

# BERÜHRUNGSFREIE UND NICHT INVASIVE UNTERSUCHUNG ANTIKER KERAMIK MITTELS INDUSTRIELLER RÖNTGEN- COMPUTERTOMOGRAFIE

STEPHAN KARL, DANIEL JUNGBLUT, JÖRDIS ROSC  
MIT EINEM BEITRAG VON RUDOLF ERLACH

## 1 EINLEITUNG

### 1.1 Röntgenografie

Bereits bald nach Erforschung der nach ihrem Entdecker Wilhelm Conrad Röntgen benannten X-Strahlen im Jahre 1895 und noch vor der ersten medizinischen Anwendung wurde die Röntgenografie bei Untersuchungen ägyptischer Mumien eingesetzt<sup>1</sup>. Den Körper und seine inneren Strukturen berührungslos und ohne materielle Eingriffe so transparent zu gestalten, dass sie weiteren Analysen zugänglich gemacht werden, ist ein äußerst effizientes und wirkungsvolles Verfahren, das bis heute sukzessive durch Fachleute in den Disziplinen Maschinenteknik, Physik, Mathematik und Radiologie sowohl für medizinische als auch industrielle Anwendungen weiterentwickelt wurde und wird.

Die Röntgenografie wie auch die Röntgen-Computertomografie haben als Methode innerhalb der *non invasive archaeology* seit Anbeginn eine besondere Bedeutung für Zustandsanalysen archäologischer und kunsthistorischer Objekte<sup>2</sup>. Die besondere Ästhetik der Röntgenbilder ist neuerdings auch von Fotokünstlern entdeckt worden<sup>3</sup>. Gegenwärtig wird der letzte Stand dieser technischen Entwicklung durch sekundenschnelle Spiralcomputertomografen in der medizinischen Diagnostik sowie durch hochauflösende Kegelstrahlcomputertomografen für die Materialprüfung in der Industrie repräsentiert.

Bereits seit den 1930er-Jahren wird die Röntgenografie in der archäologischen Keramikforschung zur Differenzierung der verwendeten Keramikarten und zur Rekonstruktion des Herstellungsprozesses eingesetzt<sup>4</sup>. Für technologische Untersuchungen von Keramikgefäßen aus dem griechischen Altertum behalf sich unseres Wissens erstmals Joseph Veach Noble in der Vasenforschung der klassischen Archäologie mit Röntgenaufnahmen, die ihm den inneren Aufbau einer attisch-weißgrundigen Lekythos des Inschriften-Malers offenbarten<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> T. Böni – F. J. Rühli – R. K. Chhem, History of paleoradiology: early published literature, 1896–1921, Canadian Association of Radiologists Journal 55/4, 2004, 203–210; vgl. C. Keller, Abbilder des Unsichtbaren, in: C. Keller (Hrsg.), Fotografie und das Unsichtbare 1840–1900, Ausstellungskatalog Albertina Wien, San Francisco Museum of Modern Art (Wien 2009) 19–35. Auch am UMJ wurden ägyptische Mumien mit dieser Methode zu einem sehr frühen Zeitpunkt durchleuchtet; s. dazu JJB 94, 1905, 39: „Herrn Dr. Purkert ist die Abteilung zu besonderem Danke verpflichtet; er bereicherte sie mit photographischen Röntgen-Aufnahmen der Kindermumie, [...]“; s. weiters JJB 95, 1906, 35 f.

<sup>2</sup> Ein Leitfaden zu Durchleuchtungen von archäologischen Funden wurde im Jahre 1968 herausgegeben: J. Driehaus, Archäologische Radiographie, Archeo-Physika 4 (Düsseldorf 1968).

<sup>3</sup> N. Veasey, X-Ray. Die Schönheit des Verborgenen, Collection Rolf Heyne (München 2010).

<sup>4</sup> Zur Geschichte s. Karl, Durchleuchtungen, 99–101. Grundlegend zur Methode und zu den Anwendungsmöglichkeiten in der Keramikanalyse: C. Carr, Advances in Ceramic Radiography and Analysis: Applications and Potentials, JASc 17, 1990, 13–34; C. Carr – E. B. Riddick, Advances in Ceramic Radiography and Analysis: Laboratory Methods, JASc 17, 1990, 35–66; Middleton, Ceramics; Berg, pots. – Zu speziellen Einsätzen: D. P. Braun, Radiographic Analysis of Temper in Ceramic Vessels: Goals and Initial Methods, JFieldA 9, 1982, 183–192; G. V. Foster, Identification of Inclusions in Ceramic Artifacts by Xeroradiography, JFieldA 12, 1985, 373–376; M. A. Courty – V. Roux, Identification of Wheel Throwing on the basis of Ceramic Surface Features and Microfabrics, JASc 22, 1995, 17–50; A. Pierret – C. J. Moran – L.-M. Bresson, Calibration and Visualization of Wall-Thickness and Porosity Distributions of Ceramics Using X-radiography and Image Processing, JASc 23/3, 1996, 419–428.

<sup>5</sup> J. V. Noble, The Techniques of Painted Attic Pottery (New York 1965) 24 Abb. 149–150. Wesentlich später erschien die Studie: A. Leonard – M. Hughes – A. Middleton – L. Schofield, The making of Aegean stirrup jars: technique, tradition and trade, BSA 88, 1993, 105–123.

Der Umstieg auf das digitale Abbildungsverfahren bei radiografischen Aufnahmen sowie verbesserte Bildauswertungen mit entsprechender Software schufen im letzten Jahrzehnt neue Visualisierungsmethoden im Rahmen der archäologischen Keramikanalyse, die sich derzeit in Projekten zur Identifizierung von signifikanten Keramiktexturen und zur Feststellung handwerklicher Techniken in verschiedenen Töpferwerkstätten von Etrurien bis Kreta niederschlägt<sup>6</sup>. Ein Nachteil bei röntgenografischen Verfahren bleibt jedoch bestehen: Aufgrund der Durchleuchtung des gesamten Objektes und seiner zweidimensionalen Darstellung kommt es zu Überschneidungen und Unschärfen der inneren Strukturen, die im Nachhinein zumeist schwierig zu differenzieren und zu beurteilen sind.

## 1.2 Medizinische Computertomografie

Mit der Computertomografie (CT) wurde durch Allan McLeod Cormack und Godfrey Newbold Hounsfield im Jahre 1972 ein mathematisches schnittbildgebendes Verfahren entwickelt, das aus einer Vielzahl fächerförmig gewonnener Röntgenaufnahmen ein Summationsbild erstellt und daraus ein dreidimensionales Tomogramm generiert. Damit konnten nun Schnitte mit einer bestimmten Stärke virtuell an beliebiger Stelle durch das Objekt gelegt werden.

Die CT ist eine Methode, die für die archäologische Dokumentation von Gefäßen aber auch anderen Objekten geradezu prädestiniert ist. Dennoch setzt in der Geschichte der Keramikforschung die Nutzung der CT für die Dokumentation und Visualisierung von Gefäßformen relativ spät ein.

Die frühesten bekannten Untersuchungen stellen *en bloc* Bergungen von Grabgefäßen dar, bei denen es im Zuge restauratorischer Maßnahmen zu einer Erstdiagnose mit Hilfe der CT kam (Abb. 1)<sup>7</sup>. Die damit zusätzlich gewonnenen Erkenntnisse zeigten relativ bald, „that the standard medical Computed Tomography (CT) can be a very practical and powerful diagnostic tool for the study of ceramic and clay archaeological artifacts<sup>8</sup>“.

Seit der Mitte der 1990er-Jahre werden griechische Vasen in einem größeren Umfang im Allard Pierson Museum in Amsterdam, anfänglich in Pilotstudien, später systematisch im Rahmen von Publikationsprojekten des Corpus Vasorum Antiquorum (CVA), mittels CT untersucht<sup>9</sup>. Ziel dieser Untersuchung in Amsterdam

<sup>6</sup> R. D’Asti – M. Vidale, Un contributo alla conoscenza delle tecniche di manifattura, in: A. Naso (Hrsg.), *Appunti sul bucchero. Atti delle giornate di studio, Archeologia – Atti di Convegni e Seminari (Udine 2004)* 293–305; J. Lang – A. Middleton – J. Ambers – T. Higgins, *Radiographic images*, in: J. Lang – A. Middleton (Hrsg.), *Radiography of Cultural Material* (Burlington 2005) 20–48; Greene – Hartley, *Ceramics; Berg, pots*; vgl. auch I. Berg, A comparative look at the use of the potters’s wheel in Bronze Age Greece, in: Y. Kazazi (Hrsg.), *2η Διεθνές συνέδριο αρχαίας ελληνικής τεχνολογίας Πρακτικά. 2<sup>nd</sup> International Conference on Ancient Greek technology. Proc. Athens 17–21 October 2005 (Athen 2006)* 189–194; I. Berg, X-radiography of Knossian Bronze Age vessels: assessing our knowledge of primary forming techniques, *BSA* 104, 2009, 137–173. Zumeist stehen bei radiologischen Untersuchungen aber Metallobjekte im Mittelpunkt; so wurden anlässlich des Kongresses „All may be revealed – X-radiography and archaeological artefacts“ im Museum of London im Jahre 2003 Richtlinien dazu herausgegeben: V. Fell – Q. Mould – R. White, *Guidelines on the X-radiography of Archaeological Metalwork*, English Heritage Publications (Swindon 2006).

<sup>7</sup> Die u. E. frühesten publizierten CT-Aufnahmen archäologischer, bes. keramischer Gegenstände Österreichs sind: B. Hebert, Zur Computertomographie-Untersuchung archäologischer Funde, *AÖ* 5/1, 1994, 36–38; B. Hebert, Computertomographie-Untersuchungen an Gräberfunden vom Frauenberg, *Sprechende Steine* 8, 1994, 1–3. Die Betreuung der Analysen erfolgte durch Robert Fürhacker; die Durchführung ermöglichte Gert Stampfel, CT-Institut Leoben. Zu weiteren frühen Untersuchungen s. T. Anderson – C. Fell, Analysis of Roman Cremation Vessels by Computerized Tomography, *JASc* 22, 1995, 609–617; B. Hering, Die Untersuchung von Sammlungsgegenständen mit Hilfe der Computertomographie – Fallbeispiele, in: W. Bock – C.-O. Fischer – J. Lexow – E. Mundry – G. Nardoni – J. Riederer – G. Schickert (Hrsg.), 4. Internationale Konferenz. Zerstörungsfreie Untersuchungen an Kunst- und Kulturgütern. 4<sup>th</sup> International Conference on Non-Destructive Testing of Works of Art, Berlin 3.–8. Oktober 1994, *DGZfP-Berichtsband 45 (Berlin 1994)* 50–59.

<sup>8</sup> N. Applbaum – Y. H. Applbaum, The Use of Medical Computed Tomography (CT) Imaging in the Study of Ceramic and Clay Archaeological Artifacts from the Ancient Near East, in: M. Uda – G. Demortier – I. Nakai (Hrsg.), *X-rays for Archaeology* (Dordrecht 2005) 231–245, bes. 243. Vgl. zu Vorgängerprojekten ebenda 232 f. Von jüngeren CT-Untersuchungen ist hinsichtlich der Visualisierung eine Studie zu drei ausgewählten Objekten der ehem. Parlasca-Sammlung (heute Antikensammlung der Universität Erlangen) besonders erwähnenswert: M. Meister, *Interaktive Visualisierungstechniken in interdisziplinären Anwendungsbereichen* (techn. Diss. Universität Erlangen 2008) 19–32 <<http://www.opus.ub.uni-erlangen.de/opus/volltexte/2008/904/pdf/Promotion>> (18.3.2011); darunter das Pygmäen-Rhyton des Sotades-Malers; CVA-Online 209480.

<sup>9</sup> R. J. Jansen – H. F. W. Koens, Computer Tomography. A Tool in the Study of Ancient Ceramics, in: P. Heesen, *The J. L. Theodor Collection of Attic Black-Figure Vases*, Allard Pierson series 10 (Amsterdam 1996) 199–201; Van de Put, *Use; Jansen, Scenes*.

war das Aufzeigen der technischen Möglichkeit einer medizinischen CT und ihrer Anwendung im archäologischen Bereich. Mit dieser Technik können in wesentlich kürzerer Zeit Profilschnitte durch das Gefäß gelegt werden, die bei geschlossenen Gefäßen mit enger Mündung im Gegensatz zur herkömmlichen archäologischen Zeichnung auch die Innenkontur der Gefäßwandung mit all ihren Unregelmäßigkeiten exakt erfassen und darstellen. Allein diese akkurate Abbildung der Gefäßwandung ermöglicht es bereits, konkrete Aussagen zum antiken Herstellungsprozess abzuleiten. Darüber hinaus werden auch sämtliche, im Vergleich zur Keramik unterschiedlich dichte Ergänzungsmaterialien sichtbar, die dem Objekt im Zuge historischer Reparaturen bzw. Restaurierungen zugefügt wurden (Abb. 2).

Obwohl der Schwerpunkt der CT-Anwendung in Amsterdam auf der möglichst exakten Darstellung des Gefäßprofils für weitere Formanalysen lag, geht ein bemerkenswerter methodischer Ansatz auf diese Projektgruppe zurück, in der versucht wurde, die Grauwerte, die sog. Hounsfield Units, eines CT-Bildes für die Differenzierung unterschiedlicher Keramikarten statistisch-vergleichend auszuwerten<sup>10</sup>. Die Methode basiert darauf, dass Röntgenstrahlen, die Keramikarten mit einer unterschiedlichen chemischen bzw. mineralogischen Zusammensetzung durchdringen, von diesen Materialien auch unterschiedlich absorbiert und in der Folge dem jeweiligen durchwanderten Keramiktyp im CT-Bild entsprechend aufgezeichnet werden. Vor allem können damit möglichst formgleiche Gefäße gut verglichen

Die Gefäßprofile, die in den letzten drei CVA-Bänden des Allard Pierson Museums von Amsterdam zwischen 2006 und 2009 publiziert wurden, sind ausschließlich aus Daten der medizinischen CT erstellt worden; s. die Vorworte von W. D. J. Van de Put in CVA Amsterdam 4; O. E. Borgers und H. A. G. Brijder in CVA Amsterdam 5 und F. Songu in CVA Amsterdam 6. Zum Exaleiptron des Polos-Malers Allard Pierson Museum Inv.-Nr. 1942 s. CVA Amsterdam 5 Taf. 283–286 Abb. 45; CVA-Online 305135.

<sup>10</sup> W. van Duivenvoorde, Attisch schwarzfiguriges Exaleiptron des Polos-Malers mit ergänztem Henkel (Allard Pierson Museum Inv.-Nr. 1942); medizinische CT (aus W. van Duivenvoorde, Attisch aardewerk gevormd in de CT-scan. Computertomografie in de archeologie: de vervaardiging van Attisch zwartfigurig aardewerk uit de zesde en vijfde eeuw voor Christus [unpubl. phil. Dipl. Universität Amsterdam 2000]); vgl. H. F. W. Koens – R. J. Jansen, Computed Tomography and Ancient Ceramics: a new approach, in: R. F. Docter – E. M. Moorman (Hrsg.), Classical Archaeology towards the Third Millennium: Reflections and Perspectives, Proc. of the XV<sup>th</sup> International Congress of Classical Archaeology, Amsterdam, July 12–17, 1998, Allard Pierson series 12 (Amsterdam 1999) 223 f. Für die Zusendung einer Kopie ihrer Diplomarbeit ist Wendy van Duivenvoorde zu danken.



Abb. 1: Schnittaufnahme durch ein zerdrücktes Kegelhalsgefäß der Hallstattzeit aus Altenmarkt bei Leibnitz, Steiermark; medizinische CT, Untersuchung vom 10. Febr. 1994 (BDA Steiermark, Abteilung für Bodendenkmale, Planarchiv)



Abb. 2: Schnittaufnahme durch ein attisch schwarzfiguriges Exaleiptron des Polos-Malers mit ergänztem Henkel (Allard Pierson Museum Inv.-Nr. 1942); medizinische CT (aus W. van Duivenvoorde, Attisch aardewerk gevormd in de CT-scan. Computertomografie in de archeologie: de vervaardiging van Attisch zwartfigurig aardewerk uit de zesde en vijfde eeuw voor Christus [unpubl. phil. Dipl. Universität Amsterdam 2000], Kat.-Nr. 25; mit Erlaubnis der Autorin Wendy van Duivenvoorde und des Allard Pierson Museum, GERALDA JURRIAANS-HELLE)

werden; so konnten z. B. in der Gruppe der Siana-Schalen jene Gefäße, die dem Taras-Maler stilistisch zugewiesen werden, von denen anderer Maler bzw. Töpfer unterschieden werden. Natürlich wird das Ergebnis einer solchen Auswertung durch die Dicke der Gefäßwandung und durch rezente Ergänzungsmaterialien beeinflusst, doch schwerwiegender wirkte sich die schlechte Auflösung der damals zur Verfügung stehenden medizinischen Computertomografen für eine solche archäometrische Untersuchung aus. Doch auch bei der jüngsten Generation der medizinischen Spiralcomputertomografen erreicht die für die Detailerkennbarkeit entscheidende Ortsauflösung kaum kleinere Werte als 0,3–0,4 mm<sup>11</sup>. Grundsätzlich sind medizinische CT-Anlagen für den menschlichen „lebenden“ Körper optimiert und dementsprechend daher in ihrer Darstellungsgenauigkeit und Durchdringungsfähigkeit begrenzt.

### 1.3 Industrielle Computertomografie

Die Weiterentwicklung des medizinischen Computertomografen zu einem industriellen Röntgen-Computertomografen schuf ein Verfahren, in dem feinste innere und äußere Strukturen von zumeist industriell hergestellten Guss- und Bauteilen mit hoher Auflösung und hohem Durchdringungsgrad nach gewissen Qualitätsanforderungen untersucht werden können. Dieses hochauflösende CT-Verfahren hat sich in der so genannten zerstörungsfreien Prüfung (ZfP oder NDT für *non-destructive testing*) seit den frühen 1990er-Jahren in der Industrie etabliert.

Industrielle Computertomografen unterscheiden sich von Anlagen der medizinischen Diagnostik grundsätzlich im mobilen Objektträger und in den stationären Bestandteilen wie Mikrofokusröhre und Detektor sowie durch eine niedrigere Beschleunigungsspannung. Gegenüber Techniken, die Schnittbilder über einen Zeilendetektor aufzeichnen, erzielt die dreidimensionale Kegelstrahl-CT aufgrund ihrer Projektionsgeometrie eine deutlich höhere Ortsauflösung in alle drei Raumrichtungen, die – abhängig von der Objektgröße – bis in den Nanometer-Bereich führen kann. Mit diesem berührungslos arbeitenden Verfahren werden heute Bauteile dreidimensional vermessen, versteckte Fehler detektiert und Porosität, Dichte und andere innere Strukturen qualitativ und quantitativ bestimmt und analysiert.

Dieser technische Fortschritt macht gerade die industrielle hochauflösende CT zu einem Verfahren, das für eine berührungsfreie Untersuchung archäologischer Objekte besonders geeignet ist; vor allem auch deswegen, da mit dieser Methode z. T. ähnlichen Fragestellungen wie in der Industrie nachgegangen werden kann und daher genügend Erfahrungswerte sowie kommerzielle Visualisierungs- und Analysesoftware vorliegen. Dennoch wird die industrielle CT im Rahmen der archäologischen Erforschung von Fundstücken nur selten angewandt und, wenn überhaupt, hauptsächlich auf Metallobjekten oder organische Stoffen wie Textilien, Holz oder Knochenmaterial<sup>12</sup>.

<sup>11</sup> Neue CT-Anlagen wie Siemens Somatom Sensation haben eine isotrope Auflösung von 0,33 mm: <http://www.medical.siemens.com>. (18.3.2011) Zusätzlich wird durch eine Ultra High Resolution-Technologie (z-UHR) eine Auflösung in der Bilddarstellung von 0,24 mm erzielt.

<sup>12</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung: H. Riesemeier – B. Illerhaus – J. Goebels – P. Reimers, Nachweis von Materialunterschieden, Defekten und verborgenen Strukturen in Kunstwerken mit Hilfe der Computertomographie (CT), in: W. Bock – C.-O. Fischer – J. Lexow – E. Mundry – G. Nardoni – J. Riederer – G. Schickert (Hrsg.), 4. Internationale Konferenz. Zerstörungsfreie Untersuchungen an Kunst- und Kulturgütern, 4<sup>th</sup> International Conference on Non-Destructive Testing of Works of Art, Berlin 3.–8. Oktober 1994, DGZfP-Berichtsband 45 (Berlin 1994) 60–65; B. Illerhaus – J. Goebels – H. Riesemeier, Die dreidimensionale Computertomographie zur Erforschung archäologischer tauscherter Eisenfunde, in: W. Menghin (Hrsg.), Tauschierarbeiten der Merowingerzeit. Kunst und Technik, Museum für Vor- und Frühgeschichte Bestandskataloge 2 (Berlin 1994) 163–168; B. Illerhaus, Fortschritte in der Computertomographie. Neueste Technik zur Untersuchung kulturhistorischer Objekte, *Restauro* 1995, 344–349.

FH Aalen: C. Sauerwein – M. Simon – I. Pfeifer-Schäller – S. Tomaschko – F. Klein, Anwendungen der 3D-Computertomographie in Entwicklung und Forschung, in: DGZfP-Jahrestagung 2002 – Vortrag 37 <<http://www.ndt.net/article/dgzfp02/papers/v37/v37.htm>> (18.3.2011); R. Fürhacker – I. Pfeifer-Schäller – R. Wedenig, Neue Erkenntnisse zu zwei Bronzeobjekten aus dem hallstattzeitlichen Gräberfeld Führholz bei Mittertrixen durch den Einsatz der industriellen 3D-Röntgen-Computertomografie, *Rudolfinum* 2004, 109–120; R.-D. Blumer – J. Butenuth – B. Nowak-Böck – C. Peek, Inventarisierung und Dokumentation. Neue Einsatzmöglichkeiten digitaler Medien in der Archäologischen Denkmalpflege, *Denkmalpflege in Baden-Württemberg* 34/1, 2005, 29–36; B. Nowak-Böck – C. Peek – I. Pfeifer-Schäller, Zur Untersuchung archäologischer Textilien mittels 3D-Computertomographie, *VDR Beiträge* 2005/1, 134–147; E. Keefer, Forschung: Kelten Digital: Geglückter Durchbruch, *AiD* 2005/2, 6–12; E. Keefer – I. Pfeifer-Schäller –

Dreidimensionale Visualisierungen, die aus Daten der industriellen Computertomografie gewonnen werden, bewirken heutzutage ein unglaubliches Faszinosum in der Archäologie und Restaurierung, das mit den ersten Durchleuchtungen mittels Röntgenstrahlen des späten 19. und frühen 20. Jahrhunderts zu vergleichen ist<sup>13</sup>. Ein erstes systematisches Vorgehen hinsichtlich der Anwendung der industriellen CT ist aktuell bei Auswertungen von Blockbergungen festzustellen, wobei dabei überprüft wird, wie weit diese virtuelle Dokumentation mit der realen Objektidentifikation und lagemäßigen Befundsituation, die sonst nur durch zeitintensive manuelle Freilegung zu erlangen wäre, verglichen werden kann<sup>14</sup>.

Untersuchungen von Keramikobjekten, vor allem von griechischen Vasen, mittels hochauflösender CT sind in der Keramikforschung selten und in CVA-Publikationen soweit unbekannt<sup>15</sup>. Eine Pilotstudie in Wien gilt hinsichtlich der Darstellung der Potentiale dieser neuen Methode als auch für die Vermittlung im Rahmen des österreichischen CVA als wegweisend<sup>16</sup>.

#### 1.4 Das Grazer CT-Projekt

In einer Zusammenarbeit mit dem Österreichischen Gießerei-Institut (ÖGI) in Leoben gelang es, ausgehend vom Universalmuseum Joanneum (UMJ) in Graz ein Projekt zu initiieren, das sich zum Ziel genommen hat, industrielle Röntgen-Computertomografie als Methode bei der Untersuchung von antiken Keramikgefäßen auf ihre Möglichkeiten und Grenzen im Rahmen der archäologischen Keramikforschung zu evaluieren<sup>17</sup>. Dafür konnten griechische Vasen aus dem Bestand des Universalmuseums Joanneum sowie aus der Originalsammlung der Karl-Franzens-Universität Graz (KFUG) verwendet werden (Tab. 1)<sup>18</sup>. Dass sich Mitarbeiter des Goethe-Zentrums für Wissenschaftliches Rechnen (G-CSC) der Universität Frankfurt sowie des Interdisziplinären Zentrums für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) der Universität Heidelberg für die Auswertung und Kombination der CT-Daten von archäologischen Gegenständen interessierten und sich in der Folge an dieser Projektidee beteiligten, war ein wesentlicher Aspekt, diese Methode über die geplanten Zielsetzungen hinaus weiterzuentwickeln<sup>19</sup>.

C. Sauerwein – H. Wälischmiller, *Voxel and STL-Data in Service of Archaeology – Digital Celts*, in: J. Völker – R. Link (Hrsg.), *EC NDT 2006*, Berlin, 25.–29.9.2006 <<http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.3.2.4.pdf>> (18.3.2011).

FH Wels: J. Kastner – D. Salaberger – M. Grabner – M. Mehofer, *Mikro-Röntgencomputertomografie: Eine zerstörungsfreie Methode für die Archäologie*, AÖ 18/1, 2007, 60–64; J. Kastner – D. Salaberger – K. Efstathiou, *Röntgencomputertomografie-Untersuchungen an metallischen Fundstücken aus Griechenland*, AÖ 18/2, 2007, 64 f.

<sup>13</sup> Bei archäologischen Untersuchungen hat sich für dieses Verfahren der Terminus 3D-Computertomografie (3D-CT) etabliert. Methodisch kritische Beiträge hinsichtlich der Ergebnisse sind eher selten; eine der wenigen Ausnahmen ist B. Illerhaus – A. Staude – D. Meinel, *Das zweite Gesicht der Nofretete*, *ZfP-Zeitung* 116, 2009, 52–56.

<sup>14</sup> *Gräberfeld Lauchheim*: N. Ebinger-Rist – C. Peek – J. Stelzner, *Gräber im virtuellen Flug erfasst. Kann die 3D-Computertomografie bei der Auswertung des frühmittelalterlichen Gräberfeldes von Lauchheim helfen?*, *Denkmalpflege in Baden-Württemberg* 38/3, 2009, 165–170; C. Peek – N. Ebinger-Rist – J. Stelzner, *Zur Bearbeitung frühmittelalterlicher Grabfunde des Friedhofs von Lauchheim (Ostalbkr.)*, *AKorrBl* 39, 2009, 559–587. *Gräberfeld Immenbeck*: I. Berg, *Visualisierung von Computertomographien (CT) in der archäologischen Forschung mit VG Studio MAX 2.0*, *Restauro* 2010, 242–244.

<sup>15</sup> Dimitrov et al., *Visage*; vgl. auch E. Wenger – L. Dimitrov – L. Sramek – C. Lang-Auinger – E. Trinkl in diesem Band. Im Jahre 2005 wurden ausgehend durch K. Bente (Institut für Mineralogie, Kristallographie und Materialwissenschaft – IMKM, Universität Leipzig) mehrere keramische Produkte, darunter auch eine Lekythos, an verschiedenen Labors mittels industrieller CT durchleuchtet: K. Bente – G. K. Friedmann, *Materialwissenschaftliche Diagnostik von Objekten der Klassischen Antike*, in: *DGZfP-Jahrestagung 2007 – Vortrag 26* <<http://www.ndt.net/article/dgzfp07/Inhalt/v26.pdf>> (18.3.2011); Friedmann – Bente, *Restaurierungen*; vgl. auch M. Recke, *Auf Herz und Niere. Etruskische Körperteilvotive der Gießener Antikensammlung*, *Spiegel der Forschung* 25/2, 2008, 56–63. Zu den möglichen Gründen für die seltene Anwendung s. Karl, *Durchleuchtungen*, 100.

<sup>16</sup> C. Lang-Auinger, *Corpus Vasorum Antiquorum – Das österreichische Projekt*, *AnzWien* 143, 2008, 57–66, bes. 64 f.

<sup>17</sup> Die CT-Untersuchungen wurden durch einen Finanzierungsbeitrag der Abteilung 3 – Wissenschaft und Forschung der Steiermärkischen Landesregierung (GZ: A3 – 16.L-42/2008-11) ermöglicht; zur Testphase s. Karl, *Durchleuchtungen*. Für die vielfältige Unterstützung im Rahmen dieses Projektes ist dem gesamten Team des CT-Labors am ÖGI zu danken: Georg Geier und Daniel Habe.

<sup>18</sup> Für die zur Verfügung Stellung der Objekte ist hinsichtlich des UMJ der damaligen Abteilungsleiterin Ulla Steinklauber und dem derzeitigen Abteilungsleiter Karl Peitler, hinsichtlich der KFUG dem Institutsleiter Peter Scherrer zu danken.

<sup>19</sup> Ergebnisse dieser Zusammenarbeit mit den genannten Rechenzentren wurden u. a. in Heidelberg und London vorgestellt: D. Jungblut – S. Karl – H. Mara – S. Krömker – G. Wittum, *Automated GPU-Based Surface Morphology Reconstruction of Volume Data for Archaeology*, in: H.-G. Bock – W. Jäger – M. Winckler (Hrsg.), *Scientific Computing and Cultural Heritage*.

Gerade Keramikgefäße mit ihrer unterschiedlichen Herstellungstechnik aber auch das Material Keramik selbst mit seiner immanenten Porosität und Inhomogenität der Matrix erweisen sich als besonders geeignet für derartige CT-Untersuchungen, obgleich dies bis zuletzt kaum von der Forschung berücksichtigt wird<sup>20</sup>. Positiv auf das Endergebnis wirkt sich das Fehlen – bis auf wenige Ausnahmen – metallischer Applikationen auf den Gefäßen aus, die den Nachteil haben, dass sie zumeist den unmittelbar angrenzenden Bereich überstrahlen. Die Unnotwendigkeit, das Objekt während des gesamten Prozesses zu berühren – jedes untersuchte Gefäß wurde bereits in der Restaurierungswerkstatt des Museums in Polystyrol-Platten (EPS) verpackt und musste bis zur Rückgabe nicht herausgenommen werden –, ist aus sicherungstechnischer bzw. konservatorischer Sicht von besonderer Bedeutung.

Im Prinzip ermöglicht die Anwendung der medizinischen bzw. industriellen CT der/dem Archäologin/Archäologen in relativ kurzer Zeit einen Einblick in das Innere derjenigen Gefäße, die sich aufgrund ihrer geschlossenen Form einer herkömmlichen optischen Untersuchung entziehen. Mit Hilfe der industriellen CT, die bei der in dieser Studie genutzten Anlage eine Mess- und Darstellungsgenauigkeit bis zu 5 µm erreicht, sind auch kleinste Restaurierungsmaßnahmen, Angarnierungen und separat getöpferte Formteile an ihrer Grenzfläche genau zu erfassen<sup>21</sup>. Es sind darüber hinaus nicht invasive Einblicke in den Scherben (*fabric*) des Gefäßes möglich. So werden wie bei einer mikroskopischen Untersuchung an einer frischen Bruchfläche des Objektes die Eigenschaften der Keramikmatrix und der Magerung bzw. der nicht-plastischen Bestandteile sichtbar. Die komplette dreidimensionale Erfassung des Objektes sowohl hinsichtlich der Oberfläche als auch der inneren Strukturen liefert eine gewaltige Datenmenge an kulturhistorisch und archäologisch relevanten Informationen, für die es im Zuge des *post processing* gilt, adäquate und effektive Schritte der Datenanalyse speziell im Rahmen der archäologischen und archäometrischen Keramikforschung zu entwickeln.

| ÖGI-ID    | Objekt-Nr.             | H/max. L<br>[mm] | Dm/<br>min. L<br>[mm] | Ware/Herkunft    | Form                 | Phase             | Datierung          | Literatur   |
|-----------|------------------------|------------------|-----------------------|------------------|----------------------|-------------------|--------------------|---|
| CT01184   | UMJ Inv.-<br>Nr. 4214  | 76               | 49                    | Protokorinthisch | Ovoider<br>Aryballos | SpätMPK<br>II–SPK | 660–630<br>v. Chr. | Katalog Archäologie-<br>museum, 164 Nr. 936<br>Abb.       |
| CT02183   | UMJ Inv.-<br>Nr. 25306 | 74               | 70                    | Korinthisch      | Kugel-<br>aryballos  | FrühSK            | 570–560<br>v. Chr. | unpubliziert  |
| CT02184   | UMJ Inv.-<br>Nr. 25304 | 67               | 68                    | Korinthisch      | Kugel-<br>aryballos  | SpätSK            | 560–550<br>v. Chr. | unpubliziert  |
| CT02185   | UMJ Inv.-<br>Nr. 25278 | 71               | 65                    | Korinthisch      | Kugel-<br>aryballos  | FrühSK            | 570–560<br>v. Chr. | Katalog Archäologie-<br>museum, 165 Nr. 940<br>Abb.       |
| CT02186   | UMJ Inv.-<br>Nr. 4215  | 63               | 66                    | Korinthisch      | Kugel-<br>aryballos  | SpätMK            | 580–570<br>v. Chr. | Katalog Archäologie-<br>museum, 165 Nr. 939<br>Abb.       |
| CT02187   | UMJ Inv.-<br>Nr. 8738  | 62               | 58                    | Korinthisch      | Kugel-<br>aryballos  | MittelFK          | 610–600<br>v. Chr. | Katalog Archäologie-<br>museum, 165 Nr. 938<br>Abb.       |
| CT02188-1 | KFUG Inv.-<br>Nr. 804  | 82               | 52                    | Nordionisch      | Randfalz-<br>kotyle  |                   | 690–650<br>v. Chr. | vgl. Karl, Durch-<br>leuchtungen, 102<br>Abb. 3, 1. v. l. |

Contributions in Computational Humanities (Heidelberg 2013) 41–49; Karl et al., Insights. Aktuell ist das CT-Projekt am Institut für Archäologie der Karl-Franzens-Universität Graz verankert: <http://www.uni-graz.at/klar1www>: Kombination von volums- und oberflächenbasierender 3D-Messtechnik zur Analyse von antiker Keramik; Stephan Karl, Jödis Rosc (ÖGI), Daniel Jungblut (G-CSC) und Hubert Mara (IWR). Für die Aufnahme am Institut für Archäologie ist dem Institutsleiter Peter Scherrer zu danken. Zum Projekt s. auch <http://ipp.uni-hd.de/>: Combination of Volume and Surface-based Measurement and Analysis of Antique Ceramics.

<sup>20</sup> Zuletzt R. Gebhard, Blick ins Innere – Funde durchschaut, AiD 2009/5, 30–32; N. Ebinger-Rist – C. Peek – J. Stelzner, Mehr Durchblick in kürzester Zeit. Befunddokumentation mit 3D-Computertomografie, in: M. Knaut – R. Schwab (Hrsg.), Archäologie im 21. Jahrhundert. Innovative Methoden – bahnbrechende Ergebnisse, AiD Sonderheft Plus (Stuttgart 2010) 80–91.

<sup>21</sup> Zur CT-Anlage s. Kap. 2.1.

| ÖGI-ID    | Objekt-Nr.                 | H/max. L [mm] | Dm/min. L [mm] | Ware/Herkunft           | Form                | Phase         | Datierung       | Literatur  |
|-----------|----------------------------|---------------|----------------|-------------------------|---------------------|---------------|-----------------|--|
| CT02188-2 | KFUG Inv.-Nr. 844          | 53            | 41             | Attisch                 | Kyathos             |               | 520–510 v. Chr. | vgl. Karl, Durchleuchtungen, 102 Abb. 3, 3. v. l.                                |
| CT02188-3 | KFUG Inv.-Nr. 788          | 53            | 36             | Korinthisch             | Kugelaryballos      | SK            | 570–550 v. Chr. | vgl. Karl, Durchleuchtungen, 102 Abb. 3, 4. v. l.                                |
| CT02188-4 | KFUG Inv.-Nr. 808          | 83            | 52             | Nordionisch             | Randfalkotyle       |               | 690–650 v. Chr. | vgl. Karl, Durchleuchtungen, 102 Abb. 3, 2. v. l.                                |
| CT03046   | UMJ Inv.-Nr. 25281         | 82            | 89             | Este-Kultur             | Becher              | Este III      | 700–500 v. Chr. | Katalog Archäologiemuseum, 177 Nr. 1011 Abb.                                     |
| CT03047   | KFUG Inv.-Nr. G 56         | 68            | 66             | Ostgriechisch           | Granatapfelgefäß    | OA Ic–d       | 630–590 v. Chr. | vgl. Karl, Durchleuchtungen, 102 Abb. 2, 1. v. l.; Karl et al., Insights, Abb. 4 |
| CT03071-1 | Vier feine Keramikzylinder | je 14,5–15,5  | je 22,5        | Testobjekte             |                     |               | modern          | vgl. Karl et al., Insights, Abb. 5   |
| CT03071-2 | Vier grobe Keramikzylinder | je 14,5–15,5  | je 22,5        | Testobjekte             |                     |               | modern          | vgl. Karl et al., Insights, Abb. 5   |
| CT03145   | UMJ Inv.-Nr. 25277         | 75            | 45             | Protokorinthischer Stil | Ovoider Aryballos   |               | 660–630 v. Chr. | Katalog Archäologiemuseum, 165 Nr. 937 Abb.                                      |
| CT03155   | UMJ Inv.-Nr. 4190          | 67            | 59             | Protokorinthisch        | Kugeliger Aryballos | Mittel FPK    | 710–700 v. Chr. | Katalog Archäologiemuseum, 164 Nr. 935 Abb.                                      |
| CT03210   | UMJ Inv.-Nr. 25301         | 71            | 66             | Korinthisch             | Kugelaryballos      | FrühSK        | 570–560 v. Chr. | Karl, Kugelaryballoi, 17. 22 Abb. 6  |
| CT03211   | UMJ Inv.-Nr. 25303         | 64            | 58             | Korinthisch             | Kugelaryballos      | MittelFK      | 610–600 v. Chr. | unpubliziert   |
| CT03212   | UMJ Inv.-Nr. 25305         | 69            | 68             | Korinthisch             | Kugelaryballos      | SpätFK–FrühMK | 600–580 v. Chr. | unpubliziert   |
| CT03213   | UMJ Inv.-Nr. 25302         | 54            | 59             | Korinthisch             | Kugelaryballos      | SpätMK        | 580–570 v. Chr. | unpubliziert   |
| CT03214   | Privatslg. 1               | 78            | 44             | Korinthisch             | Alabastron          | FK            | 620–590 v. Chr. | Karl, Alabastron, 44 f. Abb. 1–2   |
| CT03244   | Modernes Alabastron        | 116           | 70             | Testgefäß               |                     |               | modern          | unpubliziert   |
| CT03245   | Moderne Schale             | 38            | 87             | Testgefäß               |                     |               | modern          | unpubliziert   |
| CT04136   | KFUG Inv.-Nr. G 26         | 90            | 88             | Korinthisch             | Kugelaryballos      | FrühMK        | 590–580 v. Chr. | Katalog Institut, 27 f. Abb. 15  |

Tabelle 1: Die mittels industrieller CT untersuchten Keramikobjekte des Grazer CT-Projektes mit der jeweiligen Identifizierungsnummer des ÖGI und der archäologischen Sammlungen (UMJ bzw. KFUG)



## 2 DATENAUFNAHME UND DIRECT VOLUME RENDERING

### 2.1 Datenaufnahme

Die CT-Anlage, die am ÖGI bei der Untersuchung der Keramikgefäße zum Einsatz kommt, ist die v|tome|x C 240 D der Herstellerfirma phoenix|x-ray (Abb. 3). Die v|tome|x ist eine so genannte Mikrofokus-Anlage, die es ermöglicht, Auflösungen von bis zu  $5\ \mu\text{m}$  zu erreichen. Die in der v|tome|x verbaute Röntgenröhre erreicht Beschleunigungsspannungen von bis zu 240 kV, womit im industriellen Bereich Wandstärken von bis zu 30 mm Stahl oder 300 mm Aluminium durchstrahlt werden können. Der zum Einsatz kommende Flachbilddetektor hat eine Eingangsschirmgröße von  $8 \times 8$  Zoll (etwa  $200 \times 200$  mm) bestehend aus je 512 Pixeln in vertikaler und horizontaler Richtung. Die Grauwerttiefe des Detektors, d. h. die Anzahl der darstellbaren Grauwerte beträgt 16 bit (65536 Grauwerte). Für einen CT-Datensatz mit  $512 \times 512 \times 512$  Pixeln und der vorgegebenen Grauwerttiefe ergibt sich somit die Größe eines einfachen Datensatzes zu 256 MB. Um für ein gegebenes Objekt die Auflösung optimieren bzw. Exemplare mit einer Größe über ca. 20 cm (bei Auflösungen kleiner als etwa  $300\ \mu\text{m}$ ) untersuchen zu können, verfügt die v|tome|x über die Möglichkeit, den Messbereich des Detektors durch Verschieben desselben sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung zu erweitern und somit den Detektor virtuell zu vergrößern. Somit können in der v|tome|x im Extremfall Objekte bis etwa 250 mm Breite, bzw. etwa 500 mm Höhe untersucht werden. Kommt eine Messbereichserweiterung zum Einsatz, vergrößert sich der gewonnene Datensatz auf bis zu 2 GB.



Abb. 3: Aufnahme im Inneren der CT-Anlage v|tome|x C 240 D: in der Bildmitte Drehteller mit einem darauf positionierten Keramikgefäß (CT04136, KFUG Inv.-Nr. G 26) im Strahlengang, rechts Röntgenröhre und links Detektor (Foto D. Jungblut)

Für eine CT-Aufnahme muss das Prüfobjekt zwischen Röntgenröhre und Detektor so positioniert werden, dass es vollständig durch den von der Röhre ausgesandten Kegelstrahl mit einem Öffnungswinkel von  $40^\circ$  abgedeckt wird. Bei CT-Anlagen, die mit Kegelstrahl-Geometrie arbeiten, wird das so positionierte Objekt schrittweise um  $360^\circ$  gedreht, wobei im Regelfall 600 einzelne radioskopische Bilder aufgenommen werden (Abb. 4).

Im Vergleich zu dieser Technik wird bei Verwendung eines Fächerstrahls bei einer Umdrehung des Prüfobjektes im Strahlengang nur eine schmale

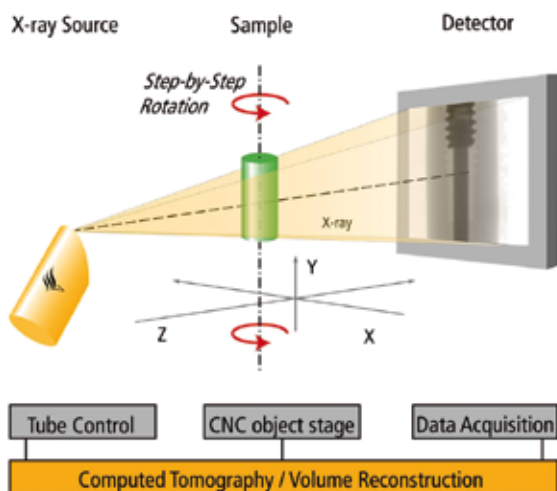


Abb. 4: Prinzip Computertomografie unter Anwendung von Kegelstrahl und Flachbilddetektor (Grafik phoenix|x-ray)

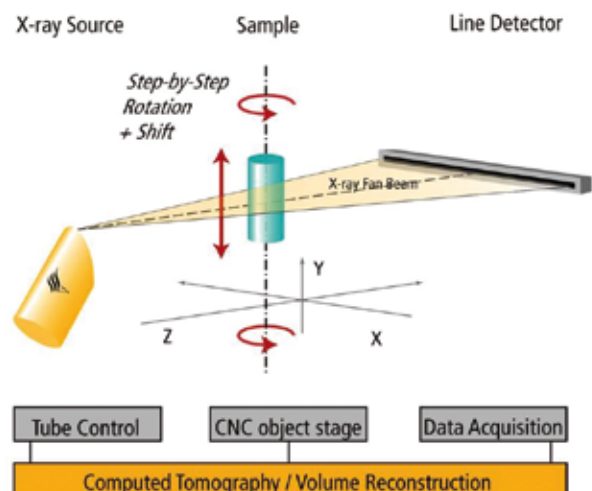


Abb. 5: Prinzip Computertomografie unter Anwendung von Fächerstrahl und Zeilendetektor (Grafik phoenix|x-ray)



Schicht erfasst (Abb. 5). Das bedeutet, dass zusätzlich zur Drehung des Objektes eine vertikale Verschiebung des Objektes im Strahlengang erfolgen muss, um das gesamte Objekt aufzunehmen. Die Dauer eines Scans liegt somit deutlich höher als bei Verwendung eines Kegelstrahls. Während eine CT-Aufnahme mit kegelförmigem Röntgenstrahl und Flachbilddetektor heutzutage üblicherweise zwischen 10 Minuten und etwa einer Stunde dauert, muss für die Aufnahme eines gleich großen Objektes mit Fächerstrahl und Zeilendetektor eine Zeitspanne von 40 bis 70 Stunden einkalkuliert werden. Solche CT-Anlagen, von denen das ÖGI mit einer *x|argos|compact* der Firma phoenix|x-ray ausgerüstet ist, kommen vor allem bei größeren Objekten bzw. aufgrund der benötigten höheren Beschleunigungsspannung bei dichteren (metallischen) Bauteilen in Betracht. Scan-Dauer und Beschleunigungsspannung führen jedoch zu einer hohen Strahlungsbelastung der Gegenstände, die Grund dafür waren, bei den Untersuchungen der griechischen Vasen im Rahmen des Grazer CT-Projektes auf den Einsatz dieser CT-Anlage vorerst zu verzichten<sup>22</sup>.

Um eine optimale CT-Aufnahme zu gewährleisten, ist neben der exakten Positionierung des Prüfobjektes die sorgfältige Einstellung der Parameter an der Anlage – jeweils angepasst an die Prüfaufgabe – von großer Wichtigkeit (Tab. 2).

| Parameter           | Erklärung  |
|---------------------|--|
| Magnification       | Geometrische Vergrößerung  |
| Voxelsize           | Voxelgröße, Kantenlänge eines Volumenelements                              |
| FOD                 | Fokus-Objekt-Abstand [mm]  |
| FDD                 | Fokus-Detektor-Abstand [mm]  |
| NumberImages        | Anzahl der aufgenommenen Bilder (z. B. 600)                                |
| TotalRotation       | Bei der Aufnahme abgedeckter Rotationswinkel (360° oder weniger)           |
| TimingVal           | Belichtungszeit des Detektors [ms]   |
| Averaging           | Anzahl der Bilder, über die ein Mittelwert gebildet wird (Rauschreduktion) |
| Voltage             | Beschleunigungsspannung [kV]   |
| Current             | Röhrenstrom [ $\mu$ A]   |
| XRayFilter          | Art des Vorfilters   |
| XRayFilterThickness | Dicke des Vorfilters [mm]  |
| DimX                | Anzahl der ausgelesenen Detektor-Pixel in x-Richtung (horizontal)          |
| DimY                | Anzahl der ausgelesenen Detektor-Pixel in y-Richtung (vertikal)            |
| STime               | Scan-Dauer [s]   |

Tabelle 2: Einstellende Parameter für einen CT-Scan

Je nach Wandstärke und Material müssen Beschleunigungsspannung, Stromstärke, Belichtungszeit und Vorfilterung so gewählt werden, dass das Objekt nicht nur aus jeder Winkelposition vollständig durchstrahlt wird, sondern auch der Grauwertkontrast möglichst groß ist, ohne den Detektor zu überstrahlen, was zu einer Schädigung des Detektors führen würde.

Bei Aufnahme der archäologischen Keramikobjekte war es erwünscht, die CT-Untersuchungen weitestgehend zu systematisieren und so zu vereinheitlichen, dass dadurch die Grauwertstufen der rekonstruierten Volumina bei allen Gefäßen annähernd zu vergleichen sind. Doch gerade dieses Vorhaben wurde durch die an manchen Gefäßen vorhandene alte Inventarnummer aus Zinkweiß beeinflusst, die die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte (Grauwert-Histogramm) durch die hohe chemische Dichte des Elementes Zink ( $7,14 \text{ g/cm}^3$ ) verschoben (Abb. 6)<sup>23</sup>. Um diese Verschiebung bei allen Keramiken mit oder ohne Inventarnummer des UMJ

<sup>22</sup> Zur Strahlenexposition s. Kap. 3. Außerhalb des eigentlichen CT-Projektes wurde ein etruskischer Krater (UMJ Inv.-Nr. 4612) mit der *x|argos|compact* durchstrahlt, allerdings nach vorhergehender TL-Analyse. Grundsätzlich sind CT-Untersuchungen mit derart erhöhten Beschleunigungsspannungen ohne ausreichende Erforschung des Einflusses der ionisierenden Strahlung auf das Lumineszenz-Verhalten archäologischer Keramik entschieden abzulehnen. Zusätzlich bewirkt eine Fächerstrahl-CT abhängig von der Länge des durchstrahlten Materials ein starkes Bildrauschen und führt dadurch zu einer „unnatürlichen“ und missverständlichen Keramiktextur in den gemessenen Röntgenprojektionen.

<sup>23</sup> Die Verwendung des weißen Farbpigmentes Zinkweiß (Zinkoxid) für die Inventarisierung der Objekte im UMJ geht auf das Jahr 1913 zurück; s. dazu Jb 102, 1913, 25. Die chemische Zusammensetzung dieser Malfarbe an einem Objekt aus derselben Inventarisierungsphase (UMJ Inv.-Nr. 4203d) wurde in der Abteilung Mineralogie des UMJ mittels Röntgendiffraktometrie (XDR) bestimmt. Für die Analyse ist Hans-Peter Bojar und Daniel Modl zu danken.



Abb. 6: Mit Zinkweiß geschriebene Inventarnummer des proto-  
korinthischen Aryballos CT01184 (UMJ Inv.-Nr. 4214)  
mit deutlich sichtbarem Dichteunterschied; VRVis  
Volume Renderer (Visualisierung ÖGI, D. Habe)

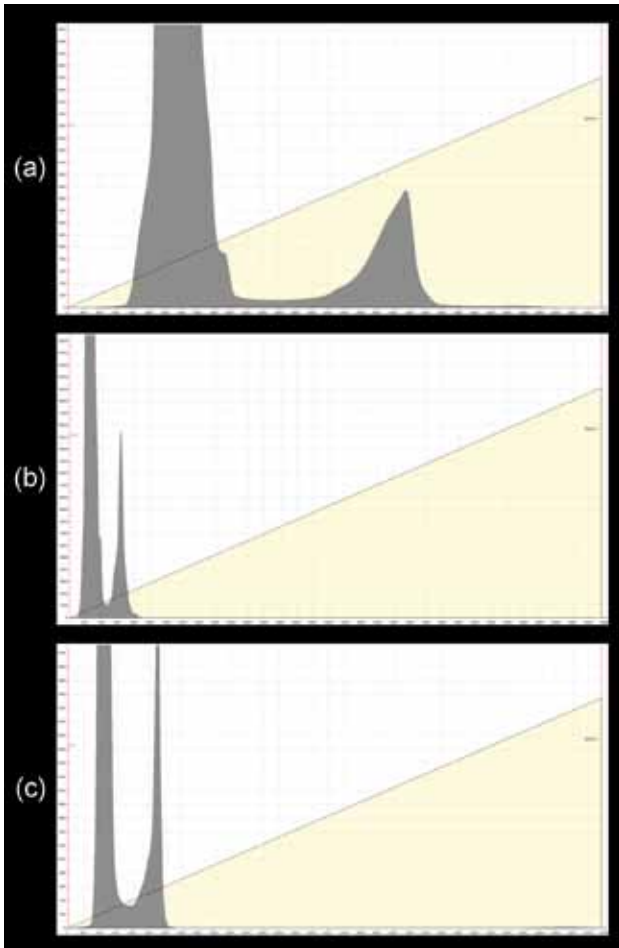


Abb. 7: Grauwertistogramme von CT-Datensätzen untersuchter  
Keramikgefäße (erster peak: Luft; zweiter peak: Ke-  
ramik): (a) CT02183 (UMJ Inv.-Nr. 25306) ohne dichte  
(metallische) Zusätze; (b) CT02187 (UMJ Inv.-Nr.  
8738) mit Inventarnummer aus Zinkweiß; (c) CT03210  
(UMJ Inv.-Nr. 25301) unter Beigabe von Stahlkugeln;  
VG Studio MAX (Grafik S. Karl)

im Vorhinein in etwa demselben Rahmen zu halten, wurden vier Stahlkugeln (Dm 6,4 mm) – aufgrund der Überstrahlung der benachbarten Regionen mit einem ausreichenden Abstand – den jeweiligen Objekten beigelegt und mit diesen zusammen aufgenommen (Abb. 7). Da sich durch die zusätzlich angebrachten Stahlkugeln das aufzunehmende Volumen vergrößerte, musste bei einigen Objekten auf eine höhere Auflösung verzichtet werden.

Die Beschleunigungsspannung bestimmt die Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlung. Je höher die Beschleunigungsspannung gewählt wird, umso härter ist die Röntgenstrahlung, d. h. umso dichteres Material bzw. umso größere Wandstärken können durchstrahlt werden. Zu beachten ist hierbei, dass mit härterer Strahlung zwar die Durchdringungsfähigkeit zunimmt, aber gleichzeitig der Grauwertkontrast schlechter wird. Dies führt dazu, dass die Unterscheidung von Details im Inneren des Objektes erschwert wird. Die Beschleunigungsspannung wird so hoch gewählt, dass das Objekt gerade durchstrahlt wird.

Die Intensität der Röntgenstrahlung, die Bildhelligkeit, wird durch den Röhrenstrom bestimmt. Je höher der Röhrenstrom gewählt wird, umso mehr Röntgenquanten werden freigesetzt, umso heller wird das einzelne Röntgenbild. Eine Änderung des Röhrenstromes hat keinerlei Einfluss auf die Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlung. Auch die Belichtungszeit, also die Zeitspanne, in der im Detektor Röntgenquanten integriert – mit anderen Worten gesammelt – werden, beeinflusst die Bildhelligkeit. Je länger der Detektor für ein Bild belichtet wird, umso heller ist das Bild.

Eine weitere Möglichkeit, um Qualität (harte oder weiche Strahlung) und Quantität (Intensität) der Strahlung zu beeinflussen, ist die Vorfilterung. Ein Vorfilter ist ein Metallplättchen, das direkt vor dem Strahlenaustrittsfenster der Röntgenröhre angebracht wird. Üblicherweise werden Aluminium, Kupfer, Zinn oder Messing in Dicken von 0,1 mm oder 0,5 mm als Vorfilter eingesetzt. Durch die Vorfilterung werden weiche (energiearme) Strahlungsanteile direkt beim Austritt aus der Röntgenröhre aus dem Strahl entfernt, während die härteren Anteile im Röntgenstrahl erhalten bleiben. Gleichzeitig wird die Intensität der Strahlung verringert. Die Vorfilterung wird in erster Linie dazu eingesetzt, um die Überstrahlung des Detektors – also die übermäßige Strahlenbelastung, die den Detektor schädigt – in den einzelnen Röntgenbildern zu verhindern und damit auch die so genannten Strahlartefakte im CT-Datensatz.

Für die vorliegenden Untersuchungen von Keramikgefäßen lieferte eine Kombination aus 1 mm Al und 1 mm Cu als Vorfilter die besten Ergebnisse (Tab. 3). Eine Überstrahlung des Detektors fand nicht statt, gleichzeitig erstreckten sich die Grauwerte, die schließlich mit den Dichten der unterschiedlichen Materialkomponenten korrespondieren, über den mit der  $v|tome|x$  maximal erreichbaren Bereich, so dass selbst kontrastarme Einschlüsse, bzw. Porositäten detektiert werden konnten.

Eine Eigenschaft der Röntgenstrahlung, die die Qualität von CT-Datensätzen negativ beeinflusst, ist das Rauschen. Die ausgesandte Röntgenstrahlung besteht aus einer großen Anzahl von Röntgenquanten. Die Eigenschaften dieser Quanten schwanken innerhalb des Strahls, dies wird als Rauschen bezeichnet. Zu starkes Rauschen kann dazu führen, dass Details im Inneren des jeweiligen Prüfobjektes (etwa Porositäten oder Einschlüsse) nicht mehr erkannt werden können. Durch Mittelung mehrerer Bilder an einer Position der Drehbewegung des Prüfobjektes im Strahlengang, das so genannte „*averaging*“, kann das Rauschen stark vermindert und damit die Detailerkennbarkeit verbessert werden.

| ÖGI-ID  | Voxelsize [µm] | FOD [mm] | STime [s] | Averaging | Voltage [kV] | Current [µA] | Power [W] | XRy Filter | XRy Filter-Thickness [mm] |
|---------|----------------|----------|-----------|-----------|--------------|--------------|-----------|------------|---------------------------|
| CT01184 | 158,9          | 282,4    | 720       | 2         | 79           | 197          | 15,6      | Al         | 0,5                       |
| CT02183 | 165,0          | 292,9    | 960       | 3         | 134          | 455          | 61,0      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |
| CT02184 | 155,7          | 276,4    | 960       | 3         | 134          | 455          | 61,0      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |
| CT02185 | 160,0          | 284,0    | 960       | 3         | 134          | 455          | 61,0      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |
| CT02186 | 145,9          | 259,1    | 961       | 3         | 134          | 455          | 61,0      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |
| CT02187 | 136,7          | 242,7    | 960       | 3         | 134          | 455          | 61,0      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |
| CT02188 | 239,6          | 442,5    | 960       | 3         | 134          | 455          | 61,0      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |
| CT03046 | 227,1          | 403,1    | 720       | 2         | 105          | 140          | 14,7      | Al         | 1,0                       |
| CT03047 | 189,6          | 336,6    | 720       | 2         | 85           | 225          | 19,1      | Al         | 1,0                       |
| CT03071 | 89,1           | 158,1    | 2915      | 2         | 110          | 132          | 14,5      | Al         | 2,0                       |
| CT03145 | 181,7          | 322,6    | 720       | 2         | 77           | 285          | 21,9      | Al         | 2,0                       |
| CT03155 | 181,7          | 322,6    | 720       | 2         | 77           | 285          | 21,9      | Al         | 2,0                       |
| CT03210 | 184,0          | 326,7    | 720       | 2         | 150          | 225          | 33,8      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |
| CT03211 | 184,0          | 326,7    | 720       | 2         | 150          | 225          | 33,8      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |
| CT03212 | 184,0          | 326,7    | 720       | 2         | 150          | 225          | 33,8      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |
| CT03213 | 184,0          | 326,7    | 720       | 2         | 150          | 225          | 33,8      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |
| CT03214 | 184,0          | 326,7    | 720       | 2         | 150          | 225          | 33,8      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |
| CT03244 | 272,9          | 686,7    | 960       | 3         | 185          | 250          | 46,3      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |
| CT03245 | 197,9          | 457,0    | 960       | 3         | 180          | 265          | 47,7      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |
| CT04136 | 240,8          | 479,5    | 719       | 2         | 93           | 450          | 41,9      | no         | no                        |

Tabelle 3: Keramikobjekte mit Angabe der Parameterwerte, Filterung und Voxelgröße bezogen auf die Anlage  $v|tome|x$  C 240 D (Standard: NumberImages: 600; TotalRotation: 360°; TimingVal: 400 ms; DimX: 512 Pixel; DimY: 512 Pixel. Ausnahme die acht Keramikzylinder CT03071: NumberImages: 1200; DimX: 873 Pixel)

Das Errechnen eines dreidimensionalen CT-Datensatzes aus der Vielzahl an den jeweiligen Winkelpositionen aufgenommenen Röntgenbildern erfolgt durch ein mathematisches Rekonstruktionsverfahren. Heutzutage wird für die Rekonstruktion aus Daten in Kegelstrahl-Geometrie üblicherweise der so genannte Feldkamp-Algorithmus verwendet. Dieser wandelt zunächst unter Berücksichtigung von Abständen, Auflösung und einigen anderen Größen den Kegelstrahl virtuell in eine Menge Parallelstrahlen um, was die darauffolgende Koordinaten-Transformation stark vereinfacht. Mit Hilfe der Radon-Transformation kann schließlich von den einzelnen radioskopischen Bildern über eine Integraltransformation das dreidimensionale Volumen berechnet werden. Der CT-Datensatz besteht aus Volumenelementen, den so genannten Voxeln, deren Kantenlängen der gewählten Auflösung entsprechen.

Der Anwender hat für die Rekonstruktion ein Programm zur Verfügung, in dem er verschiedene Parameter auswählen kann. Diese umfassen neben dem exakten Rekonstruktionsbereich und einer geometrischen Korrektur, die eine eventuell außermittige Positionierung des Prüfobjektes korrigiert, auch die Korrektur der Strahlaufhärtung im Objekt.

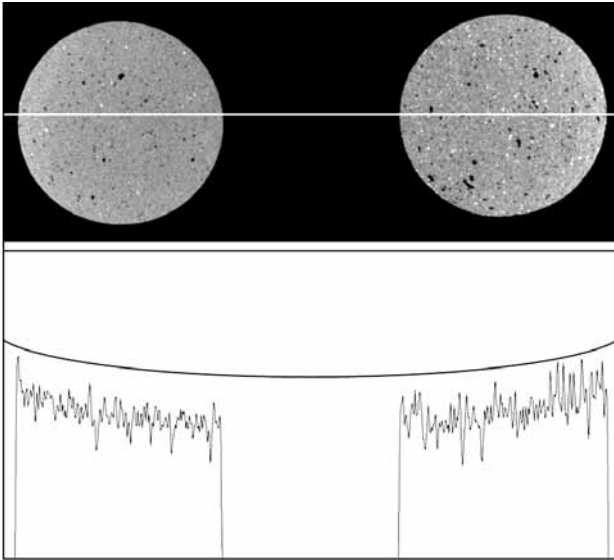


Abb. 8: Zwei keramische Testzylinder CT03071-1 mit Strahl-aufhärtungsartefakten an den äußeren Enden, Grauwert-  
verteilung der Linie mit überhöht dargestelltem Profil;  
VG Studio MAX und Scion Image (Grafik S. Karl)

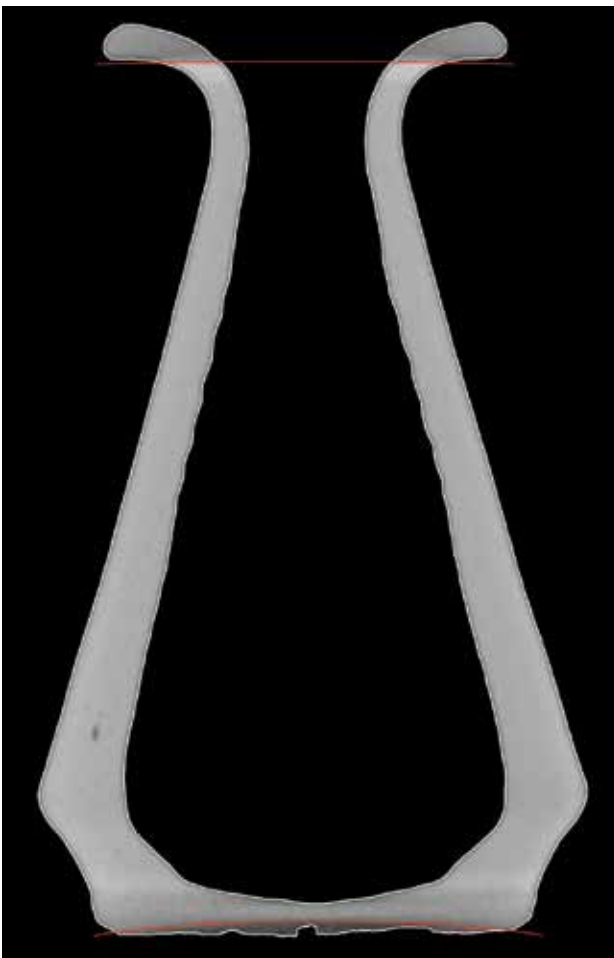


Abb. 9: Modernes Alabastron CT03244 mit Feldkamp-Arte-  
fakten am oberen und unteren Ende, Markierung der  
sphärischen Strahlungsabnahme am Rande des CT-  
Kegelstrahles; VG Studio MAX (Grafik S. Karl)

Die Strahlauhärtung, oder das „*beam hardening*“, entsteht dadurch, dass die weichen Strahlungs-  
anteile das Objekt nicht vollständig durchdringen  
können, sondern in den äußeren Bereichen des Mate-  
rials absorbiert werden. Somit bleiben die durchdrin-  
gungsfähigeren härteren Strahlungsanteile erhalten,  
die das Material durchstrahlen. Dadurch erscheint  
der zentrale Bereich des Prüfobjektes weniger dicht  
als die Randbereiche (Abb. 8).

Um einen CT-Datensatz mit höchst möglicher  
Auflösung erzeugen zu können, muss das Objekt so  
positioniert werden, dass der von der Röntgenröhre  
ausgesandte Kegelstrahl optimal ausgenutzt wird.  
Aus der Kombination der dreidimensionalen Aus-  
dehnung des Objektes und der Abnahme der Strah-  
lungsintensität des Kegelstrahls zum Rand hin, er-  
gibt sich der so genannte Feldkamp-Effekt, der sich  
im rekonstruierten Volumen als Abschattung, dem  
„Feldkamp-Artefakt“, manifestiert (Abb. 9).

Nichtlinearitäten wie Strahlauhärtung, Streu-  
strahlung und der Feldkamp-Effekt sind Ursache für  
so genannte Bildartefakte, d. h. für technisch-physi-  
kalisch bedingte, scheinbare Inhomogenitäten im CT-  
Datensatz. Diese Effekte erschweren die Extraktion  
der Oberflächengeometrie durch geeignete Schwell-  
wertverfahren und können außerdem bei unkritischer  
Betrachtung zu Missinterpretationen von CT-Daten  
führen. An der effektiven Reduktion der Artefaktbil-  
dung auf ein Minimalmaß wird bis heute gearbeitet  
und neue Verfahren werden in Zukunft vieles, was  
derzeit die Weiterverarbeitung erschwert, bereits im  
Rekonstruktionsschritt kompensieren<sup>24</sup>.

## 2.2 Direct Volume Rendering

Um zu gewährleisten, dass auch kleinste Inhomoge-  
nitäten in einem Prüfobjekt nachgewiesen werden  
können, muss bei der Datenaufbereitung auf speziell  
angepasste Visualisierungswerkzeuge zurückgegrif-  
fen werden, da bei kleinen Einschlüssen oftmals eine  
Klassifizierung nur nach Dichtewerten nicht zum  
Ziel führt<sup>25</sup>.

<sup>24</sup> Zur Artefaktreduktion s. z. B. M. Franz – S. Kasperl, Re-  
gistrierungskonzepte für die Einsatzsynchrone Artefakt Re-  
duktion mittels virtueller Computertomographie, DGZfP-  
Jahrestagung 2007 – Vortrag 87 <<http://www.ndt.net/article/dgzfp07/Inhalt/v87.pdf>> (18.3.2011).

<sup>25</sup> Die vorliegenden Auswertungen erfolgten an einem Rechner  
mit AMD Athlon 64 3800+, Single Core Prozessor, 2 GB  
RAM und einer ATI Radeon 1900XTX (512 MB Grafikspei-  
cher), der unter MS Windows XP Pro SP2 lief.

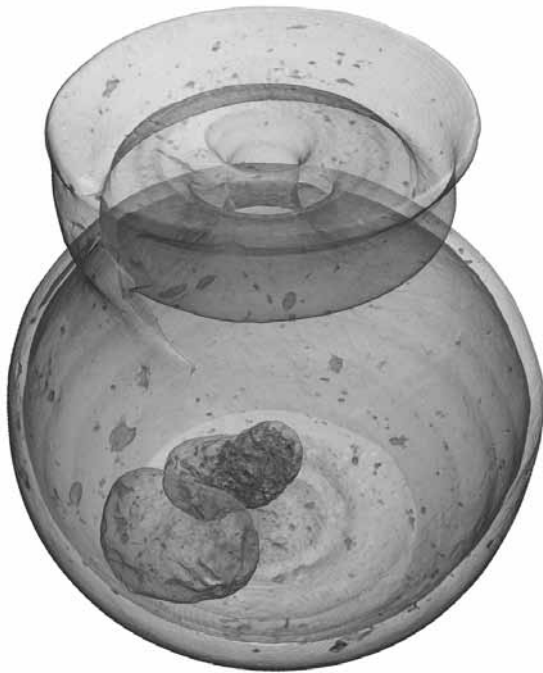


Abb. 10: DVR-Darstellung des korinthischen Kugelaryballos CT02183 (UMJ Inv.-Nr. 25306) unter Verwendung einer einfachen Transferfunktion; VRVis Volume Renderer (Visualisierung ÖGI, J. Rosc)

Der heute meist angewendete Ansatz zur Darstellung von Volumendaten ist das Direct Volume Rendering (DVR)<sup>26</sup>. Dabei wird, im Gegensatz zum Indirect Volume Rendering, bei dem in einem Vorverarbeitungsschritt die Oberfläche eines darzustellenden Volumens zur Weiterverarbeitung extrahiert wird, das gesamte Volumen zur Erzeugung der Abbildung genutzt. Beim DVR wird üblicherweise eine Position im Volumen mit Hilfe einer so genannten Transferfunktion auf einen Datenwert  $(r, g, b, \alpha)$  abgebildet, wobei  $\alpha$  (die Opazität) die Absorption entsprechend der optischen Dichte und  $r, g, b$  einen Farbwert wiedergeben. Die einfachste Methode, eine Position im Volumen direkt auf optische Eigenschaften wie Lichtfarbe und Opazität abzubilden, ist die Verwendung einer eindimensionalen Transferfunktion über die Dichte des Materials. Diese ist im Wesentlichen eine Tabelle von  $(r, g, b, \alpha)$  Werten über eine fixe Anzahl von Dichtewerten, etwa 4096 Einträge für eine Grauwerttiefe von 12 bit. Mit dieser Art der Transferfunktion können Gefäße transparent gestaltet werden (Abb. 10).

Der Einsatz einer eindimensionalen Transferfunktion hat den Nachteil, dass alle Positionen im Volumen mit derselben Dichte identisch dargestellt

werden. Um aber beispielsweise Materialübergänge gezielt darstellen zu können, ist es notwendig, über die Dichte hinausgehende Eigenschaften des Volumens zu berücksichtigen. Die Transferfunktion wird dann über mehrere Dimensionen definiert.

#### DICHTE/GRADIENTEN-TRANSFERFUNKTIONEN

Der am häufigsten eingesetzte 2D-Transferfunktionstyp ist über die Dimensionen Dichte und Größe des Grauwertgradienten (*gradient magnitude*) definiert<sup>27</sup>. Die Länge des Gradientenvektors an einer bestimmten Stelle im Volumen korrespondiert direkt mit der Stärke der Änderung des Dichtewerts an dieser Position. Dies kann sehr gut ausgenutzt werden, um Materialübergänge zu visualisieren, indem nur Bereiche mit hohem Gradienten ausgewählt werden. Mit speziellen Grafikwerkzeugen (Widgets) kann eine entsprechende Darstellung mit unterschiedlich eingefärbten Bereichen durch den zugehörigen Gradienten an dieser Position gesteuert werden. Diese Funktion eignet sich z. B. um dichte Einschlüsse in der Keramik zu visualisieren (Abb. 11)<sup>28</sup>.

<sup>26</sup> K. Engel – M. Hadwiger – J. Kniss – C. Rezk-Salama – D. Weiskopf, Real-Time Volume Graphics (Wellesley 2006) 313–328; zur Segmentierung ebenda 415–440.

<sup>27</sup> J. Kniss – G. Kindlmann – C. Hansen, Interactive Volume Rendering using Multi-Dimensional Transfer Functions and Direct Manipulation Widgets, IEEE Visualization 2001, Proc. <<http://ieeexplore.ieee.org>> (18.3.2011). Zur Merkmalsgrößen-Transferfunktion s. T. Höllt, GPU-Based Direct Volume Rendering of Industrial CT Data (unpubl. Studienarbeit, VRVis Research Center und Universität Koblenz-Landau 2007); M. Hadwiger – L. Fritz – C. Rezk-Salama – T. Höllt – G. Geier – T. Pabel, Interactive Volume Exploration for Feature Detection and Quantification in Industrial CT Data, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 14/6, 2008, 1507–1514; G. F. Geier – L. Fritz – M. Hadwiger – J. Rosc – T. Pabel – D. Habe – G. Pittino – P. Schumacher, Analysis and Exploration of CT-data using application specific Multi-Dimensional Transfer Functions, 10<sup>th</sup> European conference and exhibition on nondestructive testing, Proc. of ECNDT 2010 <[www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1\\_09\\_23.pdf](http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_09_23.pdf)> (18.3.2011).

<sup>28</sup> Zu Auswertungen von Industriekeramiken mittels Dichte/Gradienten- sowie Merkmalsgröße-Transferfunktion s. G. Geier – T. Pabel – M. Hadwiger – L. Fritz – T. Höllt, Interaktive Exploration von multiphasigen, mineralischen Werkstoffen mittels Computertomographie, DACH-Jahrestagung 2008 in St. Gallen <[www.ndt.net/article/dgzfp2008/Inhalt/di3a2.pdf](http://www.ndt.net/article/dgzfp2008/Inhalt/di3a2.pdf)> (18.3.2011).





Abb. 11: DVR-Darstellung des korinthischen Kugelaryballos CT02187 (UMJ Inv.-Nr. 8738) unter Verwendung einer Dichte/Gradienten-Transferfunktion, dichte (metallische) Einschlüsse in der Keramikmatrix rot eingefärbt; VRVis Volume Renderer (Visualisierung ÖGI, J. Rosc)

### 2.3 Analysemöglichkeiten

Die dreidimensionale Datenanalyse für industrielle CT-Datensätze erfolgt üblicherweise mit dem Softwarepaket VG Studio MAX, das derzeit in der Version 2.1 vorliegt. Diese Software verfügt über eine Reihe von Modulen für unterschiedliche Problemstellungen, darunter eines für die 3D-Porositätsanalyse und eines für Soll/Ist-Vergleiche. Ein Nachteil bleibt jedoch bestehen: Die Analysen basieren zu meist auf einer automatisierten Festlegung des ISO-Schwellwertes, der durch eine Mittelung über die zwei betreffenden Grauwerte mit der maximalen Anzahl von Voxeln für Luft und Material errechnet wird. Zur Kompensation von Ungenauigkeiten durch das technisch-physikalische Messverfahren sind aber Verfahren auf Basis des lokalen Gradienten (Transferfunktionen) zu bevorzugen.

#### POROSITÄTSANALYSE

Während Luftporen in Guss- oder anderen Bauteilen gewisse Problematiken aufweisen und als „Fehler“ (Defekte) deklariert werden, ist Porosität dem Material Keramik eigen. Porendetektion in CT-Datensätzen ist in der Industrie ein Standardverfahren und dient in erster Linie der Qualitätssicherung<sup>29</sup>.

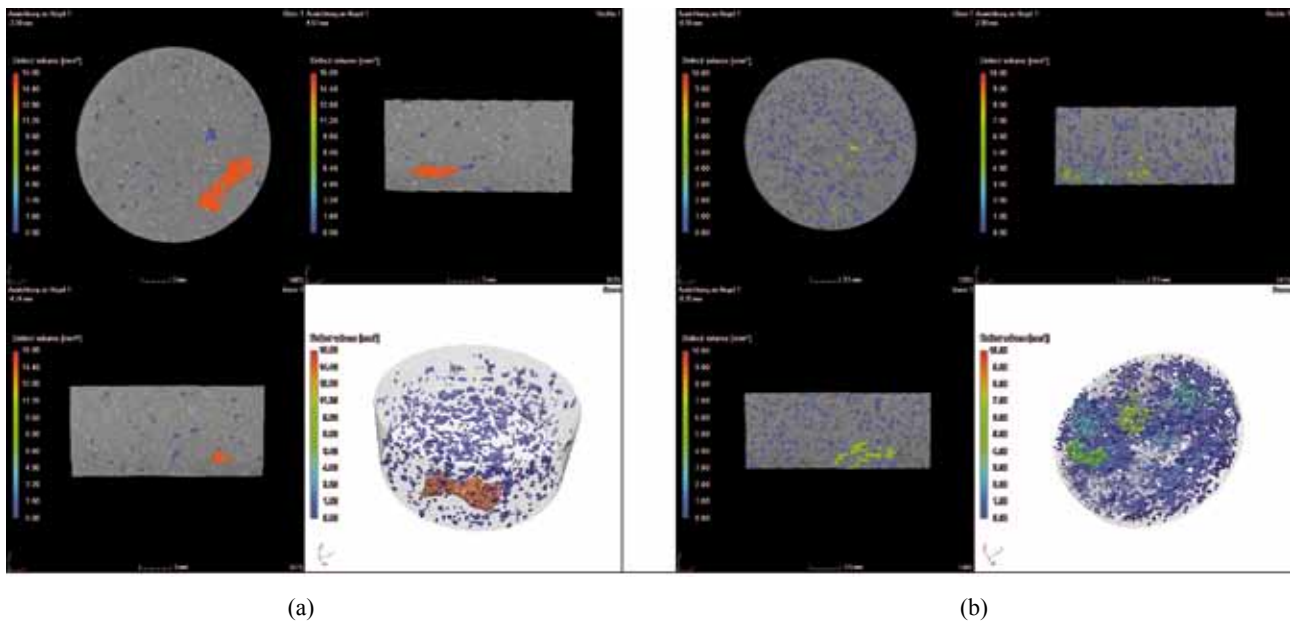


Abb. 12: Porenanalyse am Beispiel der grob gemagerten Keramikzylinder CT03071-2: (a) Zylinder Nr. 2 mit Quarz (geringer Porenanteil), (b) Zylinder Nr. 7 mit Stroh (hoher Porenanteil); VG Studio MAX (Visualisierung ÖGI, J. Rosc)

<sup>29</sup> J. Rosc – G. F. Geier – M. Hadwiger – L. Fritz – D. Habe – T. Pabel – G. Schindelbacher – P. Schumacher, Assessing Casting Quality using Computed Tomography with Advanced Visualization Techniques, World Technical Forum (WTF09), 1–3 June 2009, Brno <[http://www.nftn.co.za/files/wtf09/conf/lectures/20\\_doc.pdf](http://www.nftn.co.za/files/wtf09/conf/lectures/20_doc.pdf)> (18.3.2011); J. Rosc – D. Habe – T. Pabel – G. F. Geier – P. Schumacher, Methode für die Bewertung von Porositätsanalysen von CT-Daten, Gießerei-Rundschau 57, 2010/11–12, 242–244.

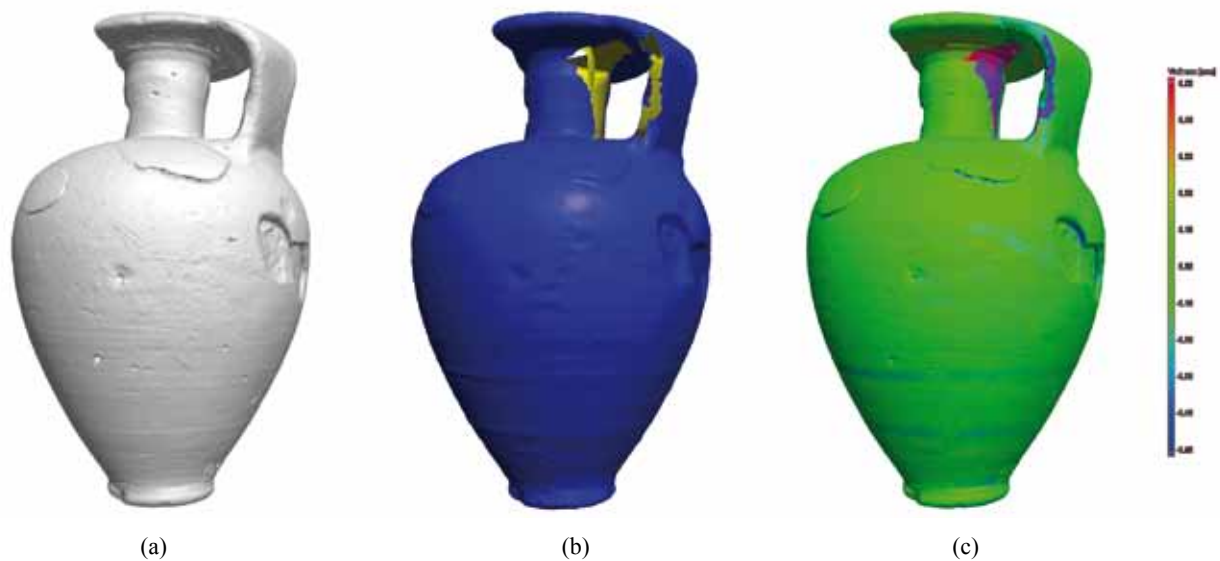


Abb. 13: Oberflächenvergleich am Beispiel des protokorinthischen Aryballos CT01184 (UMJ Inv.-Nr. 4214): (a) Oberfläche aus den CT-Daten; (b) Oberfläche aus der Vermessung mittels 3D-Scanners; (c) Oberflächendifferenz farblich markiert; VG Studio MAX (Visualisierung ÖGI, J. Rosc)

Für eine zuverlässige Porositätsanalyse muss der Anwender händisch einen geeigneten Schwellwert für den Übergang zwischen Luft – den eingeschlossenen Porositäten – und Material setzen. Wird der Schwellwert zu weit in die höheren Grauwerte, das heißt in das Material gesetzt, wird die Porengröße überschätzt. Eine Schwellwertsetzung zu weit in die niedrigen Grauwerte führt zu einer Detektion von zu geringen Porengrößen. Obwohl zusätzlich noch die Parameter Voxelgröße und Grauwertkontrast die Genauigkeit einer solchen Auswertung beeinflussen, ist eine Porositätsanalyse, die gegenüber anderen Methoden ohne Materialproben auskommt und dreidimensional abläuft, ein effektives Verfahren, Differenzen aber auch Ähnlichkeiten in den Untersuchungskörpern festzustellen. So können die Poren in ihren Einzel- und Gesamtvolumina wie auch in ihrer Anzahl abhängig von der jeweiligen Größe analysiert werden (Abb. 12).

#### OBERFLÄCHENVERGLEICH

Oberflächenvergleiche, so genannte Soll/Ist-Vergleiche, werden bei industrieller Anwendung dazu verwendet, bestehende CAD-Modelle mit den nach diesen Plänen hergestellten Gegenständen bzw. scheinbar identische Prüfobjekte auf ihre Abweichungen voneinander zu überprüfen<sup>30</sup>. Solche Vergleiche können sich in der Archäologie vor allem für formgleiche Objekte als nützlich erweisen<sup>31</sup>.

Um dies an einem archäologischen Beispiel auszutesten, wurden die Oberflächen-Daten eines Keramikgefäßes verglichen, die sowohl mittels 3D-Scanners mit strukturiertem Licht vermessen als auch aus dem CT-Datensatz extrahiert wurden. Hierfür wurde der STL-Datensatz aus der 3D-Oberflächenvermessung und der CT-Datensatz übereinander „gefittet“ und anschließend die Abweichungen an der Oberfläche des Objektes farbcodiert dargestellt. Die Farbskala reicht von blau (negative Abweichung der CT-Daten gegenüber der 3D-Oberflächenvermessung) über grün (keine Abweichungen) bis rot (positive Abweichungen) (Abb. 13). Die Genauigkeit der CT-Oberflächenvermessung beträgt in etwa 1/10 der Voxelgröße; im Falle des untersuchten Keramikgefäßes CT01184 mit einer Voxelgröße von 158,9 µm ergibt sich eine Genauigkeit von etwa 15,9 µm.

<sup>30</sup> G. Geier – O. Brunke – T. Pabel – J. Rosc – D. Habe, Neue Wege in der Computertomographie und der Bauteilprüfung, ZfP-Zeitung 116, 2009, 22–25.

<sup>31</sup> Dafür sind vor allem Objekte, die in Negativformen hergestellt wurden, in Betracht zu ziehen, wie Öllampen, Terrakotten, Reliefapplikationen, Ofenkacheln etc.



### 3 STRAHLENEXPOSITION

#### 3.1 Der archäologische Standpunkt

Im Rahmen von CT-Untersuchungen werden Objekte einer unsichtbaren Strahlung, in diesem Falle einer Röntgenstrahlung, über einen gewissen Zeitraum ausgesetzt. Mit den Auswirkungen dieser Strahlenexposition muss sich jede radiologische Untersuchung beschäftigen, denn es gilt, wie bei allen anderen archäometrischen Methoden, sich die etwaigen Konsequenzen hinsichtlich materieller und physikalischer Transformationen der Untersuchungsobjekte bewusst zu machen. Keramik bildet dabei eine besondere Ausnahme, da gebranntes Tonmaterial mit der so genannten Thermolumineszenz (TL), einem durch natürliche Strahlung verursachten Phänomen, datiert werden kann<sup>32</sup>. Während eine CT-Untersuchung auf eine spätere TL-Datierung, auch für Laien verständlich, nicht ohne Auswirkungen bleiben kann, gelten andere archäometrische Methoden in der Keramikanalyse wie mineralogisch-petrografische oder elementchemische Bestimmungen als resistent gegenüber der ionisierenden Strahlung<sup>33</sup>.

Seit dem kurzen Hinweis durch den Keramikethnologen und Töpfer Owen S. Rye in seinen *X-ray studies* des Jahres 1977 wird der Einfluss der künstlich zugesetzten, ionisierenden Strahlung auf die TL-Datierung sehr unterschiedlich beurteilt. Die Einschätzungen reichen „von keiner Veränderung“ bis „zur kompletten Vernichtung jeglicher TL-Information“<sup>34</sup>. Die Differenzen in den nur schwer nachvollziehbaren Angaben ergeben sich daraus, dass die Objekte mit unterschiedlichen CT-Anlagen sowie unterschiedlich hohen Beschleunigungsspannungen belastet wurden. Neuere Untersuchungen belegen einen sehr variablen Einfluss auf das Lumineszenz-Verhalten von Keramik<sup>35</sup>.

Im Rahmen des Grazer CT-Projektes wurde in Anlehnung an die Humanmedizin ein Weg eingeschlagen, der den Einfluss der Strahlung gegenüber dem größtmöglichen Erkenntnisgewinn so gering als möglich zu halten versucht. Die Vorgabe war, dass auch nach CT-Untersuchungen antiker Objekte eine TL-Datierung im Sinne einer Authentizitätsprüfung (eines „Echtheitstestes“) weiterhin gewährleistet sein soll, denn nur um eine solche kann es sich bei Museumsobjekten ohne bekannten Fundort und -kontext sowie zumeist unbekanntem historischen Verwahrbedingungen in den jeweiligen Museen und Sammlungen der Vorbesitzer handeln<sup>36</sup>. Es

<sup>32</sup> Zur TL-Datierung s. Kap. 3.3.

<sup>33</sup> Ionisierende Strahlung kann Elektronen aus den Atomhüllen freisetzen und so chemische Verbindungen aufbrechen. Hierin liegt die schädliche Wirkung auf den Bioorganismus. Molekularbiologische oder biochemische Analysen, wie z. B. von organischen Stoffen oder alter DNA, sind dadurch gefährdet; s. dagegen F. Gröning – J. F. Kegler – G.-C. Weniger, Die digitale Welt der Neandertaler – NESPOS, ein Online-Archiv für die Neandertalerforschung, *AKorrBl* 37, 2007, 321–333, bes. 323: „Die Computertomographie hat für die Paläoanthropologie den unschätzbaren Wert, dass die inneren Strukturen menschlicher Fossilien vollkommen zerstörungsfrei untersucht werden können“.

<sup>34</sup> O. S. Rye, Pottery manufacturing techniques: X-ray studies, *Archaeometry* 19, 1977, 205–211, bes. 208; Van de Put, *Use*, 204 Anm. 11; B. Illerhaus, Fortschritte in der Computertomographie. Neueste Technik zur Untersuchung kultur-historischer Objekte, *Restaura* 1995, 344–349, bes. 344; B. Illerhaus – J. Goebels – H. Riesemeier, 3D Computerized Tomography – Synergism between Technique and Art, in: D. Dirksen – G. von Bally (Hrsg.), *Optical Technologies in the Humanities, Selected Contributions to the International Conference on New Technologies in the Humanities and Fourth International Conference on Optics within Life Sciences*, Münster, Germany, 9–13 July 1996, *International Series on Optics Within Life Sciences* 4 (Heidelberg 1997) 91–104, bes. 91: „[...] the only exception is the destroying of any thermoluminescent information“.

<sup>35</sup> M. Ghysels, CT Scans in Art Work Appraisal, *Art Tribal* 2003/2004, 116–131; J. Castaing – A. Zink, Influence de l'irradiation aux rayons X sur la luminescence et la datation des terres cuites, *Technè: La science au service de l'histoire de l'art et des civilisations* 19, 2004, 130–133; M. Haustein – M. R. Krbetschek – E. Pernicka, Influence of radiation used by the security control at airports on the TL signal of quartz, *Ancient TL* 21, 2003, 7–10; Friedmann – Bente, *Restaurierungen*, 131 Anm. 9.

<sup>36</sup> Rice, *Pottery*, 443 f.; C. Renfrew – P. Bahn, *Archaeology. Theories, Methods, and Practice* (London 1991) 131: „Various complications remain with thermoluminescence, and TL dates rarely have an accuracy of better than  $\pm 10$  percent“; noch schärfer formulierte es C. Goedicke, Echtheitsprüfung an Tanagrafiguren nach der Thermolumineszenzmethode, in: W.-D. Heilmeyer (Hrsg.), *Bürgerwelten. Hellenistische Tonfiguren und Nachschöpfungen im 19. Jh.*, Ausstellungskatalog Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz (Berlin 1984) 78: „Angesichts des Substanzbedarfs und des notwendigen Rückgriffs auf den Fundort wird erklärlich, daß die TL als Datierungsmethode für Museumsobjekte weitgehend untauglich ist.“ Der Fehler bei der Altersangabe von Museumsobjekten liegt etwa bei 25 bis 30 %. Zur Genauigkeit einer TL-Analyse s. L. Dittberner, *Die Thermolumineszenzanalyse zur Altersbestimmung von Keramik* (Master Thesis Universität für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen 2009) 67–73; für die Zusendung einer Kopie ihrer Diplomarbeit ist Lena Dittberner zu danken. Zu weiteren TL-Datierungen vgl. die Ergebnisse zu den Tanagra-Terrakotten im Louvre: A. Zink – E. Porto, *Luminescence dating of the Tanagra*

galt Belastungsgrenzen solcher Untersuchungen hinsichtlich der wichtigen physikalischen Parameter für die Strahlungsenergie wie Röhrenstrom und -spannung sowie zur Bestrahlungsdauer herauszufinden und so weit zu definieren, dass sie für die archäologische Fragestellung noch ausreichend gute CT-Ergebnisse liefern.

Es stellte sich zunächst als schwierig heraus, die Objekte mit einheitlichen Parametern zu scannen, da jedes Einzelstück besonderer Nachjustierungen bedurfte, um eine bestmögliche Bild- und Datenqualität zu erzielen. Es muss vorausgeschickt werden, dass sich diese Angaben vorrangig auf die in Leoben benutzte CT-Anlage v|tome|x C 240 D der Firma phoenix|x-ray beziehen und bei anderen Computertomografen erst akkurat festgestellt werden müssen. Grundsätzlich wurde jedes Objekt in einem einzigen Scanvorgang mit einer 360°-Rotation zur Gänze und auf einem 512 × 512 Pixel umfassenden Detektor aufgenommen. Dieses Vorgehen beschränkte die maximale Objektgröße auf ca. 20 cm. Wichtig für die Reduktion der Scandauer auf exakt 12 min erwies sich die fixe Einstellung des *Averaging*-Wertes von 2, mit dem die Anzahl der für jede einzelne Winkelposition am Drehteller für eine Durchschnittsbildung verwendeten Einzelprojektionen bezeichnet wird. Auch die Schnelligkeit der v|tome|x wirkt sich vorteilhaft auf das Erreichen dieses Zieles aus. Von zwei- oder mehrfachen Scans desselben Gefäßes – auch wenn eine Wiederholung mit anderen Einstellungen hinsichtlich der Qualität der erzielten Rekonstruktionsmatrix eventuell eine Verbesserung versprechen könnte – wurde aufgrund der Verdoppelung bzw. Vervielfachung der Strahlenbelastung Abstand genommen. Weiters wurde im Rahmen des Grazer CT-Projektes besonderer Wert darauf gelegt, vorerst nur jene Objekte für CT-Untersuchungen heranzuziehen, die (1) auf Basis der aktuellen Keramikforschung gesichert archaischer Zeitstellung oder älter sind, (2) mit archäologischen Methoden zweifelsohne bekannten Gefäßtypen dieser Zeit zugewiesen werden können, (3) nicht aus Einzelfragmenten zusammengesetzt sind, und (4) keine sichtbaren restauratorischen Ergänzungen oder andere Maßnahmen wie Übermalungen aufweisen<sup>37</sup>.

Optimale Ergebnisse lieferten schließlich die Scans CT03210–CT03214, deren Einstellungen schließlich für die Definition von Grenz- und Fixwerten verwendet und deren Auswirkungen auf die Lumineszenz-Datierung mit Hilfe von Keramikproben unterschiedlicher Zeitstellung aus archäologischen Fundkontexten überprüft wurden (Tab. 4).

| FOD [mm] | Number Images | DimX [Pixel] | DimY [Pixel] | Timing Val [ms] | STime [s] | Averaging | Voltage [kV] | Current [μA] | Power [W] | XRy Filter | XRy Filter Thickness [mm] |
|----------|---------------|--------------|--------------|-----------------|-----------|-----------|--------------|--------------|-----------|------------|---------------------------|
| >=300    | 600           | 512          | 512          | 400             | 720       | 2         | <=150        | <=300        | <=45      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |

Tabelle 4: Grenz- und Fixwerte von CT-Untersuchungen für die CT-Anlage v|tome|x C 240 D

Generell ist darauf hinzuweisen, dass die TL-Altersbestimmung von Keramik, vor allem von Museumsobjekten, in den letzten Jahrzehnten stark zurückgegangen ist und durch stilistisch und typologisch vergleichende Methoden verdrängt wurde<sup>38</sup>. Dagegen gehört der „Echtheitstest“ im heutigen Kunsthandel trotz seiner Diskussionswürdigkeit hinsichtlich der möglichen Strahlungsschäden, den späteren Beeinflussungen und sonstigen auftretenden Komplikationen zu einem nicht weiter hinterfragten Standardverfahren mit einem abschließenden Zertifikat, ohne dem ein Objekt heutzutage, auch wenn dessen antiker Ursprung aus archäologischer Sicht nicht angezweifelt wird, offenbar unverkäuflich ist<sup>39</sup>.

terracottas of the Louvre collections, *Geochronometria* 24, 2005, 21–26, bes. 25 Abb. 2. Zur Geschichte des Authentizitätstests s. A. G. Wintle, Fifty years of Luminescence dating, *Archaeometry* 50, 2008, 280–284.

<sup>37</sup> Die einzige Ausnahme von diesen strikten Regeln stellt der Este-Becher CT03046 dar, der im Zuge der restauratorischen Vorarbeiten für die Neuaufstellung der Schausammlungen im Archäologiemuseum ebenfalls mittels CT untersucht wurde. Im Inneren dieses prähistorischen Gefäßes befindet sich eine nicht weiter erklärbare „Stabilisierung“, die mit Karton abgedeckt ist; von außen war vor der CT-Aufnahme bloß ein braun retuschierter Gipsverstrich an der Standfläche zu erkennen. Der eigentliche keramische Gefäßkörper, der von außen wie auch zur Hälfte von innen gut einsehbar war, zeigte jedoch keine restauratorische Maßnahme.

<sup>38</sup> M. A. Geyh, *Handbuch der physikalischen und chemischen Altersbestimmung* (Darmstadt 2005) 112; G. A. Wagner, *Archäochronometrie: Lumineszenzdatierung*, in: A. Hauptmann – V. Pingel (Hrsg.), *Archäometrie. Methoden und Anwendungsbeispiele naturwissenschaftlicher Verfahren in der Archäologie* (Stuttgart 2008) 177. Die Lumineszenzdatierung hat heute ganz andere Anwendungsgebiete erschlossen; s. dazu A. Kadereit – S. Greilich – C. Woda – G. A. Wagner, *Kaltes Licht aus alten Steinen – Lumineszenzdatierung in der Archäologie*, in: G. A. Wagner (Hrsg.), *Einführung in die Archäometrie* (Heidelberg 2007) 11–31.

<sup>39</sup> Im Kunsthandel werden u. E. TL-Analysen an antiken Gefäßen hauptsächlich wegen der dadurch erhofften Gewinnmaximierung bei gleichzeitiger Risikominimierung durchgeführt; vgl. z. B. den kampanisch-rotfigurigen Glockenkrater des Libation-Malers, der

Streng genommen kann industrielle CT nicht als zerstörungsfrei bezeichnet werden<sup>40</sup>. In Bezug auf Veränderungen in der DNA wurde bereits konstatiert, dass „traditionally, in the anthropological literature, radiographic procedures are seen as non-destructive because there is no apparent damage to the specimen [...]. This has, unfortunately, become the standard assumption and this attitude has carried over into CT studies.“<sup>41</sup> Eine solche Vorsicht ist jedoch bei allen archäometrischen Methoden für das Ausgangsobjekt gegeben; auch bei spektroskopischen Verfahren, bei denen den Untersuchungsflächen Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung wenn auch noch so geringer Intensität zugeführt wird<sup>42</sup>. Jedes Eingreifen des Menschen erhöht den Grad der Veränderungen, die sich für das Objekt schon allein aus der natürlichen Strahlenexposition und klimatischen, konservatorischen oder Material immanenten Bedingungen ergeben. Die CT-Methode als berührungsfrei und „nicht invasiv“ im Sinne des Erhaltes der materiellen Substanz – neben weiteren Methoden wie geophysikalische Prospektionen der *non invasive archaeology* zugeordnet – zu definieren, scheint daher eher angebracht, als sie im Vorhinein als zerstörungsfrei zu bezeichnen, da mit physikalischen Veränderungen, wenn auch z. T. in nicht messbarer Form zu rechnen ist<sup>43</sup>. Generell sollten aber archäologische oder archäometrische Methoden nicht in die plakativen Kategorien „zerstörerisch“ und „zerstörungsfrei“ unterteilt werden, da dies den eigentlichen Fragestellungen, an die sich die/der Archäologin/Archäologe mit einer bestimmten Auswahl an Verfahren (z. B. Grabung, Geophysik, Materialanalysen etc.) annähern möchte, nicht gerecht werden kann.

### 3.2 Probenauswahl

Für die Überprüfung der Veränderungen, die sich für eine spätere TL-Datierung ergeben, wurden antike aber auch neuzeitliche Keramikfragmente aus archäologischen Grabungen bzw. aus anderen Aufsammlungen (Tab. 5) ausgewählt, die in der Folge in mehrere Teile zerbrochen und mit Probenentnahmen untersucht werden konnten (Abb. 14).

---

in K. Schauenburg, Studien zur unteritalischen Vasenmalerei IX/X (Kiel 2006) 17–20 mit Anm. 90 (Abb.), publiziert ist und von der Galerie Kunst der Antike (Vöcklabruck) während der Antiquitätenmesse Kunstsalon Graz vom 13.–17. Nov. 2008 in der Aula der Alten Universität in Graz mit einem „Echtheitszeugnis“ angeboten wurde, nachdem mehrere Proben für TL-Analysen aus den figural bemalten Bildflächen des Gefäßes entnommen worden waren. Es sind dies bewusste Inszenierungen, die dazu führen, ein Objekt als „echt“ zu empfinden; s. dazu kritisch Schidlofski, Antike, 56–58.

<sup>40</sup> Die Bewertung „zerstörungsfrei“ wird im Rahmen naturwissenschaftlicher Untersuchungen auch so verstanden, dass die dem Objekt entnommene Materialprobe für weitere Untersuchungen erhalten bleibt; vgl. z. B. I. Reiche – C. Chadeaux – K. Müller – A. Stauder – J. Nötel – H. Riesemeier, Synchrotron Mikro-Computertomographie zur zerstörungsfreien Evaluierung des Erhaltungszustandes von archäologischem Knochen- und Geweihmaterial, bzw. M. Rodrigues – M. Schreiner – M. Melcher – M. Guerra – J. Salomon – M. Radtke – M. Alram – N. Schindel, The Hoard of Beçin – Non-destructive analysis of the Silver coins, in: A. Hauptmann – H. Stege (Hrsg.), Archäometrie und Denkmalpflege 2009, Jahrestagung in der Pinakothek der Moderne, München, 25.–28. März 2009, Metalla Sonderheft 2 (Bochum 2009) 87–89 bzw. 199–201.

<sup>41</sup> B. M. Grieshaber – D. L. Osborne – A. F. Doubleday – F. A. Kaestle, A pilot study into the effects of X-ray and computed tomography exposure on the amplification of DNA from bone, *JASc* 35, 2008, 681–687, bes. 682.

<sup>42</sup> Dies gilt z. B. für Röntgen-Fluoreszenzspektroskopie (XRF) oder Raman Spektroskopie; s. dazu L. S. Schleicher – J. W. Miller – S. C. Watkins-Kenney – L. F. Carnes-McNaughton – M. U. Wilde-Ramsing, Non-destructive chemical characterization of ceramic sherds from Shipwreck 31CR314 and Brunswick Town, North Carolina, *JASc* 35, 2008, 2824–2838; die Beiträge B. L. Ambrosini – A. C. Felici – G. Fronterotta – M. Piacentini – M. Vendittelli, Non destructive analysis of a red figured vase of uncertain attribution from Falerii Veteres, bzw. P. Ricciardi – F. Amato – P. Colombari, Raman spectroscopy as a tool for the non-destructive characterization of slips and glazes of a ‚Sgraffito‘ Renaissance production, in: K. T. Biró – V. Szilágyi – A. Kreiter (Hrsg.), Vessels: inside and outside, Proc. of the Conference EMAC ‘07, 9<sup>th</sup> European Meeting on Ancient Ceramics, Budapest 24–27.10.2007 (Budapest 2009) 97–102 bzw. 217–222; G. D. Smith – R. J. H. Clark, Raman microscopy in archaeological science, *JASc* 31, 2004, 1137–1160.

<sup>43</sup> „Die Anerkennung der kulturellen und physischen Integrität und Authentizität einzelner Objekte, Exemplare oder Sammlungen und die Achtung vor ihnen“ sind grundlegende Verpflichtungen aller Museumsmitarbeiterinnen und -mitarbeiter (so in den ICOM Ethische Richtlinien für Museen [Code of Ethics for Museums] von 2002 formuliert). Zur überarbeiteten Fassung dieser Richtlinien von 2010 s. <[http://www.icom-deutschland.de/client/media/364/icom\\_ethische\\_richtlinien\\_d\\_2010.pdf](http://www.icom-deutschland.de/client/media/364/icom_ethische_richtlinien_d_2010.pdf)> (18.3.2011). Im Falle einer Restaurierung oder Reparatur soll das eigentliche Ziel die Stabilisierung des Exemplars sein. Zur Verantwortlichkeit hinsichtlich der Keramikkonservierung s. V. Oakley, Ethical Considerations in the Conservation of Ceramic, *VDR Beiträge* 2006/2, 49–56, bes. 51: „[...] treatment should be kept to a minimum“ und „[...] no treatment should be undertaken without firstly assessing and establishing the purpose and objectives for the work“.

| Objekt-Nr. | Ware   | Herkunft  | Funddatum             | Archäologische Datierung    |
|------------|--|---|-----------------------|-----------------------------|
| Objekt A   | Römische Keramik, feines Fabrikat (bikonischer Topf oder einhenkeliger Krug) | Ausgrabung Kalsdorf 2000; Parz. 621; FNr. 1; Fläche 2; SE 1 | 28. Juli 2000         | 1.–2. Jahrhundert n. Chr.   |
| Objekt B   | Römische Keramik, grobes Fabrikat (dickwandiges Vorratsgefäß)                | Ausgrabung Kalsdorf 2000; Parz. 621; FNr. 1; Fläche 2; SE 1 | 26. Juli 2000         | 1.–3. Jahrhundert n. Chr.   |
| Objekt C   | Schwarzhafterware (Topf)   | Schloss Seggau, im Zuge von Umbauarbeiten gefunden          | 4. April 2007         | 16.–17. Jahrhundert n. Chr. |
| Objekt D   | Moderne Keramik (Bierkrug)   | Hafnerbetrieb Nograsek                                      | erworben 5. Juli 2009 | um 1920/1930                |

Tabelle 5: Probenauswahl der verwendeten Keramikobjekte für die TL-Analysen

Zwei römische Fragmente, wobei ein feiner und ein grober Keramiktyp herangezogen wurden, stammen aus einer Siedlungsgrabung im Bereich des Vicus von Kalsdorf südlich von Graz und werden aufgrund des vorhandenen Vergleichsmaterials und bestehender typologischer Arbeiten gesichert in das 1. bis 3. Jh. n. Chr. datiert<sup>44</sup>. Ein frühneuzeitliches Topffragment ist der sog. Schwarzhafterware des 16. bis 17. Jhs. zuzuweisen<sup>45</sup>. Ein viertes Fragment gehört zu einem keramischen, noch unglasierten Bierkrug, der im ehemaligen Hafnerbetrieb der Familie Nograsek um 1920/1930 erzeugt wurde<sup>46</sup>.

Alle vier ausgewählten Fragmente wurden so zerteilt, dass ein größeres Ausgangsstück zurückbehalten werden konnte, das ebenfalls einer TL-Analyse unterzogen wurde (Serie 0 – unbelastet). Die einzelnen Proben wurden schließlich mit der in diesem Projekt verwendeten CT-Anlage v|tome|x C 240 D mit unterschiedlichen Einstellungen der Röntgenröhre belastet (Tab. 6).

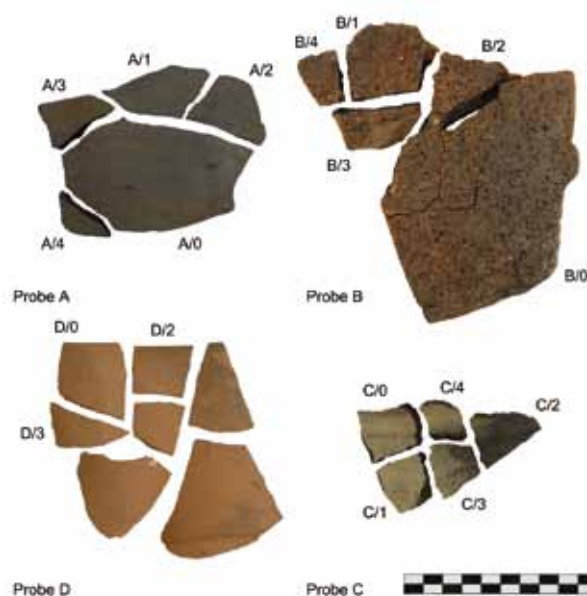


Abb. 14: Objekte A–D mit Probenauswahl für Thermolumineszenz-Analysen (Foto S. Karl)

| Serie | CT                                   | FOD [mm] | Voltage [kV] | STime [s] | Current [mA] | Power [W] | XRy Filter | XRy Filter Thickness [mm] |
|-------|--------------------------------------|----------|--------------|-----------|--------------|-----------|------------|---------------------------|
| 1     | v tome x C 240 D                     | 320,0    | 240          | 3600      | 0,50         | 120       | no         | no                        |
| 2     | v tome x C 240 D                     | 320,8    | 140          | 719       | 0,27         | 37,8      | Cu+Al      | 1,0+1,0                   |
| 3     | v tome x C 240 D                     | 320,8    | 105          | 720       | 0,14         | 14,7      | Al         | 1,0                       |
| 4     | Siemens Somatom Sensation Cardiac 64 |          | 120          | 510 mAs   |              |           |            |                           |

Tabelle 6: Belastungen der Keramikobjekte in der v|tome|x C 240 D und im Siemens Somatom Sensation Cardiac 64

<sup>44</sup> Zur so genannten Grobkeramik aus diesen Bereich des Vicus von Kalsdorf und ihrer Typografie s. E. Brunnhuber, Stratifizierte römische Keramik aus Kalsdorf, Parz. 621 (unpubl. Dipl. Universität Graz 2009) 14–20 Abb. 10 (zu Vorratsstöpfen); 20–31 Abb. 11 (zu Töpfen); 46 f. Abb. 13 (zu Krügen). Zum Vicus von Kalsdorf allgemein s. U. Lohner-Urban, Untersuchungen im römischen Vicus von Kalsdorf bei Graz. Die Ergebnisse der Ausgrabungen auf der Parzelle 421/1. Baubefund und ausgewählte Kleinfunde (Wien 2009). Für die Unterstützung bei der Datierung und Bestimmung dieser zwei Fragmente ist der/dem Ausgrabungsleiter/in Ute Lohner-Urban und Manfred Lehner sowie Christoph Hinker zu danken.

<sup>45</sup> J. Kraschitzer, Kalksteingemagerte Schwarzhafterware in der Steiermark (Diss. Universität Graz, in Arbeit). Für die Datierung und Bestimmung ist Johanna Kraschitzer zu danken.

<sup>46</sup> Günther Nograsek, Restaurator in der Abteilung Archäologie & Münzkabinett am UMJ, ist für die Übergabe eines solchen Kruges zu danken.

Bei der ersten Belastungsserie wurde die CT-Anlage mit den technisch höchstmöglichen Bestrahlungswerten eingestellt, sodass sogar der empfindliche Detektor mit einer Bleiplatte geschützt werden musste. Es ist verständlich, dass solche Maximalwerte für herkömmliche CT-Untersuchungen keinesfalls in Betracht kommen. Bei dieser Maximalbelastung ging es allein darum, Auswirkungen auf die TL-Datierung deutlich messbar zu machen. Serie 2 wurde mit den im Projekt definierten Grenzwerten und Serie 3 mit einer durch Wechseln des Filters leicht variierten Änderung belastet. Bei der vierten Serie wurde auch das Verhalten des Lumineszenzsignals bei konventionellen medizinischen Computertomografen – zum Einsatz kam ein Spiralcomputertomograf, Modell Siemens Somatom Sensation Cardiac 64 – überprüft, von denen generell behauptet wird, dass diese Bestrahlungen keine messbare physikalische Beschädigung der Materialsubstanz bewirken<sup>47</sup>. Beim allerjüngsten Objekt D, das erst später in diese Testreihe aufgenommen wurde, unterblieben aus zeitlichen Gründen die Belastungsvarianten 1 (industriell, höchste Stufe) und 4 (medizinisch).

### 3.3 Thermolumineszenz-Analysen (Beitrag R. Erlach)

Die Datierung von Keramik erfolgt unter Anwendung des Phänomens der „Thermisch stimulierten Lumineszenz“ (Thermolumineszenz, TL), das bei vielen Mineralen auftritt: beim Erhitzen der Minerale zeigen sie Lichtemissionen, die zusätzlich zum normalen thermischen Glühen auftreten. Die Ursache für diese Lichtemission liegt in der Freisetzung von Energie, die im Kristallgitter der Minerale gespeichert war. Diese gespeicherte Energie wiederum stammt vom radioaktiven Zerfall natürlich vorkommender Radionuklide wie Uran und Thorium mit ihren ebenfalls radioaktiven Zerfallsprodukten, sowie dem radioaktiven Isotop des Kaliums <sup>40</sup>K. Diese Radionuklide sind in sehr geringer Menge in den meisten natürlich vorkommenden Materialien enthalten und sorgen für einen ständig vorhandenen Pegel an radioaktiver Strahlung in der Umwelt (Abb. 15).

Damit die Datierung von Keramik mittels Thermolumineszenz funktionieren kann, ist das Brennen der Keramik im Zuge der Herstellung ganz wesentlich. Durch die dabei herrschenden hohen Temperaturen wird die gesamte über geologische Zeiträume in den Mineralen des Rohmaterials Ton gespeicherte radioaktive Strahlungsenergie frei gesetzt und damit die „TL-Uhr“ auf Null gestellt. Von diesem Zeitpunkt an beginnt die Energiespeicherung auf Grund der in der Keramik und ihrer Umgebung vorhandenen radioaktiven Stoffe von neuem – mit einer in der Regel konstanten Rate.

Für eine aus einer antiken Keramik entnommene Probe kann in einer TL-Apparatur die TL-Intensität gemessen, durch den Vergleich mit Proben, die mit einer definierten Strahlendosis bestrahlt wurden, die Empfindlichkeit der Keramik gegenüber radioaktiver Strahlung und in weiterer Folge die seit dem Brennen absorbierte „archäologische Dosis“ bestimmt werden. Dazu wird die Probe in mehrere Einzelproben aufgeteilt, von denen einige vor der TL-Messung mit einer definierten Dosis Alpha- bzw. Betastrahlung bestrahlt werden, um damit die Dosischarakteristik der Keramik nachzubilden, aus der die archäologische Dosis errechnet wird. Bei Kenntnis der für die Keramik relevanten Dosisrate der Strahlung kann damit das Alter der Keramik, bzw. der seit dem Brennen der Keramik oder dem letzten Erhitzen auf mehr als etwa 300 °C verstrichene Zeitraum berechnet werden (Abb. 16).

Dieses eigentlich sehr einfache Prinzip der Datierung wird aber durch die unterschiedlichen Eigenschaften der drei radioaktiven Strahlenarten und den inhomogenen Aufbau der Keramik etwas erschwert. Zusätzlich ist die Wirkung der verschiedenen Strahlenarten in Bezug auf die induzierte TL-Intensität pro Doseinheit nicht gleich; die Alphastrahlung hat eine wesentlich geringere Wirksamkeit als Beta- und Gammastrahlung. Die drei radioaktiven Strahlungsarten Alpha-, Beta- und Gammastrahlung haben auf Grund ihrer physikalischen Natur sehr unterschiedliche Reichweiten in Materie. Gammastrahlung ist eine elektromagnetische Strahlung mit einem relativ hohen Durchdringungsvermögen und einer Reichweite von etwa 0,5 m, sie stammt zum überwiegenden Teil aus der Umgebung der Keramik und durchdringt diese gleichmäßig. Die leichten Teilchen der Betastrahlung (Elektronen) haben in keramischem Material eine mittlere Reichweite von 1–2 mm, stammen aus der Keramik selbst (außer im Randbereich) und durchdringen alle nicht zu großen Mineralkörner beinahe gleichförmig.

<sup>47</sup> Van de Put, Use, 204 Anm. 11: „Dr. C. Goedicke’s reassuring answer is that ‚die attischen Vasen offenbar keine zusätzliche Strahlendosis [erhalten]““.

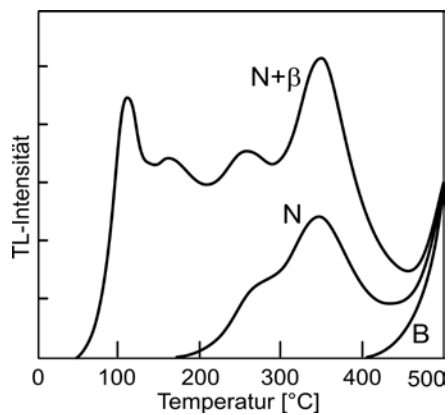


Abb. 15: Thermisch stimulierte Lumineszenz (N = TL-Kurve Keramik, N+β = TL nach zusätzlicher Beta-Bestrahlung, B = thermisches Glühen) (Grafik R. Erlach)

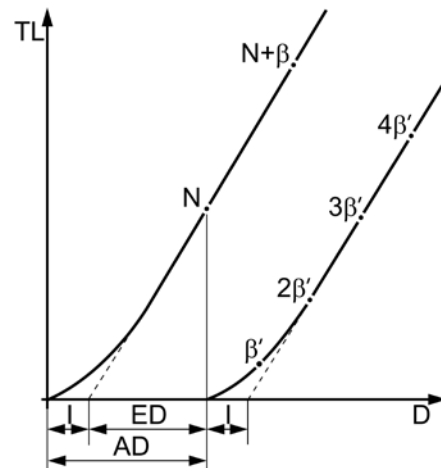


Abb. 16: Ermittlung der archäologischen Dosis AD aus der Dosischarakteristik (ED = Equivalent Dose, I = Intercept) (Grafik R. Erlach)

Am problematischsten sind die schweren Teilchen der Alphastrahlung (Helium-Kerne, bestehend aus zwei Protonen und zwei Neutronen), sie haben in keramischem Material eine Reichweite von nur etwa 20  $\mu\text{m}$ . Sie entstehen beim radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium in der Keramik selbst und geben ihre Energie sehr lokal ab. Treffen sie dabei auf ein etwas größeres Feldspat- oder Quarz-Korn (Quarz und Feldspat liefern den Hauptbeitrag zur Thermolumineszenz von Keramik), so kann dieses nicht vollständig durchdrungen werden. Die Strahlungsenergie wird nur im Randbereich des Korns absorbiert, wogegen die gemessene Thermolumineszenz aber aus dem gesamten Volumen des transparenten Korns stammt. Die resultierende Diskrepanz zwischen dem Volumen in dem die Strahlungsenergie deponiert wird und dem Volumen aus dem die Thermolumineszenz stammt, kann zu einem nicht unbeträchtlichen Fehler bei der Berechnung des TL-Alters führen.

Zur Vermeidung dieser Probleme mit der Dosimetrie in Keramiken wurden in den späten 1960er Jahren zwei Methoden zur Aufbereitung von Keramikproben für die Datierung mittels Thermolumineszenz erarbeitet:

Die *Feinkorn-Methode*<sup>48</sup> verwendet eine polyminerale Kornfraktion im Größenbereich zwischen 1 und 8  $\mu\text{m}$  deren Körner klein genug sind, dass auch die Alphastrahlung das gesamte Kornvolumen durchdringen kann. Für die Berechnung des TL-Alters ist die Dosisleistung aller drei Strahlenarten relevant.

Für die *Quarz-Einschluss-Methode*<sup>49</sup> werden größere Quarz-Körner mit einem Durchmesser von etwa 100  $\mu\text{m}$  aus der Keramik extrahiert und deren Außenschicht, in der die Alphastrahlung absorbiert wurde, abgeätzt. Für die Berechnung des TL-Alters ist nur mehr die Dosisleistung von Beta- und Gammastrahlung relevant.

#### PROBENAUFBEREITUNG NACH DER FEINKORN-METHODE

Die im gegenständlichen Projekt zu datierenden Keramiken wurden nach der Feinkorn-Methode bearbeitet, da für die Quarz-Einschluss-Methode wesentlich größere Probenmengen notwendig sind, um eine entsprechende Menge an geeigneten Quarz-Körnern für die Datierung extrahieren zu können.

Für die Datierung nach der Feinkorn-Methode wird aus dem Keramikpulver (resultiert aus der Entnahme der Proben mittels Hartmetallbohrer) die polyminerale Kornfraktion im Bereich zwischen etwa 1 und 8  $\mu\text{m}$  extrahiert. Dies geschieht durch Sedimentation aus einer Suspension des Keramikpulvers in Aceton über

<sup>48</sup> D. W. Zimmerman, Thermoluminescent dating using fine grains from pottery, *Archaeometry* 13, 1971, 29–52.

<sup>49</sup> S. J. Fleming, Thermoluminescent dating: refinement of the quartz inclusion method, *Archaeometry* 12, 1970, 133–147.



verschiedene Zeiträume. Die gewonnene Feinkornfraktion wird in einem weiteren Schritt mit verdünnter Essig- oder Salzsäure behandelt, um einerseits unerwünschte Minerale zu entfernen (z. B. hat Kalk schlechte TL-Eigenschaften) und andererseits Kornaggregate aufzubrechen, wo mehrere sehr kleine Mineralkörner (diese haben auf Grund von Oberflächeneffekten einen negativen Einfluss auf die Güte der TL-Ergebnisse) ein größeres Korn simulieren. Nach einer weiteren Sedimentation, um diese sehr kleinen Körner abzutrennen, wird die so aufbereitete und in Aceton suspendierte Probe auf mehrere Probenträger sedimentiert.

Dazu wird die Probensuspension in gleichen Portionen in mehrere Glasröhrchen pipettiert, auf deren flachem Boden die Probenträger (dünne leicht aufgeraute Aluminium-Plättchen) liegen. Nach dem Abdampfen des Acetons ergibt dies in der Regel einen sehr homogenen dünnen Belag aus Keramikpulver auf den einzelnen Probenträgern.



Abb. 17: Auf den Glasträger aufsedimentierte Proben mit unterschiedlich gleichmäßiger Belegung; oben: Idealfall; Mitte: sehr schlecht, Probe C/1; unten: akzeptabel, Probe A/4 (Foto R. Erlach)

#### SCHWIERIGKEITEN BEI DER PROBENAUFBEREITUNG

Bei den Proben, die im Rahmen dieses Projektes zur TL-Datierung verwendet wurden, konnte jedoch, trotz mehrmaliger Versuche dieses Problem irgendwie in den Griff zu bekommen, keine homogene Belegung der Probenträger erzielt werden. Das Keramikpulver wurde beim Abdampfen des Acetons stets in mehr oder weniger großem Ausmaß von der Oberfläche des Probenträgers ab- oder unter den Probenträger hineingezogen.

Um dennoch einigermaßen brauchbare Proben für die TL-Untersuchung zu erhalten, wurde versucht, für jeden Probenträger, die am Glasboden gelandete Probe mit der Pipette aufzunehmen und direkt aus der Pipette auf den jeweiligen Probenträger zu sedimentieren und dabei eine möglichst gleichmäßige Belegung zu erzielen. Der Erfolg dieser sehr mühsamen und zeitaufwändigen Prozedur kann leider nur als eher bescheiden eingestuft werden (Abb. 17).

Das Resultat dieser ungleichmäßigen Belegung ist leider eine größere Varianz der von den einzelnen Proben gemessenen TL-Intensität. Dies wirkt sich bei der Nachbildung der Dosischarakteristik der Keramik und bei der Berechnung der archäologischen Dosis sehr wahrscheinlich durch eine größere Ungenauigkeit und einen größeren Fehler im Endergebnis aus.

#### ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die für die CT-Untersuchung verwendete Röntgenstrahlung ist von ihrer Natur her mit der Gammastrahlung vergleichbar. Bei-

de sind elektromagnetische Strahlungen, die sich nur durch die Art ihrer Entstehung unterscheiden und durch ihre Energie; die Energie der Gammastrahlung in der Keramik ist zum Teil 5 bis 10mal so hoch wie die der verwendeten Röntgenstrahlung. An sich sollten Röntgen- und Gammastrahlung die gleiche oder sehr ähnliche Wirkung bezüglich der pro Dosiseneinheit induzierten TL-Intensität haben; ob sich allerdings die unterschiedliche Energie auswirkt, entzieht sich meiner Kenntnis.

Prinzipiell sollte sich die zusätzliche Bestrahlung mit Röntgenstrahlung im Zuge der CT-Untersuchung nur auf die Äquivalente Dosis ED auswirken, Intercept I und Alpha-Effektivität  $a$  sollten für den jeweiligen Keramiktyp unabhängig von der zusätzlichen Röntgenstrahlung konstant bleiben. Die Variationen von I und  $a$  bei den einzelnen Keramiktypen müssen wohl vorwiegend auf die sehr variable Probenbelegung zurückgeführt werden, sie wirken sich in weiterer Folge auf die Archäologische Dosis AD ( $I$  wegen  $AD = ED + I$ ) und das TL-Alter TLA ( $I$  und  $a$ ) aus.

Deutlich erkennbar ist der Zuwachs bei ED und in weiterer Folge bei AD und TL-Alter bei den Proben, die mit dem industriellen CT-Gerät in der Bestrahlungsvariante 1 durchstrahlt wurden (Proben: A–C/1) (Tab. 7).



Vor allem auf Grund der langen Bestrahlungsdauer von 1 Stunde ergibt sich ein zusätzlicher Beitrag zu ED (ED+) von 4,1 bis 5,9 Gy (Gray) bzw. zu AD (AD+) von 5,4 bis 6,6 Gy und daraus folgend ein zusätzlicher Beitrag zum errechneten TL-Alter von etwa 820 bis 1140 Jahren.

Bei den übrigen drei Bestrahlungsvarianten (2 bis 4: Proben A/2–4; B/2–4; C/2–4; D/2–3) lassen sich die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten wegen der starken Schwankungen der Ergebnisse nicht erkennen (Tab. 7). Der Zuwachs bei ED bzw. AD dürfte im Bereich von 1 bis 2 Gy und beim TL-Alter im Bereich von etwa 200 bis 400 Jahren liegen. Für Gefäße, die aus archäologischer Sicht älter als etwa 2000 Jahre sind, darf bei Einhalten der Bestrahlungswerte der Varianten 2 bis 4 davon ausgegangen werden, dass eine Scheidung von Imitaten des 19. Jahrhunderts auch nach der Strahlenbelastung mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit möglich ist<sup>50</sup>.

Wie sich die unterschiedlichen Parameter wie Spannung und Strom der Röntgenröhre bzw. unterschiedliche Varianten der Filterung der Röntgenstrahlung auf die Thermolumineszenz der Proben auswirken, lässt sich aus den TL-Ergebnissen nicht ablesen. Dazu müssten die Untersuchungen in einem größeren systematischen Rahmen durchgeführt werden; in Form von mehreren Bestrahlungsreihen mit jeweils einem Keramiktyp bei denen jeweils nur die Spannung, der Strom bzw. die Filterung geändert wird.

| Probe |       | ED<br>[Gy] | $\Delta$ ED<br>[Gy] | I<br>[Gy] | $\Delta$ I<br>[Gy] | AD<br>[Gy] | $\Delta$ AD<br>[Gy] | a     | $\Delta$ a | TLA*)<br>[a] | $\Delta$ TLA<br>[a] | ED+    | AD+    | TLA+   |
|-------|-------|------------|---------------------|-----------|--------------------|------------|---------------------|-------|------------|--------------|---------------------|--------|--------|--------|
|       |       | [Gy]       | [Gy]                | [Gy]      | [Gy]               | [Gy]       | [Gy]                |       |            | [a]          | [a]                 | [Gy]   | [Gy]   | [a]    |
| A/0   | P979a | 6,922      | 0,443               | 1,361     | 0,593              | 8,283      | 0,740               | 0,165 | 0,015      | 1256,4       | 215,1               |        |        |        |
| A/1   | P979b | 10,991     | 0,595               | 2,736     | 0,498              | 13,727     | 0,776               | 0,124 | 0,007      | 2392,5       | 405,3               | 4,069  | 5,444  | 1136,1 |
| A/2   | P979c | 8,542      | 0,414               | 2,026     | 0,883              | 10,569     | 0,975               | 0,153 | 0,008      | 1666,4       | 290,8               | 1,621  | 2,286  | 410,0  |
| A/3   | P979d | 6,582      | 0,710               | 1,717     | 0,842              | 8,299      | 1,102               | 0,151 | 0,011      | 1317,2       | 253,2               | -0,340 | 0,016  | 60,8   |
| A/4   | P979e | 5,754      | 0,718               | 3,798     | 1,003              | 9,552      | 1,234               | 0,101 | 0,004      | 1816,6       | 392,3               | -1,168 | 1,270  | 560,2  |
| B/0   | P980a | 4,617      | 0,534               | 3,273     | 1,451              | 7,889      | 1,546               | 0,154 | 0,025      | 1254,7       | 323,0               |        |        |        |
| B/1   | P980b | 10,364     | 0,856               | 3,014     | 0,744              | 13,378     | 1,134               | 0,162 | 0,014      | 2073,7       | 349,1               | 5,747  | 5,489  | 819,0  |
| B/2   | P980c | 4,791      | 0,402               | 3,348     | 1,155              | 8,139      | 1,223               | 0,147 | 0,017      | 1324,7       | 291,6               | 0,175  | 0,250  | 70,0   |
| B/3   | P980d | 6,134      | 0,603               | 1,727     | 0,459              | 7,861      | 0,758               | 0,189 | 0,022      | 1122,2       | 190,4               | 1,517  | -0,028 | -132,5 |
| B/4   | P980e | 6,046      | 0,734               | 1,133     | 0,891              | 7,179      | 1,154               | 0,165 | 0,029      | 1102,3       | 242,8               | 1,429  | -0,710 | -152,4 |
| C/0   | P989a | 1,396      | 0,568               | 0,523     | 0,309              | 1,920      | 0,646               | 0,195 | 0,072      | 305,4        | 107,2               |        |        |        |
| C/1   | P989b | 7,281      | 1,167               | 1,245     | 1,625              | 8,526      | 2,001               | 0,185 | 0,031      | 1394,6       | 377,7               | 5,884  | 6,606  | 1089,2 |
| C/2   | P989c | 2,648      | 0,176               | 0,791     | 0,241              | 3,439      | 0,299               | 0,224 | 0,024      | 507,0        | 78,3                | 1,251  | 1,519  | 201,6  |
| C/3   | P989d | 1,966      | 0,248               | 1,069     | 0,695              | 3,036      | 0,738               | 0,208 | 0,017      | 476,5        | 134,8               | 0,570  | 1,116  | 171,1  |
| C/4   | P989e | 2,771      | 0,396               | 1,255     | 0,456              | 4,026      | 0,604               | 0,171 | 0,011      | 685,5        | 143,7               | 1,374  | 2,106  | 380,1  |
| D/0   | P991a | 0,503      | 0,074               | 0,016     | 0,067              | 0,519      | 0,099               | 0,232 | 0,047      | 71,1         | 16,3                |        |        |        |
| D/2   | P991c | 0,777      | 0,052               | 0,407     | 0,116              | 1,184      | 0,127               | 0,167 | 0,032      | 194,1        | 40,5                | 0,275  | 0,665  | 123,0  |
| D/3   | P991d | 0,549      | 0,110               | 0,028     | 0,043              | 0,577      | 0,118               | 0,166 | 0,012      | 94,9         | 19,1                | 0,046  | 0,058  | 23,8   |

ED,  $\Delta$ ED Äquivalente Dosis

I,  $\Delta$ I Intercept

AD,  $\Delta$ AD Archäologische Dosis

a,  $\Delta$ a Alpha-Effektivität

TLA,  $\Delta$ TLA

ED+

AD+

TLA+

TL-Alter

Zuwachs ED

Zuwachs AD

Zuwachs TL-Alter

\*) Für die Berechnung des TL-Alters wurde die Alpha-Dosisleistung durch Bestimmung der Alpha-Aktivität der jeweiligen Keramik abgeschätzt, für die Beiträge durch Gammastrahlung aus der Umgebung und Betastrahlung vom Kalium-40 wurden übliche Mittelwerte angenommen. Abweichungen dieser Mittelwerte von den tatsächlichen Werten resultieren in Abweichungen des errechneten TL-Alters vom tatsächlichen Alter der Keramiken.

Tabelle 7: Ergebnisse der TL-Untersuchungen

<sup>50</sup> In jedem Fall (wenn möglich) ist die Entnahme von Proben für eine TL-Datierung vor der CT-Untersuchung die bevorzugte Variante. Zu den Kriterien, die von den ausgewählten Keramikobjekten im Rahmen dieses CT-Projektes erfüllt werden mussten, s. Kap. 3.1.

## 4 DREIDIMENSIONALE REKONSTRUKTION

### 4.1 Oberflächenrekonstruktion

Aus den dreidimensionalen Computertomografie-Bildern kann mit Hilfe des Neuronen-Rekonstruktions-Algorithmus *NeuRA*<sup>51</sup>, der am Interdisziplinären Zentrum für wissenschaftliches Rechnen in Heidelberg sowie am Goethe-Zentrum für wissenschaftliches Rechnen in Frankfurt entwickelt wurde und aktuell in der Version 2.0 vorliegt, die Oberflächengeometrie der gescannten Objekte als Dreiecksgitter rekonstruiert werden. Hierbei wird zunächst das in den Bildern vorhandene, aufnahmebedingte Rauschen durch Anwendung eines Median-Filters großteils eliminiert. Anschließend werden mit Hilfe einer speziell entwickelten Regionenwachstum-Segmentierung Hintergrund und Objekt voneinander getrennt und es wird ein Binärbild erzeugt, in dem die zum gescannten Objekt gehörenden Bildpunkte weiß und die zum Hintergrund gehörenden Bildpunkte schwarz repräsentiert werden (Abb. 18).

Aus diesem Binärbild wird durch den *Marching-Cubes-Algorithmus*<sup>52</sup> das Oberflächengitter erzeugt und durch eine modifizierte Version des Gitteroptimierungsalgorithmus nach Hoppe in verschiedene Auflösungsstufen überführt (Abb. 19–20)<sup>53</sup>.

Das anderenorts ausführlich beschriebene Verfahren der Oberflächenrekonstruktion ermöglicht eine effiziente Extraktion der Volumendaten aus industriellen CT-Aufnahmen und erschließt diese für weitere Analysen, wobei nicht ausschließlich Anwendungen in der Archäologie in Betracht kommen<sup>54</sup>.

### 4.2 Visualisierung

Die auf diese Weise erzeugten Oberflächengeometrien sind im Gegensatz zu den Scandaten nur noch wenige Megabyte groß und können leicht in Echtzeit visualisiert werden (Abb. 21–22). Dasselbe Verfahren wurde auch auf Keramikfragmente angewandt, wobei sich zeigte, dass trotz dieser Reduktion auf reine Oberflächeninformationen immer noch ein hoher Informationsgehalt an herstellungstechnischen Spuren auf der ansonsten sphärischen Gefäßoberfläche erkennbar blieb (Abb. 22)<sup>55</sup>. Beim Scannen durch Computertomografie kann die Oberflächentextur nicht digitalisiert werden und ist daher in den Rekonstruktionen nicht sichtbar.

Darüber hinaus können verschiedene Charakteristika der rekonstruierten Objekte visualisiert werden. Beispielsweise ist Gefäß CT03046, ein der Este-Kultur zugehöriger Becher (Abb. 23 a), mit Bronzeapplikationen verziert. Bei äußerer Betrachtung des Gefäßes ist nicht erkennbar, ob diese annähernd quadratischen kleinen Beschläge nur in den Ton hinein gedrückte gewölbte Blättchen sind oder es sich um Köpfe tatsächlicher Nägel handelt<sup>56</sup>. Durch geeignete Schwellwertsetzung bei der Segmentierung während des Rekonstruktionsprozesses (Abb. 23 b) können die Metallbeschläge separat rekonstruiert werden, wodurch ihre flache Form ohne Nagelstift erkennbar wird<sup>57</sup>. Es handelt sich dabei um eine Bronzeschuppenverzierung (Abb. 23 c)<sup>58</sup>. Die CT offenbarte auch, dass dem Becher der ursprüngliche Standring fehlt und die nahezu waagrechte und plane Bruch-

<sup>51</sup> <http://www.neura.org>.

<sup>52</sup> W. E. Lorensen – H. E. Cline – E. Harvey, Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, *Computer Graphics* 21, 1987, 163–169.

<sup>53</sup> H. Hoppe – T. DeRose – T. Duchamp – J. McDonald – W. Stuetzle, Mesh Optimization, *Proc. of the 20<sup>th</sup> Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM SIGGRAPH 1993 (New York 1993)* 19–26.

<sup>54</sup> Die in diesem Abschnitt beschriebenen Methoden, Ergebnisse und Visualisierungen wurden bereits in Jungblut, *Rekonstruktion*, veröffentlicht.

<sup>55</sup> Zu diesen Fragmenten vgl. Karl, *Durchleuchtungen*, 102 Abb. 3.

<sup>56</sup> In der Erstpublikation ist der Dekor folgendermaßen beschrieben: „Topf der älteren Eisenzeit (HA/C?), mit mehreren Reihen von Bronzenägeln verziert, Oberteil geglättet“; s. W. Artner, *Archäologische Übersicht. Urgeschichte, Römerzeit und Frühmittelalter im Bereich der Stadt Graz*, in: W. Resch (Hrsg.), *Die Kunstdenkmäler der Stadt Graz. Die Profanbauten des I. Bezirkes, Österreichische Kunsttopographie* 53 (Wien 1997) XLIII KG nicht bekannt Nr. 3 Abb. E 13.

<sup>57</sup> Jungblut, *Rekonstruktion*, 134–147.

<sup>58</sup> Zu diesem typischen Verzierungselement der Este-Kultur s. J. Meffert, *Die paläovenetische Votivkeramik aus dem Reitia-Heiligtum von Este-Baratella* (phil. Diss. Universität Köln 1998) 151 f.; vgl. 968 Nr. 2887 Taf. 201 <<http://kups.ub.uni-koeln.de/volltexte/2004/1148/>> (18.3.2011).

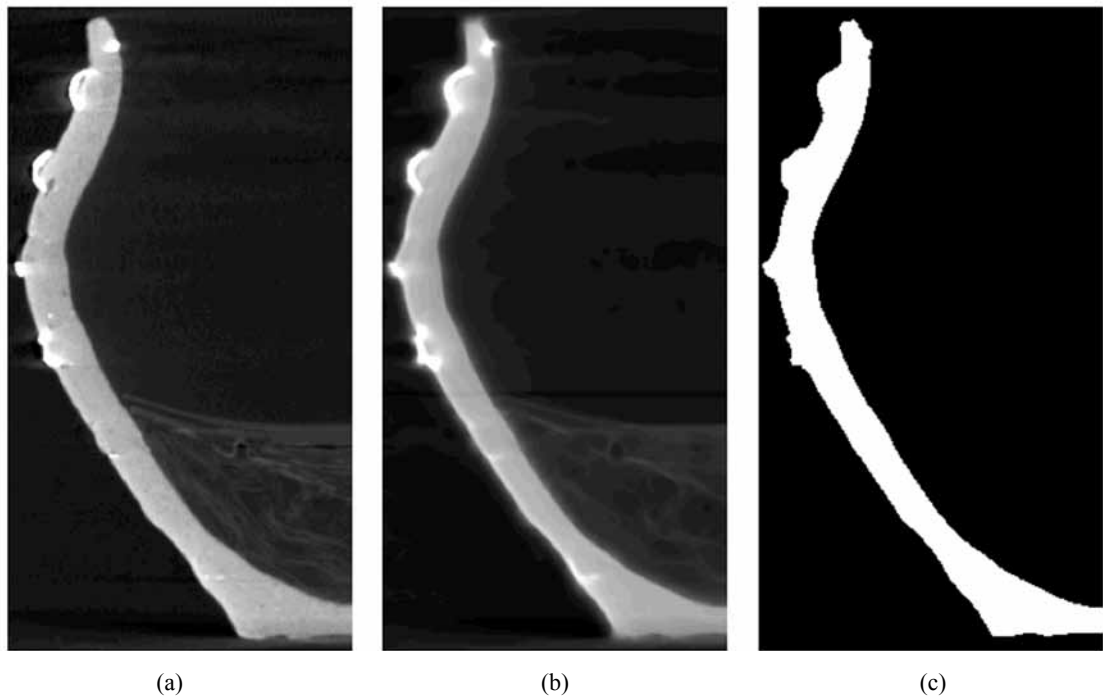


Abb. 18: Este-Becher CT03046 (UMJ Inv.-Nr. 25281): (a) Querschnitt durch das Originalbild; (b) nach Rauschverminderung; (c) nach Segmentierung (Visualisierung D. Jungblut).

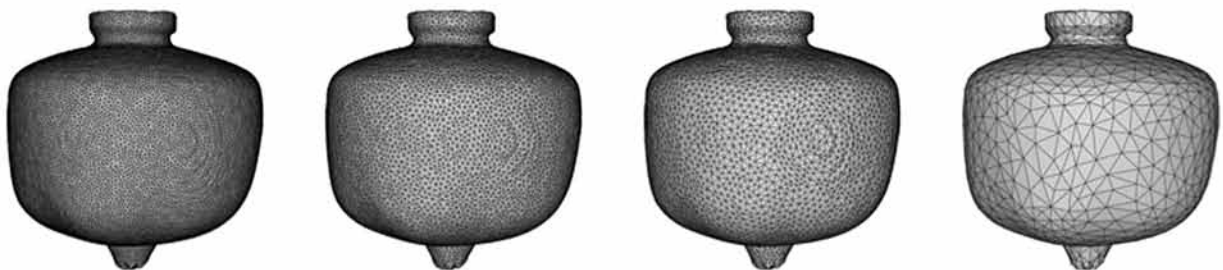


Abb. 19: Rekonstruiertes Gefäß CT03047 (Granatapfelgefäß) (KFUG Inv.-Nr. G 56) in verschiedenen Auflösungsstufen (Visualisierung D. Jungblut)

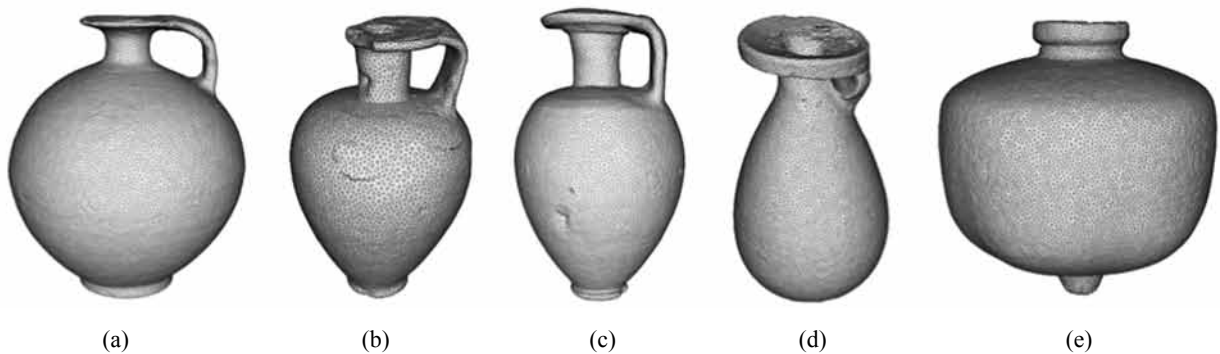


Abb. 20: Rekonstruktion der protokorinthischen Keramikgefäße (a) CT03155 (UMJ Inv.-Nr. 4190), (b) CT01184 (UMJ Inv.-Nr. 4214) und (c) CT03145 (UMJ Inv.-Nr. 25277), des korinthischen Alabastron (d) CT03214 (Privatsammlung) und des ostgriechischen Granatapfelgefäßes (e) CT03047 (KFUG Inv.-Nr. G 56) (Visualisierung D. Jungblut)

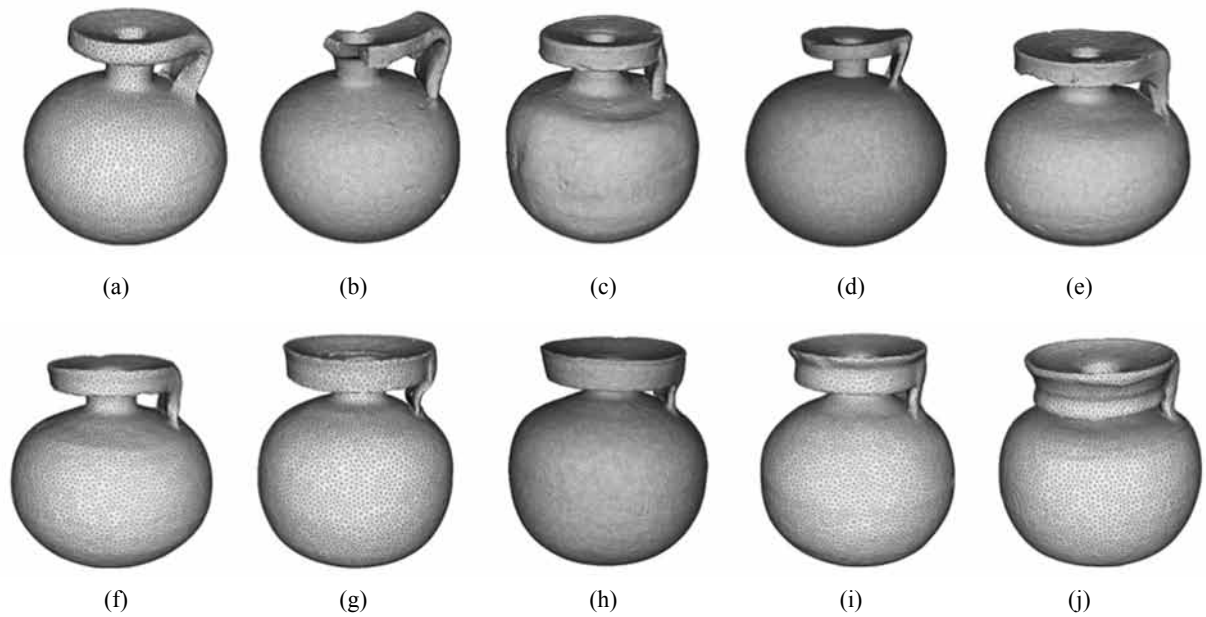


Abb. 21: Chronotypologisch sortierte Rekonstruktionen korinthischer Kugelaryballoi; (a) CT02187 (UMJ Inv.-Nr. 8738), (b) CT03211 (UMJ Inv.-Nr. 25303), (c) CT03212 (UMJ Inv.-Nr. 25305), (d) CT04136 (KFUG Inv.-Nr. G 26), (e) CT03213 (UMJ Inv.-Nr. 25302), (f) CT02186 (UMJ Inv.-Nr. 4215), (g) CT02185 (UMJ Inv.-Nr. 25278), (h) CT03210 (UMJ Inv.-Nr. 25301), (i) CT02183 (UMJ Inv.-Nr. 25306) und (j) CT02184 (UMJ Inv.-Nr. 25304) (Visualisierung D. Jungblut)

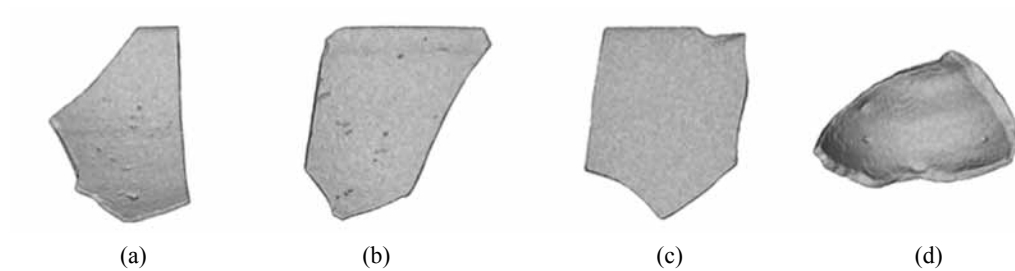


Abb. 22: Rekonstruktionen verschiedener Keramikfragmente (a) CT02188-1 (KFUG Inv.-Nr. 804) und (b) CT02188-4 (KFUG Inv.-Nr. 808) nordionischer, (c) CT02188-2 (KFUG Inv.-Nr. 844) attischer und (d) CT02188-3 (KFUG Inv.-Nr. 788) korinthischer Herkunft; Ansicht jeweils von innen (Visualisierung D. Jungblut)

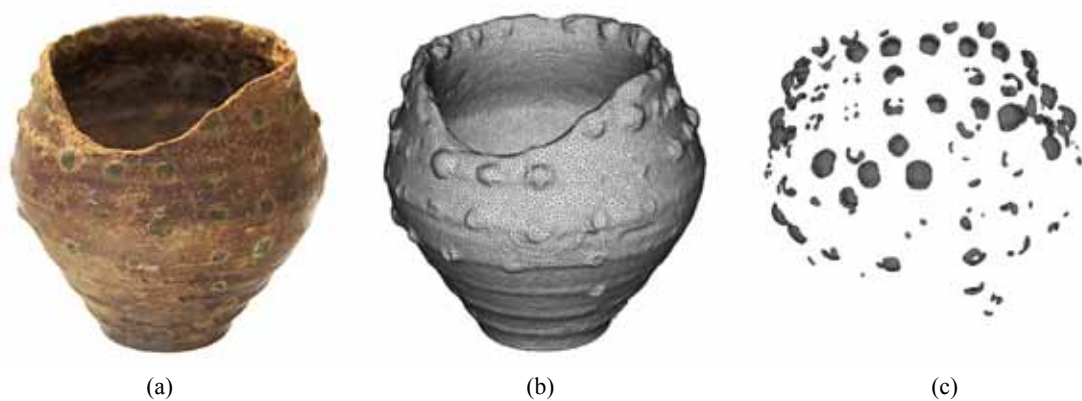
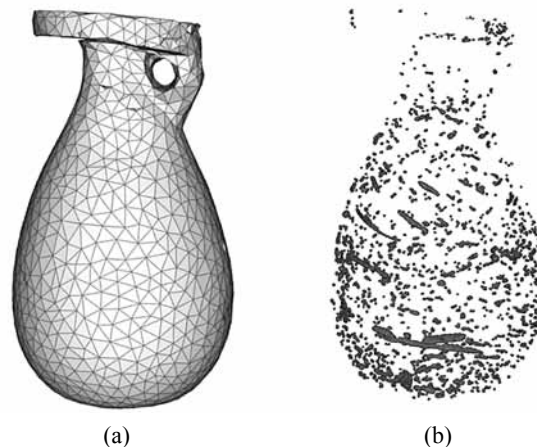


Abb. 23: Este-Becher CT03046 (UMJ Inv.-Nr. 25281): (a) Foto des Gefäßes mit Bronzeapplikationen; (b) Rekonstruktion der Oberfläche; (c) Rekonstruktion der Metallbeschläge (Foto UMJ, D. Modl; Visualisierung D. Jungblut)

Abb. 24: Korinthisches Alabastron CT03214 (Privatsammlung): (a) Rekonstruktion der Oberfläche; (b) Rekonstruktion der in der Keramik enthaltenen Luftporen, die sich im Uhrzeigersinn spiralförmig nach oben drehen (Visualisierung D. Jungblut)



stelle durch eine bereits von außen zu erahnende, dünne Schicht eines modernen Ergänzungsmaterials (Gips) kaschiert wurde<sup>59</sup>.

Des Weiteren können, ebenfalls durch geeignete Schwellwertsetzung bei der Segmentierung, die in den Keramiken vorhandenen Luftporen sichtbar gemacht werden, was hinsichtlich des Alabastron CT03214 untersucht wurde (Abb. 24). Hierbei wird die beim Töpferprozess verwendete Richtung der Drehscheibe gegen den Uhrzeigersinn sichtbar und legt, wie bei allen auf diese Weise untersuchten Gefäßen, einen Rechtshänder als Töpfer nahe.

### 4.3 Volumen- und Dichtebestimmung

Auf Basis dieser Rekonstruktionen können das Keramikvolumen und die Kapazität der Gefäße automatisch bestimmt werden.

Die Berechnung des Volumens der Keramik ermöglicht die Berechnung der physikalischen Dichte der Objekte, woraus sich Rückschlüsse auf die verwendeten Materialien, unterschiedliche Töpfertechniken und den Keramiktyp der Gefäße ziehen lassen. Zudem lassen sich durch die Berechnung der Kapazität der Gefäße Aussagen über die verwendeten Maßeinheiten in unterschiedlichen Zeitepochen treffen. Es konnte gezeigt werden, dass die Volumenbestimmung bei den untersuchten Gefäßen bis auf einen Milliliter genau ist und damit die Genauigkeit der üblichen archäologischen Methoden bei weitem übertrifft<sup>60</sup>. Von den rekonstruierten Gefäßen wurden jeweils die Kapazität und das Keramikvolumen inklusive der Lufteinschlüsse berechnet. Hierbei werden die Oberflächengitter durch Einfüllen kleiner Tetraeder in Volumengitter überführt, deren Volumina durch Aufsummieren aller Tetraedervolumen berechnet werden können (Abb. 25)<sup>61</sup>.

Da die Gefäße unter Normalbedingungen sehr exakt gewogen werden können, lässt sich mit Hilfe des Keramikvolumens die so genannte Rohdichte berechnen.

$$\text{Rohdichte} = (\text{Masse der Keramik}) / (\text{Volumen inklusive Lufteinschlüsse})$$

In der nachfolgenden Tabelle sind jeweils die Werte für die berechnete Kapazität, die Masse, das berechnete Keramikvolumen und die daraus resultierende Rohdichte der einzelnen Objekte aufgeführt (Tab. 8). Zudem wurde bei allen Gefäßen das Füllvolumen durch Einschütten von Reis bestimmt und die Abweichung zum berechneten Volumenwert der Kapazität bestimmt.

<sup>59</sup> Zum Gefäßtypus (bauchiger Becher) vgl. Meffert a. O. (Anm. 58) 90–93; Variante mit Schulterknick; vgl. 774 Nr. 1397. 1403 Taf. 88. Engster Vergleich: A. M. Chieco Bianchi – L. Calzavara Capuis, Este. Le necropoli Casa di Ricovero, Casa Muletti Prodocimi e Casa Alfonsi, MonAnt 51, Serie Monografica 2 (Rom 1985) 222 Nr. 216–12 Taf. 141, 12 (Nekropole Casa di Ricovero, Grab 216): Phase Este III D2.

<sup>60</sup> Zur Messgenauigkeit s. Jungblut, Rekonstruktion, 168–175; zur herkömmlichen archäologischen Methode s. Kap. 5.

<sup>61</sup> Zu einer weiteren Darstellung vgl. Karl et al., Insights, Abb. 6.

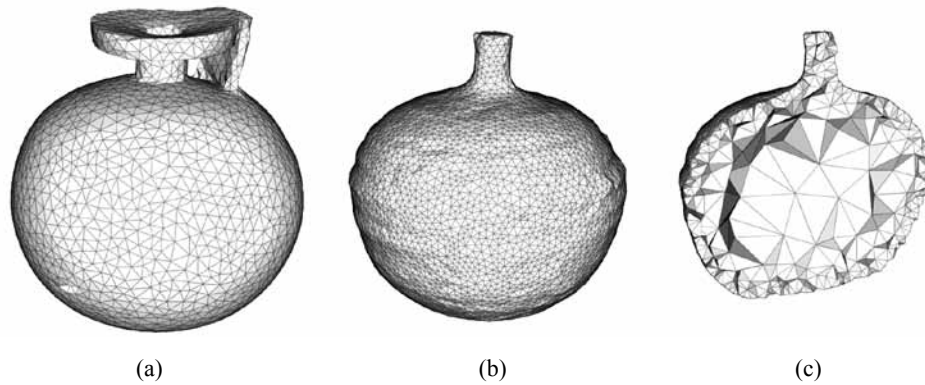


Abb. 25: Korinthischer Kugelaryballos CT04136 (KFUG Inv.-Nr. G 26): (a) Rekonstruktion der Oberfläche; (b) Kapazität in Form eines Phantomgefäßes; (c) Darstellung der Volumenberechnung in Form von Tetraeder (Visualisierung D. Jungblut)

| Objekt    | Kapazität (CT)  | Kapazität (Reis) | Abweichung | Masse         | Keramikvolumen | Rohdichte |
|-----------|-----------------|------------------|------------|---------------|----------------|-----------|
| CT01184   | 45 ml           | 44 ml            | 2 %        | 47,1 g        | 27 ml          | 1,7 g/ml  |
| CT02183   | 123 ml          | Nicht möglich    |            | Nicht möglich |                |           |
| CT02184   | 108 ml          | 112 ml           | 4 %        | 82,0 g        | 44 ml          | 1,9 g/ml  |
| CT02185   | 102 ml          | 106 ml           | 4 %        | 71,6 g        | 40 ml          | 1,8 g/ml  |
| CT02186   | 81 ml           | 84 ml            | 4 %        | 70,9 g        | 42 ml          | 1,7 g/ml  |
| CT02187   | 56 ml           | 58 ml            | 4 %        | 63,4 g        | 37 ml          | 1,7 g/ml  |
| CT02188-1 | Keramikfragment |                  |            | 18,6 g        | 10 ml          | 1,9 g/ml  |
| CT02188-2 | Keramikfragment |                  |            | 7,8 g         | 4 ml           | 2,0 g/ml  |
| CT02188-3 | Keramikfragment |                  |            | 11,0 g        | 6 ml           | 1,8 g/ml  |
| CT02188-4 | Keramikfragment |                  |            | 21,2 g        | 11 ml          | 1,9 g/ml  |
| CT03047   | 86 ml           | Nicht möglich    |            | 72,7 g        | 55 ml          | 1,3 g/ml  |
| CT03145   | 36 ml           | 36 ml            | 0 %        | 45,7 g        | 25 ml          | 1,8 g/ml  |
| CT03155   | 74 ml           | 76 ml            | 3 %        | 37,8 g        | 23 ml          | 1,6 g/ml  |
| CT03210   | 110 ml          | 114 ml           | 4 %        | 68,6 g        | 37 ml          | 1,9 g/ml  |
| CT03211   | 61 ml           | 62 ml            | 2 %        | 52,9 g        | 30 ml          | 1,8 g/ml  |
| CT03212   | 104 ml          | 107 ml           | 3 %        | 97,6 g        | 54 ml          | 1,8 g/ml  |
| CT03213   | 56 ml           | 58 ml            | 4 %        | 59,0 g        | 32 ml          | 1,8 g/ml  |
| CT03214   | 40 ml           | 39 ml            | 3 %        | 47,6 g        | 27 ml          | 1,8 g/ml  |
| CT03244   | 92 ml           | 92 ml            | 0 %        | 214,1 g       | 110 ml         | 1,9 g/ml  |
| CT03245   | 65 ml           | 67 ml            | 3 %        | 96,0 g        | 49 ml          | 2,0 g/ml  |
| CT04136   | 244 ml          | 252 ml           | 3 %        | 128,8 g       | 71 ml          | 1,8 g/ml  |

Tabelle 8: Berechnung von Kapazität, Keramikvolumen und Rohdichte der rekonstruierten Objekte

Hierbei zeigt sich eine Abhängigkeit der Rohdichte vom verwendeten Keramiktyp (Tab. 9). Diese Zahlen sind allerdings mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten, da mit Ausnahme von korinthischen Gefäßen nur wenige Rekonstruktionen und damit Messwerte für die Rohdichte vorliegen. Für die Zukunft wäre es interessant, diesen Zusammenhang weiter zu untersuchen. Es scheint sich jedoch abzuzeichnen, dass die Rohdichte wie in der Mineralogie oder Geologie eine materialspezifische Eigenschaft ist, die damit auch eine relevante archäologische Information bildet, mit der es möglich ist, Keramikttypen oder Waren, die für bestimmte Herstellungszentren charakteristisch sind, mit einem zusätzlichen Attribut zu definieren.

| Keramikttyp      | Rohdichte        |
|------------------|------------------|
| Ostgriechisch    | ca. 1,3 g/ml     |
| Protokorinthisch | ca. 1,6–1,7 g/ml |
| Korinthisch      | ca. 1,7–1,9 g/ml |
| Nordionisch      | ca. 1,9 g/ml     |
| Attisch          | ca. 2,0 g/ml     |
| Modern           | ca. 1,9–2,0 g/ml |

Tabelle 9: Rohdichte in Abhängigkeit des jeweiligen Keramikttyps



Bei genauer Betrachtung der Tabelle 8 fällt auf, dass bei Gefäß CT02183 der durch Einfüllen von Reis bestimmte Volumenwert der Kapazität fehlt. Dieses Gefäß enthält zwei große mitgebrannte Tonklumpen, die wahrscheinlich beim Töpferprozess in das Gefäß gefallen sind. Da die Entfernung dieser harten Tonklumpen das Gefäß beschädigen würde, lässt sich das Füllvolumen dieses Objektes mit den üblichen Methoden nicht bestimmen. Entfernt man diese Tonklumpen mit Hilfe von *NeuRA2* digital, lässt sich die Kapazität des Gefäßes jedoch berechnen. Da eine übliche archäologische Volumenbestimmung des ostgriechischen Granatapfelgefäßes CT03047 ebenfalls nur unter Beschädigung der feinen Grate am Umbruch des Gefäßkörpers zur Mündung möglich wäre, fehlt der entsprechende Wert ebenfalls. Mit Hilfe der hier vorgestellten Rekonstruktionen lässt sich die Kapazität des Gefäßes jedoch berechnen.

Abschließend bleibt zu bemerken, dass der durch die Reismethode bestimmte Wert häufig den CT-Volumenwert der Kapazität übertrifft. Dieses Phänomen lässt sich darauf zurückführen, dass sich der Reis in einem Gefäß mit großer Grundfläche besser verdichtet, als in dem 50 ml-Messzylinder (Innendurchmesser 2,15 cm; max. Messhöhe 13,2 cm) zur Volumenbestimmung, der für das Umfüllen und Messen der jeweiligen Reismenge in dieser Studie Verwendung fand<sup>62</sup>.

## 5 FORMANALYSE

Mit einer industriellen CT wird eine komplette dreidimensionale Dokumentation des Objektes mit allen äußeren, aber auch inneren Strukturen erreicht: Im Falle der im Rahmen des Grazer CT-Projektes untersuchten griechischen Vasen, basierend auf den oben beschriebenen technischen Vorgaben und Einstellungen, innerhalb von nur 12 min Aufnahme und weiteren etwa 12 min zur Erstellung der Rekonstruktionsmatrix<sup>63</sup>. Im Gegensatz zur Dokumentation mittels eines 3D-Scanners, basierend auf dem Prinzip von strukturiertem Licht (auch als optischer 3D-Nahbereichsscanner bezeichnet) oder eines 3D-Laser-Scanners, ist die Dauer einer CT-Untersuchung nicht von der Komplexität des Objektes abhängig; ein gewisser Vorteil, wenn es um Erhebung einer Projektdauer oder um eine Kostenkalkulation geht. Mit der CT sind zusätzlich auch äußere Oberflächen darzustellen, die wohl einsehbar sind, doch manuell bzw. mit 3D-Scannern kaum bis gar nicht einmessbar sind (Abb. 26; vgl. Abb. 13). Der besondere Vorteil des 3D-Scannens mit strukturiertem Licht bei gleichzeitiger optischer Aufnahme der Oberfläche ist hingegen die digitale Einbindung der Texturierung, d. h. der Farbinformationen der sichtbaren Objekt Oberfläche, die mit einem Computertomografen natürlich nicht möglich ist<sup>64</sup>. Nur bei signifikantem Dichteunterschied des verwendeten Malschlickers, der Engobe, zum Keramikkörper wäre eine binäre Darstellung der bemalten Flächen mittels CT erzielbar (Abb. 6). Die Feinheit der CT-Auflösung

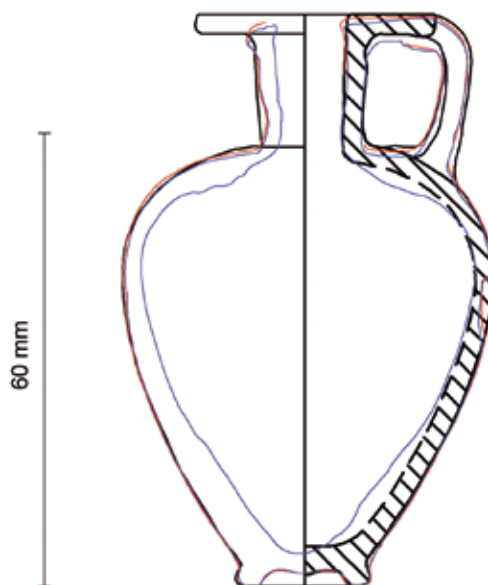


Abb. 26: Protokorinthischer Aryballos CT01184 (UMJ Inv.-Nr. 4214) mit Überlagerung der Profillinien aus der konventionellen Zeichnung (schwarz), aus den Daten der 3D-Vermessung mit strukturiertem Licht (rot) und aus der CT-Rekonstruktion (blau) (Grafik S. Karl)

<sup>62</sup> Jungblut, Rekonstruktion, 222. Das Füllvolumen des Gefäßes CT04136 wurde im Rahmen der CVA-Publikation zur Grazer Institutssammlung ebenfalls vermessen, jedoch mit Sand und einem 100 ml-Messzylinder. Diese Messung ergab den Wert 248 ml, der somit mittig zwischen 244 ml (CT) und 252 ml (Reis/Messzylinder) fällt.

<sup>63</sup> Zur Datenaufnahme und zur Auswahl der Objekte s. Kap. 2. und 3.1.

<sup>64</sup> Ein Teil der Gefäße aus diesem CT-Projekt wurde parallel dazu mittels eines 3D-Scanners mit strukturiertem Licht aufgenommen (15.–17. Juli 2009). Zweck dieses Vorgehens waren sowohl der Methodenvergleich als auch Vorarbeiten zu einer zukünftigen Methodenkombination; s. dazu Kap. 8. Der Arbeitsgruppe Visualisierung und Numerische Geometrie (NGG) des Interdisziplinären Zentrums für Wissenschaftliches Rechnen (IWR) an der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg (Susanne Krömker, Julia Portl, Julia Freudenreich, Hubert Mara und Jens Fangerau) ist an dieser Stelle besonders zu danken. Zur 3D-Vermessung s. Beitrag von H. Mara und J. Portl in diesem Band.



bildet darüber hinaus auch die Binnenritzung der schwarzfigurig bemalten Keramikgefäße ab, die gerade für die stilistische Bestimmung dieser Ware von Bedeutung ist (Abb. 27). Bemalung und Ritzung werden zumeist nur durch aufwändige zeichnerische Abrollungen des Gefäßes in einem für eine archäologische Auswertung entsprechenden Informationsgehalt gewonnen (Abb. 28).

Durch die CT wird im Prinzip eine virtuelle dreidimensionale Kopie des Untersuchungsobjektes erzielt, die in der Folge – ohne das Original zu beeinträchtigen – untersucht werden kann. Maße, wie Wandstärken, Durchmesser etc., können aus den digitalen Daten an jeder beliebigen Stelle entnommen werden. Die Erfassung der inneren Kontur der Wandung, die entweder direkt als CT-Schnitt dargestellt oder manuell umgezeichnet werden kann, ermöglicht es bei vollständig erhaltenen Gefäßen mit enger Mündung, erstmals auch diese Information richtig darzustellen. Gerade die innere Kontur offenbart wesentliche herstellungstechnische Details. So zeigen z. B. korinthische Kugelaryballoi eine unterschiedliche innere Ausformung des Überganges der Gefäßschulter zum Hals, wobei es sich hierbei um Merkmale oder Phänomene handelt, die offenbar einem chronologischen Wandel unterliegen (Abb. 28–29)<sup>65</sup>.

Die akkurate Darstellung des Gefäßprofils ist für formtypologische Analysen in der archäologischen Keramikforschung weiterhin unumgänglich. Die Verknüpfung des üblicherweise als Profil umgezeichneten Fragmentes aus einer archäologischen Grabung mit dem Profil eines ganz erhaltenen Gefäßes aus einem Museumsbestand bildet dazu eine wesentliche Grundlage<sup>66</sup>. Zusätzlich dienen Profilzeichnungen, die auch kleinste Unregelmäßigkeiten in der Gefäßwandung wiedergeben, der Festlegung des Herstellungsprozesses und unterstützen eine Formbeschreibung, die weniger die morphologischen Charakteristika des Objektes auflistet, als den Prozess seiner Entstehung zu rekonstruieren versucht<sup>67</sup>.

Die aus den CT-Daten gewonnene, dreidimensionale Erfassung der inneren Oberfläche schafft gerade hinsichtlich der Bestimmung des Einfüllvolumens einen wesentlichen Vorteil gegenüber anderen Methoden. Bei Angabe einer Füllhöhe kann das Einfüllvolumen, die Kapazität des Gefäßes, automatisiert und exakt berechnet werden<sup>68</sup>. Seit dem Jahr 2002/2003 ist die Volumenmessung ein fixer Bestandteil in CVA-Publikationen von Deutschland und Österreich, da sie ein wichtiger Indikator ist, mögliche Standardisierungen in der Antike festzustellen. Konventionell wird das innere Volumen durch das Einfüllen fester Stoffe wie Styroporkügelchen, Reis oder Sand und Umfüllen in einen Messzylinder bzw. Abwiegen des Gewichtes mit anschließendem Umrechnen auf das Volumen gemessen<sup>69</sup>. Ein anderes Verfahren basiert auf der Rotationsgeometrie des Gefäßes und errechnet das Einfüllvolumen über eine digitalisierte zweidimensionale Formerfassung der Innenkon-

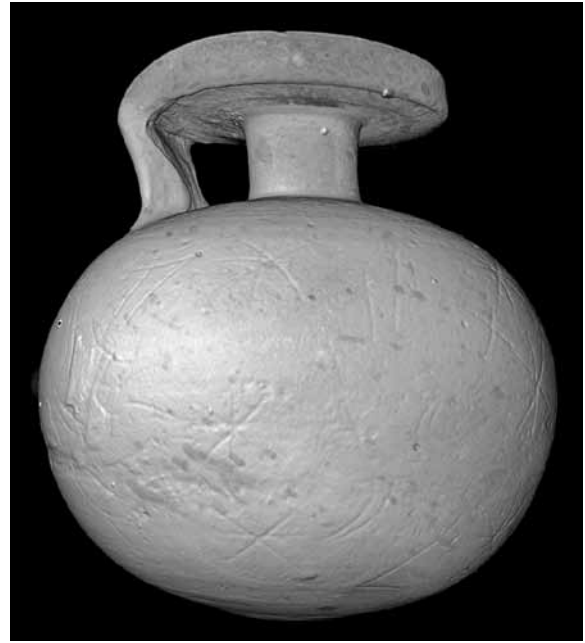


Abb. 27: Korinthischer Kugelaryballos des La-Trobe-Malers CT02187 (UMJ Inv.-Nr. 8738) mit Binnenritzung der schwarzfigurigen Bemalungstechnik; VRVis Volume Renderer (Visualisierung ÖGI, D. Habe)

<sup>65</sup> Zur Registrierung von Phänomenen s. B. Kaeser, Herstellungs- und Schicksalsspuren, Nachträge, in: M. Bentz (Hrsg.), Vasenforschung und Corpus Vasorum Antiquorum – Standortbestimmung und Perspektiven, CVA Deutschland Beih. 1 (München 2002) 65–72, bes. 71.

<sup>66</sup> W.-D. Heilmeyer, Keramologie contra Vasenkunde? – Das CVA aus der Sicht eines Museumsleiters, in: M. Bentz (Hrsg.), Vasenforschung und Corpus Vasorum Antiquorum – Standortbestimmung und Perspektiven, CVA Deutschland Beih. 1 (München 2002) 17 f.

<sup>67</sup> P. Perkins, Etruscan Bucchero in the British Museum, The British Museum Research Publication 165 (London 2007) 9.

<sup>68</sup> Zur Berechnung s. Kap. 4.3.

<sup>69</sup> Bentz – Böhr, Maßen; M. Bentz, Panathenäische Preisamphoren. Eine athenische Vasengattung und ihre Funktion vom 6.–4. Jahrhundert v. Chr., AntK Beih. 18 (Basel 1998) 31–40, bes. 32: „Bei den Messungen muss ein Unsicherheitsfaktor von etwa 0,5 l berechnet werden – in Einzelfällen sogar mehr.“ Vgl. A. Schöne-Denkinger in CVA Berlin 11, S. 8: „Bei mehrmaliger Messung traten bei größeren Gefäßen Differenzen bis zu 0,5 l auf, bei kleineren ca. 200–300 ml.“

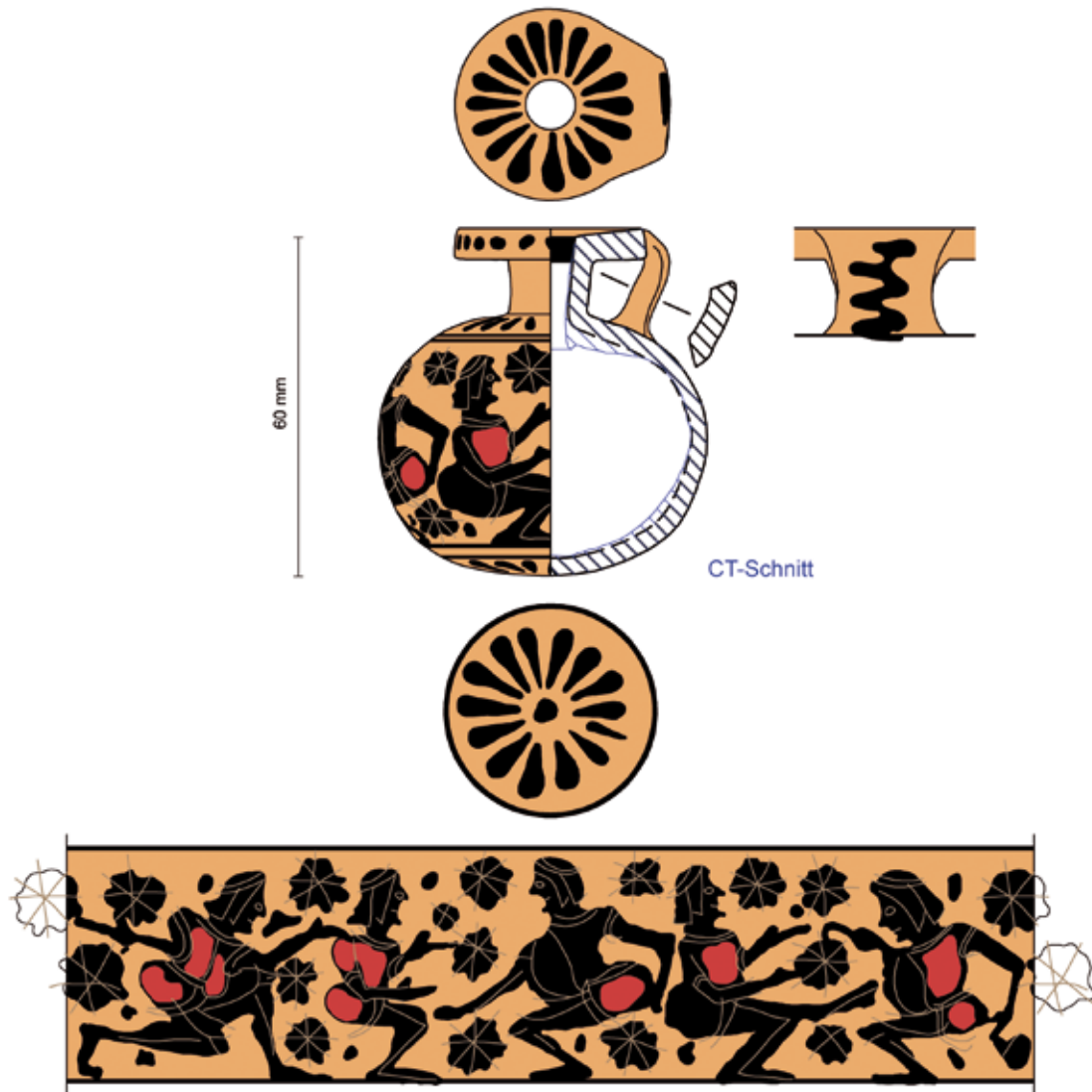


Abb. 28: Korinthischer Kugelaryballos des La-Trobe-Malers CT02187 (UMJ Inv.-Nr. 8738) mit Darstellung von Komasten, konventionelle Zeichnung mit Innenkontur nach den CT-Daten (Grafik S. Karl)

tur auf mathematischem Weg<sup>70</sup>. Kritische Bemerkungen zu den Messunsicherheiten dieser herkömmlichen Volumenbestimmungen stammen von Manfred Hüttig. „Metrologie kann definiert werden als ‚die Wissenschaft vom Messen in Verbindung mit der Bewertung der Unsicherheit‘ [...]“<sup>71</sup> Wesentlich genauer ist eine Volumenberechnung aus einem 3D-Modell, auch wenn mittels Oberflächenscanner die Wandstärke bei Gefäßen mit enger Mündung über Werte an den einmessbaren Bereichen des Randes und des Bodens gemittelt werden muss<sup>72</sup>. Neben der Automatisierung und Genauigkeit der Messung bietet die CT in diesem Fall sicherlich ein schonenderes Vorgehen für das antike Objekt.

<sup>70</sup> C. Steckner, Das Samos-Projekt. Neue Wege der Informatikanwendung in der Archäologie, AiD 1989/1, 16–21. Im Internet wird am Centre de Recherches en Archéologie et Patrimoine (CReA) der Freien Universität Brüssel ein interaktives Programm für eine automatisierte Volumenbestimmung aus einer Profilzeichnung angeboten: <http://lissaserver.ulb.ac.be/capacity>.

<sup>71</sup> M. Hüttig, Methoden der Volumenbestimmung für antike Gefäße am Beispiel griechischer Transportamphoren, AM 114, 1999, 317–324, bes. 317. Von M. Bentz wird jedoch zu Recht darauf hingewiesen, dass diese Kritik „nicht zu einem für den Archäologen sinnvoll verwertbaren Ergebnis“ führt (Bentz – Böhr, Maßen, 73 Anm. 1).

<sup>72</sup> Mara et al., Acquisition, 26 Abb. 9.

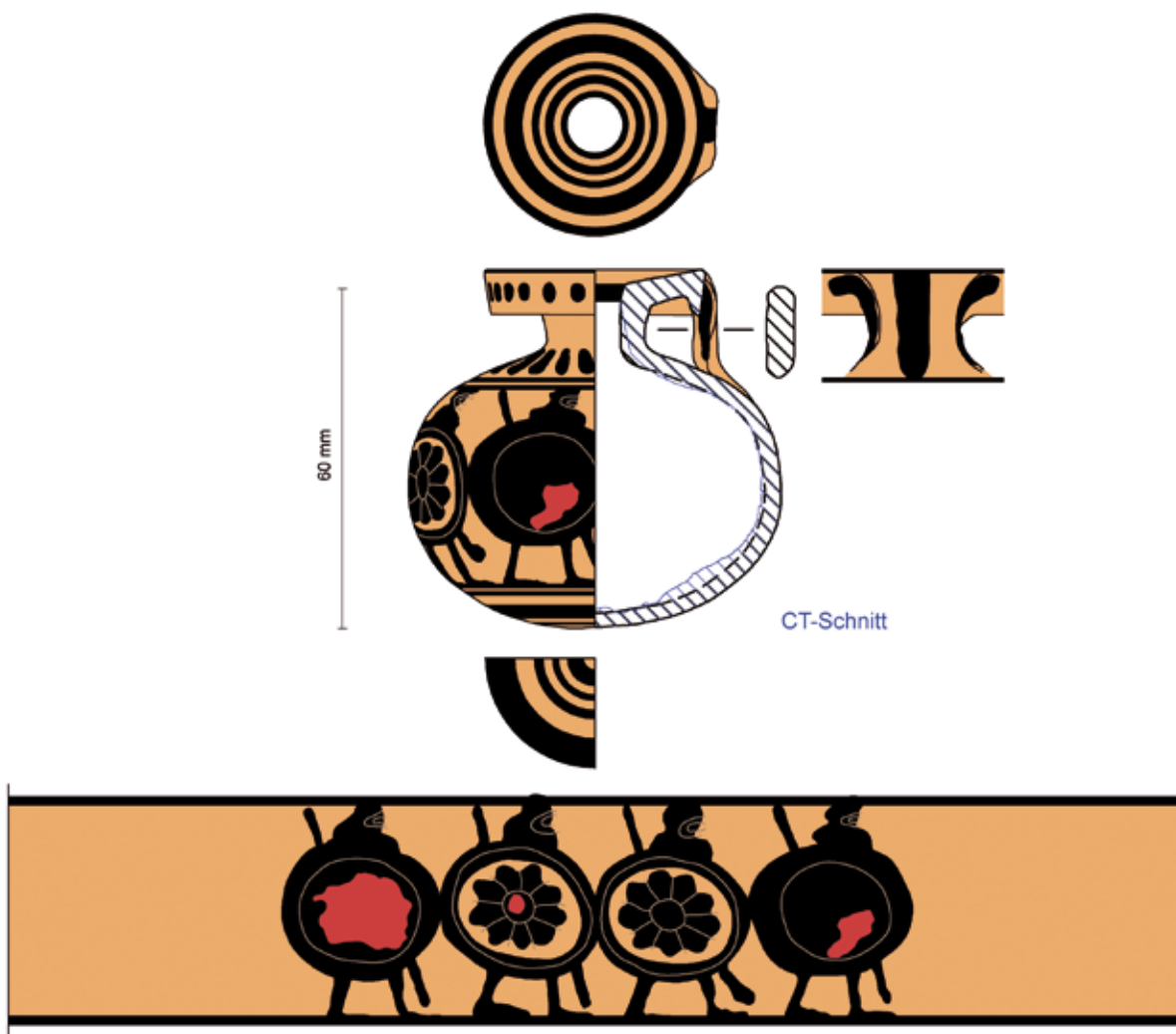


Abb. 29: Korinthischer Kugelaryballos CT02186 (UMJ Inv.-Nr. 4215) mit Darstellung eines Kriegerzuges, konventionelle Zeichnung mit Innenkontur nach den CT-Daten (Grafik S. Karl)

## 6 HERSTELLUNGSTECHNISCHE ANALYSE

In letzter Zeit werden technologische und archäometrische Studien immer mehr in den Mittelpunkt der Keramikforschung gerückt, um die einzelnen Arbeitsschritte in den Werkstätten der Töpfer und Maler besser verstehen zu können. So lässt sich der Herstellungsprozess von der Gewinnung des Rohstoffes in der Tonlagerstätte bis zur Fertigstellung des Gefäßes rekonstruieren. Der Radiografie kommt hier allgemein eine besondere Bedeutung zu, denn sie ermöglicht die dafür notwendigen Einblicke in den Körper des Gefäßes, wie sie mit anderen Methoden – gerade bei Museumsobjekten – nicht oder nur eingeschränkt möglich sind<sup>73</sup>. Die Dokumentation eines Gefäßes mit Hilfe der industriellen CT bietet eine weit über röntgenografische Aufnahmen hinausgehende Klarheit im Detail.

Durch die Sichtbarmachung charakteristischer primärer Herstellungsspuren an der Oberfläche, die sich zumeist nur im Inneren geschlossener Gefäße vor dem sekundär erfolgten Abdrehen und Glätten im lederhar-

<sup>73</sup> Bei röntgenografischen Untersuchungen wurde dieser Aspekt stets betont: Tite, Pottery, 186: „Xeroradiography, which, through its method of recording the x-ray image, enhances the edges of inclusions, pores, and any joins within the pottery, provides a particularly powerful technique for investigating pottery forming methods [...]“; vgl. Middleton, Ceramics, 83–92; Berg, pots; zu weiterführender Literatur s. Kap. 1.1.

ten Zustand bewahrt haben, und durch die Darstellung spezifischer Gefügestrukturen in der Keramikmatrix selbst ergeben sich in den meisten Fällen ausreichende Erkenntnisse, den Fertigungsprozess des jeweiligen Gefäßes nachvollziehen zu können<sup>74</sup>. „The manufacturing process forms a basic part of this study, because in the process – including firing the pottery – the potters create all of the specific qualities and characteristics of a vessel which in turn can be studied by the archaeologist.<sup>75</sup>“ Die Feststellung individueller Merkmale an den Untersuchungsobjekten kann die zumeist auf stilistischen oder typologischen Methoden basierenden Zuweisungen der einzelnen Stücke zu bestimmten Töpferwerkstätten unterstützen.

Die Verwendung der schnell drehenden Töpferscheibe ermöglicht dem Töpfer, Gefäße in kürzerer Zeit und effizienter zu formen. Das Hochziehen der Wandung bei gleichzeitiger Rotation prägt dem Ton eine charakteristische Gefügestruktur ein, die sich in einer spiralförmigen Orientierung und Ausrichtung der inneren Luftporen und der nicht-plastischen Bestandteile in der Keramikmatrix kenntlich macht<sup>76</sup>. Bei den im Grazer CT-Projekt durchstrahlten Vasen verläuft diese Spiralisierung stets im Uhrzeigersinn nach oben, was auf eine gegen den Uhrzeigersinn bewegte Töpferscheibe beruht, und besitzt von Fall zu Fall einen leicht unterschiedlichen Anstiegswinkel (Abb. 24)<sup>77</sup>. Die Drehrichtung der Töpferscheibe gegen den Uhrzeigersinn, die eine rechtshändige Körperseitigkeit des Töpfers, d. h. eine Ausprägung der motorischen Fähigkeiten seiner rechten Hand nahelegt, ist bis heute die bevorzugte Rotationsrichtung der Scheibe<sup>78</sup>. An einigen Gefäßen ist diese Spirale deutlich durch Drehwülste im Bodenbereich zu erkennen; andere Exemplare gleicher Größe und Form sind hingegen in diesem Bereich nahezu glatt (z. B. CT02187). Die von außen eingedrückte und im Inneren des Keramikmaterials sich fortsetzende Spiralstruktur kann als herstellungstechnischer *fingerprint* des Töpfers bezeichnet werden (Abb. 30).

Gefäße werden oft in separaten Schritten hergestellt, auch z. T. unter Anwendung unterschiedlicher Techniken. Die im Zuge des Projektes untersuchten korinthischen Kugelaryballoi wurden alle aus einem Stück auf der schnell drehenden Töpferscheibe – mit aller Wahrscheinlichkeit vom Stock – in einer bauchigen Form hochgezogen; der Halsbereich – wie dies die diagonalen Stressfalten im Inneren zeigen – wurde stark zusammengezogen und der Mündungsteller so mit zwei Fingern nach außen geformt, dass eine zuweilen tief unterschrittene Lippe erzeugt wurde (Abb. 29)<sup>79</sup>. Nichtsdestoweniger lassen sich töpfertechnische Abweichungen an diesen Exemplaren trotz ihres *a priori* ähnlichen Aussehens feststellen<sup>80</sup>. Die Kugelaryballoi der frühkorinthischen Phase besitzen scharfkantige Übergänge von der Hals- zur Schulterzone. Diese wurden dadurch erzeugt, dass nach dem bauchigen Hochziehen die Wandung an ein rundes Stäbchen gepresst wurde und in der Folge mit dem Stäbchen von innen und einem kantigen Gegenstück von außen die Wandung des Halses zylindrisch in die Höhe geformt wurde. Eine solche Technik entspricht in etwa jener zur Herstellung protokorinthischer ovoider Aryballoi<sup>81</sup>. Ferner ist zu beobachten, dass die frühen Kugelaryballoi im unteren Bereich beträchtlich im lederharten Zustand abgedreht wurden (mittels Metallschlaufe?), wobei sich der Töpfer zusätzlich einer Zentrierhilfe bediente, die sich an einer kleinen kegelförmigen Vertiefung am Boden

<sup>74</sup> Schreiber, Vase, 9–66. Zu den primären und sekundären Spuren s. weiters Rice, Pottery, 124–152; Rye, Pottery, 62–95; Tite, Pottery, 185–188; Berg, pots, 1179–1185.

<sup>75</sup> Abbink, cycles, 25. Zur Keramikproduktion der archaischen Zeit s. Stissi, Pottery, 10–179; vgl. allgemein Scheibler, Töpferkunst, 71–133.

<sup>76</sup> Die Untersuchung dieser charakteristischen Spiralstruktur wurde mittels medizinischer CT bereits bei Gefäßen der Nasca-Indianer angewendet; s. dazu B. Hoffmann-Schimpf – M. Tellenbach, Die Nutzung der Töpferscheibe durch die südamerikanischen Nasca-Indianer, VDR-Beiträge 2004/1, 99–104; L. Reiblich – M. Tellenbach, An die Mächte der Natur. Mythen der altperuanischen Nasca-Indianer, AW 33, 2002, 441–444.

<sup>77</sup> T. Schreiber, The turn of the wheel, in: J. Frel – S. Knudsen Morgan (Hrsg.), Greek Vases in the J. Paul Getty Museum, Occasional Papers on Antiquities 1 (Malibu 1983) 149–153; Rye, Pottery, 74–80; zur Drehdrehung s. z. B. Rice, Pottery, 129 Abb. 5.7c. Zur Aussagekraft des Anstiegswinkels s. Berg, pots, 1179 f.

<sup>78</sup> Diese Orientierung scheint (auch bei Linkshänder) auf Lern- und Lehrprozesse zurückzugehen; vgl. dazu H. Wallaert-Pêtre, Manual Laterality Apprenticeship as the First Learning Rule prescribed to Potters, in: L. R. Owen – M. Porr (Hrsg.), Ethno-Analysis and the Reconstruction of Prehistoric Artefact Use and Production, Urgeschichtliche Materialhefte 14 (Tübingen 1999) 185–206. Heutige Töpferscheiben mit elektrischem Antrieb einer eher preisgünstigen Kategorie verfügen nur über eine Drehrichtung; diese läuft standardmäßig gegen den Uhrzeigersinn.

<sup>79</sup> Zur Herstellung eines Aryballos s. Schreiber, Vase, 88–91. J. V. Noble nahm noch an, dass Aryballoi aus zwei Teilen zusammengesetzt wurden, aus dem Körper und dem Mündungsteller; s. dazu J. V. Noble, The Techniques of Painted Attic Pottery (New York 1965) 25.

<sup>80</sup> Für die Diskussion töpfertechnischer Details ist Ingolf Christian, HTBLVA Graz-Ortweinschule, zu danken.

<sup>81</sup> Jansen, Scenes, 320 f.

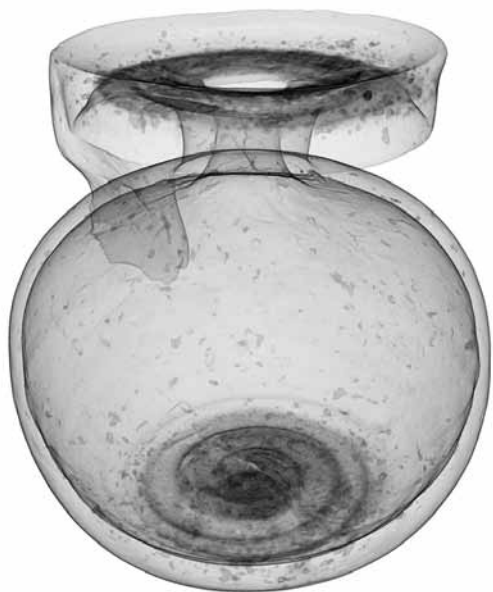


Abb. 30: Korinthischer Kugelaryballos CT02185 (UMJ Inv.-Nr. 25278) mit im Uhrzeigersinn sich drehenden, spiralförmigen Drehwülsten im Bodenbereich; VRVis Volume Renderer (Visualisierung ÖGI, J. Rosc)

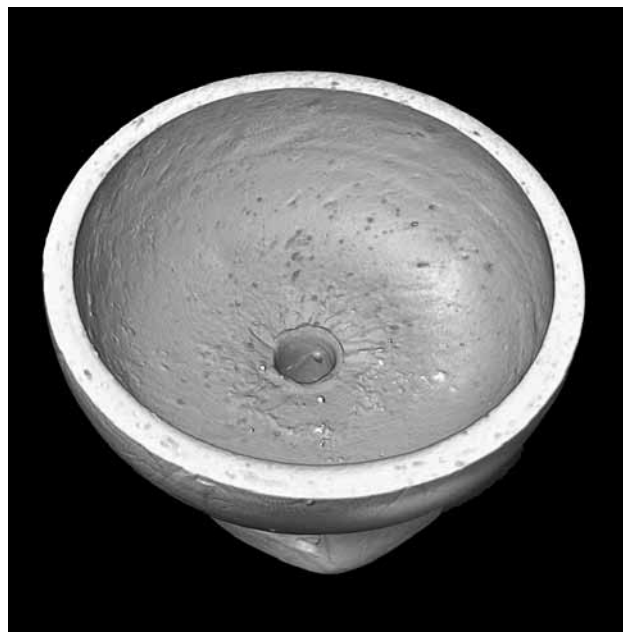
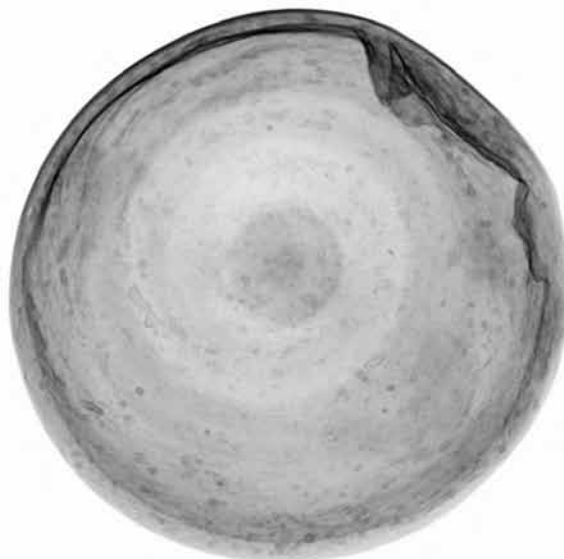


Abb. 31: Korinthischer Kugelaryballos des La-Trobe-Malers CT02187 (UMJ Inv.-Nr. 8738) mit deutlichem Grat im Inneren am Übergang von der Schulter zum Hals; VRVis Volume Renderer (Visualisierung ÖGI, J. Rosc)



Abb. 32: Korinthischer Kugelaryballos CT03212 (UMJ Inv.-Nr. 25305) mit Ausflickung einer vermutlich schadhafte Stelle durch einen separat geformten Tonlappen; VRVis Volume Renderer (Visualisierung ÖGI, J. Rosc)



zu erkennen gibt. In diesem Zustand war der Henkel, der aufgrund der perfekten Anpassung in einem relativ frühen Stadium an das frische Gefäß angarniert wurde, bereits angesetzt<sup>82</sup>. Am frühkorinthischen Kugelaryballos des La-Trobe-Malers erkennt man deutlich die Verwendung dieser technischen Hilfsmittel (Abb. 31; vgl. Abb. 27)<sup>83</sup>.

Aber auch Missgeschicke bzw. Korrekturen des Töpfers enthüllt die CT. Beim Kugelaryballos CT03212 wurde eine Öffnung in der Wandung des Gefäßes im noch relativ feuchten Zustand mit einem linsenförmigen Tonlappen verschlossen. Möglicherweise entstand sie dadurch, dass eine fehlerhafte, den Brand gefährdende Stelle präventiv herausgeschnitten wurde. Von außen ist diese Einpassung aufgrund der Abdreharbeiten kaum zu erkennen und dadurch nahezu perfekt kaschiert worden (Abb. 32).

Während die Formung des Tones auf der Drehscheibe sich bei allen untersuchten Gefäßen über die spiralförmige Orientierung der Poren und sonstigen nicht-plastischen Bestandteilen bis hin in Bereiche mit geringster Wandstärke wie die Lippe eindeutig erschließt, zeigen die angesetzten Henkel eine lineare innere Struktur, die auf ein in die Längeziehen des Tones zu einem schmalen Band mit länglich ovalem Querschnitt zurückgeht<sup>84</sup>. Angarnierungen sind trotz der z. T. perfekten Ausführung, die kaum Luftporen an der Ansatzstelle (sog. Garniernäht) zeigt, am Wechsel dieses Gefügebildes deutlich zu erkennen; dies auch über die physikalisch-technisch bedingten Feldkamp-Artefakte hinweg, die gerade bei der getroffenen Positionierung der Gefäße im CT-Strahlengang an den Übergängen zwischen der Schulter, dem Hals und dem Mündungsteller auftraten<sup>85</sup>.

Dagegen war die Untersuchung des ostgriechischen Granatapfelgefäßes CT03047 insofern überraschend, da sich dabei das völlige Fehlen dieser charakteristischen Gefügestruktur herausstellte<sup>86</sup>. Dieses Exemplar gehört zur von J. Ducat zusammengestellten Gattung von Granatapfelgefäßen mit nahezu identischer Grundform; unterteilt in zwei Gruppen, die sich ausschließlich in der unterschiedlichen Ausführung der Mündung und ihres Überganges zum Gefäßkörper manifestiert<sup>87</sup>. Variationen innerhalb dieser zwei Gruppen betreffen im Weiteren nur die dekorativen Elemente wie Bemalung und Ritzung im oberen Gefäßdrittel. Herstellungstechnische Details sind zu dieser Gefäßgattung aus der Literatur kaum zu entnehmen; die Beurteilung reicht von „handgemacht“ bis zu „eseguito al tornio e rifinito a mano“<sup>88</sup>.

Der Gefäßkörper des Grazer Stückes entstand in keiner Phase auf der Drehscheibe, sondern ist frei aufgebaut, mit aller Wahrscheinlichkeit unter Nutzung einer Negativform. Mehrere charakteristische Spuren an diesem Gefäß weisen auf diese technische Prozedur hin: So ist einerseits die Gefäßwandung gegenüber der kreisförmigen Außenkontur im horizontalen Querschnitt unregelmäßig stark ausgeprägt, andererseits verlaufen vertikale Risse an der Innenseite, die darauf zurückgeführt werden können, dass die vorbereitete Tonschicht in eine Negativform gepresst wurde und beim Trocknen und Brennen an diesen Stellen einriss. In dieser Form muss bereits die Knospe des Granatapfels kegelförmig eingetieft worden sein, da keine Spuren eines separaten Ansetzens dieses Teiles in der CT sichtbar sind. Der Schulterbereich wurde wie bei den korinthischen Kugelaryballoi händisch zusammengezogen und geschlossen. Nach dem Ansetzen des separat geformten,

<sup>82</sup> Dies bestätigt u. E. auch die Darstellung eines korinthischen Töpfers auf einem der bekannten Penteskouphia-Täfelchen; Louvre MNB 2857: s. dazu Stissi, Pottery, 481 Nr. C103 Taf. 48a; Schreiber, Vase, 12 f. Abb. 2.8. Stissi sieht darin einen Töpfer, der vermutlich im Begriff ist, den Aryballos mit Ritzlinien zu versehen. Da aber der Töpfer mit der zweiten Hand gleichzeitig die Töpferscheibe in Schwung versetzt, ist dies eher unwahrscheinlich. Wohl richtig als „Töpfer beim Abdrehen (?)“ interpretiert: Scheibler, Töpferkunst, 79 Abb. 69. Das Abdrehen ist bei der Herstellung von Keramikgefäßen der aufwändigste und zeitintensivste Arbeitsschritt; eine Darstellung dieses Prozesses wäre somit verständlich.

<sup>83</sup> Zum La-Trobe-Maler s. D. A. Amyx, Corinthian Vase-Painting of the Archaic Period (Berkeley 1988) 108 f. Die Angabe des an der engsten Stelle gemessenen inneren Durchmessers, der in etwa dem Querschnitt des verwendeten Stäbchens entspricht, könnte sich somit als relevante Information erweisen (beim Grazer Exemplar des La-Trobe-Malers: 6,8 mm).

<sup>84</sup> Schreiber, Vase, 24. Henkel können auch mit einer profilierten Schlaufe aus einer Tonplatte herausgeschnitten werden: Schreiber, Vase, 36 f.

<sup>85</sup> Zur Artefaktbildung s. Kap. 2.1.

<sup>86</sup> Erstmals in Karl et al., Insights, Abb. 4 vorgestellt.

<sup>87</sup> J. Ducat, Les vases plastiques rhodiens archaïques en terre cuite, BEFAR 209 (Paris 1966) 142–144 (Gruppe A und B); vgl. M. J. Maximova, Les vases plastiques dans l'Antiquité. Époque archaïque (Paris 1927) 89 f. 173; R. A. Higgins, Catalogue of the Terracottas in the Department of Greek and Roman Antiquities British Museum II (London 1959, Nachdruck 1975) 29 f. zu Nr. 1650.

<sup>88</sup> W. Löwe, Die Kasseler Grabung 1894 in der Nekropole der archaischen Stadt, in: P. Gercke (Hrsg.), Samos – die Kasseler Grabung 1894 in der Nekropole der archaischen Stadt von Johannes Boehlau und Edward Habich, Kataloge der Staatlichen Museen Kassel 24 (Kassel 1996) 64 zu Nr. 45, 29 Abb.; S. Boldrini, Le ceramiche ioniche, Gravisca 4 (Bari 1994) 46 zu Nr. 19 Abb. (Tarquinia 76-17162).



Abb. 33: Ostgriechisches Granatapfelgefäß CT03047 (KFUG Inv.-Nr. G 56) mit Spuren der Herstellungstechnik wahrscheinlich in einer Negativform; VG Studio MAX und VRVis Volume Renderer (Grafik S. Karl; Visualisierung ÖGI, J. Rosc)

zylindrischen Halsstückes wurde dieses samt der Gefäßwandung mit einem spitzen Gegenstand durchbohrt, sodass durch diesen Vorgang gratartige Reste weit in den Gefäßkörper hineingedrückt wurden. Zusätzlich befindet sich im Inneren ein Einstichloch des verwendeten Werkzeuges am Boden, wofür ein zugespitztes Holzstäbchen oder ein anderes Instrument zu vermuten ist. Scharfe Konturen an der oberen Gefäßhälfte weisen auf eine Nachbearbeitung im lederharten Zustand hin; weiters wurde die gesamte Oberfläche mit einem Schwamm bzw. einem adäquaten Gegenstand geglättet (Abb. 33).

Wie weit diese Beobachtung auch auf andere Gefäße dieser Gattung zutrifft, müssten weitere Forschungen – vor allem auch an Fragmenten – klären. Es spricht jedoch vieles dafür, dass dieser Typ wie auch die damit eng verwandten „Beingefäße“ grundsätzlich mittels Negativformen gewonnen wurden, ohne hier auf die Frage nach dem Produktionsort dieser Gattungen in Ostgriechenland näher eingehen zu können<sup>89</sup>. Bei Vergleichsstudien wird in Zukunft ein besonderes Augenmerk auf Terrakotten – auch die niedrige Rohdichte des Grazer Gefäßes spricht dafür – bzw. auf nicht auf der Drehscheibe hergestellte Gefäße von figuraler, vegetativer oder anderer Form zu richten sein<sup>90</sup>.

<sup>89</sup> Ducat a. O. (Anm. 87) 134–139.

<sup>90</sup> Zur Rohdichte des Granatapfelgefäßes CT03047 s. Kap. 4.3.



## 7 STRUKTURANALYSE

Das Besondere von Untersuchungen mittels industrieller CT ist die hohe Mess- und Darstellungsgenauigkeit von Strukturen innerhalb der Keramikmatrix, die bei der am ÖGI benutzten Mikrofokus-Anlage v|tome|x C 240 D abhängig von der Objektgröße und der Aufnahmetechnik eine Auflösung von bis zu 5 µm erreichen kann. Bei den untersuchten Keramikgefäßen der Antike umfasst diese nach den im CT-Projekt definierten Voreinstellungen immerhin noch etwa 150–200 µm. Diese Genauigkeit ermöglicht Analysen des Scherbens, d. h. des Keramiktyps, hinsichtlich seiner Eigenschaften der Matrix (Struktur, Porenanteil, Porengröße etc.) und der nicht-plastischen Bestandteile bzw. der Magerung (Anteil, Partikelgröße, Sortierung etc.). Dass überhaupt innere Strukturen des Materials sichtbar werden, hängt mit der komplexen Mischung und Verbindung von Mineralien in der Keramikmatrix zusammen, die neben der Porosität Bestandteile unterschiedlich spezifischer Dichte umfasst, wie neben den Tonmineralen u. a. Quarze, Feldspate oder Eisenoxide<sup>91</sup>. Diese Partikel und Poren absorbieren die Röntgenstrahlen aufgrund ihrer Dichte unterschiedlich stark und bilden sich so in den CT-Projektionen lagemäßig sowie in ihrer Form und Größe – abhängig von der erzielten Auflösung – ab. Im CT-Projekt wurde hauptsächlich korinthische Keramik untersucht, die eine helle gelblich-grüne Färbung besitzt, die auf dem Tonmineral Smektit basiert, ohne erkennbare Magerung ist, und neben etwas Chlorit, Feldspat und Quarz vor allem einen hohen Anteil von Kalziumkarbonat enthält<sup>92</sup>.

Porosität gehört zu den wichtigsten Eigenschaften der Keramik, die vom Töpfer für bestimmte Funktionen der Gefäße auch besonders manipuliert wurde<sup>93</sup>. Sie ist gekennzeichnet durch die Porengröße, die Porenverteilung, die Anzahl der Poren und den Grad der Verbindung der Poren untereinander. Poren in der Keramik resultieren grundsätzlich aus der Plastizität des Tones mit seinem variablen Wassergehalt, aber auch aus der Art und Menge der dem Ton beigemengten Magerung, der mineralogisch-chemischen Zusammensetzung, der individuellen Zubereitung des Töpfertones und schließlich aus dem Brennvorgang. Das Volumen der Poren sowie die Größe, Form und Orientierung der einzelnen Poren sind für Gefäße in vielerlei Hinsicht entscheidend. Diese Faktoren beeinflussen die Festigkeit, die Permeabilität, den Grad der Abnutzung, den Wärmeausdehnungskoeffizienten oder auch die Beständigkeit gegenüber starken Hitzeschwankungen<sup>94</sup>. Die exakte Porositätsmessung ist jedoch in der Archäometrie schwierig durchzuführen; meistens wird die so genannte offenbare Porosität (*apparent porosity*, AP) bestimmt, d. h. die Wassermenge, die ein Scherben aufnehmen kann, wobei Mikroporen in den Tonmineralen dabei kaum Berücksichtigung finden<sup>95</sup>.

Porositätsbestimmung gehört im Rahmen der „zerstörungsfreien Materialprüfung“ (ZfP) in der Industrie zur Defektdetektion, doch ist eine dreidimensionale Auswertung mit Hilfe kommerzieller Analyseprogramme aufgrund fehlender Verknüpfungen mit so genannten Dichte/Gradienten-Transferfunktionen zur Reduktion von technisch-physikalischen Ungenauigkeiten in der Rekonstruktionsmatrix der CT-Daten mit gewissen

<sup>91</sup> Middleton, *Ceramics*, 78–83; vgl. auch Berg, *pots*, 1185–1187.

<sup>92</sup> Zum korinthischen Ton s. I. K. Whitbread, *Clays of Corinth. The study of a basic resource for ceramic production*, in: C. K. Williams – N. Bookidis (Hrsg.), *Corinth. The centenary 1896–1996*, Corinth 20 (Princeton 2003) 1–13, bes. 7.

<sup>93</sup> A. O. Shepard, *Ceramics for the archaeologist*, Carnegie Institution of Washington, Publication 609 (Washington 1956) 125–130; Rice, *Pottery*, 54–79; Rye, *Pottery*, 61 f.; Hamer – Hamer, *Lexikon*, 260 f.; Abbink, *cycles*, 56.

<sup>94</sup> A. Hein – V. Kilikoglou, *Assessment of ancient vessel design with the Finite Element Method (FEM)*, in: S. Y. Waksman (Hrsg.), *Archaeometric and Archaeological Approaches to Ceramics*, Papers presented at EMAC '05, 8<sup>th</sup> European Meeting on Ancient Ceramics, Lyon 2005, BARIntSer 1691 (Oxford 2007) 9–12; A. Hein – V. Kilikoglou, *Modeling of Thermal Behavior of Ancient Metallurgical Ceramics*, *Journal of the American Ceramic Society* 90, 2007, 878–884; A. Hein – N. S. Müller – V. Kilikoglou, *Great pots on fire: Thermal properties of archaeological cooking ware*, und N. S. Müller – V. Kilikoglou – P. M. Day – A. Hein – G. Vekinis, *The influence of temper on performance characteristics of cooking ware ceramics*, in: K. T. Biró – V. Szilágyi – A. Kreiter (Hrsg.), *Vessels: inside and outside*, Proc. of the Conference EMAC '07, 9<sup>th</sup> European Meeting on Ancient Ceramics, Budapest 24.–27.10.2007 (Budapest 2009) 15–20; bzw. 145–150; A. Hein – N. S. Müller – P. M. Day – V. Kilikoglou, *Thermal conductivity of archaeological ceramics: The effect of inclusions, porosity and firing temperature*, *Thermochimica Acta* 480, 2008, 35–42.

<sup>95</sup> Für die Berechnung der offenbaren Porosität (AP) braucht man vom Scherben das Volumengewicht (V: im destillierten Wasser 2 Stunden lang gekocht; 30 min abgekühlt auf Raumtemperatur und noch im Wasserbad gewogen), das gesättigte Gewicht (A: 15 min nach der Prozedur für V bei Raumtemperatur getrocknet) und das Trockengewicht (B: 18 Stunden bei einer Temperatur von 130 °C getrocknet, 1 Stunde im Ofen und 1 Stunde außerhalb des Ofens abgekühlt); s. dazu Abbink, *cycles*, 92. Die Formel lautet:  $(A-B)/(A-V) = AP$  [%]; vgl. auch Hamer – Hamer, *Lexikon*, 261.

Vorbehalten verbunden<sup>96</sup>. Dagegen gibt es für eine zweidimensionale Identifizierung von Poren (und von Einschlüssen) innerhalb eines radiografischen Bildes bereits mehrere Vorarbeiten, die speziell entwickelte Filtertechniken zur Segmentierung anwenden, um das Bild rauschfreier und kontrastreicher zu machen, Strahlungsaufhärtungen zu reduzieren sowie die unterschiedlich durchstrahlten Bereiche im Projektionsbild unter Verwendung eines Subtraktionshintergrundes zu glätten<sup>97</sup>.

Um eine solche zweidimensionale Porositätsauswertung auf die im CT-Projekt untersuchten Objekte anzuwenden, wurden je vier Schnitte – eigentlich Schichten in der Dicke der jeweiligen Voxelgröße – aus den CT-Daten an definierten Stellen extrahiert, wobei die absoluten Grauwerte bei allen CT-Schnitten mittels derselben Berechnung über den zwei *peaks* für Luft und Keramik im jeweiligen Grauwert-Histogramm gleich dargestellt wurden. Eine Segmentierung zu binären Bildern zur Porosität erfolgte schließlich durch Bildfilterung mittels Tontrennung und Kantenbetonung sowie abschließend durch eine Schwellwertsetzung, wobei alle Schritte mit denselben Werten ausgeführt wurden (Abb. 34)<sup>98</sup>.

Aus den jeweils vier binären Bildern zur Porosität eines Objektes war es in einem weiteren Schritt nun möglich, prozentuell die sichtbare schwarze Fläche (d. h. die Poren) herauszurechnen, die vermutlich nur annäherungsweise die offenbare Porosität (AP) abhängig von der erzielten Auflösung (Voxelgröße) angibt, sicherlich jedoch im Verhältnis zueinander auf unterschiedlich hohe Porositäten in den untersuchten Keramiken hinweist. Diese Angaben können nun mit den durch die Oberflächenrekonstruktion gewonnenen Werten zur Rohdichte in ein Verhältnis gesetzt werden (Abb. 35)<sup>99</sup>.

Neben den Poren sind in den CT-Daten auch hellgraue bis weiße Partikel zu erkennen, die auf Einschlüsse in der Keramik zurückgehen, die eine höhere spezifische Dichte als die umgebende Matrix (mittelgrau) besitzen. Das Mageren des Töpfertones (mit Hilfe von sog. Zuschlagstoffen) ist eine weit verbreitete Praxis unter den Töpfern, womit die Verarbeitungsfähigkeit des Tones verbessert bzw. eine bestimmte Qualität des Gefäßes erreicht werden konnte<sup>100</sup>. Die Identifizierung der Magerung aber auch der im Ton bereits vorhandenen nicht-plastischen Bestandteile ist in der archäometrischen Keramikforschung gleichermaßen für Fragen der Herstellungstechnik wie auch für die Lokalisierung des Produktionsortes wesentlich. Um welche mineralogisch-petrografischen Teilchen es sich dabei handelt, geht aus der Röntgenprojektion nicht hervor. Zieht man in Betracht, dass z. B. Quarz ( $\text{SiO}_2$ ; Dichte: 2,7 g/cm<sup>3</sup>) oder Kalkspat ( $\text{CaCO}_3$ ; Dichte: 2,8 g/cm<sup>3</sup>) eine nahezu gleiche spezifische Dichte wie die Tonminerale von etwa 2,65 g/cm<sup>3</sup> besitzen, verwundert es zunächst, dass diese im CT-Bild überhaupt sichtbar werden. „Temper particles and clays may differ only slightly in elemental composition and specific gravity, [...]“<sup>101</sup> Doch dabei kommt ein ansonsten weniger geschätzter Aspekt positiv zum Tragen, der stark von der Auflösung der CT und der Detektion der Röntgenstrahlen abhängig ist: der so genannte partielle Volumeneffekt (*partial volume effect*). Durch die Mikroporen zwischen den einzelnen Tonmineralen wird die Abschwächung der Röntgenstrahlen reduziert: es wird pro Pixel des Detek-

<sup>96</sup> s. Kap. 2.3; vgl. H. Eisele, Automated defect detection and evaluation in X-ray CT images (techn. Diss. Universität Heidelberg 2002) <<http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/volltexte/2003/3106/pdf/diss.pdf>> (18.3.2011).

<sup>97</sup> A. Pierret – C. J. Moran – L.-M. Bresson, Calibration and Visualization of Wall-Thickness and Porosity Distributions of Ceramics Using X-radiography and Image Processing, JASc 23/3, 1996, 419–428; J. Lang – A. Middleton – J. Ambers – T. Higgins, Radiographic images, in: J. Lang – A. Middleton (Hrsg.), Radiography of Cultural Material (Burlington 2005) 20–48; Greene – Hartley, ceramics; Berg, pots, 1179; vgl. auch V. Rebuffel – S. Sood – B. Blakeley, Defect Detection Method in Digital Radiography for Porosity in Magnesium Castings, in: J. Völker – R. Link (Hrsg.), EC NDT 2006, Berlin, 25.–29.9.2006 <<http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/We.2.5.3.pdf>> (18.3.2011). Zur Bildsegmentierung s. M. Unger – T. Pock – H. Bischof, Continuous Globally Optimal Image Segmentation with Local Constraints, in: J. Perš (Hrsg.), Computer Vision Winter Workshop 2008, Moravske Toplice, Slovenia, February 4–6, Slovenian Pattern Recognition Society, Ljubljana, Slovenia <<http://www.icg.tugraz.at/publications/pdf/cvww08seg.pdf>> (18.3.2011).

<sup>98</sup> Tontrennung und Kantenbetonung: Kantenstärke 2; Kantendeckkraft 4, Tontrennung 6. Schwellenwert 110.

<sup>99</sup> Zur Rohdichte und zur Volumenbestimmung s. Kap. 4.3.

<sup>100</sup> Shepard a. O. (Ann. 93) 131; H. Neff – R. L. Bishop – E. V. Sayre, A Simulation Approach to the Problem of Tempering in Compositional Studies of Archaeological Ceramics, JASc 15, 1988, 159–172; Rye, Pottery, 29–57; H. Neff – R. L. Bishop – E. V. Sayre, More Observations on the Problem of Tempering in Compositional Studies of Archaeological Ceramics, JASc 16, 1989, 57–69; Hamer – Hamer, Lexikon, 213. 404 f. Zu weiterführender Literatur s. auch die Anmerkungen unter der Besprechung der Porosität sowie M. Tite – V. Kilikoglou, Do we understand cooking pots and is there an ideal cooking pot?, in: V. Kilikoglou – A. Hein – Y. Maniatis (Hrsg.), Modern Trends in Scientific Studies on Ancient Ceramics: papers presented at the 5<sup>th</sup> European Meeting on ancient ceramics (EMAC '99), Athens 1999, BARIntSer 1011 (Oxford 2002) 1–8.

<sup>101</sup> C. Carr – E. B. Riddick, Advances in Ceramic Radiography and Analysis: Laboratory Methods, JASc 17, 1990, 35–66, bes. 44.

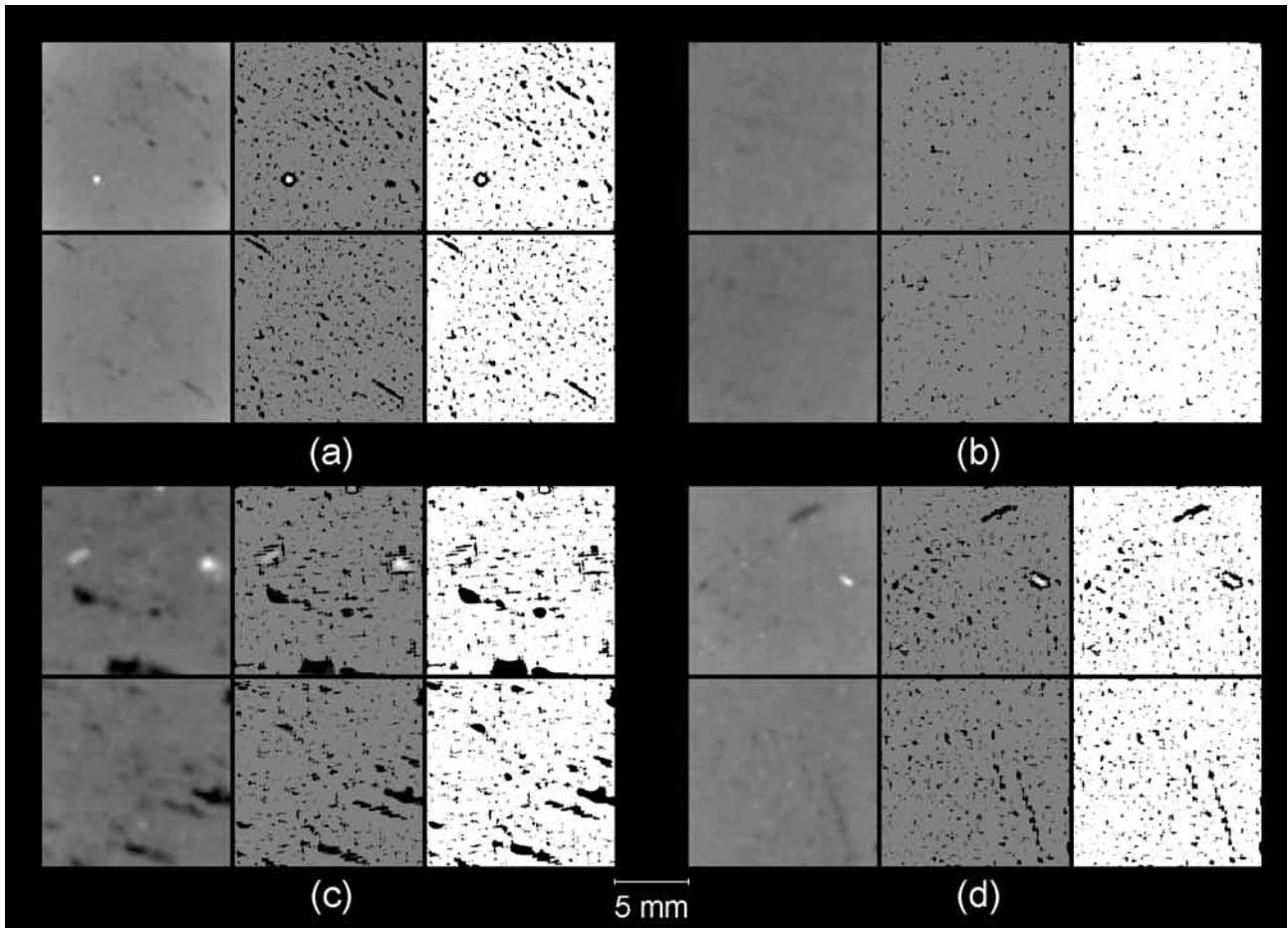


Abb. 34: CT-Schnittbilder mit binärer Darstellung der offenbaren Porosität: (a) protokorinthischer Aryballos CT01184 (UMJ Inv.-Nr. 4214); (b) attischer Augenklythos CT02188-2 (KFUG Inv.-Nr. 844); (c) nordionische Vogelkotyle CT02188-1 (KFUG Inv.-Nr. 804); (d) ostgriechisches Granatapfelgefäß CT03047 (KFUG Inv.-Nr. G 56); VG Studio MAX und Scion Image (Grafik S. Karl)

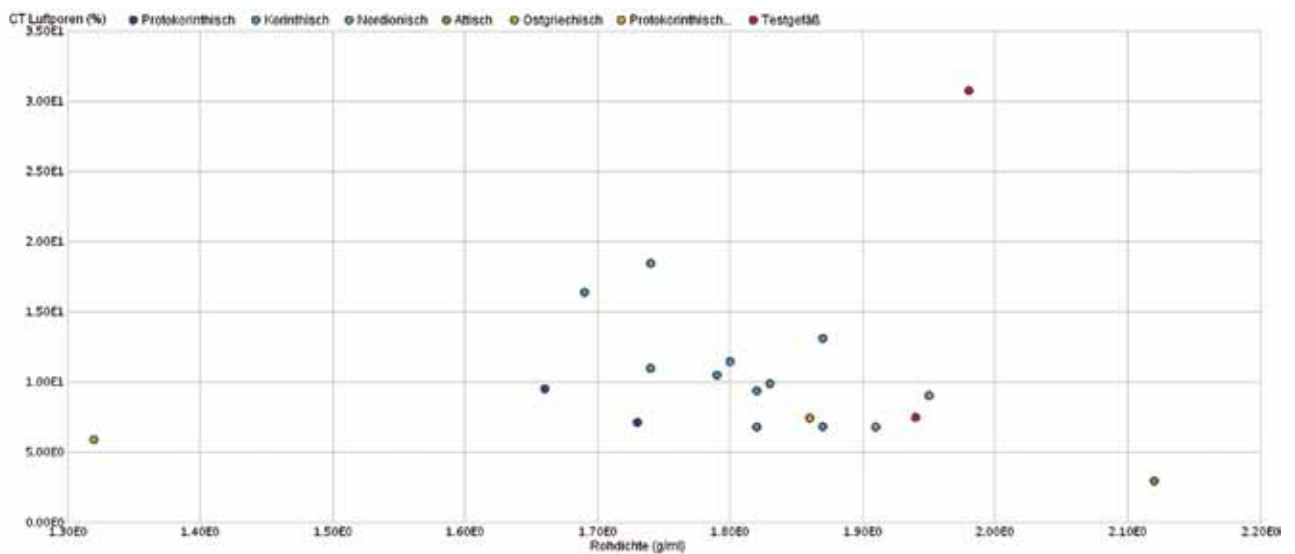


Abb. 35: Verhältnis der Rohdichte zur offenbaren Porosität bezogen auf die verschiedenen Keramiktypen der untersuchten Gefäße innerhalb des Grazer CT-Projektes; RapidMiner (Grafik S. Karl)



Abb. 36: Unterschiedlich gemagerte Keramikzylinder mit Kennzeichnung ihrer jeweiligen Magerungsart und Korngröße (fein/grob), 24 Stunden nach erfolgtem Brand (Foto S. Karl)

Zur Magerung wurde Schamott (1), Quarz (2), Muschelsand (3), Muskovit (4), Kalk (5), Marmor (6), Stroh (7), Flusssand (8), Keramikgrus (9) und Kalksandstein (10) sowie eine Mischung aus Quarz und Kalk (2:5) verwendet (Abb. 36).

Acht Zylinder (CT03071) wurden in einem einzigen CT-Durchgang zusammen mit einer Referenzprobe aus reinem Aluminium (SG:  $2,7 \text{ g/cm}^3$ ) aufgenommen (Auflösung  $89,1 \mu\text{m}$ ). Im CT-Schnitt sowie in der dreidimensionalen Auswertung lassen sich die unterschiedlichen Magerungsarten gut differenzieren (Abb. 37). Anschließend wurden aus jedem Zylinder je vier CT-Schnitte extrahiert und mittels eines Programms zur Bildanalyse (ImageTool Version 3.00) hinsichtlich morphologischer Strukturen und Dichtewariablen ausgewertet und über ein Clustering-Programm in Gruppen unterteilt<sup>103</sup>. Die dadurch definierten Gruppen korrespondierten mit wenigen Ausreißern, bedingt durch die am Rand auftretenden Strahlaufhärtungen, sehr gut mit den Ausgangsprodukten.

tors ein Mittelwert integrierter Röntgenquanten errechnet. Alle nicht-plastischen Bestandteile, die kompakter als die Tonteilchen sind, wie z. B. Quarzkörner, erscheinen im CT-Bild als hellere Punkte im Vergleich zur umgebenden Keramikmatrix; ihre signifikante Helligkeitsstufe gibt Hinweise auf die spezifische Dichte des durchstrahlten Partikels.

CT-Schnitte sind kein Ersatz für mineralogisch-petrografische Studien; doch es war überlegenswert, ob die einfach herzustellenden CT-Schnitte für eine in der archäologischen Keramikforschung bereits mit viel Erfolg angewandte, optische Scherbentypklassifikation einzusetzen sind. Bei dieser Methode geht es primär nicht um den Nachweis der Provenienz jedes einzelnen Stückes, sondern um eine möglichst klare und standardisierte Ansprache des Scherbentyps eines Keramikobjektes<sup>102</sup>. Dabei werden die Matrix und die Partikel an einer frischen Bruchfläche nach Anteil, Form, Größe etc. mit nicht mineralogisch-petrografischen Bezeichnungen nach Vergleichs- und Schätzbildern beschrieben.

Um dies zu überprüfen, vor allem um auch tatsächliche Eigenschaften zu den einzelnen Bestandteilen des Scherbens zu erhalten, wurden keramische Testzylinder (Dm 22,5 mm; H 14,5–15,5 mm) mit unterschiedlichen Magerungsarten in zwei verschiedenen Magerungsgrößen (fein: 0,1–0,2 mm; grob: 0,2–0,5 mm) unter Verwendung eines industriellen Tones aus Westerwälder Tonen und Magnesiumsili-

<sup>102</sup> Den besten Überblick über die Methode liefert V. Gassner, Materielle Kultur und kulturelle Identität in Elea in spätarchaischer-frühklassischer Zeit. Untersuchungen zur Gefäß- und Baukeramik aus der Unterstadt, Velia-Studien 2 (Wien 2003) 23–34; vgl. die immer noch grundlegende Arbeit G. Schneider – A. Burmester – C. Goedicke – H. W. Hennische – B. Kleinmann – H. Knoll – M. Maggetti – R. Rottländer, Naturwissenschaftliche Kriterien und Verfahren zur Beschreibung von Keramik, *ActaPraehistA* 21, 1989, 7–39; allgemein C. Orton – P. Tyers – A. Vince, *Pottery in Archaeology*, Cambridge Manuals in Archaeology 6 (Cambridge 2001) 132–140. 231–242.

<sup>103</sup> Karl et al., Insights. Zur Verwendung von ImageTool vgl. H. Herold, The „Polished Yellow“ ceramics of the Carolingian period (9<sup>th</sup> century AD): samples from Zalavár, South-West Hungary, in: S. Y. Waksman (Hrsg.), *Archaeometric and Archaeological Approaches to Ceramics*, Papers presented at EMAC '05, 8<sup>th</sup> European Meeting on Ancient Ceramics, Lyon 2005, BARIntSer 1691 (Oxford 2007) 137–144; bes. 140.

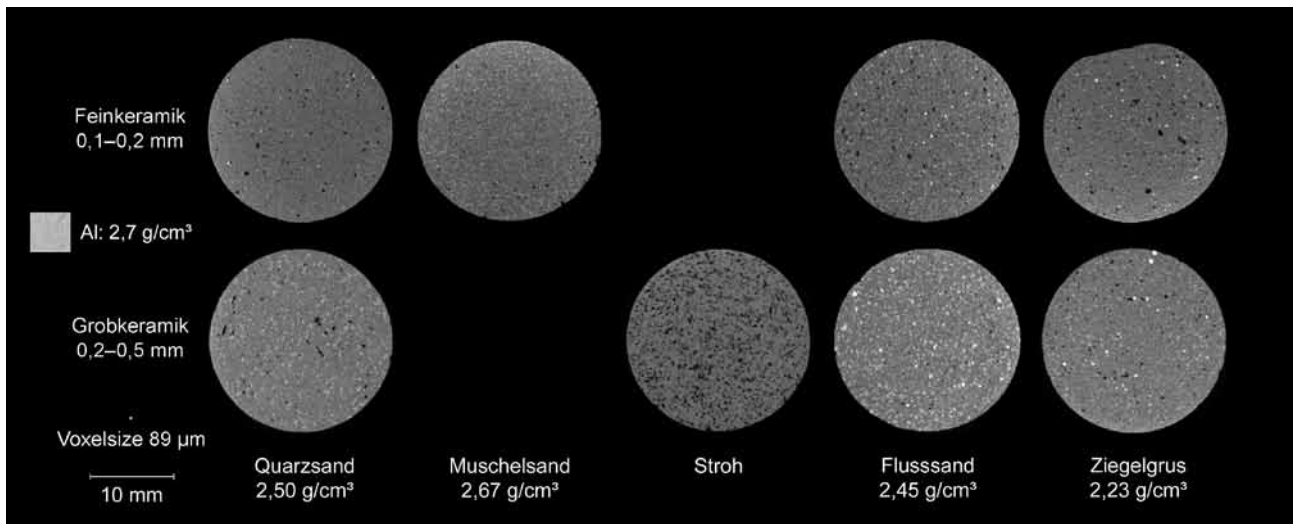


Abb. 37: CT-Schnittbilder durch acht unterschiedlich gemagerte Keramikzylinder (CT03071) mit einer beigelegten Referenzprobe aus reinem Aluminium; VG Studio MAX (Visualisierung S. Karl)

Im Vergleich zu einem Dünnschliff zeigt der CT-Schnitt trotz der wesentlich geringeren Auflösung ein gewisses Potential als archäometrische Methode in der Keramikforschung (Abb. 38)<sup>104</sup>. Der große Vorteil dabei ist, dass keine Materialprobe dem Objekt entnommen werden muss. Weiters gelingt es unterschiedliche Zusammensetzungen der Keramik innerhalb eines Gefäßes zu detektieren, die auf die Verwendung unterschiedlicher Töpfertone zurückzuführen sind. Im Vergleich zu allen anderen naturwissenschaftlichen Methoden, wie den chemischen und mineralogischen Beprobungen, ist eine CT nicht auf eine kleine Probenmenge beschränkt, sondern ermöglicht erstmalig die Analyse des gesamten Gefäßes im Mikrometerbereich.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG

Das Material Keramik erweist sich aufgrund seiner geringen Dichte und seiner Inhomogenität als geradezu ideal für radiologische Analysen. Wegen dieser Eigenschaften sind bei CT-Aufnahmen relativ geringe Intensitäten der Röntgenstrahlung erforderlich, sodass sich dadurch wie auch durch die Benutzung einer Mikrofokus-Anlage wie der v|tome|x C 240, die mit einer hohen Aufnahmegeschwindigkeit ausgestattet ist, die Belastungsdauer drastisch verkürzt. Alle diese Faktoren schlagen sich positiv auf eine sehr niedrige Strahlenexposition für die antiken Keramikgefäße nieder.

Durch die volumetrische Erfassung der Stücke können mit herkömmlichen Programmen Oberflächenmodelle generiert werden, die es erlauben, die Objekte von allen Seiten virtuell und somit berührungsfrei zu betrachten sowie in der Folge auszuwerten. In Zukunft wird die Kombination der CT-Daten mit der bereits in der Do-

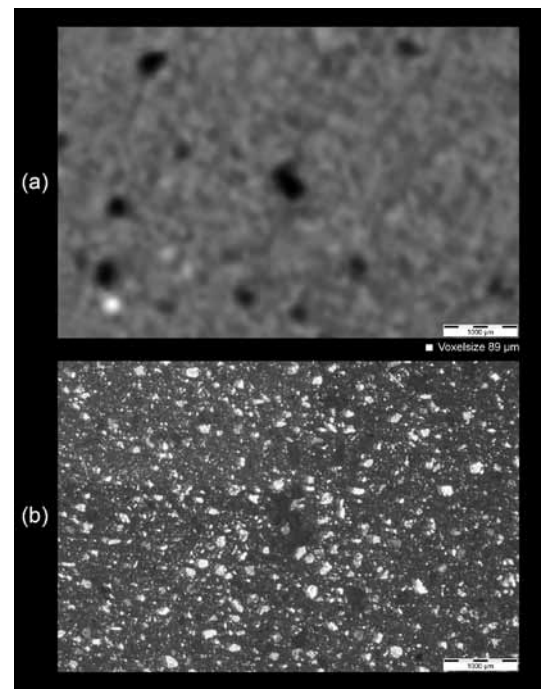


Abb. 38: Mit Quarz fein gemagerte Keramikzylinder CT03071-1 (Zylinder Nr. 2), Gegenüberstellung eines CT-Schnittes (a) und eines Dünnschliffes im Durchlicht (b) aus ungefähr demselben Bereich; VG Studio MAX und Fotomikrografie (Visualisierung S. Karl; Foto TU Graz, I. Egartner)

<sup>104</sup> Für die Erstellung von Dünnschliffen der Keramikzylinder ist Dietmar Klammer und Isabel Egartner vom Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Graz zu danken.

kumentation griechischer Vasen bewährten Methode der kontaktlosen 3D-Vermessung mittels strukturiertem Licht neue Visualisierungsgebiete erschließen, in denen auch die Farbinformationen der bemalten Oberflächen erfasst und so vermittelt werden können<sup>105</sup>.

Bei den CT-Untersuchungen hat sich gezeigt, dass griechische Gefäße auch von noch so standardisierter Form wesentlich individueller getöpft wurden, als es auf den ersten Anblick anmutet. Gerade beim Erstellen typologischer Reihen, wie es in der Archäologie praktiziert wird, können technologische Kenntnisse essentielle Kriterien zur Differenzierung beisteuern. Ein Großteil der technischen Herstellungsmerkmale kann nur im Inneren der Gefäße erkannt werden, wodurch der CT bzw. der Radiografie als berührungslose und nicht invasive Methode, die solche Einblicke in das Körperinnere gewährt, ein bedeutsamer Aspekt zufällt.

Die Verwendung der CT-Daten für die optische Scherbentypklassifikation eröffnet eine gänzlich neue Perspektive in der musealen Keramikforschung, die hauptsächlich auf intakten Gefäßen basiert. Porosität und nicht-plastische Bestandteile in der Keramikmatrix lassen sich mit speziellen Analyseprogrammen für vergleichende Studien hinreichend gut aus den CT-Daten extrahieren. Wieweit eine solche Strukturanalyse von Keramiken in Zukunft effektiver wird – vor allem im dreidimensionalen Bereich –, hängt damit zusammen, ob spezielle Programme zur Segmentierung entwickelt werden. Auf diesem Sektor wird sich in nächster Zukunft jedoch einiges verbessern, da 3D-Analysen in der Industrie, sog. Defektdetektionen, für die Qualitätssicherung von immanenter Bedeutung sind und durch Forschungsprogramme stark gefördert werden.

Das Grazer CT-Projekt lässt erahnen, dass die aus CT-Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse den Informationsgehalt des *Corpus Vasorum Antiquorum* zukünftig bei systematischer Anwendung erheblich erweitern können. „Unter der Voraussetzung, daß man unter den CVA-Publikationen vor allen Dingen die Bereitstellung von Forschungsmaterial versteht, wiegt besonders das Fehlen dokumentarischer Informationen schwer.“<sup>106</sup> Der Grundsatz einer CVA-Publikation ist, eine möglichst umfassende Dokumentation der darin vorgestellten Gefäße vorzulegen; computertomografische Untersuchungen liefern hinsichtlich dieser Zielsetzung schon heute einen gewichtigen Beitrag.

<sup>105</sup> Beispielhaft D. Pitzalis – P. Cignoni – M. Menu – G. Aitken, 3D enhanced model from multiple data sources for the analysis of the Cylinder seal of Ibni-Sharrum, in: M. Ashley – S. Hermon – A. Proenca – K. Rodriguez-Echavarría (Hrsg.), VAST 2008: The 9<sup>th</sup> International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, Braga, Portugal, December 2–5, 2008 (Aire-la-Ville 2008) 79–84.

<sup>106</sup> M. Schulz, Das CVA als Informationsquelle – ein Erfahrungsbericht, in: M. Bentz (Hrsg.), Vasenforschung und *Corpus Vasorum Antiquorum* – Standortbestimmung und Perspektiven, CVA Deutschland Beih. 1 (München 2002) 19–21; bes. 20.