

Campus Duisburg

Angewandte Kognitions- und Medienwissenschaft (Master)

Archäoinformatik - Digitale Archäologie

Informationstechnologien und Visualisierungstechniken in der Archäologie

Verfasser: Sebastian Kirch B. Sc.

Seminar: „Digital Humanities“, SS 2010

Dozenten: Prof. Dr. Wolfgang Hoeppe
Dipl.-Inform. Angela Klutsch

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Techniken & Technologien der Digitalen Archäologie	5
2.1	Innerhalb der Archäologie eingesetzte Technologien.....	5
2.1.1	Datenbanksysteme	5
2.1.2	Computer Aided Design (CAD)	6
2.1.3	Geoinformationssysteme (GIS)	7
2.2	Digitale Dokumentation	9
2.2.1	3D-Dokumentation.....	9
2.2.1.1	Regional	10
2.2.1.2	Lokal.....	13
2.2.1.3	Objekt	15
2.2.1.4	Resümee (3D-Dokumentation).....	16
2.2.2	Digitale Rekonstruktion	17
2.2.3	Automatisierte Klassifikation von Fundobjekten	21
2.2.4	CIDOC CRM – Ein Dokumentationsstandard für die heterogene Datenwelt der Archäologie.....	26
2.3	Verwaltung und Analyse digital dokumentierter Funde und Befunde	30
2.3.1	Exkurs: Bedeutung räumlicher Komponenten in der archäologischen Dokumentation	30
2.3.2	Das Zusammenspiel von Datenbanksystemen, CAD-Software und Geoinformationssystemen am Beispiel eines <i>Informationssystems für Analyse und Dokumentation raumbezogener Daten</i>	32
2.4	Herausforderungen der digitalen Archäologie.....	38
3	Aktueller Stand und Zusammenfassung.....	40
3.1	Überblick über aktuelle Forschung.....	40
3.2	Fazit	42
4	Literatur	44

1 Einleitung

Bei dem Gedanken an Geisteswissenschaften kommt einem erst mal vieles in den Sinn – wahrscheinlich aber nicht gerade Computer oder Informatik. Nach etwas gründlicherer Überlegung jedoch, ergibt diese Assoziation mehr Sinn als zunächst erwartet. Denn

„die Anwendung von computergestützten Verfahren und die systematische Verwendung von digitalen Ressourcen in den Geistes- und Kulturwissenschaften“ [INT01]

ist keine Seltenheit mehr. Das Fach *Digital Humanities*¹ umfasst genau diesen Bereich. Aufgrund des interdisziplinären Charakters sind dessen Vertreter sowohl mit traditionellen geisteswissenschaftlichen, als auch mit einschlägigen Konzepten und Verfahren der Informatik vertraut. Eine der Geistes- und Kulturwissenschaften, bei der computergestützte Verfahren schon seit ca. 50 Jahren eingesetzt werden ist die Archäologie. Die „Kunde von den alten Dingen“ [INT02] ist seit jeher eine Disziplin, die sich neben der kulturellen Komponente auch durch die „meist [...] enge Zusammenarbeit mit Naturwissenschaftlern“ [INT03] auszeichnet. Daher hat sich als Unterdisziplin der digitalen Geisteswissenschaften und als „Schnittstelle zwischen Archäologie und Informatik“ das Fach der *Archäoinformatik* [INT04] entwickelt. Die Archäoinformatik ist eine

„...spezialisierte Disziplin, welche komplexe Forschungsprobleme der Archäologie mittels moderner Informationstechnologie verstehen und lösen will.“ [INT04]

Die Etablierung der Archäoinformatik ist aus der Erkenntnis entstanden, dass Archäologie ganz eigene Problem- und Informationsstrukturen besitzt, welche auch nach eigenen informationstechnischen Ansätzen verlangen. Als klassische Unterteilung kann die Unterscheidung zwischen theoretischer und praktischer Archäoinformatik angesehen werden. Innerhalb der theoretischen Archäoinformatik werden anhand der Abstraktion des archäologischen Befundes Modelle gebildet, die wiederum der Interpretation archäologischer Fakten dienen. Der Fokus dieser Arbeit liegt aber ausschließlich auf der praktischen, angewandten Archäoinformatik, die sich mit der Entwicklung eigener Lösungen und der Integration vorhandener Hard- und Software in die Prozesse der archäologischen Forschung beschäftigt. In diesen Bereich fällt neben der Entwicklung von Datenmodellen für die Gestaltung von Datenbanken zur Wissensvernetzung, auch die Bildung von Modellen für den Archivierungsprozess digitaler Dokumente und Objekte (z.B. Dokumentationsstandards).

¹ Humanities (engl.): übersetzt „Geisteswissenschaften“

Vorhandene Hard- und Softwarelösungen werden in der Archäologie schon seit geraumer Zeit verwendet. Die erste Nutzung datiert aus den 50er Jahren, als Computer für die Erstellung von Statistiken als Hilfsmittel zur Aufgabenberechnung eingesetzt wurden. In den 60er Jahren kamen in der Folge erste Datenbankeinsätze hinzu. Im Laufe der 70er Jahre schließlich nahm das Fach der Archäoinformatik wissenschaftliche Konturen an. In den früher 70ern wurden erste Konferenzen über „Archaeological Computing“ durchgeführt und 1973 die „CAA (Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology)“ gegründet. (vgl. [HE04]) Den Startschuss für eine verbreitete Anwendung computergestützter Verfahren gaben dabei die Mitte der 70er Jahre entwickelten ersten Mikrocomputer und das Datenbankmanagementsystem dBase. Ende dieses Jahrzehnts begann auch der erste Einsatz grafischer Anwendungen zum Druck von Karten, Plänen und Zeichnungen. Waren die zugrunde liegenden Daten zu diesem Zeitpunkt noch Mittel zum Zweck, änderte sich dies, als die Daten Mitte der 80er Jahre mit Hilfe des Einsatzes so genannter Geoinformationssysteme für Analysezwecke verwendet werden konnten. Zeitgleich zeigte sich auch die erstmalige Nutzung von CAD-Software zur Konstruktion und Präsentation grafischer Objekte. Auch der rasante Fortschritt der Informationstechnologien in den letzten 15 Jahren, exemplarisch sei nur das Internet aufgezählt, hatte großen Einfluss auf archäologische Datenarchivierungs- und Verwaltungsverfahren. Ebenso wirkte sich auch die Weiterentwicklung der Erfassungs- und Vermessungstechniken (z.B. 3D-Laser-Scanning) auf die Dokumentationsverfahren und somit auf den ganzen Prozess aus. Mittlerweile sind in den meisten Handys eine Kamera und eine GPS-Ortung eingebaut, um nur zwei von uns heutzutage umgebenden Technologien zu nennen, die in der Archäologie als Hilfsmittel für die archäologische Forschung genutzt werden.

Die Hauptaufgaben des archäologischen Forschungsgebiets sind neben den eigentlichen Ausgrabungstätigkeiten, die Dokumentation und Archivierung der Funde und Befunde, die Analyse von erfassten Daten und die Präsentation und Verteilung der Daten sowie des aus den Informationen entstandenen Wissens. Aufgrund des Verfalls oder der Überbauung von Fundstellen ist die Dokumentation jedoch die wichtigste aller Aufgaben, da sie die Grundlage für weitere Schritte, wie Objektklassifikation oder Analyse, bildet. Darüber hinaus wird an den Stellen, wo eine angemessene Dokumentation nicht möglich ist, innerhalb der Archäologie die Methode der Rekonstruktion eingesetzt, um derartige Informationslücken zu schließen. Das Potential und die Anwendung von Informationstechnologien sowie computergestützten Verfahren innerhalb der Archäologie soll in der folgenden Arbeit anhand der Hauptaufgaben hergeleitet, und dabei aktuelle Forschungen und Lösungen vorgestellt werden. Daher werden zu Beginn die innerhalb der Archäologie eingesetzten Technologien skizziert. Danach werden Technologien und Methoden der Dokumentation digitaler Daten in den Fokus gerückt. Hierzu werden neben dreidimensionalen Erfassungstechniken, Methoden wie die digitale Rekonstruktion und die computergestützte Klassifikation, auch ein

entwickelter Dokumentationsstandard erläutert. Bevor auf die technologischen Hilfsmittel für die Verwaltung und Analyse der digital dokumentierten Funde und Befunde eingegangen wird, soll anhand eines kurzen Exkurses die Bedeutung des Kontextes, in der ein Objekt gefunden wurde, erklärt werden, um den Nutzen von Informationssystemen für die Verknüpfung der Daten mit ihrem Kontext zu verdeutlichen. Abschließend soll ein kurzer Überblick über die generellen Herausforderungen der Archäoinformatik gegeben werden, um in der Folge aktuelle Forschungsprojekte vorzustellen, die sich mit den Problematiken auseinandersetzen. Zuletzt wird im Fazit zusammenfassend eine kurze Aufstellung der genutzten Systeme und Technologien und ihr Einsatzgebiet in der Archäologie dargeboten.

2 Techniken & Technologien der Digitalen Archäologie

2.1 Innerhalb der Archäologie eingesetzte Technologien

Bevor auf den konkreten Einsatz computergestützter Verfahren innerhalb der Archäologie eingegangen wird, sollen die genutzten Systeme (Datenbanksysteme, CAD-Programme, Geoinformationssysteme) vorweg ohne archäologischen Bezug charakterisiert werden. Dabei werden die grundlegenden Funktionen und Aufgaben kurz geschildert.

2.1.1 Datenbanksysteme

„Ein Datenbanksystem (kurz: DBS) ist ein System zur elektronischen Datenverwaltung“, dessen wesentliche Aufgabe es ist „große Datenmengen effizient, widerspruchsfrei und dauerhaft zu speichern“. [INT05] Dabei werden die jeweiligen Datenteilmengen in heterogenen, aber bedarfsgerechten Darstellungsformen für Nutzer und Anwendungen bereitstellt.

Ein Datenbanksystem wird in die Komponenten *Datenbank* (kurz: *DB*) und *Datenbank-Managementsystem* (kurz: *DBMS*) unterteilt, wobei der Datenbestand, also die Daten in der Datenbank, auf nichtflüchtigen Speichermedien abgelegt werden, und durch die laufende Verwaltungssoftware, dem DBMS, organisiert, strukturiert und kontrolliert werden. Für Abfrage und Verwaltung werden spezifische Datenbanksprachen (z.B. SQL für relationale Datenbanksysteme) angeboten. Somit bildet das DBMS die Schnittstelle zur Abfrage, Verwaltung und Manipulation der Daten. Das DBMS wird für das jeweilige Datenbanksystem konfiguriert und ist maßgeblich entscheidend für die Leistung des Systems. Einige ihrer wesentlichen Funktionen sind die „Speicherung, Überschreibung und Löschung von Daten“, „Verwaltung der Metadaten“ sowie

Vorkehrungen zur Sicherheit, Schutz und Integrität der Daten. (vgl. [INT05]) Darüber hinaus ermöglicht es den Betrieb durch mehrere Nutzer und optimierte Datenabfragen. Eine weitere wichtige Funktion von DBMS ist das Festlegen des jeweiligen Datenbankmodells. Diese Datenbankmodelle bilden das Fundament der Datenstruktur und ihrer Beziehungen. Abhängig vom Datenbankmodell gibt es daher unterschiedliche Datenstrukturierungen, an die sich das jeweilige Datenbankschema anpassen muss. Die bekanntesten Datenbankmodelle sind entweder „hierarchisch“, „netzwerkartig“, „relational“ oder „objektorientiert“ aufgebaut. So kann beispielsweise ein System mit objektorientiertem Datenbankmodell Beziehungen zwischen Objekten selbst verwalten, wobei die Objekte untereinander Eigenschaften vererben können. (vgl. [INT05])

2.1.2 Computer Aided Design (CAD)

Der Begriff „CAD (computer-aided design)“ bedeutet übersetzt „rechnergestützte Konstruktion“. Ursprünglich kennzeichnet CAD die „Verwendung eines Computers als Hilfsmittel beim technischen Zeichnen“. [INT06] Wurden anfänglich die Zeichnungen als ebene zweidimensionale Objekte abgebildet, ist inzwischen die dritte Dimension dazugekommen, so dass in den gängigen CAD-Anwendungen virtuelle Modelle von 3D-Objekten erstellt werden können. Dieses virtuelle 3D-Objekt dient dabei als Grundlage für das Ableiten und Ausgeben der weiteren technischen Zeichnungen und kann dabei in beliebiger Häufigkeit räumlich auf Bildschirm und Papier abgebildet werden. CAD-Anwendungen werden abhängig von der Anzahl der Dimensionen, die sie unterstützen, eingeteilt.

Mit *2D-CAD-Systemen* können einfache Zeichnungen durchgeführt werden. Bei vektororientierten Zeichenprogrammen beispielsweise werden dem Nutzer vorwiegend Linien zur Bearbeitung angeboten, wobei eine Gerade durch zwei Punkte beschrieben wird. Darüber hinaus gibt es auch umfassendere Objekte wie Kreise oder Ellipsen sowie weitere Hilfswerkzeuge wie Objektpositionierung. Zusätzlich können Farbe und Linientyp der Objekte als Attribute hinzugefügt werden. (vgl. [INT06])

2½D-CAD-Systeme sind sozusagen 2D-CAD-Systeme, die um eine halbe Dimension erweitert wurden. Dies wird z.B. gelöst indem die Objekte um die Angabe einer Höhe zur Erzeugung räumlicher Objekte ergänzt werden. So werden beispielsweise Geraden zu Wänden und Kreise zu Zylindern, die aber undurchsichtig und bei denen Dicke und Volumen nicht angegeben sind. (vgl. [INT06])

3D-CAD-Systeme sind wesentlich anspruchsvoller, weil die virtuellen 3D-Objekte alle Eigenschaften der Objekte berücksichtigen müssen, die bei 2½-Systemen nicht gespeichert und abgebildet werden. Für die Darstellung der virtuellen Objekte können in CAD-Anwendungen unterschiedliche Modelle implementiert werden. Die gängigsten sind das „Kanten/Drahtmodell“, „das Flächenmodell“, „das

Volumenmodell“, „das Körpermodell“, das „Parametrische Modell“ und die „Konstruktionshistorie“. (vgl. [INT06]) Dabei vereint das Körpermodell das Kanten-, das Flächen-, und das Volumenmodell, so dass Objekte nicht mehr nur die reine Geometrie besitzen, sondern auch Volumen und Materialeigenschaften wie z.B. „Dichte“, Oberflächenbeschaffenheit, „Elastizitätskoeffizient²“ oder „elektrische Leitfähigkeit“. Aufgrund dieser gekoppelten physikalischen Eigenschaften können die Objekte gewogen und verformt werden. Das komplexeste Modellierungsverfahren ist jedoch die „Konstruktionshistorie“. Hierbei werden die zu konstruierenden Objekte anhand einer Anleitung aus Grundgeometrien wie Zylinder oder Kegel zusammengesetzt. Gespeichert werden bei diesem Verfahren nur die „Reihenfolge“ der Konstruktionsschritte sowie die geometrischen Parameter der Grundkörper, so dass die Geometrie vielfältig und flexibel verändert werden kann. (vgl. [INT06])

Die neuesten CAD-Anwendungen implementieren sinnvoller Weise objektorientierte Datenbanken, wobei Änderungen des Designs anhand der Parameter der Objekte durchgeführt werden. Die Parameter können vordefinierten Relationen folgen und erlauben flexible Designvariation und – Adaption, aber auch „Wiederverwendbarkeit von Designbestandteilen“. [INT06]

2.1.3 Geoinformationssysteme (GIS)

„Geoinformationssysteme sind Informationssysteme zur Erfassung, Bearbeitung, Organisation, Analyse und Präsentation geografischer Daten.“ [INT08] GIS werden dabei in vielen Wissenschaften angewendet, darunter auch die Archäologie. Bei einem GIS wird zwischen Daten- und Datenstrukturmodellen unterschieden. Dabei legt das Datenmodell fest, welche geografischen Daten in einem GIS gespeichert werden können und wie diese Daten miteinander verknüpft sind. Im Gegensatz zum Datenstrukturmodell handelt es sich also um „Informationen über reale Objekte“, wohingegen das Datenstrukturmodell beschreibt, auf welche Weise diese Objekte und ihre Beziehungen im GIS abgebildet werden.

Innerhalb des Datenmodells werden die Objekte durch Eigenschaften beschrieben, wobei diese Attributdaten beschreibend, sachlich und thematisch sein sollten. In klassischen GIS werden diesen Sachdaten die Geometriedaten gegenübergestellt (z.B. Lage, Form, Größe), so dass neben sachlogischen Beziehungen auch topologische, also raumbezogene Beziehungen gespeichert werden können. Diese Beziehungen samt der Sach- und Geometriedaten werden in das GIS integriert und mit seiner Hilfe verwaltet, so dass den Nutzern Abfragen und Analysen angeboten werden, die entweder auf sachlogische oder topologische Beziehungen abzielen, sich aber auch auf beide Informationstypen beziehen können. Eine beispielhafte Abfrage für den letzten Fall wäre

² „Der [...] *Elastizitätskoeffizient* [...] ist ein Materialkennwert aus der Werkstofftechnik, der den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Verformung eines festen Körpers bei linear elastischem Verhalten beschreibt.“ [INT07]

„Abfrage der Eigentümerdaten (sachdatenbezogener Aspekt) zu allen Flurstücken, die zu einem ausgewählten Flurstück benachbart (topologischer Aspekt) sind und eine Fläche haben, die größer als 1000 m² (geometriebezogener Aspekt) ist.“

[INT08]

Für die Speicherung der Objekte, ihrer Eigenschaften sowie ihrer Beziehungen können verschiedene Datenstrukturmodelle genutzt werden. Die bekanntesten sind das Relationenmodell sowie vektor- oder rasterbasierte Datenstrukturmodelle. Im Gegensatz zum Relationenmodell, das Auskunft über Objekteigenschaften und –beziehungen gibt, wird in den vektor- und rasterbasierten Datenstrukturmodellen die Geometrie der Objekte beschrieben. Dies geschieht im Falle des vektorbasierten Modells mit Hilfe geometrischer Primitiva (z.B. Linien, Kreisbögen), die zusammengesetzt werden, und im Falle des rasterbasierten Modells durch Rasterelemente (z.B. Pixel), denen ihre geometrische (Länge und Breite) und radiometrische (Grauwerte) Auflösung zugeordnet werden.

Wie anfangs definiert sind die Hauptfunktionen von Geoinformationssystemen die Datenerfassung, -bearbeitung und –verwaltung. Zur Erfassung werden unterschiedliche Methoden genutzt. Dabei spielen grafische Digitalisierungsmethoden, wie die einer integrierten CAD-Software, eine große Rolle. Erfasst werden meist Karten, Pläne und zunehmend auch Satelliten- und Luftbilder, die digitalisiert werden. So können die Daten innerhalb des GIS bearbeitet werden – z.B. Konvertierung in ein anderes Dateiformat (z.B. Vektor-Rasterkonvertierung). Die Datenverwaltung wird mittels integrierter Datenbanksysteme ermöglicht. Für die Verwaltung der Geodaten werden dabei meist relationale oder objektrelationale Datenbanksysteme eingesetzt. Zu den grundlegenden Funktionen gehören auch verschiedene Werkzeuge, um die verwalteten Daten analysieren zu können. Insbesondere räumliche Analysen stehen dabei im Vordergrund, auf die in Kapitel 2.3 im Kontext der Archäologie näher eingegangen wird. Auch die Möglichkeit der Präsentation der Daten wird durch ein GIS realisiert. Spezielle Darstellungsmöglichkeiten/-formen, wie das Ein- und Ausblenden verschiedener Layer, die automatische Erstellung von Legenden bei Karten und Plänen, 3D-Darstellungen, Animationen, Geländeschnitte und weitere spielen insbesondere auch für die Analysefunktion des GIS eine entscheidende Rolle.

Meist werden kommerzielle Geoinformationssysteme genutzt, doch auch einige Open Source-Projekte, wie „Grass GIS“ [INT09], erfreuen sich zunehmender Beliebtheit. „GRASS GIS ist eine hybride, modular aufgebaute Geoinformationssystem-Software mit raster- und vektororientierten Funktionen.“ Es ist kostenlos nutzbar, da es unter der GNU (General Public License) steht. Das System unterstützt einige Funktionalitäten, darunter sind beispielweise „Raster- und topologische Vektordatenfunktionalität, 3D-Raster-Voxelbearbeitung, Bildverarbeitung, Visualisierungs-

möglichkeiten“ sowie Im- und Export verschiedener Datenformate. (vgl. [INT10]) Es ist plattformunabhängig und optional via grafischer Benutzeroberfläche oder per Kommandozeile bedienbar. Ein Beispiel für die Anwendung von Grass GIS zur „Voxel³-basierten“ Modellierung archäologischer Daten zeigt eine Studie von Lieberwirth (2007). (vgl. [LI07])

Darüber hinaus gibt es weitere Technologien, wie die Digitale Fotografie und natürlich auch das Internet, die in der Archäologie Anwendung finden. Da derartige Technologien mittlerweile allgegenwärtig sind – ein bekanntes Beispiel ist das Hochladen einer digitalen Fotografie auf einen Server via Internet – werden diese Technologien ausschließlich im Kontext der Archäologie näher betrachtet.

2.2 Digitale Dokumentation

Die Dokumentation ist innerhalb der Archäologie die wichtigste Aufgabe. Da die Dokumentation der Funde und Befunde heutzutage nicht nur in analoger, sondern meist auch in digitaler Form durchgeführt wird, ergeben sich neue Möglichkeiten, aber auch Herausforderungen, die in der Folge angesprochen werden. Zu Beginn jedoch soll der Fokus auf digitalen Erfassungstechniken liegen, bevor neuartige Verfahren, wie die Digitale Rekonstruktion und die automatisierte Klassifikation von Objekten, erörtert werden. Abschließend wird kurz die Problematik, die aus der Ermittlung eines gemeinsamen Standards für die Digitale Dokumentation hervorgeht, angesprochen, und ein Konzept vorgestellt, das versucht dieser Herausforderung gerecht zu werden.

2.2.1 3D-Dokumentation

Das folgende Kapitel soll einen groben Überblick über moderne Messtechniken, insbesondere optische 3D-Messtechniken, bieten, die für die Erfassung und Dokumentation archäologischer Daten genutzt werden. Dabei werden die verschiedenen Methoden kurz vorgestellt, ohne näher auf die Aspekte der Datenverarbeitung einzugehen. Die erfassten Daten dienen dabei auch als Grundlage für nachfolgende Analysen – dementsprechend dienen die erstellten Karten, Bilder, Modelle und weiteren Daten auch als Input für GIS-Systeme, um dort mit weiteren Daten verknüpft zu werden. (s. Kap. 2.3.2) Um die diversen Technologien einstuft zu können, wird zum einen zwischen dem Ausmaß des erfassten Bereichs und zum anderen zwischen der genutzten Methodik unterschieden. Die Größe des erfassten Bereiches wird dabei in „regional“, „lokal“ oder „Objekt“ eingeteilt. Bei der Methodik wird zwischen bildbasierten Methoden, wie die Photogrammetrie (vgl. [RE06]),

³ Der Begriff *Voxel* wird meist in der 3D-Computergrafik verwendet und bezeichnet einen Datenpunkt („Bildpunkt, Datenelement“) einer dreidimensionalen Rastergrafik. [INT11]

entfernungs-basierten Methoden, wie Laser-Scanning (vgl. [BO02]), oder einer Kombination aus beidem (vgl. [EL04]), unterschieden. In der Folge werden die in Tab.1 aufgelisteten Messtechniken und Verarbeitungsverfahren entlang der Dimension „Ausmaß des erfassten Bereichs“ vorgestellt.

Tabelle 1: Überblick: Verschiedene 3D-Messtechniken auf regionaler, lokaler und Objektebene

	Bildbasierte Verfahren (<i>Image-Based</i>)	Entfernungs-basierte Verfahren (<i>Range-Based</i>)
Regional	<ul style="list-style-type: none"> - „Spaceborne“: (multispektrale) Satellitenbilder/-aufnahmen (mittlere & Niedrige Auflösung) >> ASTER⁴ - „Airborne“: Digitale Luftbildkameras >> digitale (großformatige) Reihemesskameras, z.B. Vexcel Ultracam 	<ul style="list-style-type: none"> - „Spaceborne“: Radarsensoren: Shuttle: SAR >> SRTM-Daten - „Airborne“: „Airborne Laser Scanning“ [INT12] >> LiDAR (vgl. [INT13])
Lokal	<ul style="list-style-type: none"> - „Spaceborne“: Satellitenbilder/-aufnahmen mit hoher Auflösung - „Airborne“: digitale Reihemesskameras - Luftbildfotografie: z.B. Digitale Kameras montiert an Ballons oder ferngesteuerten Helikoptern >> Verfahren der Photogrammetrie - Erdaufnahmen: Digitalkameras & Photogrammetrie 	<ul style="list-style-type: none"> - „Airborne“: LiDAR - Erdaufnahmen: „Terrestrial Laser Scanning“ [INT14] (mittlere bis große Entfernung)
Objekt	<ul style="list-style-type: none"> - Digitale oder digitalisierte Bilder als Grundlage für 3D-Modellierung, z.B. mit Hilfe der „Insight3D-Software“⁵ 	<ul style="list-style-type: none"> - Laser Scanning (kurze Entfernung) - Streifenprojektionsverfahren

2.2.1.1 Regional

Zu Beginn sollen Messmethoden dargestellt werden, die die Daten auf *regionaler Ebene* erfassen. Hintergrund ist dabei, dass Befunde und Artefakte nur im Kontext verstanden werden können, sei es kultureller, sozio-ökonomischer oder umweltbedingter Art. (s. Kap. 2.3.1) Darüber hinaus können die Landschaften selbst Untersuchungsobjekte sein, da sie kulturelle Bedeutung besitzen, indem ihre Form und Aussehen durch kulturelle Entwicklung mitbestimmt werden. Die Hauptaufgaben derartiger Techniken sind das Aufzeichnen und Modellieren der Topografie⁶ und der Ermittlung sowie dem Kartieren der archäologischen Stätten und Merkmale. Grundsätzlich wird innerhalb dieser Dimension zwischen Sensoren unterschieden, die entweder an Bord von Weltraum-Flugobjekten (Spaceborne Sensors) oder an normalen Flugkörpern (Airborne Sensors) befestigt sind.

⁴ ASTER nimmt Bilder in 14 Kanälen des elektromagnetischen Spektrums auf: vom sichtbaren Licht bis ins thermische Infrarot (vgl. [INT15])

⁵ Insight3D: „Open-Source Image Based 3D Modeling Software“ [INT16]

⁶ Topografie: Teilgebiet der Kartografie – befasst sich mit der Vermessung, Darstellung und Beschreibung der Erdoberfläche und der damit fest verbundenen natürlichen und künstlichen Objekte.

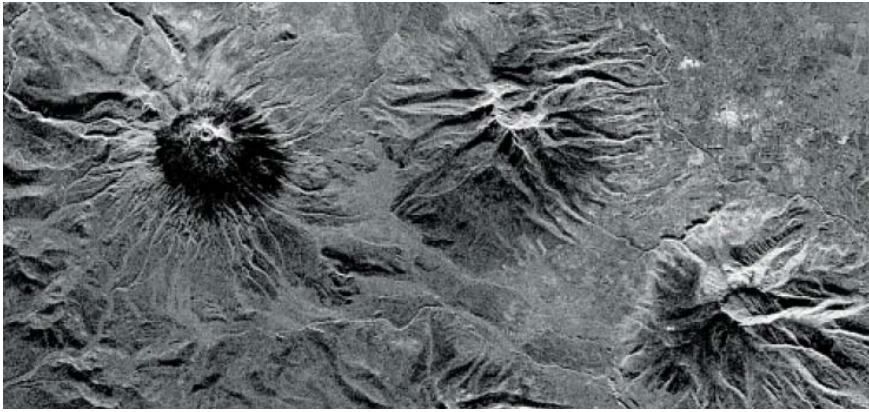


Abbildung 1: Eine interferometrische SRTM-SAR Aufnahme des Gebiets um einen Vulkan in Ecuador [BA08, S.246]

Die so genannten *Spaceborne Sensors*, die entweder an Spaceshuttles oder Satelliten montiert sind, werden genutzt, um Digitale Höhen- bzw. Geländemodelle (*Digital Elevation Models*) zu erstellen.

Der weltweite Zugang zu solchen Geländemodellen wurde einerseits durch den Einsatz der NASA erreicht. Innerhalb der Mission „Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)“ [INT17] wurde 2000 eine Höhenkartierung von 80% der Erdoberfläche (Lebensraum von 95% der Erdbevölkerung) durch ein „aktives Radarsystem (Synthetic Aperture Radar, SAR)“ [INT17] vorgenommen. Eine beispielhafte SRTM-SAR Aufnahme zeigt Abb.1. Diese „SRTM-Daten“ dienen der Berechnung eines hochgenauen drei-dimensionalen Gelände-modells bzw. „Höhenmodells der Erde“. [INT17] Eine konkrete Anwendung derartiger Geländemodelle zeigt sich in diversen Studien. So nutzten Hritz & Wilkinson (2006) die „Shuttle Radar Topographie, um antike Wasserkanäle zu kartieren“ (vgl. [HR06]) Für das „Auffinden und Kartieren antiker Siedlungshügel“ verwendeten auch Menze et al. (2006) SRTM-Geländemodelle, um die archäologischen Stätten virtuell zu erkunden. (s. Abb.2, vgl. [ME06]) Wie auch Abbildung 2 bereits erahnen lässt, können die Radardaten aus dem Weltall am effektivsten für archäologische Studien genutzt werden, wenn sie mit Daten anderer Quellen kombiniert werden (z.B. innerhalb eines GIS).

Andererseits sind Satelliten-aufnahmen eine alternative Grundlage zur Erstellung digitaler Geländemodelle. Für die Generierung von Modellen regionaler Erfassungsbereiche reichen im Gegensatz zur lokalen Ebene Satelliten-aufnahmen mit niedriger und mittlerer Auflösung aus. Satelliten wie Terra, LANDSAT oder SPOT

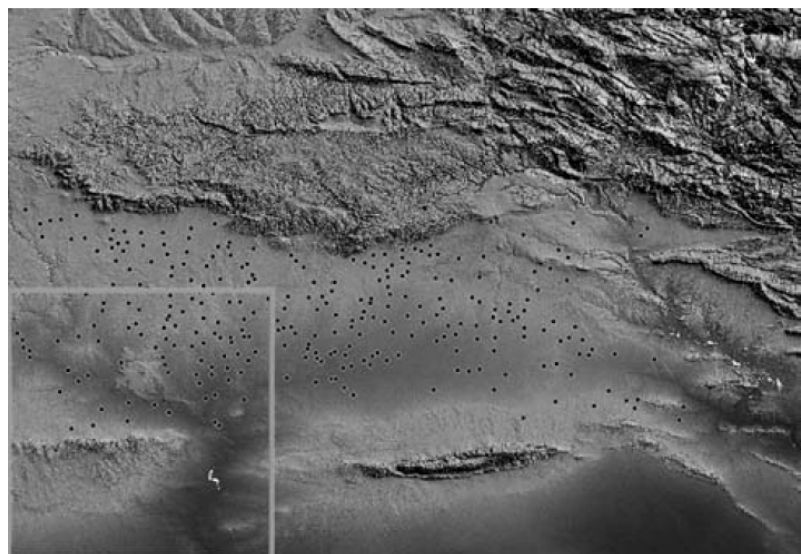


Abbildung 2: Digitales Geländemodell mit den Positionen der Siedlungshügel (Schwarze Punkte) [ME06, S.322]

versorgen die Forscher dabei mit Bildern, die in mehreren Kanälen des elektromagnetischen Spektrums aufgenommen wurden, d.h. „vom sichtbaren Licht bis hin ins thermische Infrarot“ [INT15]. Die Erzeugung von Stereobildpaaren, die die Grundlage der Geländemodelle bilden, wird im Falle der SPOT-Satelliten durch „Mehrfachbefliegung“ erreicht, so dass „die gleichen Gebiete unter verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen“ werden können. [INT18] Wissenschaftliche Instrumente wie „ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)“, das an Bord des Terra-Satellit multispektrale Bilder „in 14 Kanälen“ [INT15] aufnimmt, dienen den Archäologen insbesondere in bergigen Gegenden zur virtuellen Erkundung, aber auch zum Entdecken archäologischer Stätten. (vgl. [AL05])

Airborne Sensors hingegen werden an normalen Flugobjekten wie Flugzeugen oder Helikoptern befestigt, die auch unbemannt sein können. Zum Einsatz kommen dabei „analoge“ und „digitale, großformatige Reihenmesskameras“ [INT19, S.6-8] sowie auch Laser Scanner. Moderne digitale Reihenmesskameras, wie die Leica ADS80, können mit Hilfe ihrer digitalen Luftbildsensoren multispektrale Aufnahmen, sowie gleichzeitige Aufnahmen aus verschiedenen Blickwinkeln für die Photogrammetrie⁷ zur 3D-Modellierung tätigen. Innerhalb der Archäologie liegt der Fokus aber auf den multispektralen Aufnahmen durch Sensoren, die eine höhere spektrale, aber niedrigere räumliche Auflösung haben. Beispielsweise nutzten Rowlands & Sarris (2007) die Möglichkeiten multispektraler Aufnahmen, „um freiliegende bekannte vergrabene archäologische Überreste zu lokalisieren, und um unter der Oberfläche liegende Überreste zu skizzieren [...] mit dem Ziel zukünftige geophysische Erkundungen und archäologische Ausgrabungen zu ermöglichen“ [RO07, S.795] Entfernungsbasierte (*range-based*) Methoden wie Laser Scanning oder LiDAR⁸ (Light detection and ranging) komplettieren das Angebot der Daten aus der Luft, so dass diese als Primärquelle für die Topografische Kartierung angesehen werden können. Derartige Methoden haben in der Archäologie längst den Durchbruch feiern können. Neben der Generierung eines 3D-Modells (s. Abb.3 - Rechtes Bild), führt die LiDAR-Methode insbesondere für Erkundungen und Erfassungen in bewaldeten Bereichen zu nicht vergleichbaren positiven Ergebnissen. Beim Vergleich der linken und der mittleren Aufnahme in Abb.3 wird schnell deutlich, welchen Vorteil eine durch LiDAR erstellte Aufnahme im Gegensatz zu einer normalen hat, da sie die Konturen archäologischer Befunde preisgeben kann, die durch dichten Wald verdeckt sind.

⁷ Photogrammetrie = Messmethoden, die aus Fotografien räumliche Lage oder dreidimensionale Form ableiten.

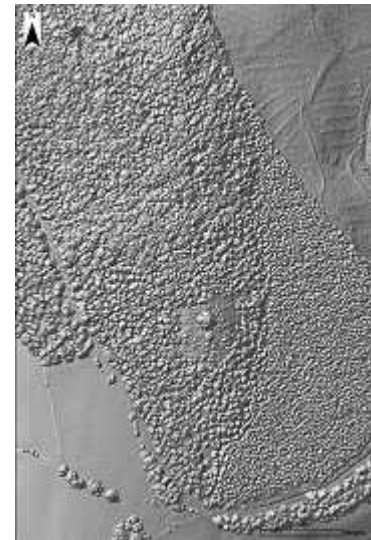
⁸ LiDAR „...ist eine dem Radar [...] sehr verwandte Methode zur optischen Abstands- und Geschwindigkeitsmessung sowie zur Fernmessung atmosphärischer Parameter. Statt Funkwellen wie beim Radar werden jedoch Laserstrahlen verwendet.“ [INT13]



Normale Fotografie



LiDAR-Aufnahme



Dreidimensionales Modell

Abbildung 3: Verschiedene Darstellungen des gleichen Bereichs [INT20]

2.2.1.2 Lokal

Fund- und Ausgrabungsstätten sind das Kernelement archäologischer Erforschung auf *lokaler Ebene*. Da materielle Überreste vergangener Ereignisse innerhalb eines abgegrenzten Bereichs wichtige Hinweise über soziale, kulturelle, technologische und ideologische Hintergründe der historischen Bewohner enthalten, ist eine gründliche Dokumentation dieser Befunde eine Notwendigkeit. Das Erfassen kleinerer Stätten, ihrer Architektur sowie der Ausgrabungsschichten, sind somit die Hauptaufgaben optischer 3D-Messmethoden für den lokalen Erfassungsbereich. Daher müssen die Aufzeichnungen auch in höherer Auflösung als auf regionaler Ebene erfolgen. Die adäquaten optischen Sensoren werden dabei entweder an Flugobjekten (auch Weltraum) oder an Plattformen am Boden montiert.

Satellitenaufnahmen mit hoher Auflösung ermöglichen die Erstellung hochauflösender digitaler Geländemodelle auf lokaler Ebene. Viele der verfügbaren Sensoren, z.B. SPOT 5, unterstützen räumliche und multispektrale Aufnahmen. Trotz ihres Potentials historische Rückstände aufspüren zu können, werden ihre Daten innerhalb der Archäologie aufgrund der hohen Kosten nur selten genutzt. Neben hochauflösenden Satellitenaufnahmen dienen Luftaufnahmen durch



Abbildung 4: Ferngesteuerter Helikopter mit Digitalkameras [INT21]

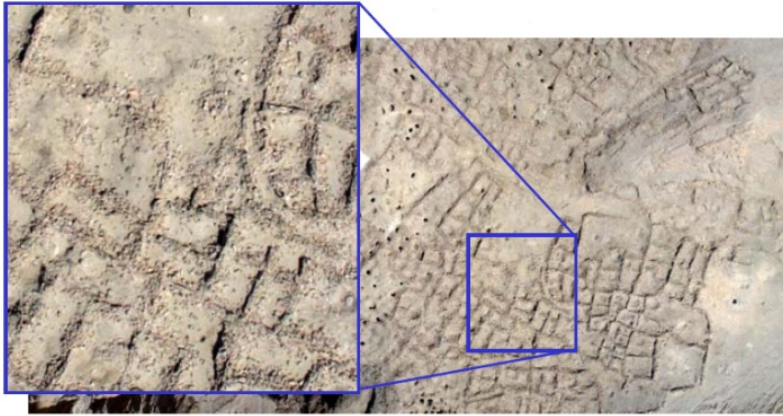


Abbildung 5: Hochauflösendes Luftbild (Bodenaufklärung: 3cm) [INT21]

digitale Reihemesskameras oder LiDAR auch für lokale Bereiche als Datengrundlage für die Erstellung dreidimensionaler Modelle der archäologischen Oberflächenmerkmale samt umliegendem Gelände. Da Luftaufnahmen aus großer Entfernung nur die Erstellung

von Grundplänen erlauben, sind für die Erfassung aus horizontaler Perspektive andere Lösungen zu erwägen. Eine einfache und oft durchgeführte Methode ist die Luftbildphotogrammetrie aus kleiner Flughöhe mit Hilfe von Ballons, oder ferngesteuerten, unbemannten Flugobjekten. Beispielsweise können einem ferngesteuerten Helikopter samt normaler Digitalkameras (s. Abb. 4) mit Hilfe von GPS/INS basierter Navigation, Flugpfade und die Orte, an denen eine Aufnahme erfolgen soll, vorgegeben werden. (vgl. [INT21]) Abb.5 zeigt die hohe Auflösung einer durch den Helikopter durchgeführten Aufnahme. Diese erlauben photogrammetrisches und somit räumliches Aufzeichnen der Topografiedaten, und beinhalten somit großes Potential hinsichtlich der Dokumentation komplexer archäologischer Fundstätten. Probleme wie das Umpositionieren stationärer Laser Scanner zur kompletten Erfassung, können so umgangen werden.

Solche stationären Laser Scanner sind neben digitalen Kameras die Hauptinstrumente zur Erfassung der Daten vom Boden aus. Trotz der recht hohen Kosten sowie des hohen Zeitaufwands werden Laser Scanner in der Archäologie auf regionaler Ebene oft eingesetzt, wenn Reliefs und Figuren erfasst, oder aber wenn freiliegende Oberflächen von Besiedlungsschichten für die Stratigrafie⁹ dokumentiert werden sollen. (vgl. [DO06]) Wegen der oft sehr komplexen Oberflächen archäologischer Merkmale können jedoch Probleme infolge von Überlagerungen und daraus entstehender Fehlinterpretationen auftreten. Digitale Kameras dagegen sind mittlerweile für wohl jeden Archäologen erschwinglich und dementsprechend weit verbreitet. Mit Hilfe der Photogrammetrie-Methodik kann aus den Fotografien, aber auch aus Messbildern spezieller Kameras, die dreidimensionale Form oder die räumliche Lage eines Objektes generiert werden. Die Wahl zwischen Scanner-Daten und Bildern wird meist durch das verfügbare Budget des Projektes sowie den Forschungsschwerpunkt und den damit verbundenen Detaillierungsgrad entschieden. In

⁹ Stratigrafie: Als archäologische Stratigraphie bezeichnet man die bei einer Ausgrabung feststellbare Abfolge von Straten bzw. Schichten, die durch natürliche Ablagerungen sowie Baumaßnahmen entstanden ist.

manchen Projekten wurden aber auch diverse Messtechniken (z.B. Photogrammetrie und Laser Scanning) kombiniert und miteinander verglichen. (vgl. [BI07, S.6] und [KA04])

2.2.1.3 Objekt

Artefakte, die während Ausgrabungen gefunden oder schon in Museen gelagert werden, geben „Hinweise auf vergangene Kulturen und deren Lebensweisen“ [INT22]. Damit geben sie Auskunft über das kulturelle, sozioökonomische und technische Konzept, das zum Herstellungszeitpunkt in der jeweiligen Region vorherrschte. Das gründliche Dokumentieren derartiger Artefakte (z.B. Stein- und Metallwerkzeuge oder Keramikgefäße), ist daher nicht nur Grundvoraussetzung für typologische und chronologische Forschungen, sondern gibt auch Hinweise für andere Untersuchungen, z.B. hinsichtlich des Güter-, Technologie- und Ideenaustauschs älterer Kulturen. Während Artefakte bis heute üblicherweise noch immer in 2D durch Zeichnungen und Fotografien aufgezeichnet werden, fügt die 3D-Dokumentation buchstäblich eine neue Dimension für archäologische Studien auf der Objektebene hinzu, indem sie zusätzliche Informationen und somit neue Untersuchungsmöglichkeiten, wie den Vergleich von Struktur und Form, anbietet. Darüber hinaus können virtuelle Replikate in beliebiger Häufigkeit erstellt werden, um software- aber genauso webbasierte, verteilte Untersuchungen an dem Objekt zu ermöglichen, ohne dass die originalen Artefakte dabei beschädigt werden.

Zur digitalen 3D Dokumentation und virtuellen Rekonstruktion der Artefakte werden entweder Bilder oder aktive Sensoren (Laser Scanner oder Streifenprojektionsverfahren¹⁰) eingesetzt. Da sich die 3D-Rekonstruktion von den Erfassungs- und Dokumentationsmethoden grundsätzlich abgrenzt, wird sie im nächsten Kapitel kurz näher vorgestellt. Zur Dokumentation zeichnen aktive Sensoren unmittelbar Form und Geometrie der Objekte auf, die somit schnell verfügbar sind – eine Weiterverarbeitung der Daten hinsichtlich einer automatisierten Objektklassifikation wird in Kap. 2.2.3 näher beschrieben. Doch auch die in der Herstellung um ein vielfaches billigeren digitalen Bilder beinhalten die notwendigen Informationen, um 3D-Modelle samt Textur erstellen zu können (z.B. durch Photogrammetrie). Mit dem doch klassischen Ansatzes des „Video-To-3D“ kann diese Umwandlung sogar automatisiert werden, solange die Intervalle zwischen den Bildern kurz gewählt sind, kein Belichtungswechsel stattfindet, und die Texturen in den Bildern scharf ist. Bei der „Video-To-3D“-Methode wird aus einer „Videosequenz einer statischen Szene als Input [...] ein visuelles 3D-Modell generiert.“ (s. Abb.6, vgl. [PO02]) Nichtsdestotrotz – sind die zuvor genannten Voraussetzungen nicht

¹⁰ Streifenprojektionsverfahren: „... Gruppe optischer Messmethoden [...], bei der Bildsequenzen zur dreidimensionalen Erfassung von Oberflächen verwendet werden.“ [INT23]

erfüllt, oder erfordert die Modellierungsaufgabe präzise, detaillierte und reliable Resultate, werden semi-automatische oder gänzlich manuelle Messungen benötigt. (vgl. [GR06, S.46] und [GR04]) Die Entscheidung über die Wahl der jeweiligen Messmethode auf Objektebene ist schwierig, und hängt neben den bekannten Faktoren, insbesondere auch von der Erfahrung der Nutzer hinsichtlich komplexerer Verfahren ab. So werden aktive Sensoren von unerfahrenen Anwendern aufgrund des automatisierten Ablaufs bevorzugt.

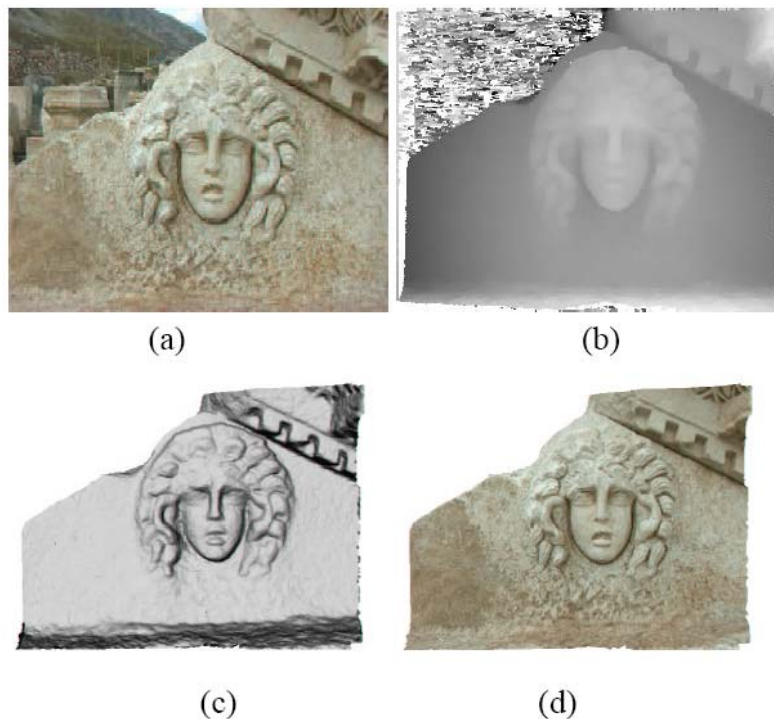


Abbildung 6: 3D-Konstruktion aus Videodaten [PO02, S.4]

- (a) „Original Video-Frame“
- (b) „depth map“
- (c) „shaded“
- (d) „texturierte Sicht des 3D-Modells“

2.2.1.4 Resümee (3D-Dokumentation)

Optische 3D und damit zusammenhängende Messtechniken sowie -methoden spielen zwar schon eine große Rolle in der Archäologie, haben ihr volles Potential aber noch nicht ausgeschöpft. Zwar sind die aktuellsten Messtechnologien meist recht teuer, trotzdem konnte gezeigt werden, dass viele der hier vorgestellten Methoden mittlerweile finanziell erschwinglich und somit auch in Reichweite für archäologische Projekte sind. Trotzdem sind Budgeteinschränkungen wohl noch einer der Hauptgründe, wobei auch der Kosten-Nutzen-Faktor einen Einfluss hat, da eventuell der Mehrwert nicht groß genug ist, um die Kosten nicht nur finanzieller, sondern auch geistiger¹¹ und zeitlicher Art zu rechtfertigen. Ein typisches Beispiel ist die begrenzte Nutzung bildbasierter Methoden zur Dokumentation, trotz der vielen recht preiswerten und nutzerfreundlichen Werkzeuge zur Datenerfassung- und Bearbeitung. Das lässt darauf schließen, dass eine engere Kooperation zwischen Archäologen und technischen Experten einen positiven Einfluss auf die Nutzungsmenge bildbasierter Techniken ausüben könnte, um mögliche Hürden oder Barrieren abzubauen. (s. auch Kap. 2.4) Beim

¹¹ Geistige Kosten bedeuten in diesem Zusammenhang: Geistiger bzw. kognitiver und mentaler Aufwand, der nötig ist, um neue Techniken und Technologien zu erlernen.

Vergleich zwischen der bildbasierten Methode der Photogrammetrie und der entfernungsbasierten Methode des Laser Scanning, „scheint es, dass Laser Scanning mehr geeignet ist für die Rekonstruktion der kleinen Partikel des Objekts, [...] Aber es ist bewiesen [...] dass photogrammetrische 3D-Modellierung [...] in der Lage ist, ebenso akkurate Objektmodelle zu produzieren.“ [BI07, S.6] Die Kombination aus beiden zumindest scheint ein sehr guter Ausgangspunkt zu sein, da die Schwächen des einen Ansatzes durch die Stärken des anderen ausgeglichen werden können. Wie beschrieben haben die jüngsten Entwicklungen in der digitalen Photogrammetrie gezeigt, dass die geometrischen Resultate, auch bei nur wenigen verfügbaren Bildern, ähnlich detailliert wie die der aktiven Sensoren sein können. So wird die Entscheidung über die zu wählende Methodik nicht mehr durch den Detaillierungsgrad eingeschränkt. Um zufriedenstellende Resultate zu erreichen, die einen Mehrwert für archäologische Forschung aufweisen, sollte die Wahl schließlich nur von den Faktoren Budget, Zeit, zu untersuchender Bereich, zu untersuchendes Artefakt, Forschungsschwerpunkt, Erfahrung des Nutzers und dem finalen Ziel des dreidimensionalen Modells abhängen. Visuell hochwertige 3D-Modelle, die für Dokumentation weniger von Interesse sind, werden eher für die 3D-Rekonstruktion oder 3D-Animationen benötigt (s. Kap. 2.2.2)

Generell haben alle hier vorgestellten optischen, digitalen 3D-Erfassungsmethoden und –werkzeuge einige Vorteile gegenüber den herkömmlichen Verfahren, die abschließend aufgelistet werden sollen. Ihr größter Nutzen ist, dass die generierten Modelle nicht nur einen Maßstab haben, und sich somit diversen Skalierungen anpassen können. Darüber hinaus beugt die kontaktlose Datenerfassung Beschädigungen der archäologischen Objekte vor. Auch die Möglichkeit des Fortsetzens der archäologischen Feldarbeit während der parallelen Datenbearbeitung und –analyse, ist neben der immer weiter ansteigenden Anzahl von Sensoren, Daten, Instrumenten sowie Bearbeitungs- und Analysewerkzeugen, ein plausibler Grund für die Wahl digitaler Erfassungs- und Dokumentationstechniken.

2.2.2 Digitale Rekonstruktion

Wie im vorherigen Kapitel angedeutet unterscheidet sich die Rekonstruktion archäologischer Funde und Befunde grundsätzlich von der Dokumentation. Soll die Dokumentation das Gegebene widerspiegeln wird bei der Rekonstruktion das nicht Gegebene dargestellt. So sollen durch die Rekonstruktion die Lücken geschlossen werden, die die Dokumentation aufgeworfen hat. Beim Schließen dieser Lücken fließen neben logischen Schlussfolgerungen und Analogien auch Annahmen in die rekonstruierten Elemente. Daher sind die Forscher eher wie Detektive, die Informationsstücke

zusammensetzen. Das Potential digitaler Technologien zur Rekonstruktion (3D-Modellierung, Verknüpfung der Daten, Darstellung räumlicher Beziehungen etc.) ist bekannt, so dass *digitale Rekonstruktionen* erstellt und angewendet werden. Daher soll im Folgenden ein grober Überblick über die Vor- und Nachteile digitaler Rekonstruktion anhand einer Studie von Olsen et al. (2004, vgl. [OL04]) gegeben werden. Hierbei wurden Wissenschaftler während des damaligen „Botai-Projekts“ hinsichtlich der Anwendung digitaler Rekonstruktionstechniken aber auch –ergebnissen befragt. In ihren Ausführungen unterstreichen Olsen et al. die Bedeutung der Rekonstruktion:

„Simulation or reconstruction has been a key for understanding complex scene, spatiotemporal relationship and sequential context. Digital reconstruction is an emerging method for rapid and efficient prototyping of assumptions and visual reasoning.“ . [OL04, S.1]

Daher wird zu Beginn des Kapitels der Rekonstruktionsprozess und seine inverse Eigenschaft, auch „inverse Physik“ genannt, kurz erläutert, um nachfolgend die Vor- und Nachteile digitaler Rekonstruktionstechniken abzuleiten. Dabei wird der Nutzen detaillierter digitaler Rekonstruktionen beim Entdecken neuer Zusammenhänge, z.B. durch „räumliche Schlussfolgerungen“, beschrieben. (vgl. [OL04, S.1])

Der Ermittlungsprozess innerhalb des Rekonstruktionsvorgangs ist mit dem einer „Tatortuntersuchung“ zu vergleichen. Olsen et al. umschreiben diesen Prozess als „inverse Physik“. Hierbei müssen die hinterlassenen Komponenten des Tatorts Fundstätte wieder zu einem Ganzen zusammengesetzt werden. Im Allgemeinen sollen *Artefakte, Prozesse und Beziehungen* wiederhergestellt, im Konkreten beispielweise ein Haus aus Abdrücken im Boden rekonstruiert werden. Der Prozess der inversen Physik beinhaltet nicht nur logische Argumente, sondern auch Analogien und Annahmen, die in der Erfahrung der Wissenschaftler „versteckt“ sind. (vgl. [OL04, S.1]) Den genauen Ablauf zeigt Abb. 7. Kognitive Fähigkeiten der Archäologen,

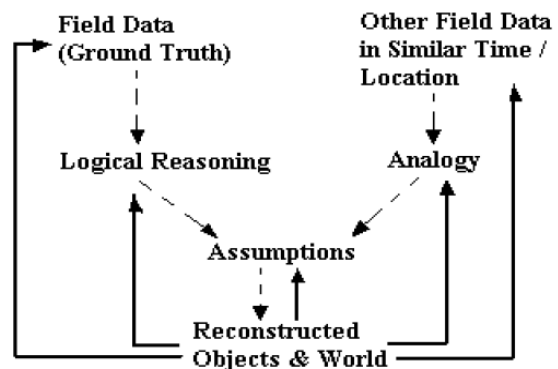


Abbildung 7: Prozess der inversen Physik [OL04, S.2]

„Objekte und Welten“ werden anhand von Annahmen („Assumptions“) rekonstruiert, wobei diese Annahmen aufgrund logischer Schlussfolgerungen („Logical Reasoning“) und den „Analogien“ getroffen werden. Grundlage hierfür sind wiederum die diversen Felddaten („Field Data“ und „Other Field Data“). Die „rekonstruierten Objekte und Welten“ sind schließlich neue Information, die als solche alle Ebenen des sich wiederholenden Prozesses beeinflusst.

- 2 Beispiele für Rekonstruktionsmethoden:
- Mauer: Analogie für die Textur, logische Schlussfolgerung für die Höhe
- Dach: Analogie zu Dächern auf Bildern und logische Schlussfolgerung aufgrund verfügbarer Baustoffe

insbesondere die Mustererkennung, spielen eine große Rolle innerhalb dieses Prozesses, so dass viele unterschiedliche Lösungen das Ergebnis sein können. Ein schnelles Feedback im Sinne einer Vorschau innerhalb der Ebene der Annahmen wäre wünschenswert, damit Annahmen bestätigt oder verworfen werden können, bevor die rekonstruierten Elemente als „Ground Truth“ (s. Abb.7) für weitere Zwecke verfügbar werden. Bestätigte Annahmen und daraus resultierende Modelle (Objekte, Prozesse oder Beziehungen) können als Kommunikationsträger zwischen räumlich getrennten Forschern oder für die Präsentation im Internet genutzt werden.

In der Archäologie stehen zur Rekonstruktion zwei räumlich-zeitliche Analogien im Mittelpunkt des Interesses – „timeline analogy“ und „proxy analogy“. Analogien entlang der Zeitachse ermöglichen das Ableiten der Artefakt-, Prozess- oder Beziehungsmerkmale von den typischen kulturellen Eigenschaften eines bestimmten Zeitraums, z.B. einer Epoche. Die Kategorie „proxy analogy“ beschreibt dagegen Kulturmerkmalsvergleiche mit heutigen Orten. Aufgrund der unterschiedlichen kognitiven Fähigkeiten der Forscher können viele mögliche Annahmen, Ergebnisse und dementsprechend auch rekonstruierte Objekte entstehen. Um diese Zahl einzudämmen, können zwei Verfahren angewendet werden. Das „physical principle“ bietet als bestmöglichstes Rezept das Auswählen der Annahme, die am sichersten belegt werden kann – wohingegen das „minimal principle“ die Lösung vorschlägt, bei der nur ein Minimum an Annahmen, unterstützendem Material und Energie benötigt wird. (vgl. [OL04, S.2])

Die Studie zeigte, dass Analogien ähnlicher Artefakte durch die Datenbank, in der die Objekte dokumentiert wurden, übernommen werden konnten. Währenddessen werden anhand der verfügbaren wissenschaftlichen Daten und daraus folgender Schlussfolgerungen „Unsicherheiten“ reduziert. Somit liegen die eigentlichen wissenschaftlichen Entdeckungen bei der Rekonstruktion innerhalb des Prozesses, bei dem die Anzahl der zu treffenden Entscheidungen anwächst. Dieser Auswahlprozess findet nach herkömmlicher Durchführung zwischen Archäologen und Künstlern statt. Die Stärke der analogen Rekonstruktion liegt dabei in ihrer Flexibilität und Mobilität, so dass diese Methode weiterhin häufige Anwendung findet. Digitale Rekonstruktionsmethoden sind dagegen weniger flexibel, kommen aber ohne Künstlerpräsenz aus, so dass der Auswahlprozess zwischen Archäologen und System stattfindet. Obwohl Human Computer Interfaces sowie Ein- und Ausgabemöglichkeiten weiterhin über Steigerungspotential verfügen, überzeugen digitale Rekonstruktionsmethoden durch die Detailliertheit sowie Dreidimensionalität der erzeugten Objekte. Die Studie zeigte dabei, dass 3D-Modelle Informationen bergen, die in zweidimensionalen Darstellungen vorenthalten werden. Da die Wahl des Detaillierungsgrads aber vom Anwendungsbereich abhängt und einige Wissenschaftler immer noch an eingescannten analogen

Zeichnungen als erste Wahl festhalten (vgl. [TA01, S.203]), muss bei der Wahl der Rekonstruktionsmethode der Detaillierungsgrad hinsichtlich des Forschungsgegenstands angepasst



Foto (2D) [INT24]



Zeichnung (2D) [INT25]



3D-Rekonstruktion [INT26]

Abbildung 8: Verschiedene Gebäudedarstellungen

werden. Innerhalb der Studie unterstrichen die befragten Archäologen das Potential der 3D-Darstellungen für räumliche Beziehungen, als sie nach der virtuellen 3D-Besichtigung besseres räumliches Verständnis angaben im Vergleich zur zweidimensionalen Ansicht. Einen beispielhaften Vergleich zwischen den unterschiedlichen Darstellungen bietet Abbildung 8. Auch der Nutzen von Datenbanken und Querverweisen wurde innerhalb der Studie hervorgehoben – so wurden mögliche Kleiderfarben aus den zur damaligen Zeit vorkommenden Pflanzen, Mineralien und Produktionsprozessen generiert und in die Datenbank zur Rekonstruktion eingetragen. Mit fortschreitender Technologie können zukünftige Rekonstruktionstechniken auch derart mobil gestaltet werden, dass eine Rekonstruktion „on-site“ (vgl. [OL04, S.3]) die Anzahl der wiederholten Stättenbesuche, z.B. aufgrund fehlerhafter Messungen, reduzieren kann. Auch bei überfluteten oder vom Verfall bedrohten Stätten können anhand der gesammelten Daten die Orte zur virtuellen Exploration rekonstruiert werden. Sogar in der Unterwasserarchäologie, bei der oftmals alte Schiffswracks untersucht werden, können digitale Rekonstruktionstechniken den virtuellen Zugang zu den Wracks und den dazugehörigen Artefakten ermöglichen. Innerhalb des „VENUS“-Projekts haben europäische Forscher eine komplexe Prozedur entwickelt, um besonders tief liegende Schiffswracks untersuchen zu können. Spezielle Kameras und akustische Schallmessgeräte erstellen in Echtzeit dreidimensionale Fotomosaike und Collagen, die virtuelle Erforschungen in unendlicher Anzahl ermöglichen, um bis jetzt verborgene Informationen freizulegen. (vgl.[INT27] und [INT28])

Abschließend lässt sich festhalten, dass digitale Rekonstruktionstechniken Archäologen als Hilfsmittel dienen können – ihr größter Nutzen sind:

- Assistierende Funktion durch schnelles Feedback
- Reichhaltige Präsentation bietet Grundlage für neue Annahmen, Logische Schlussfolgerungen und Analogien im „inversen Physik“-Prozess
- Virtuelle Exploration schwer erreichbarer Fundstätten
- Verteilte wissenschaftliche Kommunikation und Erforschung, auch durch Online-Präsentation
- Positives Beispiel: Integration von logischen Schlussfolgerungen in Datenbank

2.2.3 Automatisierte Klassifikation von Fundobjekten

Die Typologie, also die Klassifikation von Fundobjekten hinsichtlich der Kriterien Form und Material, ist die grundlegende Methode in der Archäologie, um Objekte zu Typen zusammenzufassen und einzuordnen. Dies ermöglicht den Vergleich von Fundobjekten untereinander, aber auch den Vergleich von Fundsituationen unterschiedlicher Ausgrabungen. Darüber hinaus können Klassifikationen die Grundlage weiterer Analysen bilden, so kann bspw. untersucht werden, in welcher Form bestimmte Gefäßtypen regional verbreitet waren.

Eine große Einschränkung für die Möglichkeit von Vergleichen unterschiedlicher Fundsituationen bei größerer räumlicher Entfernung sind die heterogenen Klassifikationsschemata und Typologien, die sich in unterschiedlichen Fundregionen gebildet haben. Aufgrund dieser Einschränkung können Vergleiche des Aufbaus unterschiedlicher Fundkomplexe heutzutage kaum oder nur noch mit weiterem hohem Aufwand durchgeführt werden. Ein anderes Problem bildet der generell große Zeitaufwand, der nötig ist, um eine solide Klassifikation, die für eine Weiterverarbeitung der Funde unabdingbar ist, manuell zu erstellen, so dass daher oft wenig Zeit für die eigentliche Analyse der Fundkomplexe sowie für Vergleiche nicht regionaler Fundsituationen übrig bleibt.

Aufgrund des technischen Fortschritts können Fundobjekte mittlerweile in dreidimensionaler Form digital dokumentiert werden. Diese Dokumentationsform dient nicht nur der besseren Präsentation auf dem Bildschirm, sondern ermöglicht auch eine Analyse der Objektstrukturen (Form, Material). An dieser Stelle setzt ein Konzept zur automatisierten Klassifikation von Keramikfunden an, an dem die Technische Universität Chemnitz seit einiger Zeit intensiv forscht. Dabei entwickelten sie ein „Klassifikationssystem [...], das es erlaubt die immanente Primärinformation der archäologischen Funde zügig, kostengünstig und vor allem hochkommunikabel der eigenen Wissenschaft und Nachbarwissenschaften, verfügbar zu machen.“ [BR05, S.1] Um den zeitaufwändigen Arbeitsschritt der manuellen Klassifikation zu verkürzen, wurden die zentralen Vorgänge der Klassifizierung

automatisiert. Dazu werden zuerst die Merkmale der Fundobjekte (Keramikgefäße) automatisch extrahiert, auf deren Grundlage Ähnlichkeiten und Unterschiede der Objekte erfasst werden, so dass die Gefäße den jeweiligen Gefäßklassen zugeordnet werden können. Dabei erfolgen das Einschätzen des Ähnlichkeitsmaßes sowie die Einteilung der Gefäße in Gefäßtypen und Varianten in manueller Form (s.u.). Um dies zu erleichtern werden die durch den Computer analysierten Merkmale als Form- und Eigenschaftsbeschreibungen ausgegeben, die wiederum an den Sprachgebrauch der Archäologen angepasst sind. Zur Umsetzung dieser fachspezifischen Gefäßbeschreibung wurde ein umfangreicher Thesaurus implementiert. Seine Informationen erhält dieser von einer eingebundenen Ontologie, mit derer Hilfe Beziehungen zwischen den verschiedenen Merkmalen nachvollziehbar dargestellt werden können. Abgesehen von der Klassifikationsfunktion soll das System den Archäologen auch als Datenbank dienen, die deren Anforderungen und Bedürfnisse berücksichtigt, um Voraussetzungen für eine fachspezifische Verwaltung der Funde und Fundkomplexe zu schaffen. So soll das System beispielsweise „Suchanfragen beantworten können - D.h. zu einem gegebenen Objekt sollen die ihm ähnlichsten innerhalb einer Datenbank gefunden werden.“ [BR05, S.2]

Die Erfassung der Objekte erfolgt via Laserscanning, so dass dreidimensionale Modelle in Form von „Dreiecksnetzen (auch ‚Meshes‘) vorliegen“ [BR05, S.2], die als Grundlage für die automatisierte Merkmalsextraktion, in Form von Metadaten wie Gefäßmaße, aber auch Merkmalen wie Aufbau und Komplexität, dienen. Dieser Teilaspekt der automatisierten Merkmalerkennung wird daher in der Folge kurz näher beleuchtet. Darüber hinaus werden die wesentlichen Systemaspekte, die sich mit der Identifikation von Gefäßähnlichkeiten und der Einteilung in Hierarchien beschäftigen, in groben Zügen beschrieben.

Bei der **automatisierten Merkmalsextraktion** wird zwischen primären, sekundären und tertiären Merkmalen unterschieden. Dabei werden die primären Merkmale genutzt, um die Gefäße in Hauptformen einzuteilen. Die sekundären und tertiären Merkmale dienen dagegen der Einteilung in Gefäßtypen und Gefäßvarianten.

Zum Erfassen der *primären Merkmale* werden Profillinien¹² berechnet, die sich an der Rotationsachse orientieren, die zuvor ermittelt wird, um das Objekt mit Hilfe grafischer Verfahren „am Weltkoordinatensystem“ auszurichten. Die Profillinien spiegeln (Quer)Schnitte durch das Objekt wieder, und um für die Hauptgefäßform untypische Schnitte (z.B. Schnitt mit Henkel) auszufiltern, wird eine „repräsentative Profillinie“ [BR05, S.4] berechnet. Diese ergibt sich aus dem Median der

¹² Profillinien: sozusagen alle Linien, die ein Profil des Objektes zeigen

Profillinien. Schließlich werden auf der „gemittelten Profillinie“, also der ermittelten Gefäßform, charakteristische Punkte, wie Minima und Maxima der x- bzw. y-Achse, erfasst, um die verschiedenen Gefäßsegmente unterscheiden zu können. Die Profillinien und die Segmente werden darüber hinaus in einfache geometrische Figuren abstrahiert (meist Trapeze), damit in der folgenden Klassifikation Gefäße mit vorher definierten Prototypen verglichen werden können, um sie den Klassen zuzuordnen.

Zur Berechnung der *sekundären und tertiären Merkmale*, die die Grundlage für die Einteilung in Gefäßtypen und -varianten bilden, werden die jeweiligen Gefäßsegmente betrachtet. Um die Segmente einzeln betrachten zu können, muss das System die Segmente zuvor voneinander trennen. Hierfür werden die berechneten charakteristischen Profilpunkte als Trennstellen genutzt. (s. Abb.9) In diesem Schritt werden den Gefäßen u.a. folgende Merkmale zugeteilt: Bauchumbruch, Rand, Boden, Handhabe(n) sowie Füße/Füßchen. Um die verschiedenen Bereiche analysieren zu können, betrachtet das System den Krümmungsverlauf des jeweiligen Profilsegments. Die Krümmungsverläufe beschreiben bestimmte Formen wie „gewölbt“, „einziehend“, „gerade“ oder „S-förmig“ [BR05, S.4], wobei sich diese Begriffe am Sprachgebrauch der Archäologen orientieren. Zudem kann die Stärke der Biegung identifiziert werden.

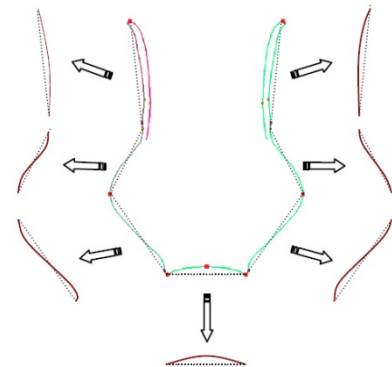


Abbildung 9: Durch das Zerlegen der Profillinie in Profilsegmente und Auswertung des Krümmungsverlaufs kann man zwischen diversen Segment-

Für den *Bauchumbruch*, der immer gewölbt ist, ermittelt das System den Umfang der Wölbung. Hierzu wird aus der Krümmung der Profillinie ein Krümmungskreis gebildet und dessen Durchmesser berechnet. Ist der Durchmesser klein, deutet dies auf einen „schmalen“, ist er groß, auf einen „weiten“ Bauchumbruch hin. Darüber hinaus kann das System zwischen einem „abgerundeten“ Bauchumbruch (bei konstanter Krümmung), und einen „scharfen“ Bauchumbruch (bei großen Krümmungsschwankungen) unterscheiden. [BR05, S.5] Auch ein Maß für die Länge der Wölbung



Abbildung 10: Die Länge der Übereinstimmung der Wölbung mit dem Krümmungskreis lässt sich als weiteres Kriterium verarbeiten. [BR05, S.5]

kann gewonnen werden, indem der Winkel zwischen den beiden Stellen, an denen Krümmungskreis und Verlauf der Profillinie nicht mehr übereinstimmen, gemessen wird. (s. Abb.10) Bei der Analyse des *Randbereichs* wird der Rand in die Komponenten Randstellung, Lippenbildung

und Randabschluss unterteilt. Die Randstellung wird auf Basis der Analyse der Profilssegmente anhand des Krümmungsverlaufs (s.o.) ermittelt. Abhängig vom Krümmungsverlauf wird die Randstellung u.a. als „steil“, „kurvig“, „aus- oder einbiegend“ beschrieben. Zur Identifikation der Lippenbildung ist dagegen eine andere Methode nötig. Hierbei wird die Mittelachse des Polygonzugs¹³ des jeweiligen Randbereichs ermittelt und um Distanzinformationen ergänzt. Diese gekoppelten Distanzinformationen geben Aufschluss über die Art der Lippenbildung, z.B. „Verdickung“ oder „Verjüngung“. (s. Abb.11) Für die Unterteilung der Eigenschaften des Randabschlusses in „gerundet“, „spitz“, „gerade“ und „gekuhlt“ ist wieder das Krümmungsverhalten des entsprechenden Segments ausschlaggebend. Beim Bodenbereich werden die Merkmalseigenschaften ähnlich wie die des Randbereichs ermittelt, jedoch kann nur zwischen einem „geraden“ und einem „einziehenden“ Boden unterschieden werden. Der Bereich der *Handhabe(n)*¹⁴ und *Füße* wird durch das System noch nicht abgedeckt – Ansätze und Methoden sollen jedoch erforscht werden.

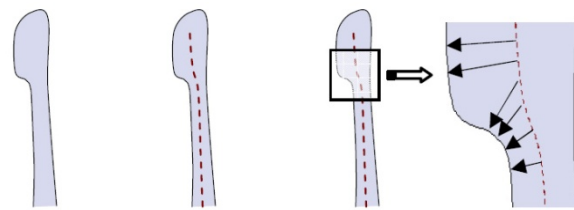


Abbildung 11: Dargestellt sind die Rand-Profillinie (links), ihre Mittelachse (mittig) und die an die Mittelachse gekoppelten Distanzinformationen (rechts). Aus den Distanzinformationen lassen sich Rückschlüsse ziehen, ob es sich um eine Verdickung oder Verjüngung handelt. [BR05, S.5]

Die tertiären Merkmale (z.B. Verzierungen oder Oberflächenbeschaffenheit) haben ähnliche Eigenschaften wie die sekundären, sind jedoch hinsichtlich der automatischen Weiterverarbeitung sehr komplex. Eine sinnvolle Umsetzung wurde zum Forschungszeitpunkt nur für die Oberflächenbeschaffenheit realisiert. Dabei kann das System mit Hilfe von Krümmungshistogrammen, die Aufschluss über die Häufigkeitsverteilung geben, glatte von rauen Oberflächen trennen. In diesem Schritt muss aber darauf geachtet werden, dass durch Einzelscans nicht ungewollt raue Oberflächen erzeugt werden, da die Krümmungshistogramme ansonsten keine Vergleichbarkeit bieten.

Das Verfahren des **Klassifizierens** kann nicht komplett automatisch ablaufen, sondern benötigt manuelle Eingaben. Wie zuvor dargelegt dienen die erfassten Merkmale samt Eigenschaften nur als Grundlage für die eigentliche Klassifikation. Zur Einteilung in Hauptgefäßformen muss zuerst ein Ähnlichkeitsmaß, unter Zuhilfenahme der Grundelemente (Trapeze und Proportionen), der Ausmaße

¹³ „Ein Polygonzug [...] ist die Spur eines Weges, der sich aus endlich vielen Geradenstücken zusammensetzt. Polygonzüge dienen der Koordinatenbestimmung mehrerer Neupunkte in einem Arbeitsgang.“ [INT29]

¹⁴ Handhabe: Fachbegriff für Griff, Henkel

und der signifikanten Verhältnisse, definiert werden. Auf dieser Grundlage kann die Einordnung der Gefäße in Gruppen erfolgen. Für diesen Zweck gibt es zwei Varianten. Zum einen kann die Zuordnung eines Gefäßes zu einer Gruppe auf der Ähnlichkeit zu einem vorher manuell definierten Prototyp basieren, wobei das Ähnlichkeitsmaß auf die Ähnlichkeit zweier Gefäße abzielt. Zum anderen kann die Vorgehensweise der Clusterbildung gewählt werden, bei der einzelne Gefäße mit zuvor zu Clustern zusammengefassten Gefäßen verglichen werden – daher beschreibt das Ähnlichkeitsmaß in diesem Fall die Ähnlichkeit zwischen einem Gefäß und einer Gruppe von Gefäßen.

Zur weiteren Unterteilung in Gefäßtypen und –varianten werden nicht die Gefäße selbst, sondern die Merkmale miteinander verglichen. Für diesen Zweck werden Tabellen erstellt, die die Einschätzung der Forscher hinsichtlich der Ähnlichkeit zweier Merkmale widerspiegeln. Unter Anwendung dieser Tabellen können die Archäologen innerhalb einer „Ähnlichkeitsfunktion“ [BR05, S.7] die ermittelten Ähnlichkeitswerte unterschiedlich gewichten, so dass der Einfluss eines Merkmals auf die identifizierte Gefäßähnlichkeit variiert werden kann. Basierend auf den berechneten Ähnlichkeiten findet schließlich die Typen- und Variantenbildung statt. Innerhalb eines Dendrogramms¹⁵ werden

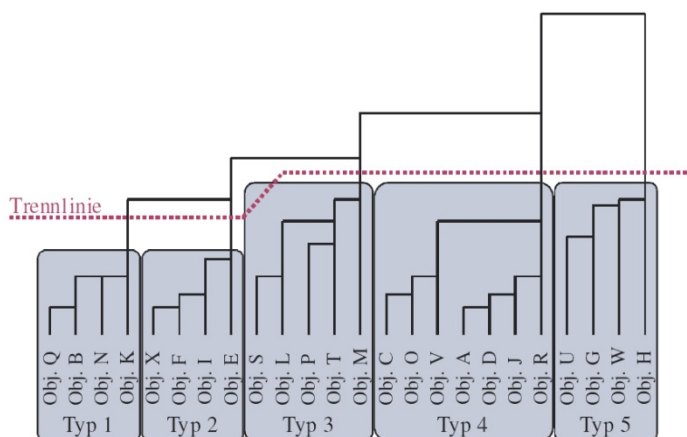


Abbildung 12: Eine manuell im Dendrogramm platzierte Trennlinie definiert fünf Typen einer Hauptgefäßform. [BR05, S.7]

die Objekte einer Hauptgefäßform vorgruppiert, die eigentliche Zusammenstellung der Gruppen wird durch den Nutzer unter Anwendung von Trennlinien vorgenommen. (s. Abb.12) Steht bei der Typenbildung eher Homogenität im Vordergrund, werden bei der Variantenbildung dagegen Varianten anhand eines Merkmals definiert, das nicht bei allen, sondern nur bei bestimmten Gefäßen auftritt.

Dieses manuelle Definieren der Trennstellen sowie die Möglichkeit der unterschiedlichen Gewichtung von Merkmalen bieten dem Anwender große Variantenauswahl für die Typenbildung, so dass mit Hilfe der automatisierten Klassifikation Grundlagen für eine schnelle Objektdokumentation geschaffen werden können. Weitere Forschungen wurden an TU Chemnitz durchgeführt - einen tieferen Einblick in die Thematik und aktuelle Forschungsergebnisse liefern Hörr, Lindinger & Brunnett (2009). (vgl. [HÖ09])

¹⁵ „Dendrogramme werden oft dazu verwendet, Beziehungen zwischen Clustern darzustellen. Ein Dendrogramm zeigt die multidimensionalen Abstände zwischen Objekten in einer baumähnlichen Struktur.“ [INT30]

2.2.4 CIDOC CRM – Ein Dokumentationsstandard für die heterogene Datenwelt der Archäologie

Nachdem mit Hilfe der digitalen Rekonstruktion und der automatisierten Klassifikation zwei Beispiele beschrieben wurden, inwieweit digitale Daten einen Vorteil für die archäologische Dokumentation haben, wird im folgenden Kapitel auf die Problematik eines allgemeinen Dokumentationsstandard eingegangen, der als Voraussetzung für eine verteilte Nutzung digitaler Daten gilt. Hintergrund ist dabei, dass kulturelle Information hinsichtlich vieler Kriterien heterogen ist (s. auch Kap. 2.4). Dabei unterscheidet sich die Information abhängig von der jeweiligen Domäne, dem archivierten Objekt und der Art der Informationssammlung. So divergiert die kulturelle Information von Bibliotheks-, Archiv-, Museen- und Websammlungen beispielsweise aufgrund verschiedener amtlicher Ansätze, der jeweiligen Disziplin, der Granularität, dem Detailgrad, der Datenstruktur und weiteren inhaltlichen Datenunterschieden. Trotzdem benötigen die diversen dokumentierten Objekte wie Dokumente, Fotos aber auch Orte und Fundobjekte spezifische Metadaten. Dies führt zu dem Konflikt, dass auch die Metadaten heterogen gestaltet werden. Da kein Metadatenschema allen Anforderungen der verschiedenen Informationssammlungen gerecht wird, ist die Integration sowie Migration der Daten kaum durchführbar. Als Kompromiss wird oft Dublin Core¹⁶ eingesetzt, durch den einfache Beschreibungen generiert werden können. Trotz der Heterogenität gibt es dennoch entscheidende konzeptuelle Überschneidungen. Dazu gehören die Komponenten Mensch, Ort, Ereignisse, Objekte, und Beziehungen. Bei diesen Überschneidungen setzt auch das Konzept des *CIDOC Conceptual Reference Model (kurz: CRM)* an, da es diese Komponenten in den Mittelpunkt seiner Methodik stellt.

Das *CIDOC Conceptual Reference Model* ist eine formale Ontologie (formalisiertes Begriffsmodell), um die Integration, Zugriffsvermittlung und den Austausch verschiedenartig strukturierter Informationen aus dem Bereich des Kulturellen Erbes zu unterstützen. (vgl. [CR04, S.7]) Das Modell soll dementsprechend dem Problem der Informationsheterogenität entgegenwirken, und insbesondere Archive, Bibliotheken und Museen unterstützen, die Verfügbarkeit kultureller Information zu verbessern. Es wurde nach zehnjähriger Forschungs- und Entwicklungszeit 2006 als Norm akzeptiert. (ISO 21127: 2006) (vgl. [INT31])

Um die Integration, die Vermittlung und den Austausch der verschiedenartigen Informationen zu ermöglichen, bietet die Ontologie ein objektorientiertes semantisches Modell, das für die Domäne „Kulturelle Artefakte“ 90 Klassen und 148 Eigenschaften bereithält, und gleichzeitig als Sprache agiert, die „von Menschen verstanden und Maschinen prozessiert“ werden kann [INT32]. Die semantischen Definitionen und Begriffserklärungen sollen genutzt werden, um die heterogenen

¹⁶ Der Dublin Core ist ein weit verbreiteter und anerkannter Metadaten-Standard (ISO 15836:2003/ISO 15836:2009) zur Beschreibung von Dokumenten und Objekten.

Informationsquellen in eine institutionsübergreifende, homogene Informationsressource zu transformieren. Das CRM beschränkt sich daher auf die zu Grunde liegende Semantik von Datenbankenschemata und Strukturen von Dokumenten, die bei der Dokumentation des Kulturerbes benötigt werden. (vgl. [CR04, S.7]) Es wird keine spezifische Terminologie für die Datenstrukturen vorgegeben, sondern Beziehungen innerhalb der Strukturen dargestellt, um logisch zu erklären, was dokumentiert wird. Für die jeweilige Datenstruktur kann das CRM beispielsweise durch weitere Beziehungen ergänzt werden, um semantische Interoperabilität zu unterstützen. Somit kann das Modell einen Bezugsrahmen für die jeweilige Anwendungs-Ontologie bieten. Im Konkreten soll das CRM den Entwicklern als Leitfaden zur Datenmodellierung sowie auch als gemeinsame Sprache zwischen ihnen und den Spezialisten der diversen Disziplinen dienen. Gemeinsame Informationsinhalte unterschiedlicher Datenformate können durch die formale Sprache des CRM lokalisiert und in globale Informationsressourcen transformiert oder integriert werden, wobei auch assoziative Suchanfragen auf diese Ressourcen durch das Modell ermöglicht werden. Hinsichtlich der Kompatibilität zu existierenden Datenstrukturen gibt es keine Beschränkungen, so dass die Nutzer auf Daten aus heterogenen Datenquellen in integrierten Umgebungen zugreifen, oder aber Daten ohne Bedeutungsverlust in andere Zielsysteme transportieren können (vgl. [CR04, S.7]).

Der Anwendungsbereich des CRM kann vereinfacht als das von Museen „betreute Wissen“ dargestellt werden. Konkret sind damit museale Dokumentationsstandards und Praktiken gemeint, die sich auf die Gesamtheit der Informationen beschränken, die für Austausch und Integration verschiedenartiger Dokumentationen von Museumssammlungen gebraucht werden. (vgl. [CR04, S.8]) Dabei soll das CRM vorwiegend Kontextinformation, sei es geschichtlicher oder geografischer Art, abdecken, damit alle „Arten und Dinge“, die gesammelt und ausgestellt werden, in akademischer Weise dokumentiert werden können. Reale Beispiele für den Begriff *Museumssammlungen* sind neben Sammlungen auch Stätten und Denkmäler, wodurch der enorme Nutzen für Archäologen unterstrichen wird. Da das CRM auf Referenzwerken über museale Dokumentationsstandards basiert, kann der Anwendungsbereich für den Nutzer unter Berücksichtigung der referenzierten Dokumentationsstandards wie folgt zusammengefasst werden: Hält die Formatierung der eigenen Daten die referenzierten Dokumentationsstandards ein, kann die eigene Dokumentation in eine „CRM-kompatible Ausdrucksform“ mit gleicher Bedeutung transformiert werden. (vgl. [CR04, S.8])

Das CRM ist ein „objektorientiertes semantisches Modell“ [CR04, S.9], das mit Hilfe einer Ontologie als Kernelement, definiert wurde. Auf Aufbau und Eigenschaften von Ontologien kann an dieser Stelle nicht genauer eingegangen werden – Elemente wie Klassen, Eigenschaften, Vererbung und Relationen spielen dabei aber eine entscheidende Rolle. Einen Überblick über die Hierarchie der wichtigsten Klassen zeigt Abb.13. Da eine genaue Erläuterung der Beziehungen der diversen Klassen

den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, soll das Grundprinzip an einem kurzen Beispiel näher gebracht werden.

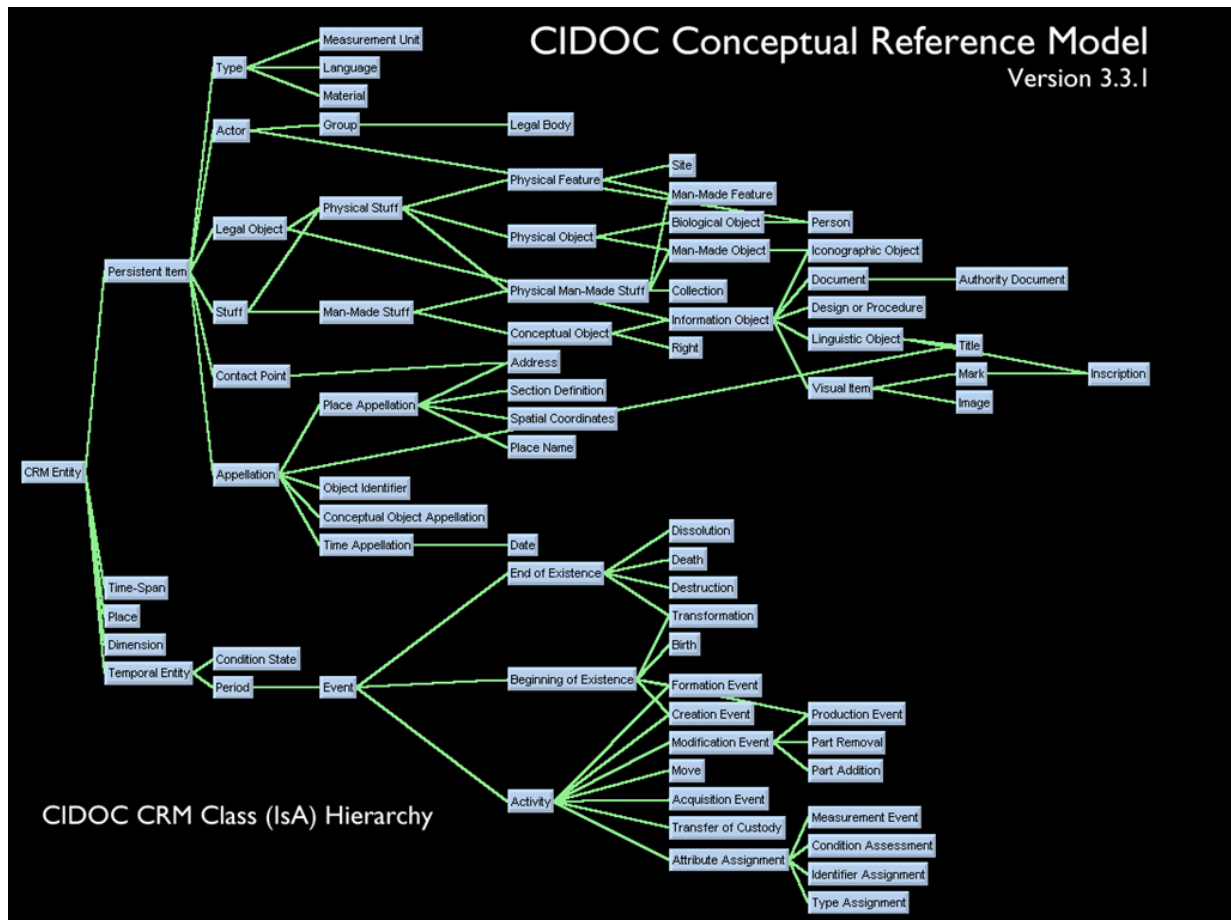


Abbildung 13: Klassenhierarchie des CRM (Version 3.3.1)

Wie zuvor dargestellt setzt das CRM an den konzeptuellen Überschneidungen unterschiedlicher (Meta)-Datenstrukturen an – Mensch, Ort, Ereignis, Objekt, Beziehungen. Um Beziehungen zwischen Menschen, Orten, Ereignisse und Objekten darzustellen werden innerhalb des CRM die Entitäten (E: Entity) über Eigenschaften (P: Property) in Beziehung gestellt. Dazu bietet das Modell u.a. die Entitäten „E39 Actor“ und „E53 Place“. (s.Abb.14) Mit der Eigenschaft „P7 took place at“ ist beispielweise die Entität „E7 Activity“ mit der Entität „E53 Place“ verbunden. Die Abbildung zeigt einen Ausschnitt des Modells, der darstellt, wie Daten aus verschiedenen Datenstrukturen miteinander verbunden werden können, um als globale Informationsressource zu dienen. Dabei steht die „Activity“, also das Ereignis im Mittelpunkt. Zu diesem Ereignis werden die anderen Entitäten in Beziehung gesetzt. So können Entitäten unterschiedlicher Datenstrukturen miteinander verknüpft werden – beispielsweise kann das durch Museum A gesammelte/ausgestellte Dokument, welches während des Ereignisses erstellt wurde, mit einem durch Museum B ausgestellten/gesammelten Bild, das sich auf das Ereignis bezieht, verknüpft werden. Darüber hinaus

werden den Objekten und Ereignissen das entsprechende Datum zugewiesen, sei es ein Zeitpunkt oder ein Zeitraum. Die Abbildung unterstreicht auch, dass die Instanz der Entität „E39 Actor“ mit Hilfe der verschieden gewählten Eigenschaften („P11 participated in“ und „P14 performed“)

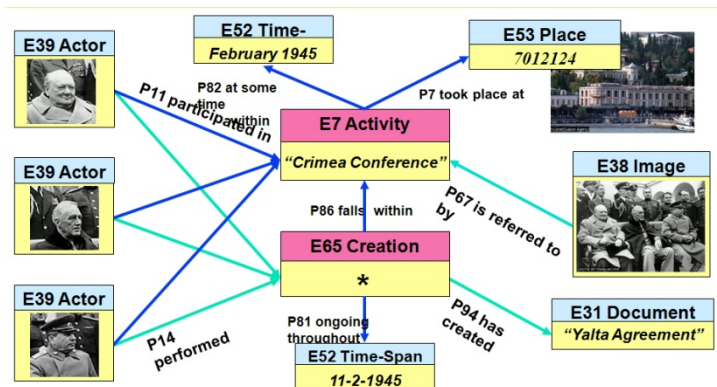


Abbildung 14: Überblick über Beziehungen wichtiger Entitäten [INT33]

unterschiedliche Rollen einnehmen kann. So kann eine Person gleichzeitig Teilnehmer eines Ereignisses und Autor eines Dokuments sein, das während dieses Ereignisses erstellt wurde. Weitere logische Aussagen die mit Hilfe des gezeigten Ausschnitts getroffen werden können sind z.B.

- E31 Document *was created by* E65 Creation Event *performed by* E39 Actor *ongoing throughout* E52 Time-Span.
- E65 Creation Event *falls within* E7 Activity *took place at* E53 Place *at some time within* E52 Time-Span.

Es gibt keine Kompatibilitätsbeschränkungen zu existierenden Datenstrukturen, so lange ein Algorithmus ermittelt werden kann, „der alle Daten der Ausgangsstruktur“ richtig kodiert und in eine „CRM kompatible Form transformiert“ [CR04, S.9], ohne dass dabei die Bedeutung verändert wird. Sind keine Kompatibilitätsbeschränkungen vorhanden kann das CRM auch als Exportformat zwischen verschiedenen Systemen dienen, und den Zugriff auf Daten erleichtern, indem bei der An- und Abfrage (z.B. Queries) CRM-Begriffe verwendet werden können. Insgesamt liefert das CIDOC CRM einen Standard, dessen Modell verglichen mit anderen Entitäts-Relationen-Modellen einfach strukturiert ist. Dies erlaubt eine Informationsintegration bei variierendem Detailgrad und liefert als Ergebnis reichhaltige, semantische Information. Da es speziell für die verlustfreie Vermittlung von heterogenen Informationen des Kulturerbes entwickelt wurde, liefert das CRM einen für die Archäologie sehr nützlichen Dokumentationsstandard, dessen Ontologie mittlerweile in einigen Projekten als Referenzontologie genutzt wird - z.B. Erlangen CRM/OWL (vgl. [INT34]) Den Nutzen, den das CRM für die Dokumentation digitaler Daten und damit auch für den Zugriff, die Integration, die Verwaltung sowie die Archivierung der in den Daten gespeicherten Informationen hat, zeigt seine

Verwendung durch das Deutsche Archäologische Institut. Dieses nutzt das Referenzmodell zur Datenvernetzung innerhalb des Instituts, aber auch auf europäischer Ebene. (s. Kap.3.1)

2.3 Verwaltung und Analyse digital dokumentierter Funde und Befunde

Aus digital dokumentierten Befunden kann nur ein Wissensgewinn erreicht werden, wenn die Objekte in einer Weise verwaltet werden, die Analysen ermöglicht. Da bei der Analyse insbesondere die räumlichen Beziehungen der Objekte eine große Rolle spielen, muss auch bei der Verwaltung sowie bei Analyseverfahren auf diesen Aspekt geachtet werden. Hierbei sind Informationstechnologien und -systeme eine große Hilfe, da sie die Aufbereitung und Verknüpfung der relevanten Daten sowie den verteilten Zugang auf diese Daten unterstützen, so dass auch gemeinsame Analysen verteilt, z.B. räumlich getrennt, durchgeführt können.

2.3.1 Exkurs: Bedeutung räumlicher Komponenten in der archäologischen Dokumentation

Bevor im folgenden Kapitel Informationssysteme, deren Hauptaufgabe die Verwaltung raumbezogener Objekte und Daten ist, vorgestellt werden, soll in einem kurzen Exkurs die Bedeutung des räumlichen Aspekts der archäologischen Dokumentation hervorgehoben und erläutert werden. Bereits im 19. Jahrhundert wurde dieser Bedeutung Rechnung getragen, so dass auch die Fundorte gewissenhaft dokumentiert wurden. Der britische Archäologe Pitt-Rivers legte schon im Jahre 1892 eine Reihe von „Maßstabs-Plänen“ an, die genutzt wurden um „dreidimensionale Orte aller Artefakte und Merkmale“ [WH02, S.2] darzustellen.

Fast alle Daten, die in der Archäologie gesammelt werden, sind entweder räumlich oder haben einen räumlichen Zusammenhang. Dieser räumliche Kontext kann in seinem Umfang variieren, so dass sich auch die raumbezogenen Daten auf viele Weisen unterscheiden. Bei unterschiedlichem Maßstab kann eine Karte beispielweise die Fundorte archäologischer Stätten eines Kontinents, aber auch die genaue Position von Fundobjekten einer Ausgrabung abbilden. Die dokumentierten Positionen und Orte stehen hierbei in Beziehungen zueinander, die durch charakteristische Muster und Anordnungen offenbart werden. Diese Muster und Anordnungen ergeben sich aus „Merkmale der Umgebung“ – z.B. Flüsse oder bestimmte Ressourcenkombination – „anderen archäologischen Merkmalen“ wie Feuerstellen oder Vorratsgruben, oder aus „kosmologischen Phänomenen“ [WH02, S.3] – z.B. symbolisch bedeutende Anordnung einzelner Felsen oder die Stellung der Himmelskörper. Weitere Beispiele für räumliche Beziehungen zwischen dokumentierten Objekten und Artefakten

Tabelle 2: Einige empfohlene Muster räumlicher Art und erklärende Phänomene. [WH02, S.3]

Spatial phenomenon	Explanatory factors
Saisonaler Jäger (und Sammler) lagert in einer Landschaft/in einem Bereich	Die Verfügbarkeit von Ressourcen
Die hierarchische Ordnung einer Besiedelung innerhalb einer Region	Räumlicher Abstand und Nähe zum Markt(platz)
Die Anordnung/Verteilung der Wachtürme entlang eines Grenzbefestigungssystems (z.B. Hadrianswall)	Sorgfältig strukturierte und formalisierte Intention verbunden mit einem spezifischen funktionalem Bedürfnis
Die Position eines Dekorationsbereichs am Körper eines Keramikgefäßes	Die physikalische Manifestation eines symbolisch-ideologischen Designs/Aufbaus
Die Anordnung (z.B. kreisförmig) von Erdaufschüttungen und Steinen an neolithischen Monument-Stätten	Ungeplantes, kumuliertes Produkt einer täglichen rituellen Tätigkeit
Ausschuss von Knochenablagerungen um eine Feuerstelle	Die funktionalen Anforderungen des Durchführens einer Knochenmarks-Extraktion (während des Sitzens um eine Feuerstelle) ¹⁷
Geoglyphen (Erdzeichnung)	Geoglyphen sind „großflächig auf dem Erdboden geformte, in Linien gezeichnete oder durch <i>Straßen- und Wegezüge</i> gebildete Figur“ [INT35]

zeigt Tabelle 2. Einige Archäologen sind sogar der Meinung, dass die Information, die diese räumlichen Beziehungen offen legen, die „zentralen Aspekte der Disziplin“ beinhalten. [WH02, S.3]

Aufgrund dieser versteckten Informationen und des Bewusstseins darüber sind die Methoden für eine effiziente Dokumentation stetig weiterentwickelt worden. In den letzten 30 bis 40 Jahren hat es daher einen riesigen Anstieg der Qualität und Menge räumlicher Daten gegeben. Neue Aufzeichnungstechniken und –Methoden, wie die Total Station²⁰, GPS, aber auch die in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Messtechniken haben Zeichenbrett und Messtisch²¹ abgelöst, und eine schnellere und genauere Datenerfassung ermöglicht. Bevor im nächsten Kapitel die Verwaltung und Nutzung

Tabelle 3: Die wichtigsten Quellen für räumliche Daten (vgl. [WH02, S. 54])

Quelle räumlicher Daten	Beispiel
Karten	<ul style="list-style-type: none"> - Traditionelle „Map sheets“ - Ausgrabungspläne - Karten mit Schraffen¹⁸
Koordinatenlisten	<ul style="list-style-type: none"> - Fundkatalog - geografische Lexika - Stätten- und Monument-Bestände
Erkundung/Feldbegehung	<ul style="list-style-type: none"> - Total Station - Theodoliten¹⁹ - GPS
Bilder (s. auch Kapitel 2.2.1)	<ul style="list-style-type: none"> - Luftaufnahmen - Satellitenbilder - geophysikalische Darstellungen
3D-Modelle mit Hilfe entfernungsbasierter Techniken . (s. auch Kapitel 2.2.1)	<ul style="list-style-type: none"> - Laser-Scanning - LiDAR

¹⁷ Die jungsteinzeitlichen Siedler aßen neben dem Fleisch auch das Knochenmark ihrer Rinder.

¹⁸ Schraffen: Sehr häufig wird mit Schraffen ein Schraffurverfahren bezeichnet, das dazu dient, auf Karten Geländeformen darzustellen. [INT38]

¹⁹ Der Theodolit ist ein Winkelmessinstrument. Es wird in der [...] Vermessungskunde zur Messung von Horizontalrichtungen und [...] Vertikalwinkel eingesetzt.“ [INT39]

²⁰ Total Station = Tachymeter: „Das Tachymeter ist ein Gerät, mit dem man Horizontalrichtungen, Vertikalwinkel und [...] auch Schrägstrecken zum Zielpunkt ermitteln kann. Es dient zur raschen [...] Auf- und Einmessung von Punkten.“ [INT36]

²¹ „Ein Messtisch ist ein (historisches) Arbeitsmittel des Geodäten oder Topografen [...]. Er wird auf ein dreibeiniges Messstativ aufgeschraubt. [INT37]

der raumbezogenen Informationen beschrieben wird, fasst Tabelle 3 die wichtigsten Quellen räumlicher Daten der Archäologie zusammen.

2.3.2 Das Zusammenspiel von Datenbanksystemen, CAD-Software und Geoinformationssystemen am Beispiel eines *Informationssystems für Analyse und Dokumentation raumbezogener Daten*

Indem die Verwaltung und Nutzung archäologischer und räumlicher Daten exemplarisch an einem raumbezogenen Informationssystem vorgestellt wird, soll innerhalb dieses Kapitels das Zusammenspiel der in der Archäologie genutzten Systeme und Technologien (s. Kap. 2.1) deutlich gemacht werden. Um auch das Potential des Internets mit einzubeziehen wurde das im Rahmen zweier Projekte („Baalbek“ und „Palatin“) (vgl. [INT40] und [INT41]) erstellte web-basierte System CISAR²² ausgewählt. CISAR ein „modulares Informationssystem für Analyse und Dokumentation raumbezogener Daten aus Archäologie und Bauforschung“ [INT42], wurde an der TU Cottbus in interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen Archäologen, Informatikern und Vermessungstechnikern in Kooperation mit dem Deutschen Archäologischen Institut (DAI) entwickelt. Es soll eine „umfassende Verknüpfung geometrischer 2D- und 3D-Daten mit thematischen Informationen, sowie Bilddaten und Dokumenten erlauben“. [INT42] Die webbasierte Lösung soll darüber hinaus das gemeinsame Arbeiten mit einem „zentralen Datenbestand“, sowie den Austausch und die Publikation der Forschungsergebnisse über das Internet ermöglichen. In den letzten Jahren hat sich in der Archäologie die vermehrte Nutzung von Datenbanken und grafischen Systemen für die Speicherung, Analyse und Präsentation der Daten durchgesetzt. Für die Verwaltung dieser Daten werden GIS genutzt, die thematische und raumbezogene Informationen effizient miteinander verknüpfen. Die Anwendung von GIS erklärt sich aufgrund ihrer Analysemöglichkeiten für thematische als auch topologische Informationen. (s. Kap. 2.1.3)

Nach Heine et al. (2005) ergeben sich somit für raumbezogene Informationssysteme grundsätzlich drei Gruppen, in die die genutzten Technologien eingeteilt werden – Datenbanken, Grafikprogramme (CAD) und GIS-Software (in engerem Sinne)²³. [HE05, S.91] Im Kontext eines derartigen Informationssystems benötigen Datenbanken eine Grafikanbindung, so dass neben grundsätzlichen Funktionen wie Verwaltung und Analyse komplexer thematischer Daten, die Ergebnisse der Analysen als Geometrien an eine Grafiksoftware übermittelt und visualisiert werden können. Derartige Programme sind daher im Gegenzug auf eine Datenbankanbindung angewiesen, so dass den visualisierten Objekten über eine Schnittstelle thematische Informationen aus einer

²² CISAR: Cottbusser Informationssystem für Archäologie und Bauforschung

²³ In engerem Sinne bedeutet hier: Einschränkung auf Verknüpfungs- und Analysewerkzeuge, die Geoinformationssysteme anbieten

Datenbank als Eigenschaften zugewiesen werden können. Auf Grund dessen werden viele klassische CAD-Programme um diese Komponente erweitert. So genannte „CAD – GIS“ (vgl. [BU05, S.40]) haben ihre Stärke „eindeutig in der graphischen Datenverarbeitung, die teilweise auch eine 3D-Modellierung ermöglicht.“ [HE05, S.91] Dagegen eignen sich die meisten Produkte von GIS – Software (im engeren Sinne) zwar für die Verknüpfung, Verwaltung & Analyse der Daten, 3D-Funktionalität jedoch wurde nach den Studien im Vorfeld der Systementwicklung durch „keines der [...] verfügbaren Produkte realisiert“. [HE05, S.91] Darüber hinaus fanden Heine et al. heraus, dass die Produkte die speziellen *Anforderungen* der Archäologen „nicht komplett erfüllen“. Zu diesen Anforderungen zählen

- Verwaltung heterogener Datenbestände und Dokumente (Fotos, Karten, Pläne) unterschiedlicher Herkunft und Datenstruktur
- Speicherung und Modellierung umfangreicher, komplexer, thematischer Daten
- einfacher, benutzerabhängiger Zugriff auf die Daten zur Eingabe, Recherche und Analyse über Internet
- Modellierung und Darstellung von 2D- und 3D-Geometrien [HE05, S.91/2]

Neben den Anforderungen an ein raumbezogenes Informationssystem wurde bei der Implementierung auch zukünftiges Arbeiten berücksichtigt, indem standardisierte Formate und Protokolle für die Daten, den Systemzugriff und den Datenaustausch eingesetzt wurden.

Der grundsätzliche Aufbau und das Zusammenspiel der eingesetzten Technologien sollen im weiteren Verlauf im Vordergrund stehen. Für die grundlegenden Funktionen, wie „zentrale Datenhaltung, einheitliche Datenstrukturen, Datensicherung und –aktualisierung“ [HE05, S.92] können Dokumenten-Management-Systeme (DMS) eingebettet werden. Diese ermöglichen ein im Internet angelegtes Dokumentenverzeichnis, in dessen Struktur den Dokumenten Eigenschaften für die spätere Suche zugeordnet werden können. Für das CISAR wurde ein lehrstuhleigenes Server-Client-System gewählt, das sich aus einem Administrationsmodul, einem Benutzermodul, und einer XML-basierten Dokumenten-Datenbank zusammenfügt. Innerhalb des Java-basierten Administrationsmoduls können Projekte und deren Verzeichnisstruktur sowie Dokumenteigenschaften angelegt und definiert werden. Benutzer- und Dokumentenverwaltung zählen ebenfalls zu den Interaktionsmöglichkeiten. Das Benutzermodul hingegen ist für die Generierung der Ergebnisseiten von Benutzeranfragen im Internetbrowser verantwortlich. Interaktionsmöglichkeiten auf Benutzerseite sind das Blättern in der Verzeichnisstruktur, Dokumentensuche nach festen Eigenschaften sowie die generelle Dokumentenbearbeitung (z.B. *neu einstellen* oder *löschen*). Da neben den Dokumenten auch komplexe Objekte oder erweiterte

Eigenschaften zu Dokumenten gespeichert werden müssen, werden spezielle Fachdatenbanken implementiert, die zugleich Abfrage- und Recherchefunktionen zur Analyse bereitstellen. Innerhalb der Entwurfsphase dieser Fachdatenbanken wurde die Interdisziplinarität der Disziplin Archäoinformatik deutlich, da eine konsistente Strukturierung der Daten und Verknüpfungen hinsichtlich Form, Umfang und Komplexität nur durch die Zusammenarbeit zwischen Archäologen, Informatikern sowie auch Bauforschern und Geodäten realisiert werden konnte. Das entwickelte Datenbank-Management-System (DBMS) besitzt eine „modulare Datenbankstruktur, wobei „einige Module die Funktionen von Basisdatenbanken“ einnehmen und die Informationen „den fachspezifischen Datenbanken zur Verfügung stellen“. [HE05, S.93] Diese Basismodule übernehmen dabei die Aufgaben einer *Bilddatenbank*, einer *Plan- und Zeichnungsdatenbank* sowie einer *Literaturdatendank*. Auch die fachspezifischen Datenbankmodule unterteilen sich in drei Kategorien. Erfasst werden *komplexe Objekte, Funde* sowie *architektonische Bauteile & Bauornamentik*. Die für die weitere Bearbeitung dieser erfassten Daten benötigten Bilder, Pläne und Literaturhinweise werden aus den jeweiligen Basis-Datenbankmodulen bezogen oder dort neu hinzugefügt. Bei der Umsetzung wurden MySQL-Datenbanken und für die Kommunikation mit den Web-Klienten die Skriptsprache PHP²⁴ eingesetzt. Beim *Baalbek-Projekt*, bei dem eine „klassische 2D-Geometrieverarbeitung ausreichend“ war, wurden die geometrischen Daten erst via Desktop-GIS modelliert und dann mit Hilfe eines so genannten Map-Servers²⁵ im Internetbrowser visualisiert.

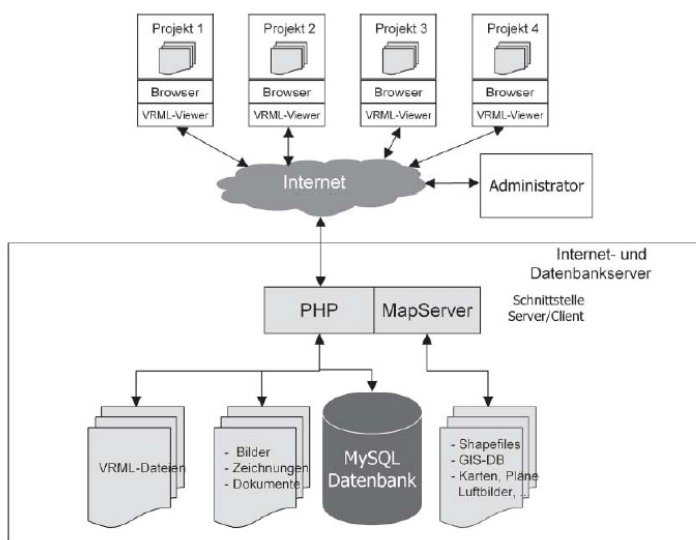


Abbildung 15: Client/Server-Architektur für webbasierte raumbezogene Informationssysteme in der Archäologie [HE05, S.93]

Beim *Palatin-Projekt*, das eine dreidimensionale Lösung erforderte, wurde 3D-CAD-Software (s. Kap.2.1.2) angewendet, mit der die Geometrien der Objekte erstellt und in das VRML-Format²⁶ umgewandelt und exportiert werden können. (vgl. HE05, S.93) Diese VRML-Dateien können mittels eines VRML-Viewer als 3D-Objekte betrachtet werden. Einen Überblick über die komplette Client/Server-Architektur des webbasierten raumbezogenen Informationssystems gibt Abbildung 15.

²⁴ PHP: Hypertext Preprocessor

²⁵ MapServer ist eine Open Source Plattform zur Online-Publikation räumlicher Daten und interaktiver Kartografie-Anwendungen.

²⁶ Virtual Reality Modeling Language (VRML): „Beschreibungssprache für 3D-Szenen[...]Die meisten 3D-Modellierungswerkzeuge ermöglichen den Im- und Export von VRML-Dateien, wodurch sich das Dateiformat auch als ein Austauschformat von 3D-Modellen etabliert hat.“ [INT43]

Hinsichtlich des *Baalbek-Projekts* nennen Heine et al. konkrete Gründe für die eigentliche Notwendigkeit eines Informationssystems. Darunter sind „unterschiedliche Bearbeitungsstände im Plan- und Kartenmaterial, ein uneinheitlicher Bilddatenbestand sowie das Fehlen von Vorgaben für einheitliche Datenstrukturen“. Entsprechend der genannten Anforderungen ergab sich somit ein dreistufiger Aufbau (vgl. [HE05, S.94]):

- 1) Bereitstellen von Dokumenten (Zeichnungen, Bilder, Texte) via DMS
- 2) Datenbankkonzipierung (Speicherung bestimmter Objekte und zusätzlicher Informationen zu Dokumenten)
- 3) Entwicklung eines webbasierten Geoinformationssystems für Analyse und Präsentation der räumlichen Zusammenhänge

Grundlegend dabei ist die Entscheidung über die Strukturierung der darzustellenden Daten, sowie die „Definition von Anwendungsprofilen“, die interdisziplinär zu realisieren sind. Da auf Benutzerseite oftmals die nötige Erfahrung fehlt, müssen innerhalb der Anwendungsprofile Ziele genauer definiert und einzelne Programmfunktionalitäten hinsichtlich Aufwand und Nutzen abgewägt werden. Konkrete Funktionalitäten, die beim *Geografischen Informationssystem Baalbek* implementiert wurden, sind bspw. die Visualisierung „räumlicher Beziehungen sowie Verteilungen von Objekten“ auf der Grundlage von Karten, Plänen und Bildern. Die Integration der Kartengrundlagen zur Präsentation in verschiedenen Maßstäben in das GIS erfolgt dabei in „abgestufter Auflösung und Detailliertheit“. Zusätzlich werden konkrete Kenntnisse, wie „Bauphasenpläne“ so eingebunden, dass

„einzelne Objekte“ mit ergänzenden Informationen (z.B. Rekonstruktionen, Fotos) „verknüpft werden können“. (vgl. [HE05, S.95]) Das Abrufen der Informationen zu den „im GIS verorteten Objekten“ sowie die Visualisierung dieser Abfrageergebnisse sind weitere wichtige Funktionen. Die Analysemöglichkeiten zur Bildung eines Verständnisses über räumliche, geografische

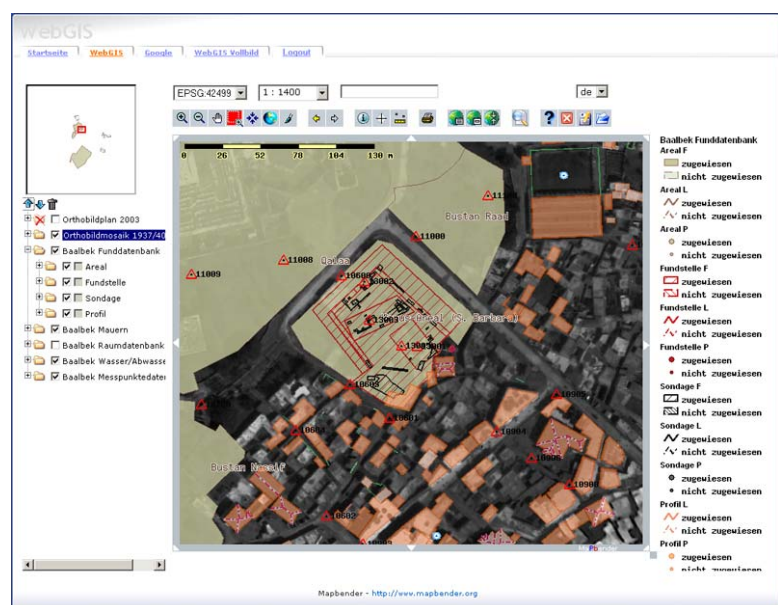


Abbildung 16: Oberfläche des WebGIS im Browser [INT44]

Zusammenhänge erweitern ferner die genannten Abfragemöglichkeiten.

Der verteilte Zugriff auf das System wird per Internet ermöglicht. Konkret wird hierbei die auf PHP angelegte Software Mapserver implementiert, welche Internet-basierte GIS-Funktionalitäten ermöglicht. Die Inhalte selbst wurden mittels Desktop-GIS wie ArcMAP oder Autodesk MAP als Shapefiles (s. auch Abb.15) generiert, aus denen die Kartenansicht durch den Mapserver erzeugt wird. Dieser Vorgang erfolgt dynamisch, d.h. dass sich die Kartenansicht den gewählten „Anzeigeeigenschaften“ und „Datenbankabfragen“ dynamisch anpasst. [HE05, S.95] (s. Abb.16) PHP dient hierbei als Schnittstelle zwischen Datenbank und Mapserver, und ermöglicht einen problemlosen Zugriff. Neben den adaptiven Kartenansichten wird dem Nutzer bei Bedarf auch ein Datenblatt präsentiert, welches Informationen über die jeweiligen Objekteigenschaften beinhaltet.

Das 3D-Informationssystem, das für das *Palatin-Projekt* entwickelt wurde, kombiniert dagegen die dort entworfenen Datenbanken mit rekonstruierten CAD-Modellen, damit die Zusammenhänge des „komplizierten Baukomplex“ (Palatin in Rom) erkenn- und darstellbar werden. [HE05, S.95] Die Grundlage zur Archivierung und Abfrage von Informationen über den Gebäudekomplex sind die diversen Module der Dokumentations-Datenbank. Ein Raumbuch gibt bspw. Auskunft über Ausstattung der einzelnen Wände, und der Katalog der Bauornamentik erleichtert die Suche z.B. nach bestimmten Ornamenten einer Zeitordnung. (vgl. [HE05, S.96]) Das Datenbanksystem dient als digitales Archiv, welches anhand der Module verschiedene Datentypen wie Messdaten, Pläne-oder

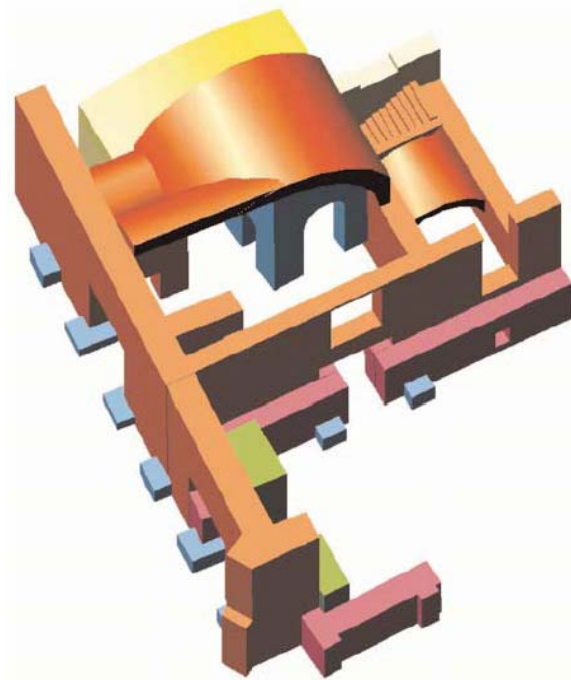


Abbildung 17: 3D-Modell im Ist-Zustand [HE05, S.96]

Fotoaufzeichnungen speichern und verknüpfen kann. Aufgrund der Verbindung zum Internet eignet sich das Datenbanksystem auch für die kollaborative Bearbeitung am Objekt. Die zusätzliche Dimension wird durch das „auf den Messdaten basierende 3D-CAD-Modell“ hinzugefügt, welches für Visualisierung und Bearbeitung angeboten wird. [HE05, S. 96] Das CAD-Modell wird aus vereinfachten Kuben zusammengesetzt (s. Abb.17). Das dargestellte Gebäude wird in seinem Ist-Zustand dargestellt, kann aber abhängig von ausgewählter, dokumentierter Bau- und Nutzungsphase verändert und angepasst werden. Daher können die jeweiligen Teile und

Ebenen ein- und ausgeblendet, und bei Bedarf zusätzliche Rekonstruktionen vorgenommen werden.

Das vornehmliche Ziel des 3D-Informationssystems aber ist die „sinnvolle Verknüpfung der Datenbank mit dem CAD-Modell“, da gängige kommerzielle Produkte dies zum damaligen Zeitpunkt (2005) „nicht zufriedenstellend“ lösten. [HE05, S. 97] Für

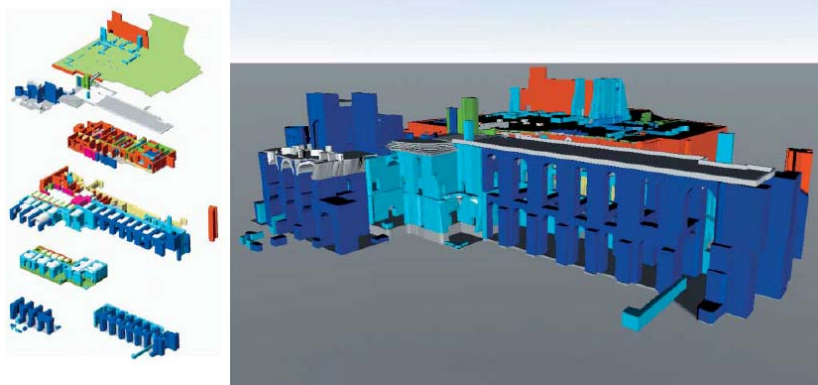


Abbildung 18: links: CAD-Modell mit den fünf übereinander liegenden Hauptebenen) rechts: VRML – Modell (Farbe steht für Bauphasen) [HE05, S.97]

spätere Publikation, insbesondere der gefundenen Verknüpfungen, ermöglichen VRML-Modelle²⁷ in Verbindung mit der MySQL-Datenbank die dreidimensionale Visualisierung. Die dazu nötige Verbindung zwischen Datenbank und dem Modell kann unterschiedlich hergestellt werden, wobei sich die Problematik aus der beidseitigen Verlinkung, d.h. den Möglichkeiten, Informationen über das Modell aus der Datenbank abzurufen, sowie eine Auswahl von Bauelementen in der Dokumentation in 3D darzustellen, ergibt. Diese Verknüpfung kann nur bei standardisierter Strukturierung sinnvoll erfolgen, im konkreten Fall wurde das „CAD-Modell, wie auch das Hauptmodul der Datenbank – das Raumbuch – so aufgebaut, dass die Basisobjekte durch einzelne Raumelemente [...] gebildet werden.“ [HE05, S.97] Mittels Verknüpfung dieser einzelnen Elemente mit dem entsprechendem Formblatt (gespeichert in Datenbank), können zusammenhängende Informationen noch während der Betrachtung des VRML-Modells abgerufen werden. Ferner können dynamische 3D-Modelle, die sich abhängig von der konkreten Datenbankabfrage temporär aus einzelnen Elemente zusammensetzen, angezeigt werden. (s. Abb.18)

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass für die beiden archäologischen Projekte an der TU Cottbus ein modular aufgebautes Informationssystem für die „Geometriemodellierung und – visualisierung“ entwickelt wurde, für das „zweidimensionale und dreidimensionale Softwarelösungen“ (vgl. [HE05, S.97]) erarbeitet wurden. Durch weitere Forschungen wurde in der Folge eine Prototyplösung für „raumbezogene Informationssysteme der bauhistorischen und archäologischen Forschung“ mit dem Namen CISAR entwickelt, die unterschiedlich verwendet und erweitert werden kann. Dabei spielte die Standardisierung der Datenformate und Strukturen eine

²⁷ VRML: Abkürzung für Virtual Reality Modeling Language, s. S.34

entscheidende Rolle. An diesem Punkt kommt u.a. das in Kap.2.2.4 vorgestellte Referenzmodell (CIDOC CRM) zur Anwendung. (s. Kap. 3.1)

2.4 Herausforderungen der digitalen Archäologie

Nachdem im Laufe der Arbeit einige Problemfelder und Herausforderungen der digitalen Archäologie angesprochen wurden, soll abschließend ein Überblick der generellen Herausforderungen zusammengefasst dargestellt werden. Wie in Kap. 2.2.4 angesprochen, ergibt sich die größte Problematik aus der großen Menge heterogener Datenbestände und –strukturen. Um digital erfasste archäologische Information auf globaler Ebene verteilt bearbeiten, analysieren, präsentieren oder in sonstiger Weise nutzen zu können, muss ein Dokumentationsstandard entwickelt werden, damit gleiche Strukturen die universelle Verknüpfung verschiedener Datenbestände ermöglichen. Das große Problem einer erfolgreichen Standardisierung resultiert aus den heterogenen Auffassungen der Forscher der unterschiedlichen Disziplinen, die innerhalb der digitalen Archäologie tätig sind. Als Folge reichen die durch Entwickler entworfenen Standards den Archäologen hinsichtlich ihres Umfangs nicht aus, wohingegen die durch die Archäologen erstellten Standards aufgrund der fehlenden Informatikkenntnisse Performance-Schwächen aufweisen. Einen ersten erfolgversprechenden Ansatz bietet hierbei das in Kap. 2.2.4 vorgestellte Referenzmodell (CIDOC CRM). Ein Abmildern dieser Problemstellung kann zudem durch den verbreiteten Gebrauch gleicher kommerzieller Software erreicht werden, so dass gleiche Datenstrukturen von Datenbanken, CAD-Modellen und Geoinformationssystemen die kooperative Nutzung ermöglichen. (vgl. [HE04]) Da kommerzielle Systeme aber oft das Budget einzelner Projekte übersteigen, bildet Open-Source Software einen erfolgversprechenderen Ansatz für eine verbreitete Nutzung gleicher Systeme.

Das allgemeine Problem der fehlenden Informatikkenntnisse auf Seiten der Archäologen und des mangelnden Archäologie-Wissens seitens der Informatiker, ist kein neues Phänomen und wurde schon 1985 von Richards beklagt. (vgl. [RI85]) Neben den negativen Auswirkungen auf eine erfolgreiche Standardisierung, ist fehlendes Informatikwissen auch ein großes Hindernis für die effektive Anwendung von Computertechnologien sowie Weiterverarbeitung der digitalen Daten. Zukünftig sollten Archäologen daher zumindest in der Lage sein, digitale Daten abrufen zu können, besser wäre sogar, dass sie auch in der Anwendung der digitalen Daten geschult sind - z.B. Erstellen und Bearbeiten von 3D-Modellen oder Analyse via GIS. Aktiv in diesem Bereich ist der *Archaeology Data Service* in England, der Handbücher (*Guides*) und andere Lehr- und Lernangebote anbietet, damit Archäologen die relevanten Computerkenntnisse aufbessern können. (vgl. [INT45]) Generell

wird dieser Problematik jedoch zu wenig Beachtung geschenkt. In diesem Zusammenhang wird auch das fehlende Lehrangebot hinsichtlich einer ausbalancierten archäologischen Ausbildung (Archäologie vs. Informatik) beklagt. (vgl. [HE04, S.28]) Das Problem unterschiedlicher Grundkenntnisse wird darüber hinaus durch die Tatsache verstärkt, dass es auch innerhalb der Wissenschaften Archäologie und Informatik eine Fülle von Unterdisziplinen gibt, die andere Wissensanforderungen stellen.

Als Folge fehlender Informatikkenntnisse erweist sich auch die Langzeitarchivierung und Publikation digitaler Daten als Herausforderung. Da Artefakte nur im Kontext wichtige Informationen beinhalten können, sollten auch die digitalen Daten nicht *isoliert*, sondern *vernetzt* archiviert werden. Auch Projektdokumentationen sollten in einer hybriden Form publiziert werden. Die Veröffentlichung sollte als Kombination aus elektronischen Daten, Analysen, der Synthese und weiteren beschreibenden Dokumenten erfolgen. Ein Beispiel einer hybriden Publikation wäre „webbasierter Text mit permanentem Zugang“ zu den relevanten digitalen Daten. [HE04, S.27] Doch aufgrund der fehlenden Kenntnisse und vieler unterschiedlicher Fachbereiche fehlt anscheinend ein kollektives Verantwortungsgefühl für die Präparation digitalen Materials für die Publikation und die Langzeitarchivierung in Digitalen Repositories²⁸. Als Folge werden nur wenige Publikationen im Internet um komplexere digitale Daten ergänzt, auch weil gedruckte Publikationen höheren Stellenwert genießen. (vgl. [HE04, S.27]) Ferner sehen manche Forscher die Archivierung und Nutzung digitaler Daten skeptisch, da ihnen der direkte Kontakt mit dem Objekt fehlt (vgl. [HE04, S.23]) – der direkte Kontakt mit den digitalen Objekten erfolgt meist über Datenbankschnittstellen, Geoinformationssysteme oder CAD-Software. Abgesehen davon bietet die Archivierung digitaler Daten aber auch die Möglichkeit, zukünftige Forschungen anhand alter Aufzeichnungen, z.B. mit neueren Technologien, durchzuführen. Ein weiteres Beispiel hierfür wäre die erneute virtuelle Erkundung eines dreidimensionalen Gebäudekomplexes, nachdem neue Erkenntnisse erlangt wurden. Neben den generellen Herausforderungen, die durch die Langzeitarchivierung digitaler Daten entstehen (z.B. Haltbarkeit der Trägermedien), spielt bei der Archivierung archäologischer Daten insbesondere die räumliche Komponente dieser Daten eine große Rolle. Die Daten müssen daher im Kontext abrufbar sein, um eine zukünftige effektive Nutzung zu gewährleisten.

²⁸ „Ein Repository (Lager, Depot), [...] ist ein verwaltetes Verzeichnis zur Speicherung und Beschreibung von digitalen Objekten. Bei den verwalteten Objekten kann es sich beispielsweise um Programme (Software-Repository), Publikationen (Dokumentenserver)“ oder „Datenmodelle (Metadaten-Repository) [...] handeln.“ [INT46]

3 Aktueller Stand und Zusammenfassung

3.1 Überblick über aktuelle Forschung

Trotz der noch nicht überall vorhandenen Aufbruchsstimmung gibt es innerhalb des deutschsprachigen Raums einige Institutionen, die sich den im vorherigen Kapitel erläuterten Herausforderungen stellen, wie einige aktuelle Forschungsprojekte beweisen. Neben der Verknüpfung der digital dokumentierten Objekten mit zusätzlichen Informationen - sachorientiert oder räumlich - steht auch die Vernetzung aller im Internet veröffentlichten Informationen archäologischer Natur – innerhalb einer Institution – aber auch das Entwickeln einer globalen Informationsressource im Mittelpunkt aktueller Forschungen. Einen guten Einblick in den aktuellen Stand liefern die verschiedenen Forschungsprojekte des Deutschen Archäologischen Instituts (DAI).

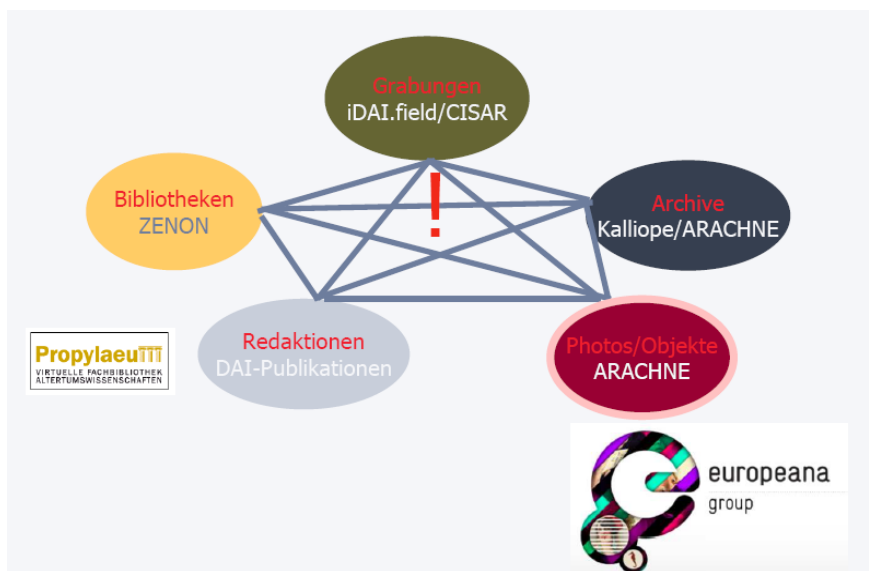


Abbildung 19: Vernetzung von Bibliothek, Archiv und Forschungsdaten am Deutschen Archäologischen Institut (DAI) [INT47]

Abbildung 19 zeigt einen Überblick über einige innerhalb der Projekte entwickelten oder genutzten Technologien und Informationssysteme, die am DAI eingesetzt werden, um dort anfallende Dokumentations- und Forschungsdaten miteinander zu

vernetzen.

Für die Grabungsdokumentation wurden hierfür das raumbezogene Informationssystem *CISAR* (s. Kap. 2.3.2 und [INT44]) sowie *iDAI.field*, ein „modulares Dokumentationssystem für Feldforschungsprojekte“, [INT48] entwickelt. Ähnlich wie auch *CISAR* versteht sich das Dokumentationssystem *iDAI.field* als Prototyp für das jeweilige Projekt. Als „Datenbank-Prototyp“ soll es für „die meisten Projekte im Schnitt zu ca. 70% direkt nutzbar sein.“ Durch eine enge Kooperation mit der Uni Köln wird die „langfristige Interoperabilität“ von *iDAI.field* mit der Datenbank *Arachne* ermöglicht. *Arachne* ist die zentrale Objektdatenbank des Archäologischen Instituts der Uni Köln, aber auch des DAI. (vgl. [INT49]) Auf der einen Seite dient *Arachne* wie auch

Zur Vernetzung auf größerer Ebene wurde der Verbundkatalog *ZENON* in die „virtuelle Fachbibliothek“ *Propylaeum* integriert. [INT52] *Propylaeum* umfasst wichtige europäische Bibliotheks- und Verbundkataloge, und dient als Plattform für den zentralen Zugriff auf Literaturdokumente mit archäologischem Bezug. Interessanter aber ist die Teilnahme des Deutschen Archäologischen Instituts an *CARARE* („Connecting ARcheology and ARchitecture in Europeana“), einem europäischen Projekt, dessen Forschungsgegenstand „die Integration von Inhalten aus den Bereichen archäologischer [...] Kulturgüter in *Europeana*³⁰“ ist. [INT53] Das DAI stellt dabei „Metadaten von 120.000 Digitalsaten historischer Aufnahmen [...] zur Verfügung“, die online in der *Arachne*-Datenbank erfasst wurden. Da für das *CARARE*-Projekt u.a. das *CIDOC CRM* (s. Kap.2.2.4) als Dokumentationsstandard gewählt wurde, müssen die Metadaten an diese Vorgaben-Modelle angepasst werden, damit *CARARE* als Schnittstelle zwischen den Objekten in der Datenbank und *Europeana* fungieren kann. Das wichtigste Projektziel von *CARARE* ist daher die Vernetzung unterschiedlicher Organisationen aus Archäologie und Denkmalpflege durch die Erschließung „bestehender digitaler Inhalte über das Portal *Europeana*“. Im Mittelpunkt steht die Zusammenführung einer großen Menge von Daten – konkret „über 2 Mio. Bilder“ – und die Entwicklung der dafür benötigten Dienste. Ein wichtiger Aspekt ist, dass über *Europeana* auch der Zugriff auf „dreidimensionale CAD-Modelle“ und weitere Virtual Reality-Inhalte ermöglicht werden soll. (vgl. [INT53])

Die aktuellen Forschungsschwerpunkte des DAI zeigen, dass die Vernetzung und Verknüpfung aller für die Archäologie relevanten Daten, und der Zugang auf diese, im Mittelpunkt des Interesses stehen. Es wird versucht, der durch Menge und Heterogenität der Daten und Strukturen entstehenden Problematik entgegenzuwirken. (z.B. *CRM*-Dokumentationsstandard) Auch die räumliche Komponente spielt eine wachsende Rolle – so konnte mit *CISAR* ein raumbezogenes Informationssystem für Archäologie entwickelt werden, das erstmals auch 3D-Funktionalitäten anbietet. Auch bei *Europeana* sollen zukünftig 3D-Modelle visuell angeboten werden.

3.2 Fazit

Dieses neue Angebot dreidimensionaler Modelle bietet viele neue Möglichkeiten für die Archäologie, insbesondere für die realitätsgetreue grafische Visualisierung von Objekten sowie die Visualisierung räumlicher Informationen und Beziehungen. Generell bieten alle dargestellten Methoden, Technologien und Systeme großes Potential für die Dokumentation, die Aufbereitung - also die Analyse und Präsentation - sowie für die Verwaltung, Archivierung und Verteilung archäologischer Funde und Befunde. In Tabelle 4 werden abschließend die in der Arbeit vorgestellten Technologien und Systeme sowie ihre Anwendung in der Archäologie übersichtlich illustriert.

³⁰ Europeana: Online Portal, das das Kulturelle Erbe Europas zusammenführen soll

Tabelle 4: Liste der genutzten Technologien und ihre Anwendung in der Archäologie

Technologien & Systeme	Anwendung in Archäologie
DB, DBS, DBMS	<ul style="list-style-type: none"> - Repositories für Langzeitarchivierung - Fachdatenbanken (Bilddatenbanken, Plan- und Zeichnungsdatenbank, Literaturdatenbanken etc.) - Objektdatenbanken - Bibliotheken - Verknüpfung mit CAD-Software und GIS
CAD-Software	<ul style="list-style-type: none"> - 2D/2½D/3D-Modellierung (CAD-Modelle) - 3D-Dokumentation - 3D-Rekonstruktion - Animationen (z.B. Filme) - CAD Modelle können mit GIS verknüpft werden oder als Grundlage für die Klassifikation dienen
Geoinformationssysteme (Moderne GIS sind an DBMS und CAD-Anwendung angebunden)	<ul style="list-style-type: none"> - Verwaltung - Dokumentation - Räumliche Analyse - Klimaanalyse (vgl. [KO07]) - Prädiktionsmodelle (z.B. Archäoprognose Brandenburg) (vgl. [INT54])
Image-Based Erfassungstechnik - Digitale Fotografie	<ul style="list-style-type: none"> - Dokumentation - 3D-Dokumentation durch Photogrammetrie - Grundlage für Analyse im GIS - Unterwasserarchäologie
Range-Based Erfassungstechnik - Laser-Scanning	<ul style="list-style-type: none"> - 3D-Dokumentation
Internet	<ul style="list-style-type: none"> - Verknüpfung der Daten - Universeller Zugang - Kollaboration - Veröffentlichen von Informationen an breites Publikum/Öffentlichkeit möglich <ul style="list-style-type: none"> >> Publikationen >> Virtuelles Museen

Trotz des großen Potentials werden die Möglichkeiten der computergestützten Verfahren innerhalb der Archäologie noch nicht ausreichend genutzt. Trotzdem - die Archäologie scheint eine Wissenschaft im Umbruch zu sein. Sie kann längst nicht mehr als reine Geistes- und Kulturwissenschaft definiert werden. Dabei würde nämlich die Tatsache unterschlagen, dass Naturwissenschaften, Statistik, Mathematik aber auch die Informatik mittlerweile die wesentlichen Fortschritte und Impulse im Fach erbringen. Die digitale Archäologie – die Archäoinformatik – eröffnet der Archäologie ganz neue Möglichkeiten, die eigenen Problemstrukturen zu durchdringen, Informationen zu repräsentieren und Wissen zu gewinnen. Damit ist sie auch ein Stück "quantitativer Selbsterkenntnis" des Faches und trägt zur Neuordnung seines Charakters bei. (vgl. [INT55])

4 Literatur

- [AL05] M. Altaweel: *The use of ASTER Satellite Imagery in Archaeological Contexts*. In: *Archaeological Prospection* 12, 2005, 151–166.
- [BA08] R. Bamler, N. Adam, S. Hinz, M. Eineder: *SAR-Interferometrie für geodätische Anwendungen*. In: *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 7/2008, Seiten 243-252. Wichmann. ISSN 0002-5968, 2008
- [BI07] G. Bitelli, V. Girelli, F. Remondino, L. Vittuari: *The Potential of 3D Techniques for Cultural Heritage Object Documentation*. In: *Proceedings of Videometrics IX - SPIE-IS&T Electronic Imaging*, vol. 6491, 2007.
- [BO02] W. Boehler: *Scanning for Cultural Heritage Recording*. In: *Proceedings of the CIPA WG 6 International Workshop*, September 1–2, Korfu, Griechenland, 2002.
- [BR05] D. Brunner, G. Brunnett, J. Oexle: *Konzept für ein System zur Automatisierten Klassifikation Bronzezeitlicher Gefäße*, 2005 – PDF: http://www.tu-chemnitz.de/informatik/GDV/forschung/doc/mi_prof_public_167.pdf, Stand: 25.10.2010
- [BU05] E. Buhmann, J. Wiesel: *GIS-Report 2004*. Verlag Harzer, 2005 Karlsruhe.
- [CR04] N. Crofts, M. Doerr, T. Gill, S. Stead, M. Stiff: *Definition of the CIDOC Conceptual Reference Model Version 4.0*, April 2004 – Dokument: http://www.cidoc-crm.org/docs/cidoc_crm_version_4.0.doc, Stand: 25.10.2010
- [DO06] M. Doneus, W. Neubauer: *Laser Scanners for 3D Documentation of Stratigraphic Excavations*. In: M. Baltsavias, A. Gruen, L. Van Gool, M. Pateraki (eds.), *Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage* (London 2006) 193–203.
- [EL04] S. El-Hakim, J.-A. Beraldin, M. Picard, G. Godin: *Detailed 3D Reconstruction of Large-Scale Heritage Sites with Integrated Techniques*. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 24 (3), 2004, 21–29.
- [GR04] A. Gruen, F. Remondino, L. Zhang: *Photogrammetric Reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan*. In: *Photogrammetric Record* 19 (107), 2004, 177–199.
- [GR06] A. Gruen, F. Remondino, L. Zhang: *The Bamiyan Project: Multi-Resolution Image-Based Modeling*. In: M. Baltsavias / A. Gruen / L. Van Gool / M. Pateraki (eds.), *Recording, Modeling and Visualization of Cultural Heritage* (London 2006) 45–53.
- [HE04] H. Eiteljorg: *Computing for Archaeologists*. In: *A Companion to Digital Humanities* (S.20-30). Editors: S. Schreibman, R. Siemens, J. Unsworth. Oxford, Wiley-Blackwell, 2004.
- [HE05] K. Heine, F. Henze, A. Riedel: *Raumbezogene Informationssysteme für Bauforschung und Archäologie*, 2005 https://www-docs.tu-cottbus.de/vermessung/public/publication/forum_der_forschung_2005.pdf, Stand: 25.10.2010

- [HÖ09] C. Hörr, E. Lindinger, G. Brunnett: *New Paradigms for Automated Classification of Pottery*. 2009 – PDF: <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2009/0147/data/CSR-09-06.pdf>, Stand: 25.10.2010
- [HR06] C. Hritz, T. J. Wilkinson: *Using Shuttle Radar Topography to Map Ancient Water Channels in Mesopotamia*. *Antiquity* 80, 2006, 415–424.
- [KA04] R. Kadobayashi, N. Kochi, H. Otani, R. Furukawa: *Comparison and Evaluation of Laser Scanning and Photogrammetry and their Combined Use for Digital Recording of Cultural Heritage*. *IAPRS&SIS* 35:5, 401– 406. 2004
- [KO07] D. Korobov: *GIS as a Tool for Investigation of Early Medieval Climatic Changes in the Kislovodsk Basin (Southern Russia)*. In: *Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)*. Berlin, 2007.
- [LI07] U. Lieberwirth: *3D Voxel-Based Model Building in Archaeology*. At: *CAA (Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology) 2007*, 2. - 6. April, Berlin, 2007.
- PDF: http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/propylaeumdok/volltexte/2010/484/pdf/01_04_lieberwirth_voxel.pdf, Stand: 25.10.2010
- [ME06] B. H. Menze, J. A. Ur, A. G. Sherratt: *Detection of Ancient Settlement Mounds: Archaeological Survey Based on the SRTM Terrain Model*. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72:3, 2006, 321–327.
- [OL04] S. Olsen, A. Brickman, Y. Cai: *Discovery by Reconstruction: Exploring Digital Archeology*, At: *Archeology SIGCHI Workshop „Ambient Intelligence for Scientific Discovery (AISD)“*, 25. April, 2004, Wien. PDF: <http://www.andrew.cmu.edu/course/60-427/aisd/Museum.pdf>, Stand: 25.10.2010
- [PO02] M. Pollefeys, L. Van Gool, M. Vergauwen, K. Cornelis, F. Verbiest, J. Tops: *Video-to-3D*, In: *Proceedings of Photogrammetric Computer Vision 2002 (ISPRS Commission III Symposium)*, International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing.
- [RE06] F. Remondino, S. El-Hakim: *Image-Based 3D Modelling: A Review*. In: *Photogrammetric Record* 21:115, 2006, 269–291.
- [RI85] J. D. Richards: *Training Archaeologists to Use Computers*. In: *Archaeological Computing Newsletter* 2: 2–5, 1985.
- [RO07] A. Rowlands, A. Sarris: *Detection of Exposed and Subsurface Archaeological Remains using Multi-Sensor Remote Sensing*. In: *Journal of Archaeological Science* 34, 2007, 795–803.
- [TA01] K.T. Taylor: *Forensic Art and Illustration*. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.
- [WH02] D.W. Wheatley, M. Gillings: *Spatial Technology and Archaeology: The archaeological applications of GIS*. (Taylor & Francis, London, 2002).

Internetquellen:

- [INT01] Wikipedia (Deutsch) – Digital Humanities:
http://de.wikipedia.org/wiki/Digital_Humanities , Stand: 25.10.2010
- [INT02] Universität Heidelberg - Klassische Archäologie: http://www.uni-heidelberg.de/studium/interesse/faecher/archaeologie_klass.html , Stand: 25.10.2010
- [INT03] Wikipedia (Deutsch <http://de.wikipedia.org/wiki/Archäologie> , Stand: 25.10.2010
- [INT04] Wikipedia (Deutsch) – Archäoinformatik:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Archäoinformatik> , Stand: 25.10.2010
- [INT05] Wikipedia (Deutsch) – Datenbanksystem:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Datenbanksystem>, Stand: 25.10.2010
- [INT06] Wikipedia (Deutsch) – CAD: <http://de.wikipedia.org/wiki/CAD>, Stand: 25.10.2010
- [INT07] Wikipedia (Deutsch) – Elastizitätskoeffizient:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Elastizitätskoeffizient> , Stand: 25.10.2010
- [INT08] Wikipedia (Deutsch) – Geoinformationssystem:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Geoinformationssystem>, Stand: 25.10.2010
- [INT09] GRASS GIS - The World Leading Free Software GIS: <http://grass.itc.it/>, Stand: 25.10.2010
- [INT10] Wikipedia (Deutsch) – GRASS GIS: http://de.wikipedia.org/wiki/GRASS_GIS , Stand: 25.10.2010
- [INT11] Wikipedia (Deutsch) – Voxel: <http://de.wikipedia.org/wiki/Voxel> , Stand: 25.10.2010
- [INT12] Wikipedia (Deutsch) - Airborne Laserscanning:
http://de.wikipedia.org/wiki/Airborne_Laserscanning , Stand: 25.10.2010
- [INT13] Wikipedia (Deutsch) – Lidar (Light detection and ranging):
http://de.wikipedia.org/wiki/Light_detection_and_ranging , Stand: 25.10.2010
- [INT14] Webseite: Spatial Resource - Terrestrial Laser Scanning:
<http://www.spatialresources.com/id76.html>, Stand: 25.10.2010
- [INT15] Wikipedia (Deutsch) - ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer): <http://de.wikipedia.org/wiki/ASTER> , Stand: 25.10.2010
- [INT16] Insight3D – Open-Source Image Based 3D Modeling Software:
<http://insight3d.sourceforge.net/> , Stand: 25.10.2010
- [INT17] Wikipedia (Deutsch) - STS-99: <http://de.wikipedia.org/wiki/STS-99> , Stand: 25.10.2010

- [INT18] Digitale Fernerkundungsmethodik in den Geowissenschaften: 2.2 Aufnahmesysteme: http://ivvgeo.uni-muenster.de/Vorlesung/FE_Script/2_2.html , Stand: 25.10.2010
- [INT19] Vortrag: Bayernbefliegung digital - PDF: http://www.vermessung.bayern.de/file/pdf/2022/vortrag09_stoessel.pdf , Stand: 25.10.2010
- [INT20] Forest Research: Archaeological prospecting in woodland using LiDAR: <http://www.forestresearch.gov.uk/lidar> , Stand: 25.10.2010
- [INT21] H. Eisenbeiss: *Mit dem Modellhelikopter über Pinchango Alto: Vergleich von terrestrischem Laserscanning und Luftbildphotogrammetrie* (2007) – PDF: http://www.photogrammetry.ethz.ch/news/ppt/henri_pinchango_v3.pdf , Stand: 25.10.2010
- [INT22] Wikipedia (Deutsch) – Artefakt (Archäologie): [http://de.wikipedia.org/wiki/Artefakt_\(Archäologie\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Artefakt_(Archäologie)) , Stand: 25.10.2010
- [INT23] Wikipedia (Deutsch) – Streifenprojektion: <http://de.wikipedia.org/wiki/Streifenprojektion> , Stand: 25.10.2010
- [INT24] Tradition In Action - The Saint of the Day: St. Odo of Cluny – November 18 (By Prof. Plinio Corrêa de Oliveira) - http://www.traditioninaction.org/SOD/j204sd_OdoCluny_11-18.html , Stand: 25.10.2010
- [INT25] Ökumenisches Heiligenlexikon – Berno von Cluny: http://www.heiligenlexikon.de/BiographienB/Berno_von_Cluny.htm, Stand: 25.10.2010
- [INT26] Webseite - Cluny Abbey Model: http://www.shafe.co.uk/art/Cluny_Abbey.asp , Stand: 25.10.2010
- [INT27] VENUS-Projekt (Virtual ExploratiON of Underwater Sites) - <http://sudek.esil.univmed.fr/venus/index.php>, Stand: 25.10.2010
- [INT28] P. Drap: *VENUS : Why? Five Objectives, Who? How?* – PDF: <http://public-repository.epoch-net.org/presentations/rome/VENUS.pdf> , Stand: 25.10.2010
- [INT29] Wikipedia (Deutsch): Polygonzug - <http://de.wikipedia.org/wiki/Polygonzug> , Stand: 25.10.2010
- [INT30] Webseite: Grundlagen der Statistik: Dendrogramme: http://www.statistics4u.info/fundstat_germ/cc_dendrograms , Stand: 25.10.2010

- [INT31] The CIDOC Conceptual Reference Model: <http://www.cidoc-crm.org/index.html> , Stand: 25.10.2010
- [INT32] Vortrag: Katrin Teichmann: *Metadaten und das CIDOC Conceptual Reference Model - Eine Einführung* (2009): http://www.swib09.de/vortraege/20091125_teichmann.pdf , Stand: 25.10.2010
- [INT33] Vortrag: Martin Doerr: *Introductory Note: The CIDOC Conceptual Reference Model - Between Scholarship and Technology*. At: International Symposium "Sharing the Knowledge", Washington DC, 2003: http://www.cidoc-crm.org/docs/crm_for_wash.ppt, Stand: 25.10.2010
- [INT34] Informationen über Erlangen CRM/OWL: <http://erlangen-crm.org/> und http://www8.informatik.uni-erlangen.de/IMMD8/staff/Goerz/crm_owl_cidoc2008.pdf , Stand: 25.10.2010
- [INT35] Wikipedia (Deutsch) – Geoglyph: <http://de.wikipedia.org/wiki/Geoglyph> , Stand: 25.10.2010
- [INT36] Wikipedia (Deutsch) – Tachymeter (Geodäsie): [http://de.wikipedia.org/wiki/Tachymeter_\(Geodäsie\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Tachymeter_(Geodäsie)) , Stand: 25.10.2010
- [INT37] Wikipedia (Deutsch) – Messtisch: <http://de.wikipedia.org/wiki/Messtisch>, Stand: 25.10.2010
- [INT38] Wikipedia (Deutsch) – Schraffe: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schraffe>, Stand: 25.10.2010
- [INT39] Wikipedia (Deutsch) – Theodolit: <http://de.wikipedia.org/wiki/Theodolit>, Stand: 25.10.2010
- [INT40] Deutsches Archäologisches Institut (DAI): Baalbek-Projekt: <http://www.dainst.org/baalbek>, Stand: 25.10.2010
- [INT41] Deutsches Archäologisches Institut (DAI): Palatin-Projekt http://www.dainst.org/index_a7611f43644a14a97867001c3253dc21_de.html, Stand: 25.10.2010
- [INT42] F. Henze, K.Heine: *CISAR- ein modulares Informationssystem für Analyse und Dokumentation raumbezogener Daten aus Archäologie und Bauforschung* – PDF:, <http://www.denkmaeler3.de/pdf/Henze-Heine.pdf> , Stand: 25.10.2010
- [INT43] Wikipedia (Deutsch) – Virtual Reality Modeling Language: http://de.wikipedia.org/wiki/Virtual_Reality_Modeling_Language, Stand: 25.10.2010
- [INT44] DAI – Cisar - Ein modulares Informationssystem für Archäologie und Bauforschung: <http://www.dainst.org/cisar> , Stand: 25.10.2010

- [INT45] Archaeology Data Service – Homepage: <http://archaeologydataservice.ac.uk/> und <http://ads.ahds.ac.uk/>, Stand: 25.10.2010
- [INT46] Wikipedia (Deutsch) – Repository: <http://de.wikipedia.org/wiki/Repository>, Stand: 25.10.2010
- [INT47] S. Thänert: *Forschungsdaten und ihre Informationssysteme in der Archäologie*: Die Datenwelt am Deutschen Archäologischen Institut (Vortrag beim 4. Leipziger Kongress für Information und Bibliothek, 2010) – PDF: http://www.opus-bayern.de/bib-info/volltexte/2010/944/pdf/Bibltag2010Thaenert_kurz.pdf, Stand: 25.10.2010
- [INT48] DAI-Projekt - iDAI.field: - <http://www.dainst.org/idaifield>, Stand: 25.10.2010
- [INT49] Arachne-Homepage: <http://www.arachne.uni-koeln.de/drupal/>, Stand: 25.10.2010
- [INT50] iDAI-Bookbrowser: <http://www.arachne.uni-koeln.de/drupal/?q=de/books> , Stand: 25.10.2010
- [INT51] DAI-Projekt: Ausbau der Archäologischen Bibliographie - Neue Möglichkeiten der Recherche in ZENON:
http://www.dainst.org/index_86310e19bb1f14a195250017f0000011_de.html,
Stand: 25.10.2010
- [INT52] Propylaeum, die virtuelle Fachbibliothek Altertumswissenschaften:
<http://www.propylaeum.de/>, Stand: 25.10.2010
- [INT53] DAI-Projekt - CARARE: <http://www.dainst.org/carare>, Stand: 25.10.2010
- [INT54] Brandenburgische Landesamt für Denkmalpflege und Archäologische Landesmuseum: Das Forschungsprojekt „Archäoprognose Brandenburg“:
http://www.bldam-brandenburg.de/projekte_s/archaoprognose.html , Stand: 25.10.2010
- [INT55] Vortrag: B. Ducke, J. Müller: *Archäologie trifft Computer: Archäoinformatik in Theorie und Praxis* (2007) – PDF:
<http://www.uni-kiel.de/ufq/bereiche/dateienAI/Archaeoinformatik.pdf>,
Stand: 25.10.2010