



nestor

Langzeiterhaltung
von 3D-Röntgen-Computertomographien
in der Archäologischen Denkmalpflege

Leila Sayer-Degen

nestor edition 5



Langzeiterhaltung
von 3D-Röntgen-
Computertomographien
in der Archäologischen
Denkmalpflege

Leila Sayer-Degen

nestor edition 5

Herausgegeben von

nestor - Kompetenznetzwerk Langzeitarchivierung und
Langzeitverfügbarkeit Digitaler Ressourcen für Deutschland

nestor - Network of Expertise in Long-Term Storage
of Digital Resources

<http://www.langzeitarchivierung.de>

nestor Kooperationspartner:

- Bayerische Staatsbibliothek
- Deutsche Nationalbibliothek
- FernUniversität Hagen
- Georg-August-Universität Göttingen / Niedersächsische Staats- und
Universitätsbibliothek Göttingen
- Humboldt-Universität zu Berlin
- Landesarchiv Baden-Württemberg
- Stiftung Preußischer Kulturbesitz / SMB - Institut für Museumsforschung
- Bibliotheksservice-Zentrum Baden-Württemberg
- Institut für Deutsche Sprache
- Computerspiele Museum Berlin
- Goportis
- PDF/A Competence Center

© 2012

nestor - Kompetenznetzwerk Langzeitarchivierung und Langzeitverfügbarkeit
Digitaler Ressourcen für Deutschland

Der Inhalt dieser Veröffentlichung darf vervielfältigt und verbreitet werden, sofern der Name des Rechteinhabers "nestor - Kompetenznetzwerk Langzeitarchivierung" genannt wird. Eine kommerzielle Nutzung ist nur mit Zustimmung des Rechteinhabers zulässig.

URN: urn:nbn:de:0008-2012040400

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn:nbn:de:0008-2012040400>]

Die Schriftenreihe **nestor edition** präsentiert ausgewählte wissenschaftliche Arbeiten mit dem Schwerpunkt Langzeitarchivierung. Sie wird in loser Folge von **nestor – Kompetenznetzwerk Langzeitarchivierung** herausgegeben. Damit entsteht ein Forum, in dem Beiträge zu verschiedenen Aspekten der digitalen Langzeitarchivierung einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Die Arbeiten werden von ausgewiesenen Experten aus den jeweiligen Fachgebieten für die **nestor edition** gezielt ausgewählt, wenn sie einen besonderen Beitrag zu wichtigen Themenfeldern oder zu neuen wissenschaftlichen Forschungen auf dem Gebiet leisten.

Bemerkungen zu dieser Publikation, aber auch Vorschläge für die Aufnahme weiterer Beiträge in der Edition gerne an: VL-nestor@dnb.de

Für die Partner von **nestor – Kompetenznetzwerk Langzeitarchivierung**
Reinhard Altenhöner und Natascha Schumann
Deutsche Nationalbibliothek

Leila Sayer-Degen

**Langzeiterhaltung
von 3D-Röntgen-Computertomographien
in der Archäologischen Denkmalpflege**

Masterthesis

Studiengang: Konservierung Neuer Medien und Digitaler Information
Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart

20. August 2010

Gutachter: Prof. Dr. Hans Dieter Huber
Dr. Christian Keitel

– überarbeitete Fassung –

Kurzfassung

In der vorliegenden Thesarbeit soll überprüft werden, ob und wie digitale Bilddaten, die bei der 3D-Röntgen-Computertomographie (3D-RCT) entstehen, langfristig zugänglich und nutzbar gehalten werden können. Die möglichen Erhaltungsstrategien werden anhand der 3D-RCT-Bilddaten diskutiert, die in der Archäologischen Restaurierung des Landesamtes für Denkmalpflege Baden-Württemberg in Esslingen, bereits seit 2007 systematisch von Gipsblöcken des Gräberfeldes von Lauchheim, Ostalbkreis, angefertigt werden. Eine wichtige Voraussetzung für eine Konservierungsstrategie der 3D-Daten ist die Definition und Bewertung der „signifikanten Eigenschaften“. Die dreidimensionale Aufnahme der Objekte erfolgt, um den spezifischen archäologischen und restauratorischen Fragestellungen nachzugehen. Die 3D-Daten sind Forschungsdaten, deren wissenschaftliche Aufbereitung mithilfe der Software das Ziel hat, diese Fragestellungen zu beantworten. Im Rahmen der Thesis haben Beteiligte des Lauchheim-Projektes die Eigenschaften des 3D-Datensatzes definiert und gewichtet, die aus ihrer Sicht wesentlich für die Aussagekraft sind und die bei einer Migration der Daten möglichst nicht verloren gehen dürfen. Die Formate und die Software, in der die Daten derzeit erstellt und in denen sie weiter bearbeitet werden, werden im Hinblick auf ihren langfristigen Erhalt beurteilt. Gezeigt werden die Herausforderungen bei der Langzeiterhaltung komplexer 3D-Daten. Wünschenswert ist ein Entgegenkommen der 3D-Software-Hersteller, um die für die Langzeitarchivierung notwendigen Schritte umsetzen zu können.

Abstract

The thesis shows whether and how far the digital image data from the 3D computed tomography with X-rays (3D XCT) could be kept accessible and usable over the long term. The possible conservation strategies are discussed on the basis of 3D XCT image data which are held at the Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg in Esslingen / State Institution for Cultural Heritage, Germany. In its role of archaeological conservation, the Landesamt has, since 2007, systematically generated images from blocks of soil obtained at the burial site of Lauchheim. An important prerequisite is the definition and the assessment of the "significant properties", which must be maintained in any data migration as they are crucial for the meaning and interpretation of the digital object. These properties are analyzed and evaluated for the 3D data. A second goal is to review the current formats and software in which the data are being created and how they are processed further.

The advantages and disadvantages of the technology used in regard to their long-term preservation is then summarised with the conclusion that current software suppliers need to further optimise their formats to facilitate longer term archiving.

Danksagung

Ich bedanke mich bei allen, die mir mit ihrer Unterstützung diese Arbeit ermöglicht haben.

Besonderer Dank an:

Prof. Dr. Hans Dieter Huber, Dr. Christian Keitel, Dipl.-Rest. Nicole Ebinger-Rist, Dipl.-Rest. Jörg Stelzner, Christina Peek M.A. und Dr. Florian Gauß vom Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg, Mario Röhrle, Dipl.-Ing. Daniela Handl und Markus Woyde von der Firma Volume Graphics Heidelberg, Dipl.-Ing. Martin Taupitz von der Firma GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Boris Jakubaschk, Horst Bock und Hubert Petrich vom Geschäftsbereich Informationstechnologie am Universitätsklinikum Tübingen, Hubert Krause vom Medizinischen Informationsmanagement des Städtischen Klinikum Karlsruhe, Clemens Sayer, Christa Degen, Ursula Sayer, Rudolf Netzelmann, Bernd Kiefer, Stefan Sayer und Michael Burnet.

INHALTSVERZEICHNIS

DANKSAGUNG.....	4
1. EINFÜHRUNG IN DAS THEMA.....	7
1.1 Einleitung.....	7
1.2 Forschungsdaten.....	10
1.3 Zum Stand der 3D-Daten-Archivierung in unterschiedlichen Berufssparten.....	11
1.3.1 Zur Beurteilung der Archivierung medizinischer CT-Daten am Universitätsklinikum Tübingen.....	14
1.4 Bisherige Vorarbeiten in der digitalen Langzeitarchivierung in Bezug auf die vorliegende Arbeit.....	15
1.5 Datenträger und Erhaltungsstrategien.....	18
a) Migration.....	19
b) Konversion.....	20
c) Emulation.....	21
d) Computermuseum.....	22
1.5.1 Fazit.....	22
1.6 Metadaten	22
1.7 3D-Dateiformate.....	24
2. DIE SITUATION IN DER ARCHÄOLOGISCHEN DENKMALPFLEGE....	27
2.1 3D-RCT als Untersuchungsmethode von archäologischen Objekten.....	27
2.1.1 Funktionsweise der RCT-Messung.....	30
2.1.2 Technische Umgebung.....	31

2.1.3	Die Ausgangsformate TIF, VOL/RAW	32
2.1.4	Workflow: Bildbearbeitung	35
2.1.5	Die Bearbeitungsformate VGI/VGL.....	36
3.	ZUR ARCHIVIERUNG VON 3D-INHALTEN.....	38
3.1	Anforderungen an eine Langzeitsicherung von 3D-RCT-Daten.....	38
3.1.1	Proprietäre Formate.....	38
3.1.2	Volume Graphics und VGStudio MAX.....	39
3.1.3	Zum Erhalt der 3D-Inhalte in VGI-/VGL-Dateien.....	40
3.2	Voraussetzungen für eine Langzeitsicherung von 3D-RCT-Daten.....	41
3.2.1	Signifikante Eigenschaften von 3D-RCT-Daten.....	42
3.2.2	Identifizieren der signifikanten Eigenschaften.....	43
3.2.3	Bewerten der signifikanten Eigenschaften.....	44
3.3	Möglichkeiten zur Dokumentation der 3D-Aufnahmen.....	46
3.3.1	Erstellen eines 3D-PDF's mit dem offenen Format U3D.....	48
3.3.2	Filme in AVI <i>uncompressed</i>	50
3.3.3	<i>MyVGL-Viewer</i>	51
3.3.4	2D-Ansichten.....	51
3.3.5	<i>Report</i>	52
3.3.6	Fazit.....	53
4.	ZUSAMMENFASSUNG.....	54
5.	AUSBLICK.....	57
6.	GLOSSAR.....	58
7.	ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS.....	61
8.	QUELLENVERZEICHNIS.....	62
9.	SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG.....	70

1. EINFÜHRUNG IN DAS THEMA

1.1 Einleitung

In der Archäologie ist es üblich, in langen Zeiträumen zu denken. Aber welche gedanklichen Zeitsprünge erfordert es, an das Bewahren der digitalen Daten zu den Jahrtausende alten archäologischen Objekten für den Zugriff von morgen zu denken?

Die Neuen Medien haben in der „Wissenschaft von den sichtbaren Überresten alter Kulturen“¹ Einzug gehalten. Heutzutage erfolgt die Dokumentation und Auswertung einer archäologischen Ausgrabung meistens digital. Dennoch ist die Phase des Übergangs von der analogen zur digitalen Welt noch nicht abgeschlossen: In zahlreichen Digitalisierungsprojekten werden heute massenhaft analoge Dokumente zusätzlich digitalisiert. Oft wird neben einem Digitalisat, z.B. einer wissenschaftlichen Webpublikation, ein Pendant in gedruckter Form vorgelegt. Daraus ergibt sich bestenfalls ein „doppelter Boden“. Dennoch muss bereits heute an das Problem der Archivierung der digitalen Dokumente gedacht werden.

Die Neuen Medien haben viele Vorteile, darunter z.B. der zeit- und ortsunabhängige Zugriff oder die Zeitersparnis. Dessen ungeachtet gibt es wie bei analogen Dokumenten das Problem der Archivierung: Für analoges Schrift- und Fotomaterial müssen geeignete Verpackungen, Schränke und Raumklimata gewährleistet werden, um sie langfristig zu bewahren. Auch für digitale Daten müssen geeignete Bedingungen geschaffen werden, für die ein Umdenken nötig ist.

Und damit nicht genug: Während sich noch der Übergang von der analogen zur digitalen Erfassung vollzieht, kommt eine weitere Neuheit dazu: Die interaktiven digitalen Objekte. Das Abbild, das heutige *User* drehen, wenden und „durchfliegen“ können, entspricht in besonderem Maße den menschlichen Sehgewohnheiten.

¹ Unter „Archäologie“ im Duden. Das Fremdwörterbuch, Bd. 5, 7. Auflage, Dudenverlag, 2001.

3D-Röntgen-Computertomographien finden seit kürzerer Zeit erfolgreich in der Archäologie und Restaurierung Einsatz.² Durch die anwachsenden Fundmengen in den Magazinen bei gleichzeitigem Personalmangel in Landesämtern und Museen ist der zeitliche Aufwand für eine herkömmliche Restaurierung und Dokumentation kaum mehr zu schaffen. Aus diesem Grund muss die Archäologie neue Wege in der wissenschaftlichen Fundauswertung beschreiten. Die 3D-Röntgen-Computertomographie (3D-RCT) bringt in kürzerer Zeit eine visuelle Bestandsaufnahme von archäologischen Objekten. Die Blöcke³ werden vermessen, untersucht und dokumentiert – ohne sie zu öffnen. Die 3D-Aufnahmen von archäologischen Fundensembles ermöglichen dank heutiger Technik spektakuläre neue Ein- und Ansichten – allerdings ist der Langzeiterhalt der 3D-Daten eine bislang ungelöste und herausfordernde Aufgabe.

Die 3D-computertomographischen Messungen produzieren umfangreiche, dreidimensionale Datensätze, die anhand spezieller Software zu aussagekräftigen wissenschaftlichen Ergebnissen weiterverarbeitet werden. Die Argumentationskette, die für den Einsatz der 3D-RCT spricht, greift nur, wenn es gelingt, die digitalen Daten, die den *status quo* des archäologischen Befundes dokumentieren und damit die Grundlage für heutige und zukünftige wissenschaftliche Erkenntnis sind, für längere Zeit zugänglich zu halten. Auswertbar und nachvollziehbar bleiben diese Erkenntnisse nur, wenn die 3D-Bilddaten auch noch in fünf, zehn oder fünfzig Jahren zugänglich sind, was für archäologische Zeitdimensionen verschwindend gering ist. Im schlimmsten Fall aber sind die 3D-Daten in fünf Jahren teilweise oder sogar vollständig verloren, da sie dann nicht mehr von den neuen Softwareprogrammen gelesen werden können. Wie kann das verhindert werden? Diese Fragestellung steht im Fokus der vorliegenden Arbeit, um das Problem, das sich in der Archäologischen Denkmalpflege stellt, zu lösen.

Kontrollierte Datenträger- und Formatmigration gehören derzeit zur wichtigsten Strategie, digitale Information über Jahrzehnte und Jahrhunderte verfügbar zu halten.

² J. Kastner, D. Salaberger, M. Grabner, M. Mehofer, Mikro-Röntgencomputertomographie: Eine zerstörungsfreie Methode für die Archäologie, *Archäologie Österreichs* 18, 1, 2007, S. 60-64.

M. Mödlinger, Mikro-Röntgencomputertomografie in der Archäologie: Analyse eines bronzezeitlichen Schwertes, in: *Industrielle Computertomografie. Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, 3D-Materialcharakterisierung und Geometriebestimmung*, Fachtagung 27.-28. Februar 2008, Wels/ Österreich, 2008, S. 219-223.

³ Blockbergung: Ein Fundensemble, bei dem alle Objekte *in situ* mit dem umgebenden Material aus der Erde gestochen und eingegipst werden. Ziel dabei ist, alle Objekte aus verschiedenen Materialien, neben Metall auch Textil-, Leder- und Pflanzenreste, in ihrer stratigraphischen Abfolge zu bergen und später unter Laborbedingungen erfassen zu können.

Mit einer Migration von komplexen Grafikdateien von einem Format in ein anderes – sofern es überhaupt möglich ist – ist jedoch das Risiko verbunden, dass die Daten sich verändern, z.B. in Aussehen, Struktur, Position, Farben oder sogar verloren gehen. Beim Umgang mit den entstehenden Datenmengen stellt sich deshalb die zentrale Frage: Was soll erhalten bleiben? Als erstes muss Klarheit darüber bestehen, dass nicht alles, was heute an 3D-Bilddaten geschaffen wird, langfristig erhaltenswert ist. Ist die Auswahl der zu archivierenden Daten getroffen, muss man sich im Klaren darüber sein, dass mit jeder derzeit möglichen Erhaltungsstrategie dennoch die Gefahr verbunden ist, dass Daten nach dem Transfer von einem Archiv- und Speichersystem auf ein anderes unter Umständen verändert werden, unvollständig oder nicht mehr auffindbar sind. Eine besondere Herausforderung stellen 3D-Daten auch deshalb dar, weil für den Austausch und die Nutzung von 3D-Inhalten Standards fehlen. Oftmals entwickeln 3D-Software-Hersteller ihre eigenen Formate, die nicht öffentlich spezifiziert sind und sich deshalb nur von der firmeneigenen, lizenzkostenpflichtigen Software korrekt auslesen und nutzen lassen. Dies ist für den Datenaustausch übers Web oder zwischen verschiedenen 3D-Programmen und speziell für das Ziel, die Daten über einen langfristigen Zeitraum verfügbar zu machen, ein entscheidendes Hindernis. Diese in der Logik der Marktwirtschaft und einem de facto Monopol begründete Firmenpolitik ist zwar offensichtlich. Sie muss jedoch noch von den heutigen *Usern* als Nachteil an der Software formuliert werden.

Die Daten, die bei der 3D-Röntgen-Computertomographie in der Archäologischen Denkmalpflege entstehen, werden mit einer Visualisierungssoftware bearbeitet und liegen dann in firmeneigenen (proprietären) Formaten vor. Sie sollen untersucht werden im Hinblick auf die Migrierbarkeit und andere Möglichkeiten der Datenerhaltung. Diese Möglichkeiten werden einer Prüfung unterzogen, welche Funktionalität und welche Aussagekraft dabei erhalten werden kann und mit welchen Verlusten für die Eigenschaften des digitalen Objektes zu rechnen ist. Daraus soll ablesbar sein, welches die Anforderungen an ein archivgeeignetes 3D-Austauschformat sind. Eine Voraussetzung für ein solches Austauschformat ist, die signifikanten Eigenschaften herauszufiltern, die für den Zweck, für den die Grafikdaten geschaffen wurden, unerlässlich sind, um die Aussagekraft und den Erkenntnisgewinn in dem jeweiligen Kontext nicht zu verfälschen.

Dabei wird sich diese Untersuchung an das Konzept der *significant properties / essential characteristics*⁴ anlehnen. Anhand der 3D-RCT-Daten der Archäologischen Denkmalpflege sollen die signifikanten Eigenschaften definiert und bewertet werden. Im Ergebnis soll erkennbar sein, welchen Eigenschaften der RCT-Daten Priorität beim Bemühen um den langfristigen Erhalt zukommt. Der Fokus liegt darauf, dass der 3D-Volumendatensatz und die ihm innewohnende Aussagekraft nicht verfälscht werden oder verloren gehen. Das grundlegende Ziel ist, die digitalen Daten dauerhaft und so verlustarm zu speichern, dass die wissenschaftliche Auswertung für die *Designated Community*⁵ möglich bleibt.

1.2 Forschungsdaten

Die digitalen Objekte, um deren langfristige Zugänglichkeit und (Nach-)Nutzbarkeit es in dem vorliegenden Text geht, umfassen nicht nur das Abbild des archäologischen Objektes, z.B. des Gipsblockes mit den darin enthaltenen Funden, sondern auch die potentielle Aussagekraft, die durch die dreidimensionale Messung entstanden ist. Ein Ziel der Langzeitarchivierung ist die spätere Wiederholbarkeit der von der Messung bis zum bearbeiteten Endergebnis erfolgten Schritte, die zum wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn führten, welcher in der Form einer Webpublikation oder eines gedruckten Kataloges festgehalten wird. Die DFG veröffentlichte im Januar 2009 die „Empfehlungen zur gesicherten Aufbewahrung und Bereitstellung digitaler Forschungsprimärdaten“.⁶

⁴ Vgl. M. Hedstrom, C. A. Lee, *Significant properties of digital objects: definitions, applications, implications*, 2002, S. 218-223; http://ils.unc.edu/caltee/sigprops_dlm2002.pdf, Zugriff am 17.8.2010. H. Heslop, S. Davis, A. Wilson, *An Approach to the Preservation of Digital Records*, National Archives of Australia, 2002, S. 1-24; <http://duckdigital.com/DAM/wp-content/uploads/2006/09/ApproachPreservationDigitalRecords.pdf>, Zugriff am 17.8.2010.

H. Hockx-Yu, G. Knight: *What to preserve?: Significant Properties of Digital Objects, Report on the JISC/BL/DPC Workshop of April 7, 2008*, British Library Conference Centre. In: *The International Journal of Digital Curation*, Issue 1, Vol. 3, 2008, S. 141-153; <http://www.ijdc.net/index.php/ijdc/article/viewFile/70/49>, Zugriff am 17.8.2010.

G. Knight, M. Pennock, *Data Without Meaning: Establishing the Significant Properties of Digital Research*, in: *The International Journal of Digital Curation*, Issue 1, Vol. 4, 2009, S. 159-174; <http://www.ijdc.net/index.php/ijdc/article/viewFile/110/87>, Zugriff am 17.8.2010.

A. Wilson, *InSPECT: Significant Properties Report*, Arts and Humanity Data Service (AHDS), 2007, S. 5-10; http://www.significantproperties.org.uk/wp22_significant_properties.pdf, Zugriff am 17.8.2010.

⁵ Mit der „*Designated Community*“ sind im Kontext der dLZA (digitalen Langzeitarchivierung) die potentiellen, zukünftigen Nutzer oder Nutzer-Gemeinschaften gemeint. Siehe im Glossar von DCC (Digital Curation Centre) unter „*Designated Community*“: <http://www.dcc.ac.uk/digital-curation/glossary-terms#D>, Zugriff am 1.8.2010. Siehe auch „*Designated Community*“ in *Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS), Reference Model for an Open Archival Information System (OAIS)*, 2002, *Reference*; <http://public.ccsds.org/publications/archive/650x0b1.pdf>, S. 1-10, Zugriff am 8.8.2010.

⁶ Deutsche Forschungsgemeinschaft, *Empfehlungen zur gesicherten Aufbewahrung und Bereitstellung digitaler Forschungsprimärdaten*, Bonn, 2009; http://www.dfg.de/download/pdf/foerderung/programme/lis/ua_inf_empfehlungen_200901.pdf, Zugriff am 3.4.2011.

Forschungsdaten oder auch Forschungsprimärdaten sind Daten, die als Arbeitsgrundlage für eine wissenschaftliche Publikation erstellt werden. Sie entstehen eher durch experimentelles Vorgehen, das auch immer wieder neu an eine bestimmte Fragestellung angepasst sein kann, als durch formelle Arbeitsabläufe. Meistens unterliegen sie keinen standardisierten Formatvorgaben und liegen deshalb häufig in einer Vielfalt von Dateiformaten vor. Sie sind meist kaum mit Metadaten versehen, da die Metadatenerfassung selten in die Arbeitsabläufe integriert ist. Das Speichervolumen von Forschungsdaten kann außerdem enorm sein.⁷ Somit ist es besonders kompliziert, sogenannte Forschungsdaten für den öffentlichen Zugang und die Nachnutzung bereitzustellen. Die Wissenschaftler verfügen kaum über Zeit und Mittel, Forschungsdaten für die öffentliche Bereitstellung vorzubereiten, Metadaten müssten beispielsweise automatisiert den Daten beigelegt werden.

Bei den computertomographischen Messungen und der anschließenden Bearbeitung entstehen eben solche Forschungsdaten, die zusammen mit vielen anderen Daten die Grundlage für eine wissenschaftliche Publikation in Druckform samt einem Katalog und für eine wissenschaftliche Webpublikation sein werden. Der digitale Langzeiterhalt von 3D-Daten schafft erst die Voraussetzung für einen offenen Zugang zu wissenschaftlichem Wissen. Damit gibt die vorliegende Studie nicht nur Hinweise für die Erhaltung von digitalen 3-D-Objekten der Archäologie, sondern auch ganz allgemein für den Umgang mit Forschungsdaten.

1.3 Zum Stand der 3D-Daten-Archivierung in unterschiedlichen Berufssparten

In diesem Kapitel soll untersucht werden, wie der Erhalt von 3D-RCT in anderen Berufsfeldern organisiert wird.

Industrielle Computertomographie wird z.B. in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt, wo es eine mindestens 30jährige Aufbewahrungspflicht für Prüfberichte gibt.⁸

⁷Jens Klump, Digitale Forschungsdaten, in: H. Neuroth, A. Oßwald, R. Scheffel, S. Strathmann, M. Jehn (Hrsg.), nestor-Handbuch. Eine kleine Enzyklopädie der digitalen Langzeitarchivierung, Version 2.0, Boizenburg, Verlag Werner Hülsbusch, 2009, Kap. 17.10; http://nestor.sub.uni-goettingen.de/handbuch/artikel/nestor_handbuch_artikel_292.pdf, Zugriff am 3.4.2011.

⁸ „Rigide verpflichtet ein amerikanisches Gesetz Flugzeughersteller, ihre mehrere Terrabyte umfassenden Konstruktions-, Berechnungs-, Statistik- und Bilddaten ca. dreißig Jahre aufzubewahren, nachdem das letzte Exemplar einer Baureihe geflogen ist.“ Zitat aus Artikel von R. Blittkowsky, Langzeitarchivierung industrieller IT-Prozesse, 2004; <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/16/16567/1.html>, Zugriff am 8.8.2010.

In dieser Branche ist durch Normen vorgeschrieben, die Bilder wichtiger Bauteile zur Archivierung als Radiographien auf Film auszudrucken.⁹

Das Ausbelichten von Digitalisaten auf Mikrofilm wird bei der Archivierung innerhalb von Digitalisierungsprojekten gefördert, unter anderem, weil Mikrofilm nach dem heutigen Stand bei guten Lagerungsbedingungen einer der langlebigsten Datenträger ist. Auch die Ausbelichtung von farbigen Abbildungen auf Farbmikrofilm ist als neu entwickelte Technik möglich.¹⁰

In der Medizin findet die elektronische Bildgebung anhand von Röntgen und Computertomographie seit den 1970er Jahren Anwendung. Deshalb müssen die Radiologen und Mediziner schon seit Langem mit den produzierten Datenmengen in Praxen und Kliniken umgehen. Allerdings werden hier relevante Daten nach wie vor noch ausgedruckt, weshalb die zu speichernde Datenmenge nicht so hoch ist. Es gibt gesetzlich geregelte Aufbewahrungspflichten in der Medizin. So fordert §28 der Röntgenverordnung,¹¹ dass Radiologen die Röntgenbilder 10 Jahre lang aufbewahren müssen. Weiterhin müssen aber alle Aufzeichnungen über Röntgenbehandlungen 30 Jahre lang aufbewahrt werden.

Am Beispiel des Universitätsklinikums Tübingen, Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, soll gezeigt werden, wie mit den CT-Daten in der Medizin umgegangen wird¹². Die Abteilung verfügt über drei Computertomographen vom Hersteller Siemens. Die Röntgenbilder sowie die 3D-Röntgen-Computertomographien werden mit dem PACS – *Picture Archiving and Communication System* und dem RIS – Radiologie Informationssysteme¹³ verwaltet. Diese Informationssysteme sind in der Medizin sehr verbreitete Systeme, um einerseits die Menge an Bilddaten aus Computertomographie-, Röntgen- und weiteren Untersuchungen inklusive der Patientendaten zu verwalten und andererseits sie an unterschiedlichen Orten abrufbar zu machen.

⁹ Laut mündlichem Hinweis von Dipl.-Ing. (FH) MT, MBA Martin Taupitz von der Firma GE Sensing & Inspection Technologies GmbH am 25.6.2010.

¹⁰ Im Projekt ARCHE, das 2006 endete und an dem sich auch das Landesarchiv Baden-Württemberg beteiligte, wurde die Digitalisierung auf Farbmikrofilm anhand verschiedener Hard- und Software-Komponenten getestet, <http://www.landesarchiv-bw.de/arche>, Zugriff am 8.8.2010.

¹¹ Röntgenverordnung RöV2003, §28 (3); http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/r_v_1987/gesamt.pdf, S.25, Zugriff am 18.6.2010.

¹² Am 26.5.2010 Gespräch mit Horst Bock, stellvertretendem Projektleiter von MIT (= Medizinische Informationstechnologie) – *Image Management*, am 17.6.2010 mit Hubert Petrich, Geschäftsbereich Informationstechnologie, beide tätig am Universitätsklinikum Tübingen, Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Radiologie.

¹³ Vgl. Roland Heitmann, Auswahl und Konfiguration von PAC-Systemen für radiologische Arztpraxen unter Berücksichtigung der Einführung der elektronischen Patientenkarte, Diplomarbeit im Januar 2005 am Fachbereich Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik der Fachhochschule Gießen-Friedberg.

Röntgenaufnahmen und Computertomographien werden über den in der Medizin weit verbreiteten Standard DICOM – *Digital Imaging and Communications in Medicine* – ausgetauscht. DICOM ist ein in der Medizin höchst verbreiteter, offener de-facto-Standard.¹⁴ Die Vorgaben von DICOM standardisieren sowohl das Format zur Speicherung von Daten als auch deren Austausch. Entstanden ist DICOM 1985, als erstmals eine standardisierte Schnittstelle definiert wurde, die der Übertragung digitaler Bilder und zugehöriger Daten zwischen Geräten verschiedener Hersteller ermöglichen sollte.¹⁵ Es ist das Format, in dem das medizinische Personal die digitalen Bilder, die in Computertomographie-Untersuchungen entstehen, auswertet und weiterbearbeitet. Die Hersteller bildgebender Systeme in der Medizin wie digitales Röntgen oder Computertomographie richten ihre Produkte fast alle nach dem DICOM-Standard aus, so dass die Daten auf den Geräten unterschiedlicher Hersteller austauschbar sind.

Es gibt dennoch Probleme mit dem DICOM-Standard, denn die Hersteller medizinischer Geräte implementieren den DICOM-Standard unterschiedlich und passen ihn an die eigenen Geräte an, da kein Zwang besteht, sich komplett an den Standard zu halten. DICOM speichert und überträgt nicht nur Bilddaten, sondern auch Informationen zum Patienten und der Untersuchung. In dem Standard wird das Bildergebnis, das die medizinische Befundung wiedergeben soll, gespeichert. Das Rohformat, das der Computertomograph ausgibt, wird hingegen nicht vom Universitätsklinikum selbst mitgespeichert. Die Rohformate von CT-Messungen werden beim Gerätehersteller Siemens verwaltet, der im eigenen Interesse und zur technischen Weiterentwicklung Rohformate und Messparameter bei sich aufbewahrt. Der Geschäftsbereich „Informationstechnologie“ ist für die Speicherung der Aufnahmen zuständig.

Die gemessenen und bearbeiteten Daten werden dreimal gespiegelt aufbewahrt, d.h. dass die Daten in Kopie auf verschiedenen Speichern abgelegt werden. Der Vorteil davon ist, dass beim Ausfall eines Gerätes die Daten auf einem anderen Träger abrufbar und verfügbar bleiben. Zunächst werden sie im sogenannten Kurzzeitspeicher, einem Festplattenspeicher, gespeichert.

¹⁴ Seit 1995 ist DICOM in Europa als formaler Standard (MEDICOM, ENV 12052) akzeptiert. Siehe <http://dicom.offis.de/dcmintro.php.de>, Zugriff am 29.3.2011. DICOM-Webseite: <http://medical.nema.org/>, Zugriff am 29.3.2011.

¹⁵ Heitmann 2005, S. 53.

Nachts werden die Daten in einen sogenannten Langzeitspeicher auf Bänder übertragen, einer *tape library*. Mit einem *tape roboter* können die gewünschten Kassetten wieder entnommen werden. Wenn die Daten nach einer gewissen Zeit nicht vom Langzeitspeicher abgerufen werden, legt man die Datenträger in einen Tresor. Alle drei Standorte sind voneinander getrennt.

1.3.1 Zur Beurteilung der Archivierung medizinischer CT-Daten am Universitätsklinikum Tübingen

Ein Nachteil des Erhalts der CT-Daten am Universitätsklinikum Tübingen ist, dass nur die bearbeiteten DICOM's und nicht die originalen Messdatensätze (oder Rohdatensätze, engl. RAW) erhalten werden. Aus Sicht der Mediziner und Radiologen liegt der Schwerpunkt auf dem Erhalt des diagnostizierten Befundes und folglich eines entsprechend bearbeiteten Bildes.

DICOM-Bilddaten werden üblicherweise komprimiert.¹⁶ Die Kompression soll die „diagnostische Aussagekraft“ gemäß der Röntgenverordnung erhalten und der Aufzeichnungspflicht gerecht werden, kann aber technisch verlustbehaftet (*lossy*) sein. In einer Konsensuskonferenz haben sich Vertreter aus der Radiologie, Industrie, Physik und Technik u.a. auf bestimmte Kompressionsraten digitaler Bilddaten in der Radiologie geeinigt, die sie für medizinisch vertretbar halten.¹⁷ Dabei wurden jeweils höhere Kompressionsraten für vertretbar gehalten als vor der Konferenz. Zuvor wurde eine verlustlose Kompression (*lossless*) für die „Langzeitarchivierung“ empfohlen. Die Vorteile der Kompression erstens bei der Verwaltung in PACS und zweitens bei der Distribution der Daten wie Speicherkapazität, Geschwindigkeit, Energie- und Hardware-Kosten werden in dem Artikel zur Konferenz hervorgehoben.¹⁸ Erhält man allerdings die Messdatensätze, so besteht auch zukünftig die Möglichkeit, je nach Interesse den Datensatz nochmals auszuwerten, Ergebnisse nachzuvollziehen und den damaligen Zustand oder Befund

¹⁶ R. Loose, R. Braunschweig, E. Kotter, P. Mildenerger, R. Simmler, M. Wucherer, Kompression digitaler Bilddaten in der Radiologie – Ergebnisse einer Konsensuskonferenz, in: Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren, Bd. 181, 2009, S. 32-37.

¹⁷ Loose 2009, S. 36.

¹⁸ Loose 2009, S. 36.

neutral, messgenau und vollständig zu erhalten, ohne dass die Messung wiederholt werden muss.

Mit dem Erhalt von Rohdaten und der dazugehörigen Formatspezifikation bewahrt man die dreidimensionale Aufnahme zu einer bestimmten Zeit in seinem kompletten potentiellen Aussagewert und damit die Chance, Befunde unter neuen Blickwinkeln auszuwerten. Zusätzlich benötigt man eine Software, die dieses Format auslesen kann.

Es ist festzuhalten, dass die redundante Speicherung an verschiedenen, räumlich voneinander getrennten Standorten auf unterschiedlichen Speichermedien gewissen Schutz vor Verlust bietet. Bei der Nutzung eines PACS und der Datenverarbeitung müssen Gesetze zum Datenschutz und zur Aufbewahrungsdauer¹⁹ beachtet werden. Im Hinblick auf den Datenschutz ist außerdem zu beachten, ob die Bilder aus Computertomographie-Untersuchungen mit digitalen Signaturen versehen werden.

1.4 Bisherige Vorarbeiten in der digitalen Langzeitarchivierung in Bezug auf die vorliegende Arbeit

In Deutschland gibt es weder eine nationale Strategie für die Digitalisierung kulturellen Erbes noch für die damit zusammenhängende digitale Langzeitarchivierung (dLZA). Der aktuelle Forschungsstand der digitalen Langzeitarchivierung kann umfassend im nestor-Handbuch, Eine kleine Enzyklopädie der digitalen Langzeitarchivierung, nachgelesen werden.²⁰ Das Akronym „nestor“ bedeutet ausgeschrieben „Network of Expertise in long-term STOrage and availability of digital Resources in Germany“. Der deutsche Projekttitle lautet „Kompetenznetzwerk Langzeitarchivierung und Langzeitverfügbarkeit digitaler Ressourcen in Deutschland“. Wie Nestor, der Berater der Griechen in Troja, soll das gleichnamige Netzwerk den Institutionen bei der Aufgabe der Langzeiterhaltung des kulturellen Erbes Unterstützung anbieten. Die Anforderungen und strategischen Ziele für

¹⁹ Röntgenverordnung 2003, RöV 2003, Link: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/r_v_1987/gesamt.pdf, Zugriff am 18.6.2010.

²⁰ H. Neuroth, A. Oßwald, R. Scheffel, S. Strathmann, M. Jehn (Hrsg.), nestor-Handbuch. Eine kleine Enzyklopädie der digitalen Langzeitarchivierung, Version 2.0, 2009; <http://nestor.sub.uni-goettingen.de/handbuch/index.php>, Zugriff am 8.8.2010.

Deutschland wurden im nestor-Memorandum erstmals am 31. März 2006 veröffentlicht.²¹ Darin wird festgehalten, dass der Erhalt des digitalen Kulturerbes die gemeinsame Aufgabe politischer Entscheidungsträger, Urheber, Verleger, Hard- und Softwarehersteller und kultureller Gedächtnisorganisationen ist. Zentrale Themen sind die Wahrung der Integrität (d.h. der Vollständigkeit), der Authentizität (d.h. das Dokument ist das, was es vorgibt zu sein) und der langfristigen Verfügbarkeit der digitalen Objekte. Dabei sind alle Arten von digitalen Objekten gemeint. Ein „digitales Objekt“ bedeutet in der Langzeitarchivierung eine logisch abgegrenzte Einheit, bestehend aus einer Reihe von Bit-Sequenzen²². In den nestor-Veröffentlichungen soll Information zur dLZA zugänglich gemacht und gebündelt werden und Kooperationen von Bibliotheken, Archiven, Museen, Datenzentren und anderen Institutionen mit dem gleichen Problem erleichtern.

Die Langzeitarchivierung digitaler Medien gelingt bisher noch nicht mit einer einheitlichen Lösung für alle Objektgattungen. Das Thema Langzeitsicherung wird häufig unterschätzt, besonders in Bezug auf den Aufwand und die Kosten. Eine Besonderheit im 3D-Sektor sind die riesigen Datenmengen, die erzeugt werden und entsprechend gesichert werden müssen. Werden die 3D-Daten unkomprimiert und redundant abgelegt, entstehen schnell Datenmengen von mehreren Terrabyte. Es müssen weiterhin die Mittel langfristig eingeplant werden, um die zum Lesen und Bearbeiten der 3D-Daten notwendige Software bereitzuhalten, die Daten zumindest stichprobenartig in regelmäßigen Abständen - etwa einmal im Jahr - auf ihre Les- und Nutzbarkeit hin zu testen und gegebenenfalls zu migrieren oder zu konvertieren.

Das in dieser Arbeit zentrale Konzept der „signifikanten Eigenschaften“ (auch bezeichnet als „essentielle Eigenschaften“)²³ wurde in den vergangenen Jahren in zahlreichen Programmen und Projekten zur digitalen Langzeitarchivierung erwähnt und seine Bedeutung betont²⁴. Die National Archives of Australia (NAA) formulierten 2002 das Konzept der signifikanten Eigenschaften, für das sie die Bezeichnung „*the essence of a record*“ fanden:

²¹ <http://files.d-nb.de/nestor/memorandum/memo2006.pdf>; Zugriff am 8.8.2010.

²² Siehe OAIS, Kap. 1.7.2, *Terminology*, S. 1-10: *Digital Object: An object composed of a set of bit sequences*, Zugriff am 8.8.2010.

²³ engl. Bezeichnungen: *significant/essential properties/characteristics*

²⁴ Vgl. Wilson 2007. Hockx-Yu 2008.

“The project team developed the concept of a record’s ‘essence’ as a way of providing a formal mechanism for determining the characteristics that must be preserved for the record to maintain its meaning over time. The performance model demonstrates that digital records are not stable artefacts; instead they are a series of performances across time. Each performance is a combination of characteristics, some of which are incidental and some of which are essential to the meaning of the performance. The essential characteristics are what we call the ‘essence’ of a record.”²⁵

Obwohl schon in den Jahren zuvor dieses Konzept diskutiert wurde, blieb die Veröffentlichung der NAA die präziseste Beschreibung. Weiterhin diskutiert wurde das Konzept der *significant properties* von der Initiative „*Electronic Records Archives*“ (ERA)²⁶ der US National Archives and Records Administration (NARA), USA, dem Programm „*Seamless Flow*“ der National Archives (TNA)²⁷, UK und im EU-Projekt DELOS²⁸. Die Bedeutung und das theoretische Konzept der signifikanten Eigenschaften sind aufgrund der Auseinandersetzung in der entsprechenden Literatur mittlerweile deutlich geworden – Beispiele zur praktischen Anwendung des Konzepts auf die realen Situationen findet man allerdings kaum. Bedauerlicherweise sucht man Beispiele, in denen signifikante Eigenschaften für einzelne digitale Objektarten bestimmt und bewertet werden, oftmals vergeblich in den veröffentlichten Projektberichten²⁹. Darum kann man davon ausgehen, dass das Identifizieren, Bewerten oder Verbreiten signifikanter Eigenschaften für spezielle Objektgattungen den Gedächtnisinstitutionen selbst überlassen bleibt. Das nationale Ziel einer einheitlichen Konservierungsstrategie – *conservation policy* zum Erhalt und zur Verfügbarkeit des digitalen Erbes sollte auch das Konzept der signifikanten Eigenschaften mit einbeziehen.³⁰

²⁵ Zitiert nach Heslop 2002, S. 13, Kap. 4, *Concept of essence*;
<http://duckdigital.com/DAM/wp-content/uploads/2006/09/ApproachPreservationDigitalRecords.pdf>, Zugriff am 8.8.2010.

²⁶ <http://www.archives.gov/era/>, Zugriff am 8.8.2010.

²⁷ http://www.nationalarchives.gov.uk/documents/transition_strategy_paper.pdf,
<http://www.nationalarchives.gov.uk/documents/faqs-for-general-public.pdf>, Zugriff am 8.8.2010.

²⁸ http://www.planets-project.eu/docs/papers/Brown_DevelopingPracticalApproaches_IJDC.pdf, Zugriff am 17.8.2010.

²⁹ Projektberichte siehe: <http://www2.si.umich.edu/CAMILEON/reports/reports.html>, Zugriff am 15.8.2010.

Eine Ausnahme ist der folgende Artikel, in dem ein Beispiel von signifikanten Eigenschaften von Multimedia-Kunst gegeben wird: C. Becker, G. Kolar, J. Küng, A. Rauber, *Preserving Interactive Multimedia Art: A Case Study in Preservation Planning*, in: *Lecture Notes in Computer Science*, 2007, Vol. 4822, 2007, S. 257-266.

³⁰ Zur Konservierungsstrategie (auch bezeichnet als *conservation/preservation strategy/policy, preservation planning/system*) im Umfeld der dLZA siehe auch Artikel zu PLATO: C. Becker, H. Kulovits, A. Rauber, H. Hofman, *PLATO: A Service Oriented Decision Support System for Preservation Planning*, 2010; http://www.planets-project.eu/events/rome-2010/pre-reading/docs/Becker_etc_PlatoSOA.pdf, Zugriff am 1.8.2010. <http://www.planets->

1.5 Datenträger und Erhaltungsstrategien

Die Themen der folgenden Kapitel „Datenträger und Erhaltungsstrategien“ und „Metadaten“ betreffen alle digitalen Informationen und nicht nur die spezielle Objektart 3D-RCT-Daten. Datenträger und ihre Haltbarkeit,³¹ Metadatenstandards³² und Speichertechnologien³³ werden in der Fachliteratur und auf entsprechenden Webseiten ausführlich diskutiert. Da diese Themenfelder auch bei der Erhaltung der computertomographischen Bilddaten beachtet werden müssen, werden sie kurz vorgestellt.³⁴

Generell ist die Erhaltung der digitalen Daten risikobehaftet. Die Daten sind gefährdet durch unbeabsichtigtes oder beabsichtigtes Löschen oder Manipulieren. Dies kann durch den Menschen verursacht sein oder durch Systemfehler. Damit die Manipulation der Daten nicht unbemerkt bleibt, sollte die Vollständigkeit und Fehlerfreiheit mit einer Prüfsumme nachgewiesen werden, z.B. SHA-1 oder CRC (*cyclic redundancy check*): Bei diesen Verfahren stellt ein bestimmter Algorithmus (eine Rechenvorschrift) sicher, dass schon bei der kleinsten Änderung der Daten in einem Dokument die Zahl, die als Ergebnis der Rechnung herauskommt, der sogenannte Hashwert, sich stark verändert.

Werden die Daten für den Langzeiterhalt auf andere Träger oder Formate übertragen, ist noch nicht garantiert, dass sie auch wieder auffindbar und damit für die Nutzung zu einem späteren Zeitpunkt bereitgehalten werden. Wachsen die Datenmengen an, ist die Organisation der Daten unter dem Gesichtspunkt Nutzung und Präsentation aufwändig, aber unvermeidbar.

project.eu/events/plato/, Zugriff am 1.8.2010. Oder zu Kap. 4.1.1.6 *Preservation Planning* in OAIS, S. 4-12, Zugriff am 8.8.2010.

³¹ Z.B. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik:

https://www.bsi.bund.de/cln_156/DE/Themen/weitereThemen/ITGrundschutzKataloge/Inhalt/Massnahmenkataloge/M4H_ardwareundSoftware/m4hardwareundsoftware_node.html; <http://www.techwriter.de/thema/lebensda.htm>, <http://de.wikipedia.org/wiki/Langzeitarchivierung>, http://www.medienportal.biz/_pdf/Haltbarkeit_von_Datentraegern.pdf, Zugriffe am 17.8.2010.

³² Z.B. <http://www.niso.org/publications/press/UnderstandingMetadata.pdf>, http://www.spectrum.uni-bielefeld.de/modelex/publication/techdoc/modelex_techrep4/node12.html, Zugriffe am 16.8.2010.

³³ Z.B. <http://www.pro-datenrettung.net/lexikon/speicher-technologien.html>, Zugriff am 16.8.2010.

³⁴ Vgl. auch zu diesen Themenfeldern: Skript zur Vorlesung “Methoden der Langzeitarchivierung” im SS 2009 von Dr. G. Maier, Landesarchiv Baden-Württemberg, Stand: 17.5.2009. Mit freundlicher Genehmigung von Dr. Gerald Maier.

Die Haltbarkeit sowohl der Dateiformate als auch der Trägerformate ist durch den schnellen Medien- und Systemwechsel gefährdet. Die physische Haltbarkeit von neuen Datenträgern ist verglichen mit der Haltbarkeit von Papier äußerst kurz. Besonders gefährdet sind magnetische oder opto-magnetische Datenträger wie Disketten, Magnetbänder oder CD's und DVD's. Die Nähe von Magnetfeldern kann die Information auf Disketten oder Magnetbändern zerstören, das Einwirken von UV-Strahlung kann optische Datenträger beschädigen. CD's und DVD's sind nicht standardisiert und es gibt sie in etlichen Varianten, was nicht sinnvoll für die Langzeiterhaltung ist. Sie sind zudem besonders anfällig für physische Schäden durch Lacke, Kratzer u.ä. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass CD's und DVD's keine geeigneten Speichermedien für die Langzeitarchivierung sind. Externe Festplatten sind für die Langzeitarchivierung geeignet, sofern man rechtzeitig – spätestens nach fünf Jahren – eine Datenträgermigration vornimmt und sie ersetzt. Ebenso geeignet sind herkömmliche Festplattenspeichersysteme mit redundanten RAID-Arrays, z.B. RAID 5, bei dem die Daten auf mehrere Festplatten verteilt und gespiegelt werden. Dieses Speicherverfahren ist kostspieliger, da Festplattenschränke etwa 3-4 Jahre halten und dann ausgetauscht werden müssen. Die bei der Archivierung und bei Backups üblicherweise eingesetzten Strategien, die Daten redundant zu halten und auf unterschiedlicher Hardware räumlich getrennt aufzubewahren, gewinnen für die Langzeitarchivierung zusätzlich an Bedeutung.

Es gibt vier Erhaltungsstrategien für digitale Information, die unabhängig voneinander einzeln oder kombiniert einsetzbar sind. Dies sind Migration, Konversion, Emulation oder das Computermuseum.

a) Migration

Unter „Migration“³⁵ versteht man sowohl die Datenträgermigration (auch Medienmigration genannt), z.B. das Übertragen der Information von einer Festplatte auf ein Flash-Speichermedium, als auch die Formatmigration (auch Datenmigration genannt), z.B. das Migrieren der Information von einer älteren 3D-PDF-Version in eine aktuellere 3D-PDF-Version und die Anpassung in die neue Hard- und Softwareumgebung.

³⁵ Siehe unter „Migration“ in Glossar/Linkliste von kopal: <http://kopal.langzeitarchivierung.de>, Zugriff am 16.7.2010.

Die Datenträgermigration und die langfristige Speicherung der Datenobjekte selbst bilden die Grundlage der physischen Erhaltung und der Interpretierbarkeit der Daten (auch *Bitstream Preservation* genannt). Dem physischen Verfall des Trägermediums kommt das Veralten der verwendeten Datenträger-Technologie meist zuvor. Die Formatmigration nimmt man vor, wenn die Nutzung der Daten aufgrund ihres Formates gefährdet ist. Bei der Formatmigration besteht die Gefahr, dass sich das digitale Objekt verändert, wie z.B. das Erscheinungsbild (z.B. Größe, Farben, Proportionen). Je komplexer die Datei-Formate, die migriert werden, umso umfangreicher und unübersichtlicher wird der Vorgang der Migration und umso riskanter ist es, dass unbemerkt Daten verloren gehen.

Bei der Formatmigration sollte das Objekt im ursprünglichen Format und in jeder Migrationsversion erhalten werden. Ein Nachteil ist, dass damit ggf. viel Speicherplatz benötigt wird. Die Migration kann automatisiert ablaufen, allerdings benötigt man ein passendes Migrationswerkzeug für jedes Format und jeden Migrationsschritt und jedes Objekt muss einzeln migriert werden. Dazu kommt, dass immer rechtzeitig migriert werden muss, um keinen Migrationszyklus zu verpassen. Die Migration ist nicht für alle Formate möglich. Ein Nachteil ist, dass Vollständigkeit und Unversehrtheit der Daten in Frage gestellt werden kann. Andererseits zwingt der technologische Wandel die Nutzer dazu, auf aktuellere Daten- und Speichersysteme überzuwechseln, um die Information auf aktuellen Computern benutzbar zu halten. Bei der Migration wird das Objekt möglichst so verändert, dass es in einer neuen Systemumgebung angezeigt und benutzt werden kann und dass seine wichtigsten Inhalte und Konzepte erhalten bleiben (siehe Kapitel 3.2).

Wie schon eingangs bemerkt, ist die verlustfreie, regelmäßige Migration derzeit die wichtigste Erhaltungsstrategie der digitalen Langzeiterhaltung.

b) Konversion

Eine weitere wichtige Strategie ist die „Konversion“. Sie bezeichnet das Übertragen der digitalen Information in analoge Form auf einen geeigneten Datenträger wie Mikrofilm oder Papier. Dabei wird aus der Information, die in einem binären Code verschlüsselt ist, ein mit dem menschlichen Auge lesbares Bild, z.B. digitale Information wird als Bild auf

Mikrofilm ausbelichtet. Zur späteren Nutzung am Computer kann dieses Bild mit einem entsprechenden Lesegerät redigitalisiert werden.

Vorteile der Konversion sind zum einen, dass die zur späteren Interpretierbarkeit unbedingt notwendige Einheit von Metadaten und Primärdaten (d.h. das digitale Objekt selbst) leichter erreicht wird; man schreibt die Metadaten zu den Objekten auf den Film und muss, um die Verknüpfung zu gewährleisten, keinen großen Aufwand treiben wie bei rein digitalen Erhaltungsstrategien. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Daten nicht so leicht manipulierbar sind wie *Bitstreams* und die Haltbarkeit des analogen Trägermaterials.

c) Emulation

Die Strategie der Emulation³⁶ (lat. *aemulator* = Nacheiferer) verwendet ein Programm, den Emulator, das auf einem aktuellen Computer die historische Hard- und Softwareumgebung nachbildet, um die Programme und die Information, die früher in dieser Umgebung angezeigt wurden, wieder darzustellen. Häufig werden Emulatoren für die Nachbildung älterer Videospiele eingesetzt, um sie auf einem aktuellen Computer benutzen zu können.

In der digitalen Langzeitarchivierung wird die Emulation noch nicht in größerem Umfang verwendet. Archiviert man als Vorbereitung auf die Emulation neben dem eigentlichen zu archivierenden Objekt und den Metadaten auch die zugehörige Visualisierungssoftware in einer sogenannten „Kapsel“, hat man zwar alles, was man für eine spätere Nutzung braucht, als Einheit archiviert, weiß aber noch nicht, ob die Software in zukünftigen Betriebssystemumgebungen läuft. Die Archivobjekte werden dadurch sehr groß. Andererseits muss man bei der Emulation im Unterschied zur Migration die migrierten Versionen des Objektes nicht mit archivieren. Ein weiterer Vorteil der Emulation ist, dass die Objekte selbst nicht verändert werden, stattdessen müssen die Emulatoren der jeweiligen Hardware angepasst sein.

³⁶ Siehe: Sammeln, Tipps und Tricks, Was sind Emulatoren? Auf der Homepage von Boris Jakubaschk, mit freundlicher Genehmigung: <http://www.homecomputermuseum.de/>, Zugriff am 17.7.2010.
AEP Emulation Page: <http://www.aep-emu.de/>, Zugriff am 17.7.2010.
Artikel „Emulation“ von S. Funk in: nestor 2009, Kap. 8:16; http://nestor.sub.uni-goettingen.de/handbuch/artikel/nestor_handbuch_artikel_16.pdf, Zugriff am 17.7.2010.

d) Computermuseum

Das Computermuseum (auch *hardware-preservation* genannt) strebt die Erhaltung der überholten Hard- und Software, der Betriebssysteme oder Applikationen an. Als sinnvolle Langzeitstrategie wird das Computermuseum, die Konservierung der Hardware, nicht in Betracht gezogen. Es kann nützlich sein, für eine Übergangsphase Informationsobjekte mitsamt ihrer Hard- und Software vorzuhalten, wenn es z.B. für die Migration zu spät und eine Emulation nicht möglich ist. Dies passiert meist dann, wenn die Nutzung der Objekte dadurch gefährdet ist, dass diese technologisch obsolet geworden sind.

1.5.1 Fazit

Fasst man die Gefahren für die Langzeitsicherung der digitalen Daten einmal zusammen, so sind dies: Proprietäre Systeme und Formate, die Konvertieren und Migrieren beschränken oder nicht erlauben und damit die zukünftige Lesbarkeit gefährden, Wechsel von Datenformaten, Datenträgern und Dateisystemen, physische Haltbarkeit der Datenträger, Manipulation der Daten, Wiederauffindbarkeit der Daten.

1.6 Metadaten

Für die Langzeitarchivierung ist es wichtig, Metadatenstandards einzuhalten. Metadaten sind die Daten über die Daten, die es zu archivieren gilt. Ohne bestimmte Informationen zu den Daten zu erhalten, würde zukünftigen Nutzern und Nutzerinnen einerseits die Bedeutung/der Wert des digitalen Objektes verloren gehen, andererseits braucht man, um die Daten zu erhalten, Informationen zur technischen Umgebung, wie z.B. zum Format und zur verwendeten Software.

Unterscheiden kann man zwischen drei Arten von Metadaten:³⁷

1. Inhaltliche, beschreibende Metadaten
2. Technische oder Erhaltungs-Metadaten
3. Verwaltende, rechtliche Metadaten

1. Inhaltliche, beschreibende Metadaten sind auf den Inhalt des digitalen Objektes bezogen. Sie würden bei den computertomographischen Untersuchungen der Blöcke z.B. folgende Angaben enthalten: Ort, Projekt, Grabungsnummer, Zeitstellung, Typ der archäologischen Objekte, Fundnummer, Grabnummer, Befundnummer, Objektnummer, Messparameter etc.

2. Technische oder Erhaltungs-Metadaten sind auf die technische Umgebung bezogen und werden explizit für die Langzeitarchivierung benötigt. Sie enthalten Informationen zum Dateiformat und zur Version sowie zu Kompressionsverfahren, Auflösung, Codec³⁸ u.a. formatspezifischen Eigenschaften, sowie zu Dateigröße, Dateiname, Erstellungsprogramm, Anzeige- oder Bearbeitungsprogramm, Träger. Des Weiteren enthalten technische Metadaten Angaben zum Umfang: Anzahl der Dateien, Ordner, zur Struktur: z.B. dreidimensionaler Volumendatensatz, zum Datum: Erstellungsdatum, letztes Speicherdatum, Übernahmedatum, zur Protokollierung der Historie: Veränderungen vor und nach Übernahme, Migration, Hard- und Software etc., zur Prüfung der Vollständigkeit: Prüfsumme/Hashwert.

3. Verwaltende, rechtliche Metadaten

Sie enthalten Informationen zu den Rechten: Zugriffsrechte und -einschränkungen, Eigentümer des digitalen Objektes, Urheber, Verwertung, sowie zur Identifizierung des digitalen Objektes: eine automatisch erstellte systemeigene ID-Nummer.

Wenn ein Objekt archiviert wird, sollte es einen eindeutigen, permanenten Identifikator, den sogenannten *persistent identifier*, haben, der das Objekt, unabhängig vom Speicherort und über Systemwechsel hinweg, zuordnet und nachweisbar macht.

³⁷ Siehe Ch. Keitel, U. Gutzmann, U. Kamp, A. Scheiding, „Metadatenkatalog für die Übernahme und Erhaltung von digitalen Daten im Archiv“ vom Arbeitskreis „Elektronische Archivierung“ in der Vereinigung deutscher Wirtschaftsarchivare e.V. (VdW), S. 3-4; http://www.wirtschaftsarchive.de/akea/m_handreichung.htm, Zugriff am 17.8.2010. Maier 2009, S. 39.

³⁸ „Codec“ ist ein Kunstwort, zusammengesetzt aus den englischen Wörtern *coder* und *decoder*. Es bezeichnet ein Verfahren im Audio-/Videobereich, dass Daten oder Signale digital kodiert.

Für elektronische Ressourcen ist ein *persistent identifier* ein Mittel, die Ressource dauerhaft und stabil zu adressieren und zu identifizieren. Zudem ermöglicht der *identifier*, die zu einem Objekt zugehörigen Metadaten mit diesem zu verknüpfen. Die üblichen Internetadressen URL (*Uniform Resource Locators*) eignen sich zur stabilen Referenzierung nicht, da sie sich oft ändern³⁹. Die Deutsche Nationalbibliothek bietet die URN – *Uniform Resource Name* – Strategie an, beispielsweise zur dauerhaften Adressierung auf Online-Kataloge.

Für den Bereich der digitalen 3D-Objekte fehlt bislang ein Metadatenstandard. Unter den Metadaten für 3D-Objekte müssen sich alle Text-Informationen befinden, die für eine spätere Ansicht, Nutzung oder Bearbeitung nötig sind. Zu jeder Konservierungsstrategie gehört die Erfassung von Metadaten, da ohne sie das Managen des heutigen Wissens unmöglich wäre. Die beiden grundsätzlichen Fragen dabei sind, welche Informationen für zukünftige Nutzer der Daten unerlässlich sind und in welches Format diese Informationen übertragen werden sollten.⁴⁰

1.7 3D-Dateiformate

Die folgende Tabelle dient als Übersicht über 3D-Dateiformate. Empfohlene Dateiformate für die langfristige Verwendung von 3D-Daten, die als Austauschformate in Betracht kommen, sind die drei zuerst aufgeführten, offenen Formate: die standardisierten Formate X3D⁴¹ und U3D⁴² und COLLADA.⁴³ 3D-PDF und 3DXML sind proprietäre Formate. VRML ist ein offenes, standardisiertes Format, das inzwischen von X3D abgelöst wurde.

³⁹ Mehr Informationen unter: <http://www.persistent-identifier.de/?link=202>, Eindeutige Bezeichner für digitale Inhalte, Zugriff am 21.7.2010.

⁴⁰ Siehe dazu: J. Doyle, H. Viktor, E. Paquet, A Metadata Framework for Long Term Digital Preservation of 3D Data, in: International Journal of Information Studies, Vol. 1, Issue 3, 2009, 165-171.

⁴¹ X3D wurde vom World Wide Web Consortium W3C entwickelt, <http://www.w3.org/>, Zugriff am 25.6.2010.

⁴² Das erweiterbare U3D-Format wird unterstützt von Adobe Acrobat, Adobe Reader ab Version 7, Adobe Photoshop CS3, Adobe FrameMaker ab Version 8 und pdfLaTeX. Zu U3D: http://de.wikipedia.org/wiki/Universal_3D; http://www.adobe.com/de/products/acrobat/pdfs/2005_10_U3D_Whitepaper_d_3D.pdf, Zugriffe am 12.8.2010. Quellen zu U3D: Studienarbeit von J. Lorenz, 3D Visualisierungsformate im Kontext des Lifecycle Managements, Fachbereich Wirtschaftsingenieurswesen, Hochschule Offenburg, o.J., Kap. 2.4; <http://www.only-open-source.com/dokus/3d-visualisierungsformate.html>, Zugriff am 1.8.2010. U3D-Bibliothek: <http://sourceforge.net/projects/u3d/>, Zugriff am 8.8.2010.

⁴³ X3D und COLLADA werden in den DFG-Praxisregeln „Digitalisierung“ (Stand: April 2009) empfohlen: Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wissenschaftliche Literaturversorgungs- und Informationssysteme (LIS): DFG-Praxisregeln „Digitalisierung“, 2009, S. 26; <http://www.dfg.de/lis>, http://www.dfg.de/download/pdf/foerderung/programme/lis/praxisregeln_digitalisierung.pdf, Zugriff am 25.6.2010.

STL ist eine Schnittstelle zur Übertragung dreidimensionaler Oberflächenmodelle, z.B. aus RCT-Messungen.

Abb. 1 Tabelle zu 3D-Formaten.

Format	Entwickler	Entstehungs-Datum	Beschreibung	Spezifikation
X3D ⁴⁴ Extensible 3D .x3d .x3dv (gemäß ISO-Standard, classic-encoding) .x3db (ISO- Entwurf für X3D-Daten in einer Binärdatei, binary-encoding)	W3C- Konsortium	2001	Beschreibungssprache für 3D-Modelle, die in einem Web-Browser angezeigt werden können, Nachfolger des VRML- Standards, basiert auf XML, offizieller Standard für 3D-Inhalte im Internet, seit 2004 spezifiziert als ISO- Standard: ISO/IEC 19775-1:2004 ⁴⁵ .	Offen
COLLADA ⁴⁶ COLLABorative Design Activity .dae	KHRONOS Group	2004	Von Google Earth unterstützt, basiert auf XML und soll sich als offenes Austauschformat zwischen 3D- Programmen etablieren.	Offen
U3D Universal 3D .u3d	EMCA (European Computer Manufacturers Association)	2005	Standardisiert als ECMA- 363, vom 3D Industry Forum, dem auch Adobe angehört, als Standard für 3D-Daten aller Art.	Offen

⁴⁴ Quellen zu X3D: <http://de.wikipedia.org/wiki/X3D>, Zugriff am 8.8.2010.

J. H. Kloss, X3D. Programmierung interaktiver 3D-Anwendungen für das Internet, München, Addison-Wesley, 2010.

⁴⁵ ISO-Norm: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=33913, Zugriff am 1.8.2010.

⁴⁶ Literatur zum COLLADA-Dateiformat: R. Arnaud, M. C. Barnes: *Collada, Sealing the gulf of 3D digital content creation*, 2006, A. K. Peters, Massachusetts. [http://de.wikipedia.org/wiki/Collada_\(Speicherformat\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Collada_(Speicherformat)), Zugriff am 12.8.2010.

Format	Entwickler	Entstehungs-Datum	Beschreibung	Spezifikation
3D-PDF ⁴⁷	Adobe	2004	Im kostenlosen Adobe Reader ab Version 8 können 3D-Inhalte interaktiv in einem 3D-PDF dargestellt werden.	Das Copyright über die Spezifikation liegt bei Adobe
3DXML ⁴⁸	Dassault Systemes	Ohne Angabe	Verwendet wird ein XML-Container, ist nur in der Produktserie der Dassault Systemes implementiert, z.B. von der Software CATIA, d.h. 3DXML-Dateien können nur von diesen firmeneigenen Programmen richtig ausgelesen werden.	Die Lizenz liegt bei Dassault Systemes
VRML ⁴⁹ Virtual Reality Modeling Language .wrl .vrml	Silicon Graphics (SGI)	VRML Version 1.0 wurde 1995 damals noch unter dem Namen Virtual Reality Markup Language entwickelt	Für das Internet entwickelt, in für den Menschen lesbarer Form - ASCII oder UTF-8 - geschrieben, 1997 wurde die VRML-Version 2.0 im ISO-Standard VRML97-ISO 14772 festgeschrieben, von X3D abgelöst.	Offen
STL ⁵⁰ Surface Tessellation Language oder Standard Triangulation Language oder Standard Tessellation Language; stl	Herkunft unsicher	Ohne Angabe	Der Name bedeutet „Beschreibung der Oberfläche von 3D-Körpern anhand von Dreiecksfacetten“, STL bezeichnet eine Schnittstelle vieler CAD-Systeme, weit verbreitet; binär oder in ASCII-Code.	Ohne Angabe

⁴⁷ Zu 3D-PDF: http://en.wikipedia.org/wiki/Portable_Document_Format, Zugriff am 12.8.2010.

⁴⁸ Zu 3DXML: <http://en.wikipedia.org/wiki/3DXML>, Zugriff am 12.8.2010.

⁴⁹ Zu VRML: http://de.wikipedia.org/wiki/Virtual_Reality_Modeling_Language, Zugriff am 12.8.2010.

⁵⁰ Mit STL werden geometrische Informationen aus dreidimensionalen Datenmodellen, z.B. aus RCT-Messungen übertragen. Ein Problem gibt es bei Darstellung gekrümmter Oberflächen. Je geringer die Anzahl der Dreiecke, umso mehr weicht die Krümmung der Oberfläche vom echten Objekt ab. Zu STL: <http://de.wikipedia.org/wiki/STL-Schnittstelle>, Zugriff am 12.8.2010. *Format Specification* von STL: <http://www.ennex.com/~fabbers/StL.asp>, Zugriff am 12.8.2010.

2. DIE SITUATION IN DER ARCHÄOLOGISCHEN DENKMALPFLEGE

2.1 3D-RCT als Untersuchungsmethode von archäologischen Objekten

Am Landesamt für Denkmalpflege in Esslingen werden im Rahmen eines DFG-Projekts neue Strategien der Fundbearbeitung erprobt. Untersuchungsobjekt ist das frühmittelalterliche Reihengräberfeld von Lauchheim im Ostalbkreis, Baden-Württemberg, das mit 1308 freigelegten Bestattungen eines der größten und bedeutendsten Gräberfelder Mitteleuropas ist. Das Gräberfeld von Lauchheim, welches von 1986-1996 ausgegraben wurde, zeichnet außerdem der lange Belegungszeitraum aus, vom ausgehenden 5. bis zum Ende des 7. Jhs. n. Chr., und die nahe gelegene, auf 9 ha großflächig ausgegrabene zugehörige Siedlung. Dabei sind die Anzahl und die Qualität der Grabbeigaben aus Metall, Glas und Keramik, die sich im mineralreichen Boden gut erhalten haben, herausragend. Die Erhaltung des organischen Materials aus den Fundensembles ist aufgrund der teilweise in feuchtem Boden gelegenen Gräber sehr gut. Die Highlights der kostbaren, teilweise aus dem mediterranen Raum importierten Fundobjekte wie Schmuck, Kleiderstoffe oder Amulette wurden in Vorberichten und Ausstellungen präsentiert und lassen den Status und die Beziehungen der in Lauchheim bestatteten Bevölkerung erahnen⁵¹. Weitere Untersuchungen der oft sehr komplexen und zahlreichen Befunde versprechen Erkenntnisse zur sozialen, ökonomischen und demographischen Situation einer frühmittelalterlichen Siedlung.

Die vierteiligen Fundensembles aus verschiedenen vergesellschafteten Materialien⁵² wurden häufig in Blöcken aus Gips geborgen und im Landesamt für Denkmalpflege aufbewahrt. Die teilweise seit 22 Jahren bei -22° C eingelagerten Gipsblöcke warten auf ihre detaillierte Untersuchung und Auswertung. Die herkömmlichen Methoden der Befundaufnahme von Blockbergungen sind manuelles Freilegen, stratigraphische Auswertung und genaue Dokumentation. Mit den standardmäßig eingesetzten digitalen 2D-Röntgenaufnahmen können materialabhängig nicht alle Funde differenziert erfasst werden.

⁵¹ Vgl. J. Banck, Ein merowingerzeitlicher Baumsarg aus Lauchheim/Ostalbkreis. Zur Bergung und Dokumentation der Textilfunde. In: L. Bender Jorgensen/C. Rinaldo (Hrsg.), *Textiles in European Archaeology*, Report from the 6th NESAT-Symposium, 1996, *Gothenburg Archaeological Theses A1*, 1998, S. 115-124. I. Stork, Lauchheim im frühen Mittelalter, in: W. Menghin (Hrsg.), *Menschen, Zeiten, Räume. Archäologie in Deutschland*, Ausstellungskatalog Berlin 2003, Stuttgart, Theiss, 2002, S. 321-330.

⁵² Der archäologische Fachbegriff „vergesellschaftet“ bezeichnet verschiedene Objekte in einem geschlossenen Fundkomplex, die vermutlich gemeinsam niedergelegt wurden.

So treten die Konturen des dichten Metalls deutlich hervor, organische Funde können dagegen kaum von der sie umgebenden Erde unterschieden werden.⁵³



Abb. 2 Das zweidimensionale digitale Röntgenbild zeigt einen Block aus Lauchheim mit einem Gürtelgehänge. Die metallenen Funde wie Schere, Messer und Zierscheibe treten hervor.

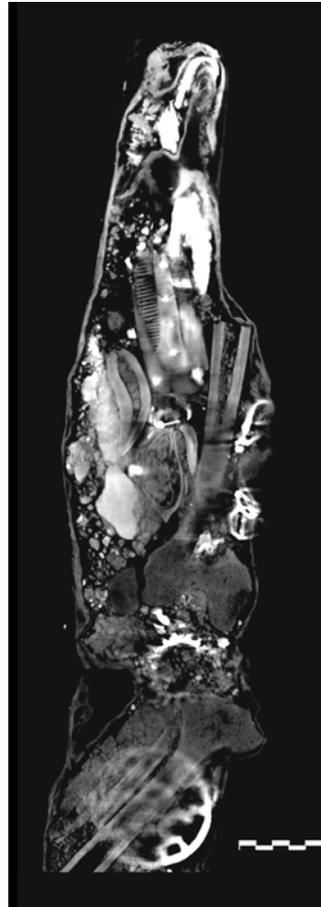


Abb. 3 In der computertomographischen Aufnahme desselben Blockes erkennt man außer dem Metall (weiß) zusätzlich eine Cypraea (Kaurischnecke), einen Bärenzahn, einen Kamm und die Knochen des Bestatteten.

⁵³ Vgl. N. Ebinger-Rist, J. Stelzner, C. Peek, Mehr Durchblick in kürzester Zeit. Befunddokumentation mit 3D-Computertomografie, in: M. Knaut, R. Schwab (Hrsg.), Archäologie im 21. Jahrhundert. Innovative Methoden - bahnbrechende Ergebnisse, in: Sonderheft 2010 PLUS der Zeitschrift *Archäologie in Deutschland*, 2010, S. 81. C. Peek, N. Ebinger-Rist, J. Stelzner, Zur Bearbeitung frühmittelalterlicher Grabfunde des Friedhofs von Lauchheim (Ostalbkreis). Möglichkeiten und Grenzen digitaler Untersuchungsmethoden, *Archäologisches Korrespondenzblatt* 39, Heft 4/2009, 2010, S.569.



Abb. 4 RCT-Aufnahme eines Messers mit anhaftendem organischen Material.

In der Pilotphase des DFG-Projektes wurden herkömmliche Untersuchungsmethoden mit neuen Technologien wie der RCT unter den Aspekten Aussagekraft und Informationsgewinn verglichen. Das Ergebnis des Pilotprojekts war, dass mit der 3D-RCT eine zeitlich verkürzte und in ihrer Aussagekraft gleichwertige Fundaufnahme und Dokumentation möglich ist.⁵⁴ Die Förderung des erfolgreichen Projektes wurde fortgesetzt. Mit den seit 2007 systematisch eingesetzten 3D-RCT wächst das Datenvolumen, das die Archäologische Denkmalpflege produziert, enorm an.

⁵⁴ Ebinger-Rist 2010a, S. 80-91.

2.1.1 Funktionsweise der RCT-Messung

Seit neuestem⁵⁵ steht der Archäologischen Denkmalpflege der industrielle Computertomograph phoenix|x-ray 1 450 der Firma GE Sensing & Inspection Technologies GmbH zu Messungen zur Verfügung.⁵⁶ Er steht im Forschungsinstitut für Edelmetalle und Metallchemie (fem) in Schwäbisch Gmünd.



Abb. 5 Computertomographiesystem phoenix|x-ray 1 450. Mit freundlicher Genehmigung von GE Sensing & Inspection Technologies GmbH.

Der wesentliche Unterschied solcher industrieller Computertomographen gegenüber Geräten, die in der Medizin eingesetzt werden, ist der, dass das Objekt/die Probe gedreht wird. Ein weiterer Unterschied ist die Beschleunigungsspannung, mit der schwerere Materialien wie z.B. Metall, durchdrungen werden können. Das Objekt befindet sich auf einem Drehteller, auf dem es um 360° gedreht und gleichzeitig von einem Röntgenstrahl durchdrungen wird. Dieser Röntgenstrahl trifft auf den gegenüberliegenden Flächendetektor, der die Schwächung der Strahlung beim Durchdringen des Objektes misst. Dabei nimmt der Flächendetektor zweidimensionale Projektionen des Objektes aus mehreren hundert Winkelpositionen auf, die Informationen über die Position und lokale

⁵⁵ Die Einweihung des neuen phoenix|x-ray-Computertomographen fand am 2. Juli 2010 im Forschungsinstitut für Edelmetalle und Metallchemie – fem statt. Das Landesamt für Denkmalpflege kann den Computertomographen zu Messungen von eigenen Objekten nutzen.

⁵⁶ Webseite der Firma: <http://www.phoenix-xray.com/de/index.php>, Zugriff am 17.8.2010.

Schwächung der Objekte enthalten. Aus diesen Projektionen wird mit Hilfe des Feltkamp-Algorithmus ein dreidimensionaler Volumendatensatz rekonstruiert. Der Vorteil des industriellen phoenix v|tome|x 1 450 liegt in der enormen lateralen Auflösung bis in den Mikrometerbereich. Abhängig von der Größe und Dicke des Gipsblockes kann die tomographische Messung allein ein bis drei Stunden dauern.

2.1.2 Technische Umgebung

Werden Messungen an dem Computertomographen durchgeführt, entstehen die Ausgangsformate, die in Kapitel 2.1.3 beschrieben werden. Die Volumendatensätze gelangen auf einer Festplatte ins Landesamt für Denkmalpflege. Hier werden sie mit der Visualisierungssoftware VGStudio MAX auf folgenden zwei Computern bearbeitet und gespeichert:

1. Typ: Lenovo ThinkStation D20, 64 Bit

Arbeitsspeicher: 50 GB

Festplatte: 1,36 TB

Betriebssystem: Windows 7

2. Typ: Dell Precision T7500, 64 Bit

Arbeitsspeicher: 32 GB

Festplatten: 1,99 TB und 1,36 TB

Betriebssystem: Windows Vista

Zusätzlich werden die Bilddaten momentan auf zwei externen Festplatten von Seagate FreeAgent Xtreme und My Book Essential Edition mit je 1 TB Speicherplatz gesichert. Geplant ist die Spiegelung der 3D-Bilddaten wie auch der Textinformationen über die Objekte (Datenbank) auf den Serversystemen im Landesamt für Denkmalpflege, Esslingen, im Rechenzentrum der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg i.Br. und im Rechenzentrum der Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg.

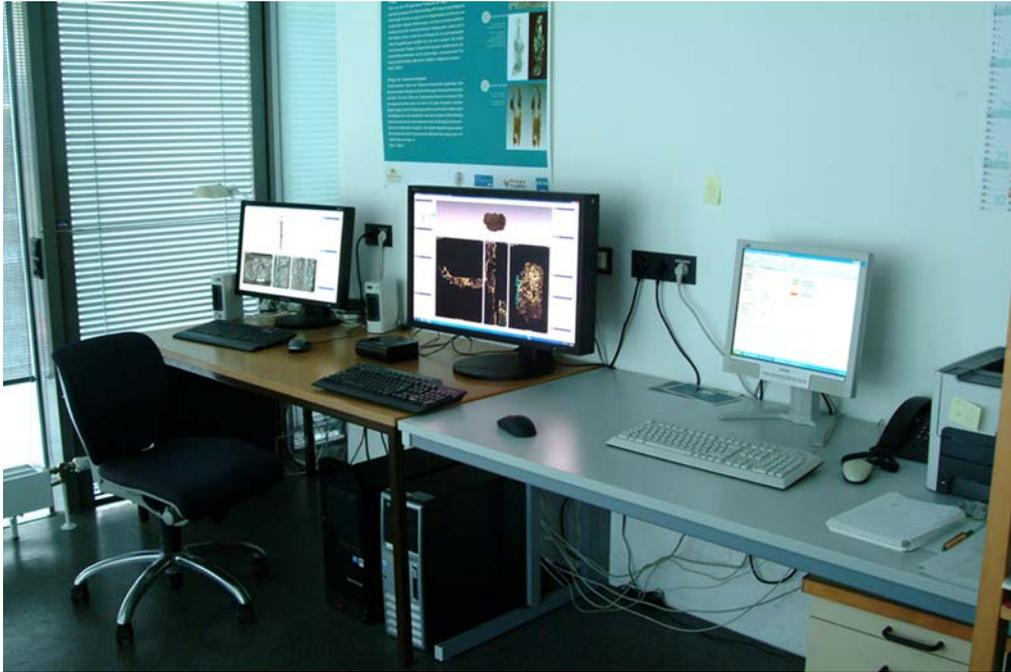


Abb. 6 Arbeitsplatz zur Bearbeitung der 3D-RCT-Bilddaten

2.1.3 Die Ausgangsformate TIF, VOL/RAW

Die Langzeitsicherung hängt wesentlich von den Dateiformaten und der Datenqualität ab, in denen die zu erhaltende Information vorliegt. Dateiformate kodieren die digitalen Daten eines Objektes, ein Anwendungsprogramm verarbeitet diese Daten und zeigt sie an. Man kann Dateiformate unterscheiden nach Formatspezifikation (offen oder proprietär), der möglichen oder unmöglichen Einbettung anderer Dateien (Containerdateien), dem Verwendungszweck (z.B. Grafikformat), komprimierte oder unkomprimierte Formate.

TIF

Im Fall des Lauchheim-Projektes werden die archäologischen Objekte, derzeit hauptsächlich Blöcke, im Röntgen-Computertomographen gemessen. Dabei entstehen Projektionsbilder als 2D-TIF-Datensätze (*Tagged Image File Format*). Die Datensätze ergeben in diesem Stadium noch kein 3D-Abbild der Objekte.

Betrachtet werden im Folgenden die Vor- und Nachteile der Archivierung der 2D-TIF-Projektionsbilder des im RCT gemessenen Objektes.

Diese Bilder sind keine dreidimensionalen Datensätze. Erst mit Hilfe der Rekonstruktionssoftware entstehen echte Volumendatensätze. Das reine TIF-Format als sogenanntes Baseline-TIF ist für die Langzeitarchivierung geeignet. Unter Baseline-TIF versteht man die Untermenge gültiger TIF-Dateien, die mit jedem Programm, das TIF-Dateien lesen kann, verarbeitet werden können. Das Baseline-TIF ist erweiterbar durch *Extensions*, beispielsweise die Einbindung von Metadaten in die *Datei-Header*. Es erlaubt darüber hinaus die Speicherung in geräteunabhängige Farbräume und die Einbettung von ICC-Profilen. Wenn der RCT-Hersteller das Baseline-TIF für die 2D-Projektionsbilder verwendet, wie im Falle des Computertomographen phoenix v|tome|x 1 450, spricht grundsätzlich nichts dagegen, diese langfristig aufzubewahren, da das Dateiformat für diesen Zweck empfehlenswert ist.

Warum ist das TIF-Format für die Langzeitarchivierung geeignet? Für die Archivierung der 2D-TIF-Projektionsbilder spricht, dass TIF ein Standarddateiformat ist, die Spezifikation offen zugänglich und lizenzkostenfrei ist, jeder Software-Hersteller auf der Grundlage der Spezifikation ein Programm erstellen kann, das TIF verarbeiten kann, und weil TIF hohe Farbtiefen erlaubt, weit verbreitet ist und von sehr vielen Programmen interpretiert werden kann. Bei der Archivierung von TIF-Dateien sollte darauf geachtet werden, auf Kompression zu verzichten und keine anderen Formate oder mehrere Bilder in einem TIF zu speichern.

Allerdings gibt es auch Nachteile aus Gründen der Praktikabilität. Man erhält die 3D-Daten zwar unrekonstruiert, aber mit der Möglichkeit, daraus jederzeit einen 3D-Datensatz zu erstellen. Es ist davon auszugehen, dass es, solange RCT-Anlagen im Einsatz sind, entsprechende Rekonstruktionssoftware geben wird, die aus zweidimensionalen, unrekonstruierten TIF-Bildern dreidimensionale Datensätze erstellen kann. Dennoch bedeutet es einen zusätzlichen Aufwand für zukünftige Nutzer, die aus den Projektionsbildern erst mit einer Rekonstruktionssoftware einen 3D-Datensatz erstellen müssten. Ein wesentlicher Nachteil ist, dass die 2D-Projektionsbilder einen enormen Speicherplatz benötigen. Da aber die Preise für Rechnerleistung und Speicherkapazität derzeit kontinuierlich sinken, dürfte dieses Problem beherrschbar sein.

VOL/RAW

Aus den TIF-Datensätzen werden mit Hilfe der Rekonstruktionssoftware `datos|x` Volumendateien als VOL-Daten rekonstruiert. Ein gemessenes Objekt hat als VOL-Volumendatei etwa die Größe von 8-10 GB, VOL-Dateien sind folglich ziemlich groß. VOL-Dateien bezeichnen ein dreidimensionales Bild, welches aus einer Menge von Voxeln⁵⁷ besteht. Das VOL-Format speichert den rekonstruierten Volumendatensatz ab.

VOL-Dateien werden auch als rekonstruierte RAW-Dateien (Rohdateien) bezeichnet. Innerhalb der VOL-Datei befinden sich die Schnittbilder des Objektes als BMP-Dateien (Bitmap). VOL-Dateien haben im Sinne der Langzeitarchivierung den Nachteil, dass es große Datenmengen sind, die einen großen Speicherplatz benötigen. Dennoch sind sie kleiner als die originalen TIF-Projektionsbilder.

Ein weiterer Vorteil ist, dass sie als Rohdaten sämtliche Details der Daten enthalten. Der Nachteil ist, dass man, um ihren Inhalt darzustellen und sie zu konvertieren, spezielle Software benötigt. Archiviert man nur die VOL-Dateien, muss man ebenfalls die Programme archivieren, die diese Daten auslesen können, und dafür sorgen, dass diese Programme in einer zukünftigen Umgebung lauffähig bleiben.

PNG

Ein weiteres zweidimensionales Grafikformat neben TIF kommt für die Langzeitarchivierung von Bilddaten in Frage, nämlich das PNG-Format (Portable Network Graphics). Es wurde für den Einsatz im Internet entwickelt und ist auch für animierte Grafiken geeignet. Das Internetkonsortium W3C hat es als Formatstandard anerkannt. Die Vorteile sind, dass man damit verlustfrei komprimieren kann und eine hohe Bildqualität möglich ist, ein Nachteil ist der geringe Verbreitungsgrad.

⁵⁷ Ein Voxel ist das dreidimensionale Pendant zum Pixel. Es ist die kleinste Einheit eines Volumendatensatzes und wird anhand der x,y,z-Achsen definiert. Eine 3D-Aufnahme setzt sich aus einzelnen dreidimensionalen Voxeln zusammen. Je kleiner die Kantenlänge eines Voxels, umso höher ist die Auflösung der Messung und damit der Informationsgehalt der computertomographischen Messung und des Volumendatensatzes.

2.1.4 Workflow: Bildbearbeitung

Mit der Rekonstruktionssoftware *datos|x* von *phoenix|x-ray* GE S&I wird das dreidimensionale Volumen berechnet. Darin sind die Materialien des gemessenen Gipsblockes in unterschiedlichen Grauwerten dargestellt. Zur Visualisierung des Messergebnisses wird die Software *VGStudio MAX* der Firma *Volume Graphics* eingesetzt. Mit der Software hat der Bearbeiter die Möglichkeit, die Größe der einzelnen, im Block enthaltenen Objekte zu verändern oder den Block in verschiedenen Ebenen zu drehen, virtuell „aufzuschneiden“ oder zu „durchfliegen“, um sich ein genaues Bild von den Objekten und der erhaltenen Stratigraphie zu machen. Die Software stellt das Objekt außerdem in drei virtuellen Schnitten (axial, frontal und sagittal) dar, die einzeln als TIF-Bilder gespeichert werden, um die Lage und Position der Objekte zueinander nachvollziehbar zu machen.



Abb. 7 a⁵⁸ Dreidimensionales Abbild der im Lauchheimer Gipsblock enthaltenen Objekte. Deutlich lassen sich sowohl Metallobjekte wie Eisenschere, -messer und bronzene Zierscheibe als auch organische Funde wie Kamm, Bärenzahn und *Cypraea* erkennen.

⁵⁸ Siehe auch den Film unter: <http://www.denkmalpflege-bw.de/denkmaele/filme/ziergehaenge-wmv.html>, Zugriff am 12.4.2011.

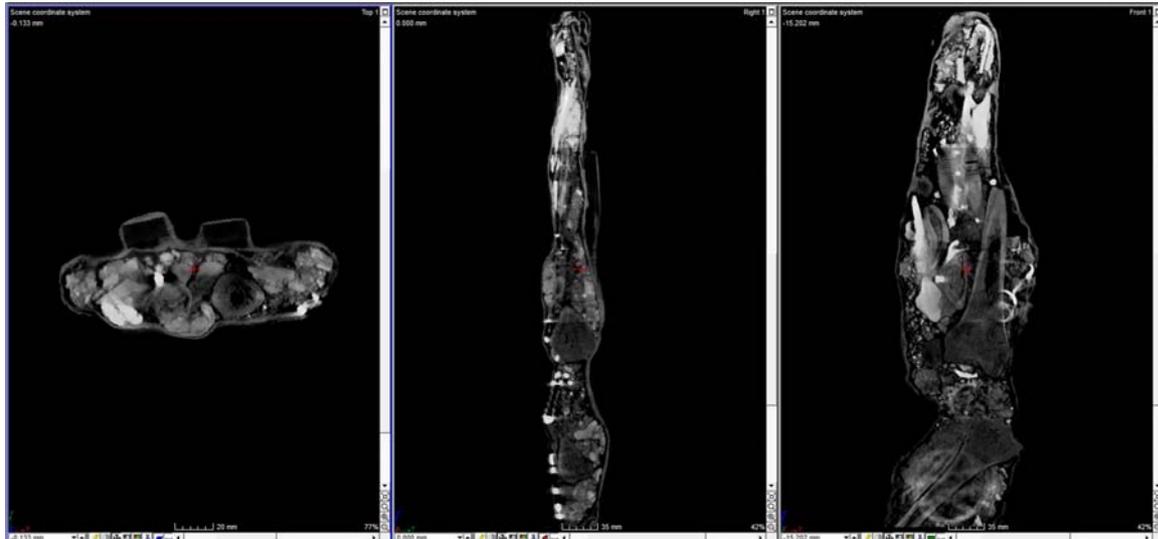


Abb. 7 b Die virtuellen Schnitte durch den Block.

2.1.5 Die Bearbeitungsformate VGI/VGL

Das Dateiformat, in dem die einzelnen Bearbeitungsschritte des Gesamtdatensatzes wie *mergen*, Segmentieren, Kolorieren, Messen vorgenommen werden, ist VGI oder VGL. VGI ist das Format der früheren Versionen der Software VGStudio MAX, die neuen Programmversionen geben inzwischen das Format VGL aus. Die neueren Programmversionen sind abwärtskompatibel, d.h. sie können das frühere Dateiformat VGI erkennen und lesen. Umgekehrt ist ein Datensatz, der mit der neueren Softwareversion erstellt wurde, nicht von älteren Versionen des Programms lesbar. Immerhin bleiben die älteren Dateiformate mit den neuen Versionen nutzbar, dennoch ist fraglich, ob die Abwärtskompatibilität bei zunehmender zeitlicher Entfernung nicht doch gefährdet ist.

VGI- und VGL-Dateien enthalten keine Voxeldaten. Die Voxeldaten verschiedenster Formate, die sich je nach CT-Hersteller unterscheiden können, werden direkt importiert und referenziert.⁵⁹ Somit werden die Ausgangsdaten nicht verdoppelt, sondern referenziert. Der Ausgangsdatsatz wird durch das Bearbeiten in der Visualisierungssoftware nicht verändert, es sei denn, man verändert die Grauwerte durch den Einsatz von Filtern oder verwendet explizit die Tools „*create new volume*“ oder „*modify data*“. Die jeweiligen

⁵⁹ Siehe auf Abb. 9 welche Importformate in VGStudio MAX 2.1 möglich sind.

Visualisierungseinstellungen, Analyseergebnisse etc., die mit VGStudio MAX an dem CT-Datensatz durchgeführt werden, sind in den VGI- und VGL-Dateien separat enthalten, so dass sie zu einem späteren Zeitpunkt neu geladen werden können. Angezeigt werden kann der Bearbeitungszustand des 3D-Objektes nur, wenn der Messdatensatz, d.h. in diesem Fall die VOL/RAW-Datei, eine VGL-Datei und der zugehörige *vg-project*-Ordner vorliegen.

Die VGL-Datei referenziert auf den Messdatensatz und enthält alle in VGStudio MAX durchgeführten Einstellungen, wie Segmentieren, Kolorieren in Form von komprimierten XML-Dateien. Im *vg-project*-Ordner sind Hilfsdateien wie z.B. Masken abgespeichert, die sich in Textdateien nicht gut anzeigen lassen.



Abb. 8 Exportformate.



Abb. 9 Importformate.

Auf Abbildung 8 und 9 sieht man, welche Export- und Importformate in VGStudio MAX 2.1 möglich sind. Die Formate VGI/VGL lassen sich ebenfalls als DICOM exportieren.

Obwohl für den Export als DICOM im Sinne der langfristigen Nutzbarkeit die weite Verbreitung spricht, kann das DICOM-Format Probleme beim Auslesen bereiten, weil der DICOM-Standard von den Geräteherstellern nicht einheitlich implementiert wird (siehe Kap. 1.3).

3. ZUR ARCHIVIERUNG VON 3D-INHALTEN

3.1 Anforderungen an eine Langzeitsicherung von 3D-RCT-Daten

3.1.1 Proprietäre Formate

Proprietäre Formate sind für die digitale Archivierung grundsätzlich nicht empfehlenswert. Proprietäre oder geschlossen spezifizierte Formate bezeichnen Formate, die einer Firma gehören. Zumeist sind sie nicht öffentlich spezifiziert, d.h. die Darstellungsweise der Daten in einem Format ist nicht transparent. Der Quellcode oder *source code* ist nicht frei und vollständig verfügbar. Die Nutzung kann zudem lizenzkostenabhängig sein. Es gibt auch Softwarefirmen, die Formate mit einer öffentlichen Spezifikation entwickeln. Viele Firmen binden aber Kunden an sich, indem sie Formate bereitstellen, die an ihre Anwendungen geknüpft sind, mit der Folge, dass nur derjenige, der die zugehörige Software kauft, die Daten auch korrekt und vollständig auslesen und nutzen kann. Offene Formate sind demgegenüber Formate, deren vollständige Spezifikation als *open source* öffentlich verfügbar ist. Die Regeln der Formatierung und/oder der Modus der Darstellung sind transparent und der Austausch zwischen verschiedenen Anwenderprogrammen ist dadurch ermöglicht. Für die langfristige Nutzbarkeit ist es wichtig, Daten in einem Format zu erhalten, dessen Formatspezifikation bekannt ist, so dass man sie mit archivieren kann und die Inhalte dadurch, ggf. indem man ein Programm dafür schreibt, noch nach langer Zeit richtig interpretieren kann. Heutzutage ist es aufgrund der Vielfalt und Komplexität von Programmen und Formaten sinnvoll, den Datenaustausch zwischen verschiedenen Herstellern zu erleichtern. Zum Erhalt der langfristigen Darstellbarkeit wird daher der Einsatz nichtproprietärer, offener und gut dokumentierter Formate empfohlen.

3.1.2 Volume Graphics und VGStudio MAX

Die Software-Firma Volume Graphics Heidelberg unterstützt eine Migration der firmeneigenen Formate VGI/VGL (*Volume Graphics Info File / Volume Graphics File Format*) in andere, offen spezifizierte Formate nicht.

Wenn ein gemessener Datensatz in der Software VGStudio MAX geöffnet und damit etwas gemacht wird, wird der Datensatz unter der Bezeichnung VGI/VGL abgespeichert. Darin sind die Informationen enthalten, die alle Bearbeitungszustände des 3D-Datensatzes speichern und bei einem späteren Abruf wieder zur Verfügung stellen. Die VGI/VGL-Datei ist ausschließlich mit der Software VGStudio MAX vollständig les- und nutzbar. Dies ist ein Hindernis für den dauerhaften Erhalt der 3D-Inhalte in diesem Format und damit ein Nachteil der Software. Da Datenformate ebenso wie Verarbeitungssysteme einem rasanten technologischen Wandel unterliegen, sollten die Inhalte mittels Migration, Konversion oder Emulation dem aktuellen technologischen Stand angepasst werden (siehe Kapitel 1.5).

Der Nachteil für den Erhalt der Daten, der durch die fehlende Migrierbarkeit der firmeneigenen Formate entsteht, muss im Kontakt mit den 3D-Software-Herstellern klar geäußert werden.⁶⁰ Für den Erhalt der 3D-Daten müssen Eigenschaften zukünftiger geeigneter Formate definiert werden, die Informationen zur Formatspezifikation. Deshalb ist ein frühzeitiger Dialog mit Software-Herstellern nötig. Die florierende Firma Volume Graphics argumentiert, dass mit ihrer Monopolstellung und der daraus resultierenden weiten Verbreitung der firmeneigenen Formate ein zukünftiger Software-Nachfolger zumindest den Import von VGI/VGL-Dateien anbieten würde, schon aus rein ökonomischen Interessen. Damit wäre die Nutzung der Formate weiterhin gewährleistet. Vorteilhaft ist, dass die Firma unbefristete Lizenzen vergibt, d.h. wer einmal die Lizenz für das Programm erworben hat, kann, auch wenn er spätere Programm-Versionen nicht kauft, weiterhin mit der Software arbeiten. Auf künftigen Hardwaregenerationen kann diese Software jedoch nicht mehr oder nur mit zusätzlicher Software (Emulatoren) ausgeführt werden.

⁶⁰ Möglicherweise haben Kunden diesen Ansatz noch nicht geäußert. Deshalb war es sinnvoll, dazu ein persönliches Gespräch am 19.5.2010 mit den Mitarbeitern der Firma Volume Graphics Heidelberg Dr.-Ing. Daniela Handl und Markus Woyde zu führen.

3.1.3 Zum Erhalt der 3D-Inhalte in VGI/VGL-Dateien

Die Firma Volume Graphics setzt ein proprietäres Verfahren ein, um die bei der Bearbeitung der Voxeldaten mit dem Programm VGStudio MAX entstehenden Metadaten zu speichern. Damit ist die Lesbarkeit der Daten ab dem Moment gefährdet, wenn das Betriebssystem oder das Programm nicht mehr weiterentwickelt werden. Das Ergebnis dieser Firmenpolitik ist bedauerlicherweise, dass die für die Langzeitsicherung der 3D-Daten notwendigen Schritte des Migrierens nicht ausgeführt werden können. Dadurch ist die Lesbarkeit und Nutzbarkeit der mit dieser Software bearbeiteten Daten zukünftig stark gefährdet. Die Vielseitigkeit der Bearbeitungsmöglichkeiten in VGStudio MAX ist einerseits ein großer Vorteil, für die Dateiformate VGI/VGL jedoch, mit denen genau diese Informationen abgespeichert werden, verhindert die Firma Volume Graphics eine entsprechende Formatmigration und damit den Erhalt der Funktionalitäten der 3D-Aufnahmen. Das bedeutet, dass genau der Bearbeitungszustand, der durch das spezielle 3D-Programm ermöglicht wird, gefährdet ist, da dieses Format unter Umständen nur mit dieser Software, mit bestimmten Programm-Versionen, auf bestimmten Computern, mit bestimmten Betriebssystemen lesbar bleibt. Da man davon ausgehen muss, dass sich Hard- und Software rasant weiterentwickeln, ist die Erhaltung dieser sehr speziellen Formate und ihrer nicht offen gelegten Format-Spezifikation, wenn überhaupt möglich, sehr aufwändig. Man müsste die zugehörige Umgebung gleich mit archivieren in der Hoffnung, diese lange lauffähig zu halten. Aber schon die physischen Zerfallsprozesse der Hardware sind unvermeidlich. Was bleibt, ist eine Strategie, die vorsieht, die 3D-Inhalte durch Datenträgermigration, Emulation, Konversion oder eben durch Formatmigration zu erhalten.

Aus diesen Gründen sollte die Firma Volume Graphics entweder die Format-Spezifikation inklusive Quellcode und Tools mindestens treuhänderisch in vertrauenswürdigen Archiven⁶¹ hinterlegen oder den Kunden einen Datei-Konverter anbieten, so dass jede/r, der mit diesen Formaten arbeitet, die VGI-/VGL-Dateien in andere, offene Formate migrieren kann.

⁶¹ Der Arbeitskreis "Vertrauenswürdige digitale Archive" hat kürzlich einen Norm-Entwurf DIN 31644 vorgelegt, der im DIN Normenausschuss "Schriftgutverwaltung und Langzeitverfügbarkeit digitaler Informationsobjekte" (NABD15) auf der Grundlage der nestor-Kriterien entwickelt wurde.

Standardformate erleichtern den Nutzern den Zugriff, indem sie Strukturen festlegen, die es ermöglichen, dass ein Format von vielen Programmen gelesen werden kann wie z.B. bei TIF oder PDF. Diese Formate sind lizenzkostenfrei nutzbar und weit verbreitet, sie werden vermutlich auch in vielen Jahren noch von Anzeigeprogrammen erkannt und richtig verarbeitet.

Der Wunsch nach einem standardisierten Austauschformat für 3D-Grafiken wird inzwischen häufig geäußert. Wünschenswert ist weiterhin das Bereitstellen eines Datei-Konverters von der Herstellerseite für komplexe 3D-Dateiformate in ein solches Austauschformat. Dies wäre zugleich auch die Voraussetzung dafür, dass ein solches 3D-Austauschformat weite Verbreitung findet. Entscheidend ist jedoch auch die Bereitschaft der 3D-Software-Hersteller, möglichst offene 3D-Formate zum Import und Export in ihren Programmen anzubieten.

3.2 Voraussetzungen für eine Langzeitsicherung von 3D-RCT-Daten

Jedem Bemühen zum Trotz wird die digitale Langzeitsicherung nie die perfekte Kopie mit all den Eigenschaften des digitalen Objektes samt Funktionalitäten und Ausstattung der Objektumgebung archivieren können. Das heißt, digitale Archivierung muss mit Verlusten oder einer Reduzierung der Eigenschaften des digitalen Objektes rechnen. Um die digitale Datensubstanz zu erhalten, sollten die digitalen Objekte von ihren ursprünglichen, heterogenen Datenträgern getrennt und durch technische Erhaltungsstrategien wie Migration oder Konversion für eine zukünftige Nutzung gesichert werden. Um die Daten nicht nur physisch zu erhalten, sondern um sie langfristig nutzbar zu halten, kann es nötig sein, sie zu verändern. Die Ausprägung des digitalen Objektes, in der es ursprünglich vorlag, kann zum Zwecke der Erhaltung der Benutzbarkeit von dem zukünftig zu archivierenden digitalen Objekt abweichen. Entscheidend ist daher, im Voraus festzulegen, welche Eigenschaften für den bearbeiteten Datensatz wesentlich sind. Diese Eigenschaften, im Folgenden als „signifikante Eigenschaften“ bezeichnet, sollen bei der Langzeitsicherung beachtet und idealerweise erhalten bleiben. Es sollte möglich sein, sie technisch auf verschiedene Weise anzeigbar und interpretierbar zugänglich zu machen, da dies die Wahrscheinlichkeit ihrer zukünftigen Lesbarkeit erhöht.

3.2.1 Signifikante Eigenschaften von 3D-RCT-Daten

Wie schon in Kapitel 1.4 bemerkt, wurde das Konzept von „*essence of a record*“ im Rahmen des *digital preservation projects* des Australischen Nationalarchivs (NAA) 2002 formuliert.⁶² In diesem Kapitel sollen die signifikanten Eigenschaften⁶³ der computertomographischen Bilddaten am Beispiel des Lauchheim-Projektes in einem Schema dargestellt und bewertet werden. Jeder Eigenschaft wird dabei ein Prozentanteil zugeordnet. Die Gewichtung der Eigenschaften des 3D-Inhaltes hängt davon ab, welche Eigenschaften von RestauratorInnen und ArchäologInnen in welchem Maß als signifikant erachtet werden. Die übergeordneten Anforderungen sind, dass die RCT-Messdaten und die Bearbeitungszustände des digitalen Objektes erhalten bleiben.

Bei den signifikanten Eigenschaften, die im Folgenden gemeint sind, geht es um die intellektuelle Absicht und Aussage des Informationsobjektes, die bei einer künftigen Migration der Daten erhalten werden soll. Es gibt natürlich noch andere Eigenschaften des Objektes, die im Rahmen einer Konservierungsstrategie signifikant sind, wie z.B. die technischen Eigenschaften, auch *representation properties* genannt.⁶⁴ Die *representation properties* berücksichtigen technische Aspekte wie das Format, die Kodierung, Algorithmen und die Hardware-Umgebung.

Die verschiedenen Dateiformate, in denen die 3D-Aufnahmen vorliegen, wurden in den Kapiteln 2.1.3, 2.1.5 und 3.1.2 unter dem Gesichtspunkt der Langzeitsicherung vorgestellt. Die technischen Objekteigenschaften unterscheiden sich deutlich von den hier besprochenen Eigenschaften, die für die inhaltliche Bedeutung signifikant sind.

⁶² Heslop 2002. Siehe Kap. 1.3, S. 13-15.

⁶³ Hedstrom 2002. Wilson 2007. Hockx-Yu 2008.

⁶⁴ Wilson 2007, S. 8.

3.2.2 Identifizieren der signifikanten Eigenschaften

Welches sind nun die Objekt-Eigenschaften, die als signifikant bezeichnet werden dürfen und die es prioritär zu erhalten gilt?

Das zu archivierende digitale Objekt soll die Eigenschaften des Volumendatensatzes beinhalten, die mit Hilfe der Visualisierungssoftware differenziert dargestellt werden können. Wünschenswert wäre ein offenes Zielformat, das sowohl den originalen Volumendatensatz der computertomographischen Messung enthält als auch die diversen Bearbeitungsstadien einer VGL-Datei.

Da der Erhalt der vollen Funktionsfähigkeit eines Dateiformats bei der Migration in ein anderes, archivgeeignetes Format zwar angestrebt, aber aufgrund der Komplexität interaktiver und dreidimensionaler Inhalte bislang nicht erreicht wird, soll eine Auswahl und Gewichtung der Eigenschaften die Wahl erleichtern, welche Verluste bei einer Migration tolerabel wären. Das Bewerten der signifikanten Eigenschaften soll die Anforderungen an ein solches Zielformat festhalten. Die Identifikation, Zuordnung und Bewertung der Haupteigenschaften erfolgte in Zusammenarbeit mit den Beteiligten des DFG-Projektes Lauchheim am Landesamt für Denkmalpflege (siehe das Schema auf Abb. 10).

Die Auswahl und Gewichtung der signifikanten Eigenschaften fällt für jede Institution und für jedes Vorhaben auf dem Weg zur digitalen Langzeitarchivierung sowie für die verschiedenen digitalen Daten anders aus, weil sich die Anforderungen unterscheiden. Durch das Bestimmen der inhaltlich signifikanten Eigenschaften der Objekte sollen die Anforderungen an ein Zielformat verdeutlicht und die Grundlage für eine Migration geschaffen werden.

Die Frage war, was aus der Sicht der Archäologin, des Archäologen und des Restaurators, die im Projekt mitarbeiten, mit dem Blick auf jetzige und künftige Nutzer die wichtigsten Eigenschaften der 3D-RCT-Datensätze für die Aussagekraft und die Auswertbarkeit sind.

Die signifikanten Eigenschaften digitaler Objekte können in fünf Kategorien unterteilt werden:⁶⁵ Inhalt, Verhalten, Kontext, Aussehen und Struktur.

Die wesentlichen Eigenschaften der 3D-RCT-Inhalte wurden diesen Kategorien zugeordnet. Die 3D-Aufnahme selbst wird der Kategorie Inhalt zugeordnet. Ebenso gehört das Laufbild, der Film, der vom gemessenen Objekt erstellt wird, zur Kategorie Inhalt.

In die Kategorie Verhalten fällt die Interaktivität, der Volumendatensatz ist drehbar, skalierbar, man kann ihn „durchblättern“, diese Eigenschaft zeichnet den dreidimensionalen Datensatz maßgeblich aus. In die Kategorie Kontext gehören die Fragen nach dem Wer, Wann und Warum, die zur computertomographischen Messung und damit zur Erstellung des Volumendatensatzes geführt haben. Unter den Kontext fallen inhaltliche, beschreibende Metadaten sowie die Dokumentation, z.B. Wer hat die Messung wann veranlasst? Von welchem Fundort, aus welchem Grab stammt das Objekt? Welche Objekte sind darin enthalten? Wer bearbeitet die 3D-Aufnahmen, schneidet die Filme? u.s.w. In die Kategorie Aussehen gehören die Farben des Hintergrundes, der Schrift, das Layout, in dem das Objekt dargestellt wird. Zur Kategorie Struktur gehören z.B. die Darstellung von virtuellen Schnitten des dreidimensionalen Objektes in drei Raumrichtungen (frontal, axial und sagittal).

Der Fokus liegt auf der 3D-Aufnahme selbst und somit dem dreidimensionalen Bilddatensatz mit den darin enthaltenen Informationen. Aus diesem Grund wurden der 3D-Aufnahme wiederum fünf Haupteigenschaften zugeschrieben. Dies sind erstens die Stratigraphie der im Block enthaltenen Objekte und damit ihre Lage und Position zueinander, zweitens die Objektform, d.h. die dreidimensionale Darstellung der äußeren Konturen des gemessenen Objektes, drittens die Grauwertverteilung, welche die unterschiedliche Dichte der gemessenen Materialien anzeigt. Dabei ist Luft im Tomogramm fast schwarz dargestellt, Metalle heben sich je nach Dichte grau bis hellgrau ab⁶⁶. Die vierte Eigenschaft ist die Voxelauflösung in Mikrometern, die fünfte die Farbgebung, die entsprechend der im Block enthaltenen, realen Objekte nachträgliche Einfärbung der freigestellten, dreidimensionalen Objekte.

⁶⁵ Vgl. Wilson 2007, S. 8. Becker 2007, Abb. 3.

⁶⁶ Siehe Abb. 3.

3.2.3 Bewerten der signifikanten Eigenschaften

Nachdem die Kollegin und die Kollegen die signifikanten Eigenschaften der 3D-Daten definiert und diesen Kategorien zugeordnet hatten, wurde die Bewertung dieser Eigenschaften vorgenommen. Zuerst widmeten wir uns den fünf Hauptkategorien. Um zu erkennen, welche dieser fünf Kategorien für das digitale Objekt die größte Aussagekraft hat, hat jeder der drei Mitarbeiter einzeln die Gewichtung einer jeden Eigenschaft in Prozent angegeben. Daraus wurde jeweils das Mittel errechnet und in das Schema (siehe Abbildung 10) übernommen. Die wichtigste Eigenschaft des digitalen Objektes ist der Inhalt / die 3D-Aufnahme mit 43,3 %. Die zweitwichtigste ist das Verhalten mit 36,7 %, zu dem die Wiedergabefähigkeit der Interaktivität des digitalen Objektes gehört, die es ermöglicht, einen dreidimensionalen Datensatz von allen Seiten und im „Durchflug“ auch im Inneren zu betrachten, eine Eigenschaft, die zweifelsohne essentiell für einen dreidimensionalen Datensatz ist. Der Kontext gibt mit 10 % die drittwichtigste Eigenschaft an, denn ohne eine Dokumentation bleiben die Aussage und Absicht eines digitalen Objektes für zukünftige Nutzer nicht nachvollziehbar. Struktur und Aussehen wurden von den Mitarbeitern mit jeweils 5 % gewichtet. Die Möglichkeit der verschiedenen Schnittansichten und des Layouts, in dem das 3D-Objekt angezeigt wird, sind nach Meinung der Mitarbeiter nachrangig.

Für die dreidimensionale Aufnahme wurden wiederum die fünf signifikanten Eigenschaften durch Prozentanteile gewichtet. Die Auflösung im Mikrometerbereich und damit die Größe der Voxels und die Menge der enthaltenen Informationen ist mit 40 % für die Mitarbeiter die signifikanteste Eigenschaft. An zweiter Stelle kommt mit 26,7 % die Grauwertverteilung, aus der die Materialität der einzelnen Objekte ablesbar ist. Die drittwichtigste Eigenschaft ist nach Einschätzung der Mitarbeiter mit 21,7 % die Objektform, darauf folgt die Stratigraphie/Lage/Position mit 11,6 %. Die nachträgliche, digitale Einfärbung der Einzelobjekte wird mit 0 % als unerhebliche Objekt-Eigenschaft eingestuft. Angelehnt an das Modell für *essential object characteristics*⁶⁷ wurde folgendes Schema entwickelt, welches die Gewichtung der signifikanten Eigenschaften zeigt.

⁶⁷ Becker 2007, Abb. 3.

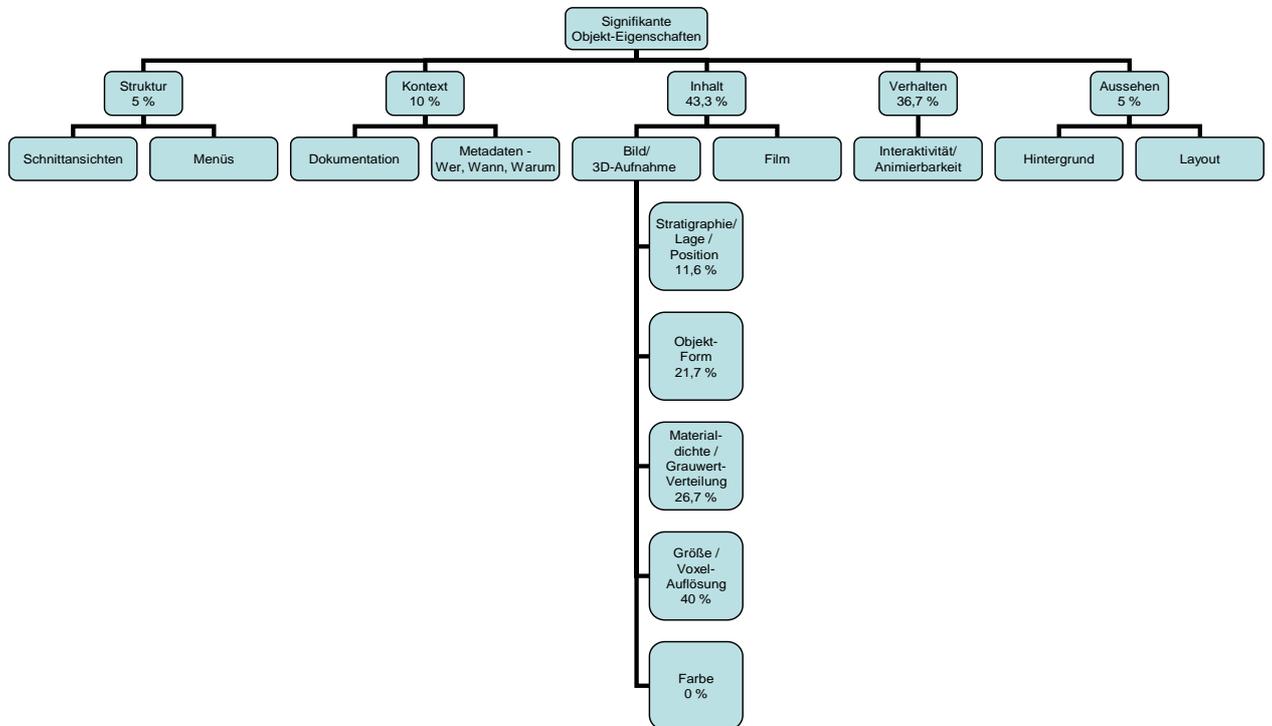


Abb. 10 Schema der signifikanten Objekt-Eigenschaften für 3D-Daten.

3.3 Möglichkeiten zur Dokumentation der 3D-Aufnahmen

Es ist im Voraus klar, dass allein mit den im Folgenden beschriebenen, derzeit möglichen Varianten zur Datenerhaltung der 3D-Aufnahmen keine digitale Langzeitarchivierung möglich ist. Zur Archivierung der digitalen Objekte gehört wesentlich ihre Funktionalität. Darum sind die in diesem Kapitel beschriebenen Wege keine Strategien zur Erhaltung, sie sollen lediglich die offenen Wege aufzeigen, die erstellten 3D-Daten zu dokumentieren. Aus den Tabellen Abbildung 15 am Ende dieses Kapitels geht hervor, welche der signifikanten Eigenschaften bei den beschriebenen Dokumentationsarten erhalten bleiben. Die aufgezeigten Alternativen können den langfristigen Zugriff, die spätere Nutzung und die unveränderte Aussage/Bedeutung nicht in allen Bereichen gewährleisten. Dennoch soll hier am Beispiel der 3D-RCT-Bilddaten der Archäologischen Restaurierung gezeigt werden, welche Alternativen es im Moment gibt, um die 3D-Objekte und den

Wissensstand, den sie festhalten, zu erhalten. Die folgenden Beispiele zeigen deutlich, dass die Vor- und Nachteile des Datenerhaltes vom Ziel und Zweck abhängen, für die man das digitale Objekt bewahren möchte und welche seiner Eigenschaften für dieses Ziel und zu diesem Zweck nötig sind. Die zentrale Frage stellt sich hierbei erneut: Was und wofür will ich erhalten?

3.3.1 Erstellen eines 3D-PDF's mit dem offenen Format U3D

Das 3D-PDF-Format ist geeignet, 3D-Inhalte interaktiv darzustellen. Da Adobe auch das Konvertieren anderer Dokumententypen in PDF unterstützt, lassen sich Dokumente aus unterschiedlichen Quellen in PDF zusammenführen. Mit der Software Adobe Acrobat 9 Pro Extended lassen sich 3D-Inhalte aus vielen CAD-Programmen in ein 3D-PDF von Adobe konvertieren, der Erwerb der Software ist allerdings kostspielig. Es gibt aber einen zweiten Weg, um aus 3D-Modellen ein 3D-PDF zu erstellen, ohne dass Gebühren für Lizenzen oder Softwareanschaffung anfallen. Man kann ein 3D-Modell im U3D-Format in ein 3D-PDF einbinden. U3D (Universal 3D) wurde 2005 als „universeller Standard für dreidimensionale Daten aller Art“ entwickelt (siehe Kapitel 1.7, Abbildung 1, Tabelle zu 3D-Dateiformaten). Dazu muss man einen 3D-Inhalt in U3D konvertieren. Für diesen Schritt gibt es bereits Werkzeuge, das Programm MeshLab zum Beispiel. Es kann unter vielen Formaten, vor allem aus 3D-CAD-Systemen, auch die Formate VRML und STL einlesen. Bei der Volumenrekonstruktion mit der Rekonstruktionssoftware datos|x werden u.a. diese STL-Daten erzeugt. Eine Möglichkeit wäre es also, die STL-Daten des rekonstruierten 3D-Volumendatensatzes in MeshLab einzulesen und als U3D zu exportieren. Über die Software VGStudio MAX ist es ebenfalls möglich, Oberflächenmodelle in STL zu exportieren (*surface extraction - create triangle mesh / create closed surface*).

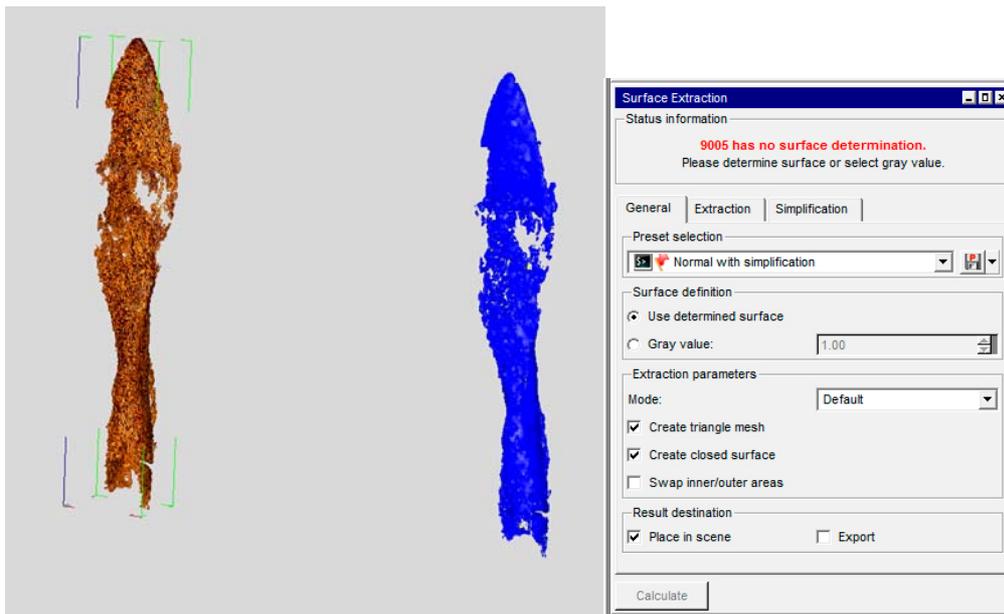


Abb. 11 *Surface extraction*: Aus der segmentierten, kolorierten Lanzenspitze links wird ein Oberflächenmodell rekonstruiert.

Aus dem U3D-Modell ließe sich dann ein interaktives 3D-PDF erzeugen. Ein Nachteil dabei ist, dass die Farben des 3D-Modells sowohl beim Export des Oberflächenmodells aus VGStudio MAX als auch in MeshLab beim Export von U3D verloren gehen. Zumindest wenn man ein bearbeitetes und im Nachhinein koloriertes 3D-Objekt als 3D-PDF darstellen möchte, ist der Verlust der Farbgebung ein Nachteil. Für die Darstellung des 3D-Volumendatensatzes als „Rohdatensatz“ wäre es kein Verlust, da das gemessene Objekt ausschließlich in Grauwerten dargestellt wird.

Ein weiterer Nachteil ist, dass die Darstellung von 3D-Modellen in 3D-PDF oberflächenbasiert ist. Bei einem 3D-Oberflächenmodell werden lediglich die Oberflächen eines Objektes anhand von Gitternetzlinien rekonstruiert, die Zwischenräume, meist Drei- oder Vielecke des Gitternetzes (engl. *mesh*) werden dann mit einer bestimmten Textur gefüllt. Die Oberfläche kann je nach Programm sehr differenziert gestaltet werden. Dennoch enthält ein Volumendatensatz ungleich mehr Informationen zum Objekt. Ein Volumendatensatz enthält sehr viele verschiedene Oberflächen, das Objekt wird anhand von sogenannten Punktwolken gespeichert und die jeweiligen *regions of interest* (ROI) können einzeln betrachtet, bearbeitet und abgespeichert werden.

Ein Oberflächenmodell, welches als 3D-PDF angeschaut werden kann, könnte zur Visualisierung eines Blockes ausreichen.

Allerdings gibt es bislang qualitative Mängel bei der Visualisierung von Oberflächenmodellen in 3D-PDF, und der Verlust der Farbgebung ist von Nachteil. Wenn ein 3D-Inhalt an Interessenten weitergeleitet werden soll, die den Block und die darin enthaltenen Objekte mitsamt ihrer Position und Stratigraphie betrachten möchten, könnte das 3D-PDF potentiell in Frage kommen, auch weil es im lizenzfreien, weltweit genutzten Acrobat Reader geöffnet werden kann. Wenn man einen 3D-Inhalt mitsamt seiner Funktionalitäten in Zukunft nutzbar und die Stadien seiner Entstehung und Bearbeitung bis zum Endergebnis nachvollziehbar halten möchte, ist das 3D-PDF kein geeignetes Format.

3.3.2 Filme in AVI *uncompressed*

Eine weitere Variante, welche die 3D-Funktionalität des Datensatzes mit einschließt, ist es, Filme vom 3D-Objekt zu erzeugen.

Der Export eines Filmes im unkomprimierten AVI-Containerformat ist in VGStudio MAX möglich. In VGStudio MAX kann ein Film vom Objekt gemacht werden, bei dem die Kamera auf einer auswählbaren Flugbahn (*trajectory* – in Abbildung 12 zu sehen) um das Objekt rotieren kann oder auch im „Durchflug“ durch den Block die Stratigraphien nachvollziehbar macht. Das Erzeugen eines Filmes ist ein zusätzlicher Arbeitsschritt. Mit der Archivierung des Filmes ist außerdem ein höherer Aufwand verbunden, gelingt aber die Archivierung, kann ein Großteil des bearbeiteten 3D-Inhaltes wieder abgerufen und angeschaut werden. Die Animierbarkeit geht zwar verloren, weil sich das Objekt nur auf der einmal zuvor ausgewählten Flugbahn bewegt, dennoch ist die dreidimensionale An-, Auf- oder Durchsicht möglich, die dem Betrachter den Block aus verschiedenen Blickwinkeln präsentiert.

Man könnte statt einem AVI *uncompressed* auch stapelweise die Schnittbilder eines Filmes aus VGStudio MAX exportieren und archivieren. Ein Nachteil davon ist, dass zukünftige Nutzer, wenn sie den Film anschauen möchten, erst aus den Schnittbildern einen Film erzeugen müssten. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Schnittbilder erheblich mehr Speicherplatz benötigen als AVI-Filme. Entscheidet man sich für das Archivieren von AVI-Filmen von den Blöcken, sollte man sich möglichst auf ein Format und eine Formatversion festlegen.

Einmal im Jahr sollte eine dieser Dateien stichprobenartig auf ihre Lauffähigkeit getestet werden, am besten mit einem handelsüblichen Player, um größeren Verlusten vorzubeugen.

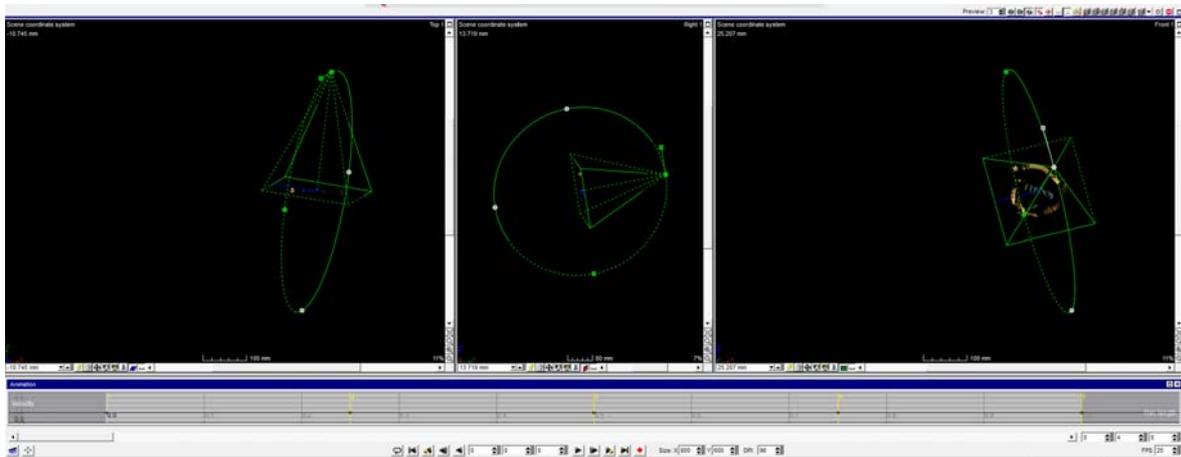


Abb. 12 Auswählen der Flugbahn, *trajectory*, zum Erstellen eines Filmes.

3.3.3 MyVGL-Viewer

Eine Möglichkeit, um 3D-Daten in Formaten wie VGI und VGL, anschauen zu können, ohne dass die Software erworben wird, ist die, sogenannte *Viewer* (Betrachter) vorzuhalten. Der aktuelle *Viewer* MyVGL kann auch die ältere Formatversion VGI anzeigen. Es müsste dann stets der passende, aktuellste *Viewer* der entsprechenden 3D-Software vorgehalten werden. Dies ist ein relativ hoher Aufwand. Den MyVGL-*Viewer* gibt es nicht kostenlos, eine jährliche Lizenzgebühr ist dafür fällig, wenn dieser weiterverteilt werden soll, diese ist jedoch im Vergleich zu den Anschaffungskosten für die Visualisierungssoftware sehr gering. Zudem ist die Nutzung des *Viewers* zeitlich nicht beschränkt. Damit erhält man sich die Möglichkeit, die Daten zumindest anschauen zu können. Im *Viewer* kann keine der Bearbeitungsfunktionalitäten durchgeführt werden. Dennoch sind die verschiedenen Visualisierungstools enthalten, wodurch verschiedene Ansichten des Objekts ausgewählt werden können, der Zustand wird aber nicht gespeichert. Einen *Viewer* vorzuhalten, ist keine Erhaltungsstrategie, es ist ein Mittel, um für kürzere Zeiträume die Möglichkeit der Anzeige und des Austausches von 3D-Objekten, die in proprietären Formaten gespeichert sind, zu ermöglichen. Ein *Viewer* kann die 3D-Bilder lediglich anzeigen, für eine spätere Nachbearbeitung und Nutzung ist er nicht geeignet.

3.3.4 2D-Ansichten

Eine weitere Möglichkeit ist das Erstellen von zweidimensionalen Ausdrucken in TIF oder PNG. Die freigestellten Funde können als 2D-Bilder entweder digital oder als Ausdruck auf Papier archiviert werden. Der zusätzliche Ausdruck auf Papier hält den bearbeiteten, visuellen Endzustand der Einzelobjekte dauerhaft fest, allerdings zweidimensional. Diese Lösung kann nur als eine zusätzliche, weitere Dokumentation der bearbeiteten 3D-Objekte dienen. Der entscheidende Nachteil ist der Verlust der Dreidimensionalität. Der Vorteil dieser Form des Datenerhalts ist, dass damit jenseits der Diskussion um den Erhalt von 3D-Formaten eine Ansicht der virtuell untersuchten Objekte zum Zeitpunkt der Erfassung langfristig und ohne großen zusätzlichen Aufwand festgehalten wird. Das Objekt kann auf diese Art immerhin jederzeit mit dem bloßen Auge angeschaut werden, ohne dass der Block dazu geöffnet worden sein muss. Daher sollte auf diese einfache Art der Dokumentation in keinem Fall verzichtet werden sollte, einerseits als Routine im Dokumentations-Workflow, andererseits als Notlösung für den *worst case*, bei dem der Zugriff auf die digitalen Daten nicht mehr möglich ist. Für den digitalen Erhalt der Bilder sollten die Formate TIF oder PNG gewählt werden (siehe Kapitel 2.1.3)

3.3.5 Report

Als eine weitere Form der Dokumentation können in VGStudio MAX Formblätter als *Report* abgespeichert werden. Dazu klickt man die entsprechende Datei doppelt an und öffnet unter *properties* und *render object properties* das *Tool Report*. Im *Report* können die einzelnen Bearbeitungsschritte, die mit dem Volumendatensatz vorgenommen wurden, beschrieben und anhand von *Screenshots* veranschaulicht werden. Das *Tool Report* ist eine Form des Protokollierens der Bearbeitung, die am 3D-Objekt vollzogen wurde.

Speichert man diese Protokolle gesondert ab, dienen sie der Dokumentation des Workflows Bildbearbeitung, sie können eine Beschreibung der Bearbeitungsschritte enthalten, ausgehend vom gemessenen „Rohdatensatz“ über die Weiterbearbeitung in VGStudio MAX bis zum bearbeiteten Endergebnis.

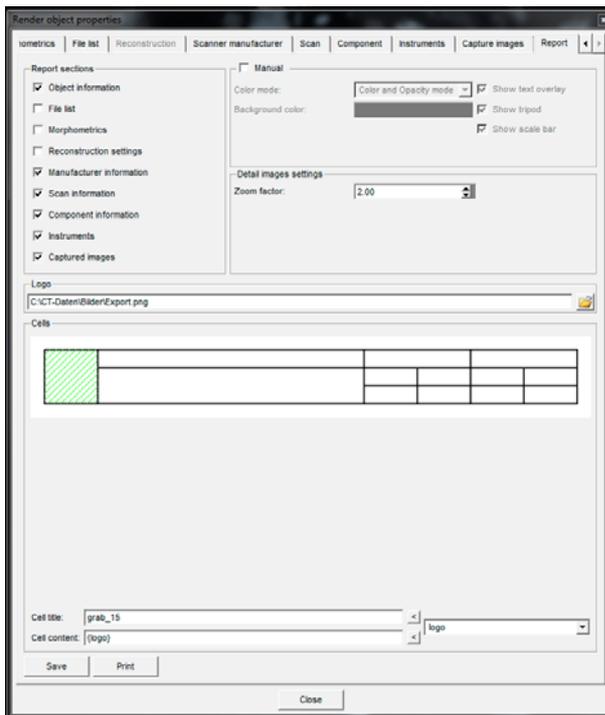


Abb. 13 Report.



Abb. 14 Screenshot eines Report.

3.3.6 Fazit

Können mit den derzeit möglichen Dokumentationsarten die signifikanten Eigenschaften der 3D-Daten erhalten bleiben?

Dokumentationsart	Signifikante Eigenschaft				
	Inhalt / 3D-Aufnahme	Verhalten / 3D-Animierbarkeit	Kontext / Metadaten	Aussehen	Struktur
3D-PDF mit U3D	<i>siehe unten</i>	ja	eventuell	nein	nein
Filme in AVI-uncompressed		nein	eventuell	ja	eventuell
My VGL-Viewer		nein	kann mit archiviert werden	ja	ja
2D-Ansichten		nein	kann mit archiviert werden	eventuell	eventuell
Report		nein	kann mit archiviert werden	eventuell	nein
	sehr wichtig				weniger wichtig

Inhalt / 3D-Aufnahme

Dokumentationsart	Signifikante Eigenschaft				
	Größe / Voxelauflösung	Materialdichte / Grauwert	Objektform	Stratigraphie / Lage / Position	Farbe
3D-PDF mit U3D	nein	nein	ja	ja	nein
Filme in AVI-uncompressed	ja	ja	ja	ja	ja
My VGL-Viewer	ja	ja	ja	ja	ja
2D-Ansichten	ja	ja	ja	ja	ja
Report	ja	eventuell	ja	ja	ja

sehr wichtig weniger wichtig

Abb. 15 Tabellen zu Signifikanten Eigenschaften.

Auf den Tabellen sind die Eigenschaften eingetragen, die als wichtigste Eigenschaften eingeschätzt wurden. Auf der linken Seite stehen die derzeit möglichen Dokumentationsarten. In der oberen Tabelle sind die übergeordneten Eigenschaften der digitalen Objekte aufgeführt. In der unteren Tabelle sind die Eigenschaften der Unterkategorie Inhalt / 3D-Aufnahme aufgeführt. Ob es möglich ist, mit den Dokumentationsarten die Eigenschaften zu erhalten, kann man in der Mitte ablesen.

Aus der oberen Tabelle geht hervor, dass der Erhalt der 3D-Funktionalität, d.h. der Animierbarkeit der 3D-Daten die größten Schwierigkeiten bereitet. Die 3D-Animierbarkeit bleibt beim 3D-PDF erhalten, verändern würden sich dabei nachrangige Eigenschaften wie Aussehen (z.B. Hintergrund, Layout) und Struktur (Schnittansichten), allerdings gehen auch wichtige Charakteristika wie die Voxelauflösung und das Erkennen der Materialdichte anhand der Grauwertverteilung (untere Tabelle) teilweise verloren.

Ein Film, der das Objekt von allen Seiten zeigt, gibt die Dreidimensionalität zwar wieder, aber nur auf einer zuvor festgelegten Bahn, die Animierbarkeit kann damit nicht abgerufen werden.

Von den hier vorgestellten Möglichkeiten der Datenerhaltung werden im Projekt Lauchheim bereits die Filme und die 2D-Ansichten zur Dokumentation der Ergebnisse eingesetzt. 3D-PDF's, ein *Viewer* oder das *Tool Report* werden bislang nicht genutzt.

Die Gewichtung der Eigenschaften der digitalen Objekte sollte darauf hinweisen, welche inhaltlichen und optischen Eigenschaften im Fall einer Migration der Daten nicht verloren

gehen dürfen. Der Software-Hersteller bietet kein offenes, lizenzfreies 3D-Format zum Export an. Leider stellt er auch keinen Datei-Konverter für seine Kunden zur Verfügung. Die Möglichkeit des Austausches ist dadurch eingeschränkt, dass es einen weit verbreiteten Standard für 3D-Formate bislang nicht gibt. Jedes 3D-Programm kann somit nur eine spezielle Auswahl an Formaten importieren und exportieren. Aufgrund der Festlegung auf eine spezielle Software und der dazu angebotenen Dateiformate sind Auswahl, Austausch und Angebot von 3D-Formaten beschränkt.

Für die komplexen Anforderungen an eine digitale Langzeitarchivierung der 3D-Inhalte müssen die grundlegenden Voraussetzungen erst geschaffen werden: Archivgeeignete 3D-Austauschformate, die Möglichkeit des Imports und Exports solcher Austauschformate in und aus den gängigsten 3D-Programmen, Metadatenstandards zur Erfassung der Messprotokolle und notwendiger Textinformation zur späteren Ansicht und Nachbearbeitung der 3D-Objekte.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Der Einsatz von 3D-RCT im Bereich der Archäologischen Denkmalpflege hat Vorreitercharakter: Das zeigen die Verwendung modernster Technik und die dadurch möglichen innovativen Ergebnisse, die kein Material zerstören. Aber die Archivierung der daraus gewonnenen Daten stellt ein Problem dar. Die Idee des Bewahrens, die dem Berufsfeld der Restaurierung und Denkmalpflege eigen ist, muss sich auch auf den Erhalt der digitalen Daten erstrecken. ArchäologInnen und RestauratorInnen sollten sich angesichts der Problematiken, die sich in Bezug auf die Langzeitsicherung ergeben, keinesfalls dem Einsatz der Neuen Medien in ihrem Berufsfeld verschließen – sondern sie voll ausnutzen, zusätzlich zu den herkömmlichen Ansätzen. Die Restaurierung kann die Möglichkeiten einer 3D-Visualisierungssoftware in besonderem Maße nutzen. Die 3D-RCT-Aufnahme ist einer manuellen Freilegung der Blöcke, Befundaufnahme und Restaurierung immer voraus. Archäologie und Restaurierung begeben sich auf einen neuen Level: Das digitale Bewahren.

Am wertvollsten und im Vergleich zum Erhalt der digitalen Daten auch am haltbarsten sind die Gipsblöcke mit den archäologischen Funden selbst. Auch wenn die technische Weiterentwicklung noch so rasant fortschreitet, dürften die digitalen Bilder niemals das Original ersetzen. Welches sind die darauffolgenden, nach einer Wertigkeitsskala absteigenden Erhaltungsstadien der Daten?

Die Untersuchung des Blockes mit einem Computertomographen erzeugt zweidimensionale TIF-Dateien als Projektionsbilder. Wenn man diese TIF-Dateien als Master erklärt und unbearbeitet und unkomprimiert erhält, sichert man die Messung, da aller Wahrscheinlichkeit nach eine beliebige zukünftige 3D-Software diese Bilder zu einem 3D-Datensatz rekonstruieren könnte. Diese zu erhalten ist besonders wertvoll, weil man die Messung in ihrem kompletten Potential erhält.

Das nächste, erhaltenswerte Stadium der Daten sind die rekonstruierten dreidimensionalen VOL-/RAW-Dateien, die den Volumendatensatz enthalten. Man kann hoffen, dass VOL-Dateien zukünftig lesbar bleiben, da es ein einfaches Format ist, um 3D-Volumendaten zu speichern. Den Datensatz als VOL/RAW zu archivieren, hat gegenüber den TIF-Dateien den Vorteil, dass die Daten schon rekonstruiert sind.

Entscheidet man sich ausschließlich für eine Archivierung der VOL-/RAW-Messdatensätze, gehen die bearbeiteten Endzustände in VGI/VGL, dem dritten Datenstadium, verloren, in denen das Objekt entsprechend dem Ziel des Forschungsprojektes dargestellt werden soll. Die Archivierung der firmeneigenen Formate VGI/VGL kann aufgrund der proprietären Nutzbarkeit, der geschlossenen Formatspezifikation und der nicht bestehenden Migrierbarkeit allerdings nicht gewährleistet werden.

Die signifikanten Eigenschaften der 3D-RCT-Daten wurden am Beispiel des Projektes Lauchheim definiert und fünf Hauptkategorien zugeordnet. Von den Hauptkategorien sind die 3D-Aufnahme und das Verhalten, insbesondere die Interaktivität am signifikantesten. Unter die Kategorie Verhalten fällt die Interaktivität des dreidimensionalen Datensatz, die signifikant und für die langfristige Aussagekraft von großer Bedeutung ist.

Für die 3D-Aufnahme definierten die Mitarbeiter wiederum fünf Kategorien von Eigenschaften: Stratigraphie, Objektform, Grauwertverteilung, Voxelauflösung und Farbe. Von diesen Eigenschaften ist die Voxelauflösung und damit die Genauigkeit der im Volumendatensatz enthaltenen Information für die Mitarbeiter die signifikanteste Eigenschaft. Darauf folgen Grauwertverteilung, die die Materialität wiedergibt, die Objektform und die Stratigraphie der Funde im Block.

Bei einer zukünftigen Migration soll die Gewichtung der Haupteigenschaften helfen, ein archivgeeignetes Format zu finden, in dem diese signifikanten Eigenschaften weitgehend erhalten bleiben.

Ein offen dokumentiertes 3D-Austauschformat, das die Funktionalitäten einschließt, die eine Visualisierungssoftware bereitstellt, gibt es momentan nicht. Die Folge sind der begrenzte Zugriff auf die 3D-Inhalte, die Abhängigkeit auf spezialisierte, mit Lizenzkosten verbundene Software für den Austausch und die Bearbeitung von 3D-Modellen sowie die Unsicherheit bezüglich der langfristigen Nutzung und des späteren Zugriffs. Auch wenn es momentan noch nicht gelingt, die Funktionalitäten zur Visualisierung der 3D-Aufnahmen vollständig zu erhalten, wurden dennoch Alternativen aufgezeigt, wie der Wissensstand und die Ergebnisse, die aus den 3D-RCT-Untersuchungen gewonnen werden, dokumentiert werden können. In einer Tabelle ist dargestellt, welche der signifikanten Eigenschaften bei den derzeit möglichen Dokumentationsformen erhalten werden können.

5. AUSBLICK

Die einzelnen Schritte von der Erstellung des Messdatensatzes über die Bearbeitung bis hin zu den verschiedenen bearbeiteten Endzuständen der mittels Computertomographie untersuchten archäologischen Funde sollten im Sinne der Langzeitarchivierung nachvollziehbar und im besten Fall wiederholbar sein. Die Herausforderungen der Archivierung der komplexen 3D-Daten liegen im rasanten technologischen Wandel von Softwareversionen und Betriebssystemen und der Unwägbarkeit, ob die jetzt erstellten Daten zukünftig auf neuer Hard- und Software lauffähig bleiben, sowie in nicht dokumentierten Bearbeitungsschritten, die eine Auswertung der Ergebnisse beeinträchtigen.

Die Visualisierungssoftware VGStudio MAX ist weltweit marktführend, dementsprechend sind auch die VGI/VGL-Dateien nicht gering verbreitet. Dennoch ist die fehlende Migrierbarkeit der VGI-/VGL-Formate in archivgeeignete 3D-Zielformate bisher nicht als Nachteil an der Software aufgefallen. Immerhin, die Stimmen nach einem solchen 3D-Traumformat werden nicht nur in der *Community* der digitalen Langzeitarchivierung lauter. Wünschenswert ist ein Datei-Konverter, den die Hersteller-Seite zur Verfügung stellt, so dass ihre Kunden, die mit der Software arbeiten, die Daten zur langfristigen Nutzbarkeit in andere Formate migrieren können, ohne dass die signifikanten Eigenschaften der 3D-Aufnahmen verloren gehen.

6. GLOSSAR

ASCII	American National Standard Code for Information Interchange, auch US-ASCII, 7-Bit-Zeichenkodierung, die das lateinische Alphabet in Groß- und Kleinschreibung, die zehn arabischen Ziffern und einige Satzzeichen enthält, der Zeichenvorrat entspricht in etwa dem einer englischen Tastatur, US-Variante von ISO 646, Grundlage für spätere, erweiterte Zeichenkodierungen, 1967 als Standard veröffentlicht.
AVI	Audio Video Interleave, Videocontainerformat, das Audio- und Videodaten ineinander verzahnt, d.h. <i>interleaved</i> abspeichert.
CT	Computertomographie / <i>computed tomography</i> .
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine standardisiert in der Medizin das Speicherformat und den Austausch von Daten.
DNG	Digital Negative Format, offen spezifiziertes Format der Firma Adobe, das die verschiedenen, proprietären Rohdatenformate von Herstellerfirmen ersetzen soll, findet bislang keinen Anklang.
3D-PDF	PDF, in das dreidimensionale Inhalte eingebunden werden können, Format der Firma Adobe.
HTML	Hyper Text Markup Language, textbasierte Auszeichnungssprache zur Strukturierung von unterschiedlichen Inhalten in Dokumenten, bildet die Grundlage des Internets, entwickelt vom W3C-Konsortium, wird von einem Webbrowser dargestellt, enthält Metainformationen.
Identifizier	Ein eindeutiger Bezeichner für digitale Inhalte im Internet.
ISO	International Organisation for Standardisation mit Sitz in der Schweiz.
Kopal	Kooperativer Aufbau eines Langzeitarchivs digitaler Informationen, vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Projekt.
OAIS	Reference Model for an Open Archival Information System.

PNG	Portable Network Graphics, Grafikformat für Rastergrafiken mit verlustfreier Bildkompression, standardisiert, lizenzkostenfrei.
RAW	Hier: 3D-Rohdatenformat, bestehend aus einer Menge von Voxeln.
RCT	Röntgen-Computertomographie.
(Format-) Spezifikation	Eine Formatspezifikation ist eine Beschreibung und damit eine Aufschlüsselung der Reihenfolge der Bits, so dass klar wird, welches Bit für welchen Teil der Information steht.
U3D	Universal 3D, offenes, standardisiertes 3D-Datenformat.
Unicode	1991 vom Unicode Konsortium als gleichnamiger Standard veröffentlicht mit dem Ziel, alle Zeichen aller Sprachen in Kodeform zu definieren, Unicode ist die internationale ISO-Norm 10646.
URL	Uniform Resource Locator, übliche Adressierung von digitalen Inhalten im Internet.
URN	Uniform Resource Name zur dauerhaften Adressierung von digitalen Inhalten im Internet.
UTF-8	8-bit Unicode Transformation Format, eine 8-Bit-Kodierung von Unicode, ist die am weitesten verbreitete Kodierung für Unicode-Zeichen, besonders über das Internet.
VGI/VGL	Volume Graphics Info File / Volume Graphics File Format.
VOL	Herstellerabhängiges Datenformat für 3D-Volumendatensätze, mit dem GE Sensing & Inspection Technologies GmbH Rohdaten formatiert. Analog zum RAW-Format.
Voxel	Ein Voxel ist das dreidimensionale Pendant zum Pixel. Es ist die kleinste Einheit eines Volumendatensatzes und wird durch seine x-,y-,z-Achsen definiert.
W3C	World Wide Web Consortium, das Gremium zur Standardisierung von Web-Technologien, 1994 von Tim Berner-Lee in Cambridge, Massachusetts gegründet.
XCT	Computed tomography with X-ray.
X3D	Extensible 3D, offenes, standardisiertes 3D-Datenformat.

XML

Extensible Markup Language, Auszeichnungssprache, die für den Austausch von Daten verwendet wird, vor allem über das Internet, es besteht aus menschenlesbaren Textzeichen wie z.B. ASCII, nicht aus binären Zeichen und hat immer ein Anfang- und ein Endtag. Das W3C-Konsortium hat die XML-Spezifikation herausgegeben.

7. ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS

Die Reproduktionsrechte für die in den Abbildungen dargestellten Objekte liegen bei den hier angeführten verwahrenden Institutionen.

- Abb.1 Tabelle zu 3D-Formaten, erstellt von L. Sayer-Degen.
- Abb. 2 Zweidimensionales, digitales Röntgenbild eines Blockes aus Lauchheim, Landesamt für Denkmalpflege, Bildbearbeitung: L. Sayer-Degen.
- Abb. 3 Dreidimensionale RCT-Aufnahme eines Blockes aus Lauchheim, Landesamt für Denkmalpflege, Bildbearbeitung: J. Stelzner.
- Abb. 4 RCT-Aufnahme eines segmentierten, kolorierten Objektes, Landesamt für Denkmalpflege, Bildbearbeitung: J. Stelzner.
- Abb. 5 Computertomographiesystem v|tome|x 450, von der Hersteller-Webseite: http://www.phoenix-xray.com/de/products/vtomex/vtomex_1_450.html, Zugriff am 17.8.2010.
- Abb. 6 Arbeitsplatz zur Bearbeitung der 3D-RCT-Bilddaten, Landesamt für Denkmalpflege, Aufnahme: J. Stelzner.
- Abb. 7 Screenshot der Schnittansichten, Software VGStudio MAX 2.1, Aufnahme: J. Stelzner.
- Abb. 8 Screenshot der Exportformate, Aufnahme: J. Stelzner.
- Abb. 9 Screenshot der Importformate, Aufnahme: J. Stelzner.
- Abb. 10 Schema der signifikanten Objekt-Eigenschaften für 3D-Daten, erstellt von L. Sayer-Degen.
- Abb. 11 *Surface extraction*: Aus der segmentierten, kolorierten Lanzenspitze links wird ein Oberflächenmodell rekonstruiert, Aufnahme: J. Stelzner.
- Abb. 12 Auswählen der Flugbahn, *trajectory*, zum Erstellen eines Filmes, Aufnahme: J. Stelzner.
- Abb. 13 *Report*, erstellt von L. Sayer-Degen und J. Stelzner.
- Abb. 14 Beispiel von einem *Report*, erstellt von L. Sayer-Degen und J. Stelzner.
- Abb. 15 Tabellen Signifikante Eigenschaften und Dokumentationsformen, erstellt von L. Sayer-Degen.

8. QUELLENVERZEICHNIS

- ADS Archaeology Data Service (ADS), University of York, UK, Department of Archaeology: <http://ads.ahds.ac.uk/>, Zugriff am 17.8.2010.
- ARCHE Projekt ARCHE: <http://www.landesarchiv-bw.de/arche>, Zugriff am 8.8.2010.
- Banck 1998 J. Banck, Ein merowingerzeitlicher Baumsarg aus Lauchheim/Ostalbkreis. Zur Bergung und Dokumentation der Textilfunde. In: L. Bender Jorgensen/C. Rinaldo (Hrsg.), *Textiles in European Archaeology*, Report from the 6th NESAT-Symposium, 1996, *Gothenburg Archaeological Theses A1*, 1998, S. 115-124.
- Becker 2007 C. Becker, G. Kolar, J. Küng, A. Rauber, Preserving Interactive Multimedia Art: A Case Study in Preservation Planning, in: *Lecture Notes in Computer Science*, 2007, Vol. 4822, 2007, S. 257-266.
- Becker 2010 C. Becker, H. Kulovits, A. Rauber, H. Hofman, PLATO: A Service Oriented Decision Support System for Preservation Planning, 2010; http://www.planets-project.eu/events/rome-2010/pre-reading/docs/Becker_etc_PlatoSOA.pdf, Zugriff am 1.8.2010.
- Blittkowsky 2004 R. Blittkowsky, Langzeitarchivierung industrieller IT-Prozesse, 2004; <http://www.heise.de/tp/r4/artikel/16/16567/1.html>, Zugriff am 8.8.2010.
- Brandes 2001 U. Brandes, M. Scott Marshall, S. C. North, Graph Data Format Workshop Report, in: Proceedings of the 8th International Symposium on Graph Drawing (GD 2000) (LNCS 1984), 2001, S. 407-409; Konstanzer Online-Publikations-System (KOPS), <http://kops.uni-konstanz.de/volltexte/2009/7779/>, Zugriff am 30.7.2010.

- Bustos 2007 B. Bustos, D. W. Fellner, S. Havemann, D. A. Keim, D. Saupe, T. Schreck, Foundations of 3D Digital Libraries: Current Approaches and Urgent Research Challenges, in: First International Workshop on Digital Libraries Foundations (In conjunction with ACM IEEE Joint Conference on Digital Libraries), Vancouver, British Columbia, Canada, June 23, 2007; http://kops.ub.uni-konstanz.de/volltexte/2009/6866/pdf/Foundations_of_3D_Digital_Libraries.pdf, Zugriff am 30.7.2010.
- DFG 2009a Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wissenschaftliche Literaturversorgungs- und Informationssysteme (LIS): DFG-Praxisregeln „Digitalisierung“, 2009; http://www.dfg.de/download/pdf/foerderung/programme/lis/praxisregeln_digitalisierung.pdf, Zugriff am 25.6.2010.
- DFG 2009b Deutsche Forschungsgemeinschaft, Empfehlungen zur gesicherten Aufbewahrung und Bereitstellung digitaler Forschungsprimärdaten, Bonn, 2009; http://www.dfg.de/download/pdf/foerderung/programme/lis/ua_inf_empfehlungen_200901.pdf, Zugriff am 3.4.2011.
- DICOM DICOM-Webseite: <http://medical.nema.org/>
Zum DICOM-Standard MEDICOM, ENV 12052 siehe <http://dicom.offis.de/dcmintro.php.de>, Zugriff am 29.3.2011.
- Doyle 2009 J. Doyle, H. Viktor, E. Paquet, A Metadata Framework for Long Term Digital Preservation of 3D Data, in: *International Journal of Information Studies*, Vol. 1, Issue 3, 2009, S. 165-171.
- Ebinger-Rist 2009 N. Ebinger-Rist, C. Peek, J. Stelzner, Gräber im virtuellen Flug erfasst. Kann die 3D-Computertomografie bei der Auswertung des frühmittelalterlichen Gräberfeldes von Lauchheim helfen?, in: *Denkmalpflege in Baden-Württemberg*. Nachrichtenblatt der

- Landesdenkmalpflege, 3, 2009, S. 165-170;
http://www.denkmalpflege-bw.de/fileadmin/media/publikationen_und_service/nachrichtenblaetter/2009-03.pdf, Zugriff am 12.8.2010.
- Ebinger-Rist 2010a N. Ebinger-Rist, J. Stelzner, C. Peek, Mehr Durchblick in kürzester Zeit. Befunddokumentation mit 3D-Computertomografie, in: M. Knaut, R. Schwab (Hrsg.), Archäologie im 21. Jahrhundert. Innovative Methoden - bahnbrechende Ergebnisse, in: Sonderheft 2010 PLUS der Zeitschrift *Archäologie in Deutschland*, 2010, S. 80-91.
- Ebinger-Rist 2010b N. Ebinger-Rist, C. Peek, J. Stelzner, F. Gauß, Computed Tomography: A Powerful Tool For Non-Destructive Mass Documentation For Archaeological Metals, in: P. Mardikian, C. Chemello, C. Watters, P. Hull, Metal 2010, International Conference on Metal Conservation, Interim Meeting of the International Council of Museum Committee for Conservation Metal Working Group, October 11-15, 2010, Charlston, South Carolina, USA, Clemson University, 2010.
- Ernst 2007 K. Ernst (Hrsg.), Erfahrungen mit der Übernahme digitaler Daten, Elfte Tagung des Arbeitskreises „Archivierung von Unterlagen aus digitalen Systemen“ vom 20./21. März 2007, ausgerichtet vom Stadtarchiv Stuttgart, Hohenheim Verlag GmbH, 2007.
- Heitmann 2005 R.Heitmann, Auswahl und Konfiguration von PAC-Systemen für radiologische Arztpraxen unter Berücksichtigung der Einführung der elektronischen Patientenkarte, Diplomarbeit im Januar 2005 am Fachbereich Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik der Fachhochschule Gießen-Friedberg; http://homepages.fh-giessen.de/~hg8416/studium/Diplomarbeiten/Diplomarbeit_PACS_Roland_Heitmann_2005.pdf, Zugriff am 7.6.2010.

- Heslop 2002 H. Heslop, S. Davis, A. Wilson, An Approach to the Preservation of Digital Records, National Archives of Australia, 2002, S. 1-24; <http://duckdigital.com/DAM/wp-content/uploads/2006/09/ApproachPreservationDigitalRecords.pdf>, Zugriff am 17.8.2010.
- Hedstrom 2002 M. Hedstrom, C. A. Lee, Significant properties of digital objects: definitions, applications, implications, 2002, S. 218-223; http://ils.unc.edu/callee/sigprops_dlm2002.pdf, Zugriff am 17.8.2010.
- Hockx-Yu 2008 H. Hockx-Yu, G. Knight: What to preserve?: Significant Properties of Digital Objects, Report on the JISC/BL/DPC Workshop of April 7, 2008, British Library Conference Centre. In: The International Journal of Digital Curation, Issue 1, Vol. 3, 2008, S. 141-153; <http://www.ijdc.net/index.php/ijdc/article/viewFile/70/49>, Zugriff am 17.8.2010.
- InSPECT InSPECT – Investigating Significant Properties of Electronic Content; <http://www.significantproperties.org.uk>, Zugriff am 17.8.2010.
- Jakubaschk Homepage von Boris Jakubaschk: <http://www.homecomputermuseum.de/>, Zugriff am 17.7.10.
- JISC 2009 JISC Project Report: Digitisation Programme: Preservation Study April 2009. The final public report completed by the Digital Preservation Coalition, the Digital Archives Department of the University of London Computer Centre (ULCC) and Portico, S. 1-65; http://pubs.ulcc.ac.uk/120/1/JISC_DPP_final_public_report_2.pdf, Zugriff am 17.8.2010.

- Kastner 2007 J. Kastner, D. Salaberger, M. Grabner, M. Mehofer, Mikro-Röntgencomputertomographie: Eine zerstörungsfreie Methode für die Archäologie, *Archäologie Österreichs* 18, 1, 2007, S. 60-64.
- Keitel 2008 Dr. Ch. Keitel, Elektronische Archivierung in Deutschland: Eine Bestandsaufnahme, in: VdA-Verband deutscher Archivarinnen und Archivare e.V., Schmitt, Heiner (Hrsg.), Für die Zukunft sichern! Bestandserhaltung analoger und digitaler Unterlagen, Bd. 13, 78. Deutscher Archivtag 2008 in Erfurt, 2009, S. 115-128.
- Keitel 2010a Keitel, Christian: Benutzerinteressen annehmen und signifikante Eigenschaften festlegen: einige neue Aufgaben für Archivare, in: VdA-Verband deutscher Archivarinnen und Archivare e.V., Schmitt, Heiner (Hrsg.), Archive im digitalen Zeitalter: Überlieferung - Erschließung – Präsentation, Bd. 14, 79. Deutscher Archivtag in Regensburg, 2010, S. 29-42.
- Keitel 2010b Ch. Keitel, Digitale Archivierung beim Landesarchiv Baden-Württemberg, in: *Der Archivar*, 63. Jg., 2010, Heft 1, S. 19-26; http://www.archive.nrw.de/archivar/hefte/2010/ausgabe1/Archivar_1_10.pdf, Zugriff am 29.3.2011.
- Keitel o.J. Ch. Keitel, U. Gutzmann, U. Kamp, A. Scheiding für den Arbeitskreis „Elektronische Archivierung“ in der Vereinigung deutscher Wirtschaftsarchivare e.V. (VdW). Praktische Lösungsansätze zur Archivierung digitaler Unterlagen: “Langzeitarchivierung” und dauerhafte Sicherung der digitalen Überlieferung, Ergebnisse der Arbeitskreissitzungen zwischen 2004-2007, o.J.; http://www.wirtschaftsarchive.de/akea/m_handreichung.htm, Zugriff am 17.8.2010.

- Knight 2009 G. Knight, M. Pennock, Data Without Meaning: Establishing the Significant Properties of Digital Research, in: *The International Journal of Digital Curation*, Issue 1, Vol. 4, 2009, S. 159-174; <http://www.ijdc.net/index.php/ijdc/article/viewFile/110/87>, Zugriff am 17.8.2010.
- kopal kopal - Kooperativer Aufbau eines Langzeitarchivs digitaler Informationen, <http://kopal.langzeitarchivierung.de>, Zugriff am 17.8.2010.
- Loose 2009 R. Loose, R. Braunschweig, E. Kotter, P. Mildenberger, R. Simmler, M. Wucherer, Kompression digitaler Bilddaten in der Radiologie – Ergebnisse einer Konsensuskonferenz, in: *Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*, Bd. 181, 2009, S. 32-37.
- Lorenz o.J. Studienarbeit von J. Lorenz, 3D Visualisierungsformate im Kontext des *Lifecycle Managements*, Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen, Hochschule Offenburg, o.J.; <http://www.only-open-source.com/dokus/3d-visualisierungsformate.html>, Zugriff am 1.8.2010.
- Maier 2009 Unveröffentlichtes Skript zur Vorlesung “Methoden der Langzeitarchivierung” im SS 2009 von Dr. G. Maier, Landesarchiv Baden-Württemberg, Stand: 17.5.2009.
- Mitcham Jenny Mitcham, Kieron Niven, Julian Richards, Archiving archaeology: Introducing the guides to good practice, in: A. Rauber, M. Kaiser, R. Guenther, P. Constantopoulos (Hrsg.), iPRES 2010. Proceedings of the 7th International Conference on Preservation of Digital Objects, 19.-24. September 2010, Wien/Österreich, Österreichische Computer Gesellschaft, 2010; http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_191968.pdf, Zugriff am 29.3.2011.

- Mödlinger 2008 M. Mödlinger, Mikro-Röntgencomputertomografie in der Archäologie: Analyse eines bronzezeitlichen Schwertes, in: Industrielle Computertomografie. Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, 3D-Materialcharakterisierung und Geometriebestimmung, Fachtagung 27.-28. Februar 2008, Wels/Österreich, 2008, S. 219-223.
- nestor 2009 H. Neuroth, A. Oßwald, R. Scheffel, S. Strathmann, M. Jehn (Hrsg.), nestor-Handbuch. Eine kleine Enzyklopädie der digitalen Langzeitarchivierung, Version 2.0, Boizenburg, Verlag Werner Hülsbusch, 2009; <http://nestor.sub.uni-goettingen.de/handbuch/index.php>, Zugriff am 8.8.2010.
- nestor Webseite: <http://www.langzeitarchivierung.de/>, Zugriff am 25.6.2010.
- OAIS Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS), Reference Model for an Open Archival Information System (OAIS), CCSDS Secretariat, Program Integration Division (Code M-3), National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC 20546, USA, 2002, 1-148, *functional model* auf S. 38; <http://public.ccsds.org/publications/archive/650x0b1.pdf>, Zugriff am 18.8.2010.
- Peek 2010 C. Peek, N. Ebinger-Rist, J. Stelzner, Zur Bearbeitung frühmittelalterlicher Grabfunde des Friedhofs von Lauchheim (Ostalbkreis). Möglichkeiten und Grenzen digitaler Untersuchungsmethoden, *Archäologisches Korrespondenzblatt* 39, Heft 4/2009, 2010, S. 559-578.
- PLANETS a EU-Projekt PLANETS: *Preservation Planning*: http://www.planets-project.eu/docs/presentations/Planets_iPRES_strodl_final_3.pdf, Zugriff am 17.8.2010.

- PLANETS b EU-Projekt PLANETS: Signifikante Eigenschaften:
http://www.planets-project.eu/docs/papers/Brown_DevelopingPracticalApproaches_IJD C.pdf, Zugriff am 17.8.2010.
- Portico <http://www.portico.org>, Zugriff am 25.6.2010.
- RöV 2003 Röntgenverordnung 2003, RöV 2003; http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/r_v_1987/gesamt.pdf, Zugriff am 18.6.2010.
- Stelzner 2010 J. Stelzner, N. Ebinger-Rist, C. Peek, B. Schillinger, The application of 3D computed tomography with X-rays and neutrons to visualise archaeological objects in blocks of soil, *Studies in Conservation*, 55, 2010, S. 1-12.
- Stork 2002 I. Stork, Lauchheim im frühen Mittelalter, in: W. Menghin (Hrsg.), Menschen, Zeiten, Räume. Archäologie in Deutschland, Ausstellungskatalog Berlin 2003, Stuttgart, Theiss, 2002, S. 321-330.
- VGStudio MAX Volume Graphics GmbH, Einführung in VGStudio MAX. Version 2.0. Analyse und Visualisierung von Voxeldaten, Heidelberg, 2008.
- VdA 2009 VdA-Verband deutscher Archivarinnen und Archivare e.V., Schmitt, Heiner(Hrsg.), Für die Zukunft sichern! Bestandserhaltung analoger und digitaler Unterlagen, Bd. 13, 78. Deutscher Archivtag 2008 in Erfurt, 2009.
- Wilson 2007 A. Wilson, InSPECT: Significant Properties Report, Arts and Humanity Data Service (AHDS), 2007, S. 5-10;
http://www.significantproperties.org.uk/wp22_significant_properties.pdf, Zugriff am 17.8.2010.

9. SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Ich versichere, dass ich die Thesearbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

A handwritten signature in black ink, reading "Leila Sayer-Degen" with a long horizontal flourish at the end.

Leila Sayer-Degen

Tübingen, den 20.8.2010