abb.159: Blick vom Grabungshaus Richtung Umm el-Qaab



Die inhaltliche Verantwortung für diese Originalversion dieser Diplomarbeit liegt bei der Autorin. Die inhaltliche Verantwortung für diese Originalversion of this thesis is available in print and online.

# ANHANG GRABUNGSTAGEBUCH



Abb.160: Teilweise freigelegte Mauerkronen des Grab Y

## 18.10.2021 | Tagestitel: Die Wüste

Wetter 35°C, leicht windig, wolkenlos

Nach einer unruhigen Nacht, in der ich von unzähligen Mücken heimgesucht wurde, klingelte mein Wecker um 05:15 Uhr und zwang mich, in den Tag zu starten. Trotz der Müdigkeit und des Schlafmangels aber voller Motivation bereitete ich mich auf den bevorstehenden Tag vor. Um 06:00 Uhr stärkten wir uns gemeinsam mit einem kleinen ersten Frühstück, bestehend aus heißem Tee und Gebäck, bevor wir uns auf den Weg zum Grabungshaus machten. Begleitet von Sicherheitspersonal, wanderten wir zu Fuß durch die morgendliche Stille der Wüste.

Als wir im Grabungshaus ankamen, wurden wir von den ÄgyptologInnen freundlich begrüßt, die uns eine ausführliche Führung durch die Räumlichkeiten gaben. Wir konnten sowohl die Arbeitsbereiche, in denen wertvolle Artefakte und Dokumente analysiert und aufbewahrt wurden, als auch die Aufenthaltsräume, besichtigen. Nachdem wir uns mit den Räumlichkeiten des Grabungshauses vertraut gemacht hatten, fuhren wir mit dem Auto in die nur fünf Minuten entfernte Ausgrabungsstätte. Dort erwartete uns eine beeindruckende Szene: Unzählige einheimische Helfer aus den umliegenden Ortschaften waren fleißig dabei, den Wüstensand mithilfe von kleinen Metalleimern wegzuschaffen und sorgfältig auf der Suche nach Artefakte und Scherben zu sieben. Die Atmosphäre war geprägt von geschäftigem Treiben und der Arbeit der Grabungshelfer. Wir machten uns daran, einen ersten Überblick über die Ausgrabungsstätte zu gewinnen, sammelten Eindrücke und probierten verschiedene Testaufnahmen sowie

Fototechniken aus. Dabei stellten wir fest, dass der starke Wüstenwind, der sich deutlich von dem in der Ortschaft unterschied, die Handhabung unserer mitgebrachten Beschattungsfolien und Tüchern erschwerte. Außerdem stellten wir fest, dass dieses viel zu klein dimensioniert war.

Um 10:00 Uhr kehrten wir zum Grabungshaus zurück, wo uns ein reichhaltiges Frühstück erwartete, das wir gemeinsam mit den Ägyptologen zu uns nahmen. Gestärkt und erholt machten wir uns anschließend wieder auf den Weg, um die Umgebung der Ausgrabungsstätte zu erkunden. Unser Ziel war es, die vorab auf Kartenmaterial eingetragenen Vermessungspunkte aus Beton ausfindig zu machen, um später das Grab georeferenziert aufnehmen zu können. Während einige schnell entdeckt wurden, waren andere von Sand verdeckt und erforderten mehr Zeit und Aufwand bei der Suche. Glücklicherweise sorgte der Wind dafür, dass die Hitze besser auszuhalten war und die Arbeit an der Ausgrabungsstätte weniger anstrengend wurde als befürchtet. Nach unserer erfolgreichen Suche kehrten wir um 14:00 Uhr zum Grabungshaus zurück, wo uns ein gutes Mittagessen erwartete. Den übrig Nachmittag verbrachten wir auf der Dachterrasse des Grabungshauses, wo wir bei einer atemberaubenden Aussicht Gespräche über die Zeiteinteilung und die geplanten Aufnahmetaktiken für die nächsten Tage führten.

Erschöpft, aber zufrieden mit den gewonnenen Eindrücken und Erfahrungen des ersten Tages, machten wir uns um 17:00 Uhr auf den Rückweg zur Unterkunft.



Abb.161: Dachterrasse auf dem Grabungshaus





Abb.162: Vergrößertes Beschattungstuch, Aufnahme von YKK-7

## 21.10.2021 | Tagestitel: Das Leintuch und der Schatten

Wetter 36°C, in der Wüste windig, wolkenlos

Wecker läutet - aufstehen, anziehen - kleines Frühstück - Abmarsch um 6:45. Der zweite Tag, an dem wir direkt an der Ausgrabung arbeiteten, stand an. Mit den gewonnenen Erkenntnissen aus den ersten Testfotos, die wir am ersten Tag in der Wüste und gestern in der Unterkunft angefertigt haben, versuchten wir so viele Daten in Form von Fotografien wie möglich zu erfassen.

Zwei grundlegende Probleme begleiteten uns jedoch weiterhin: Zum einen war es schwierig, die richtige Schärfe der Fotos zu erzielen, insbesondere bei der Sony Kamera. Zum anderen war es eine Herausforderung, das Grab so abzuschatten, dass eine korrekte Textur ohne harte Schatten entstand. Das zweite Problem konnten wir durch das Zusammenknoten von Leintüchern und Seilen lösen. Gemeinsam positionierten wir den Schatten genau dort, wo er gerade benötigt wurde. Diese Vorgehensweise funktionierte erstaunlicherweise sehr gut.

Neben der ersten Aufnahme einer Nebenkammer des Grabes Y, testeten wir auch das mitgebrachte Hochstativ am benachbarten Grab des Königs Den, um Übersichtsfotos für eine bessere Foto-Ausrichtung bei der Berechnung zu bekommen. Am Nachmittag im Grabungshaus widmeten wir uns der Fotogrammetrie und der Datenaufnahme von kleineren Objekten wie Tonkrüge oder Lehmverschlüsse, die an der Ausgrabungsstätte von den Ägyptologen entdeckt worden waren. Die Aufnahme des Innenlebens von Vasen bedarf allerdings noch Verbesserungen, um eine kor-

rekte Berechnung und Modellerstellung durchführen zu können, da es nicht einfach ist, die erzeugte Punktwolke der Außenhülle mit der Punktwolke der Innenhülle zu verbinden.

Erschöpft von dem anstrengenden, wieder sehr heißen Tag in der Wüste, standen am Abend ein gemeinsames Abendessen und unsere wöchentlich stattfindende Corona-Testung auf dem Programm. Im Gegensatz zum Tag zuvor, als wir noch einen Filmabend veranstaltet hatten, waren wir diesmal zu müde für solche Aktivitäten.



Abb.163: Fotogrammetrische Aufnahme eines Tongefäßes



Abb.164: Fotogrammetrische Aufnahme eines Lehmverschlusses



Abb.165: Bálint István Kóvacs beim Einstellen des Hochstativs

## 02.11.2021 | Tagestitel: Komplette Aufnahme

Wetter 32°C, starker Wind, wolkenlos

Heute stand ein wahrer Kraftakt auf dem Programm. Wie so oft machten wir uns um 6:45 Uhr auf den Weg zur Ausgrabungsstätte. Vor unserer bevorstehenden Abreise wollten wir den gesamten aktuellen Ausgrabungsstand des Grabes noch einmal aufnehmen. Die Arbeiter vor Ort hatten aus diesem Grund extra einen freien Tag bekommen, sodass wir menschenleere Fotos mit dem Hochstativ anfertigen konnten.

Ausgerüstet mit sämtlichem Equipment, das wir nach Ägypten mitgenommen hatten - mit Ausnahme unserer Laptops und Berechnungsgeräte - bereiteten wir uns auf die heutige Herausforderung vor. Zunächst säuberten einige verbliebene Grabungshelfer die Mauerkronen von einer dünnen Sandschicht, die der nächtliche Wind darauf geweht hatte. Da wir leider viel zu wenig Marker für die Gesamtaufnahme dabei hatten, bastelten wir mithilfe von Kisten und einem Klebeband einzigartige Muster und somit unsere eigenen Marker, die wir später im Programm manuell markieren konnten, um eine bessere Berechnung für die Fotogrammetrie erreichen zu können.

Mit zusätzlicher Unterstützung der Ägyptologen gelang es uns, erneut tausende abgeschattete Aufnahmen des Grabes anzufertigen. Leider war heute der windigste Tag, was die Handhabung mit dem Beschattungstuch erheblich erschwerte. Aufgrund des Zeitdrucks mussten wir leider auf das Mittagessen verzichten, da wir unbedingt heute mit den Aufnahmen fertig werden wollten.

Da die Sonne in der Wüste jedoch früher als bei uns untergeht, mussten wir zwei Kammern für den morgigen und somit letzten Tag an der Ausgrabungsstätte aufheben.

Am Abend erwartete uns ein köstliches Abendessen, und wir rauchten anschließend gemeinsam eine Shisha (Wasserpfeife) auf der Terrasse unserer Unterkunft. Unsere Abreise naht.



Abb.166: Marker mit Hilfe von Kisten und Klebebändern

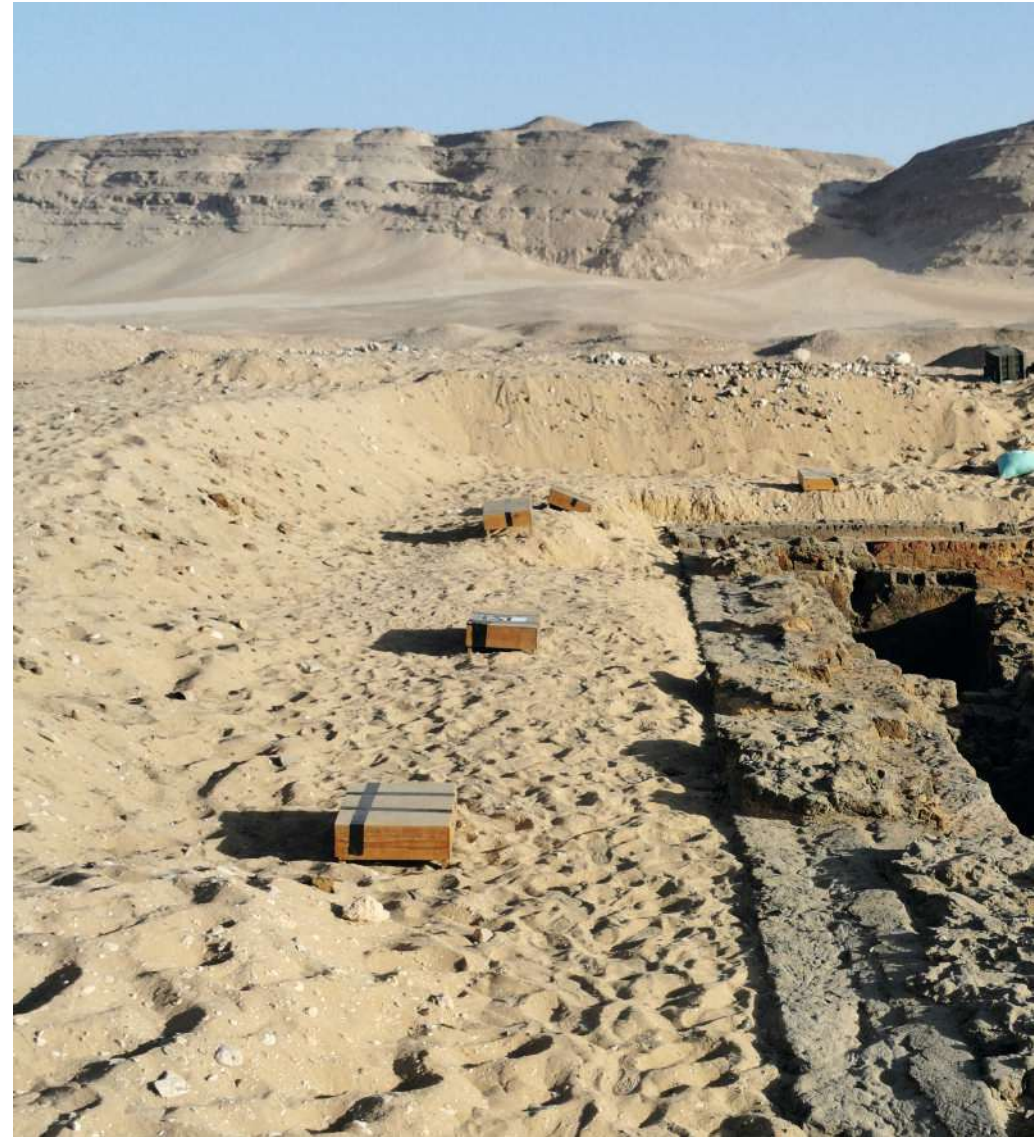


Abb.167: Verteilte Kistenmarker für die Übersichtsfotos



Abb.168: Teambesprechung über die ersten digitalen Ergebnisse

#### 04.11.2021 | Tagestitel: Präsentation der Kampagne

Wetter 33°C, windig, wolkenlos

Heute war der große Tag gekommen - unser letzter Tag in Abydos. Gemeinsam machten wir uns wie gewohnt früh morgens auf den Weg zum Grabungshaus. Am Abend stand außerdem die Zwischenpräsentation der ersten Ergebnisse vor den ägyptischen Verantwortlichen des ägyptischen Governat Sohag und den Vorarbeitern der Ausgrabungsstätte, den sogenannten Kufties, auf dem Programm.

Balint übernahm die Programmierarbeit für eine erste AR-Anwendung, während Sara und Peter an der Präsentation arbeiteten. Karl und ich begaben uns erneut auf das Feld, um bestimmte Stellen von Übergängen zwischen Mauerkronen und Nebenkammern nachträglich nochmals zu fotografieren. In der errechneten Punktwolke hatten wir nämlich Stellen entdeckt, die nur wenige Fotos aufwiesen. Wir nutzten den gesamten Tag an der Ausgrabungsstätte und beendeten unsere letzte Arbeit in der Wüste mit Selfies von uns und einigen Grabungshelfern.

Um 18:30 Uhr fand ein speziell organisiertes Abschlussessen mit den ägyptischen Inspektoren und den Kuftis statt. Anschließend begaben wir uns in den für die Präsentation vorbereiteten Raum und zeigten die ersten digitalen Ergebnisse und AR-Versuche. Der Leiter der ägyptischen Abteilung von Sohag übersetzte für die nicht Englisch sprechenden Vorarbeiter ins Ägyptische. Alle waren sehr begeistert von den Darstellungen, und manch einer sprach sogar von Magie.

Unseren letzten Abend verbrachten wir gemeinsam mit einer Runde Gin, Wodka und einer Shisha, bis wir schließlich um 01:00 Uhr ins Bett gingen. Glücklicherweise war der Koffer bereits fast fertig gepackt, sodass ich mir keine Sorgen über einen bevorstehenden Stress machen musste. Inmitten dieser aufregenden Erfahrungen und unvergesslichen Erinnerungen blickten wir voller Wehmut auf unseren letzten Tag in Abydos zurück.

### 05.11.2021 | Tagestitel: Abreise nach Kairo

Wetter 33°C, wenig windig, wolkenlos

An unserem Abreisetag wurden wir, wie bei unserer Ankunft auch, von einem Fahrer zum etwa drei Stunden entfernten Flughafen in Luxor gebracht. Während der Autofahrt hatte ich Gelegenheit, beim Blick auf das uns begleitende Wüstengebirge die letzten drei Wochen in Abydos Revue passieren zu lassen.

Es war äußerst faszinierend, eine solche Ausgrabung begleiten zu dürfen und an den Ergebnissen mitzuarbeiten, die später teilweise für wissenschaftliche Zwecke verwendet werden, aber auch der Allgemeinheit zugänglich gemacht werden können. Die Erfahrungen, die ich während dieser Zeit gesammelt habe, waren unglaublich bereichernd und haben mir einen tiefen Einblick in die Welt der Archäologie und die Zusammenarbeit mit den beteiligten Experten ermöglicht.

Zuhause in Wien können wir dann mit der eigentlichen Digitalisierungsarbeit beginnen.



Abb.169: Präsentation vor dem Team und Inspektoren aus Sohag