

**Die Computertomographie
als Untersuchungs- und Dokumentationsmethode
zur Bearbeitung frühmittelalterlicher Fundkomplexe**

Dissertation

der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart
zur Erlangung des Grades

eines Doktors der Philosophie

vorgelegt von

Jörg Stelzner

geboren am 24. September 1977 in Biberach an der Riß

Tag der mündlichen Qualifikation: 10. Mai 2016

RektorIn: Petra von Olschowski

1. Betreuer: Prof. Dr. Gerhard Eggert

2. Betreuer: Prof. Dr. Christoph Krekel

Staatliche Akademie der Bildenden Künste
Stuttgart

In gedruckter Form erscheint diese Arbeit in der Reihe 'Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden Württemberg' des Landesamtes für Denkmalpflege Baden-Württemberg.

Danksagung

An erster Stelle danke ich Herrn Prof. Dr. Gerhard Eggert und Herrn Prof. Dr. Christoph Krekel (Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart) für die Betreuung und Begutachtung dieser Arbeit.

Für die Gelegenheit, dieses Thema zu bearbeiten, möchte ich mich bei den Antragstellern des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projektes Lauchheim Herrn Prof. Dr. Sebastian Brather (Universität Freiburg) und Herrn Prof. Dr. Dirk L. Krause sowie dem Projektkoordinator Herrn Dr. Jonathan Scheschkewitz (beide Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart) bedanken. Mein besonderer Dank gilt den Projektmitarbeitern Herrn Dr. Florian Gauß, Herrn Dr. Benjamin Höke und Frau Christina Peek M.A. für die gewinnbringende Zusammenarbeit und den fachlichen Austausch. Zudem bedanke ich mich bei allen Projektbeteiligten und Angestellten des Landesamtes für Denkmalpflege Baden-Württemberg, die mir mit Rat und Unterstützung bei dieser Arbeit geholfen haben. Insbesondere danke ich Herrn Dipl.-Forstwirt Sebastian Million für die holzanatomische und dendrochronologische Analyse, Herrn Dr. Marcus Meyer für die Bestimmung der Münzen, Frau Dr. Elisabeth Stephan für die zoologische Bestimmung, Herrn David Bibby B.A. für seine Unterstützung die Datenbank betreffend, Frau Dipl.-Restauratorin Vera Dröber und Frau Dipl.-Restauratorin Mareike Mehlis für die Restaurierung ausgewählter Funde sowie Frau Yvonne Mühleis für das Erstellen von Fundphotographien.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Philipp Schütz (Eidgenössische Materialprüfungsanstalt, Hochschule Luzern) für die gemeinsame Arbeit bei der Untersuchung der Spathen sowie den Rat und die Unterstützung bei Fragen zur Computertomographie. Zudem gilt mein Dank Dr. Burkhard Schillinger (Technische Universität München) für die Zusammenarbeit und die Messungen an der Forschungs-Neutronenquelle Heinz-Meier-Leibnitz (FRM II), Herrn Dr. Daniel Berger und Herrn Dr. Roland Schwab (Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie) für Ihre Beurteilung der Metallgefüge von Hochzinnbronzen und den Rat bei metallographischen Fragestellungen, Herrn Dr. Stefan Mäder (Galerie Fischer Auktionen) für seinen Rat die Schweißmusterverzierung der Spathen betreffend, Frau Dr. Daniela Handl und Herrn Henry Weber B.A. (Volume Graphics) für die Unterstützung bei der Bearbeitung der computertomographischen Daten und Frau Anastasia Bayer B.Sc., Frau Nefa Lugonja B.Sc. (Forschungsinstitut für Edelmetalle und Metallchemie), Herrn Raouf Jemmali M.A. (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) sowie Herrn Dipl.-Ing. Bernd Rathgeb und Herrn Dipl.-Ing. Tobias Rapp (Zeiss) für die Durchführung der CT-Messungen.

Zudem danke ich Jochen Wobser M.A., Stefan Mayr M.A. und Tobias Heyel sowie allen anderen, die Interesse an meiner Arbeit hatten.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, insbesondere meiner Frau Dipl.-Restauratorin Ingrid Stelzner, für ihre jahrelange Unterstützung.

Inhalt

1 Einleitung	7
2 Grundlagen der Computertomographie	10
2.1 Geschichte	10
2.2 Anwendung in der Archäologie	10
2.3 Die Computertomographie mit Röntgenstrahlung und Neutronen	12
2.3.1 Funktionsprinzip	12
2.3.2 Strahlungsquellen	13
2.3.3 Wechselwirkung mit Materie	14
2.3.4 Detektion	16
2.3.5 Rekonstruktion	17
2.4 Qualität und Auswertbarkeit	18
2.4.1 Geometrische Auflösung	19
2.4.2 Kontrastauflösung	23
2.4.3 Artefakte	24
2.5 Visualisierung	27
3 Material und Methodik	29
3.1 Eingesetzte computertomographische Methoden und Anlagen	29
3.2 Computertomographie der Blockbergungen	30
3.2.1 Mikro-Röntgencomputertomographie	30
3.2.2 Neutronencomputertomographie	33
3.3 Computertomographie der Einzelfunde	35
3.3.1 Mikro-Röntgencomputertomographie	35
3.3.2 Submikro-Röntgencomputertomographie	37
3.3.3 Neutronencomputertomographie	37
3.4 Bearbeitung der Computertomographie-Daten	39
3.4.1 Datenimport und Visualisierung	39
3.4.2 Analyse und Bearbeitung der Daten	42
3.4.3 Datensicherung	42

4 Untersuchung und Dokumentation der Blockbergungen	43
4.1 Objektansprache	43
4.1.1 Metallfunde	43
4.1.2 Funde aus silikatischen Materialien und Mineralien.....	53
4.1.3 Funde aus Materialien mit anorganischen und organischen Bestandteilen ..	58
4.1.4 Funde aus organischen Materialien	64
4.1.5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	68
4.2 Stratigraphie	70
4.2.1 Lage und Ausrichtung der Objekte	70
4.2.2 Mikrostratigraphie organischer Schichten.....	72
4.2.3 Stratigraphie im Befund.....	74
4.3 Dokumentation	78
4.3.1 Dokumentationsweise der Blockbergungen aus Lauchheim.....	78
4.3.2 Möglichkeiten moderner Grabungstechnik	80
5 Untersuchung und Dokumentation der Spathen	80
5.1 Stand der Forschung	81
5.1.1 Analyse frühmittelalterlicher Spathaklingen.....	81
5.1.2 Computertomographie frühmittelalterlicher Spathen.....	82
5.2 Untersuchung der Spathbestandteile.....	84
5.2.1 Spathagefäß (Griff)	84
5.2.2 Spathascheide	86
5.2.3 Spathaklinge	89
5.3 Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse.....	97
5.4 Dokumentation	102
5.5 Klingenaufbau und Schweißmuster der Spathen aus Lauchheim	102
5.5.1 Klingenaufbau	103
5.5.2 Schweißmuster mit tordierten Kompositstäben	107
5.5.3 Schweißmuster mit wellenförmigen untordierten Kompositstäben.....	107
5.5.4 Schweißmuster mit quer verlaufenden Kompositstäben	109
5.5.5 Einlagen im Schweißmuster.....	110
5.6 Zusammenfassung und Ausblick.....	111

6 Weitere Untersuchungen ausgewählter Metallfunde	112
6.1 Objektansprache stark korrodierter Funde.....	112
6.2 Objektaufbau komplexer Funde.....	114
6.3 Oberflächendetails	118
6.3.1 Oberflächenveredelungen.....	118
6.3.2 Münzen	121
6.3.3 Runen	121
6.4 Kupferlegierungen	123
6.4.1 Messingtauschierungen	123
6.4.2 Hochlegierte Zinnbronzen	124
6.4.3 Kupferlegierungen mit hohem Bleianteil	134
6.5 Zusammenfassung.....	136
7 Holzanatomische und dendrochronologische Analysen.....	137
7.1 Stand der Forschung.....	137
7.2 Untersuchung der Hölzer.....	138
7.3 Ergebnisse der Holzanalysen	141
7.3.1 Holzreste in Blockbergungen	141
7.3.2 Holzreste eines Spathagefäßes	144
7.4 Diskussion der Ergebnisse	147
7.5 Zusammenfassung.....	148
8 Textiltechnologische Analysen	149
8.1 Textilien in Blockbergungen.....	149
8.2 Textilien an Einzelobjekten.....	151
8.3 Goldgewebe	153
9 Schlussbetrachtung	155
10 Literatur.....	160

11 Anhang	181
A 11.1 Angaben zur Methodik und zu den Untersuchungsgegenständen.....	181
A 11.1.1 Angewendete Anlagen.....	181
A 11.1.2 Übersicht über die untersuchten Blockbergungen.....	182
A 11.1.3 Übersicht über die untersuchten Einzelobjekte	188
A 11.2 Dokumentationsbeispiele	192
A 11.2.1 Blockbergung Grab 799 (Fundbuch Nr. 886, Befund Nr. 908).....	192
A 11.2.2 Blockbergung Grab 821 (Fundbuch Nr. 921, Befund Nr. 906).....	197
A 11.2.3 Spatha Grab 801 (Fundbuch Nr. 887, Befund Nr. 915)	200
A 11.2.4 Schnalle Grab 221/235 (Fundbuch Nr. 270, Befund Nr. 212)	203
A 11.3 Übersicht über die Spathen mit den Merkmalen des Klingenaufbaus	204

1 Einleitung

Die archäologische Denkmalpflege steht angesichts eines stetig zunehmenden Fundaufkommens durch Rettungsgrabungen, verursacht durch Infrastrukturprojekte sowie Neubau- und Gewerbegebiete, vor der Schwierigkeit einer zeitnahen Auswertung und wissenschaftlichen Vorlage des Fundmaterials. Ganz besonders trifft dies aufgrund der enormen Anzahl an Funden auf frühmittelalterliche Gräberfelder zu. Deren Bearbeitung ist insbesondere für die Restaurierung wegen fehlender finanzieller und personeller Mittel nicht zu bewältigen. Dies hat zur Folge, dass die Zeitspanne zwischen Ausgrabung und Auswertung kaum mehr zu vertreten ist. Alleine in Baden-Württemberg lagern in den Magazinen Dutzende Gräberfelder, die bisher nicht bearbeitet werden konnten. Hinzu kommt, dass die Funde aufgrund der modernen Ausgrabungsweise, die zusätzliche Informationen wie organische Bestandteile und komplexe Befundsituationen zu bewahren versucht, zunehmend in Blockbergungen geborgen werden. Dies hat einen erheblichen Zeitaufwand für die Freilegung und Restaurierung in den Werkstätten zur Folge (Krause 2009; Gauß et al. 2010; Scheschkewitz 2013).

Gerade die Aufarbeitung der Blockbergungen stellt die archäologische Restaurierung vor besondere Herausforderungen, denn die übliche Freilegung von Blockbergungen unter dem Mikroskop sowie die Dokumentation dieser Fundkomplexe in Zeichnungen, Photographien und Text sind sehr zeitaufwendig. Die konventionelle zweidimensionale Radiographie beschränkt sich zumeist auf die enthaltenen Metallobjekte und liefert nur begrenzte Informationen zur Lage und Stratigraphie der Objekte. In der Archäologie kommen außerdem zunehmend Fragestellungen hinzu, die mit einer konventionellen Restaurierung nicht zu beantworten sind und weiterführende Untersuchungen erforderlich machen (Brather 2007; 2013; Mäder 2009). Eine wissenschaftliche Fundvorlage wird angesichts dieser Situation immer weiter verzögert oder sogar unmöglich.

Erschwerend wirken sich die durch die Ausgrabung veränderten Umgebungsbedingungen auf die Funde aus. So führen Sauerstoffzutritt und Austrocknen der Objekte zur Korrosion von Metallfunden und zur Zersetzung von organischen Materialien durch Mikroorganismen. In Restaurierungswerkstätten besteht die Strategie, dies durch Aufbewahrung in Gefriermagazinen zu unterbinden. Die Kapazitäten sind jedoch meist begrenzt – und ohnehin wird bei einer jahrelangen Aufbewahrung beispielsweise die Korrosion der Eisenfunde auch in gefrorenem Zustand auf Dauer nicht verhindert (Kuhn/Eggert 2011). Insgesamt führt diese Situation zur Schädigung des Fundmaterials und hat einen erheblichen Informationsverlust zur Folge. Weitere Ausgrabungen sind nur schwer zu rechtfertigen, wenn die geborgenen Kulturgüter von Seiten der Restaurierung in der Denkmalpflege weder konservatorisch bewahrt noch für eine wissenschaftliche Auswertung aufgearbeitet werden können.

Eine Möglichkeit, die Aufarbeitung von archäologischen Fundkomplexen zu beschleunigen und gleichzeitig zusätzliche Informationen über die enthaltenen Objekte zu gewinnen, bietet der Einsatz der Computertomographie (CT). Sie erlaubt im Gegensatz zur herkömmlichen Radiographie ein zu

untersuchendes Objekt im Gesamten dreidimensional zu analysieren. Die CT wurde bereits für unterschiedliche restauratorische und archäologische Fragestellungen erfolgreich eingesetzt (Casali 2006; Morigi et al. 2010; Payne 2012) und bietet die Möglichkeit, Objekte in ihrem aktuellen Zustand zu dokumentieren und diese Informationen der Wissenschaft zur Verfügung zu stellen. Im Fall von Blockbergungen wurde die Röntgencomputertomographie (RCT) bisher vor allem angewendet, um Informationen für eine gezielte Freilegung und die Stabilisierung von fragilen Objekten in den Fundkomplexen zu erhalten (Jansen et al. 2006; Re et al. 2015). Ob sich mit dieser Methode die Möglichkeit bietet, die konventionelle Vorgehensweise der Freilegung, Zustandsanalyse und Restaurierung zu ersetzen und somit eine beschleunigte Auswertung der Objekte zu ermöglichen, gilt es zu überprüfen. Karl et al. (2013: 77) geben hier die euphorische Haltung in der Archäologie und Restaurierung gegenüber der Methode und den Mangel an kritischen Artikeln zu bedenken. Vor diesem Hintergrund will die vorliegende Arbeit feststellen, ob eine Dokumentation von Blockbergungen für eine Auswertung und wissenschaftliche Publikation der enthaltenen Objekte und der organischen Reste in ausreichender Qualität umsetzbar ist – und ob dies auch bei einer großen Anzahl von Funden anwendbar und praktikabel ist. Zudem gilt es zu klären, welche zusätzlichen Informationen sich gegenüber der konventionellen Vorgehensweise gewinnen lassen. Die Notwendigkeit der Konservierung ist hiervon nicht betroffen und bleibt weiterhin bestehen.

Untersuchungsgegenstand zur Beantwortung dieser Fragestellungen ist das frühmittelalterliche Gräberfeld Lauchheim „Wasserfurche“ im Ostalbkreis, das aufgrund von Baumaßnahmen im Jahr 1986 entdeckt und bis 1996 unter Leitung von Dr. Ingo Stork fast vollständig ausgegraben wurde. Es ist mit über 1300 Grabbefunden das bisher größte dokumentierte frühmittelalterliche Gräberfeld Südwestdeutschlands (Stork 1995; 1997; 2002; Gauß 2013). An die 30.000 Fundgegenstände wurden geborgen und seit ihrer Auffindung in einem Gefriermagazin bei -20 °C gelagert. Das Gräberfeld Lauchheim „Wasserfurche“ stellt somit ein Paradebeispiel für kaum zu bewältigende Fundmengen in der Denkmalpflege dar. Bis zu seiner Aufarbeitung verging ein Zeitraum von annähernd 30 Jahren, in dem nur ausgewählte Objekte restauriert werden konnten.¹

Ein großer Teil der aufzuarbeitenden Objekte wurde als Fundkomplexe in ihrem originalen Befundzusammenhang geborgen, wobei die Funde mit der umgebenden Erde in Frischhaltefolie und Gipsbinden gesichert wurden (Cronyn 1990: 46 f.; Biel/Klonk 1998). In vielen Fällen war dies die einzige Möglichkeit, die Objekte ohne Beschädigung und Informationsverlust zu bergen, vor allem wenn diese in einem schlechten Zustand waren oder es sich um eine komplizierte Fundsituation mit organischen Resten handelte. Es handelt sich insgesamt um 305 Blockbergungen, die es erstmals erlauben, die CT systematisch zur Ansprache des Fundmaterials einzusetzen und an einem weiten

¹ Die Aufarbeitung des Gräberfeldes Lauchheim „Wasserfurche“ erfolgte in dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekt: *Lauchheim. Dokumentation, Auswertung und Publikation der Befunde und Funde des bedeutendsten frühmittelalterlichen Gräberfeldes Südwestdeutschlands sowie der zugehörigen Siedlung*. Ziel des Projekts war eine beschleunigte wissenschaftliche Vorlage des Gräberfeldes (Gauß et al. 2010).

Spektrum von Objekten und Materialien als Dokumentations- und Untersuchungsmethode umfangreich zu überprüfen.

Im ersten Teil der vorliegenden Arbeit soll auf die Grundlagen geeigneter Methoden der CT mit Röntgenstrahlung und Neutronen eingegangen werden. Hierbei soll verdeutlicht werden, welche Faktoren Einfluss auf die Qualität und Auswertbarkeit der CT-Daten nehmen. Offen ist bislang, ob anhand der CT eine umfangreiche Dokumentation aller möglichen Funde in Blockbergungen in ausreichender Qualität umsetzbar ist.

Im zweiten Teil der Arbeit soll auf die technischen Voraussetzungen eingegangen werden, etwa CT-Systeme sowie die geeignete Software für eine Bearbeitung von Blockbergungen und für die Klärung weiterführender Fragestellungen. An vergleichenden Beispielen werden die hier angewendeten Anlagen der Mikro-Röntgencomputertomographie (μ -RCT), Submikro-Röntgencomputertomographie (Sub- μ -RCT) und Neutronencomputertomographie (NCT) vorgestellt und ihre Eignung für unterschiedliche Fragestellungen diskutiert.

Die zentralen Anforderungen an die Methode, die Visualisierung der Funde und die Materialbestimmung, sind Inhalt des dritten Teils. Es soll geklärt werden, ob die vorliegenden Materialien identifiziert, in ausreichender Qualität visualisiert und somit alle relevanten formalen Objektdetails für die archäologische Bestimmung der Funde in Blockbergungen gewonnen werden können. Außerdem wird untersucht, ob anhand der CT-Daten eine stratigraphische Auswertung der Blockbergungen durchführbar ist und ob eine virtuelle Rekonstruktion von Befundzusammenhängen und fragmentierten Objekten praktikabel und zeitlich umsetzbar ist. Die Ergebnisse werden überprüft, indem einzelne Blockbergungen gezielt geöffnet und Objekte für weitere Analysen entnommen werden. Um die Nachvollziehbarkeit der Untersuchungen zu gewährleisten, werden die einzelnen Arbeitsschritte bis zur Umsetzung einer einheitlichen Dokumentation dargestellt und mögliche Fehlerquellen wie Messartefakte diskutiert.

Darüber hinaus soll in den folgenden Kapiteln geklärt werden, inwieweit die CT für weiterführende Fragestellungen in Bezug auf Herstellungstechnik, Materialeigenschaften oder Datierung genutzt werden kann. Die Schwerpunkte bilden hierbei die Untersuchungen der insgesamt 105 Spathen und weiterer Metallobjekte, holzanatomische und dendrochronologische Analysen sowie Textilanalysen.

Die Auswertung der bislang umfangreichsten Studie zur Anwendung der CT in der Archäologie erlaubt eine kritische Betrachtungsweise der Vor- und Nachteile der Methode, die aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen und möglichen Fehlerquellen bzw. Fehlinterpretationen der gewonnenen Daten abschließend vorgenommen wird.

2 Grundlagen der Computertomographie

2.1 Geschichte

Die CT basiert auf der Entdeckung, dass sich die Eigenschaften der verwendeten Strahlung nach dem Durchdringen eines Objekts verändern. Wilhelm Conrad Röntgen schaffte mit der von ihm am 8. November 1895 entdeckten und nach ihm benannten Röntgenstrahlung die erste Voraussetzung für die Entwicklung dieser Technik (Röntgen 1896). Heute wird für die bildgebenden Verfahren elektromagnetische Strahlung des gesamten Spektrums eingesetzt – von Mikrowellen bis zu γ -Strahlen, außerdem Partikel wie Protonen, Elektronen und Neutronen oder auch Schallwellen. Die Wechselwirkungen der Strahlung mit dem Objekt können sehr vielseitig sein, wie zum Beispiel Schwächung, Phasenänderung oder energetische Veränderung. Nachdem die Strahlung das Objekt durchdrungen hat, werden die Veränderungen durch geeignete Detektorsysteme erfasst (Banhart 2008a: 3). Die mathematische Grundlage für die Rekonstruktion der gewonnenen Daten, die sogenannte „Radon-Transformation“, lieferte Johann Radon (1917). Mit den von Allan Cormack (1963) weitergeführten mathematischen Voraussetzungen baute Godfrey N. Hounsfield (1973) den ersten Röntgen-Computertomographen. Die zunächst medizinische RCT (Kalender 2000) wurde 1978 auch zur Untersuchung von nicht lebenden Objekten eingesetzt (Reimers et al. 1984), was den Beginn der ab Mitte der 1990er Jahre etablierten industriellen RCT darstellt.² Vor allem seitdem hohe Auflösungen im μm -Bereich durch Mikrofokus- oder sogar im sub- μm -Bereich durch Nanofokus-Röntgenröhren erzielt werden, findet die industrielle RCT eine weitere Verbreitung (Banhart 2008a: 6).

Neben der RCT stellt die CT mit Neutronen eine der wichtigsten computertomographischen Methoden dar. Die ersten Versuche zur NCT wurden von Barton (1977) publiziert. Seitdem wird die NCT aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber Wasser vor allem als Untersuchungsmethode komplementär zur RCT eingesetzt (Lehmann/Kardjilov 2008).

2.2 Anwendung in der Archäologie

Was die Untersuchung von archäologischem Kulturgut betrifft, wurde die RCT schon sehr früh eingesetzt, etwa zur Betrachtung von archäologischen Objekten (Tout et al. 1979), Mumien (Harwood-Nash 1979) oder auch Fossilien (Conroy/Vannier 1984; Wind 1984). Mit der Entwicklung der μ -RCT konnten auch sehr komplexe Objekte untersucht werden, die eine hohe Auflösung erfordern, wie beispielsweise der Mechanismus von Antikythera (Freeth et al. 2006; Ramsey 2007). Das Anwendungsspektrum der RCT in der archäologischen Forschung reicht heute von detaillierten ana-

² Im Unterschied zur medizinischen Computertomographie mit Röntgenstrahlen kann bei der industriellen Computertomographie mit einer hochenergetischeren Strahlung und größeren Strahlendosen gearbeitet werden. Dadurch werden meist höhere Auflösungen erreicht, oder es können größere Objekte untersucht werden. Zudem ist es nicht erforderlich, dass sich Röntgenquelle und Detektor um das Objekt bewegen, das Objekt wird vielmehr auf einem Drehteller bewegt.

tomischen Analysen (Reiche et al. 2011; Haneca et al. 2012) bis zu groß angelegten Materialstudien (Bill et al. 2012; Karl et al. 2013). Neben der RCT ist die NCT die wichtigste computertomographische Methode bei der Untersuchung von Kulturgut. Zur Analyse von archäologischen Objekten wurde sie erstmals von Schillinger et al. (1997) vorgestellt.

Der Einsatz der CT zur Untersuchung von Blockbergungen ist bislang weniger verbreitet. Zur Anwendung kamen hier sowohl medizinische Anlagen, um beispielsweise römische Glasgefäße (Janzen et al. 2006) und Goldgewebe (O'Connor et al. 2008) in Blockbergungen zu lokalisieren, als auch industrielle μ -RCT Anlagen zur Darstellung eines römischen Schuppenpanzers aus Bronze und Eisen (Kastner et al. 2007), eines Bronzegefäßes (Lehmann/Meier 2007), von Gürteln mit Bronzebestandteilen (Kress/Wicha 2008; Re et al. 2015) sowie Glasperlen und weiteren Metallobjekten (Berg 2010). Auch das Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg unternahm bereits erste Versuche zur Bearbeitung von Fundkomplexen mit der μ -RCT, wobei zunächst die Untersuchung von Einzelobjekten mit organischen Resten im Fokus stand (Berger/Pfeiffer-Schäller 2005; Blumer et al. 2005; Nowak-Böck et al. 2005). Die erste Dokumentation eines im Block geborgenen Taschenbefundes des Gräberfeldes Lauchheim unter Einbeziehung der μ -RCT erfolgte im Rahmen eines Seminars an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (SABK; Stelzner 2006). Sechs weitere Blockbergungen konnten innerhalb eines Methodenvergleichs anhand der μ -RCT untersucht werden (Ebinger-Rist et al. 2009; Peek et al. 2009; Stelzner et al. 2010).³

Ein entscheidender Aspekt bei der Analyse archäologischer Objekte ist die Frage, ob die gewählte Untersuchungsmethode zerstörungsfrei ist. Im Fall der CT ist hier der Einfluss der Strahlung auf die zu untersuchenden Materialien anzuführen. Die ionisierende Strahlung kann Elektronen aus den Atomhüllen freisetzen und so molekularbiologische oder biochemische Analysen etwa von organischen Stoffen oder alter DNA beeinträchtigen (Grieshaber et al. 2008; Karl et al. 2013: 88). Untersuchungen zum Einfluss der RCT auf das Kollagen in historischem Pergament konnten jedoch keine eindeutigen Veränderungen nachweisen (Patten et al. 2013). Gröning et al. (2007: 323) beschreiben die RCT als „vollkommen zerstörungsfreie“ Untersuchungsmethode für die Paläoanthropologie. Die Untersuchungen von Bertini et al. (2014a) konnten eine chemische Veränderung von Bernstein und Copal durch harte Synchrotron-Strahlung anhand der Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie (FTIR) nachweisen, während durch Röntgenstrahlung mit einer geringeren Intensität keine Veränderung detektiert werden konnte. Im Fall von Keramikobjekten ist zu beachten, dass sich die Strahlung negativ auf die Thermolumineszenz-Datierung auswirken kann (Karl et al. 2013: 88 f.). Zudem wurde eine durch Strahlung verursachte Veränderung der Farbgebung von Glas beobachtet (Bertini et al. 2014b: 259). Der Begriff „zerstörungsfrei“ ist insofern nur eingeschränkt zu verwenden, wie dies Karl et al. (2013: 90) bereits anmerken. Es ist eine Frage der

³ Der Methodenvergleich erfolgte in dem von der DFG geförderten Pilotprojekt *3D-Computertomographie, Röntgen und Freilegung frühmittelalterlicher Grabfunde* von Dezember 2007 bis August 2008.

Definition, ob nicht der Begriff „nichtinvasive Methode“ für bestimmte Anwendungen vorzuziehen ist.

Im Fall der NCT ist zudem darauf hinzuweisen, dass die Objekte durch die Neutronen radioaktiv werden. Abgesehen von Silber und Kobalt ist die erzeugte Radioaktivität für die meisten Materialien sehr kurzlebig. Objekte, etwa aus Silber, müssen hingegen zum Abklingen der Radioaktivität für einige Wochen im Reaktor verbleiben, bevor sie wieder in die Museen oder Institute zurückkehren können (Schillinger/Bücherl 2004: 37; Lehmann et al. 2005: 70). Bei der Untersuchung von Blockbergungen ist des Weiteren eine mögliche Störung der Fundsituation durch das für die Messung notwendige Aufstellen zu bedenken; außerdem das Auftauen der Funde während der Messung, falls diese ansonsten in einem Gefriermagazin gelagert werden. Sowohl die RCT als auch die NCT wurden innerhalb dieser Arbeit eingesetzt, weshalb im Folgenden auf beide Methoden eingegangen werden soll.

2.3 Die Computertomographie mit Röntgenstrahlung und Neutronen

2.3.1 Funktionsprinzip

Bei der klassischen industriellen RCT, wie sie hier eingesetzt wurde, wird das Objekt zwischen der Strahlungsquelle und dem Detektor auf einem Drehteller platziert und um eine fixe Achse gedreht (Abb. 2.1).

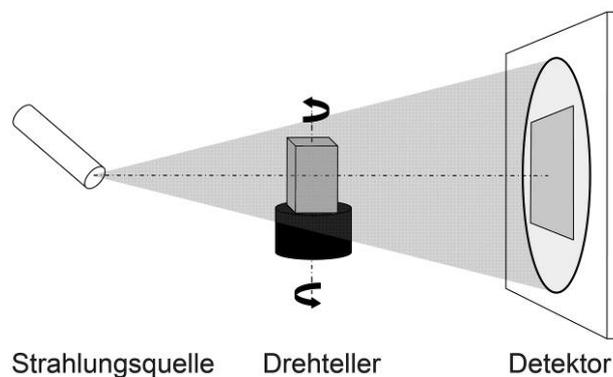


Abb. 2.1: Aufbau einer industriellen RCT-Anlage.

Für jede Winkelposition werden Projektionen aufgenommen, die anschließend zu einem Volumendatensatz rekonstruiert werden (Feldkamp et al. 1984). Dieser Aufbau entspricht auch dem der NCT, wobei hier im Gegensatz zur RCT kein Kegel- bzw. Fächerstrahl vorliegt, sondern eine parallele Strahlgeometrie (Abb. 2.2). Bei einem Kegelstrahl muss das gesamte dreidimensionale Volumen auf einmal berechnet werden, was den vollen Winkelbereich von 360° erfordert. Bei paralleler Strahlgeometrie ist hingegen ein Winkelbereich von 180° für die Rekonstruktion ausreichend (Schillinger et al. 2006: 68).

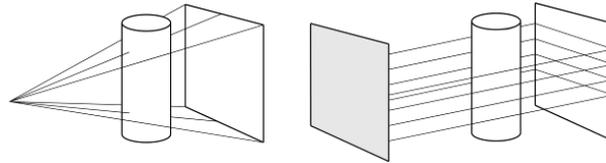


Abb. 2.2: Kegelstrahl (links) und Parallelstrahl (rechts) nach Schillinger et al. (2008: 73).

Für die Rekonstruktion werden diese (einige hundert) Projektionen zu der Verteilung der Schwächung in dem untersuchten Material kombiniert und anhand eines Rekonstruktionsalgorithmus lässt sich eine dreidimensionale Matrix der Schwächungskoeffizienten berechnen (Feldkamp et al. 1984). Der rekonstruierte Wert eines individuellen Volumenelements beschreibt somit, wie stark die Strahlung in einem bestimmten Teilbereich des durchstrahlten Objekts geschwächt wurde, wobei der Schwächungskoeffizient vor allem durch die chemische Zusammensetzung und, im Fall von Röntgenstrahlung, durch die Dichte bestimmt wird. Die gewonnene Rekonstruktion erlaubt es somit, das gesamte Objekt anhand der dreidimensionalen Verteilung seiner Schwächungskoeffizienten in einer Voxelmatrix⁴ zu untersuchen. Die gewonnenen Schwächungskoeffizienten werden genutzt, um den Grauwert zu bestimmen, mit dem das entsprechende Voxel im virtuellen Abbild dargestellt wird. Zusammen mit dem Grauwert kann anhand der Schwächung für jedes Voxel ein Transparenzwert berechnet werden, der zum Beispiel in einer dreidimensionalen Ansicht erlaubt, die umgebende Luft auszublenden (Ketcham/Carlson 2001: 393; Casali 2006: 57–62).

2.3.2 Strahlungsquellen

Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen, die durch die Wechselwirkung von geladenen Teilchen mit Materie entstehen. In der Regel werden diese durch den Aufprall energiereicher Elektronen auf ein Material (Metall), auch Target genannt, erzeugt. Das Energiespektrum der Röntgenstrahlung besteht aus dem kontinuierlichen, sogenannten Bremsstrahlungsspektrum und dem für das Target-Material charakteristischen Linienspektrum.

Für die RCT stehen unterschiedliche Röntgenquellen mit unterschiedlicher Strahlungsintensität (Photonen pro Sekunde) zur Verfügung. In erster Linie sind Röntgenröhren zu nennen, die man wiederum in Nano-, Mikro- und Makrofokus-Röntgenröhren unterteilen kann. Diese unterscheiden sich insbesondere durch ihre Brennfleckgröße sowie Stromstärke und -spannung. So erreichen Sub- μ -RCT Anlagen sehr hohe Auflösungen durch die sehr geringen Brennfleckgrößen von bis zu 500 nm, wobei Beschleunigungsspannung und Stromstärke begrenzt sind. Im Gegensatz hierzu liefern Makroröntgenröhren keine allzu hohe Auflösung, erlauben jedoch Beschleunigungsspannungen von bis zu 800 kV und Stromstärken von einigen Milliampere, wodurch große und dichte Objekte gemessen werden können (Casali 2006: 50).

⁴ Ein Voxel ist das dreidimensionale Äquivalent zu einem Pixel. Das Gitterelement ist durch seine (x,y,z)-Koordinaten bestimmt.

Weitere Strahlungsquellen für die RCT, die in dieser Arbeit keine Anwendung finden, sind zum einen Linearbeschleuniger (LINAC), in denen ein gepulster Elektronenstrahl mit sehr hoher Beschleunigungsspannung (2-15 MV) auf ein Target gelenkt wird. Dabei entsteht sehr kurzwellige, ebenfalls gepulste Bremsstrahlung, mit der auch sehr dichte und dickwandige Objekte durchstrahlt werden können. Zum anderen werden Ringbeschleuniger verwendet, in denen beschleunigte Elektronen elektromagnetische Wellen abstrahlen. Diese Synchrotron-Strahlung zeichnet sich durch eine hohe Intensität in einem breiten Frequenzbereich (Infrarot- bis Röntgenstrahlung) aus und kann für die CT genutzt werden (Casali 2006: 51; Kastner et al. 2010: 599).

Bei der Neutronenstrahlung handelt es sich um eine Partikelstrahlung, die durch unterschiedliche Methoden produziert werden kann. Für tomographische Anwendungen sind zwei Arten üblich: zum einen Nuklearreaktoren, wo durch Spaltung von Uran oder Plutonium eine Kettenreaktion in Gang gesetzt wird, die Energie und Neutronen freisetzt; zum anderen Spallationsneutronenquellen, in denen mit hoher Energie Atome mit Teilchen beschossen werden, wodurch ebenfalls Neutronen freigesetzt werden (Casali 2006: 48; Kardjilov et al. 2006: 31).

2.3.3 Wechselwirkung mit Materie

Röntgenstrahlung und Neutronen werden beim Durchdringen von Materie absorbiert und gestreut. Die sich hieraus ergebende Schwächung für parallele, monochromatische Strahlung folgt dem Lambert-Beerschen Gesetz (Casali 2006: 53):

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.1)$$

Dabei sind I_0 , I (W cm^{-2}) die Intensitäten der Ausgangsstrahlung bzw. der durch eine Materialprobe der Dicke x transmittierten Strahlung und μ (cm^{-1}) der lineare Schwächungskoeffizient des durchstrahlten Materials. Berücksichtigt man, dass ein Objekt aus unterschiedlichen Materialien besteht, muss die Gleichung (2.1) erweitert werden (Ketcham/Carlson 2001: 386):

$$I = I_0 e^{\left[\sum_i (-\mu_i x_i) \right]} \quad (2.2)$$

Jeder Index i beschreibt ein einzelnes Material mit dem Schwächungskoeffizienten μ_i über eine lineare Distanz x_i . Die Schwächung ist zudem abhängig von der Energie der Strahlung, welche bei Standardröntgenanlagen zwischen wenigen und 500 keV variieren kann. Zieht man in Betracht, dass der Schwächungskoeffizient von der Energie E der Strahlung abhängig ist, ergibt sich (Ketcham/Carlson 2001: 386):

$$I = \int I_0(E) e^{\left[\sum_i (-\mu_i(E) x_i) \right]} dE \quad (2.3)$$

Dabei ist I_0 die Intensität je Energieintervall dE der Strahlung. Für Photonen repräsentiert der lineare Schwächungskoeffizient μ (cm^{-1}) alle möglichen Absorptions- und Schwächungsreaktionen wie

Photoeffekt, Compton-Streuung oder Paarbildung, und beschreibt den Anteil der Röntgenstrahlung, der pro Einheit der Dicke eines Mediums absorbiert oder gestreut wurde. Im Allgemeinen steht dieser Wert für die Anzahl der Atome in einem Kubikzentimeter eines Materials und die Wahrscheinlichkeitsdichte (pro Länge), dass ein Photon durch eines dieser Atome absorbiert oder gestreut wird (Buzug 2008: 32). Für Neutronen wird die Schwächung durch den makroskopischen Querschnitt Σ (cm^{-1}) beschrieben, der die gesamte Zielfläche der Wechselwirkung eines gegebenen Neutronenstrahls mit einem Kubikzentimeter eines Materials darstellt (Markgraf/Matfield 1992: 26). Um die Dichte ρ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) eines Materials miteinzubeziehen, ist es üblich, μ und Σ durch die Dichte zu teilen. Das Ergebnis ist der Massenschwächungskoeffizient μ/ρ oder Σ/ρ ($\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$), und die Gleichung (2.1) wird zu (Casali 2006: 53):

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\rho x} \quad (2.4)$$

Für bildgebende Verfahren mit Neutronen werden normalerweise kalte oder thermische Neutronen mit geringen Energien von einigen meV eingesetzt. Die Anwendung von schnellen Neutronen ist weniger üblich (Lehmann et al. 2005: 69). Abbildung 2.3 zeigt die Massenschwächungskoeffizienten für Röntgenstrahlung mit einer Energie von 100 keV und thermischen Neutronen (25 meV) in Abhängigkeit von der Ordnungszahl der relevanten Elemente.

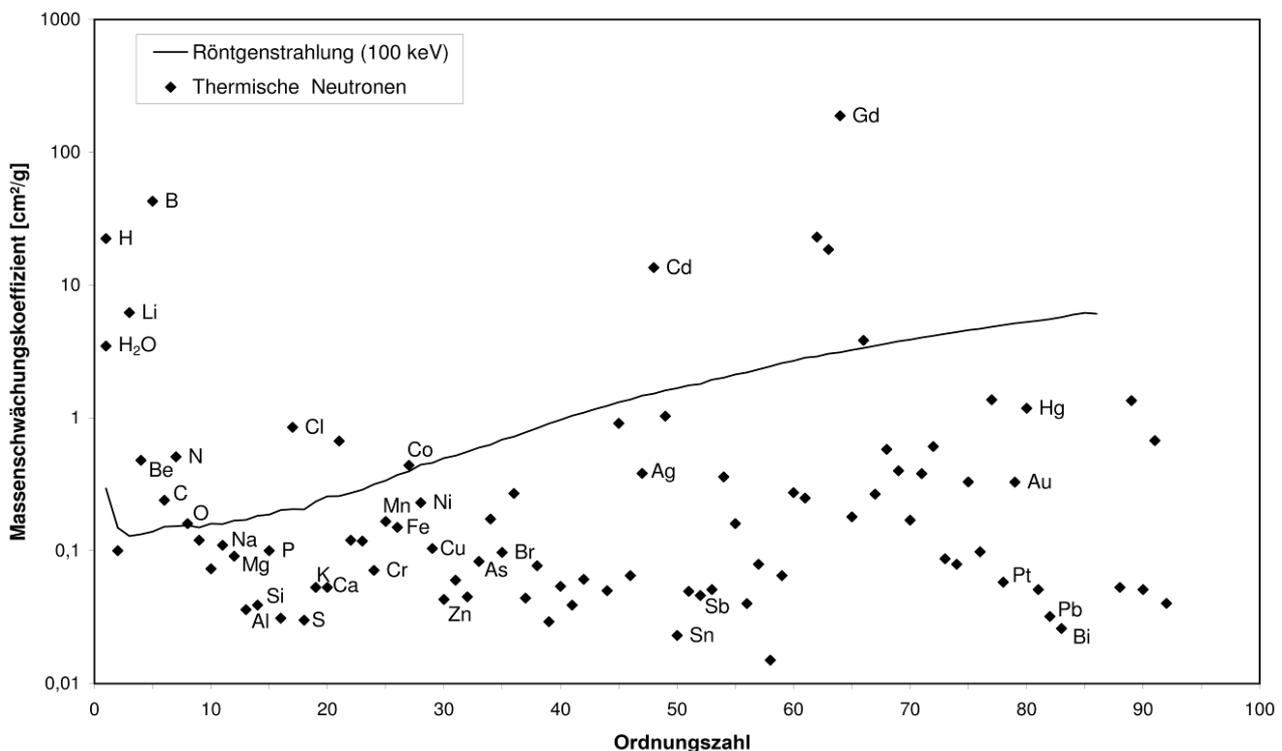


Abb. 2.3: Massenschwächungskoeffizienten für Röntgenstrahlung bei 100 keV (Hubell/Seltzer 2004) und thermische Neutronen bei 25 meV (Markgraf/Matfield 1992) entsprechend der Ordnungszahl der Elemente.

Das unterschiedliche Verhalten von thermischen Neutronen und Röntgenstrahlung ist offensichtlich. Die abweichende Schwächung der beiden Strahlungsarten kann durch die Art der stattfindenden Wechselwirkung erklärt werden. Während Neutronen mit dem Kern eines Atoms in Wechselwirkung treten, reagieren Röntgenstrahlen hauptsächlich mit den Elektronen in der Atomhülle. Demnach nimmt der Massenschwächungskoeffizient für Röntgenstrahlen mit höheren Ordnungszahlen zu, da mit der größeren Anzahl an Elektronen auch die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung zunimmt (Deschler-Erb et al. 2004: 648). Dies führt dazu, dass Röntgenstrahlung von Metallen stark absorbiert wird, während organische Materialien leicht durchdrungen werden. Im Gegensatz zu Röntgenstrahlen zeigen thermische Neutronen keine generelle Tendenz der Schwächungskoeffizienten. Die Wahrscheinlichkeit, dass Neutronen mit einem Atomkern reagieren, hängt von dem Absorptionskoeffizienten und den Wirkungsquerschnitten der Streustrahlung ab, die keine systematische Abhängigkeit von der Ordnungszahl der Elemente haben und auch für die unterschiedlichen Isotope variieren (Sears 1992; Kardjilov et al. 2006: 31). Die Schwächung von thermischen Neutronen ist oft komplementär zu den Eigenschaften von Röntgenstrahlung; leichte Elemente wie Wasserstoff oder Lithium ergeben hohe Bildkontraste durch die Schwächung der Strahlung, wohingegen schwere Elemente wie Blei oder Wismut leicht von thermischen Neutronen durchdrungen werden können (Sears 1992). Generell sind Metalle transparenter für Neutronen als für Röntgenstrahlen. Wasserhaltige organische Materialien wie etwa Leder, Holz oder Textilien ergeben einen sehr viel höheren Kontrast mit Neutronen als mit Röntgenstrahlung.

2.3.4 Detektion

Die Strahlung wird von einem Detektor erfasst und die verbleibende Intensität I wird gemessen, nachdem sie das zu untersuchende Objekt durchdrungen hat und abgeschwächt wurde. Detektoren beeinflussen die CT-Bildqualität durch ihre Größe (effektive Detektorfläche), Quantität (Pixelgröße und -abstand) und ihren dynamischen Bereich (Effizienz, das Energiespektrum und die Intensität einer Strahlungsquelle zu erfassen). Für die Detektion von Röntgenstrahlung kann eine Vielzahl an Detektoren Verwendung finden (Casali 2006: 68 f.). In der Vergangenheit und auch heute noch erfolgt die Detektion mit radiographischen Filmen, auf denen die auftreffende Röntgenstrahlung photochemische Reaktionen erzeugen, anhand derer das Projektionsbild des Objekts nach der Entwicklung als Schwärzung sichtbar gemacht werden kann (Lindegard-Andersen et al. 1988). Die gängigen Detektoren für digitale Aufnahmen können in zwei Kategorien erfasst werden: Flächendetektoren und Bildverstärker-Kamera-Kombinationen. Bei Flächendetektoren wird die Röntgenstrahlung zunächst in sichtbares Licht umgewandelt. Dies erfolgt mithilfe von Szintillationschichten, die zumeist aus Cäsiumjodid (CsJ) oder Gadoliniumoxisulfit (GOS) bestehen. Das Licht wird durch amorphe Silizium (a-Si)-Photodioden und Dünnschichttransistoren oder über CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)-Sensoren in elektrische digitale Signale umgewandelt.

Moderne CMOS-Detektoren können anhand von Materialien wie Cadmiumtellurid (CdTe) Röntgenstrahlung auch direkt konvertieren. Bildverstärker-Kamera-Kombinationen bestehen ebenfalls aus einer Szintillationsschicht, von wo aus das Licht über einen Spiegel und zumeist eine Linse auf eine optische Kamera gelenkt wird (Casali 2006: 68 f.).

Im Gegensatz zu Röntgenstrahlung können Neutronen nicht direkt über einen Szintillationsprozess erfasst werden. Notwendig hierfür ist ein zusätzliches Umwandlungsmaterial (z. B. das Lithium Isotop ${}^6\text{Li}$ oder Gadolinium), welches die Neutronen absorbiert und dadurch ionisierende Sekundärstrahlung wie Röntgen- oder α -Strahlung abgibt. Diese Sekundärstrahlung kann dann durch ein Szintillationsmaterial wie Zinksulfid (ZnS) in Licht umgewandelt und mit einem konventionellen Detektorsystem wie etwa einer optischen Kamera erfasst werden (Kardjilov et al. 2006: 32; 2011: 249).

2.3.5 Rekonstruktion

Grundlage für die Rekonstruktion von Schnittbildern (Tomogrammen) sind die Projektionen (Radiographien), die bei der Messung des Prüfstücks aus einer Vielzahl von Winkelpositionen aufgenommen werden. Der Projektionsdatensatz ist zentral für die Rekonstruktion einer kompletten 3D-Abbildung, da er die Integrale der lokalen Verteilung der Schwächungskoeffizienten μ in einem Objekt aus (idealerweise allen) unterschiedlichen Richtungen darstellt.⁵ Die Projektionen $P_\theta(t)$ können durch Linienintegrale beschrieben werden, die durch den Winkel θ und den Parameter t (Abstand vom Ursprung) eindeutig definiert sind (Kak/Slaney 1988: 49). Dieser Abstand lässt sich für jede Position (x,y) im Objekt berechnen zu:

$$t = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (2.5)$$

Die Ermittlung der Schwächung erfolgt durch die detektierte Veränderung der Strahlungsintensität, basierend auf dem Lambert-Beerschen Gesetz (2.1). Die zur Rekonstruktion verwendeten Projektionen $P_\theta(t)$ ergeben sich aus dem natürlichen Logarithmus des Verhältnisses von ursprünglicher zu geschwächter Intensität (Stock 2009: 22):

$$\ln \frac{I_0}{I} = \int_{(\theta,t)} \mu(x,y) ds = P_\theta(t) \quad (2.6)$$

Hierbei wird die Verteilung der Schwächungskoeffizienten μ an einer bestimmten Position x,y entlang eines Strahles t als zweidimensionale Funktion $f(x,y)$ angenommen. Da die Schwächungseigenschaften von der Energie der Röntgenstrahlung abhängen, ist die Berechnung mit dem Logarithmus nur eine Approximation, die allerdings in den meisten Fällen sehr gute Resultate liefert.⁶

⁵ Zur Klärung der Prinzipien wird hier nur auf die Rekonstruktion von 2D-Bildern eingegangen, zu der die 3D-Rekonstruktion analog ist.

⁶ Freundliche Mitteilung Dr. Philipp Schütz (17. November 2015).

Das Linienintegral $P_\theta(t)$ wird als die Radon-Transformation der Funktion $f(x,y)$ bezeichnet und beschreibt die Summen der Funktionswerte entlang aller Geraden in der xy -Ebene (Kak/Slaney 1988: 50):

$$P_\theta(t) = \int_{\text{Gerade}(\theta,t)} f(x,y) ds \quad (2.7)$$

Die genormten Projektionen (Dunkel-Hellfeld-korrigiert und logarithmiert) können als Sinogramme betrachtet werden, wobei diese die Gesamtheit aller Projektionen über eine Drehung (von 0° bis 360°) darstellen und jedes Sinogramm eine Schnittebene im Projektionsstapel eines definierten Winkels repräsentiert. Anhand dieser werden die Schnittbilder des Tomogramms rekonstruiert. Mathematisch betrachtet ist die Rekonstruktion der Funktion $f(x,y)$ aus den Projektionsdaten äquivalent zum Invertieren der Radon-Transformation (Kak/Slaney 1988). Für die Rückprojektion werden Filterfunktionen zur Vermeidung von Abbildungsfehlern durch fehlende Informationen (praktisch können nicht alle Winkel gemessen werden), Bildrauschen, Artefakten und anderen Bildanomalien wie der Ram-Lak-Filter (Ramachandran/Lakshminarayanan 1971) oder Shepp-Logan-Filter (Shepp/Logan 1974) eingesetzt. Praktisch bedeutet dies, dass eine explizite und rechnerisch effiziente, diskretisierte Version der inversen Radon-Transformation verwendet wird, wodurch Daten aus Parallelstrahlgeometrien wie bei der NCT rekonstruiert werden können (Haibel 2008: 144). Für die direkte Rekonstruktion in drei Dimensionen, wie dies bei Daten aus Kegelstrahlgeometrien notwendig ist, wird zumeist der Feldkamp-Davis-Kress-Algorithmus angewendet (Feldkamp et al. 1984; Hsieh et al. 2013). Neben der hier angesprochenen analytischen Rekonstruktion, welche die Rekonstruktion in einer in sich geschlossenen Gleichung löst, versucht die weniger übliche, weil rechenintensive, iterative Rekonstruktion das abschließende Ergebnis als Lösung von mehreren Gleichungen respektive als Lösung eines Optimierungsproblems, welches in einer iterativen Form angegangen wurde zu formulieren. Darüber hinaus gibt es weitere Rekonstruktionsalgorithmen, welche im Allgemeinen als Hybrid-Algorithmen zusammengefasst werden können respektive statische Optimierungskriterien verwenden (Hsieh et al. 2013).

2.4 Qualität und Auswertbarkeit

Das Messergebnis und somit die Messunsicherheit wird von einer Vielzahl von Einflussgrößen bestimmt, welche in die Kategorien CT-Gerät (Röntgenquelle, Manipulator, Detektor, Systemumgebung), Anwendung (Werkstück, Messparameter, Messanordnung), Auswertung (Rekonstruktion, Datenkorrektur, Datenauswertung) und Bedienung (Messstrategie, Erfahrung) unterteilt werden können. Die 2010 erschienene VDI/VDE-Richtlinie (VDI/VDE 2630, Blatt 1.2) widmet sich diesem Thema und spricht entsprechende Empfehlungen aus (Flisch et al. 2010: 146). Eine vergleichende Studie zur Messgenauigkeit unterschiedlicher industrieller CT-Systeme wurde von Carmignato (2012) publiziert. Die Messunsicherheit wird bei kommerziellen Anlagen üblicherweise durch eine Kalibrierung des Herstellers für verschiedene Vergrößerungsstufen bestimmt. Die für die Auflösung

und die damit verbundene Erkenn- und Auswertbarkeit von Details einer Messung entscheidenden Parameter sind die geometrische Auflösung und die Kontrastauflösung. Zudem können auftretende Artefakte das Messergebnis beeinträchtigen (Reimers/Goebbels 1983: 733; Stelzner et al. 2015).

2.4.1 Geometrische Auflösung

Die geometrische Auflösung ist eine Angabe für das Ausmaß, in dem ein abbildendes System die Form eines Objekts genau reproduziert und ist ein Maß für die Schärfe einer CT-Messung (Burststein/Bossi 1990: 3). Es gibt viele Faktoren, welche die geometrische Auflösung beeinflussen und die vereinfachend als die Systemunschärfe U_{Sys} beschrieben werden können. Diese ergibt sich aus den Unschärfen des Brennflecks U_B , des Detektors U_D und des Rekonstruktionsalgorithmus U_R (Maisl 1992: 19; Kasperl 2005: 24):

$$U_{Sys} = \sqrt{U_B^2 + U_D^2 + U_R^2} \quad (2.8)$$

Die Unschärfe des Brennflecks U_B wird im Fall der RCT bestimmt durch die bei der Kegelstrahlgeometrie bestehende Vergrößerung ($M = \text{Magnification}$) und durch die Brennfleckgröße d_B (Abb. 2.4):

$$U_B = (M - 1)d_B \quad (2.9)$$

Die Unschärfe des Detektors U_D ergibt sich aus dem Durchmesser des Detektors d_D und der Vergrößerung M :

$$U_D = \frac{d_D}{M} \quad (2.10)$$

Für die Unschärfe des Rekonstruktionsalgorithmus U_R sind der verwendete Rekonstruktionsfilter β_R und die Unschärfe des Detektors U_D maßgebend:

$$U_R = \beta_R U_D \quad (2.11)$$

Hierbei wird deutlich, dass die geometrische Auflösung einer Messung durch den Vergrößerungsfaktor M bestimmt wird, der sich aus dem Verhältnis der Abstände Strahlungsquelle-Detektor D_{SD} und Strahlungsquelle-Objekt D_{SO} ergibt (Mouze 1996: 140):

$$M = \frac{D_{SD}}{D_{SO}} \quad (2.12)$$

Mit zunehmendem Abstand zwischen Strahlungsquelle und Detektor D_{SD} erhöht sich auch die geometrische Unschärfe des Systems (Abb. 2.5). Um in hochvergrößernden Anwendungen Abbildungen mit einer geringen Unschärfe zu erreichen, ist die Brennfleckgröße d_B essentiell (Flisch et al. 2012).

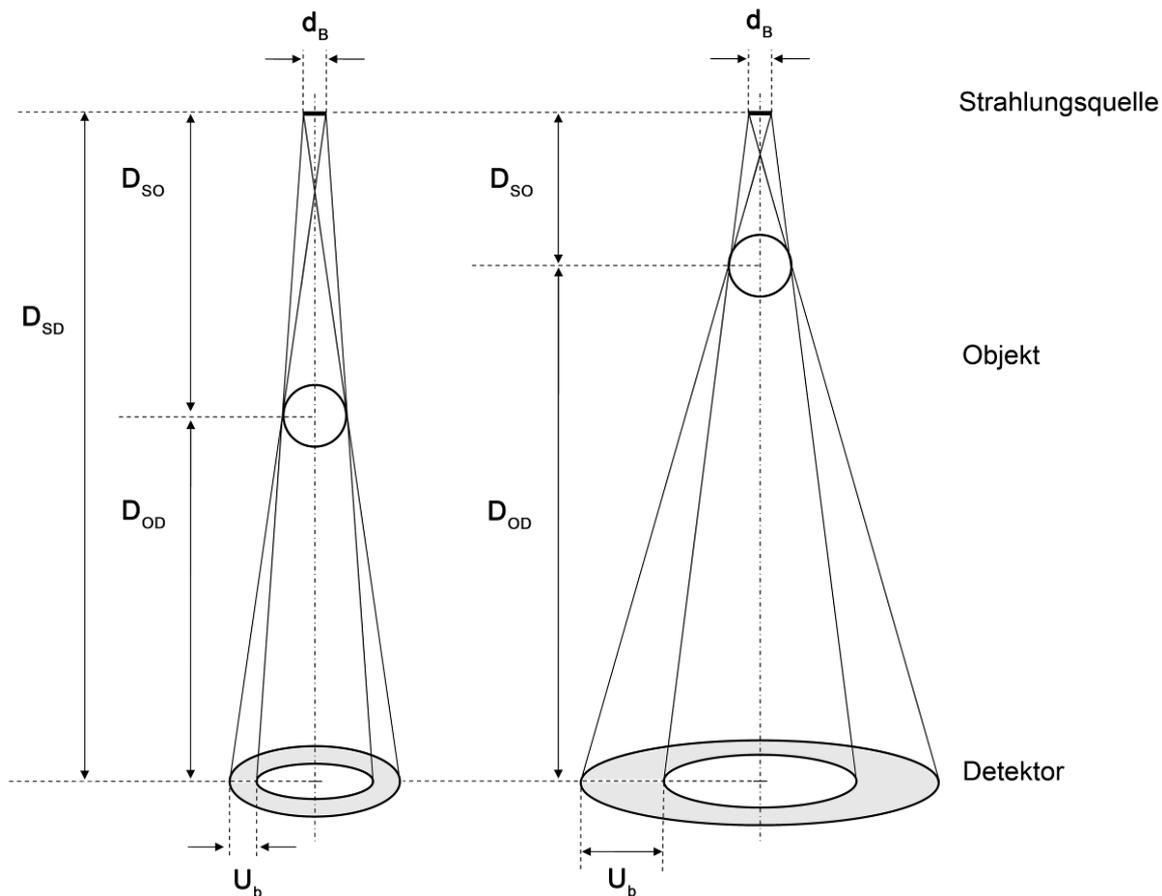


Abb. 2.4: Schematische Darstellung der Kegelstrahlgeometrie und der Abhängigkeit der Unschärfe des Brennflecks U_B von der Position des Objekts und der damit einhergehenden Vergrößerung M .

Eine gängige Angabe für die geometrische Auflösung einer Messung ist die Voxelgröße V . Diese zeigt über die Nyquist-Beziehung die Größe der Objektdetails an, die aufgelöst werden können (Hiller/Kasperl 2010: 157). Bestimmt wird die Voxelgröße V durch die Vergrößerung M , die Brennfleckgröße d_B und die Detektorauflösung ($P = \text{Pixelgröße}$) (Mouze 1996: 141):

$$V = \frac{P}{M} + \left(1 - \frac{1}{M}\right) d_B \quad (2.13)$$

Für eine möglichst hohe Vergrößerung M muss D_{SO} möglichst klein sein (Abb. 2.5). Demgegenüber reduziert eine hierdurch erhöhte D_{SD} die detektierten Photonen und erhöht damit entweder die erforderliche Zeit der Messung oder das Rauschen in den rekonstruierten Bildern (Stelzner et al. 2015). Durch das Fokussieren des Strahls kann hier jedoch der Verlust von Photonen eingedämmt werden.⁷ Die zu erreichende geometrische Auflösung ist zudem vom Durchmesser des zu untersuchenden Objekts d_o abhängig, da die möglichst klein zu wählende D_{SO} nicht den Durchmesser

⁷ Freundliche Mitteilung Dr. P. Schütz (16. Oktober 2015).

des Objekts unterschreiten kann, wenn sich das Objekt während der Messung um 360° drehen soll. Wird das gesamte Objekt erfasst, so wird die Vergrößerung M auch durch das Verhältnis Durchmesser Objekt d_o zu Durchmesser Detektor d_D vorgegeben (Bergmann et al. 2006):

$$M_{\max} = \frac{d_D}{d_o} \quad (2.14)$$

Überschreitet der Objektdurchmesser d_o den Durchmesser des Detektors d_D , kann durch eine Messkreiserweiterung, bei der der Detektor horizontal bewegt wird, das gesamte Objekt erfasst werden. Dies führt allerdings zu einer geringeren geometrischen Auflösung. Erforderlich wird eine Messkreiserweiterung, wenn die Maße von zwei Seiten des Objekts die Ausmaße des Detektors überschreiten. Betrifft dies nur eine Seite, können mehrere Messungen entlang der y-Achse angefertigt werden, wobei sich Röntgenquelle und Detektor vertikal parallel zueinander bewegen und die einzelnen Messungen anschließend mit der entsprechenden Software kombiniert werden. In speziellen Fällen, in denen eine höhere geometrische Auflösung notwendig ist, kann ein Bereich des Objekts im Detail gemessen werden. Abhängig von der Größe eines Details kann eine solche

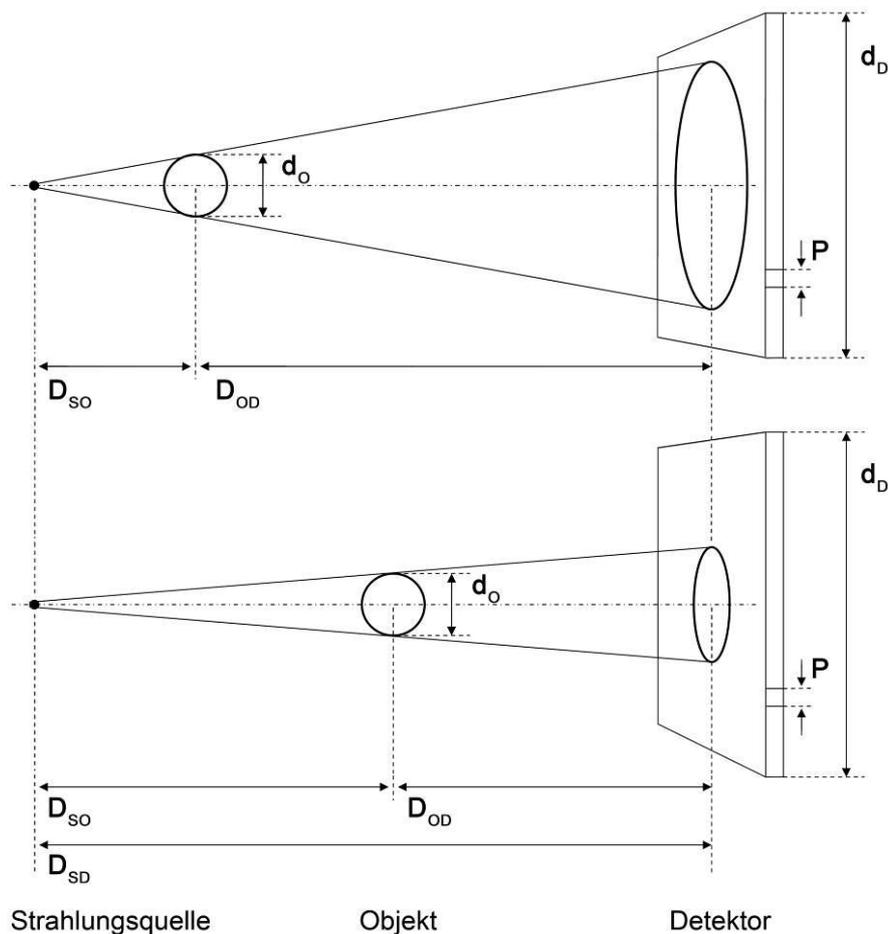


Abb. 2.5: Schematische Darstellung der Kegelstrahlgeometrie und der Abhängigkeit der Vergrößerung M von der Objektposition zwischen Strahlungsquelle und Detektor.

Region of Interest (ROI) mit der maximalen geometrischen Auflösung der verwendeten Anlage dargestellt werden (Maaß et al. 2007: 252).

Was die geometrische Auflösung betrifft, besteht zwischen der RCT und der NCT ein entscheidender Unterschied. Dieser liegt in der unterschiedlichen Strahlgeometrie, die Einfluss auf die erzielte geometrische Auflösung einer Messung hat. Im Gegensatz zu Röntgenröhren, die einen kleinen und intensiven Brennfleck auf dem Target erzeugen, muss bei der NCT mit angenäherter Parallelstrahlgeometrie gemessen werden, da eine punktuelle Neutronenquelle mit ausreichender Strahlungsintensität nicht realisierbar ist. Die Quelle bei der NCT für die Reaktorneutronen ist ein Kollimator mit einigen Zentimetern Durchmesser und einem anschließendem Flugrohr von 10 bis 15 Metern (Abb. 2.6). Entscheidend für die Bildqualität ist die Kollimation der Strahlung, die durch das Verhältnis der Distanz L von Strahlungsquelle zu Objekt zum Durchmesser D der Blende definiert ist (Schillinger et al. 2008: 73). Je größer das Verhältnis L/D , desto besser ist die Parallelität der Strahlung. Typische Werte liegen zwischen 200 und 500. Bei einem definierten Verhältnis L/D wird jeder Bereich eines Objekts auf der Detektorfläche mit dem Durchmesser d projiziert, wobei l die Distanz zwischen Objekt und Detektor ist (Kardjilov et al. 2006: 32):

$$d = \frac{l}{\left(\frac{L}{D}\right)} \quad (2.15)$$

Hierbei ist zu beachten, dass der anzustrebende minimale Abstand l durch den Durchmesser des zu untersuchenden Objekts vorgegeben ist (Kardjilov et al. 2006: 32).

Ein Nachteil der Parallelstrahlgeometrie ist die fehlende implizite Vergrößerung des Abbildes, wie sie bei der RCT durch die Kegelstrahlgeometrie entsteht (Abb. 2.2). Hierdurch bleibt die Auflösung auf die tatsächliche Detektorauflösung beschränkt (Schillinger et al. 2008: 74; Kardjilov et al. 2011: 249).

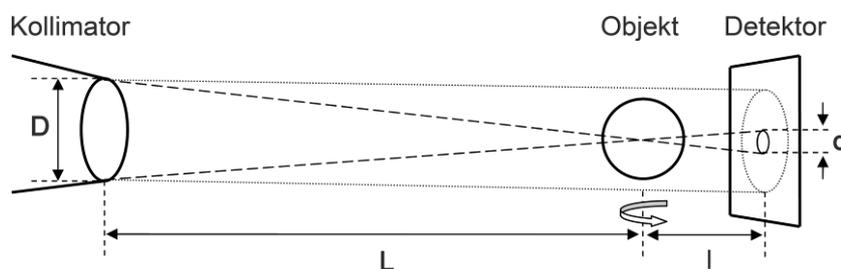


Abb. 2.6: Schematische Darstellung der Neutronenstrahlgeometrie nach Kardjilov et al. (2006: 32).

2.4.2 Kontrastauflösung

Der Kontrast zwischen Materialien ist die Voraussetzung für deren Unterscheidung. Die Kontrastauflösung definiert, wie genau Materialvariationen eines Objekts in einer CT-Messung reproduziert werden. Begrenzt wird die Kontrastauflösung durch das Rauschen in einer Abbildung, was der quantitativen Körnung im Bild entspricht (Burstein/Bossi 1990: 5). Der Kontrast k wird oft hinsichtlich des Verhältnisses der unterschiedlichen Signale von Material sig_m und Hintergrund sig_h definiert (Stock 2009: 16):

$$k = \frac{(| sig_m - sig_h |)}{sig_h} \quad (2.16)$$

Wichtige Faktoren für den Kontrast sind die Integrationszeit sowie die Energie und Intensität der verwendeten Strahlung. Je mehr Photonen detektiert werden, desto zuverlässiger ist die Darstellung der Intensitätsunterschiede und daher die Kontrastwiedergabe des Bildes. Im Fall der RCT spielt neben der Intensität vor allem das Spektrum der Röntgenstrahlung eine Rolle. So ist etwa für die Durchdringung von dichten Materialien und großen Wandstärken eine hohe Photonenenergie notwendig. Je höher die Beschleunigungsspannung ist, umso härter ist die Röntgenstrahlung. Mit härterer Röntgenstrahlung nimmt zwar die Durchdringungsfähigkeit zu, dies hat aber auch eine Verschlechterung des Kontrasts in den Projektionen zur Folge, was die Unterscheidung von Details erschwert. Demzufolge wird die Beschleunigungsspannung möglichst so gewählt, dass die Strahlung gerade noch das Objekt durchdringt (Karl et al. 2013: 82). Weitere entscheidende Faktoren für den Kontrast sind der dynamische Bereich des Detektors und das Rauschen durch Streustrahlung in den aufgenommenen Projektionen. Im Fall der RCT verschlechtert sich die Qualität der Projektionen durch die Wechselwirkung der Strahlung – insbesondere Compton-Streuung – im Objekt und den Komponenten des Computertomographen (Casali 2006: 53; Schütz et al. 2013). Bei der NCT hingegen wird ein störendes Hintergrundrauschen durch gestreute Neutronen und vor allem sekundäre γ -Strahlung verursacht, welche durch Wechselwirkung mit dem Objekt und dem Strukturmaterial der Anlage entsteht. Die aus dem Strahl gestreuten Photonen bzw. Neutronen können einzelne oder mehrere benachbarte Bildelemente des Detektors treffen, was zu einer Überlagerung der Primärstrahlung und einer systematischen Erhöhung der Grauwerte führt. Der Effekt ist inhomogen und von der Geometrie sowie vielen weiteren Parametern abhängig. Ein Maß für die Grauwerte ist das Signal-Rausch-Verhältnis (SRV), das sich aus dem Verhältnis N_p/N_s von den Detektor erreichender Primärstrahlung N_p und sekundärer Streustrahlung N_s ergibt (Casali 2006: 55; Banhart 2008b; Lehmann/Kardjilov 2008). Eine Vielzahl unterschiedlicher Maßnahmen kann das SRV verbessern: eine verlängerte Belichtungszeit, geeignete Kollimatoren, Anpassung der Objektposition, Veränderung des Anlagenaufbaus und des Detektors etc. (Lehmann et al. 2004: 229; Casali 2006: 55; Schütz et al. 2013).

2.4.3 Artefakte

Eine Vielzahl unterschiedlicher Artefakte kann das Messergebnis beeinträchtigen und verfälschen, wobei diese das Produkt unterschiedlicher Ursachen sind. Die meisten Artefakte können auf Strahl-aufhärtung und Streustrahlung, auf Ausrichtungsfehler des Objekts oder einen ungünstiger Appa-raturaufbau sowie auf unzureichende Daten oder ungeeignete Algorithmen zurückgeführt werden (Burstein/Bossi 1990: 5). Durch die Bewegung des Objekts während der Messung kann es zu Messwertverfälschungen und verschwommenen Abbildungen kommen (Abb. 2.7). Eine nicht zent-rische Ausrichtung des Objekts kann bei der anschließenden Rekonstruktion zu Fehlern führen, was unscharfe Abbildungen zur Folge hat und vor allem bei der Oberflächenbestimmung zu Mess-abweichungen führt. Eine zu geringe Abtastrate (Anzahl der Projektionen) bei der Messung kann das Messergebnis beeinträchtigen und zu sogenannten Aliasing-Artefakten führen (Stock 2009: 85–89).

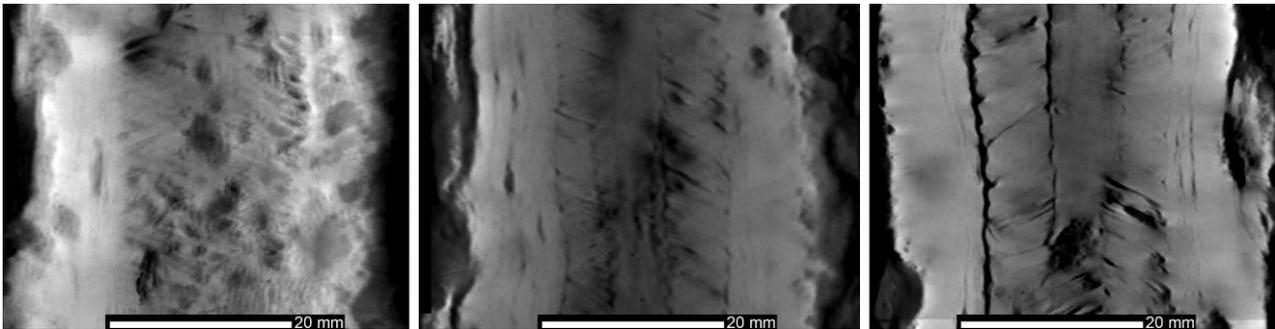


Abb. 2.7: Frontale μ -RCT-Schnittbilder des Schweißmusters der Spatha aus Grab 151⁸: Unscharfe Abbildungen durch nichtzentrische Ausrichtung (links), Bewegungsartefakt (Mitte) und scharfe Ab-bildung (rechts).

Häufig zu beobachtende Ringartefakte (konzentrische Ringe um den Bildmittelpunkt, Abb. 2.8) wer-den meist durch defekte oder falsch kalibrierte Detektorzellen hervorgerufen (Ketcham/Carlson 2001: 391).

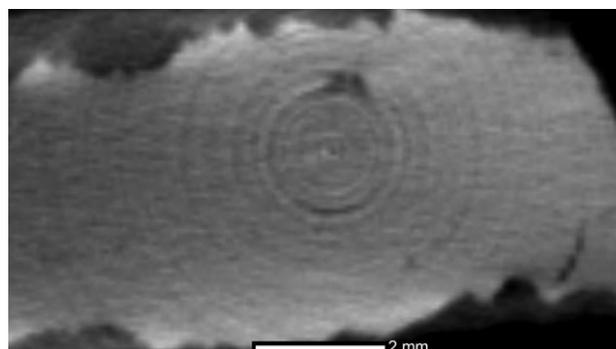


Abb. 2.8: Horizontales μ -RCT-Schnittbild eines Ringartefaktes.

⁸ Fundort Lauchheim „Wasserfurche“. Im Folgenden wird der Fundort nur angegeben, wenn es sich hierbei nicht um Lauchheim handelt.

Besonders stark absorbierende Materialien können die Qualität der CT-Daten beeinträchtigen. Partialvolumenartefakte entstehen beispielsweise durch Strukturen mit hohem Kontrast, welche die Größe der Detektorpixel unterschreiten. Daraus folgt, dass durch die Diskretisierung in Voxel-einheiten Bereiche mit unterschiedlichem Absorptionskoeffizienten in einem einzelnen Voxel dargestellt werden. Hierdurch werden nicht die tatsächlichen Grauwerte wiedergegeben, sondern ein mittlerer Grauwert, was in der Abbildung einen fließenden Übergang und keine klare Kante ergibt. Bei stark absorbierenden Materialien strahlen die Grauwerte in benachbarte Voxel über und führen so zu Messartefakten. Durch sorgfältige Kalibrierung in Vorbereitung auf die Datenanalyse können zwar Messunsicherheiten unter einem Pixel erreicht werden (Flisch et al. 2010), es können jedoch schwach absorbierende Materialien durch diesen Grauwertübergang überlagert werden. Merkmale mit geringem Kontrast können hierdurch in der Nähe von stark absorbierenden Bereichen nicht sichtbar sein. Streifenartefakte entstehen, wenn stark absorbierende Materialien die Strahlung so stark schwächen, dass praktisch keine durchgehende Strahlung mehr gemessen werden kann. Hierdurch treten helle Streifen auf, die vom Objekt ausgehen und ein sternförmiges Aussehen haben können. Durch stark voneinander abweichende Materialdichten kann der Dynamikbereich des Detektors überschritten werden, was dazu führt, dass Materialunterschiede in der Umgebung stark absorbierender Objekte nicht registriert werden und Schatten entstehen (Abb. 2.9, 2.11; Kastner et al. 2006: 5; Schmitt et al. 2008: 118; Stock 2009: 91).

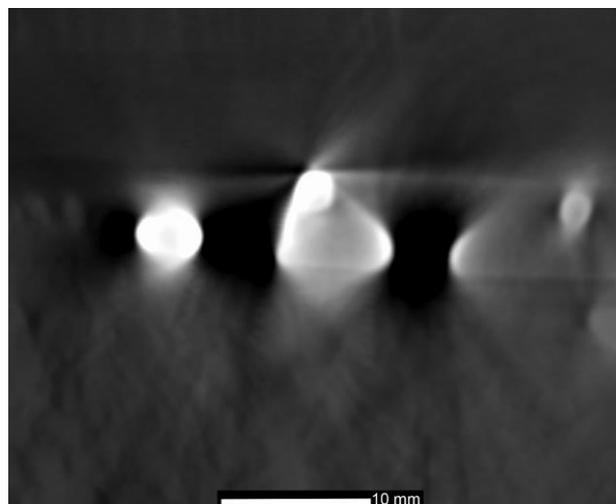


Abb. 2.9: Horizontales μ -RCT-Schnittbild des Streifenartefaktes und der dunklen Schatten verursacht durch das stark absorbierende Material einer Bronzierscheibe aus Grab 44.

Insbesondere Artefakte durch Streustrahlung und Strahlaufhärtung erschweren die Untersuchung von Objekten und Materialien. Wie oben bereits beschrieben, führt Streustrahlung zu Kontrastminderung und Unschärfe in den CT-Daten (Schütz et al. 2013). Strahlaufhärtungsartefakte sind auf die unterschiedlich starke Absorption der polyenergetischen Strahlung zurückzuführen, wobei die niederenergetische Strahlung durch das durchstrahlte Objekt stärker absorbiert wird und sich das Strahlungsspektrum mit zunehmender Objektdicke zu höheren Energien verschiebt. Dies hat zur

Folge, dass die Schwächung der Strahlung keiner exponentiellen Funktion in Abhängigkeit von der Objektdicke mehr entspricht. Diese Abweichung führt zu Abbildungsfehlern wie dunklen Streifen entlang langer Absorptionskanten und Zentralbereiche erscheinen weniger dicht als Randzonen, was selbst bei homogenen Objekten auftritt (Abb. 2.10, 2.11).

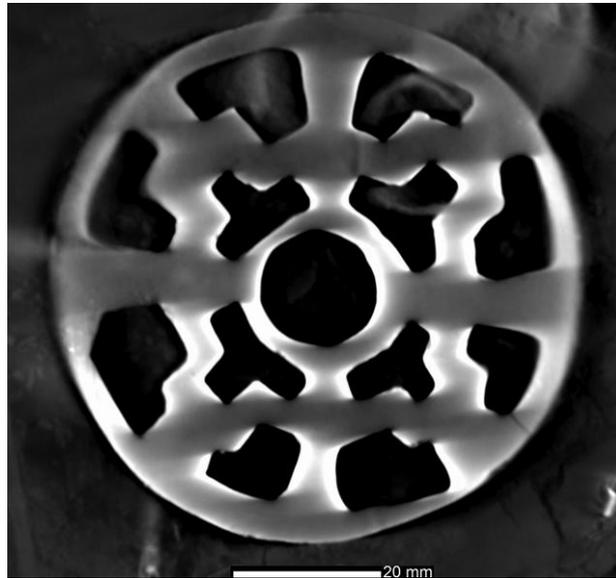


Abb. 2.10: Frontales μ -RCT-Schnittbild des Artefaktes (dunkle Streifen) durch Strahlauhfärtung in der Bronzierscheibe aus Grab 44.

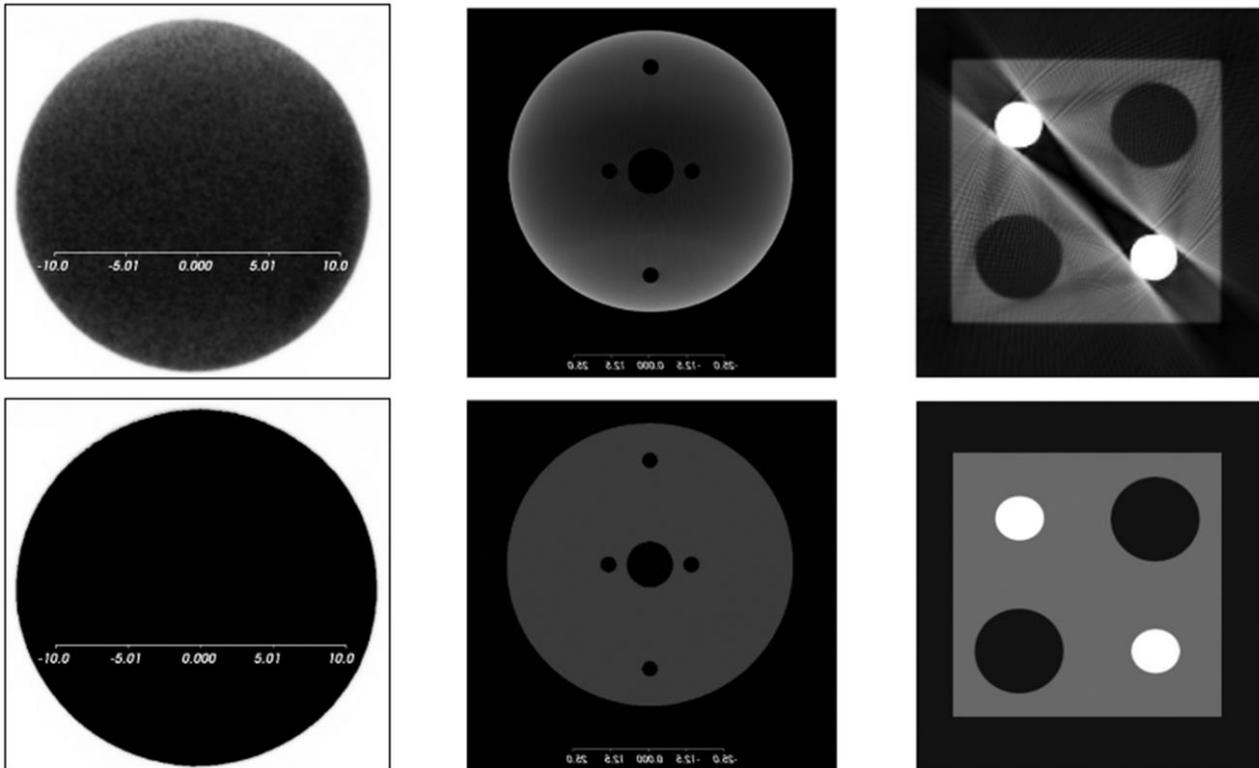


Abb. 2.11: Beeinträchtigung von RCT-Daten (oben) durch Rauschen (links), Strahlauhfärtung (Mitte), Streifen und Schatten eines stark absorbierenden Materials (rechts), und ohne Beeinträchtigung (unten; aus Amirkhamov 2012: 8).

Dieser als Cuppingartefakt bezeichnete Effekt verringert die Kontrastauflösung, sodass eine Erkennung lokaler Dichteunterschiede eingeschränkt ist. Dieses Artefakt lässt sich zwar in vielen Fällen durch die Anwendung von Filtern und analytischen Korrekturverfahren reduzieren, aber nicht aufheben (Hopkins 2004).

Artefakte durch Strahlaufhärtung betreffen vor allem die RCT, finden jedoch in geringerem Maße auch bei der NCT statt (Schillinger et al. 2008: 75). Das Feldkamp- oder Kegelstrahlartefakt, welches die RCT betrifft, ist auf die Strahlgeometrie zurückzuführen. Aufgrund fehlender Projektionsinformationen aus bestimmten Richtungen und der verwendeten Approximation im Feldkamp-Algorithmus ergibt sich eine Abschattung im rekonstruierten Volumen.⁹ Solche Effekte können die Extraktion der Oberflächengeometrie durch geeignete Schwellwertverfahren erschweren und zudem zu Fehlinterpretationen von CT-Daten führen (Karl et al. 2013: 84).

Da sowohl die Effekte durch Streustrahlung und Strahlaufhärtung als auch der Feldkamp-Effekt die Anwendbarkeit der Computertomographie erheblich einschränken, stehen diese im Fokus aktueller Forschung (Kyriakou et al. 2010; Schütz et al. 2014).

2.5 Visualisierung

Das visualisierte Rekonstruktionsergebnis, das auch als Tomogramm bezeichnet wird, gibt die dreidimensionale Verteilung der Schwächungskoeffizienten des untersuchten Objekts wieder. Der CT-Datensatz besteht aus Volumenelementen (Voxeln), deren Kantenlängen der Auflösung entsprechen.¹⁰

Für die Rekonstruktion der Ausgangsdaten aus den Sinogrammen sind zwei Formen der Diskretisierung notwendig: die räumliche Reproduktion und die Unterteilung der Grauwerte in CT-Nummern oder CT-Werte. Deren Umfang ist von dem verwendeten System und dem dynamischen Bereich des Detektors abhängig (Ketcham/Carlson 2001: 388; Casali 2006: 57). Gängige Maße für die Grauwertauflösung von Detektoren sind 8, 12 oder 16 bit, wobei eine 16-bit-Dynamik $2^{16} = 65536$ möglichen unterschiedlichen Grauwerten entspricht (Purschke 2005; Casali 2006: 58). Bei den meisten industriellen Anlagen entsprechen diese Werte der Grauwertverteilung in den erstellten oder exportierten Bilddateien. Die Grauwerte variieren hierbei entsprechend des Absorptionsgrades des durchstrahlten Materials. Obwohl die CT-Werte die Schwächungskoeffizienten des Materials in jedem Voxel linear wiedergeben sollten, ist eine absolute Übereinstimmung nicht gegeben; idealerweise werden diese für jeden Voxel relativ zur Kontrastauflösung und Grauwertverteilung dargestellt (Ketcham/Carlson 2001: 388).

⁹ Freundliche Mitteilung Dr. P. Schütz (16. Oktober 2015).

¹⁰ Im Folgenden wird in diesem Zusammenhang der Begriff „Auflösung“ verwendet; er bezeichnet die Kantenlängen der Voxel in einem Datensatz.

Mit den Informationen zur räumlichen Verteilung der Grauwerte lassen sich Histogramme der CT-Daten erstellen. Hierfür wird die Anzahl der Bildpunkte mit gleichem Grauwert gegen den Träger der Bildfunktion aufgetragen. Das heißt, dass in einem Histogramm für jeden Grauwert dessen Häufigkeit in den CT-Daten dargestellt ist. Über die Form des Histogramms lassen sich dann Informationen über die CT-Daten gewinnen. Über deren Bearbeitung ist es möglich, den Kontrast in der Abbildung zu erhöhen (Casali 2006: 62).

Neben der Visualisierung in zweidimensionalen Schnittbildern aus unterschiedlichen Richtungen können dreidimensionale Darstellungen der CT-Daten erstellt werden. Hierfür werden zumeist die Techniken Direct Volume Rendering (DVR) und Indirect Volume Rendering (IVR) eingesetzt. Bei den indirekten Verfahren wie zum Beispiel dem Marching Cubes Algorithmus wird als Zwischenschritt eine Iso-Oberfläche definiert, welche die Grenze des darzustellenden Volumens bildet. In den meisten Fällen wird angenommen, dass diese Grenze einem bestimmten CT-Wert entspricht. Das extrahierte Ergebnis kann dann als Polygonnetz weiterbearbeitet werden (Bartz/Meißner 2000: 171 f.). Beim DVR hingegen wird das gesamte Volumen zur Erzeugung der Abbildung genutzt. Jedem Voxel in dem Volumen wird über eine Transferfunktion ein Datenwert (α , r, g, b) zugewiesen, wobei α die Opazität und r, g, b einen Farbwert wiedergeben (Ohser/Schladitz 2008: 47; Geier et al. 2010).

Ein weiterer Schritt zur dreidimensionalen Darstellung von Objekten ist das Segmentieren. Dieses Verfahren kann auf der Detektion von Kanten und Regionen oder über die Bestimmung eines Schwellwertes basieren. So können durch das Definieren eines Schwellwertes und das Herabsetzen der Opazität der darunterliegenden Voxel diese unsichtbar gemacht werden und den Blick auf das nichttransparente Material freigeben (Ketcham/Carlson 2001: 393; Casali 2006: 64).

3 Material und Methodik

3.1 Eingesetzte computertomographische Methoden und Anlagen

Für die Untersuchung und Dokumentation von archäologischen Objekten stehen unterschiedliche computertomographische Methoden zur Verfügung (Casali 2006). Die gängigsten Methoden sind die beschriebenen RCT und NCT, wobei die RCT in unterschiedliche Anlagen wie LINAC, Makro-, μ - und Sub- μ CT-Systeme sowie die CT mit Synchrotronstrahlung unterteilt werden kann. Die Wahl der Methoden ist vor allem von dem Untersuchungsgegenstand und der Fragestellung abhängig. Hinsichtlich des zu untersuchenden Objekts sind sowohl das vorliegende Material als auch die Objektgröße und dessen Durchmesser von Bedeutung. Für eine hohe Auflösung muss sich der Untersuchungsgegenstand möglichst nahe an der Strahlungsquelle befinden. Dies hat zur Folge, dass der maximale Objektdurchmesser die Auflösung (Voxelgröße) einer CT-Messung bestimmt.¹¹ Abbildung 3.1 verdeutlicht, welche Methode für welchen Objektdurchmesser infrage kommt und welche Auflösung hiermit zu erreichen ist.

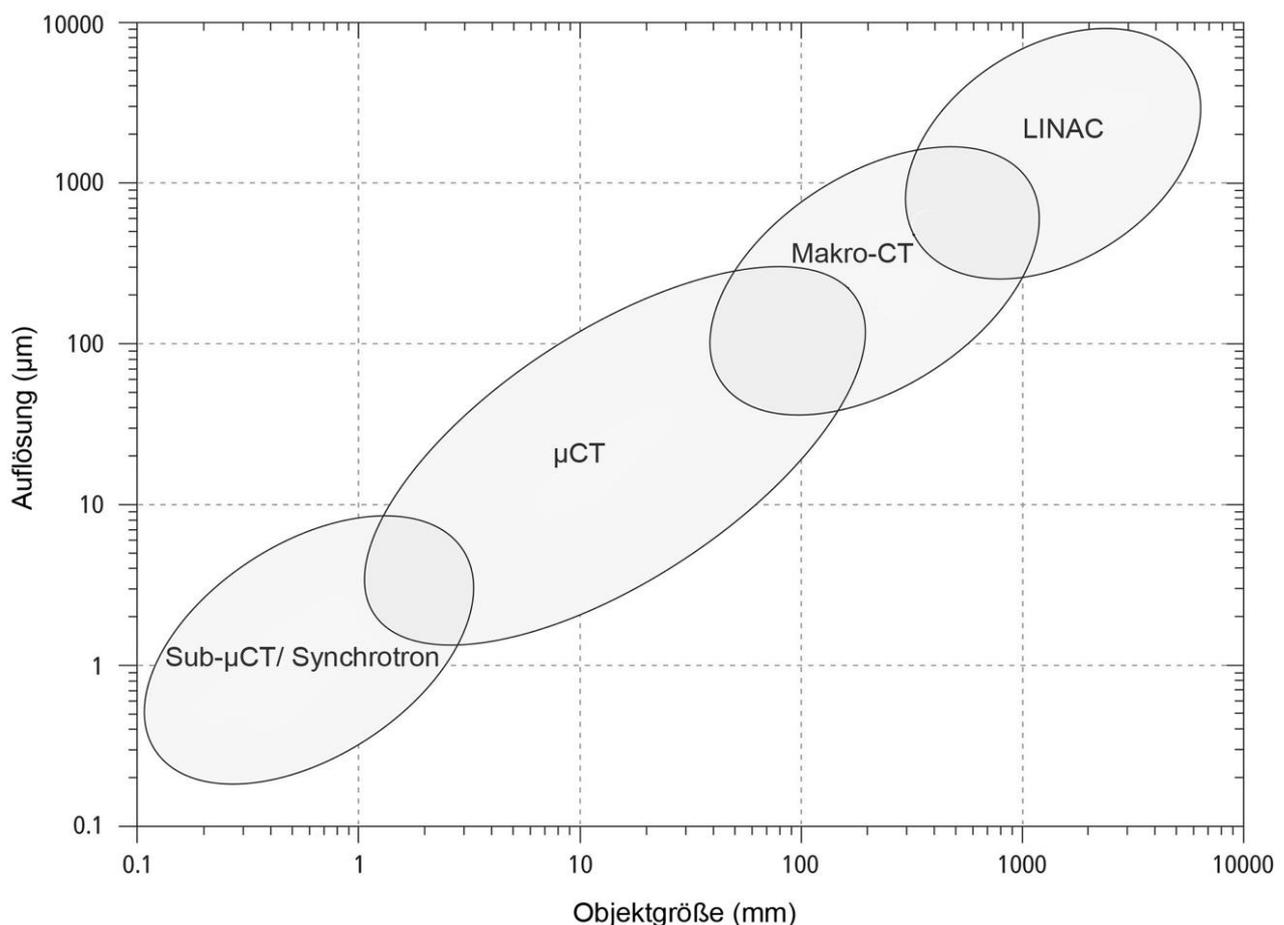


Abb. 3.1: Zusammenhang der Objektgröße, RCT-Anlage und Auflösung nach Brunke (2008: 66).

¹¹ Zum Einfluss des Objektdurchmessers auf die Auflösung siehe Kapitel 2.4.1 Geometrische Auflösung.

Für die Messungen zur Aufarbeitung der Blockbergungen und Funde wurden insgesamt fünf unterschiedliche RCT-Anlagen angewendet.¹² Darüber hinaus wurden Messungen mit der NCT am Forschungsreaktor (FRM-II) der Technischen Universität München durchgeführt.¹³

3.2 Computertomographie der Blockbergungen

3.2.1 Mikro-Röntgencomputertomographie

Aufgrund der Durchmesser der Blockbergungen, die hier zwischen 40 und 450 mm variieren, eignet sich für die Untersuchung die μ -RCT, welche auch die erforderliche Auflösung für die Bearbeitung der Daten liefert. Die erste Messung einer Blockbergung aus Lauchheim wurde während eines Seminars an der SABK Stuttgart mit dem Kegelstrahl μ -RCT-System RayScan 200 der Firma Wälischmiller an der Fachhochschule in Aalen (FHAA) durchgeführt (Stelzner 2006). Die Messungen von 17 weiteren Blockbergungen erfolgten von Dezember 2007 bis März 2009 bei der Firma Zeiss in Oberkochen mit einem RayScan 200E. Anschließend wurden zunächst 24 Blockbergungen am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Stuttgart und daraufhin alle weiteren Blockbergungen am Forschungsinstitut für Edelmetalle und Metallchemie (FEM) in Schwäbisch Gmünd gemessen. In beiden zuletzt genannten Fällen wurden die Messungen mit einem industriellen Vtomex 450 μ -RCT System der Firma GE Phoenix durchgeführt. Zur Vermeidung von Bewegungsartefakten wurde eine Holzkonstruktion angefertigt, in der die Blockbergungen senkrecht fixiert und auf dem Drehteller der CT-Anlage platziert wurden. Aufgrund der abweichenden Größe und der unterschiedlichen Zusammensetzung der Blockbergungen mussten die Messparameter für jede Blockbergung individuell angepasst werden. Um eine gute Balance zu erzielen zwischen dem detektierten Eingangssignal, für das hohe Beschleunigungsspannungen und starke Filter von Vorteil sind, und einem guten Materialkontrast, der demgegenüber niedrige Beschleunigungsspannungen voraussetzt, ist die Beschleunigungsspannung möglichst so zu wählen, dass die Strahlung das Objekt gerade noch durchdringt (Karl et al. 2013: 82; Stelzner et al. 2015).

Die Messungen mit den RayScan-Systemen wurden mit einer Beschleunigungsspannung von 140 bis 180 kV und einem Röhrenstrom zwischen 200 und 400 μ A unter Verwendung von Filtern (Cu oder PbFe) mit einer Integrationszeit von 1000 ms durchgeführt, wobei die Anzahl der Projektionen zwischen 810 und 990 lag. Die Messungen mit dem Vtomex 450 wurden mit einer Spannung zwischen 220 und 280 kV und Stromstärken zwischen 300 und 600 μ A mit Filtern (Cu oder CuSn) und einer Projektionenanzahl zwischen 800 und 1500 bei variierenden Integrationszeiten (500–1000 ms) aufgenommen. Die Abbildung 3.2 verdeutlicht anhand der gemessenen Blockbergungen den Zusammenhang von Objektdurchmesser und erzielter Auflösung bei den verschiedenen Messungen.

¹² Siehe Anhang Tabelle A.1.

¹³ Durchgeführt wurden die Messungen von Dr. Burkhard Schillinger.

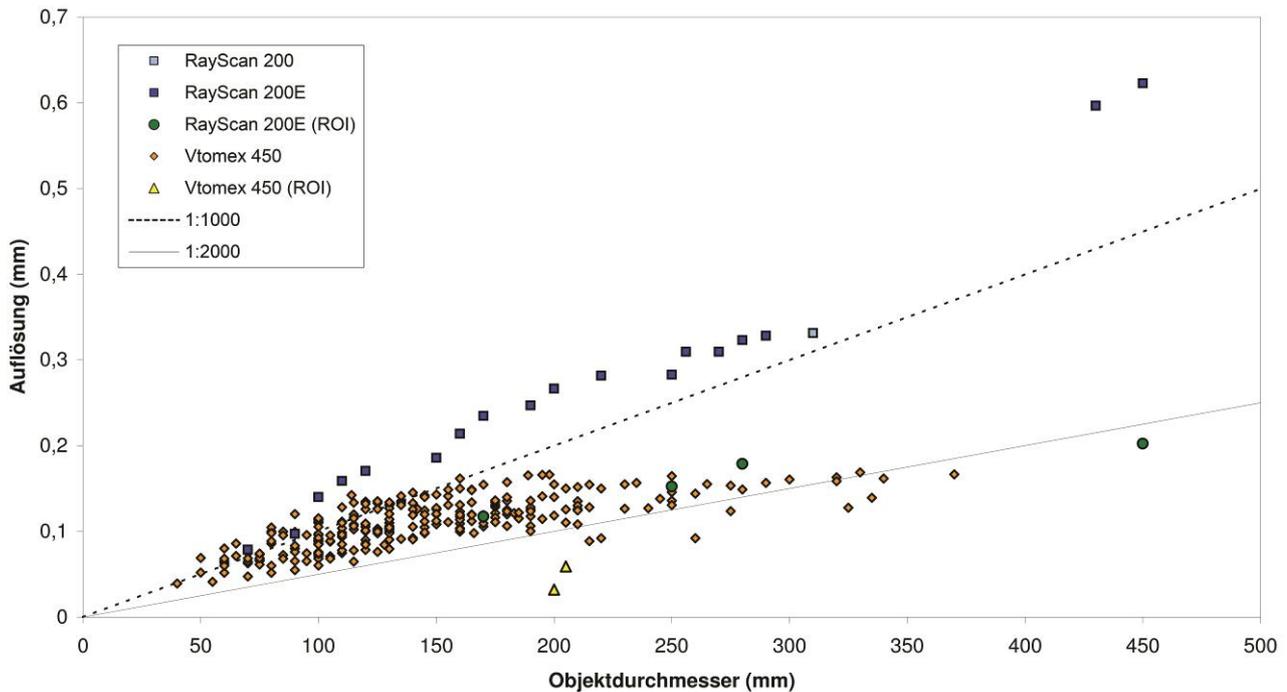


Abb. 3.2: Blockbergungsdurchmesser und erzielte Auflösungen der unterschiedlichen μ -RCT-Anlagen und Messmethoden.

Der Einfluss der Objektgröße auf die Auflösung ist zu erkennen – insbesondere dann, wenn der Objektdurchmesser wegen einer zu geringen Detektorfläche eine horizontale Messkreiserweiterung erforderlich macht.¹⁴ Dies war bei zwei Blockbergungen mit einem Durchmesser von über 400 mm der Fall, was zu einer weitaus geringeren Auflösung dieser Messungen führte (Stelzner et al. 2010: 97).¹⁵

Ein Vergleich der unterschiedlichen Anlagen zeigt, dass bei den RayScan 200-Systemen die Auflösung im Verhältnis von ungefähr 1:1000 zum Objektdurchmesser liegt, während die Auflösung des Vtomex 450-Systems weniger vom Durchmesser der Blockbergung beeinflusst wird und zum Teil ein Verhältnis von über 1:2000 zeigt. Hierbei ist zu beachten, dass bei Blockbergungen mit einem Objektdurchmesser von über 200 mm und einer Auflösung unter 0,1 mm die Datensätze extrem groß und dadurch schwer zu bearbeiten sind. Im Fall der Blockbergung aus Grab 1231 führte dies zum Beispiel zu einem Datenvolumen von 22 GB für eine einzelne Messung. Da insgesamt drei Messungen zur Erfassung des gesamten Fundkomplexes notwendig waren, die anschließend zusammengerechnet wurden, lag hier ein Datensatz von insgesamt 66 GB vor. Darüber hinaus kann sich aus der Vergrößerung bei der Messung ein schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis mit einem erhöhten Rauschen in den rekonstruierten Bildern ergeben, was die Qualität und die Auswertbarkeit beeinträchtigt. Eine hohe Auflösung kann sich negativ auf den Kontrast einer Messung auswirken, was im Fall des Vtomex 450-Systems bei einem Verhältnis von über 1:2000 zu

¹⁴ Zur Notwendigkeit einer Messkreiserweiterung siehe Kapitel 2.4.1 Geometrische Auflösung.

¹⁵ Einen Überblick über die Maße der Blockbergungen und zudem, mit welcher Anlage welche Auflösung erzielt wurde, gibt im Anhang die Tabelle A.2.

beobachten war (Abb. 3.3). Dies trifft vor allem auf die Blockbergungen mit großem Durchmesser zu, wobei hier auch die Durchdringbarkeit der Blockbergungen und der damit verbundene geringere Kontrast durch eine erhöhte Beschleunigungsspannung eine Rolle spielten.

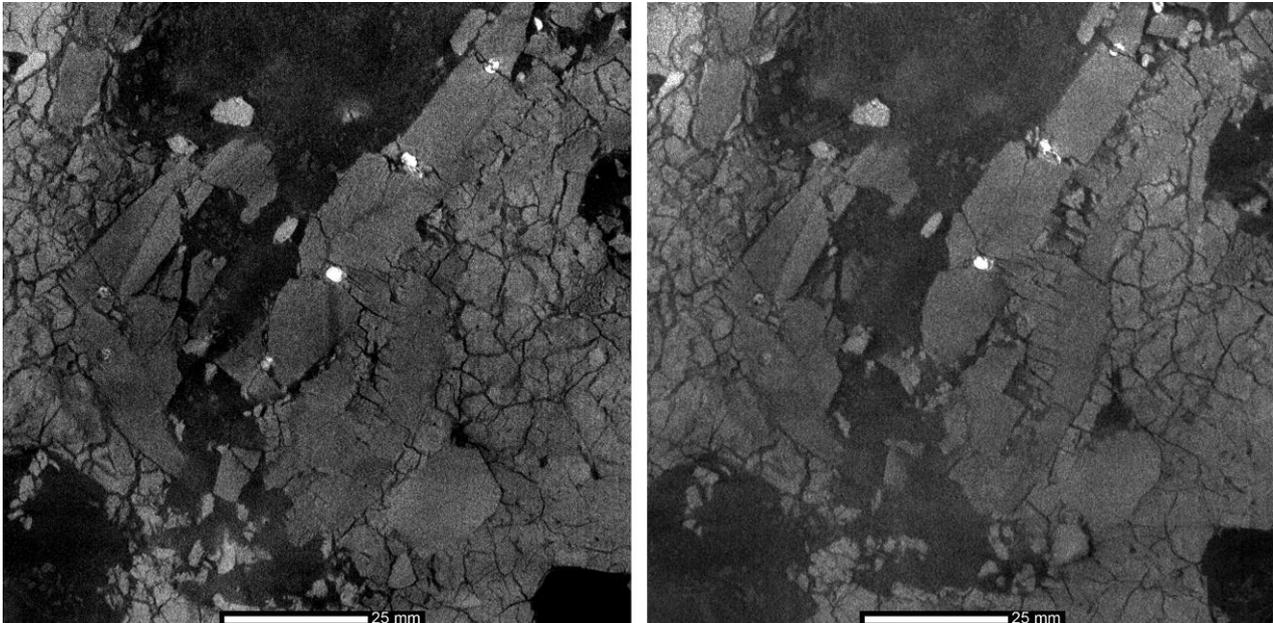


Abb. 3.3: Frontale μ -RCT-Schnittbilder mit zunehmendem Rauschen in den CT-Daten des Kammes aus Grab 1231 bei erhöhter Auflösung (Voxelkantenlänge): 0,11 mm (links) und 0,09 mm (rechts).

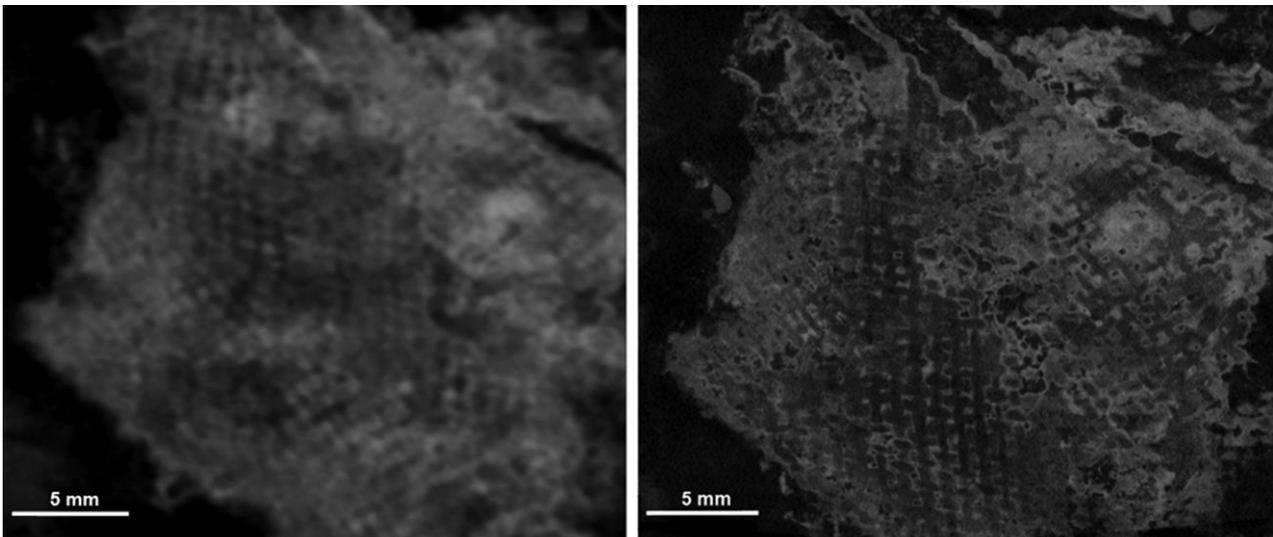


Abb. 3.4: Frontale μ -RCT-Schnittbilder der unterschiedlichen Auflösung einer normalen Messung (links, 140 μ m) und einer ROI-Messung (rechts, 30 μ m) am Beispiel eines Textils aus Grab 100.

In bestimmten Fällen, in denen eine höhere Auflösung notwendig war, wurde ein Detail der Blockbergung als ROI gemessen, was hier zur Beantwortung verschiedener Fragestellungen an sechs

Blockbergungen durchgeführt wurde.¹⁶ Die Abbildung 3.4 verdeutlicht den Unterschied der Auflösung und der damit einhergehenden Detailerkennbarkeit einer normalen Messung und einer ROI-Aufnahme an einem im Block geborgenen Textil.

3.2.2 Neutronencomputertomographie

Für die Untersuchung von Blockbergungen, in denen organische Materialien vorliegen, wurde die NCT aufgrund der zu Röntgenstrahlung komplementären Eigenschaften von Neutronen als eine vielversprechende Möglichkeit überprüft, diese Materialien zu visualisieren. Müller/Eberli (2008: 10 f.) beschreiben die Neutronenradiographie zur Visualisierung der organischen Reste einer frühmittelalterlichen *Spatha* in einer Blockbergung.

Fünf Blockbergungen, die bereits mit der RCT untersucht worden sind und organische Materialien wie Textilien, Leder oder Holz enthalten, wurden demnach an der Neutronenquelle des Forschungsreaktors FRM II der Technischen Universität München-Garching gemessen, um die Ergebnisse mit der RCT zu vergleichen (Stelzner et al. 2010). Die Radiographie- und Tomographieanlage ANTARES bietet hierfür ein kaltes und thermisches Neutronenspektrum. Die Kollimation betrug $L/D = 400$ mit einem Neutronenfluss von 1×10^8 n/cm²s auf einer Fläche von 200 x 200 mm². Die Experimente mit thermischen Neutronen zeigen, dass der hohe Wassergehalt in dem zur Bergung verwendeten Gips die Strahlung zu stark absorbiert und es nicht möglich ist, die Blockbergungen der Länge nach zu durchstrahlen. Auch ein Versuch mit schnellen Neutronen höherer Energie der Radiographie- und Tomographieanlage NECTAR konnte dieses Problem nicht lösen.

Sowohl mit thermischen als auch mit schnellen Neutronen waren hingegen Radiographien der frontalen Ansicht der Blockbergungen erfolgreich, wobei die Radiographien mit thermischen Neutronen bessere Ergebnisse lieferten und die Objekte mit einem höheren Kontrast zur umgebenden Erde darstellte. Die Abbildung 3.5 zeigt den Vergleich einer Radiographie mit thermischen Neutronen und einer Radiographie mit Röntgenstrahlung. Abgebildet ist die Blockbergung des Gürtelgehänges aus Grab 695, bestehend aus Beinkamm, Eisenmesser, Bronze- und Eisenringen und einem Bronzanhänger. Zu erkennen ist, dass die Radiographie mit Röntgenstrahlung die Metallobjekte mit hoher Materialdichte darstellt. Von dem Kamm hingegen sind nur die Eisenniete, nicht aber die Beinbestandteile zu erkennen. Die Neutronen wurden durch die Erde und den umgebenden Gips sehr stark geschwächt. Erkennbar sind die Risse in der Erde, wo die Neutronen weniger geschwächt wurden. Mit dieser zusätzlichen Schwächung durch Gips und Erde war es nicht möglich, den Kamm darzustellen. Im Gegensatz zur Röntgen-Radiographie zeigt die Neutronen-Radiographie die organischen Strukturen in der Mitte der Blockbergung, während die Metallobjekte weniger ersichtlich und insbesondere die Bronzeobjekte nicht zu erkennen sind.

¹⁶ Detailmessungen (ROI) wurden etwa zur Untersuchung von Holz durchgeführt. Siehe hierzu Kapitel 2.4.1 Geometrische Auflösung und Kapitel 7.2 Untersuchung der Hölzer.

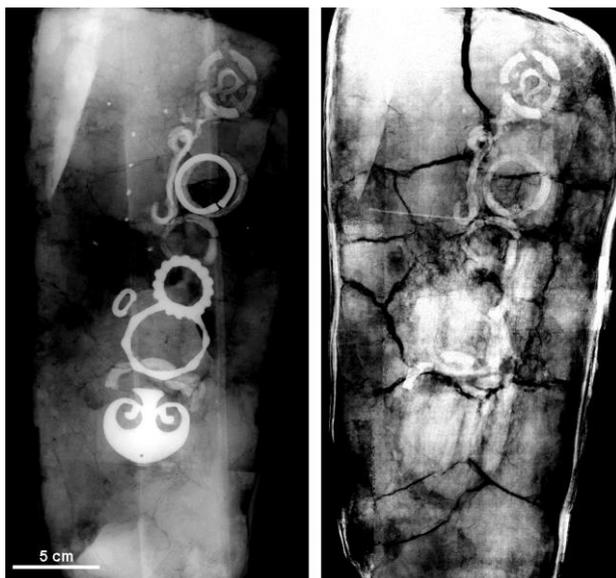


Abb. 3.5: Vergleich der Radiographie mit Röntgenstrahlung (links) und Neutronen (rechts) des im Block geborgenen Gürtelgehänges aus Grab 695, bestehend aus einem Eisenmesser (links oben), einem Beinkamm mit Eisennieten (Mitte oben) und mehreren Ringen und Kettengliedern aus Eisen und Bronze (rechts) sowie eines peltaförmigen Bronzeanhängers (unten). Im unteren Teil des Gürtelgehänges hat sich Holz der Grabkammer erhalten, welches sich in der Neutronen-Radiographie hell darstellt.

Die voneinander abweichende Darstellung der verschiedenen Materialien lässt sich mit der Schwächung der Strahlung durch die unterschiedlichen Elemente erklären.¹⁷ Abbildung 2.3 zeigt, dass der Schwächungskoeffizient für thermische Neutronen von Eisen höher ist als der von Kupfer oder Zinn. Das organische Material hingegen, welches von der Grabkammer stammt, ist wegen des hohen Wasserstoffgehalts des Holzes gut sichtbar. Die organischen Bestandteile des Beins sind demgegenüber vermutlich bereits vergangen, und auch die verbliebenen Elemente des anorganischen Hauptbestandteils Hydroxylapatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) ergeben mit der umgebenden Erde und dem Gips nicht genügend Kontrast, um den Kamm darzustellen.

Um die starke Schwächung durch die Erde und den Gips zu reduzieren, wurde in einem weiteren Versuch eine kleinere Blockbergung aus dem Grab 100 mit enthaltenem organischem Material und den Maßen 215 x 215 x 75 mm verkleinert. Hierfür wurde die umgebende Erde so weit wie möglich abgetragen. Anschließend wurden die Funde mit einer dünnen Schicht Gips gesichert. Nachdem diese hinreichend getrocknet war, wurde eine Messung vorgenommen. Damit war es erstmals möglich, die Bestandteile einer Blockbergung dreidimensional durch die NCT zu visualisieren. Der Vergleich mit der μ -RCT (Abb. 3.6) zeigt, dass das enthaltene Textil mit beiden Methoden detektierbar ist. Die Qualität der Darstellung ist jedoch unterschiedlich: Die μ -RCT erscheint für die Auswertung und Dokumentation von Blockbergungen aufgrund der höheren Auflösung und des größeren Kontrasts auch von zumindest mineralisierten organischen Materialien besser geeignet (Abb. 3.7).

¹⁷ Zur unterschiedlichen Schwächung von Röntgenstrahlung und Neutronen siehe Kapitel 2.3.3 Wechselwirkung mit Materie.



Abb. 3.6: Frontale Schnittbilder der Blockbergung aus Grab 100 der CT mit Röntgenstrahlung (links) und Neutronen (rechts).

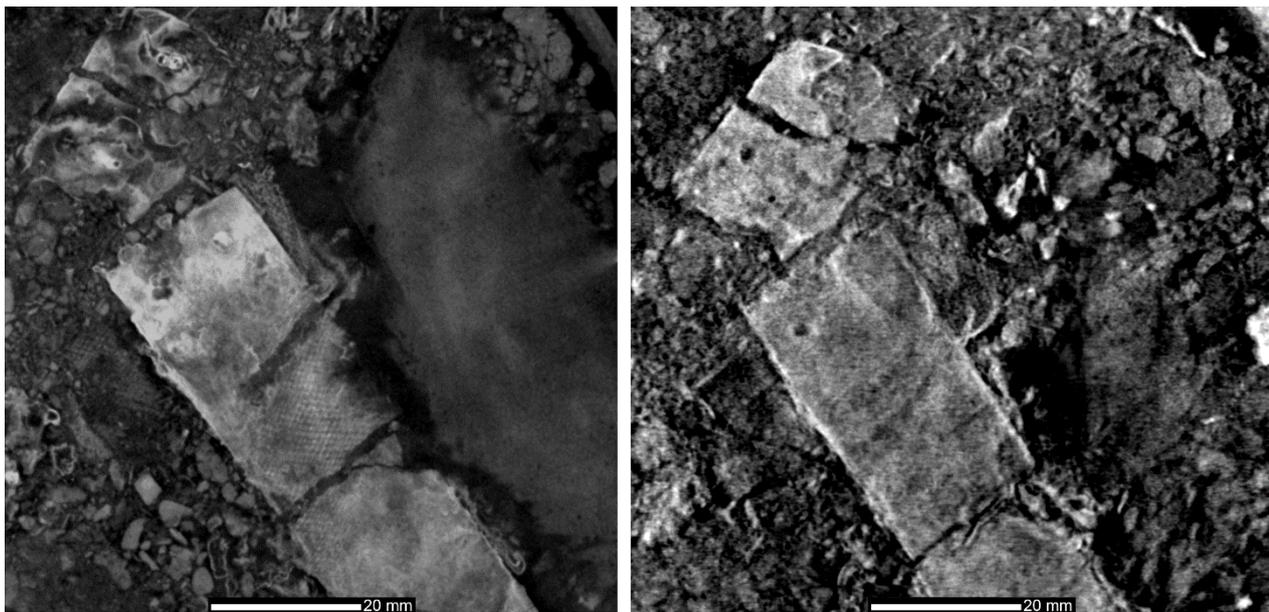


Abb. 3.7: Frontale Detailschnittbilder des Beschlags, der Riemenzunge und des Textils auf der Riemenzunge in der Blockbergung aus Grab 100 anhand der CT mit Röntgenstrahlung (links) und Neutronen (rechts).

3.3 Computertomographie der Einzelfunde

3.3.1 Mikro-Röntgencomputertomographie

Über die Blockbergungen hinaus wurden insgesamt 120 weitere Objekte mit der μ -RCT nach unterschiedlichen Fragestellungen untersucht, wobei alle Objekte mit der Kegelstrahl μ -RCT-Anlage Vtomex 450 am FEM in Schwäbisch Gmünd gemessen wurden.

93 einzeln geborgene Spathen (zwölf weitere Spathen befinden sich in Blockbergungen), bei denen neben den organischen Bestandteilen vor allem der Klingenaufbau im Zentrum der Untersuchung

stand, stellten den größten Teil der Funde dar, die mit μ -RCT untersucht und dokumentiert wurden.¹⁸

Vor den Messungen wurden die Spathen partiell mit Paraloid B 72 (5 % in Aceton) gesichert und anschließend in zugeschnittenen Platten aus Ethafoam eingebettet und fixiert. Für die Messungen wurden diese wie die Blockbergungen in einer Holzkonstruktion fixiert, um Bewegungsartefakte zu vermeiden. Nach einigen Probemessungen mit variierenden Parametern und einer anschließenden Beurteilung der Messergebnisse wurden die Messungen mit einer Spannung zwischen 250 kV und einer Stromstärke von 320 μ A unter Verwendung eines 1 mm Kupferfilters durchgeführt. Die Anzahl der Projektionen pro Teilbereich betrug 1200 bei einer Integrationszeit von 500 ms. Aufgrund der langen schmalen Form waren bis zu neun Messungen notwendig, um das gesamte Objekt bei einer möglichst hohen Auflösung zu erfassen. Diese Datensätze mussten anschließend zusammengefügt werden. Die Auflösung der Messungen liegt zwischen ~ 60 und ~ 150 μ m, wobei einzelne Spathen bedingt durch den Durchmesser der jeweiligen Blockbergung mit einer höheren Auflösung gemessen werden konnten als die in den Blockbergungen (Stelzner et al. 2010: 97).

Darüber hinaus wurden an der Spatha aus Grab 65 weitere Messungen zur Untersuchung herstellungstechnischer Details und zum Einfluss von Strahlaufhärtungsartefakten auf das Messergebnis an der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt (EMPA) in Dübendorf (Schweiz) vorgenommen. Hierfür wurde die Klinge in einer μ -RCT-Anlage mit einer Beschleunigungsspannung von 200 kV und einem Röhrenstrom von 60 μ A gemessen. Um die Effekte von Strahlaufhärtung zu vermindern, wurde das Röhrenspektrum durch einen Kupferfilter von 1 mm Dicke aufgehärtet. Es wurden insgesamt 720 Projektionen des Objekts aufgenommen, wobei in jeder Position eine Integrationszeit von 6 Sekunden gewählt wurde. Das Objekt wurde dabei von einem hochpräzisen Drehtisch (Typ „UPR-160F air“ von Micos) in Schritten von $0,5^\circ$ um eine feste Achse rotiert. Der Bereich des Übergangs von Griffangel zur Klinge wurde mit einer effektiven Pixelgrösse von ~ 70 μ m gemessen, die Details der Klinge mit einer Auflösung von ~ 47 μ m. Die gewonnenen Daten wurden mit einer an der EMPA entwickelten Rekonstruktionssoftware auf Basis des Feldkamp-Davis-Kress-Algorithmus (Feldkamp et al. 1984) rekonstruiert.

Für einen Vergleich der bodengelagerten Klinge mit einem homogenen Material ähnlicher Form wurde zusätzlich ein flaches Stück Stahl ähnlicher Geometrie und Dimension (Platte von 30 x 100 mm² mit einer Dicke von 4 mm) unter gleichen Bedingungen gemessen.¹⁹

¹⁸ Die Tabelle A.3 im Anhang bietet einen Überblick über die untersuchten Spathen. In Tabelle A.4 sind die weiteren gemessenen Einzelobjekte aufgelistet.

¹⁹ Die Messungen und die Rekonstruktion der Daten wurden von Dr. P. Schütz durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.2.3 Spathaklinge beschrieben.

3.3.2 Submikro-Röntgencomputertomographie

Bei Kegelstrahl-RCT-Systemen führten kontinuierliche Entwicklungen im Bereich der Röntgenröhren und RCT-Anlagen zu Auflösungen von bis zu einem μm ($\mu\text{-RCT}$) und darunter (Sub- $\mu\text{-RCT}$). Die Sub- $\mu\text{-RCT}$ eignet sich insbesondere für kleinere Objekte und Proben, an die besondere Fragestellungen gerichtet werden, die eine hohe Auflösung erfordern, um Details erkennen zu können. Der $\mu\text{-RCT}$ ist die Sub- $\mu\text{-RCT}$ in Bezug auf das Erkennen von Details, die Schärfe der Abbildung sowie die geometrische Auflösung und den Kontrast aufgrund des kleineren Brennfleckdurchmessers überlegen. Die Sub- $\mu\text{-RCT}$ hat jedoch wegen der begrenzten Strahlungsstärke ein schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis und eignet sich nur für kleinere Objekte (Kastner et al. 2010: 604 f.). Die Abbildung 3.8 verdeutlicht den Unterschied zwischen einer $\mu\text{-RCT}$ und einer Sub- $\mu\text{-RCT}$ -Aufnahme. Bei dem hier eingesetzten Nanotom M der Firma GE Phoenix am FEM in Schwäbisch Gmünd ist die Objektgröße etwa auf einen Durchmesser von 240 mm und eine Höhe von 250 mm begrenzt.²⁰

Anhand der Sub- $\mu\text{-RCT}$ konnten Fragestellungen zur Holzanatomie (Stelzner/Million 2015) und zur Herstellungstechnik bzw. Materialbeschaffenheit von Goldgeweben und Objekten aus Bronze verfolgt werden.

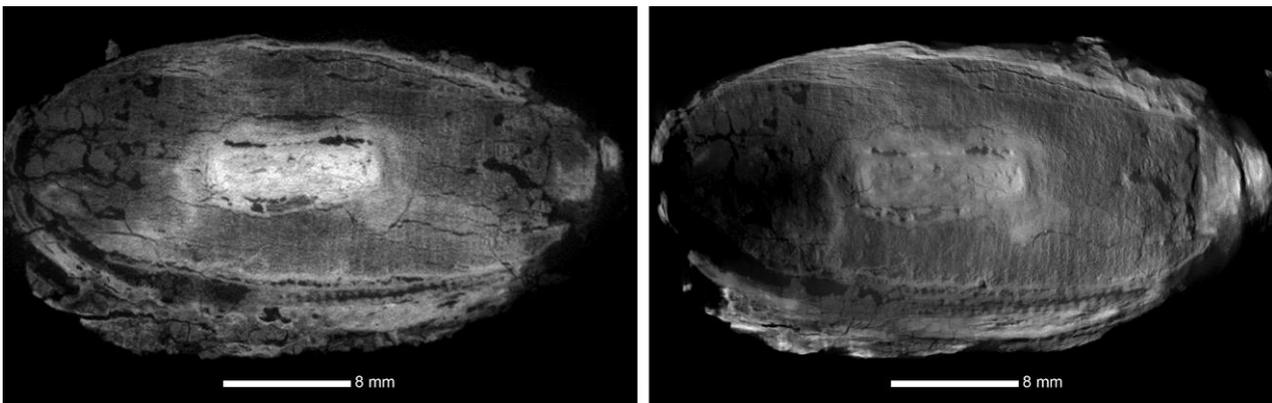


Abb. 3.8: Horizontale Schnittbilder des Vergleichs der $\mu\text{-RCT}$ (links) mit einer Auflösung von $60\ \mu\text{m}$ und der Sub- $\mu\text{-RCT}$ (rechts) mit einer Auflösung von $25\ \mu\text{m}$ des Holzgriffs der Spatha aus Grab 40.

3.3.3 Neutronencomputertomographie

Neben den Versuchen mit der NCT an Blockbergungen wurden auch Einzelobjekte aus Metall mit dieser Methode untersucht, an denen sich mit Korrosionsprodukten bedeckte organische Materialien befinden. Die Messungen der Einzelobjekte erfolgte bei einer Kollimation $L/D = 800$ mit einem Neutronenfluss von $2,6 \times 10^7\ \text{n/cm}^2\text{s}$ auf einer Fläche von $60 \times 60\ \text{mm}^2$. Die Auflösung betrug $0,1\ \text{mm}$ bzw. bis zu $30\ \mu\text{m}$ bei den kleinen Objekten.

²⁰ Die Tabelle A.4 im Anhang gibt einen Überblick über die mit der Sub- $\mu\text{-RCT}$ untersuchten Objekte.

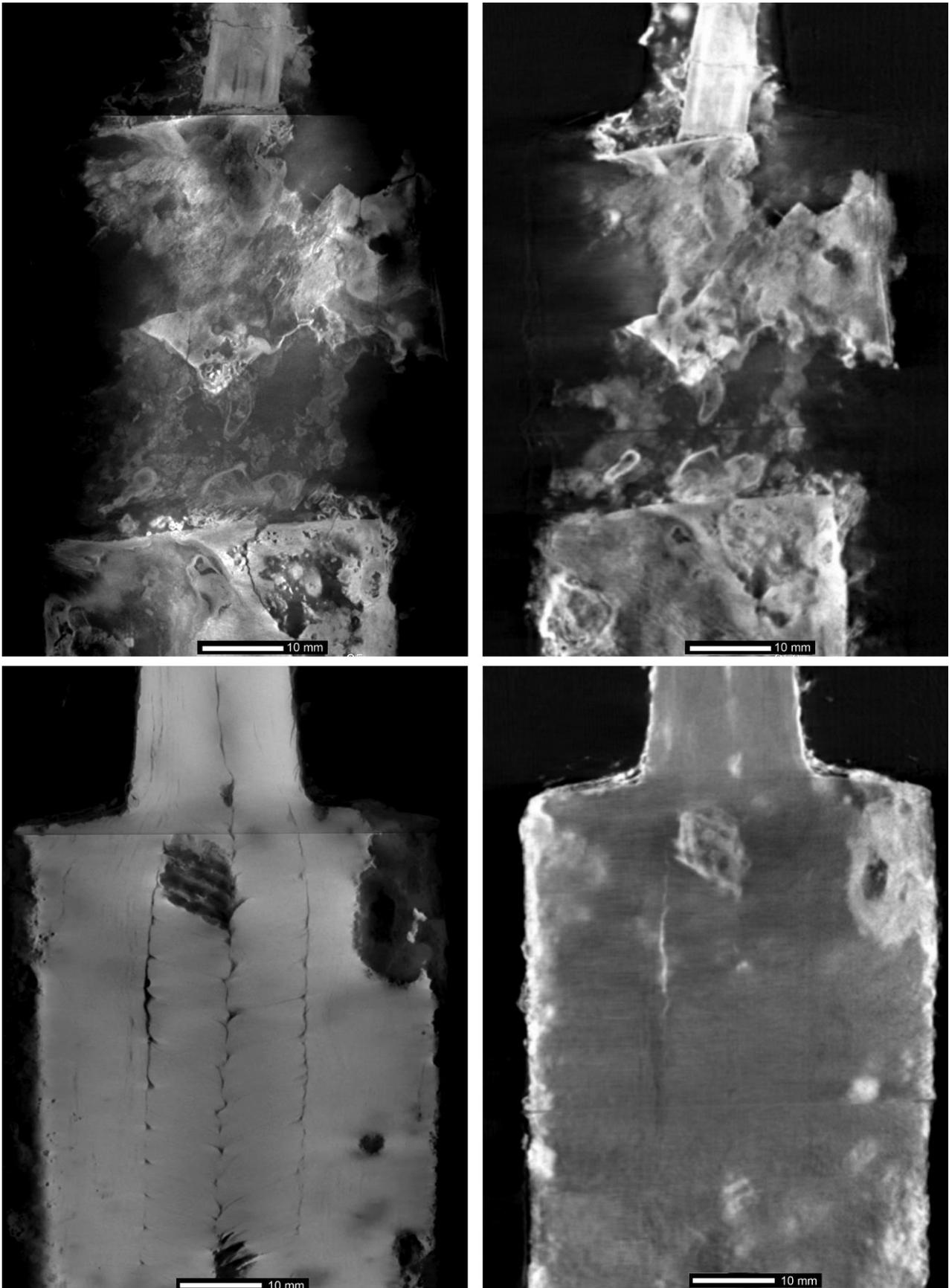


Abb. 3.9: Frontale Schnittbilder der Spatha aus Grab 46: Vergleich der CT mit Röntgenstrahlung (links) und Neutronen (rechts) der organische Bestandteile (oben) und der Klinge aus Eisen (unten).

Im Gegensatz zur RCT, bei der die stark voneinander abweichende Dichte der Materialien, wie es etwa bei Bronze bzw. Edelmetallen und Organik der Fall ist, zu Einschränkungen führen kann, liefert die NCT hier sehr gute Ergebnisse. Hierdurch kann die Organik, und im Fall von einzeln geborgenen Funden auch das Metallobjekt, untersucht und dokumentiert werden, ohne das organische Material von der Metalloberfläche entfernen zu müssen (Stelzner et al. 2010: 102). Aufgrund des geringeren Dichteunterschieds und der höheren Auflösung erzielt die μ -RCT bei Eisenobjekten bessere Ergebnisse bei der Darstellung der Materialien. Die Abbildung 3.9 zeigt den Vergleich der mit NCT und μ -RCT gemessenen Spatha aus Grab 46.

3.4 Bearbeitung der Computertomographie-Daten

3.4.1 Datenimport und Visualisierung

Zur Bearbeitung der Daten, die bei großen Blockbergungen zum Teil über 60 GB betragen können, ist eine Workstation mit einem geeigneten Arbeitsspeicher notwendig.²¹ Für die Visualisierung, Bearbeitung und Analyse der Daten wurde die Software VGStudio MAX²² der Firma Volume Graphics verwendet, welche die unterschiedlichen Formate der Messungen visualisieren kann. Die zur Untersuchung erhobenen Daten liegen zunächst als Einzelbilder (TIF), die rekonstruierten Daten der NCT als 8-bit-, und die der RCT als 16-bit-Rohdatensätze vor. Die RayScan-Anlagen und der μ -RCT-Aufbau an der EMPA liefern Daten im RAW-Format, während bei den Anlagen von GE Phoenix mit der Rekonstruktionssoftware Datos 2 VOL-Datensätze erzeugt werden. Für den Import in VGStudio MAX werden bei der Rekonstruktion neben den Rohdaten auch VGI-Daten erzeugt, die direkt geöffnet werden können. Wie die Rohdaten werden diese nicht durch die anschließende Bearbeitung des Datensatzes verändert.

Wie bereits angeführt, geben die unterschiedlichen Grauwerte in den CT-Daten die Schwächungskoeffizienten der Materialien wieder, wobei Bereiche mit einer starken Absorption der Strahlung hell und Bereiche mit einer geringen Absorption dunkel dargestellt werden. Die Verteilung der bei 16-bit-Datensätzen 65536 möglichen Grauwerte lässt sich beim Importieren durch Kalibrierung der Daten anpassen, sodass das gesamte Grauwertspektrum genutzt und die Feinheiten in den Materialunterschieden besser erkennbar sind. Hierfür wurden der Hintergrund und das am stärksten absorbierende Material auf bestimmte Grauwerte definiert. Über das Histogramm des Datensatzes wird diese Verteilung der Grauwerte dargestellt (Abb. 3.10).

²¹ Für die Bearbeitung der Daten mit VGStudio MAX wurde eine Lenovo ThinkStation D20, 64 Bit mit einem Arbeitsspeicher von 96 GB und einer Festplatte von 1,36 TB mit Windows 7 als Betriebssystem genutzt. Für die Betrachtung und Auswertung stand der speziell für die Untersuchung von CT-Daten entwickelte Monitor NEC MD304MC zur Verfügung.

²² Anwendung fanden die Versionen VGStudio MAX 2.0 bis 2.2.

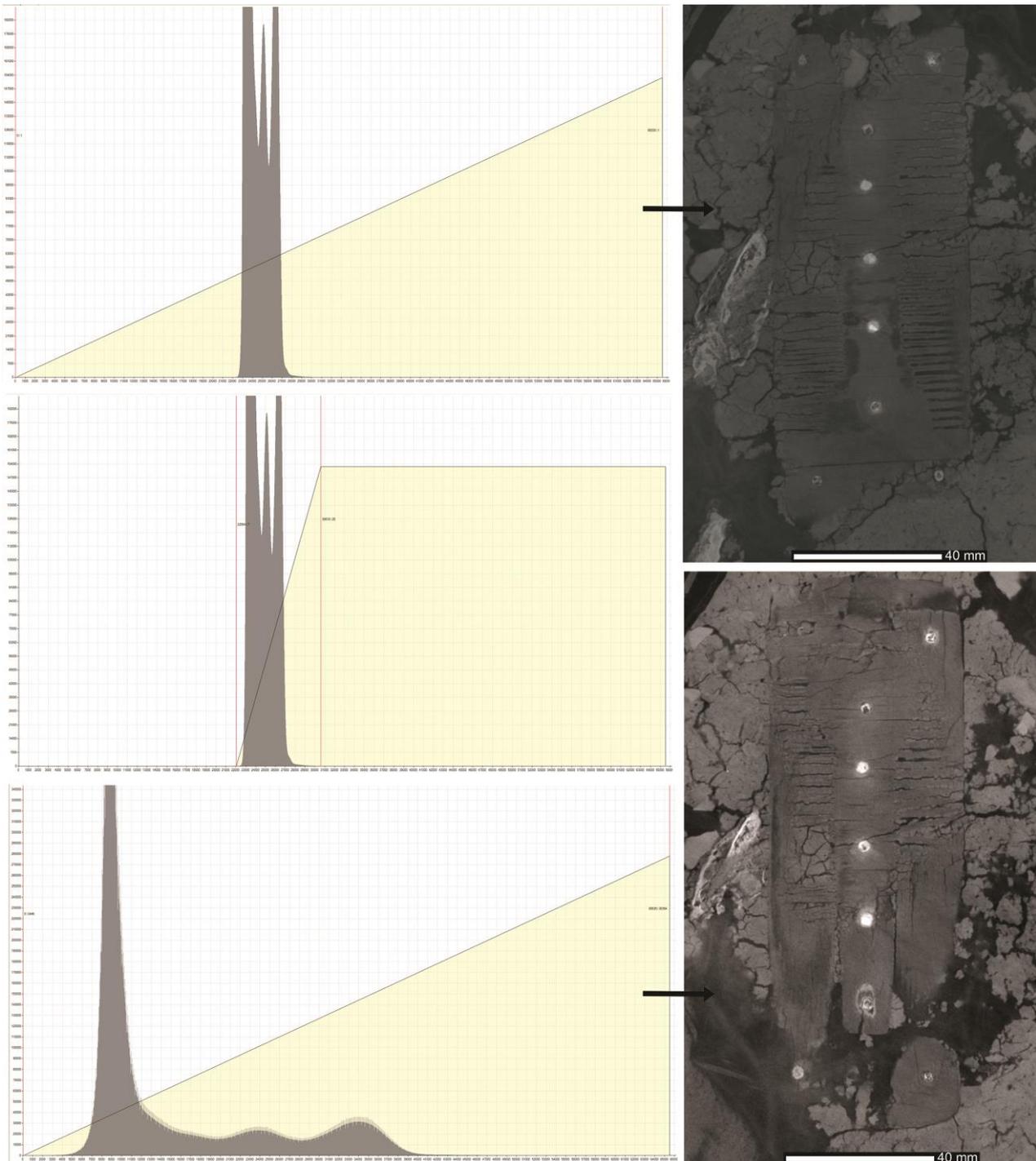


Abb. 3.10: Anpassung des Grauwertbereiches von 0 bis 65536 am Beispiel eines im Block geborgenen Kammes.

Das Kalibrieren der Daten ist erforderlich, wenn ein Objekt aufgrund seiner Größe in mehreren Messungen erfasst werden muss. Die Grauwerte der einzelnen Messungen müssen in diesem Fall aufeinander abgestimmt werden, damit keine gravierenden Unterschiede bei der Grauwertverteilung in der anschließend zusammengeführten Messung sichtbar sind. Da es bei der CT mit Kegelstrahlgeometrie an den Rändern der Messungen zu keilförmigen Feldkamp-Artefakten kommt, die in den zusammengeführten Daten zu Unregelmäßigkeiten führen, ist es erforderlich, diese Ränder

beim Importieren auszusparen. In der Voransicht lässt sich der Bereich des Datensatzes, der importiert werden soll, eingrenzen. Auf diese Weise wird zudem die Datengröße eines Volumens eingeschränkt, was zu einer besseren Bearbeitbarkeit des Datensatzes führt. Waren mehrere Messungen notwendig, so wurden mehrere Datensätze, die zuvor kalibriert und eingegrenzt wurden, in dasselbe Projekt importiert, anschließend gegeneinander registriert und daraufhin als RAW-Datei exportiert. Auf diese Weise wird ein einzelner Datensatz zur weiteren Bearbeitung erstellt.

Der importierte Datensatz wird in zweidimensionalen Schnittbildern visualisiert. Die virtuellen Schnitte können in drei orthogonalen Ebenen dargestellt werden, wobei sich diese an dem globalen Koordinatensystem des Datensatzes orientieren. Die Schnittrichtungen sind axial in horizontaler X-Y-Richtung, frontal in X-Z- und sagittal in Y-Z-Richtung angelegt, wobei das importierte Objekt beliebig gedreht, ausgerichtet und registriert werden kann. Somit kann ein Schnitt in jedem beliebigen Winkel dargestellt werden. Die Abbildung 3.11 verdeutlicht diese Schnittrichtung an der Blockbergung aus Grab 419. Mithilfe der Software kann zudem eine dreidimensionale Darstellung mit unterschiedlichen Renderparametern erstellt werden. Die Bearbeitungsschritte eines Datensatzes werden in einer VGL-Datei abgespeichert. Der Rohdatensatz bleibt in der Regel unverändert.²³

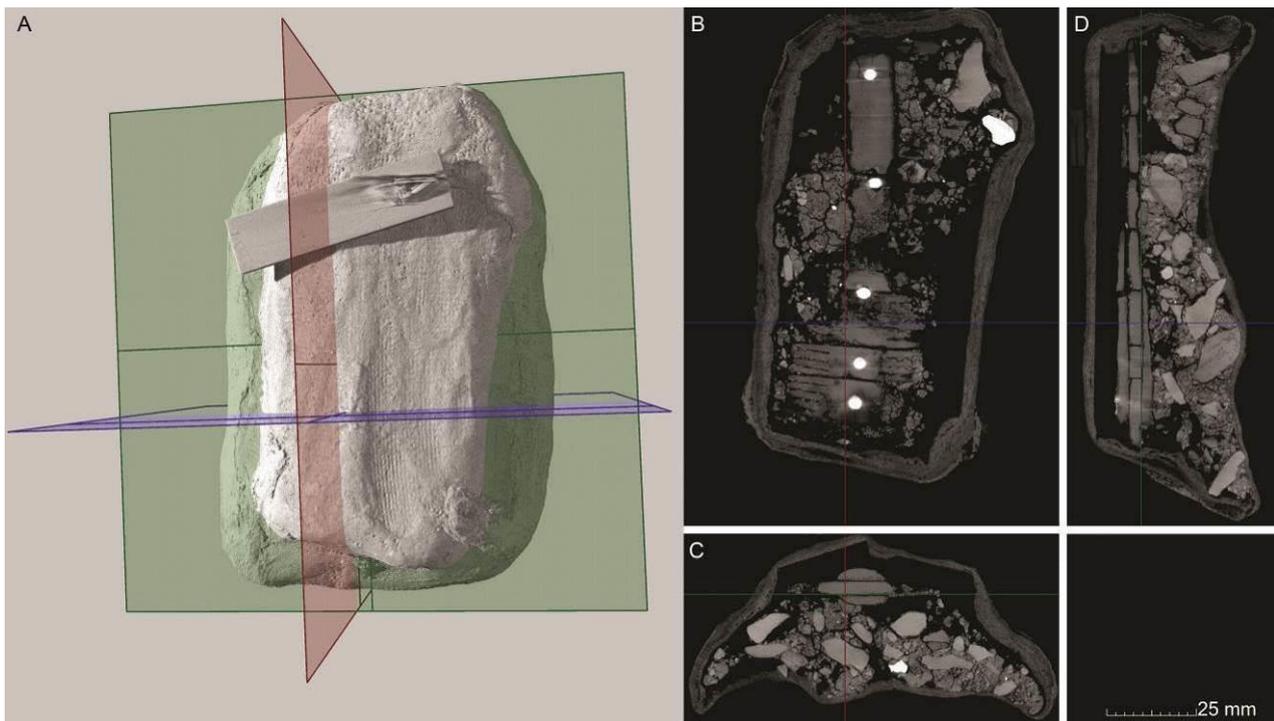


Abb. 3.11: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung (A) der Blockbergung des Beinkammes aus Grab 419 mit aufgebrachtem Nordpfeil aus Blei sowie den Schnittebenen der μ -RCT-Schnittbilder (B-D) zur Orientierung: Die grüne Ebene entspricht dem frontalen Schnitt (B), die blaue Ebene dem horizontalen Schnitt (C) und die rote Ebene dem sagittalen Schnitt (D).

²³ Detaillierte Informationen zur Software finden sich im VGStudio Max 2.2 Handbuch.

3.4.2 Analyse und Bearbeitung der Daten

Nach dem Import der Daten können diese analysiert und weiterbearbeitet werden. Hierzu stehen in der Software VGStudio MAX unterschiedliche Längen- und Winkelmesswerkzeuge zur Verfügung, mit denen alle Maße eines vorliegenden Objekts aufgenommen werden können. Anhand der Grauwerte in den Schnittbildern können die Objekte identifiziert und deren Lage zueinander bestimmt werden. Neben der Betrachtung der Schnittbilder, denen insbesondere die stratigraphischen Zusammenhänge in einer Blockbergung entnommen werden können, ist die dreidimensionale Darstellung der Objektoberflächen möglich.

Für eine formale und stilistische Ansprache kann ein Objekt in unterschiedlicher Weise visualisiert werden. Im Fall von Blockbergungen lassen sich durch das Verschieben der Schwellenwertanzeigen in der Opazitätskurve, für einen ersten Überblick weniger dichte Materialien ausblenden und dichte Materialien wie Metalle ohne die umgebende Erde darstellen. Für eine genaue Veranschaulichung dieser Funde und der weniger dichten Materialien ist es hingegen notwendig, diese digital freizustellen. Die Software VGStudio MAX bietet verschiedenen Werkzeuge zum Segmentieren der Objekte über die Grauwerte oder eine manuelle Auswahl, anhand derer gezielt Materialien unterschiedlicher Dichte definiert und extrahiert werden können. Diese lassen sich dann als geometrische Einheiten darstellen.

Für die Visualisierung lassen sich Grauwerte im Histogramm einer jeden Einheit beeinflussen, so dass Objekteigenschaften hervorgehoben oder transparent werden. Die unterschiedlichen geometrischen Einheiten und deren Dichtverlauf lassen sich durch Falschfarben darstellen, plastische Eigenschaften oder Oberflächendetails können durch Lichteffekte hervorgehoben werden. Die einzelnen geometrischen Einheiten können unabhängig voneinander bewegt oder miteinander fixiert werden. Indem jedes Fragment als eigenständige geometrische Einheit segmentiert und exportiert wird, können fragmentierte Objekte in der dreidimensionalen Ansicht zusammengefügt werden.

3.4.3 Datensicherung

Die auf einem NAS-Server abgelegten und gespiegelten Daten wurden nach ihrer Bearbeitung zur Sicherung auf externe Festplatten und in die für die Aufarbeitung des Gräberfeldes Lauchheim „Wasserfurche“ konzipierte Datenbank auf den Server des Landesamtes für Denkmalpflege Baden-Württemberg geladen. Alle zur Dokumentation erhobenen Daten, wie Abbildungen und Animationen, wurden ebenfalls in die Datenbank geladen.

Die Langzeitsicherung von CT-Daten, insbesondere der bearbeiteten Daten, bringt gewisse Anforderungen mit sich. Zum einen sind hier die enormen Datenmengen zu nennen, für die entsprechender Speicherplatz zur Verfügung stehen muss. Zum anderen setzt die Lesbarkeit der Daten die Verfügbarkeit der entsprechenden Software voraus. So lassen sich zwar die Rohdaten der

Messungen mit frei zugänglicher Software öffnen und visualisieren, die mit VGStudio MAX dokumentierten und bearbeiteten Daten hingegen sind nur mit dieser Software zu öffnen. Insofern ist es für eine Langzeiterhaltung der gewonnenen Ergebnisse notwendig, zusätzlich möglichst viele weitere Daten wie Abbildungen und Animationen zu sichern. Ausführlicher wurde auf die Sicherung der CT-Daten und die hiermit verbundene Problematik von Sayer-Degen (2012) eingegangen.

4 Untersuchung und Dokumentation der Blockbergungen

4.1 Objektansprache

Eine entscheidende Frage bei der Untersuchung und Dokumentation von Blockbergungen über die μ -RCT ist, ob die darin enthaltenen Objekte identifiziert werden können. Voraussetzung hierfür ist die Bestimmung der zugrunde liegenden Materialien sowie die Visualisierung und Rekonstruktion der Form der Objekte. Im Folgenden werden diese Punkte und die hiermit verbundenen Schwierigkeiten, wie methodische Einschränkungen oder Artefakte und mögliche Fehlinterpretationen für die unterschiedlichen vorliegenden Materialien, angesprochen und diskutiert. Zur besseren Übersicht werden die Materialien aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften und den damit verbundenen Anforderungen an die Methode in folgende Kategorien unterteilt: Metalle, silikatische Materialien und Mineralien, Materialien mit anorganischen und organischen Bestandteilen sowie organische Materialien.

4.1.1 Metallfunde

In Bezug auf die Materialidentifikation sind in den CT-Daten Metalle aufgrund ihrer hohen Dichte und dem damit einhergehenden Grauwertunterschied zur umgebenden Erde gut von ihrer Umgebung zu unterscheiden. Lediglich bei stark korrodiertem Eisen kann dieser Grauwertunterschied geringer sein. Eine Bestimmung bzw. Unterscheidung von Metallen ist über ihre unterschiedliche Dichte in gewissem Maß möglich, wobei sich dies im Fall der Blockbergungen aus Lauchheim im Wesentlichen auf Silber, Kupferlegierungen und Eisen beschränkt. In jeweils einem Fall konnten Gold und Blei in den Blockbergungen festgestellt werden.

Eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst die Dichte eines Objekts. In erster Linie sind dies die enthaltenen Elemente, die Materialstärke und der Erhaltungszustand. Der große Dichteunterschied der gängigsten Metalle lässt jedoch annehmen, dass deren Unterscheidung möglich ist. Die Graphik (Abb. 4.1) zeigt die Schwächung von Röntgenstrahlung durch einige häufig bei archäologischen Bodenfunden anzutreffende Metalle. Der Ausschnitt (Abb. 4.2) verdeutlicht die unterschiedlich starke Schwächung für den hier relevanten Energiebereich. Deutlich wird an dieser Stelle aber auch, dass der Schwächungsunterschied der Metalle und somit der Kontrast in den CT-Daten mit zunehmender Beschleunigungsspannung abnimmt.

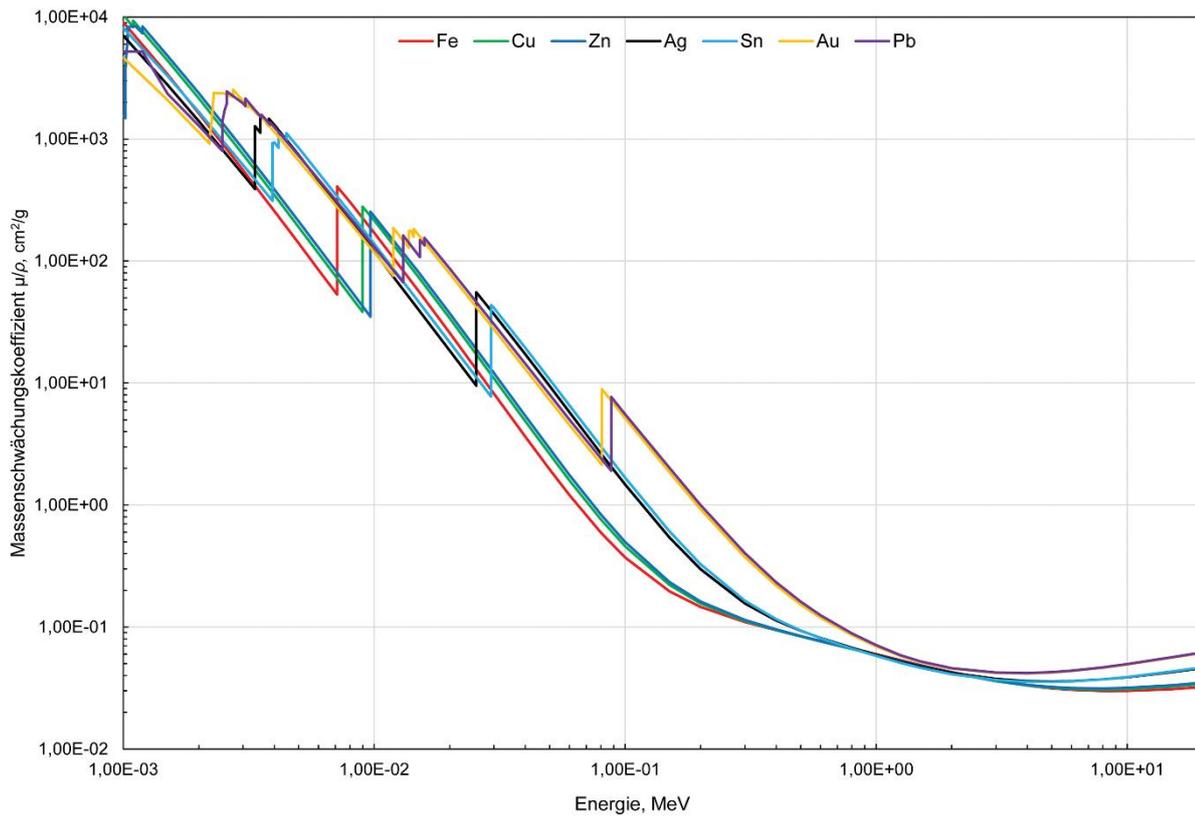


Abb. 4.1: Massenschwächungskoeffizienten von häufig im Frühmittelalter verwendeten Metallen entsprechend der Energie der Röntgenstrahlung.

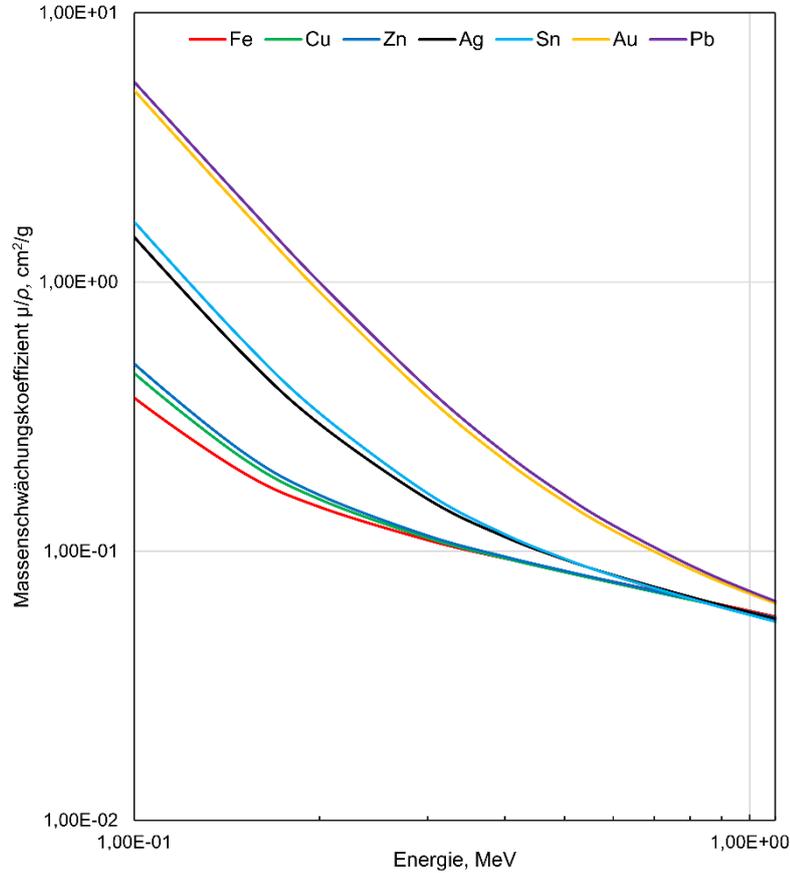


Abb. 4.2: Detailansicht Massenschwächungskoeffizienten für den relevanten Energiebereich.

Die Abbildung 4.3 zeigt an einem Beispiel die abweichende Schwächung der Metalle anhand der Grauwertverteilung und verdeutlicht, dass der Dichteunterschied auch bei abweichender Materialstärke eine Differenzierung ermöglicht. So wird der sehr viel dünnere Silberring heller dargestellt als der stärkere Bronzering. Der Dichteunterschied zwischen Kupfer und Eisen (Abb. 4.2) fällt geringer aus. Im Fall von Bronzeobjekten ist dieser Unterschied dagegen zumeist erheblich, was auf Legierungsbestandteile wie Zinn zurückzuführen ist. Wegen der variierenden Grauwertverteilung beim Datenimport und der unterschiedlichen Materialzusammensetzung von Blockbergungen kann sich die Bestimmung von einzeln vorliegenden Metallen ohne ein weiteres Metall als Vergleichsmaterial als schwieriger gestalten. Als Referenz diene in solchen Fällen der auf die Außenseite der Blockbergungen angebrachte Nordpfeil aus Blei. Durch das Kalibrieren des Datensatzes auf Luft und Blei lassen sich häufig vorliegende Metalle wie Silber, Bronze und Eisen bestimmen. Im Fall von Eisen können die für das Material charakteristischen Korrosionserscheinungen, die sich etwa in Schichten oder auch durch die Mobilität des Eisens als Rostblasen etc. darstellen, Hinweise liefern (Scott/Eggert 2009: 98 f.; Abb. 4.7, 4.8).

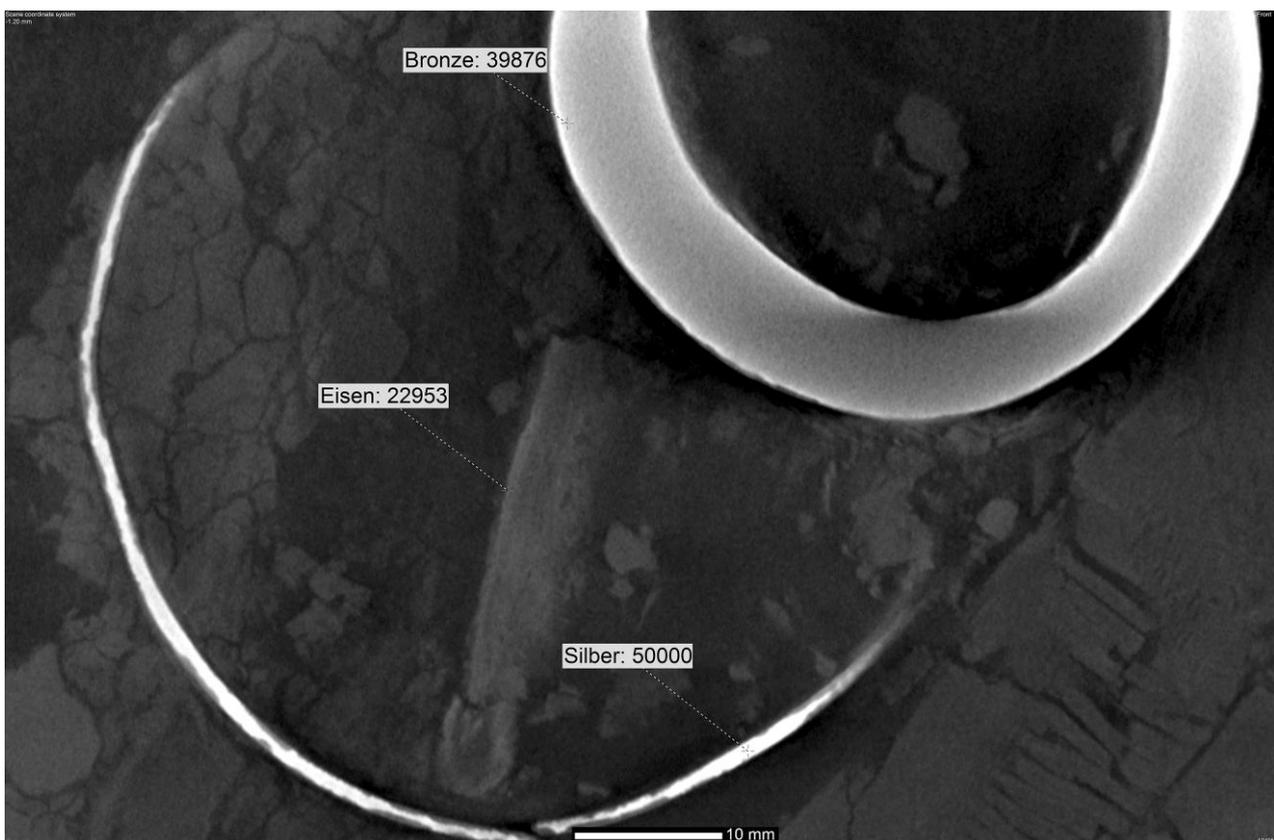


Abb. 4.3: Frontales μ -RCT-Schnittbild der Grauwertverteilung für Silber, Bronze und Eisen in einem auf Blei und Luft kalibrierten Datensatz.

Schwierig gestalten sich hingegen Aussagen zu Legierungszusammensetzungen wie etwa Kupferlegierungen. Grundsätzlich variieren die Schwächungskoeffizienten der Legierungspartner wie Zinn, Zink und Blei zwar erheblich (Abb. 4.2), was sich auch in den Grauwerten der CT-Daten

zeigen sollte. Dennoch liefern die Grauwerte aufgrund der Vielzahl möglicher Legierungszusammensetzungen und Verhältnisse der Legierungspartner keine gesicherten Rückschlüsse darauf, welche Legierungsbestandteile verwendet wurden. So war es beispielsweise nicht möglich, eine antike Reparatur anhand des Grauwertunterschieds der Kupferlegierungen einer Zierscheibe des im Block geborgenen Gürtelgehänges aus Grab 447 festzustellen, sondern nur über die genieteten Verbindungsstellen (Stelzner et al. 2010: 100). Die manuelle Freilegung der Zierscheibe zeigte hingegen, dass die Oberfläche der ergänzten Reparaturstelle eine andere Farbe aufweist. Dies ist wohl nur durch eine von der übrigen Zierscheibe abweichende Legierungszusammensetzung zu erklären (Abb. 4.4).

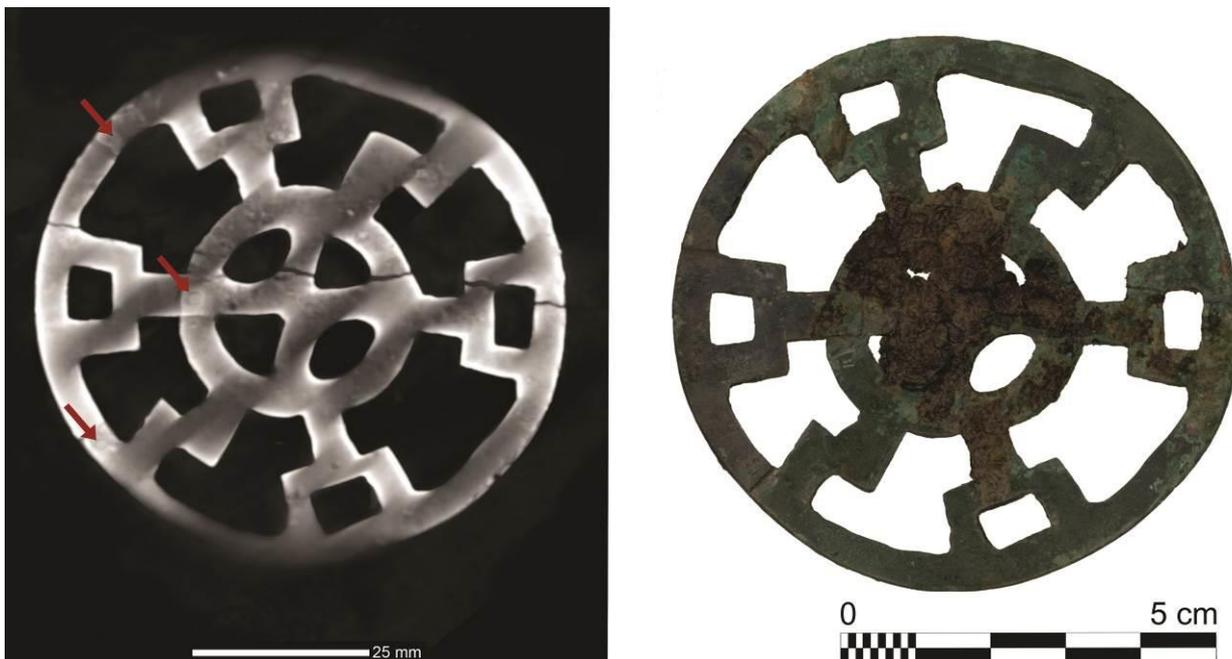


Abb. 4.4: Frontales μ -RCT-Schnittbild (links) und Scan (rechts) der antiken mit drei Nieten (siehe Pfeile) befestigten Reparaturstelle auf der linken Seite der Zierscheibe.

Eine Unterteilung in Bronze und Messing wurde aufgrund der technologischen Charakteristika dennoch grundsätzlich als sinnvoll erachtet und vorgenommen. Ausgehend von Vergleichsfunden und den für die Merowingerzeit üblichen Tauschierungen aus Silber und Messing (Gußmann 1994: 135; Riederer 1994) wurden die Einlegearbeiten in Eisenobjekten als Messing angesprochen und alle weiteren Objekte aus Kupferlegierungen als Bronze bezeichnet. Ein Beispiel hierfür ist die Spatha aus Grab 284, in deren Knauf- und Parierplatte sich eine Plattierung aus einer dichteren Legierung befindet. Knauf und Zierniete weisen eine ähnlich starke Absorption auf und sind anhand ihres Grauwertes nicht eindeutig von der Plattierung zu unterscheiden (Abb. 4.5). Vergleichsfunde wie beispielsweise eine Spatha aus Tuttlingen (Christlein 1978: 72) weisen darauf hin, dass solche Plattierungen wohl aus Messing gefertigt wurden. Die Niete und der Knauf hingegen sind vermutlich aus Bronze hergestellt. Diese Einteilung kann jedoch nicht wirklich Aufschluss über die verwendete Legierung geben, es handelt sich vielmehr um eine funktionale Unterscheidung. Es kann nicht mit

Sicherheit bei allen Objekten von Zinnbronzen ausgegangen werden. Zudem konnte auch nicht berücksichtigt werden, dass Tauschierungen aus reinem Kupfer gefertigt sein könnten oder neben Zink weitere Legierungsbestandteile vorliegen.²⁴

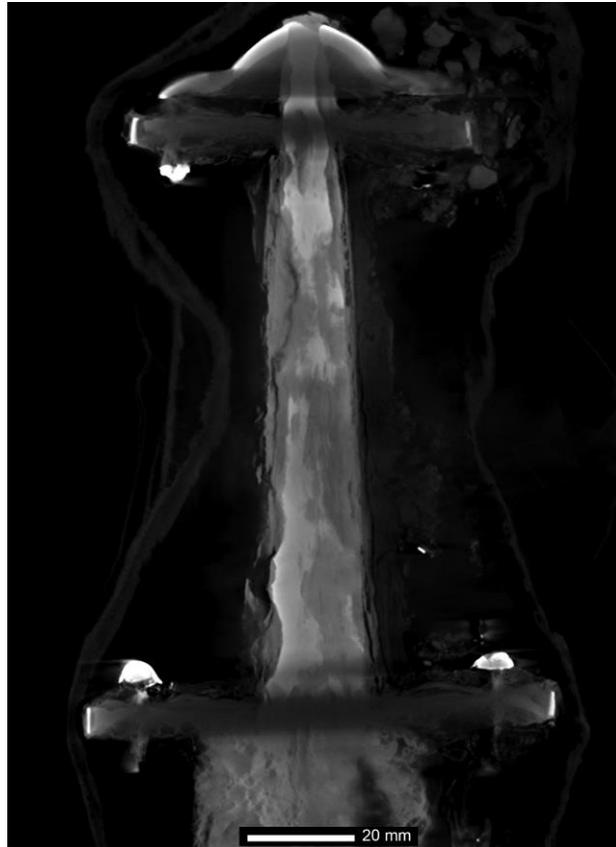


Abb. 4.5: Frontales μ -RCT-Schnittbild des Spathagriffs (Grab 284) mit dem Bronzeknauf oben und den Bronzenieten in Knauf- und Parierplatte. In den Außenseiten von Knauf- und Parierplatte sind die wohl aus Messing gefertigten Einlagen sichtbar (siehe hierzu auch Abb. 5.2).

Für eine Objektansprache ist die genaue Visualisierung der Form notwendig, was das Segmentieren der unterschiedlichen Materialien erfordert. Im Fall von Metallen kann dies in VGStudio MAX zum großen Teil über die Grauwerte erfolgen. Die Identifizierung der originalen Oberfläche kann sich hierbei jedoch als problematisch darstellen, da sich diese nicht unbedingt an der Materialdichte erkennen lässt und sich in den Korrosionsprodukten eines Objekts befinden kann. Dies kann auf Bronzeoberflächen (Robbiola et al. 1998: 2090; Bertholon 2001: 818) und insbesondere auf Objekte aus Eisen zutreffen, deren Erhaltungszustand stark variieren kann (Scott/Eggert 2009: 98). Vereinfacht dargestellt, konnten an den Eisenobjekten in den untersuchten Blockbergungen drei unterschiedliche Erhaltungszustände beobachtet werden. Bei gut erhaltenen, wenig korrodierten Objekten lässt sich die Oberfläche detailliert darstellen, wie dies beispielsweise bei dem Messer aus Grab 928 der Fall ist, welches als Teil eines Gürtelgehänges im Block geborgen wurde (Abb.

²⁴ Zur Untersuchung von Objekten aus Kupferlegierungen siehe Kapitel 6.4 Kupferlegierungen.

4.6). Die Oberfläche der Klinge ist so gut erhalten, dass sich auch Details wie die parallel verlaufenden Rillen in der Oberfläche der Klinge visualisieren lassen. Solche präzisen Darstellungen führten wohl dazu, dass Ebinger-Rist et al. (2011: 344) im Fall eines Schlüssels aus dem Grab 447 von der Darstellung der Schmiedehaut berichtete, wofür es jedoch keinen sicheren Hinweis gibt.



Abb. 4.6: Frontales μ -RCT-Schnittbild (links) und dreidimensionale Darstellung (rechts) des Eisenmessers aus Grab 928.

Schwieriger gestaltet sich die Darstellung von stärker korrodierten Objekten, deren Material sich zum Teil in Korrosionsprodukte umgewandelt hat, wie es bei dem oberen Teil der Klinge des Messers aus Grab 928 der Fall ist (Abb. 4.6).

Aufgrund der Mobilität der Eisenkorrosionsprodukte und der unregelmäßigen Konglomeratbildung mit Bestandteilen der Umgebung lässt sich die originale Oberfläche oft nur schwer definieren und ein Segmentieren der Form anhand der Grauwertverteilung ist nur eingeschränkt möglich. In solchen Fällen muss die Oberfläche mit manuellen Freistellungswerkzeugen der Software nachbearbeitet werden. Aufgrund der zum Teil nicht sichtbaren Oberfläche handelt es sich in vielen Fällen oft um eine Annäherung an die Form und nicht um deren exakte Wiedergabe.²⁵ Die Abbildung 4.7 zeigt einen solchen Erhaltungszustand an den Fragmenten eines Pfriems aus Grab 1, der einen

²⁵ Zu bedenken ist hier, dass bei schlecht erhaltenen Eisenobjekten eine originale Oberfläche auch bei einer herkömmlichen Restaurierung und Freilegung nicht unbedingt lokalisiert werden kann (Scott/Eggert 2009).

Eisenkern mit einer umgebenden, transparent wiedergegebenen Korrosionsschicht darstellt. Nicht eindeutig ist, wo sich die originale Oberfläche befindet.



Abb. 4.7: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung der Eisenpfriemfragmente aus Grab 1 mit transparent dargestellter Korrosion um den Eisenkern.

Den dritten Erhaltungszustand bilden Objekte, die vollständig korrodiert vorliegen, bei denen sich die Form des Objekts aber in der Korrosion abzeichnet. Ein Beispiel hierfür ist die Blockbergung aus Grab 151, in der neben einer Waage auch verschiedene Geräte aus Eisen geborgen wurden. Das Erscheinungsbild der Pinzette verdeutlicht, wie sich das Eisen in Korrosionsprodukte umgewandelt und in der Umgebung verteilt hat. Das Objekt selbst scheint nur noch als Hülle vorhanden zu sein, die in den Korrosionsprodukten zu erkennen ist. Durch manuelles Segmentieren kann diese Form freigestellt und visualisiert werden (Abb. 4.8).



Abb. 4.8: Frontales μ -RCT-Schnittbild (links) und dreidimensionale Darstellung (rechts) der Eisenpinzette aus Grab 151.

Das Grabungsfoto (Abb. 4.9) verdeutlicht den Zustand des Eisens in der Blockbergung. Eine Freilegung und Restaurierung ist hier wohl nur mit einem großen Zeitaufwand zu bewerkstelligen. Zudem ist es fraglich, ob die sehr stark korrodierten Objekte überhaupt mit einem zufriedenstellenden

Ergebnis geborgen und bearbeitet werden können. Anhand der μ -RCT konnten die enthaltenen Objekte jedoch dargestellt werden.²⁶



Abb. 4.9: Photographie des Beckenbereichs des Grabes 151, in dem die extrem schlecht erhaltenen Eisenobjekte als Blockbergung gesichert wurden (Maßstab 10 cm).

Die Darstellung von Eisen ist demnach stark von dem Erhaltungszustand abhängig, wobei auch auftretende Artefakte in den Messungen die Darstellung beeinflussen können.²⁷ So kommt es bei Materialkombinationen mit stark absorbierenden dichten Metallen durch Artefakte zu Schatten in deren Umgebung, was beispielsweise bei Tauschierungen der Fall sein kann. Abbildung 4.10 verdeutlicht einen solchen Schatten, in dem keine Materialinformationen des weniger dichten Eisens in der Umgebung des Silberdrahts vorliegen. Da es sich nur um einen kleinen Bereich handelt, ist eine dreidimensionale Darstellung solcher Objekte dennoch möglich und das Artefakt fällt nicht weiter ins Gewicht. Die Segmentierung solcher Objekte ist jedoch zeitaufwendig.

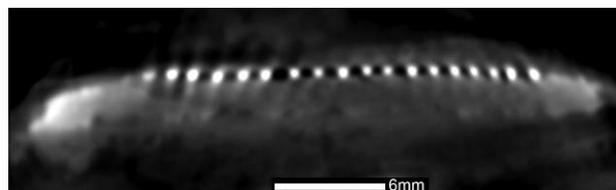


Abb. 4.10: Horizontales μ -RCT-Schnittbild der durch Artefakte bedingten Schatten um die Silberdraht-einlage in dem Eisenbeschlag aus Grab 15.

²⁶ Zu den Objekten der Blockbergung aus Grab 151 und deren stratigraphischen Abfolge siehe Kapitel 4.2.3 Rückschlüsse auf die Grablegung (Abb. 4.42).

²⁷ Zum Einfluss von Artefakten auf die Qualität der Messungen siehe Kapitel 2.4.3 Artefakte.

Ein weiterer Effekt bei dichten Materialien sind Streifenartefakte, welche die Darstellung der Oberfläche erschweren können. Bei solchen Daten ist eine Nachbearbeitung mit manuellen Freistellungswerkzeugen erforderlich, da eine Segmentierung über die Grauwerte zu unregelmäßigen Oberflächen führt, die nicht dem Original entsprechen. Ein Beispiel hierfür ist eine Tierkopffibel aus Bronze (Grab 44), die als Teil eines Gürtelgehänges im Block geborgen wurde (Abb. 4.11). Die unregelmäßige Oberfläche führte Ebinger-Rist et al. (2011: 345) wohl zu der Annahme, dass hier die Gushaut sichtbar ist, was bei der Betrachtung des freigelegten Originals als Fehlinterpretation gelten darf.



Abb. 4.11: Frontales μ -RCT-Schnittbild (links), dreidimensionale μ -RCT-Darstellung (Mitte) und Scan von Vorder- und Rückseite der Bronzefibel aus Grab 44.

In dem Schnittbild dieses Objekts ist des Weiteren zu beobachten, wie Artefakte durch Strahlhärtung zu einer Abschwächung des Grauwertes in bestimmten Bereichen führen. Dieser Effekt ist vor allem bei Ringen in den Innenbereichen oben und unten zu erkennen, was auch die dreidimensionale Darstellung erschwert (Abb. 4.12). Die geringere Materialdichte könnte zu der Interpretation führen, dass diese Bereiche etwa durch Abnutzung einer Aufhängung ausgedünnt sind. Der Vergleich mit dem originalen Ring (Grab 44) zeigt jedoch, dass dies nicht zutreffend ist. Der Bronzering aus Grab 1281 zeigt hingegen, neben den Abdunkelungen im oberen und unteren Teil durch Strahlhärtung, eine eindeutige Einbuchtung auf der Innenseite oben rechts, die wohl als der Bereich der ursprünglichen Aufhängung zu deuten ist.

Trotz der genannten Einschränkungen, die durch den Erhaltungszustand und auftretende Artefakte hervorgerufen werden können, ist es durch das Segmentieren möglich, sehr detaillierte Darstellungen der Oberflächen von Objekten aus dichtem Metall zu erhalten, die dem Original doch sehr nahe kommen. Ein Beispiel hierfür ist die Riemenzunge mit einem Silberpressblech aus Grab 44, deren

Form durch das Segmentieren des Datensatzes dargestellt werden konnte (Abb. 4.13). Es ist jedoch in den meisten Fällen nicht möglich, dies allein über die Grauwerte zu erreichen, sondern erfordert eine Nachbearbeitung mit manuellen Freistellungswerkzeugen.



Abb. 4.12: Frontales μ -RCT-Schnittbild (links oben), dreidimensionale μ -RCT-Darstellung (rechts oben) und Scan (links unten) des Bronzeringes aus Grab 44 sowie frontales μ -RCT-Schnittbild des Bronzeringes aus Grab 1281 (rechts unten).



Abb. 4.13: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung (links) und Scan (rechts) der Silberpressblech-Riemenzunge aus Grab 44.

Die Rekonstruktion fragmentierter Funde ist bei Metallobjekten in den meisten Fällen notwendig, um ihre Funktion zu klären und sie typologisch einordnen zu können. Das Zusammenfügen von Bruchstücken, die als eigenständige geometrische Einheiten segmentiert und exportiert werden, ist in VGStudio MAX möglich. Die im Block geborgenen Schlüssel aus Grab 588 verdeutlichen, wie fragmentierte und darüber hinaus zusammenkorrodierte Funde rekonstruiert und als einzelne Objekte dargestellt werden können (Abb. 4.14). Zu beachten ist, dass bei korrodierten Objekten, deren Oberfläche schwer zu bestimmen ist, Gleiches für die Bruchkanten zutrifft, was eine Rekonstruktion erschwert bzw. unmöglich macht. Zudem hat sich gezeigt, dass der Zeitaufwand für eine Rekonstruktion bei stark fragmentierten Funden erheblich sein kann. Deshalb empfiehlt es sich, sehr stark fragmentierte Objekte zu bergen und manuell zu restaurieren, was hier im Fall der Metallobjekte lediglich bei einigen stark fragmentierten Schildbuckeln notwendig war.



Abb. 4.14: Dreidimensionale μ -RCT-Abbildungen der Eisenschlüssel aus Grab 588 im Fundzustand (links), rekonstruiert (Mitte) und einzeln rekonstruiert dargestellt (rechts).

4.1.2 Funde aus silikatischen Materialien und Mineralien

Glas und Keramik sind Materialien, die in den CT-Daten üblicherweise keinen allzu großen Kontrast mit ihrer Umgebung bilden und sich nicht über ihre Grauwerte, sondern hauptsächlich über ihre Form von der umgebenden Erde unterscheiden lassen – entweder als komplett erhaltenes Gefäß oder als Scherben. Bei einzelnen Scherben kann eine Identifikation bei entsprechend hoher Auflösung auch über die inneren Strukturen wie Gaseinschlüsse oder Magerungsbestandteile erfolgen (Abb. 4.15).

Eine Ausnahme stellt Glas dar, das aufgrund von meistens zur Farbgebung beigefügten Elementen, wie beispielsweise Blei, eine sehr hohe Dichte aufweisen kann. Dies ist besonders bei unter-

schiedlich gefärbten Perlen zu beobachten, die wegen der farbgebenden Zusätze erhebliche Abweichungen in der Dichte der Glasmasse aufweisen können. Abbildung 4.16 verdeutlicht, dass einige Perlen der im Block geborgenen Perlenkette aus Grab 343 die Röntgenstrahlung sehr viel stärker absorbieren als die übrigen. Nach dem Öffnen der Blockbergung konnte dies durch die gelbe Farbe der Perlen erklärt werden. Diese wird vermutlich durch eine Bleiverbindung hervorgerufen, die zu einer starken Schwächung der Strahlung führt (Stelzner et al. 2010: 100). Im frühen Mittelalter waren Blei-Zinn-gelbgefärbte Perlen weit verbreitet (Heck 2000).

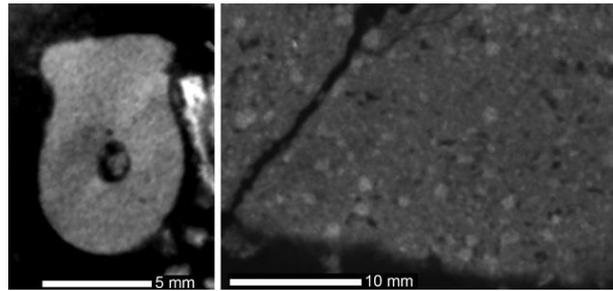


Abb. 4.15. Horizontale μ -RCT-Schnittbilder eines umgebördelten Glasfragmentes (Grab 315) mit kleinen Gaseinschlüssen in der Glasmasse (links) und Detail eines Keramikscherbens (Grab 45) mit Gaseinschlüssen und Magerungsbestandteilen (rechts).

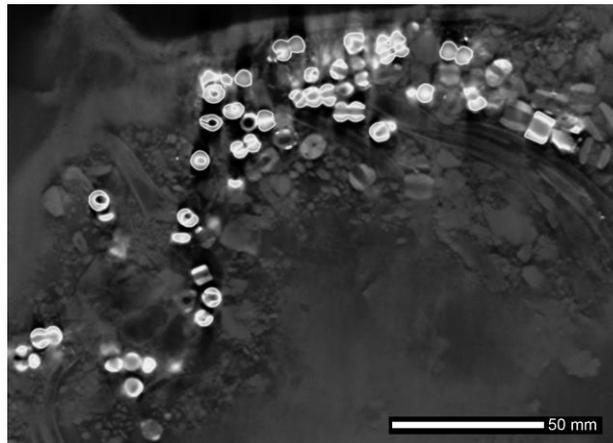


Abb. 4.16: Frontales μ -RCT-Schnittbild der unterschiedlich starken Absorption der Perlen in Grab 343 durch farbgebende Verbindungen. Bei den stark absorbierenden Perlen handelt es sich um durch eine Bleiverbindung gelb gefärbte Perlen.

Auch wenn dieses Beispiel eine Bestimmung der Farbe von Glas über die Dichte des Materials in bestimmten Fällen möglich erscheinen lässt, kann eine solche nicht mit Sicherheit erfolgen, da eine Vielzahl von Elementen, die zudem in unterschiedlichen Oxidationsstufen vorliegen können, zur Farbgebung angewendet wurde (Weyl 1951; Buchta-Hohm et al. 1992; Heck 2000). Dies trifft auch auf die Farbe des Scherbens und der Oberfläche keramischer Werkstoffe zu, welche ein Hilfsmittel zur Kennzeichnung einer Keramik oder eines Keramiktyps darstellt und Hinweise auf Materialien und den Herstellungsprozess wie die Brandatmosphäre geben können (Noll 1991: 50–53). Die Identifikation von Steinen und anderen Mineralien ist nicht ohne Weiteres möglich, wenn sich diese

von den Steinen der umgebenden Erde nur schwer unterscheiden lassen. So sind Feuersteinfunde bei den Lauchheimer Bodenverhältnissen nur anhand ihrer Lage im Befund und/oder aufgrund der Grabungsdokumentation auszumachen, da sie weder anhand ihrer Dichte noch ihrer Form eindeutig von den hier vorliegenden kantigen Steinen zu unterscheiden sind. Demgegenüber können andere Steine oder Mineralien, wie etwa der Proberstein aus Grab 151 (Abb. 4.17) und der Ammonit (Anhänger?) aus Grab 1191, über ihre Form oder, wie das Bohnerz aus Grab 1191, über seine Dichte von anderen Steinen der Umgebung unterschieden werden (4.18).



Abb. 4.17: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung und horizontales μ -RCT-Schnittbild des Probersteins aus Grab 151.



Abb. 4.18: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung von Silex, Ammonit und Bohnerz sowie Eisenring und Bronzedraht aus Grab 1191 (rechts) und sagittales μ -RCT-Schnittbild des Silex und des Bohnerzes (links).

Eine Unterscheidung von Glas und Mineral ist in bestimmten Fällen, wie etwa bei der Verwendung als Einlage, schwierig und auch unter Heranziehen von Vergleichsfunden kaum möglich, da eine Vielzahl unterschiedlicher Materialien, etwa für die Cloisonnétechnik, Verwendung fand (Farges 1998: 323). Eine für die Merowingerzeit typische Einlage ist der rote Granat, bei dem es sich häufig um Almandin handelt (Greiff 1998; Quast/Schüssler 2000) und der hier in den Blockbergungen auf Scheibenfibeln vorliegt. In dem Fall der Scheibenfibeln aus Grab 1131 sind in den Einlagen

kleine Gaseinschlüsse zu erkennen (Abb. 4.19), was in einem Granat nicht anzutreffen wäre (Diethelm 1994: 157). Dass es sich hierbei um Glas handelt, wird auch durch einige bei der Grabung separat geborgene Einlageplättchen der fragmentierten Fibel bestätigt. Voraussetzung hierfür sind Messungen mit einer hohen Auflösung, welche eine Unterscheidung dieser Materialien über die Gaseinschlüsse in der Glasschmelze ermöglichen.

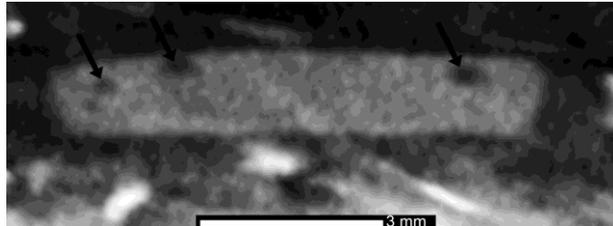


Abb. 4.19: Horizontales μ -RCT-Schnittbild einer Glaseinlage der Scheibenfibel aus Grab 1131 mit Gaseinschlüssen (siehe Pfeile) in der Glasmatrix.

Eine dreidimensionale Visualisierung der Objekte aus Keramik, Glas oder Mineralien über deren Grauwerte ist nur dann möglich, wenn sich das Material eindeutig von seiner Umgebung abhebt, was nur auf Gläser mit einem Anteil an Elementen hoher Ordnungszahl oder bei bestimmten Mineralien mit hoher Dichte zutrifft. Bei den hier vorliegenden Fällen ist zumeist das manuelle Segmentieren notwendig, um die Objekte freizustellen. Dies kann besonders bei Glasgefäßen aufgrund des sehr dünnen Materials schwierig und zeitintensiv sein. Dennoch ist es möglich, Glasgefäße in Blockbergungen darzustellen, wie dies der Fall des Sturzbechers aus Grab 1125 mit einer Wandstärke von nur 1,5 mm zeigt (Abb. 4.20, 4.21). Auch Verzierungen auf Perlen können visualisiert werden, wenn die Farben der unterschiedlichen Glasmassen bekannt sind. Keramische Objekte müssen aufgrund des geringen Grauwertunterschiedes manuell segmentiert werden, was dann auch mögliche Verzierungen in der Oberfläche erkennen lässt (Stelzner et al. 2010: 100).

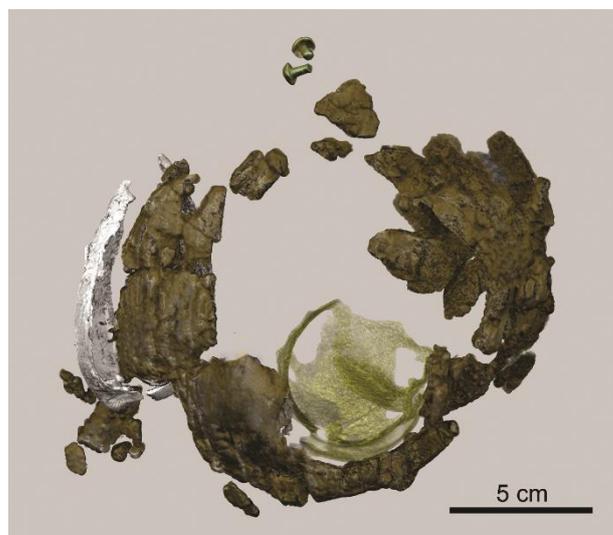


Abb. 4.20: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung der Blockbergung aus Grab 1125 mit schlecht erhaltener Keramik und Glasgefäß darin. Zudem eine Kaurischnecke und zwei Bronzeniete.

Ein Beispiel hierfür ist die Keramik aus Grab 170 (Abb. 4.22). Gleichmaßen trifft dies auf die meisten Steine und Mineralien zu, wobei die unregelmäßige und scharfkantige Form von Feuersteinen das manuelle Freistellen erschwert.

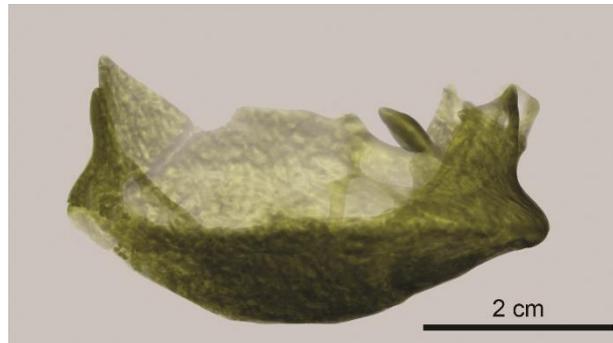


Abb. 4.21: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung des Sturzbecherbodens aus Grab 1125.

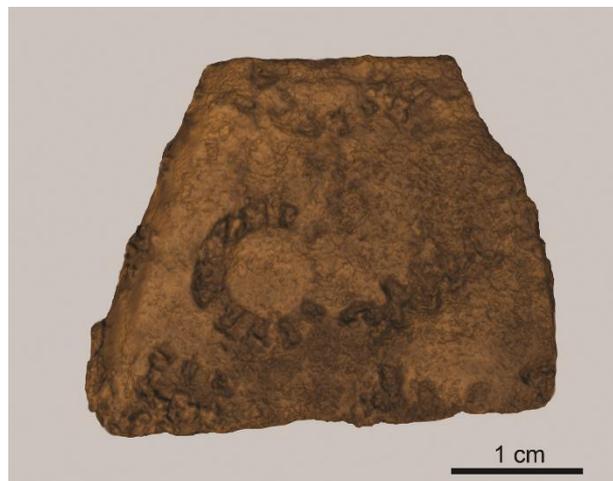


Abb. 4.22: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung der Stempelverzierung auf einer Keramikscherbe aus Grab 170.

Bei Gefäßen aus Glas und Keramik ist für eine archäologische Analyse die Form ausschlaggebend. Diese lässt sich bei intakten Objekten nachvollziehen – und auch bei Gefäßen, die in nur wenige Fragmente zerbrochen sind, kann sie rekonstruiert werden (Abb. 4.23).



Abb. 4.23: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung der Keramik aus Grab 45 im Fundzustand (links), rekonstruiert (Mitte) und im Querschnitt (rechts).

Für stark fragmentierte Objekte ist dies jedoch, wie bei den Metallobjekten bereits angesprochen, nur zu einem gewissen Grad möglich. Jedes einzelne Fragment muss hierfür als eigenständige geometrische Einheit segmentiert und exportiert werden. Das virtuelle Zusammenfügen von vielen Fragmenten, wie dies beispielsweise an dem Keramikgefäß aus Grab 45 versucht wurde, gestaltet sich zudem als schwierig und ist in einem vertretbaren zeitlichen Rahmen kaum möglich. Der interessante Ansatz der digitalen Rekonstruktion fragmentierter archäologischer Objekte anhand deren Oberflächenmodelle, wie von Velios/Harrison (2007) beschrieben, könnte womöglich auch für CT-Daten infrage kommen, um die Rekonstruktion stark fragmentierter Objekte zu ermöglichen.

4.1.3 Funde aus Materialien mit anorganischen und organischen Bestandteilen

Materialien, die sowohl aus anorganischen als auch organischen Bestandteilen bestehen, wie Knochen, Geweih oder Elfenbein, werden in den CT-Daten mit einem ähnlichen oder dunkleren Grauwert wie die umgebende Erde dargestellt. Sie lassen sich zumeist über ihre Form oder auch, bei entsprechender Auflösung der Daten, über ihre charakteristischen Strukturen identifizieren, falls solche vorhanden sind. In dieser Weise ist die Identifikation der in den Blockbergungen enthaltenen menschlichen und tierischen Knochen möglich (Abb. 4.24).

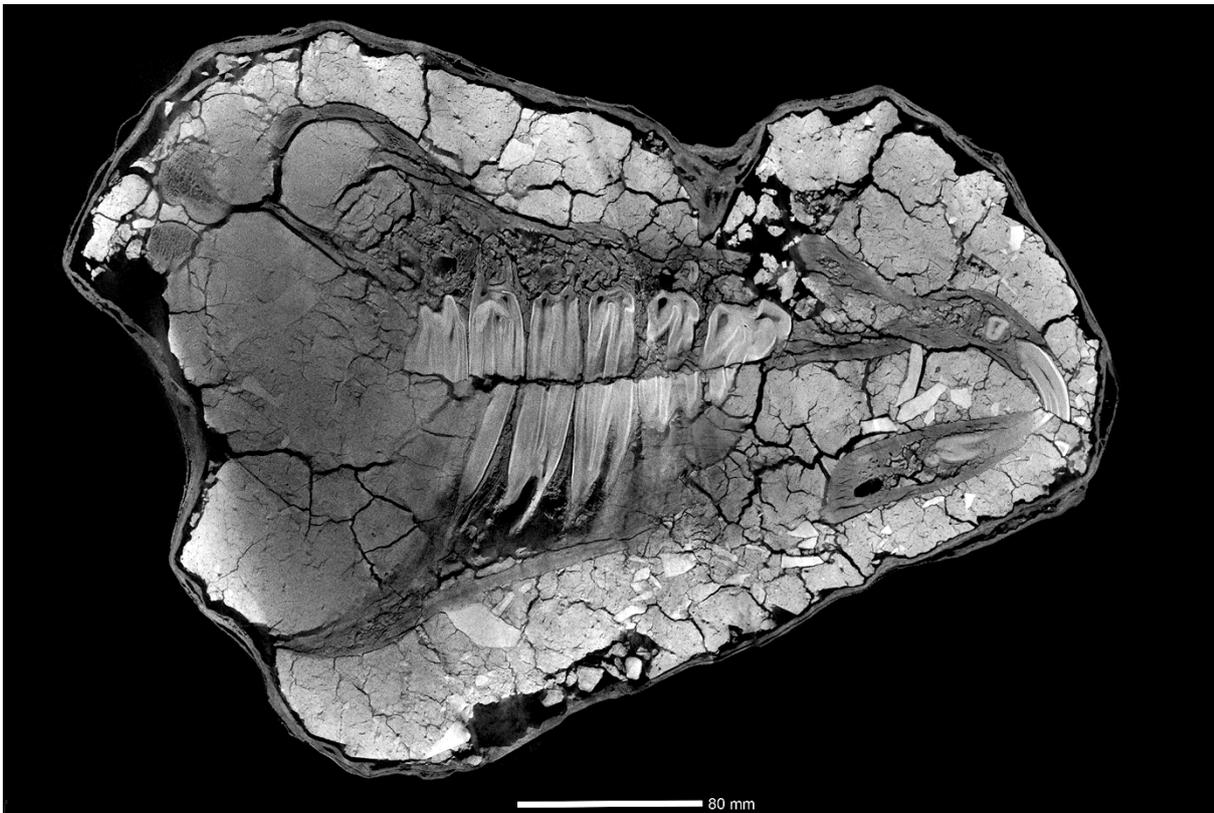


Abb. 4.24: Frontales μ -RCT-Schnittbild des Pferdeschädels aus Grab 640.

Eine anthropologische Analyse erfolgte nicht über die CT, da diese bereits an geborgenen Knochen durchgeführt wurde, wobei auch im Bereich der Anthropologie Informationen beispielsweise zu Alter und Geschlecht anhand der CT zu gewinnen sind (Lynnerup et al. 1997).

Sehr häufige Funde sind Käämme, die aufgrund ihrer Form als solche angesprochen werden können. Eine Unterscheidung, ob diese aus Knochen oder Geweih gefertigt sind, ist in solchen Fällen möglich, wenn sich Bereiche der Spongiosa erhalten haben. Aufgrund des schnelleren Wachstums unterscheidet sich die Spongiosa des Geweihs von der Knochenspongiosa durch eine parallel angeordnete röhrenförmige Struktur. Die Spongiosa von Knochen weist hingegen eine eher verzweigte Netzwerkstruktur aus dünnen Streben auf (Abb. 4.25). Im Querschnitt von Geweih zeigen sich die Röhren als nebeneinander angeordnete Löcher (O'Connor 1987: 9).

Eine solche Struktur ist in vielen Fällen an den Unterseiten von Griff- und/oder Futteralleisten zu erkennen. Es gibt jedoch auch Fälle wie beispielsweise den Kamm aus Grab 350, welcher Bereiche der Spongiosa auch in Teilen der Zinkenplatten und auch in den Zinken selber aufweisen (Abb. 4.26). Deutlich sind röhrenartige Strukturen und keine netzartige Struktur zu sehen, was darauf schließen lässt, dass hier Geweih als Material zugrunde liegt. Diese längs gerichteten Strukturen sind bis auf 21 Ausnahmen ohne Spongiosa an den insgesamt 131 tomographierten Käämmen zu erkennen. In einigen Fällen ist wegen einer zu geringen Auflösung der CT-Daten nicht ganz klar, ob es sich um Risse in stark abgebauter Kompakta oder um die Röhren der Spongiosa handelt.

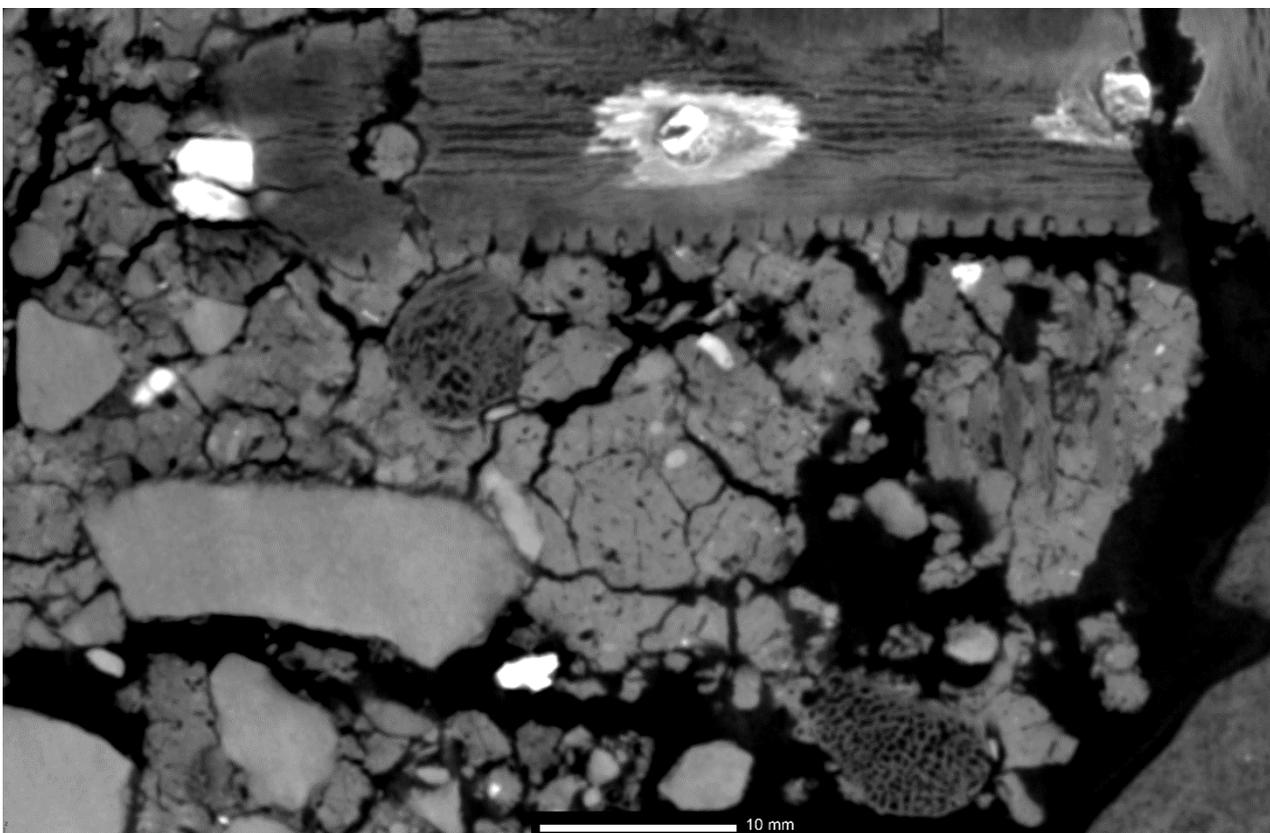


Abb. 4.25: Frontales μ -RCT-Schnittbild der Geweihspongiosa in der Griffplatte des Kamms aus Grab 350 (oben) und der Spongiosa in Knochen unterhalb davon.

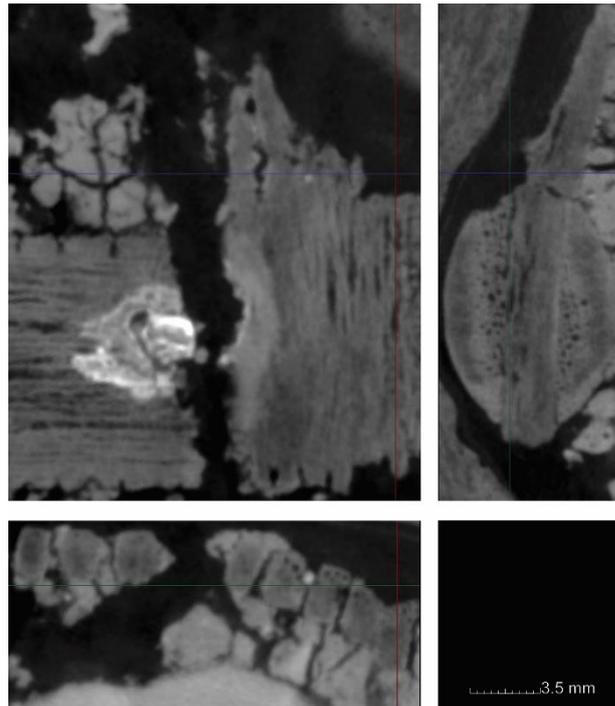


Abb. 4.26: μ -RCT-Schnittbilder der Geweihpongiosa in Griff- und Zinkenplatte sowie in den Zinken des Kammes aus Grab 350.

Nur an drei Kämmen ist eine eher netzartige Spongiosa auszumachen, wie dies etwa bei dem Kamm aus Grab 354 an dessen Griffleiste der Fall ist (Abb. 4.27). Die feinporige Struktur spricht hier jedoch ebenfalls für Geweih. Zudem füllt die Spongiosa den gesamten Innenbereich aus, was sich so nur bei Geweihstangen findet.²⁸

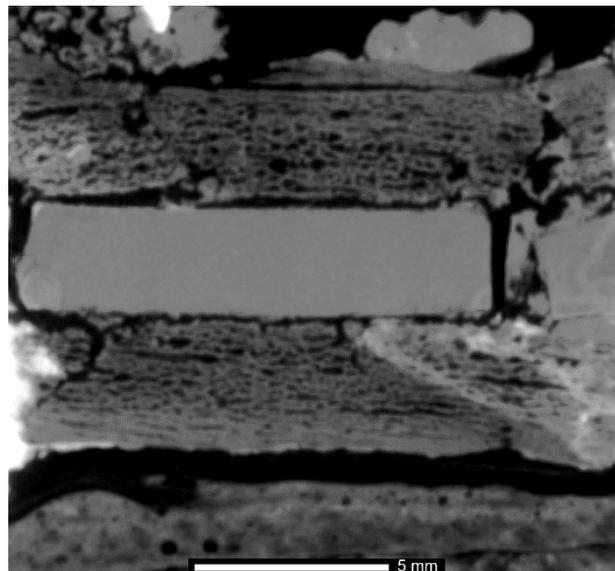


Abb. 4.27: Horizontales μ -RCT-Schnittbild der Spongiosa der Griffplatten und des kompakten Materials der Zinkenplatte des Kammes aus Grab 354.

²⁸ Freundliche Mitteilung Dr. Elisabeth Stephan (15. Oktober 2015).

Bemerkenswert ist in diesem Fall, dass für die Zinkenplatten kompaktes und somit widerstandsfähigeres Material verwendet wurde, wohingegen die Griffleisten mit einem großen Anteil an Spongiosa gefertigt wurden. Eine Unterscheidung der Kompakta von Geweih und Knochen ist nur schwer möglich. Außerdem ist im Fall der Zinkenplatte des Kammes aus Grab 350 aufgrund der hohen Dichte und des kompakten Erscheinungsbildes ein anderes Material wie das Dentin von Elfenbein nicht auszuschließen. Die Verwendung von Elfenbein für die Zinken ist jedoch eher ungewöhnlich, da Geweih elastischer ist als Elfenbein und Konchen und sich somit besser eignet (MacGregor 1985: 28 f.).²⁹ Insgesamt lassen diese Ergebnisse den Schluss zu, dass die Käämme aus Lauchheim in der Mehrzahl aus Geweih gefertigt wurden.

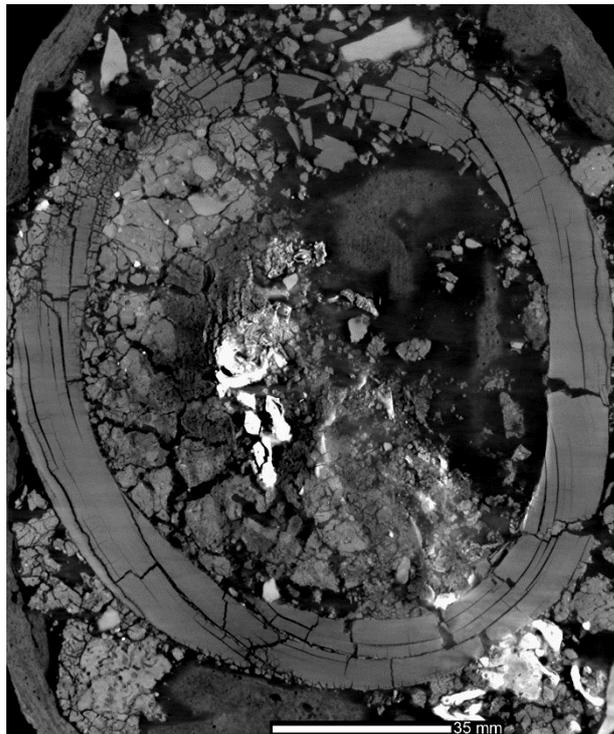


Abb. 4.28: Frontales μ -RCT-Schnittbild des Elfenbeinringes aus Grab 474/479 mit typischem Bruchmuster und Delaminierung entlang der Owenringe.

Eine weitere häufige Fundgruppe sind Geweisscheiben, die bei den hier untersuchten Objekten ausnahmslos aus der Rose von Geweihen hergestellt wurden (Abb. 4.30; Theune-Großkopf 1994: 92). Elfenbeinringe, die sowohl einzeln als auch um eine Zierscheibe an Gürtelgehängen vorkommen, können zumeist über ein typisches Bruchmuster und die Delaminierung entlang der Owenringe erkannt werden (Drauschke/Banerjee 2007: 112), welche in den CT-Daten sichtbar sind (Abb. 4.28).

²⁹ Freundliche Mitteilung Dr. E. Stephan (15. Oktober 2015).

Auch Zähne, wie etwa der Bärenzahn aus Grab 447, können Bestandteil von Gürtelgehängen sein und lassen sich über die Form identifizieren (Abb. 4.29). Zu bedenken ist hierbei, dass diese Materialien in Blockbergungen nur dann zu bestimmen sind, wenn sie sich aus der Form des Objekts erschließen lassen oder im Fall von Kämmen aus Knochen oder Geweih Anteile der Spongiosa bzw. bei Elfenbein die Owenringe vorliegen. Ist dies nicht gegeben und/oder haben sich nur kleine oder stark abgebaute Bereiche solcher Materialien erhalten, erfordert die Bestimmung über deren Mikromorphologie höhere Auflösungen als dies bei Objekten in Blockbergungen möglich ist. Im Fall von Elfenbein war dies bisher nur anhand der CT mit Synchrotronstrahlung möglich (Reiche et al. 2011).



Abb. 4.29: Frontales μ -RCT-Schnittbild des Bärenzahns und der Kaurischnecke aus Grab 447.

Weitere Objekte, die dieser Materialgruppe zugeordnet werden, wie die Schalen von Muscheln und Schnecken, Korallen oder Perlen sowie Perlmutter, bestehen überwiegend aus Calciumcarbonat und einem geringen Anteil an Protein (Kühn 2001: 301). Die im frühen Mittelalter als Anhänger an Gürtelgehängen anzutreffende Kaurischnecke ist über ihre Form zu erkennen (Abb. 4.29). Mögliche Perlen oder Einlagen aus Koralle konnten hier nicht nachgewiesen werden und sind bei den erzielten Auflösungen wohl nur schwer zu identifizieren. Die μ -RCT wurde jedoch an einzelnen eisenzeitlichen Objekten, die wegen ihrer geringen Größe mit einer hohen Auflösung gemessen werden konnten, bereits als Untersuchungsmethode von Koralleneinlagen angewendet (Bente et al. 2015).



Abb. 4.30: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung des Kammes aus Grab 907 mit Doppelkreisaugenverzierung auf den Futteralleisten.

Bei den Materialien aus anorganischen und organischen Bestandteilen ist der Grauwertunterschied zur umgebenden Erde in den Blockbergungen zumeist nicht groß genug, um diese über einen Schwellwert in VGStudio MAX zu segmentieren. Für eine dreidimensionale Darstellung müssen die

manuellen Werkzeuge herangezogen werden, was zum Beispiel bei der unregelmäßigen Form eines Beinkammes oder der dünnen Schale einer *Cypraea* zeitaufwendig sein kann. Das Freistellen lässt aber auch eine Visualisierung der typischen Kreisäugen und Zirkelschlagmuster in den Beinscheiben oder den Futteralleisten der Beinkämme zu (Abb 4.30, 4.31; Theune-Großkopf 1994).

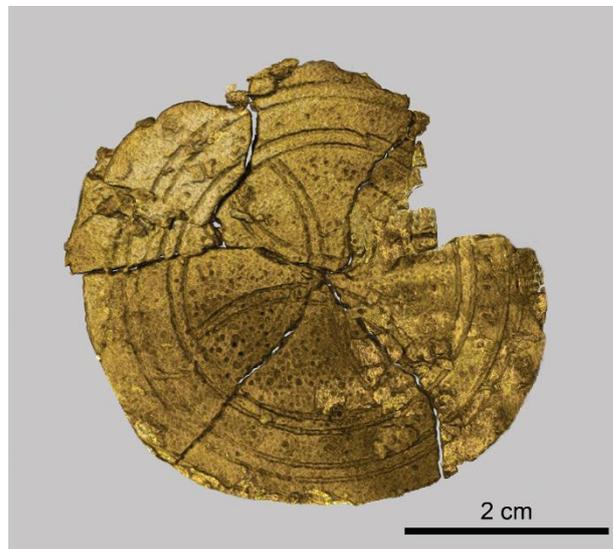


Abb. 4.31: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung der Geweihscheibe aus Grab 988 mit Verzierung aus Zirkelschlagornamentik und Kreisäugen.

Wie bei den Funden aus Metall, Glas oder Keramik ist die Rekonstruktion der Form feinteilig fragmentierter Objekte nicht ohne Weiteres möglich. Anders als bei diesen Fundgattungen ist eine Objektansprache von Kämmen, Scheiben oder Ringen in den meisten Fällen aber auch ohne die Rekonstruktion der Fragmente machbar. Weniger stark fragmentierte Objekte lassen sich in einem vertretbaren Zeitrahmen zusammenfügen.

4.1.4 Funde aus organischen Materialien

Organische Materialien ergeben in den CT-Daten aufgrund ihrer geringen Dichte keinen allzu großen Kontrast und werden weniger hell als Erde oder Steine dargestellt. Dies erlaubt es, beispielsweise Bernsteinperlen von Glasperlen zu unterscheiden (Abb. 4.32).

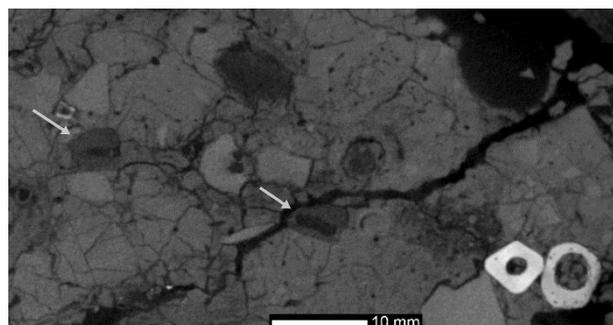


Abb. 4.32: Frontales μ -RCT-Schnittbild der Bernstein- (dunkel, siehe Pfeile) und Glasperlen aus Grab 1220.

Die Identifikation organischer Schichten in Blockbergungen hängt vor allem von deren Erhaltungszustand ab, da eine Bestimmung grundsätzlich über die charakteristischen Strukturen dieser Materialien möglich ist. Bei den Erhaltungsbedingungen im Gräberfeld von Lauchheim haben sich diese Strukturen in den Blockbergungen hauptsächlich aufgrund der Mineralisierung durch Korrosionsprodukte von umgebenden Metallobjekten erhalten (Gillard et al. 1994; Fischer 1997: 13–18; O'Connor et al. 2015: 395 f.). Über diese Strukturen sind die Materialien voneinander zu unterscheiden und es konnten organische Schichten aus Fell, Holz, Pflanzenhalmen und Textil bestimmt werden (Abb. 4.33).

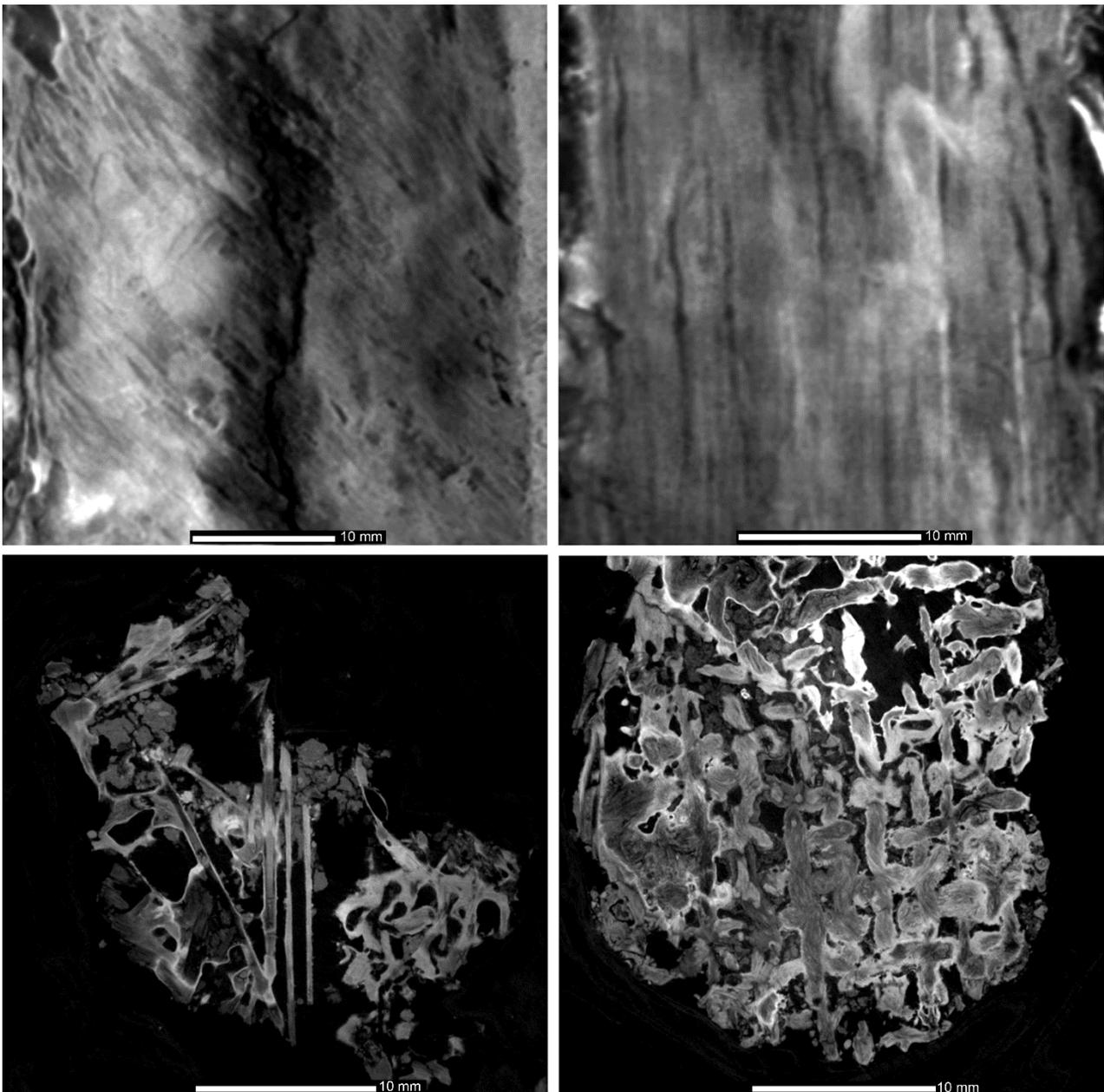


Abb. 4.33: Frontale μ -RCT-Schnittbilder organischer Reste in Blockbergungen: Fell (links oben), Holz (rechts oben), Pflanzen (links unten) und Textil (rechts unten).

Stark abgebaute organische Schichten lassen sich dagegen nicht eindeutig identifizieren. Bereiche mit dunklerem Grauwert als die Erde können jedoch ein Hinweis auf das Vorhandensein von organischen Materialien sein. Zudem können Position und Form solcher Bereiche weiteren Aufschluss über das zugrunde liegende Material liefern. Insbesondere Leder, das bei den hier erzielten Auflösungen keine charakteristische Struktur aufweist, kann auf diese Weise angesprochen werden, wie dies etwa bei Lederriemen, Aufhängungen oder Bestandteilen von Gürteln oder Spatha-, Sax- oder Messerscheiden der Fall ist (Abb. 4.34).

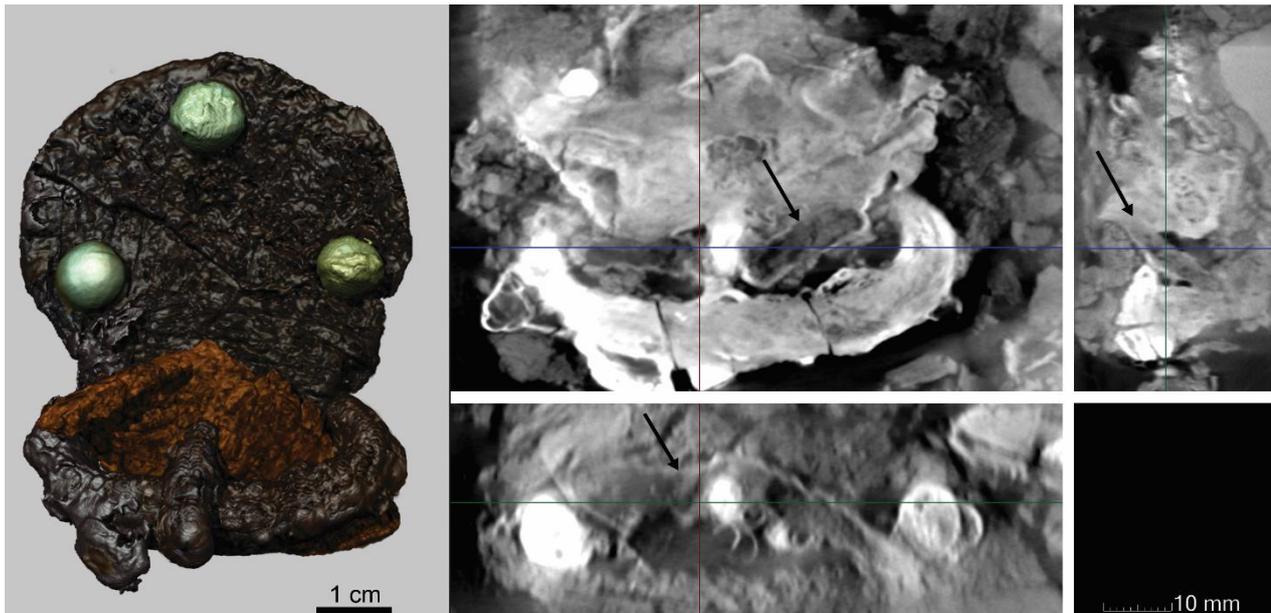


Abb. 4.34: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung und μ -RCT-Schnittbilder des Lederriemens (siehe Pfeile) um den Dorn innerhalb des Bügels der Schnalle aus Grab 345.

Horn ist ebenfalls nicht ohne Weiteres zu identifizieren, da dessen feine Strukturen nur bei einer entsprechenden Auflösung erkennbar sind. Abbildung 4.35 zeigt die Messung eines rezenten Horns und ein organisches Material, das mineralisiert an einem Messergriff vorliegt. Dieses stellt sich ähnlich dar und weist ebenfalls die feinen längs gerichteten Strukturen auf und wurde somit als Horn angesprochen. Eine Unterscheidung von Horn zu anderen Materialien aus Keratin wie Hufe oder Schildpatt, wie dies von O'Connor et al. (2015: 396–405) mikroskopisch dargestellt wurde, ist anhand der CT bei den hier erzielten Auflösungen nicht möglich. Ob sich bei Messungen mit einer ausreichend hohen Auflösung Informationen zur Identifizierung unterschiedlicher Hornarten gewinnen lassen, könnte in weiteren Untersuchungen geklärt werden.

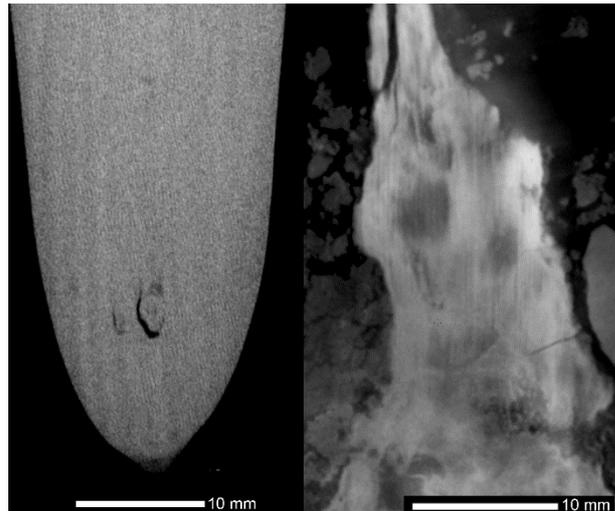


Abb. 4.35: Frontale μ -RCT-Schnittbilder von rezemtem Horn (links) und Hornreste am Griff des Messers aus Grab 505.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Untersuchung von organischen Resten zu beachten ist, sind Metallobjekte mit hoher Dichte in deren unmittelbaren Umgebung. So können dichte Metalle wie Bronze oder Silber zu Schatten führen, welche das Erkennen von organischem Material verhindern. Ein Beispiel hierfür ist das organische Material auf der Zierscheibe aus Grab 44. Dieses wurde erst nach der Bergung im Zentrum der Zierscheibe erkannt und ist in den CT-Daten nicht sichtbar (Abb. 4.4, S.46). Demgegenüber konnte aber direkt an Bronzeobjekten erhaltenes Textil bestimmt werden, das selbst nach der Öffnung der Blockbergung kaum zu identifizieren ist. In der Regel ist an korrodierten Eisenobjekten mineralisiertes organisches Material gut zu erkennen. Großen Einfluss auf die Darstellung von organischem Material haben neben dem Grad der Mineralisierung und dem Erhaltungszustand der Durchmesser und die Stärke der Blockbergung, da eine hohe Auflösung und ein guter Kontrast Voraussetzung für eine Identifizierung sind (Stelzner et al. 2010: 97 f.).³⁰ Die dreidimensionale Visualisierung organischer Materialien ist über ein manuelles Segmentieren möglich. Der dreidimensionale Charakter einer organischen Schicht, wie etwa der Faltenwurf eines Gewebes, kann so hervorgehoben werden. Oft ist das Freistellen jedoch gerade bei mineralisierten organischen Resten aufwendig und das Ergebnis nicht wirklich aussagekräftig, da die Oberfläche etwa mit Korrosion bedeckt und nicht klar von der organischen Schicht zu unterscheiden ist. In solchen Fällen ist die Darstellung in zweidimensionalen Schnittbildern wesentlich aussagekräftiger, wobei hier das Ausrichten des Datensatzes entscheidend ist, da sich die Schichten meistens unregelmäßig über mehrere Ebenen erstrecken. Das Übereinanderlegen von mehreren Schnittbildern kann hier zu einer Verbesserung der Darstellung beitragen.

³⁰ Zum Einfluss dichter Materialien und der Größe der Blockbergung siehe Kapitel 2.4 Qualität und Auswertbarkeit.

4.1.5 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Eine Objektansprache über die μ -RCT kann in den meisten Fällen mit hoher Wahrscheinlichkeit erfolgen – anhand der Materialdichte oder von charakteristischen Strukturen, anhand von Form und Funktion des Objekts, dessen Lage im Befund sowie unter Heranziehen der Grabungsdokumentation und Vergleichsfunden.

Für die Materialbestimmung liefert die μ -RCT die Dichtedifferenzen der unterschiedlichen Materialien in Form von verschiedenen Graustufen. Je dichter das Material, desto heller wird das Objekt dargestellt und liefert somit einen Hinweis auf das zugrunde liegende Material, wobei eine genaue Bestimmung anhand der Schwächung der Strahlung nicht möglich ist. Die in der medizinischen RCT angewendete Hounsfield-Skala hingegen (Hounsfield 1973), die Körpergewebe anhand der Schwächung der Strahlung in Hounsfield-Einheiten einordnet, lässt eine Bestimmung der unterschiedlichen Gewebe des menschlichen Körpers zu, da deren Grauwerte klar definiert sind. Eine Bestimmung der Hounsfield-Einheiten unterschiedlicher Materialien, die für die Untersuchung von mit Mumien vergesellschafteten Objekten von Bedeutung sind, wurde von Gostner et al. (2011) vorgenommen, wobei Metalle eine zu hohe Dichte aufweisen, als dass sie in einem medizinischen Computertomographen definiert werden könnten. Demgegenüber wurden für eine Vielzahl nicht-metallischer Materialien, wie zum Beispiel organische Materialien, Knochen und Ähnliches, verschiedenste Mineralien sowie Keramik die Hounsfield-Einheiten angegeben. Die eindeutige Bestimmung der unterschiedlichen Materialien ist jedoch aufgrund der zum Teil zu ähnlichen Grauwerte, der Inhomogenität der Stoffe sowie unterschiedlicher Erhaltungszustände allein über die Hounsfield-Skala nicht möglich, kann aber Anhaltspunkte auf ein zugrunde liegendes Material liefern. Auch industrielle CT-Systeme können so kalibriert werden, dass Grauwerte in etwa mit der Dichte eines Materials korrespondieren, wobei dies nur bei festgelegter Geometrie und für eine bestimmte Anwendung ohne Weiteres möglich ist. Ein Vergleich zu einer Referenzskala ist wegen der chemischen Variabilität archäologischer Materialien und der notwendigen unterschiedlichen Messparameter nur eingeschränkt möglich (Ketcham/Carlson 2001: 389).

Eine Einschränkung der μ -RCT besteht darin, dass zwar die Form eines Objekts nachvollziehbar wird, nicht aber dessen reale Färbung. Gerade bei Perlen stellt dies ein bisher nicht zu lösendes Problem dar, was zur Folge hat, dass Blockbergungen mit Perlen geöffnet und diese für die Bestimmung der Farben geborgen werden müssen. Zudem ist die Farbe von Keramik oder Mineralien aus den CT-Daten nicht nachzuvollziehen. Gleiches trifft für Objekte zu, die Glaseinlagen, Email oder Einlagen aus Mineralien aufweisen. Gerade was Mineralien betrifft, ist eine Bestimmung des Materials mitunter unmöglich, wenn die Farbe des Objekts nicht bekannt ist.

Neben dem zugrunde liegenden Material ist besonders die Form eines Objekts ausschlaggebend, um seine Funktion zu klären. Für eine dreidimensionale Darstellung müssen die unterschiedlichen Materialien eines Objekts segmentiert werden, was bei weniger dichten Materialien wie Keramik, Bein oder Organik einen erheblichen Zeitaufwand darstellen kann. Neben der Form lassen sich

dann aber auch Details wie Oberflächenverzerrungen, herstellungstechnische Merkmale oder mögliche Gebrauchsspuren sichtbar machen. Das manuelle Freistellen erlaubt des Weiteren die Darstellung von Objekten, die aus unterschiedlichen Materialien hergestellt wurden, wie etwa Scheibfibern mit Granateinlagen (Abb. 6.4).

Bei fragmentierten Objekten kann eine Rekonstruktion des Fundes erfolgen, was bei vierteilig zerbrochenen Objekten allerdings einen erheblichen Zeitaufwand bedeuten kann. Dies trifft hier vor allem auf Objekte zu, die nicht im Befundzusammenhang, sondern aufgrund ihres fragmentierten Zustands einzeln im Block geborgen wurden. Hierbei handelt es sich zumeist um Gefäße aus Keramik und Glas, Beinkämme oder auch Schildbuckel. Ein digitales Zusammensetzen der Fragmente ist erfahrungsgemäß nicht praktikabel, wenn diese zu kleinteilig zerbrochen sind, da die exakte virtuelle Anpassung der Bruchkanten noch mehr Zeit in Anspruch nimmt als die manuelle Freilegung und Restaurierung. Insbesondere die Anpassung schmaler Bruchkanten, wie sie beispielsweise bei Glasgefäßen vorliegen ist problematisch. Demzufolge sind bei der Aufarbeitung der Blockbergungen des Gräberfeldes Lauchheim die fragmentierten Objekte, für deren typologische Ansprache eine Rekonstruktion erforderlich ist, herkömmlich freigelegt und restauriert worden. Dies betrifft Keramik- und Glasgefäße oder Schildbuckel. Bei den Kämmen wurde entschieden, diese ausschließlich anhand der μ -RCT zu dokumentieren, weil eine herkömmliche Bearbeitung im vorgegebenen Zeitrahmen nicht möglich war. Es wurden jedoch nur diejenigen Objekte segmentiert und dreidimensional dargestellt, die in einem Befundzusammenhang mit anderen Objekten geborgen wurden. Auf eine Rekonstruktion der feinteilig fragmentierten Kämmen wurde verzichtet, die einzeln geborgenen Beinkämme wurden ausschließlich in zweidimensionalen Schnittbildern visualisiert. Organische Schichten wurden segmentiert und dreidimensional dargestellt, wenn dies in einem vertretbaren Zeitraum möglich und ein aussagekräftiges Ergebnis zu erwarten war. Die übrigen organischen Schichten konnten in den zweidimensionalen Schnittbildern visualisiert werden, wenn der Datensatz hierfür dementsprechend registriert wurde bzw. eine virtuelle Ebene an die Schicht angelegt und anhand dieser ausgerichtet werden konnte.

Die detaillierte Darstellung von Oberflächen wie Materialstrukturen ist abhängig von dem Erhaltungszustand der Objekte und der Qualität der CT-Daten. Ausschlaggebend sind die Auflösung und der Kontrast sowie mögliche Artefakte einer Messung, was durch den Durchmesser und die Stärke der Blockbergung, den enthaltenen Materialien sowie die verwendete CT-Anlage beeinflusst wird. Auch die Bodenbeschaffenheit kann, etwa durch einen hohen Feuchtegehalt oder einen hohen Anteil an Steinen, die Qualität der CT-Daten beeinflussen. Gerade für die dreidimensionale Darstellung ist in den meisten Fällen eine Nachbearbeitung durch manuelles Segmentieren notwendig, da die Freistellung allein über die Grauwerte zu einer verfälschten Darstellung der Oberfläche führen kann. Ein prominentes Beispiel hierfür ist die Untersuchung der Nofretete. Hier zeigten Illerhaus et al. (2009), dass eine aus den Grauwerten ermittelte Darstellung der Oberfläche, die als „zweites Gesicht der Nofretete“ bezeichnet wurde, auf einem verfälschten Ergebnis beruht.

4.2 Stratigraphie

4.2.1 Lage und Ausrichtung der Objekte

Neben der Objektansprache bilden die stratigraphische Abfolge und die Ausrichtung der Funde die Grundlage für eine archäologische Auswertung. Entgegen der zweidimensionalen Radiographie kann die μ -RCT sehr detaillierte Informationen zur Ausrichtung und stratigraphischen Lage im Block geborgener Objekte liefern.

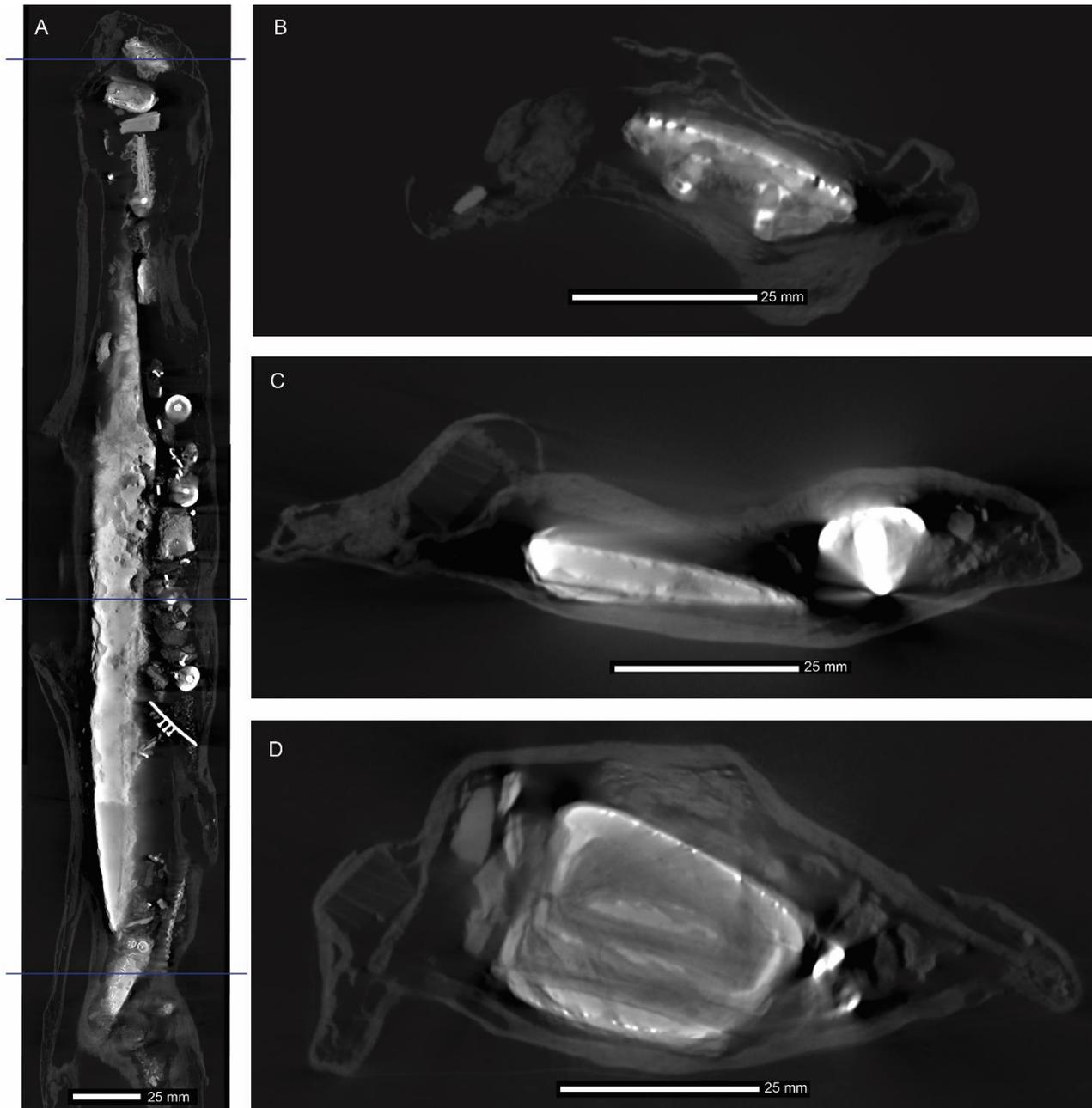


Abb. 4.36: μ -RCT-Schnittbilder der Ausrichtung und Lage der Objekte in der Blockbergung aus Grab 15. A: frontaler Schnitt der Blockbergung. B: horizontaler Schnitt eines Beschlags. C: horizontaler Schnitt der Saxklinge und eines Ziernietes. D: horizontaler Schnitt des Riemendurchzugs, in dem sich der Beschlag der Schnalle des Spathagurtes befindet. Stratigraphisch darunter befindet sich die Riemenzunge des Gurtes mit der Schauseite nach unten zur Grabsohle.

So ist es in den meisten Fällen bereits in zweidimensionalen Schnittbildern möglich, die Ausrichtung eines Objekts im Befund zu bestimmen. Ein Beispiel hierfür ist der Sax mit Aufhängung und Spathagarnitur aus Grab 15. Durch das Ausrichten des Datensatzes auf die einzelnen Objekte lassen sich in den zweidimensionalen Schnittbildern meist schon die entscheidenden Hinweise auf die Form und die Schauseite eines Objekts erfassen. So ist in den Schnittbildern erkennbar, in welcher Richtung der Sax mit seiner Spitze ausgerichtet ist und auf welcher Seite sich die Schneide befindet (Abb. 4.36).

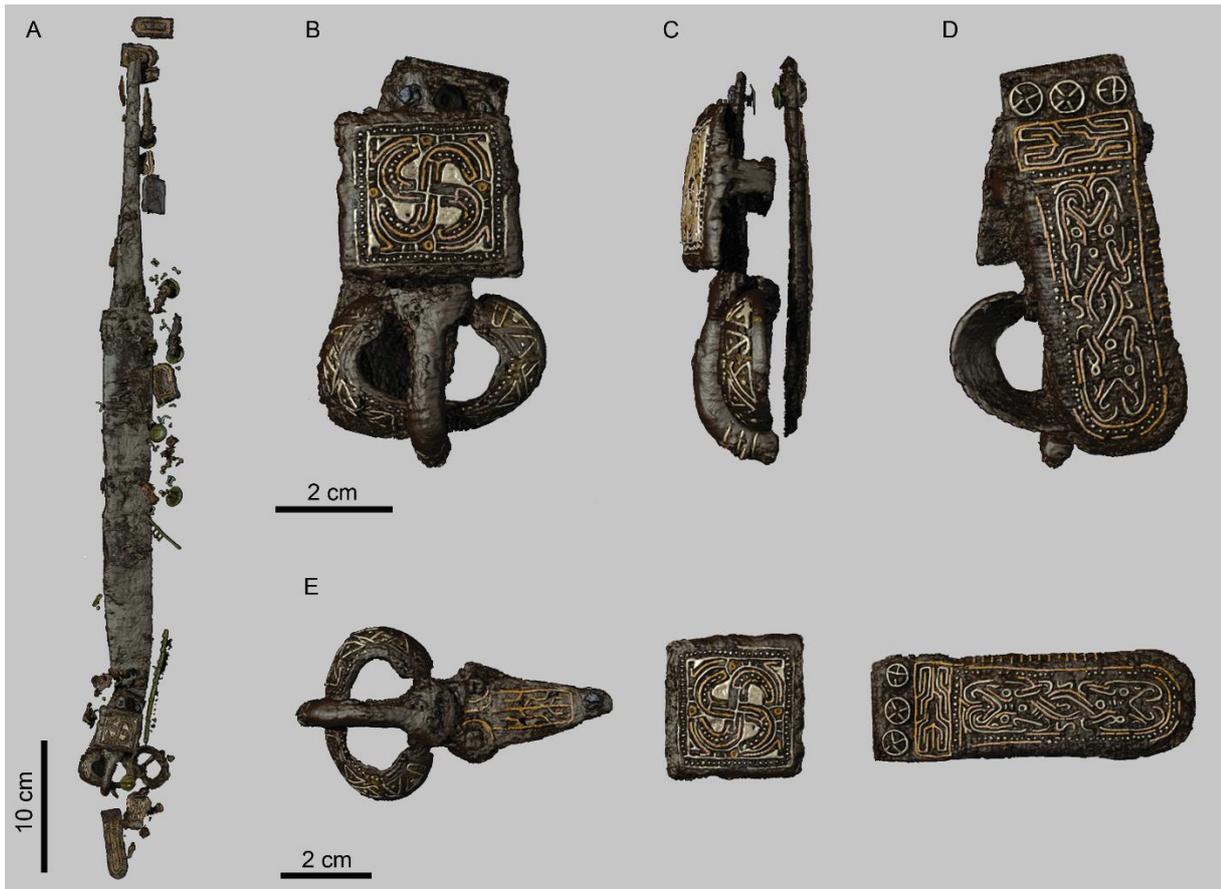


Abb. 4.37: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung der Objekte in der Blockbergung aus Grab 15 (A) sowie des Spathagurtes in Fundlage (B–D) und aus der Fundsituation herausgelöst (E).

Bei den Beschlägen und Riemenzungen sind die Rundungen zu erkennen und anhand der Tauschierung wird offensichtlich, in welche Richtung die Schauseite des Objekts ausgerichtet ist. Weitere Hinweise bieten die Ösen an der Unterseite oder die Niete am oberen Ende, die zudem eine Unterscheidung von Beschlägen und Riemenzungen zulassen. Gleichmaßen ist die Bestimmung der Ausrichtung der Schnallen anhand des Schnallendorns und der Form des Schnallenbügels möglich. Darüber hinaus lassen sich die Lage der Objekte zueinander und deren stratigraphische Abfolge bestimmen, wie etwa die Bestandteile des Spathagurtes. Es ist nachvollziehbar, dass sich der rhombische Schnallenbeschlag in dem Bügel des beweglichen quadratischen Riemendurchzugs befindet, der stratigraphisch über dem Schnallenbeschlag liegt und diesen komplett bedeckt.

Beide Objekte weisen mit ihrer Schauseite nach oben. Die zum Spathagurt zugehörige Riemenzunge liegt stratigraphisch unter der Schnalle mit der Schauseite nach unten und weist mit ihrer Rundung in dieselbe Richtung wie der Schnallendorn (Gauß 2013: 165). Für den Betrachter wird die Befundsituation aber vor allem dann nachvollziehbar, wenn die Objekte bearbeitet, also segmentiert und mit Falschfarben versehen sind (Abb. 4.37).

Organisches Material des Riemens ist in diesem Fall nicht zu erkennen. Kann solches nachgewiesen werden, dann kann auch die stratigraphische Position des organischen Materials bestimmt werden, wie dies etwa der Lederriemen des Gehänges aus Grab 337 verdeutlicht. Hier lässt sich in den sagittalen Schnittbildern nachvollziehen, dass sich der Lederriemen stratigraphisch über wie unter den Ringen befindet und dass der untere Riemen durch eine Öffnung im oberen Riemen verläuft (Abb. 4.38).

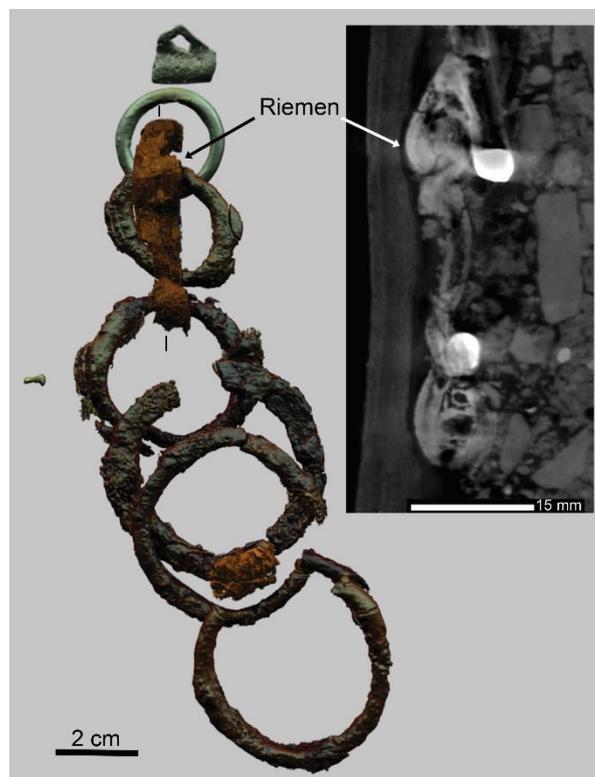


Abb. 4.38: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung und sagittales CT-Schnittbild des Lederriemens an den Ringen des Gehänges aus Grab 337.

4.2.2 Mikrostratigraphie organischer Schichten

Organische Materialien liegen oft in Schichtpaketen bzw. Konglomeraten vor und sind auch bei der manuellen Freilegung einer Blockbergung nicht ohne Weiteres voneinander zu unterscheiden. Ferner ist deren stratigraphische Abfolge oft nur schwer zu erfassen. Für eine Aufnahme aller Schichten ist es erforderlich, die zuoberst liegenden Schichten abzutragen, um die darunter liegenden Schichten bestimmen zu können. Organische Materialien können zudem durch Korrosionsprodukte bedeckt sein und erst durch eine chemische Freilegung durch Komplexbildner sichtbar werden. In

diesem Fall bietet die μ -RCT bei entsprechenden Erhaltungsbedingungen und einer ausreichenden Qualität der Daten die Möglichkeit, die Stratigraphie solcher Schichten ohne Eingriff zu analysieren. So wurde beispielsweise die stratigraphische Abfolge eines Schichtpakets bestehend aus Leder, Textil und Pflanzenmaterial oder die Anzahl der Schichten eines Textils beschrieben (Peek et al. 2009: 570 f.).

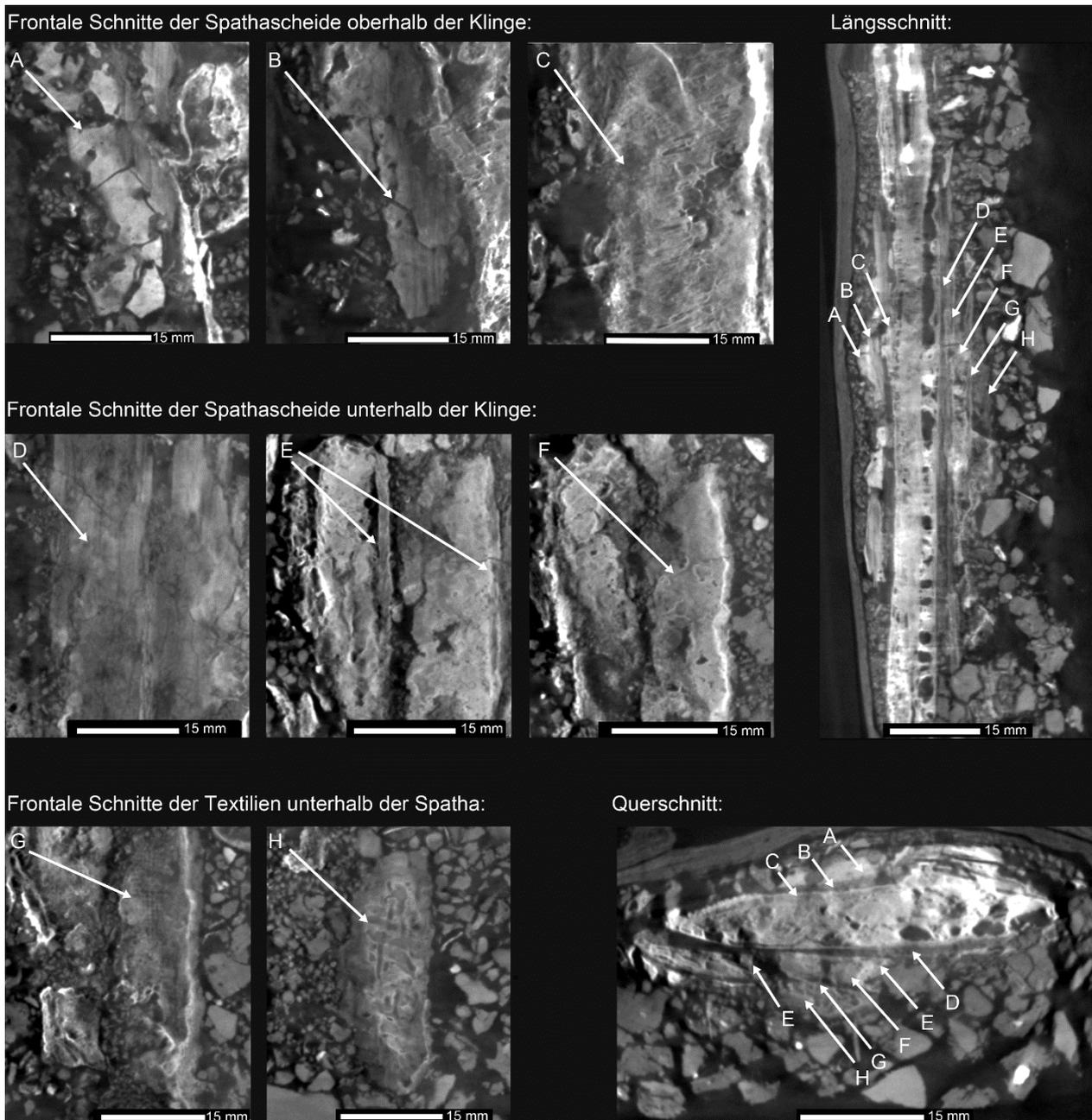


Abb. 4.39: μ -RCT-Schnittbilder der Abfolge der organischen Schichten an der Klinge der Spatha aus Grab 345 von oben nach unten: Leder (A), Holz (B), Fell (C), Holz (D), Schnüre (E), Leder (F), Textil, fein (G), Textil, grob (H).

Gerade bei der Analyse komplexer Fundsituationen, wie sie hier vor allem bei Blockbergungen mit Spathen vorliegen, kann die Abfolge der unterschiedlichen organischen Schichten nachvollzogen werden. Das Beispiel aus Grab 335 verdeutlicht die organischen Schichten, die sich stratigraphisch über und unter der Spatha erhalten haben (Abb. 4.39).³¹ Es ist jedoch zu beachten, dass dies wie beschrieben auf organische Materialien beschränkt ist, die sich anhand ihrer Strukturen identifizieren lassen. Dies erfordert einen bestimmten Erhaltungszustand, was hier durch die Mineralisierung der organischen Schichten gegeben ist. Ob eine mikrostratigraphische Analyse an stark abgebauten und/oder unter Feuchtbodenbedingungen erhaltenen organischen Schichten, wie sie von Banck-Burgess (2010) beschrieben wird und an dem Grab 974 aus Lauchheim vorgenommen wurde (Banck 1998; Banck-Burgess 2009: 646–650), möglich ist, erscheint aufgrund eines zu geringen Kontrasts und den hier erzielten Auflösungen fraglich.

4.2.3 Stratigraphie im Befund

Die Untersuchung der stratigraphischen Situation im Befund anhand der μ -RCT von Blockbergungen erlaubt in bestimmten Fällen Rückschlüsse hinsichtlich der Grablegung (Brather 2013: 219 f.). Einen Einblick in den Ablauf eines Bestattungsvorganges gewährt beispielsweise der zuvor beschriebene Spathagurt der Spathagarnitur vom Typ Civezzano aus Grab 15 (Abb. 4.37). Dieser erlaubt die Aussage, dass der Spathagurt aufgewickelt bzw. zusammengelegt auf der Saxspitze deponiert wurde und wie die Spatha nicht angelegt war (Gauß 2013: 165). Aussagekräftige Erkenntnisse können sich vor allem dann ergeben, wenn sich Knochen des Bestatteten mit in der Blockbergung befinden. Die stratigraphische Analyse der vierteiligen Gürtelgarnitur aus Grab 144 zeigt, dass diese dem Individuum angelegt war. Belegt werden kann dies durch die Position eines Rückenbeschlags unter dem Becken (Abb. 4.40). Spatha und Sax hingegen wurden auf dem Leichnam deponiert (Ebinger-Rist/Stelzner 2013: 91; Gauß 2013: 164).

³¹ Zur Untersuchung organischer Schichten an Spathaklingen siehe auch Kapitel 5.2 Untersuchung der Spathabestandteile.

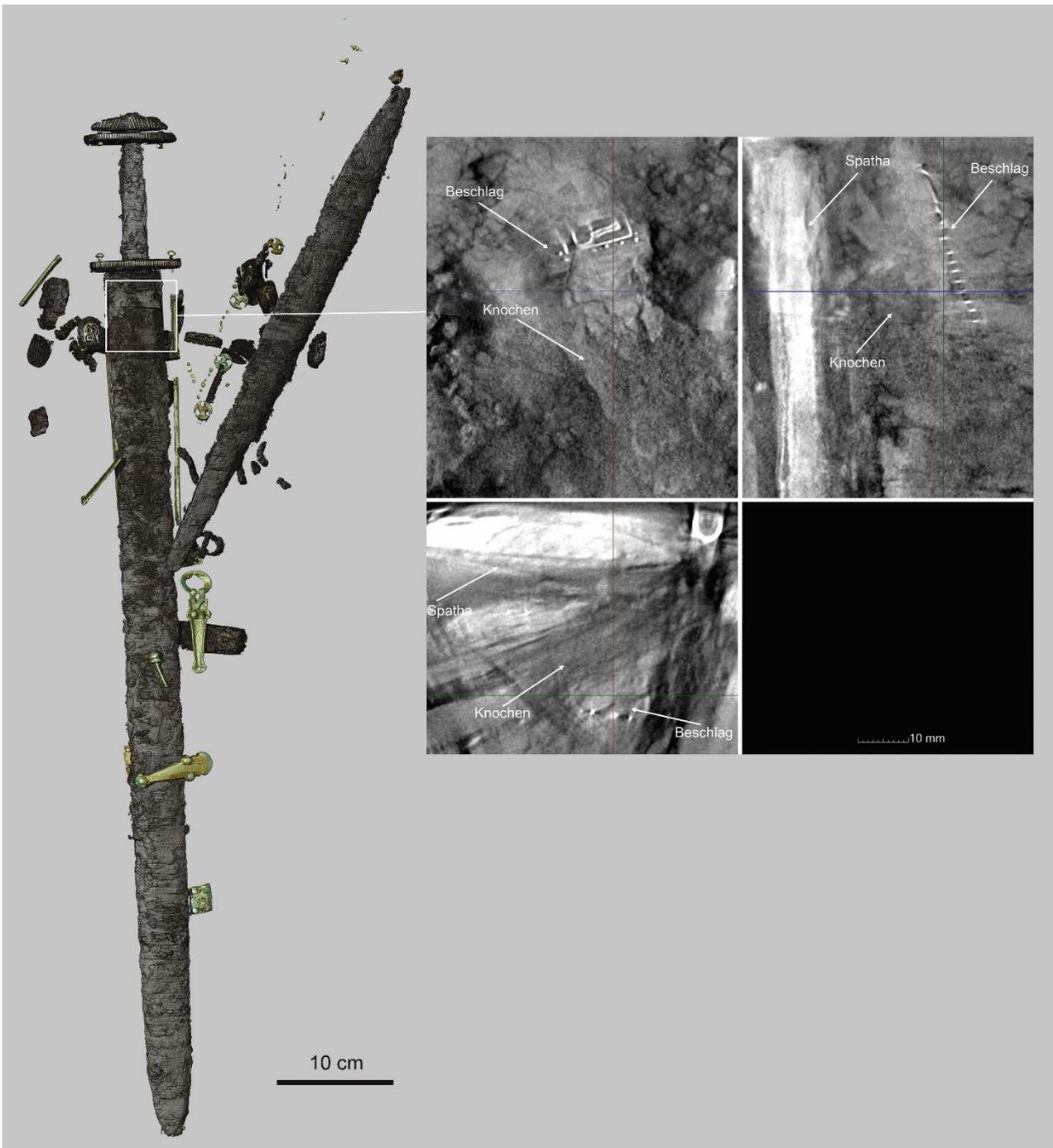


Abb. 4.40: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung der Spatha, des Saxes und der Gürtelgarnitur aus Grab 144 sowie CT-Schnittbilder der stratigraphischen Situation eines Rückenbeschlags unter dem Beckenknochen, die verdeutlicht, dass der Gürtel angelegt war.

In einem weiteren Fall wird anhand der CT-Daten belegt, dass die Gürtelgarnitur aus Grab 39 angelegt war. Abbildung 4.41 verdeutlicht, dass der durchbrochene Rückenbeschlag mit der Schauseite nach unten ausgerichtet ist und sich zum Teil unter dem Becken befindet. Alle anderen Bestandteile hingegen liegen stratigraphisch über dem Becken. Demnach war hier der Gürtel angelegt, während Spatha und Sax auf dem Individuum deponiert wurden.

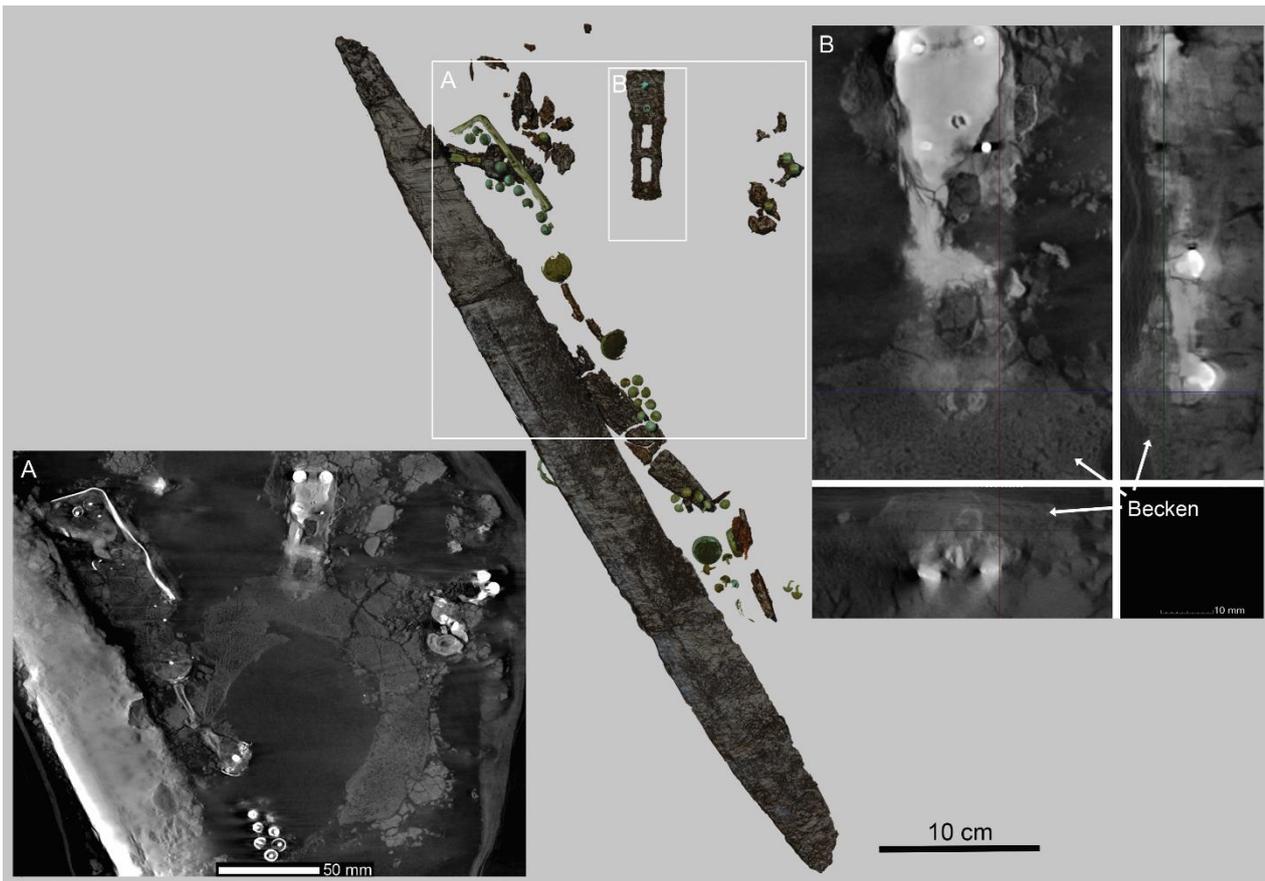


Abb. 4.41: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung des Saxes und der Gürtelgarnitur aus Grab 39. Frontales CT-Schnittbild (A) des Beckens und der Beschläge des Gürtels sowie CT-Schnittbilder (B) der stratigraphischen Situation des Rückenbeschlags unter dem Beckenknochen, welche verdeutlicht, dass der Gürtel angelegt war.

Die stratigraphische Lage von Werkzeugen kann einen Hinweis darauf geben, ob diese in einer Art Tasche oder Beutel vergesellschaftet waren. So befinden sich in der Blockbergung aus Grab 151 neben der Bronzewaage mit Waagschalen weitere Werkzeuge aus Eisen und ein Proberstein unterhalb eines Rückenbeschlags stratigraphisch unter dem Becken des Bestatteten. Der stark korrodierte, nicht mehr vollständig erhaltene Sax liegt horizontal über dem Becken mit der Spitze nach links (Abb. 4.42). Dies lässt den Schluss zu, dass sich das Werkzeug vermutlich in einem an dem Gürtel befestigten Behältnis auf dem Rücken des Individuums befand, während der Sax abgelegt wurde. Weitere Beispiele für die Aussagekraft der CT-Daten sind die auf dem Becken deponierte Gürtelgarnitur aus Grab 44 und die um das Becken des Individuums gelegte Kette eines Gehänges aus Grab 407 (Peek et al. 2009: 561–566).

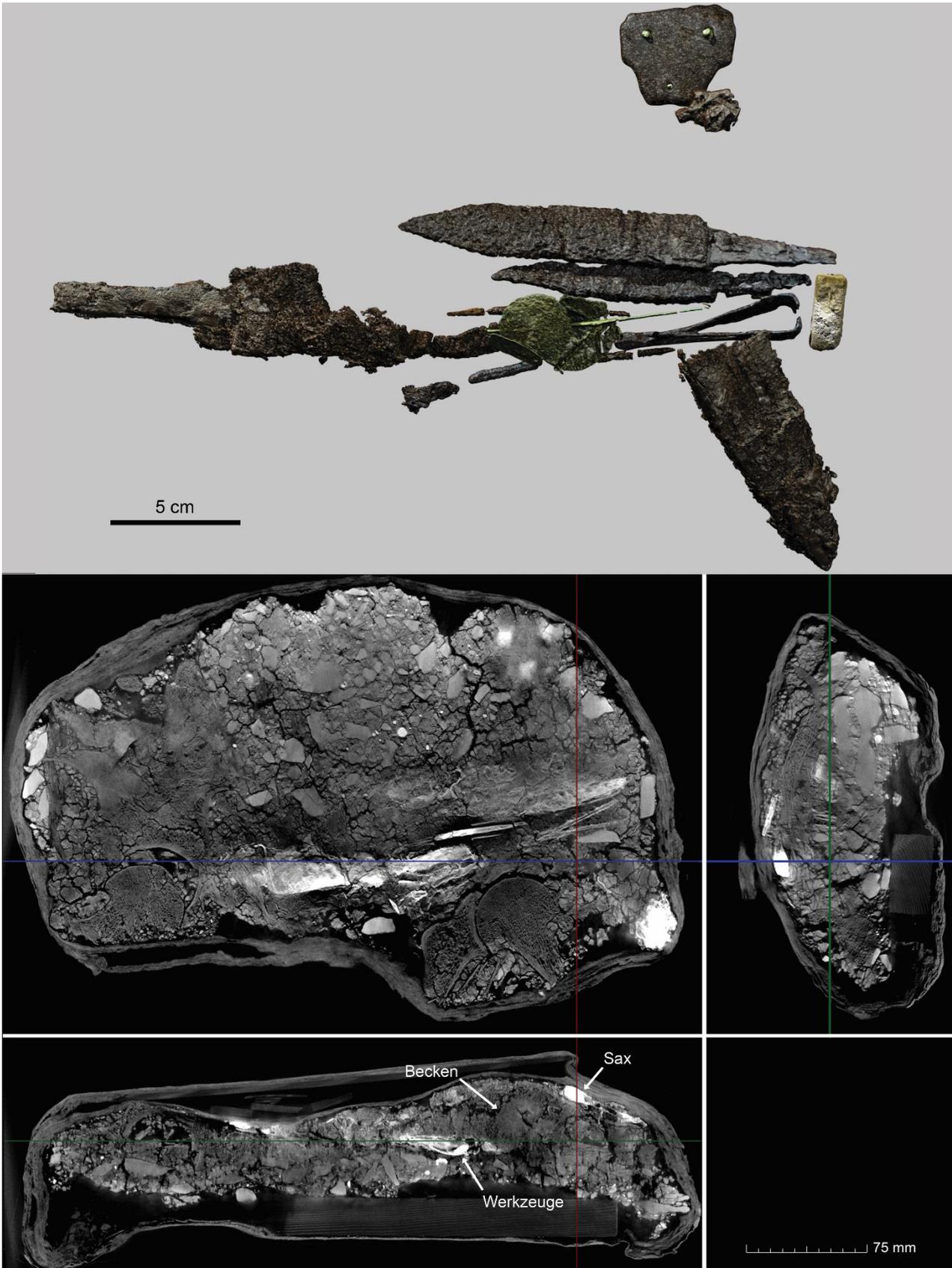


Abb. 4.42: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung des fragmentierten Saxes, des Rückenbeschlags und der Geräte (zwei Messer, Waage mit Waagschalen, Pflriem, Ahle, Pinzette und Proberstein) aus Grab 151. Darunter CT-Schnittbilder der Fundsituation. Der horizontale Schnitt verdeutlicht die stratigraphische Lage des Saxes über und der Werkzeuge unter dem Becken des Bestatteten.

4.3 Dokumentation

4.3.1 Dokumentationsweise der Blockbergungen aus Lauchheim

Die Dokumentation einer Blockbergung über die CT-Daten erfordert mehrere Arbeitsschritte, wie den Import und das Registrieren der Daten, die Lokalisierung der Objekte in Schnittbildern und deren dreidimensionale Darstellung. Für die stratigraphische Dokumentation der Blockbergungen über die μ -RCT wurden die Datensätze zunächst ausgerichtet. Zur Orientierung diente der in Lauchheim auf allen Blockbergungen dokumentierte Nordpfeil. Für die Messungen wurde ein Pfeil aus Blei in Nordrichtung auf die Außenseiten der Blockbergungen angebracht, anhand dessen die Datensätze in VGStudio MAX ausgerichtet und registriert werden konnten. Bei der Ausrichtung musste zudem darauf geachtet werden, dass sich die Funde in einer der Grabungssituation entsprechenden Ebene befinden. Die stratigraphische Situation konnte anschließend in zweidimensionalen frontalen Schnittbildern (Plana) von oben nach unten dokumentiert werden. Die Anzahl der Abbildungen richtet sich nach der Fundsituation, sodass jedes Objekt zumindest in einem Schnittbild erfasst und durch einen Indikator mit der entsprechenden Objektnummer markiert ist. Organische Schichten sind entweder dem Objekt zugeordnet, an dem sie sich befinden, oder als eigenes Objekt bezeichnet, wenn sie keinem Objekt zuzuordnen sind oder sich über mehrere Objekte verteilen. Komplexe stratigraphische Situationen wurden zusätzlich in Querschnitten (Profile) dargestellt. Beschrieben sind die einzelnen Schnittbilder vom Bestatteten aus gesehen, was am Beispiel der Blockbergung eines Tascheninhaltes aus Grab 799 (Gauß/Stelzner 2013: 63 f.) dargestellt ist.³² Das Segmentieren und Rekonstruieren der einzelnen Objekte erlaubt es zudem, einen dreidimensionalen Eindruck der Fundsituation zu vermitteln. Für die Katalogisierung der durch die CT erfassten Objekte wurden die einzelnen Funde von Vorder- und Rückseite mit den Querschnitten abgebildet.³³ Die Farbgebung der Objekte lehnt sich an das natürliche Erscheinungsbild der restaurierten Materialien an, wobei auf eine eindeutige Differenzierung geachtet wurde. Zu beachten ist, dass es sich hierbei um Falschfarben handelt und auch die Schattierung in einem Objekt ausschließlich auf den Dichtewerten eines Objekts beruht. Die Plastizität der Objekte wurde durch gezielte Lichteffekte hervorgehoben. In einigen Fällen war es notwendig, die Blockbergungen zu öffnen, um die Farbgebung von Glas oder Keramik nachvollziehen zu können. Die stratigraphische Dokumentation der Perlen erfolgte über die μ -RCT, für die Objektansprache mussten sie jedoch geborgen werden. Einzelne in Blockbergungen vorliegende Objekte, die nicht segmentiert wurden, wie beispielsweise Kämmen, können anhand ihrer Schnittbilder dokumentiert, ihre Verzierungen im Detail dargestellt werden. Das Beispiel des Kammes aus Grab 821 verdeutlicht, wie über die Schnittbilder die notwendigen Merkmale erfasst werden können.³⁴ So konnte hier dokumentiert werden, dass es

³² Siehe Anhang Dokumentation Blockbergung Grab 799.

³³ Ebd. Die Dokumentation der Objekte erfolgte gemeinsam mit Dr. Florian Gauß bzw. Dr. Benjamin Höke und die Dokumentation der organischen Reste mit Christina Peek.

³⁴ Siehe Anhang Dokumentation Blockbergung Grab 821.

sich um einen zweireihigen, dreilagigen Kamm mit vier Eisennieten in einem partiell fragmentierten Futteral mit sechs Eisennieten handelt. Die Futteralplatten sind beidseitig durch eine Gravur mit einem Zirkelornament und Dreiecken mit Kreisaugenfüllung verziert. Alle relevanten Maße konnten den CT-Daten entnommen werden.

Aus den CT-Daten können anhand der Software VGStudio MAX neben Abbildungen auch Filme erstellt werden. Durch einen Durchflug aller Schnittbilder von oben nach unten lässt dies eine Dokumentation des gesamten Objekts zu. Aus den dreidimensionalen Darstellungen der Objekte lassen sich zudem Animationen erstellen, die durch das Drehen der Objekte einen kompletten Eindruck der Fundsituation vermitteln können. Das zur Verfügung stellen solcher Informationen wurde bislang noch nicht umgesetzt, wird aber in Zukunft gewiss eine größere Rolle einnehmen.³⁵

Die Umwandlung der CT-Daten in Oberflächendaten (STL) würde prinzipiell auch eine Darstellung erlauben, die einer bislang für die Katalogisierung üblichen Zeichnung nahe kommt. Allerdings bedeutet dies einen weiteren Arbeitsschritt und würde die Darstellungsmöglichkeiten der Methode nicht ausschöpfen (Abb. 4.43).

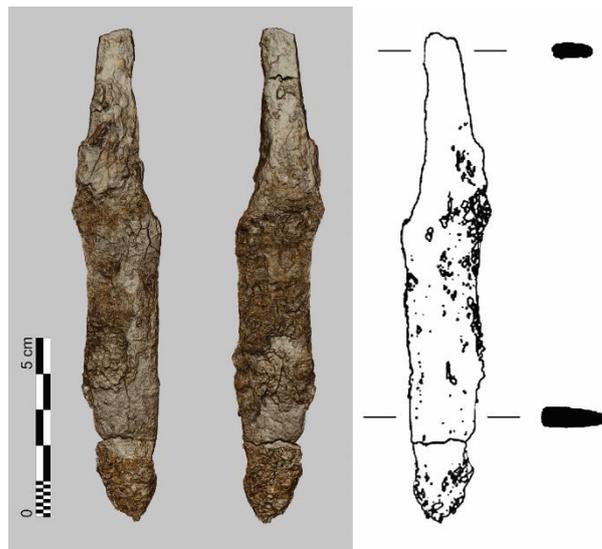


Abb. 4.43: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung (links) sowie eine aus STL-Daten erstellte Darstellung (rechts) des Eisenmessers mit Querschnitten aus Grab 1.

Die Dokumentation der Blockbergungen sowie der darin enthaltenen Objekte erfolgte in der Lauchheim Datenbank (Scheschkewitz 2013: 15), für die eigens ein Dokumentationsmodul für Blockbergungen entwickelt wurde. Neben der stratigraphischen Dokumentation wurden die Lokalisierung im Befund, die Bearbeitungs- und Dokumentationsweise sowie die Größe und der Verbleib der Blockbergungen aufgenommen. Eine direkte Verknüpfung besteht zur Befund-, Objekt- und Organikbeschreibung sowie zu den Abbildungen und CT-Daten.

³⁵ Bisher wurden solche Animationen der Lauchheimer Blockbergungen für Präsentationen und Ausstellungen verwendet. In Zukunft könnten sie dazu dienen, das Fundmaterial einem breiteren Publikum näher zu bringen.

4.3.2 Möglichkeiten moderner Grabungstechnik

Die Grabungsdokumentation des Lauchheimer Gräberfeldes beruht auf Photographien und Zeichnungen. Messpunkte wurden genommen, liegen aber nicht extra für die Blockbergungen vor, die in den Zeichnungen der Gräber kartiert wurden. Demzufolge ist es nicht möglich, die Blockbergungen über Messpunkte auszurichten und in das Koordinatensystem zu übernehmen. Ist bereits bei der Ausgrabung bekannt, dass eine Blockbergung über die CT analysiert und dokumentiert werden soll, dann besteht die Möglichkeit, drei Messpunkte in den Blockbergungen anzubringen, an denen die CT-Daten der Blockbergungen später registriert und in ein bestehendes Koordinatensystem der Grabungsdokumentation eingebettet werden können. Dies erlaubt es, die genauen Koordinaten eines jeden Objekts aus den CT-Daten abzugreifen und die exakte Position zu dokumentieren.³⁶

5 Untersuchung und Dokumentation der Spathen

Im Zentrum der über die Untersuchung und Dokumentation der Blockbergungen hinaus führenden Analysen stehen vor allem die 105 nicht restaurierten zweischneidigen Langschwerter, die aufgrund ihres komplexen technologischen Aufbaus für eine zusätzliche Merkmalerfassung über die CT von großem Interesse sind. Die Spatha gilt in der archäologischen Frühgeschichtsforschung gemeinhin als die herausragende Beigabe in der Ausstattung merowingerzeitlicher Männergräber (Sasse 2001: 79; Steuer 2004: 568; Kory 2013: 207). Bereits seit Langem spielen die zweischneidigen Langschwerter als Indikator sozialer Unterschiede im archäologischen Befund eine entscheidende Rolle und werden als Rangabzeichen (Steuer 1987) oder Statussymbol (Härke 1992; Theuvs/Alkemade 2000) angesprochen. Darüber hinaus ist die Spatha Gegenstand zahlreicher Studien mit chronologischen und typologischen Fragestellungen (Menghin 1983). Die verschiedenen Interpretations- und Untersuchungsansätze beruhen dabei auf quantitativen Untersuchungen der Waffenkombinationen, auf der Qualität der Spathabestandteile des Griffs, auf dem im Grab vergesellschafteten funktionalen Zubehör, der Aufhängung oder dem stets postulierten, nicht unerheblichen Aufwand bei der Herstellung der Spathaklingen. Gerade bei den Klingen, dem wesentlichen Bestandteil dieser komplex zusammengesetzten Waffengattung (Steuer 2004: 573), ist in Ermangelung geeigneter technischer Untersuchungsmöglichkeiten bislang jedoch eine überwiegende Beschränkung auf formale, metrische und stilistische Kriterien festzustellen. Naturwissenschaftliche Untersuchungen zu den komplexen Herstellungsprozessen (Gärbung, Konstruktion, Härteverfahren) von Spathaklingen (Scott/Eggert 2009: 21–25) finden in der archäologischen Frühgeschichtsforschung nur selten in ausreichendem Maße Berücksichtigung (Mäder 2000: 17–20).

³⁶ Ein solches Dokumentationssystem wurde gemeinsam mit Michael Lingnau für die Blockbergungen der Grabkammer vom Bettelbühl entwickelt.

Erst in jüngerer Zeit wurden umfangreiche Kriterien zur umfassenden Begutachtung von Spathaklingen vorgelegt, die auch hinsichtlich technologischer und kulturgeschichtlicher Fragestellungen neue Perspektiven eröffnen können (Mäder 2000: 20–22; 2009).

Grundsätzlich problematisch ist jedoch nach wie vor der Umstand, dass differenzierte Aussagen zu frühmittelalterlichen Spathaklingen meist nur möglich sind, wenn erheblicher Aufwand betrieben und dem Objekt großer Schaden zugefügt wird. Da dies aus zeitlichen und/oder konservatorischen Gründen kaum zu vertreten ist, sucht man bereits seit geraumer Zeit nach geeigneten Verfahren, um Spathaklingen nichtinvasiv analysieren zu können. Mit dem Einsatz der μ -RCT scheinen nunmehr technische Voraussetzungen hierfür gegeben zu sein. Grundlage für eine erfolgreiche Interpretation der gewonnenen Daten ist die Kenntnis der Möglichkeiten und Grenzen dieser Methode. Ziel war eine Untersuchung und Dokumentation aller Lauchheimer Spathen sowie die kritische Darstellung des Erkenntnispotentials, das sich durch die Auswertung computertomographischer Messungen von Spathaklingen ergibt (Stelzner et al. 2015).

5.1 Stand der Forschung

5.1.1 Analyse frühmittelalterlicher Spathaklingen

Seit dem 3. Jhr. n. Chr. bis in die Wikingerzeit hinein sind Schwertklingen aus archäologischen Bodenfunden überliefert, die durch die Technik, Stahl und Eisen miteinander zu verschweißen, eine Vielzahl an Oberflächeneffekten aufweisen (Scott/Eggert 2009: 21). Verständlich wurde die Technik, Stäbe miteinander zu verschweißen, die aus mehreren Lagen unterschiedlichen Materials aufgebaut und teilweise tordiert sind, durch experimentelle Arbeiten von Maryon (1960) und Anstee/Biek (1961). Um diese Technik sichtbar zu machen, kamen bisher vor allem die Radiographie und destruktive Methoden zum Einsatz. Jedoch ist die Radiographie von Spathaklingen zur Visualisierung von Schweißmusterverzerrungen nur eingeschränkt zu verwenden, da diese nicht unbedingt sichtbar sind. Zudem können übereinanderliegende Schweißmusterbahnen zu unterschiedlichen Effekten führen, die nicht eindeutig interpretierbar sind und keine zuverlässige Beschreibung des Klingenaufbaus erlauben (Anstee/Biek 1961: 88 f.; Westphal 1991a: 309–311). Um gesicherte Erkenntnisse zu gewinnen, wurden die Oxidschichten auf den Klingen durch Anschleifen entfernt und die Oberflächen anschließend geätzt oder poliert (Sachse 1978). Die japanische Poliertechnik, wie sie ausführlich von Mäder (2009: 75–85) beschrieben wird, lieferte über das Sichtbarmachen des Schweißmusters hinaus weitere Informationen zur Herstellungstechnik. Nach einer Politur werden auch Schmiedetexturen und unterschiedliche Phasen unter dem Mikroskop sichtbar, die Aufschluss über die Gärung oder Härteverfahren liefern können. Um Informationen über den Klingenaufbau zu gewinnen, mussten die Klingen zudem quer durchgesägt werden oder es wurden V-förmige Proben von beiden Seiten an unterschiedlichen Stellen entnommen, um den gesamten Klingenschnitt zu erhalten und die Klinge nicht in zwei Teile zersägen zu müssen (Emmerling

1972: 316; Tylecote/Gilmour 1986: 4). Von Interesse in den Querschnitten sind dann etwa Schweißnähte und Materialunterschiede, die Rückschlüsse auf den Klingenaufbau liefern können. In den angeätzten Querschnitten können mit optischen oder elektronischen Mikroskopen sehr detaillierte Informationen über die unterschiedlichen Phasen, das Gefüge sowie Defekte gewonnen werden. Anhand der metallographischen Analysen lassen sich Informationen zu Legierungsbestandteilen wie Kohlenstoff oder Phosphor gewinnen und es können Aussagen zu herstellungstechnischen Details wie dem Abschrecken und Anlassen einer Klinge getroffen werden (Tylecote/Gilmour 1986; Scott 1991; 2014). Auch Mikrohärteprüfungen der Phasen wurden zur Bestimmung des Kohlenstoffgehalts und zur Beurteilung von Härteverfahren frühmittelalterlicher Schwerter eingesetzt (Emmerling 1972: 315; Tylecote/Gilmour 1986: 7; Ehrenreich et al. 2005). Eine Übersicht über die Härten der unterschiedlichen Phasen gibt Williams (2009: 123). Phasendiagramme der Eisen-Kohlenstoff- und Eisen-Phosphor-Systeme, kontinuierliche Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramme für eutektischen Stahl sowie eine detaillierte Beschreibung der unterschiedlichen Phasen und welche Rückschlüsse sie auf Wärmebehandlungen zulassen, finden sich bei Scott/Eggert (2009: 3–9). Über Mikrohärteprüfungen und mikroskopische Analyse hinaus wurden zur Analyse der im Eisen enthaltenen Elemente spektroskopische und chemische Analysen (Smith 1960: 4; Emmerling 1972: 316 f.) oder, zum Beispiel von Segebade (1997: 152), die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), die Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) und die Photonenaktivierungsanalyse (PAA) eingesetzt.

5.1.2 Computertomographie frühmittelalterlicher Spathen

Der Einsatz der RCT bei der Untersuchung frühmittelalterlicher Spathen zielt in erster Linie darauf ab, die Schweißmusterverzierung und den komplizierten Aufbau solcher Klingen nachvollziehbar zu machen. Erste Messungen mit einem Film-basierenden Computertomographen an einer schweißmusterverzerten Klinge aus dem 4. Jhr. n. Chr. werden von Lindegard-Andersen et al. (1988) beschrieben.³⁷ In den Tomogrammen konnten innere Strukturen mit hohem Kontrast dargestellt werden. Diese stark voneinander abweichende Schwächung der Strahlung wurde durch die unterschiedlich starke Korrosion von weichem und hartem Stahl in den Torsionsbändern erklärt. Des Weiteren ließen die Tomogramme eine in der Mitte der Klinge verlaufende Schweißnaht vermuten, was auf zwei Lagen von Torsionsstäben schließen lassen würde. Wessel et al. (1994) und Segebade (1997) veröffentlichten die ersten Untersuchungen mit einem Mikrotomographen an zwei schweißmusterverzerten mittelalterlichen Schwertern, die im Rhein gefunden wurden. Das geschweißte Muster wurde in den Querschnitten zwar deutlich, war jedoch nicht im Einzelnen reproduzierbar oder analysierbar. Zudem zeigte eine Klinge im Querschnitt einen hellen Rand von 0,1

³⁷ Messparameter: Spannung 140 kV, Stromstärke 144 mA, Brennfleck = 2,5 mm², FOD = 2,5 m, FFD = 2,8 m, CRONEX Film NDT 65.

bis 0,2 mm Stärke, der eine ca. 20 % höhere Röntgenabsorption gegenüber dem inneren Klingenkörper aufwies. Ob dieses Phänomen durch eine besondere Härtung, das Einbringen anderer Elemente oder durch einen Messfehler verursacht wurde, konnte nicht abschließend geklärt werden. Dass auch in den Tomogrammen eines medizinischen RCT-Systems (Philips CT AVE1) das Schweißmuster einer Klinge erkannt werden konnte, wurde von Vigneron (1999: 307 f.) beschrieben.³⁸ Weitere Untersuchungen von einzelnen Schwertklingen erfolgten zumeist mit industriellen RCT-Anlagen. Paysan (2005: 108–111) beschreibt die Messung eines aus wechselnden Schichten mit unterschiedlichem Kohlenstoffgehalt verschweißten, eisenzeitlichen Knollenknaufschwerts mit einem Wälischmiller RayScan 200 mit einer 225 keV Microfocus Röntgenröhre, wobei der Klingenaufbau aufgrund des zu geringen Dichteunterschieds der Schichten und durch Artefakte bei der Untersuchung von stark absorbierenden Objekten nicht nachvollziehbar war. Im Gegensatz dazu konnte an einer frühmittelalterlichen Goldgriffspatha aus Sindelfingen der Aufbau der schweißmusterverzerrten Klinge mit einem Schlangemotiv dargestellt werden.³⁹ Als möglicher Grund für die abweichenden Ergebnisse wird der unterschiedliche Erhaltungszustand der beiden Klingen angeführt. Die stärker korrodierte Spatha lieferte mehr Informationen als das in einem Gewässer gefundene verhältnismäßig gut erhaltene Knollenknaufschwert. Seit 2009 wird die μ -RCT innerhalb der Aufarbeitung des Gräberfeldes Lauchheim „Wasserfurche“ erstmals systematisch an einer großen Anzahl an Spathen als Untersuchungsmethode eingesetzt (Gauß et al. 2010), wobei der Klingenaufbau und das Schweißmuster unter Berücksichtigung der von Mäder (2000: 20–22) formulierten technischen Merkmale im Zentrum der Analyse stehen (Gauß 2013: 165; Stelzner et al. 2015). Den Aufbau frühmittelalterlicher Klingen konnte Lehmann (2010) an einer Spatha aus Bad Wünnenberg und Lehmann/Müsch (2011) an einer zu einem Sax umgeschmiedeten Spatha aus Haltern-Flaesheim ebenfalls nachvollziehen. In diesem Zusammenhang ist auf eine Studie über insgesamt 28 Spathen aus Westfalen hinzuweisen. Dieses Kooperationsprojekt der Altertumskommission für Westfalen und der LWL-Archäologie für Westfalen erforschte frühmittelalterliche Spathen anhand der μ -RCT (Lehmann 2014, 2016). Des Weiteren ist eine frühmittelalterliche Spatha aus Pforzen mit der Neutronencomputertomographie von Gebhard et al. (2008) untersucht worden, wobei sich hier die Fragestellung vor allem auf die Spathascheide konzentrierte.

³⁸ Messparameter: Spannung 140 kV, Stromstärke 50 mA, Schichtdicke 1 mm, Umlaufzeit: 1 Sek., Negativbelichtung Print Protocol Philips easy Vision CT/MR/R2.1.

³⁹ Diese Ergebnisse wurden auf der Tagung „Anwendung der 3-D Computertomographie in Archäologie, Restaurierung und Kunstgeschichte“ am 6.12.2004 an der FH-Aalen vorgestellt und sind dort auf CD erhältlich (Paysan 2005: 202).

5.2 Untersuchung der Spathabestandteile

Insgesamt wurden 105 Spathen aus Lauchheim gemessen und die unterschiedlichen Bestandteile wie Handhaben, Spathascheide und Klinge untersucht.⁴⁰ Die Abbildung 5.1 verdeutlicht die Schnittrichtungen, in denen die Spathen analysiert, dargestellt und beschrieben werden.

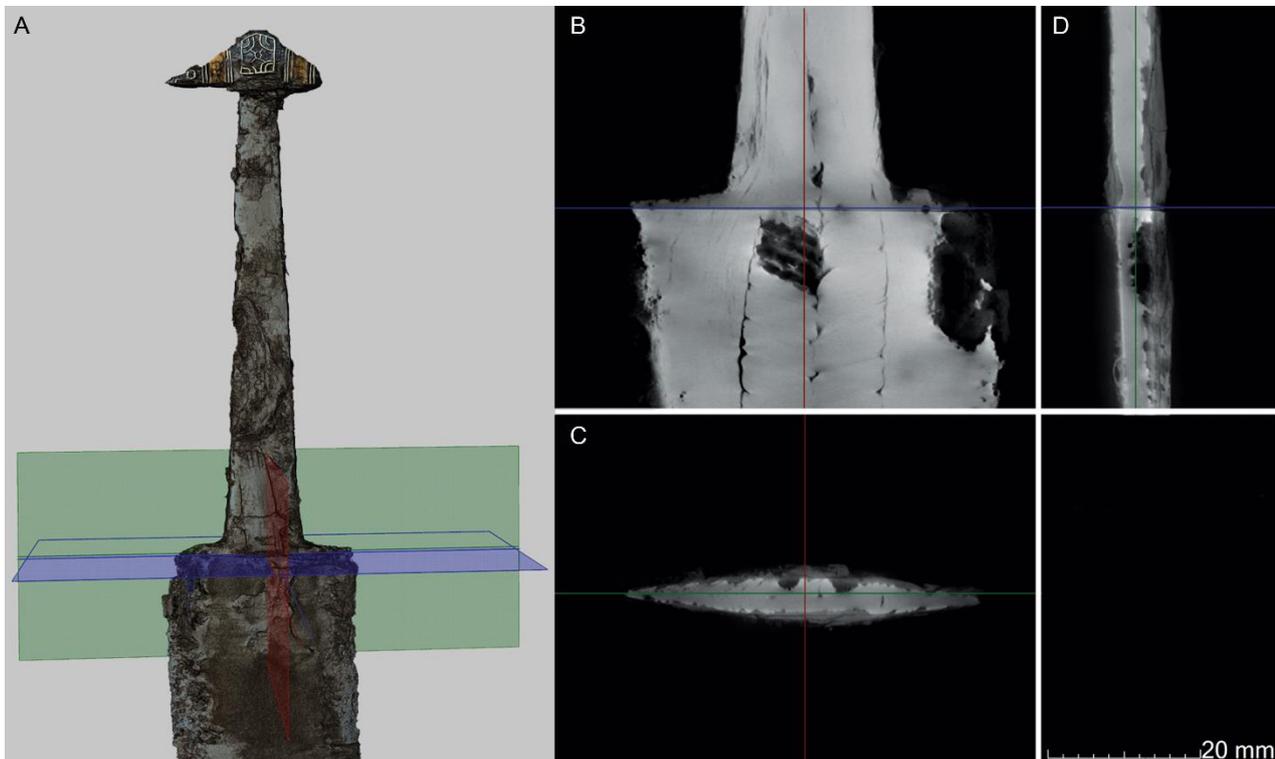


Abb. 5.1: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung (A) des Knaufs (Eisen mit Silber- und Messingtauschierung), der Griffangel und des Übergangsbereichs von Griff zu Klinge der Spatha aus Grab 46 sowie den Schnittebenen der μ -RCT-Schnittbilder (B–D). Zur Orientierung: Die grüne Ebene entspricht dem frontalen Schnitt (B), die blaue Ebene dem horizontalen Schnitt (C) und die rote Ebene dem sagittalen Schnitt (D).

5.2.1 Spathagefäß (Griff)

Die anhand der μ -RCT gewonnenen und mit VGStudio MAX bearbeiteten Daten erlauben die dreidimensionale Darstellung der untersuchten Spathen trotz aufliegender Korrosionsschichten, dies ist auch in Blockbergungen der Fall. Zusätzlich zur Form der Klinge lassen sich die Form und zu meist auch die unterschiedlichen Materialien des Gefäßes bestimmen, die für die archäologische Forschung hinsichtlich chronologischer Fragestellungen von Bedeutung sind (Stelzner et al. 2015). Abbildung 5.2a zeigt das Gefäß der Spatha mit dem Bronzeknauf aus Grab 284, welcher in die zweite Hälfte des 7. Jhr. n. Chr. zu datieren ist. Der technische Aufbau des Gefäßes sowie dessen organische Bestandteile, zu denen die Griffhülse und Bestandteile der Parierplatte und des Knaufs zählen, lassen sich anhand der μ -RCT untersuchen. So finden sich beispielsweise an der Spatha

⁴⁰ Zum methodischen Vorgehen und den Messparametern siehe Kapitel 3.3.1 Mikro-Röntgencomputertomographie.

aus Grab 552 neben Holzstrukturen in der Griffhülse auch Holzstrukturen zwischen den Deckblechen der Knauf- und der Parierplatte (Abb. 5.2b).

Drüber hinaus können anhand der μ -RCT Konstruktionsmerkmale im Inneren der Gefäße erkannt werden, die mit konventionellen Untersuchungsmethoden nur schwer auszumachen sind. An der Spatha aus Grab 522 befindet sich beispielsweise ein um die Griffangel laufendes Blech aus Bronze (Abb. 5.3), das wohl zur Befestigung von Knauf und Knaufplatte an der Griffangel dient. Weitere Beispiele sind ein Stift aus Bronze (Abb. 5.2b, Grab 552) und ein Keil aus Holz (Abb. 7.8, Grab 40), die beide zur Fixierung des Knaufs der Spatha eingebracht wurden.

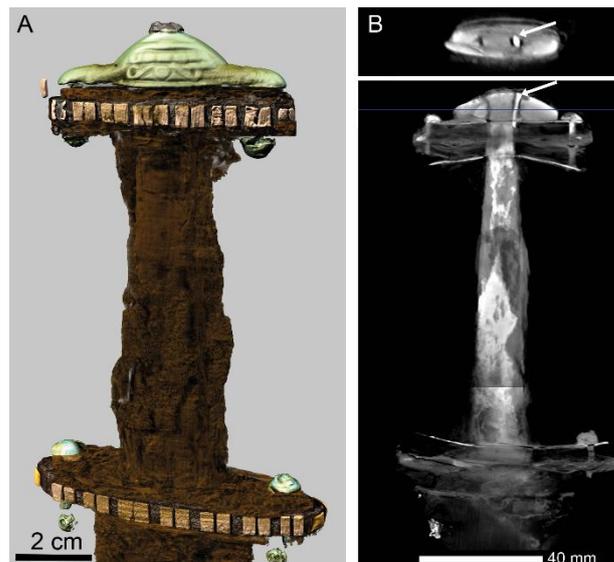


Abb. 5.2: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung (A) des Griffs der im Block geborgenen Spatha aus Grab 284 mit Bronzeknauf und –nieten, Messingtauschierungen in Knauf- und Parierplatte sowie organischen Bestandteilen. μ -RCT-Schnittbilder (B) des Griffs der Spatha aus Grab 552 mit Holz sowohl zwischen den Deckblechen der Knauf- als auch der Parierplatte sowie einem Bronzestift zur Fixierung des Knaufs (siehe Pfeile).

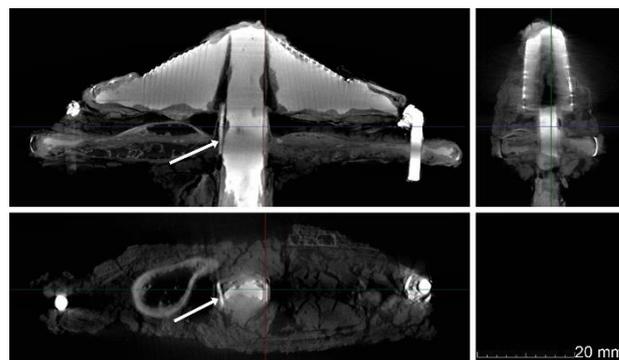


Abb. 5.3: μ -RCT-Schnittbilder des Knaufs und der Knaufplatte der Spatha aus Grab 522 mit Bronzeblech um die Griffangel (siehe Pfeile), vermutlich zur Fixierung von Knauf und Knaufplatte.

5.2.2 Spathascheide

Bei entsprechender Erhaltung ist es möglich, Merkmale der Spathascheide aufzunehmen und den Aufbau der organischen Bestandteile nachzuvollziehen.⁴¹ Lehmann (2011: 186 f.) konnte den bereits bekannten Aufbau einer Spathascheide anhand der RCT bestätigen.

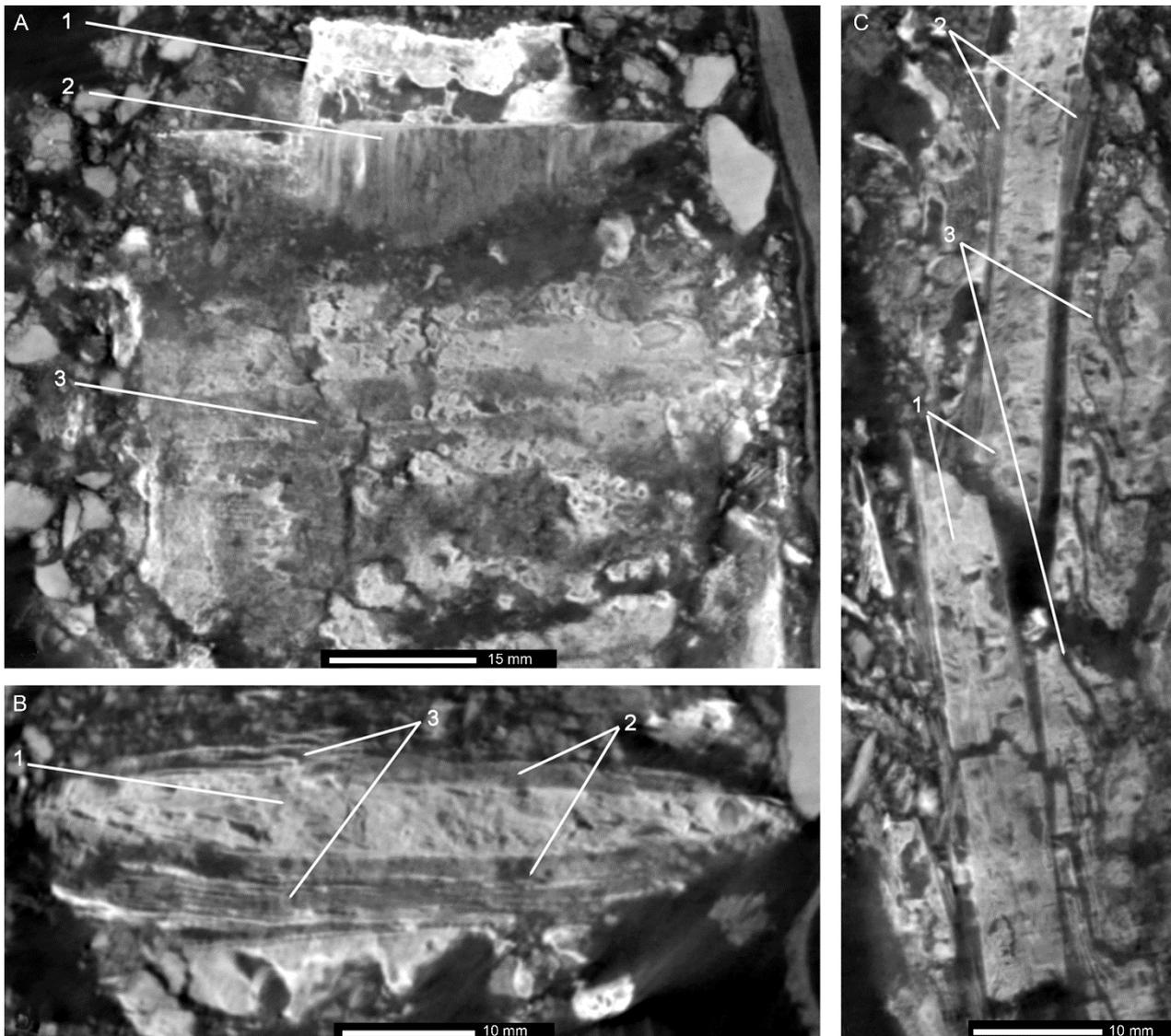


Abb. 5.4: μ -RCT-Schnittbilder der im Block geborgenen Spatha aus Grab 500 zeigen die unterschiedlichen Materialien der Klinge und der Spathascheide Eisen (1), Holz (2) und Textil (3). In dem frontalen Schnitt (A) ist der Übergang zwischen Griffangel und Klinge (1), das Holz (2) im Bereich des Scheidenmundes und die Streifen der textilen Wicklung (3) zu sehen. Der horizontale Schnitt (B) verdeutlicht, dass die organischen Materialien der Spathascheide Holz (2) und Textil (3) sich auf beiden Seiten der Klinge (1) erhalten haben, während im sagittalen Schnitt (C) vor allem auf der rechten Seite der an dieser Stelle gebrochenen Klinge (1) die einzelnen Lagen der textilen Wicklung (3) zu erkennen sind.

⁴¹ Siehe hierzu auch Kapitel 4.2.2 Mikrostratigraphie organischer Schichten.

Aufgebaut sind Spathascheiden im Allgemeinen aus zwei mit Fell gefütterten Holzschalen, über denen sich ein Lederbezug befindet. Zusätzlich kann sich um diesen Bezug eine Umwicklung befinden, die aus Rinde/Bast, Leder oder einem anderen Material bestehen kann (Lehmann 2007: 130–134). Ein Beispiel für eine solche Konstruktion mit einer Umwicklung aus einem Stoffband um die hölzernen Schalen der Spathascheide zeigt die Abbildung 5.4 (Stelzner et al. 2015).

Neben dem Aufbau der Spathascheide selbst spielen weitere Konstruktionsmerkmale wie Scheidenmundbleche, Randbeschläge oder Riemendurchzüge eine entscheidende Rolle bei der Aufnahme der Spathascheide. Die metallischen Bestandteile lassen sich wie andere Objekte segmentieren und darstellen (Abb. 5.5).

In bestimmten Fällen konnte die auf der Spathascheide längs verlaufende Konstruktion des Riemendurchzugs aus Holz identifiziert und dokumentiert werden (Abb. 5.6). Das Beispiel aus Grab 493 verdeutlicht, dass sich eine Verzierung aus quer verlaufenden Stegen um einen solchen Riemendurchzug in der hölzernen Spathascheide befand, die sich in der Eisenkorrosion als Negativ erhalten hat (Abb. 5.7). Weitere häufige Verzierungselemente sind Schnüre bzw. Zwirne, die sich wie bei der Spatha aus Grab 525 zumeist stratigraphisch zwischen den Holzschalen und dem darüberliegenden Leder erhalten haben (Abb. 5.8). Die anhand der CT gewonnenen Erkenntnisse wurden über eine mikroskopische Untersuchung der äußerlich sichtbaren organischen Materialien abgesichert und gegebenenfalls erweitert, wobei die Riemendurchzüge und Verzierungen in den organischen Schichten der unrestaurierten Spathen zum überwiegenden Teil nur anhand der μ -RCT identifiziert werden konnten.

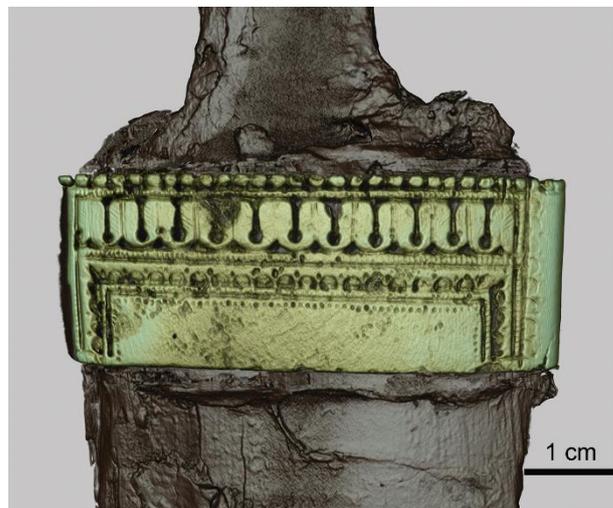


Abb. 5.5: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung des Scheidenmundbleches vom Typ Samson-Oberlörick der Spatha aus Grab 956.

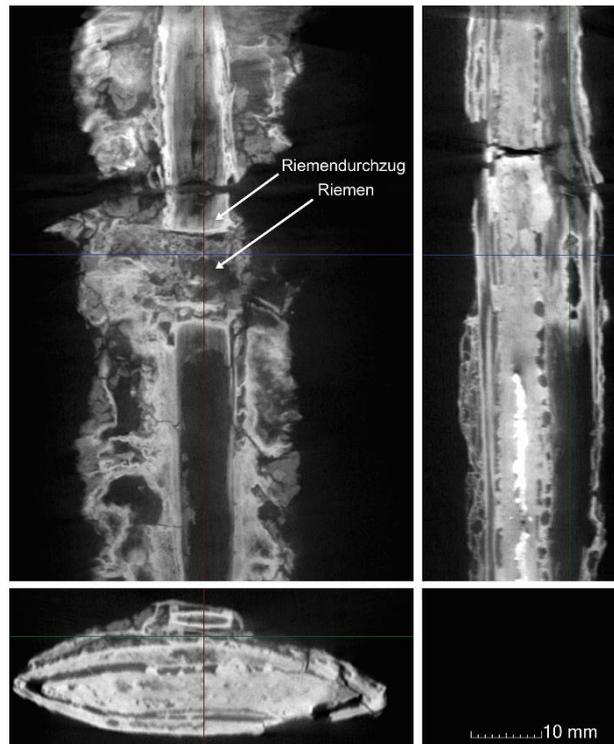


Abb. 5.6: μ -RCT-Schnittbilder des Riemendurchzugs aus Holz und des Riemen aus Leder der Spatha aus Grab 765.

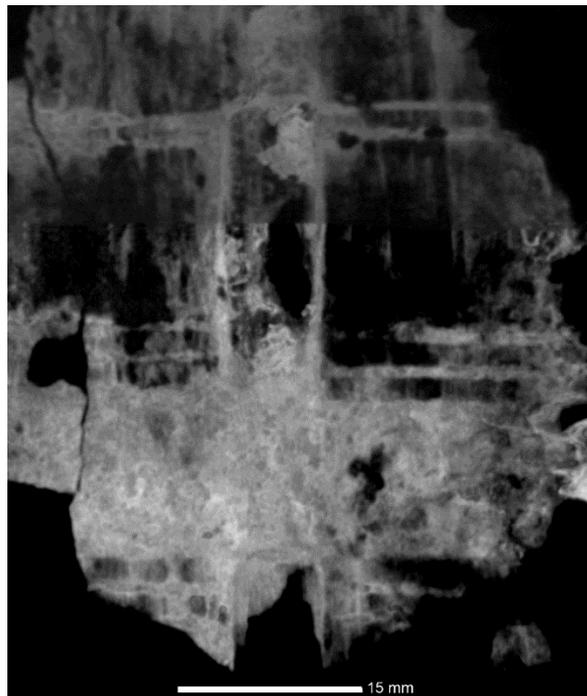


Abb. 5.7: Frontales μ -RCT-Schnittbild der Verzierung in der Holzschale der Spathascheide aus Grab 493 in Form von seitlich des Riemendurchzugs quer verlaufenden Stegen.

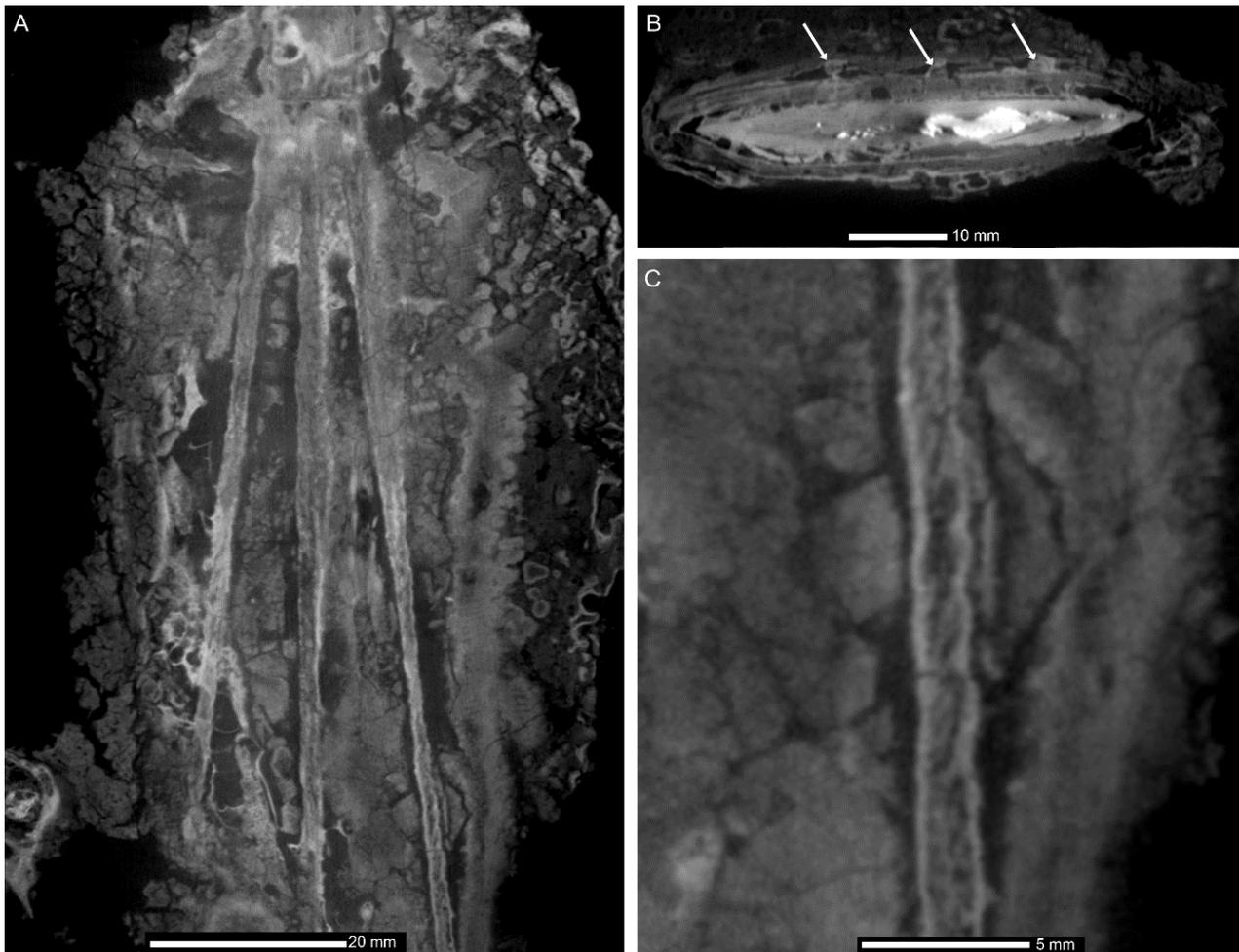


Abb. 5.8: Frontales μ -RCT-Schnittbild (A) der Verzierung aus Schnüren unterhalb des Riemendurchzugs der Spathascheide aus Grab 525. Das horizontale Schnittbild (B) zeigt die Position der Schnüre (siehe Pfeile) zwischen der Holzschale und einer Schicht aus Leder. Das frontale Schnittbild (C) zeigt eine Z-gedrehte Schnur im Detail.

5.2.3 Spathaklinge

Wie beim Griff lassen sich bei der Klinge die morphologischen und metrischen Merkmale erfassen, wie sie etwa von Geibig (1991: 83–85) formuliert wurden. Eine gewisse Einschränkung besteht hier durch die Korrosion der Spathen, welche die Detektion der originalen Oberfläche erschweren kann⁴² und bei der Klingenförmigkeit eine eindeutige Bestimmung von Hohlkehlen nicht immer zulässt. In den frontalen Schnittbildern sind die Kompositstäbe erkennbar. Aufgrund einer stärkeren Korrosion der kohlenstoffreichen Lagen in den Kompositstäben (Ypey 1984: 193) heben sich diese, aufgrund der damit einhergehenden geringeren Dichte, dunkel von den kohlenstoffarmen Lagen ab. Die Messungen der Lauchheimer Spathen weisen eine große Variationsbreite an Schweißmusterverzierungen auf. Innerhalb der Verzierung konnten zudem Eiseneinlagen und in einem Fall eine

⁴² Zur Schwierigkeit, die originale Oberfläche zu lokalisieren und darzustellen, siehe auch Kapitel 4.1.1 Metallfunde.

Einlage aus Draht nachgewiesen werden. Neben der Form der Kompositstäbe (Richtung und Winkel der Torsion) und deren Verbindung miteinander, wie etwa gegenläufig tordierte Stäbe, die ineinander verzahnt sind, oder vierkantig flach aneinander geschmiedete Stäbe, lässt sich ein weiteres von Mäder (2009: 143) formuliertes Merkmal in den frontalen Schnittbildern nachvollziehen. Hierbei handelt es sich um die Anordnung der Schweißmusterbahnen am Übergang von Klinge zu Angel. Bei einer ausreichenden Auflösung sind darüber hinaus längs verlaufende Schmiedestrukturen zu erkennen, welche zumeist im Schneidenbereich sichtbar sind (Abb. 5.9).

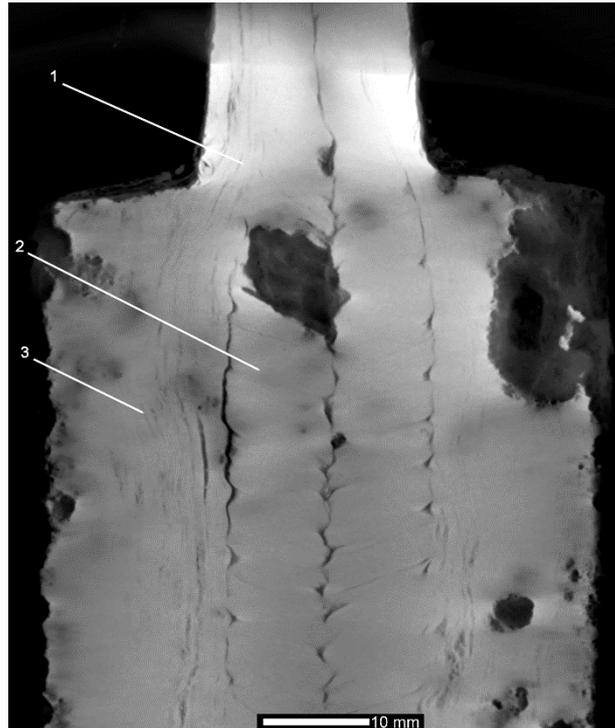


Abb. 5.9: Frontales μ -RCT-Schnittbild des Übergangs von Griffangel zur Klinge mit Schweißmusterverzierung der Spatha aus Grab 46. (1) Übergang der Schneiden und Kompositstäbe in die Griffangel. (2) Ineinander verzahnte Kompositstäbe. (3) Schmiedetextur in den Schneiden.

Neben diesen häufig anzutreffenden längs verlaufenden Schmiedestrukturen konnten vereinzelt auch kleine unregelmäßige und teilweise annähernd ovale Schmiedestrukturen sichtbar gemacht werden (Abb. 5.10).

Die Messungen der Klingen verdeutlichen, welche zusätzlichen Informationen durch die μ -RCT gewonnen werden können. Entscheidend für die Beurteilung dieser Merkmale ist dabei der Erhaltungszustand der Klinge. So ist das Schweißmuster nur bei unterschiedlich starker Korrosion der verwendeten Stahlsorten an der Objekt Oberfläche gut zu erkennen (Abb. 5.11a). Bei gut erhaltenen Klingenoberflächen hingegen sind keine Dichtunterschiede der Materialien sichtbar und die Kompositstäbe lassen sich nur über die Korrosion an den Schweißnähten nachvollziehen (Abb. 5.9).



Abb. 5.10: Frontales μ -RCT-Schnittbild der unregelmäßigen bis ovalen Schmiedestrukturen der Spatha aus Grab 1069.

Bei der Beurteilung des Klingenaufbaus hat der Erhaltungszustand der Spatha einen noch größeren Einfluss. So kann ein extrem schlechter Erhaltungszustand zu sehr aussagekräftigen Informationen führen. Ist kein metallischer Kern der Klinge erhalten, können die Korrosionsprodukte im besten Fall immer noch die Strukturen der Schweißmusterverzierung darstellen. Die im Block geborgene Spatha aus Grab 500 zeigt beispielsweise einen sehr komplexen Klingenaufbau. Die Klinge ist zwar vollständig korrodiert und ein metallischer Kern ist nicht mehr erhalten, dennoch ist es möglich, den Aufbau in den Schnittbildern visuell darzustellen. In dem frontalen Schnittbild (Abb. 5.11a) ist zu erkennen, dass es sich um drei tordierte Bereiche handelt, zwischen denen sich zwei nicht tordierte Kompositstäbe befinden. Dass es sich bei den nicht tordierten Bereichen um einzelne Stäbe handelt, zeigt Abb. 5.11b. Der Längsschnitt (Abb. 5.11c) hingegen verdeutlicht, dass die drei tordierten Bereiche aus zwei übereinanderliegenden Stäben gefertigt wurden, die jeweils aus drei Lagen kohlenstoffreichem und vier Lagen kohlenstoffarmen Eisen bestehen.

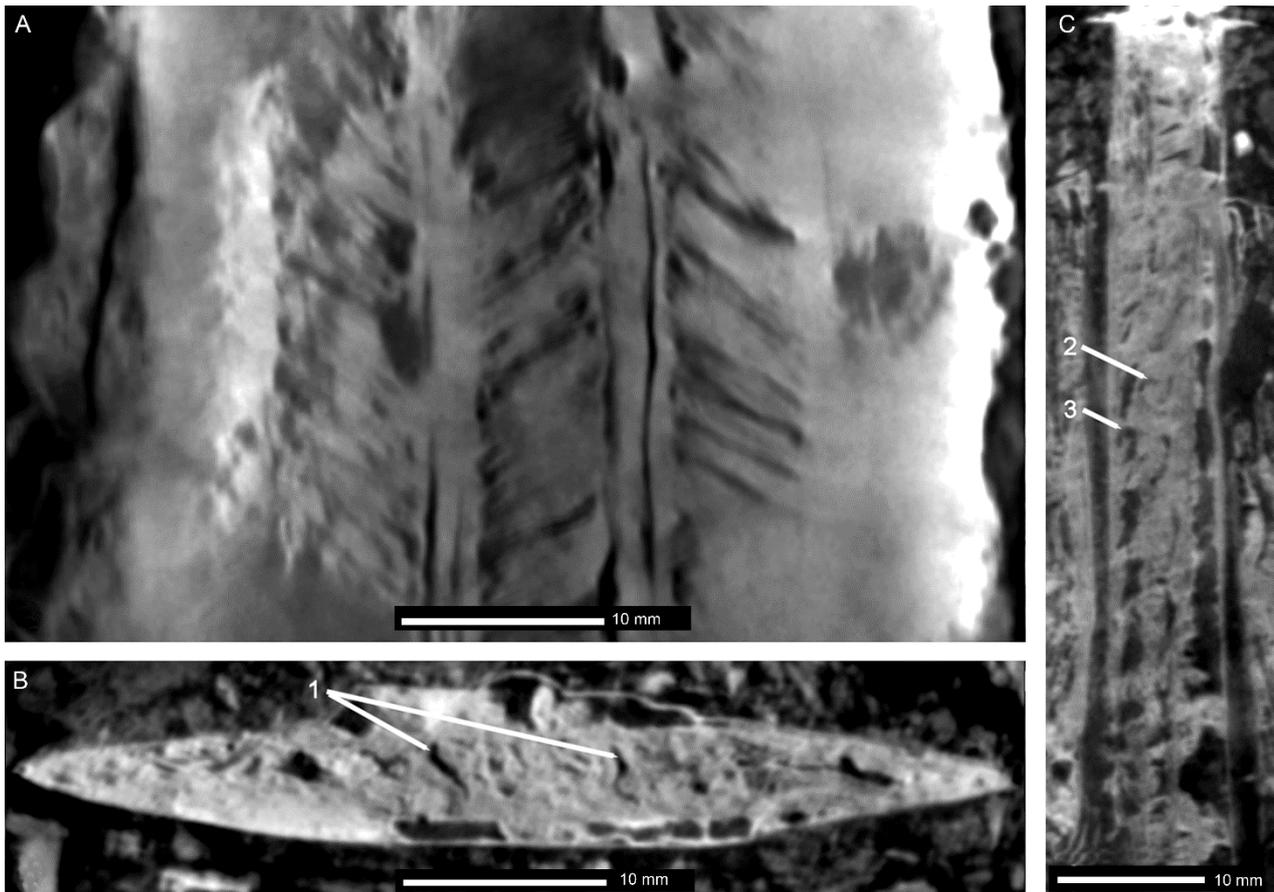


Abb. 5.11: μ -RCT-Schnittbilder der Spathaklinge aus Grab 500. Der frontale Schnitt (A) zeigt die tordierten und nicht tordierten Kompositstäbe der Klinge. Im horizontalen Schnitt (B) wird deutlich, dass es sich bei den nicht tordierten Bereichen um einzelne Stäbe (1) handelt, während der sagittale Schnitt (C) veranschaulicht, dass die drei tordierten Bereiche jeweils aus zwei aufeinander geschweißten Stäben (2 und 3) aufgebaut sind.

Die frontalen Schnittbilder in Abbildung 5.12 zeigen die Klinge von oben nach unten, wobei die Torsion der Kompositstäbe zu erkennen ist. Die oberste sichtbare Schicht (Abb. 5.12a) legt den Schluss nahe, dass die Torsionsstäbe bis zur Hälfte abgetragen wurden und sich somit ursprünglich ein Halbkreismuster an der Oberfläche zeigte, das wohl aufgrund der Korrosion nicht mehr erhalten ist. Die Schnittbilder 5.12c und 5.12d befinden sich oberhalb und unterhalb der Klingennitte und zeigen einen abrupten Wechsel der Torsionsrichtung, was ein weiterer Hinweis darauf ist, dass es sich um zwei Lagen von Kompositstäben handelt. Die Torsionsrichtung eines einzelnen Stabes würde sich nur langsam ändern und im Zentrum des Stabes würde sich wieder das bereits erwähnte Halbkreismuster zeigen (Maryon 1960: 28 f.; Ypey 1982: 384–387). Insgesamt wurden also acht Stäbe miteinander verschweißt und die Schneiden angeschmiedet (Abb. 5.13).

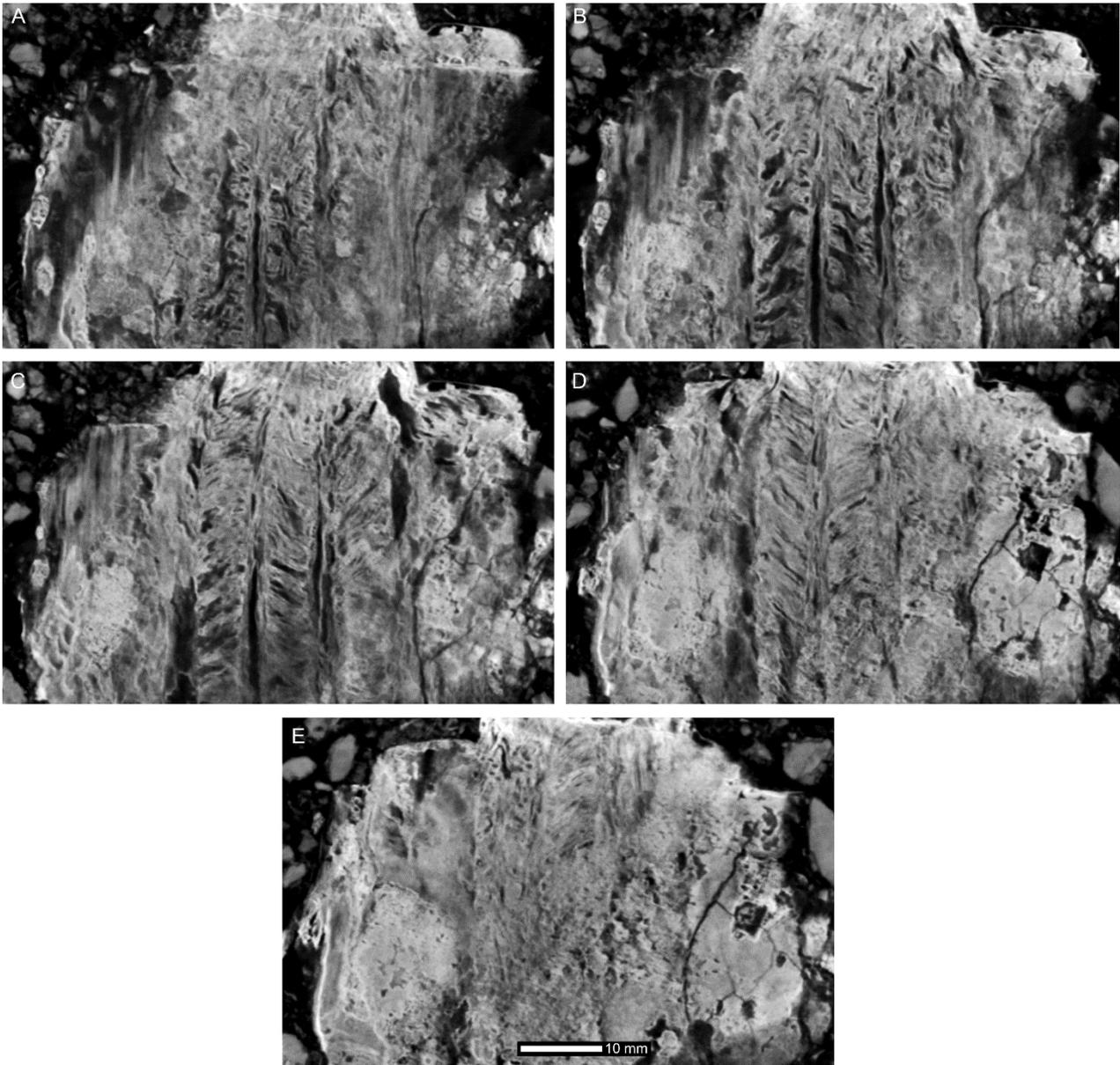


Abb. 5.12: Frontale μ -RCT-Schnittbilder der Spathaklinge aus Grab 500 zeigen von oben nach unten (A–E) die Torsion der aufeinander geschweißten und auf die Hälfte abgeschliffenen Kompositstäbe.

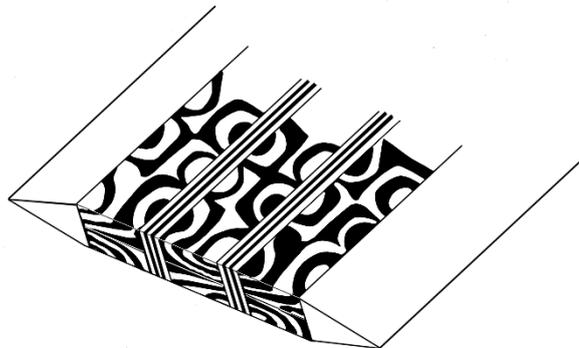


Abb. 5.13: Schematische Zeichnung des Klingenaufbaus der Spatha aus Grab 500.

Schwieriger gestaltet sich die Untersuchung von besser erhaltenen Klingen mit Metallkern, da sich bei fast allen Messungen im Querschnitt ein homogener Graubereich im Zentrum der Klinge befindet, der oft nicht eindeutig analysierbar ist (Abb. 5.14). Zudem stellt sich der Rand der Klinge als heller Umriss dar, wie dies von Wessel et al. (1994: 398) und Segebade (1997: 156 f.) beschrieben wurde. Aufgrund verschiedener physikalischer Effekte wie zum Beispiel Strahlauhärtung ist nicht davon auszugehen, dass diese Grauwertverteilung der CT-Daten den Dichteverlauf des untersuchten Objekts wiedergibt. Gerade der Effekt der Strahlauhärtung führt zu Fehlern, die als Strahlauhärtungsartefakte bekannt sind.⁴³ Verdeutlicht wird dieses Artefakt durch die Messung eines modernen Stahlstücks ähnlicher Form. Abbildung 5.15a zeigt den Querschnitt dieses Objekts, in dem deutlich der helle Rand und das dunklere Zentrum zu erkennen sind. Abbildung 5.16 veranschaulicht das Artefakt anhand der Grauwertverteilung eines Profilschnitts durch das Objekt. Dieses Artefakt lässt sich durch analytische Korrekturverfahren zwar reduzieren, aber nicht aufheben (Abb. 5.15b).

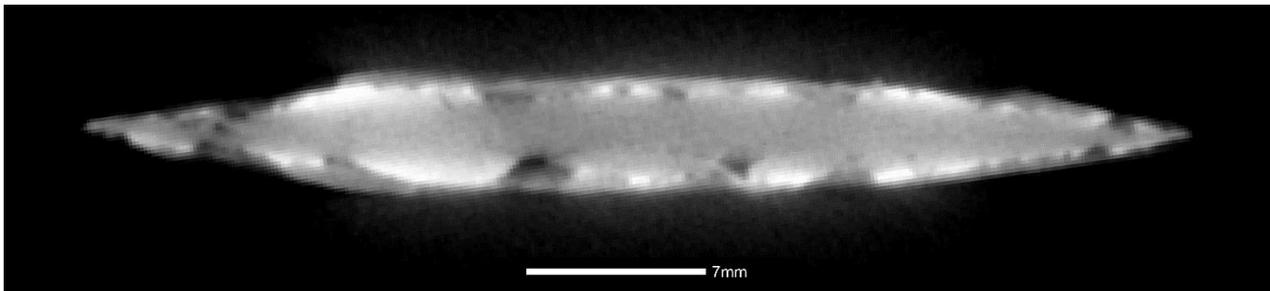


Abb. 5.14: Horizontales μ -RCT-Schnittbild der Spathaklinge aus Grab 1101 mit heller Umrandung und homogenem Graubereich im Zentrum der Klinge.

Da sich an diesem modernen Stahlstück aus homogenem Material dieselbe helle Umrandung zeigt, ist davon auszugehen, dass es sich bei dem oben beschriebenen Phänomen in den Querschnitten der Klingen um das gleiche Strahlauhärtungsartefakt handelt und dieses nicht etwa herstellungsbedingt zu erklären ist. Dieser Abbildungsfehler, der schließlich überwiegend im Kernbereich der Klinge auftritt, kann die Nachweisbarkeit des Klingenaufbaus erheblich beeinträchtigen. Eine Unterscheidung von Kompositstäben, die Bestimmung eines Klingenkerns oder von angeschmiedeten Schneiden gestaltet sich dadurch ebenfalls sehr schwierig und ist in bestimmten Fällen nicht eindeutig möglich. Dieses Bild zeigt sich insbesondere bei gut erhaltenen und wenig korrodierten Spathen.

⁴³ Zur Entstehung von Strahlauhärtungsartefakten und deren Einfluss auf die Messung siehe Kapitel 2.4.3 Artefakte.

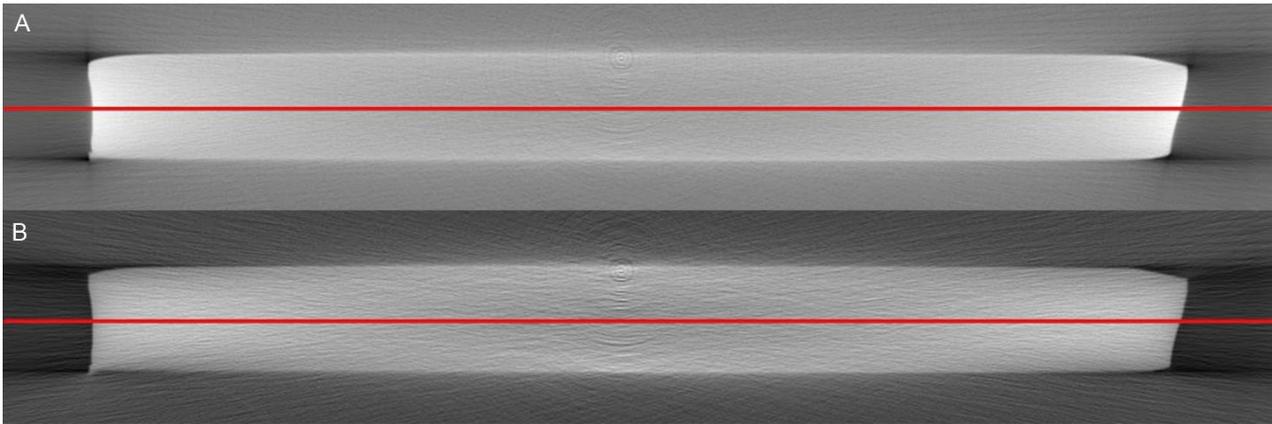


Abb. 5.15: Horizontale μ -RCT-Schnittbilder der Messungen eines modernen Stahlstücks ($30 \times 4 \text{ mm}^2$) ohne (A) und mit (B) Artefaktreduktion durch analytische Korrekturverfahren. Der Vergleich der Grauwertprofile entlang der roten Linie verdeutlicht, dass die Grauwerte in dem nicht korrigierten Profil zum Zentrum hin stark abnehmen, während das korrigierte Profil dies wegen einer virtuellen Reduzierung der Dichte im Rand des Metalls wesentlich abschwächt. Das hier diskutierte Beispiel verdeutlicht, dass die zunehmende Intensität im Rand der Klingenquerschnitte in Artefakten der Messungen zu begründen ist, welche durch einfache analytische Korrekturverfahren nur marginal verbessert werden. Die zunehmende Intensität im Rand der Klingen ist diesen Ergebnissen nach nicht das Resultat von Härtingsprozessen (Abb. Dr. P. Schütz).

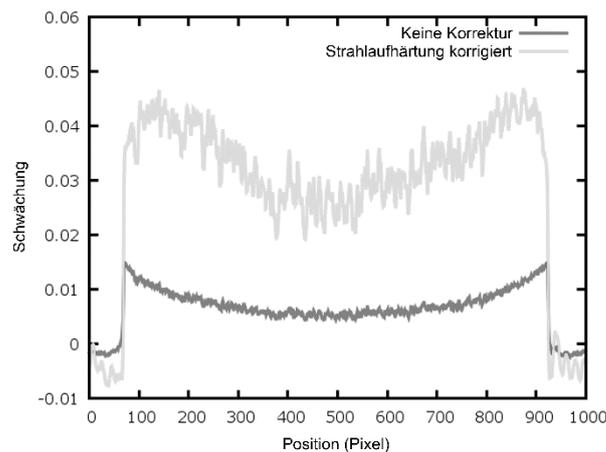


Abb. 5.16: Grauwertverteilung der Profilschnitte 80a und 80b durch das Stahlstück zur Verdeutlichung des Strahlauhärtungsartefakts mit und ohne Korrektur (Abb. Dr. P. Schütz).

Bei der Spatha aus Grab 65 war es trotz des Artefakts möglich, den Aufbau einer Klinge mit erhaltenem Eisenkern in den Längs- und Querschnitten zu visualisieren und so deren Aufbau nachzuvollziehen. Es handelt sich hierbei um eine Klinge, die aus mindestens sieben Teilen zusammengefügt wurde. Auf beiden Seiten des Kerns befinden sich jeweils zwei Kompositstäbe. Zudem wurden die Schneiden angeschmiedet (Abb. 5.17). Solche Fälle, in denen sich der Klingenaufbau gut erhaltener Spathen so eindeutig nachvollziehen lässt wie bei der Spatha aus Grab 65, stellen allerdings Ausnahmen dar. Das mehr oder weniger stark auftretende Artefakt bei Klingen mit einem

Metallkern verhindert oftmals die Darstellung des Klingenaufbaus in den Quer- und Längsschnitten (Stelzner et al. 2015).⁴⁴

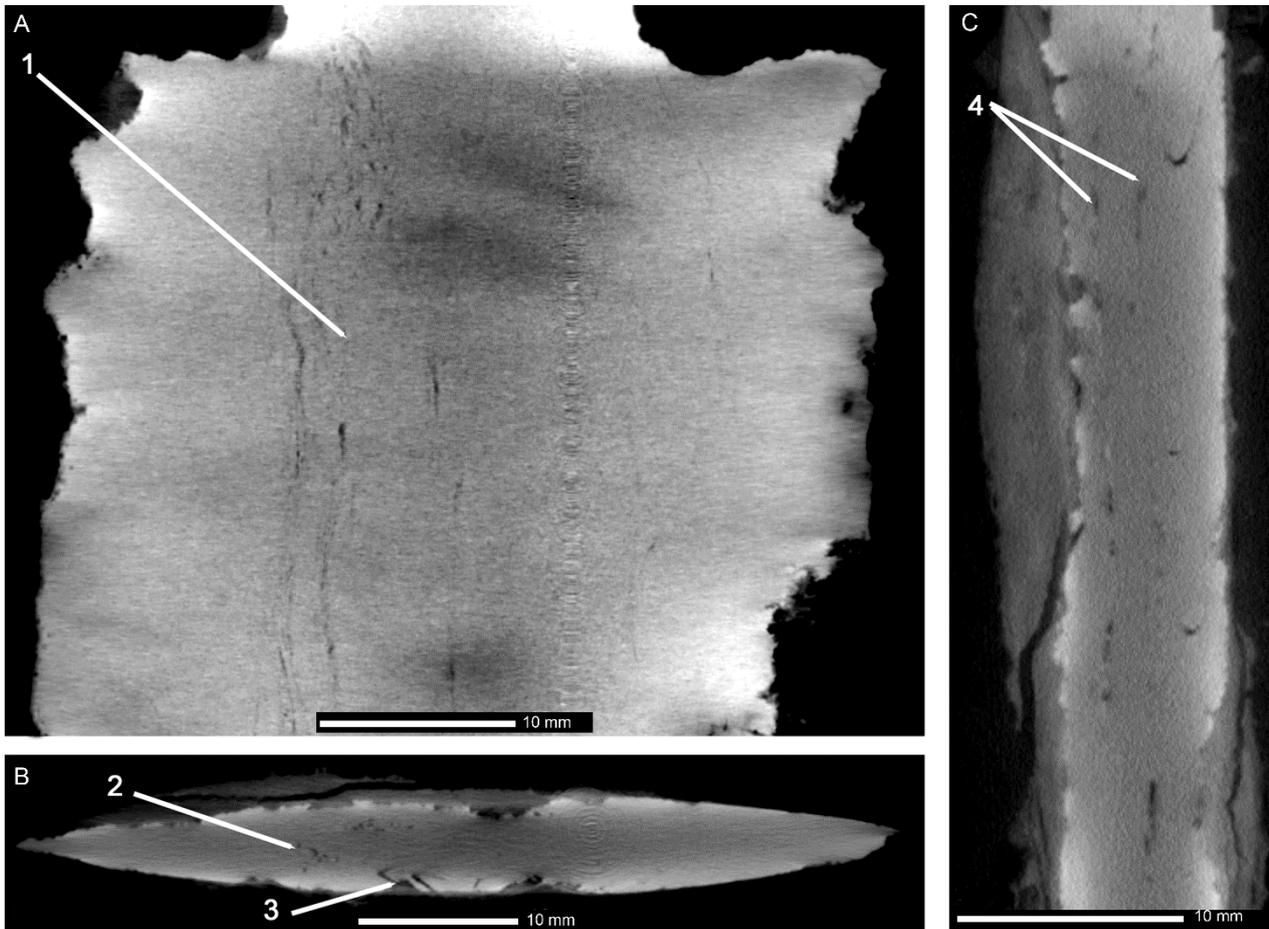


Abb. 5.17: μ -RCT-Schnittbilder der Spathaklinge aus Grab 65. Der frontale Schnitt (A) zeigt die Schmiedetextur (1) im Klingenkern, während im horizontalen Schnitt (B) Schweißnähte zu erkennen sind. Diese verdeutlichen, dass die Schneiden (2) angesetzt sind und jeweils zwei Kompositstäbe (3) auf den Kern geschmiedet wurden. Der sagittale Schnitt (C) veranschaulicht nochmals die beiden Schweißnähte (4) zwischen den Kompositstäben und dem Kern.

Eine Möglichkeit, dennoch Informationen über den Aufbau zu gewinnen, ergibt sich aus der Betrachtung der frontalen Schnittbilder. Zum Klingenninneren nimmt hier zwar ebenfalls das Artefakt als homogener Graubereich zu, es sind jedoch Strukturen zu erkennen, die in den Quer- und Längsschnitten nicht unbedingt sichtbar sind. In den meisten Fällen konnte auf diese Weise der Aufbau der Klinge über die frontalen Schnittbilder geklärt werden. So ist eine gleichbleibende Torsionsrichtung auf beiden Seiten der Klinge ein sicherer Hinweis auf einen mehrlagigen Aufbau (Westphal 1991a: 309 f.). Bei einem abrupten Wechsel der Torsionsrichtung im Klingenzentrum kann ebenfalls von einem mehrlagigen Aufbau der Klinge ausgegangen werden. Ferner können

⁴⁴ Zum methodischen Vorgehen der Messungen und Rekonstruktion im Fall der Spatha aus Grab 65 und des Vergleichsstücks aus Stahl siehe Kapitel 3.3.1 Mikro-Röntgencomputertomographie.

Klingenkerne erkannt werden, wenn zwischen den Kompositstäben spezifische Schmiedetexturen nachgewiesen werden können.

Einen besonderen Fall stellen Spathen wie das Beispiel aus Grab 205 dar. Es sind zwar Schmiedetexturen in der Klinge zu erkennen (Abb. 5.18), in den frontalen Schnitten sind aber weder Schweißmusterbahnen noch Schweißnähte sichtbar und es entsteht der Eindruck, dass die Klinge aus einem Stück geschmiedet wurde. Ob dieser Eindruck durch einen besonders guten Erhaltungszustand hervorgerufen wird oder ob es sich tatsächlich um ein homogenes Material handelt, kann nicht eindeutig beurteilt werden. Das Auftreten des oben beschriebenen Artefakts in den Querschnitten erlaubt keine eindeutige Analyse.

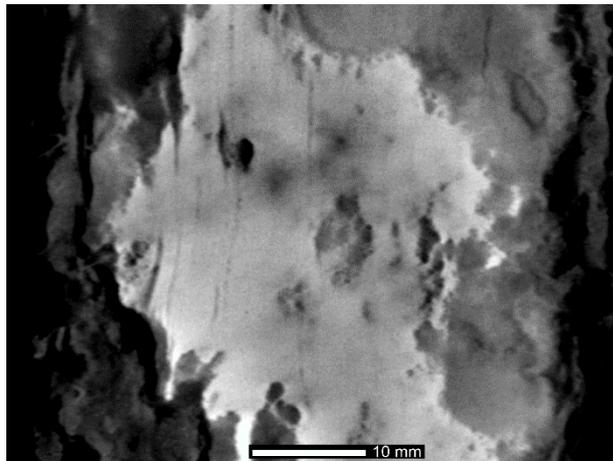


Abb. 5.18: Das frontale μ -RCT-Schnittbild der Spatha aus Grab 205 zeigt eine längs verlaufende Schmiedetextur.

5.3 Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse

Die 105 untersuchten Spathen zeigen stark abweichende Erhaltungszustände, die von vollständig korrodiert bis zu nur leicht an der Oberfläche mineralisiert reichen und auch innerhalb eines Objekts stark variieren können. Grundsätzlich erschwert ein guter Erhaltungszustand die Analyse der Klingen, da die Merkmale aufgrund von Strahlauhärtungsartefakten nicht deutlich abgebildet werden. Was die oft sichtbaren, längs verlaufenden Schmiedestrukturen betrifft, können diese Aufschluss über die Ausrichtung und womöglich auch die Häufigkeit der Faltung beim Schmiedevorgang geben, was innerhalb dieser Arbeit jedoch nicht näher überprüft werden konnte. Die angesprochenen unregelmäßigen bis ovalen Strukturen könnten auf einen anderen Herstellungsprozess bei der Gärbung des Materials deuten (Mäder 2009: 68). Es bleibt abzuwarten, ob sich in weiteren Analysen vermehrt solche Strukturen wie etwa Wirbel etc. nachvollziehen lassen, die weitere Informationen über den Herstellungsprozess liefern könnten.

Der Klingenaufbau konnte in den meisten Fällen nachvollzogen werden. Bei sechs Spathen konnte wegen auftretender Artefakte ein Kern zwischen zwei Lagen von Kompositstäben nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. In einem dieser Fälle konnte auch nicht geklärt werden, ob die

Schneiden angeschmiedet sind oder nicht, da hier eine durchgehende Schweißnaht zwischen Kern und Schneide nicht eindeutig festgestellt werden konnte. Bei fünf Spathen blieb der Nachweis einer Hohlkehle aufgrund des Erhaltungszustands offen.

Bei der Betrachtung des Schweißmusters müssen zur Bestimmung der Drehrichtung von Kompositstäben über die CT-Daten die gesamten Stäbe berücksichtigt werden. Zu beachten ist bei den einlagigen Spathen, die aus kompletten Kompositstäben bestehen, dass die bei der Messung zur Strahlungsquelle gerichtete Drehrichtung ausschlaggebend ist, da sich diese in der dahinterliegenden Klingenhälfte umkehrt (Abb. 5.19).

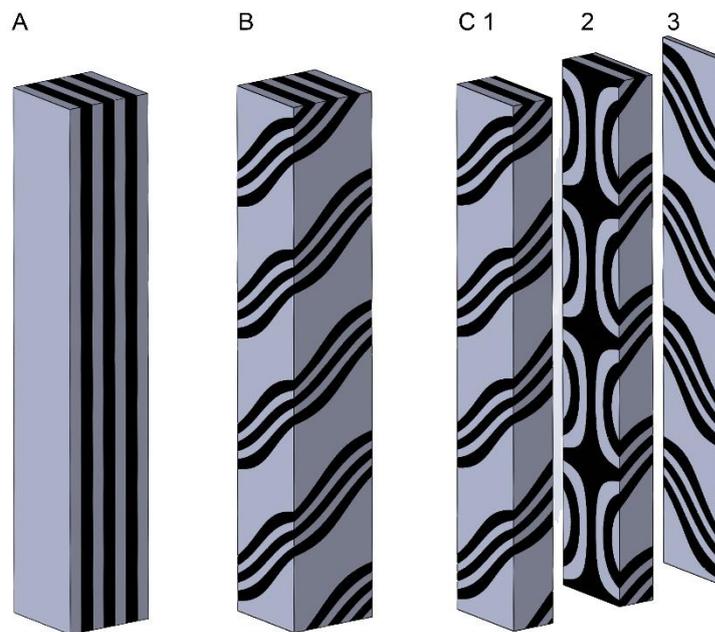


Abb. 5.19: Dreidimensionales Modell eines Kompositstabs (A), eines Z-gedrehten Kompositstabs (B) und der frontalen Schnitte eines Z-gedrehten Kompositstabs (C). Diese verdeutlichen, wie sich das Schweißmuster innerhalb des Stabes von Z (C1) zu halbkreisförmig in der Mitte (C2) zu S in der dahinterliegenden Hälfte (C3) verändert.

Bei den zweilagigen Spathen hat sich bei einer großen Anzahl der Klingen aus Lauchheim die Annahme bestätigt, dass die Kompositstäbe abgetragen wurden. Ursprünglich hat sich wohl ein Halbkreis-, Kreis- oder ein wie von Mäder (2009: 115) beschriebenes schlangenförmiges Muster bei versetzten Halbkreisen auf der Klinge abgezeichnet. Solche halbkreisförmigen Strukturen aus der Mitte von Kompositstäben sind in einigen Fällen in der Oberfläche nachzuweisen (Abb. 5.21d). Dennoch ist das ursprüngliche Aussehen der Oberfläche an den innerhalb dieser Arbeit untersuchten Objekten mitunter nur schwer zu bestimmen. Dies zeigt sich auch daran, dass sich unterschiedliche Oberflächenerhaltungszustände in einer Klinge darstellen und Halbkreise nur an einzelnen Stellen nachweisbar sind, während sie sich in anderen Bereichen nicht erhalten haben. Aufgrund der unterschiedlichen Erhaltungszustände der Spathen ist hier eine Aussage nicht für alle Klingen möglich. Es ist wohl nicht auszuschließen, dass die Kompositstäbe auch nicht bis zur Klingenhälfte

oder über diese hinaus abgetragen wurden. Zudem ist eine Gestaltung der Klingen durch unterschiedlich stark abgeschliffene Kompositstäbe möglich, sodass ursprünglich verschiedene Höhen der Kompositstäbe vorlagen (Emmerling 1972: 311; Mäder 2009: 118). Eine diesbezügliche genauere Analyse sowie eine Rekonstruktion der Oberflächen, wie von Mäder (2009: 119) vorgeschlagen, waren innerhalb dieser Arbeit nicht möglich.

Grundsätzlich ist für die Spathen aus Lauchheim auszuschließen, dass bei den mehrlagigen Klingen komplette Kompositstäbe vorliegen. Es liegt jeweils die untere Hälfte der Stäbe vor. Dies bedeutet, dass bei einem zweilagigen Aufbau bei dem zur Strahlungsquelle gerichteten Stab die zweite Hälfte und somit die entgegengesetzte Drehrichtung zur eigentlichen Torsion des Stabes zu sehen ist. Bei dem Stab der zweiten Lage liegt zwar ebenfalls der untere Teil des Stabes vor, dieser wird jedoch von seiner Rückseite betrachtet, sodass die Drehrichtung der tatsächlichen Torsion entspricht (Abb. 5.20).

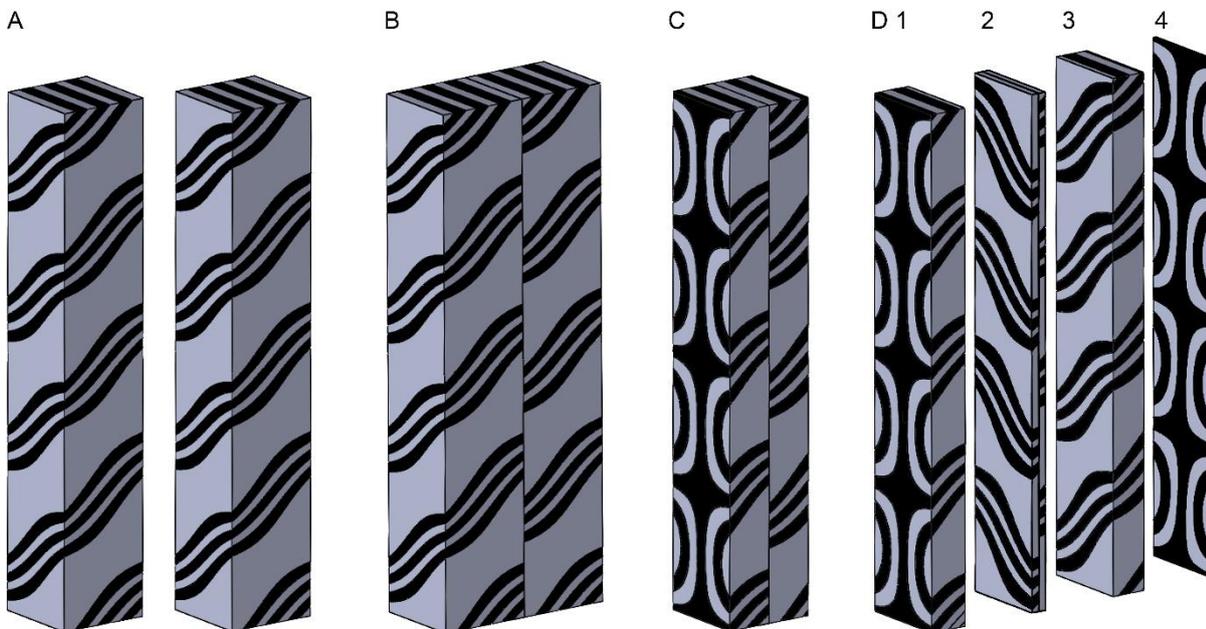


Abb. 5.20: Dreidimensionales Modell zweier Z-gedrehter Kompositstäbe (A), die miteinander verschweißt (B) und von beiden Seiten auf die Hälfte abgetragen (C) wurden. Die frontalen Schnitte (D) verdeutlichen, wie sich das Schweißmuster innerhalb einer zweilagigen Klinge verändert.

Die Beispiele der Spatha aus Grab 898 mit einer Lage und der Spatha aus Grab 784 mit zwei Lagen an Torsionsstäben verdeutlichen diese Interpretation der sichtbaren Torsionsrichtungen in den CT-Daten (Abb. 5.21).

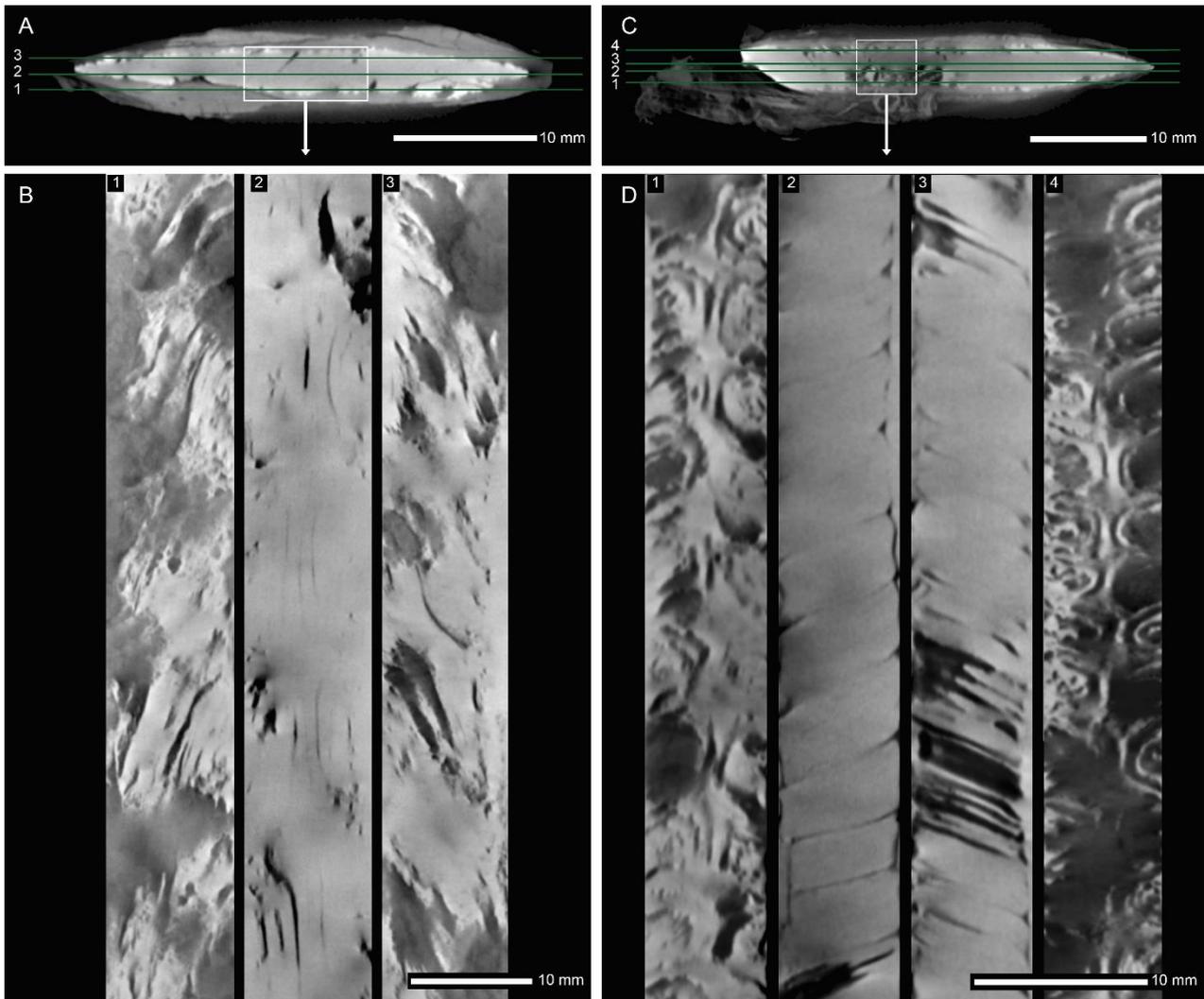


Abb. 5.21: μ -RCT-Schnittbilder der Spathen aus Grab 898 (A und B) und Grab 784 (C und D). Der horizontale Schnitt (A) zeigt den Querschnitt der einlagigen Spatha aus Grab 898, die frontalen Schnittbilder (B) veranschaulichen die Veränderung des Schweißmusters innerhalb des Z-gedrehten Kompositstabes, wobei die Abfolge der Schnitte der Strahlungsrichtung entsprechen (vgl. Abb. 5.19c). GleichermäÙen zeigen die Schnitte C und D diese Abfolge für den zweilagigen Aufbau, bestehend aus zwei, wohl auf die Hälfte abgetragener, S-tordierter Kompositstäbe der Spatha aus Grab 784 (vgl. Abb. 5.20d).

Für die Interpretation der Drehrichtung der Kompositstäbe wird hier deutlich, dass, obwohl in den CT-Daten zwei unterschiedliche Drehrichtungen zu erkennen sind, die Stäbe in der gleichen Richtung tordiert wurden. Für eine herkömmliche Analyse eines mehrlagigen Aufbaus bedeutet dies Folgendes: In Fällen, bei der die halbkreisförmige Struktur durch Korrosion nicht mehr erhalten ist oder durch den Materialabtrag durch Schleifen und Polieren oder Anätzen entfernt wurde, darf grundsätzlich die entgegengesetzte Drehrichtung zu der sichtbaren Torsion angenommen werden. Denn in einem solchen Fall würde man sich in der unteren Hälfte des Kompositstabes befinden. Der Grad der Wendelung kann in den CT-Daten über das Messen des Winkels der sichtbaren Streifen zur Kante des Kompositstabs ermittelt werden. Da dieser Winkel zum Inneren des Stabs kleiner wird, ist es notwendig, diesen am Rand zu erfassen. Das setzt einen möglichst vollständig erhaltenen Kompositstab voraus, um eine vergleichbare Aussage zu erhalten (Emmerling 1972:

300). Dies ist nicht unbedingt in allen Fällen gegeben, was eine exakte Maßangabe nicht immer zulässt.

Bei der Betrachtung der Schweißnaht konnten sowohl glatte als auch ineinander verzahnte Verbindungen zwischen tordierten Kompositstäben festgestellt werden. Die Beobachtung dieses Merkmals ist allerdings mit einer gewissen Unsicherheit behaftet, da sowohl die Qualität der Messung als auch der Erhaltungszustand der Klinge eine Rolle spielen. Emmerling (1972: 302) geht davon aus, dass die Kompositstäbe vor dem Verschweißen in einer rechteckigen Form vorliegen müssen. In den CT-Daten ist jedoch eine Verzahnung zum Teil sehr deutlich zu erkennen. Eine wellige, verzahnte Schweißnaht zwischen den Kompositstäben konnte durch das Polieren der Klingenoberfläche auch von Mäder (2009: 113 f.) an der Spatha aus Neudingen (Grab 75), Schwarzwald-Baar-Kreis festgestellt werden, weshalb auch dieses Merkmal in die Dokumentation aufgenommen wurde (Abb. 5.9).

An insgesamt neun Spathen sind weder Kompositstäbe noch Schweißnähte zu erkennen. Hier ist davon auszugehen, dass es sich um Klingen handelt, die kein Schweißmuster aufweisen (Menghin 1983: 18; Ypey 1984: 199; Mäder 2009: 122 f.). Hierfür spricht auch, dass in allen Fällen Schmiedestrukturen zu erkennen sind. Es ist jedoch zu beachten, dass die Grenze der Nachweisbarkeit erreicht ist, wenn an möglichen Schweißnähten keine Korrosion feststellbar ist. Unterschiedliche metallographische Phasen, die über einen möglichen Aufbau der Klinge Aufschluss geben könnten, sind wohl aufgrund zu geringer Dichteunterschiede und einer zu geringen Auflösung nicht darstellbar. Hier kann die μ -RCT die herkömmliche metallographische Analyse nicht ersetzen. Informationen zu unterschiedlichen Metallphasen, die auch Hinweise auf eine Wärmebehandlung liefern, könnten hingegen anhand der energieselektiven Neutronencomputertomographie gewonnen werden, wie dies Salvemini et al. (2012) an japanischen Schwertern zeigten.

Während der Querschliff auf einen kleinen Bereich der Spatha begrenzt ist, bietet die μ -RCT in Bezug auf den Klingenaufbau die Möglichkeit, die gesamte Spatha zu analysieren. Dies ist insofern von Bedeutung, als dass an einer nicht unerheblichen Anzahl der Spathen eine zum Teil mehrfache Veränderung des Schweißmusters über die gesamte Klinge zu beobachten ist. Dies kann nur dann erkannt werden, wenn die gesamte Klinge gemessen wird. Darüber hinaus ist die Methode nicht-invasiv und organische Reste müssen auch dann nicht entfernt werden, wenn die genauen formalen und metrischen Merkmale dokumentiert werden sollen. Die Methode bietet vielmehr die Möglichkeit, auch organische Schichten zu untersuchen und zu dokumentieren.

Im Vergleich zu den herkömmlichen Radiographien kann die μ -RCT ein sehr viel umfangreicheres und detaillierteres Bild des vorhandenen Schweißmusters und des Klingenaufbaus liefern. Zum Beispiel waren Schweißmuster und Eiseneinlagen sowie die Schmiedetexturen der Schwerter in den zuvor angefertigten Radiographien bisher nicht sichtbar bzw. nachvollziehbar (Stelzner et al. 2015).

5.4 Dokumentation

Aufgrund des Informationsgewinns durch die CT konnte die Dokumentation der Spathen durch zusätzliche Merkmale erweitert werden (Gauß 2013: 165; Stelzner et al. 2015). Auf dieser Grundlage wurden den Daten folgende Maße entnommen: die Gesamtmaße (Länge, Breite und Stärke) der Spathen, die Maße von Knauf, Knaufplatte und Parierplatte, die Länge der Klinge sowie die Breite und Stärke der Klinge am Auflager, in der Klingennitte und 50 Millimeter über der Spitze. Darüber hinaus wurden bei vorhandenen Kompositstäben die Länge und Breite des Schweißmusters sowie die Torsionsrichtung und -winkel der einzelnen Kompositstäbe erfasst. Für die Dokumentation der mehrlagigen Spathen wurde die Drehrichtung aufgenommen, wie sie in den CT-Daten sichtbar ist, ohne diese weiter zu interpretieren (s.o.). Rechtsgedrehte Stäbe werden mit S, linksgedrehte mit Z und gerade Stäbe mit I bezeichnet. Zudem werden die Wechsel der Torsion in den Stäben dokumentiert. Zur Vereinheitlichung wurde der Wendungswinkel immer am äußeren Rand des Kompositstabes abgemessen, wobei der Winkel auf 5° gerundet wurde. Dadurch wurden mögliche Abweichungen innerhalb eines Stabes berücksichtigt. War ein Halbkreismuster in der Oberfläche sichtbar, wurde dieses ebenfalls dokumentiert. Zudem wurden die Maße wie die Länge und Breite vorhandener Kehlungen und der Schneidewinkel in der Klingennitte aufgenommen. Weitere formale und herstellungstechnische Merkmale der Klinge, die dokumentiert wurden, sind der Klingenschnitt, der Querschnitt der Griffangel, die Form des Auflagers (Emmerling 1972: 307–309) und die Anordnung der Schneiden und Kompositstäbe im Schulterbereich (Mäder 2009: 141 f.), die Schmiedetextur in Schneiden und Kern (sofern sichtbar) sowie verzahnte Schweißnähte der Kompositstäbe. Die organischen Bestandteile des Griffs und der Scheide wurden angesprochen und deren stratigraphische Abfolge, Position und Maße dokumentiert. Teil der Dokumentation sind des Weiteren erhaltene Bestandteile der Aufhängung wie Beschläge oder Riemen. Unter diesen Gesichtspunkten wird die Spatha aus Grab 801 exemplarisch dargestellt.⁴⁵

5.5 Klingenaufbau und Schweißmuster der Spathen aus Lauchheim

Bei den untersuchten Spathen ergibt sich für den Klingenaufbau und die hierfür verwendeten Kompositstäbe anhand der μ -RCT der größte Erkenntnisgewinn. Aus diesem Grund soll hier diesbezüglich eine erste Übersicht der Lauchheimer Spathen dargestellt werden. Wegen der zuvor beschriebenen Schwierigkeit, eindeutige Aussagen zur originalen Oberfläche treffen zu können, beschränkt sich die Angabe hier auf den Klingenaufbau sowie die Anzahl und die Drehrichtung der einzelnen Stäbe und deren Variationen.⁴⁶ Für einlagige Klingen ergibt sich die Oberflächendarstel-

⁴⁵ Siehe Anhang Dokumentation Spatha Grab 801. Die Dokumentation der Spathen erfolgte gemeinsam mit Dr. F. Gauß bzw. Dr. B. Höke.

⁴⁶ Eine Übersicht der Spathen mit den im Folgenden diskutierten Merkmalen bietet die Tabelle A.4 im Anhang.

lung aus der Drehrichtung der Stäbe. Befinden sich etwa ein S- und ein Z-gedrehter Stab nebeneinander, zeigt sich eine V-förmige Abfolge an der Oberfläche. Bei umgekehrter Anordnung der Drehrichtungen eine Λ -förmige Abfolge.

Bei der Beschreibung der mehrlagigen Klingen und einem Vergleich mit bisher untersuchten Spathen ergibt sich nun eine weitere Schwierigkeit: Soll die Drehrichtung so angegeben werden, wie man sie nach einer Freilegung der Klinge sehen würde und wie sie in dieser Form bisher auch dokumentiert wurde – oder folgt man der Interpretation, dass der Stab abgetragen wurde und die tatsächliche, entgegengesetzte Drehrichtung angibt?⁴⁷ Da es in vielen Fällen schwierig zu beurteilen ist, wie weit die Stäbe abgetragen wurden und welches Muster sich tatsächlich auf der Oberfläche abgezeichnet hat, wird in der folgenden Beschreibung der Schweißmuster die Torsionsrichtung für zweilagige Spathen auf den gesamten Stab und nicht auf die in den CT-Daten sichtbare Richtung der vorliegenden Klingenhälfte angegeben. Dies bedeutet, dass die Angabe einer herkömmlichen Beschreibung entgegengesetzt ist, da hier bislang die sichtbare Drehrichtung der unteren Stabhälfte als die Torsionsrichtung angegeben wird. Künftige weiterführende Analysen und Rekonstruktionen der Oberflächen von zweilagigen Klingen könnten Aufschluss darüber geben, ob sich in diesen ursprünglich die Mitte der Kompositstäbe in Form von Halbkreisen darstellte.

5.5.1 Klingenaufbau

Die Analysen der Spathen zeigen eine Vielzahl unterschiedlicher Klingen. Im Folgenden werden diese in Kategorien dargestellt. Dabei werden der Klingenaufbau, das Schweißmuster und die Anzahl der Lagen und Torsionsstäbe berücksichtigt. Die Abbildung 5.22 gibt eine Übersicht der Kategorien, wobei neben dem unterschiedlichen Klingenaufbau die Anzahl der Kompositstäbe angegeben wird. Berücksichtigt man beim Querschnitt einer Klinge die Form, so kann eine weitere Unterscheidung aufgrund möglicher Hohlkehlen stattfinden. Dieses Kriterium ist jedoch aufgrund der Schwierigkeit, die originale Oberfläche in der Korrosion zu bestimmen, in einigen Fällen mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Konnte ein Typ mit Hohlkehle eindeutig identifiziert werden, erhält dieser Typ den Zusatz (H).

⁴⁷ Zur Interpretation der Drehrichtung mehrlagiger Klingen in den CT-Daten siehe Kapitel 5.3 Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse.

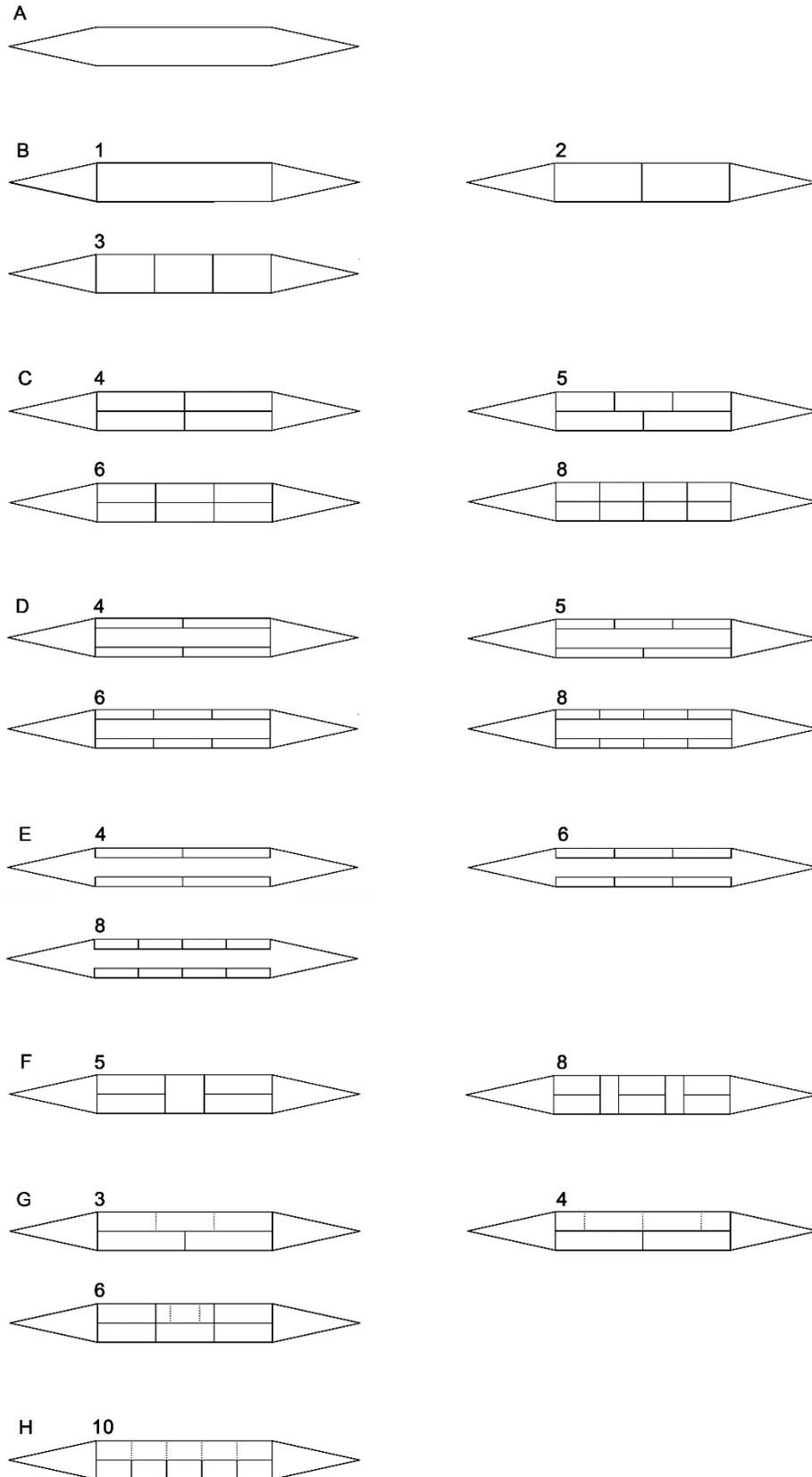


Abb. 5.22: Schematische Darstellung des Klingenaufbaus der Spathen aus Lauchheim mit variierender Anzahl an Kompositstäben. Die gestrichelten Linien in Typ G stellen den wellenförmigen Verlauf der Kompositstäbe dar. In Typ H sind die gestrichelt dargestellten Kompositstäbe nicht durchgehend.

Es zeigt sich, dass neun Klingen kein Schweißmuster und keine Schweißnähte (Typ A), sechs Spathen eine Lage und 87 Spathen zwei Lagen an Torsionsstäben aufweisen. Zwei Spathen zeigen den Aufbau, bei dem zwischen zweilagigen Torsionsstäben ein durchgehender einlagiger Stab vorliegt (s. Spatha Grab 500, Abb. 5.12 und 5.13).

Die Anzahl der Torsionsstäbe variiert bei den einlagigen Klingen zwischen eins und drei (Typ B1, B2 und B3). Bei einem zweilagigen Aufbau ist zunächst ein vorliegender Kern ein weiteres Unterscheidungsmerkmal, wobei hier auch relevant ist, ob die Schneiden angeschmiedet sind oder als ein Teil mit dem Kern vorliegen. Bei den zweilagigen Klingen ohne Kern variiert die Anzahl der Torsionsstäbe zwischen zwei und vier je Lage (Typ C4, C4(H), C6, C6(H) und C8). Zudem gibt es Fälle, in denen eine Lage in drei Stäben und die andere Lage in zwei Stäben vorliegt (Typ C5 und C5(H)). Bei den Klingen mit Kern und angeschmiedeten Klingen variieren die Stäbe zwischen zwei und vier je Lage (Typ D4, D6, D6(H), D8 und D8(H)). Auch hier gibt es den Fall mit einer ungeraden Verteilung der Torsionsstäbe von drei zu zwei (Typ D5). Die Klingen mit Kern und nicht angeschmiedeten Schneiden liegen mit einer Anzahl von zwei, drei und vier Torsionsstäben je Lage vor (Typ E4, E6 und E8). Die zwei Klingen, welche sowohl aus zweilagigen als auch einlagigen Kompositstäben bestehen, weisen zum einen zwei Stäbe je Lage und dazwischen einen einzelnen Stab (Typ F5, Grab 1188) und zum anderen drei Stäbe je Lage und zwischen diesen zwei einzelne Stäbe (Typ F8(H), Grab 500) auf.

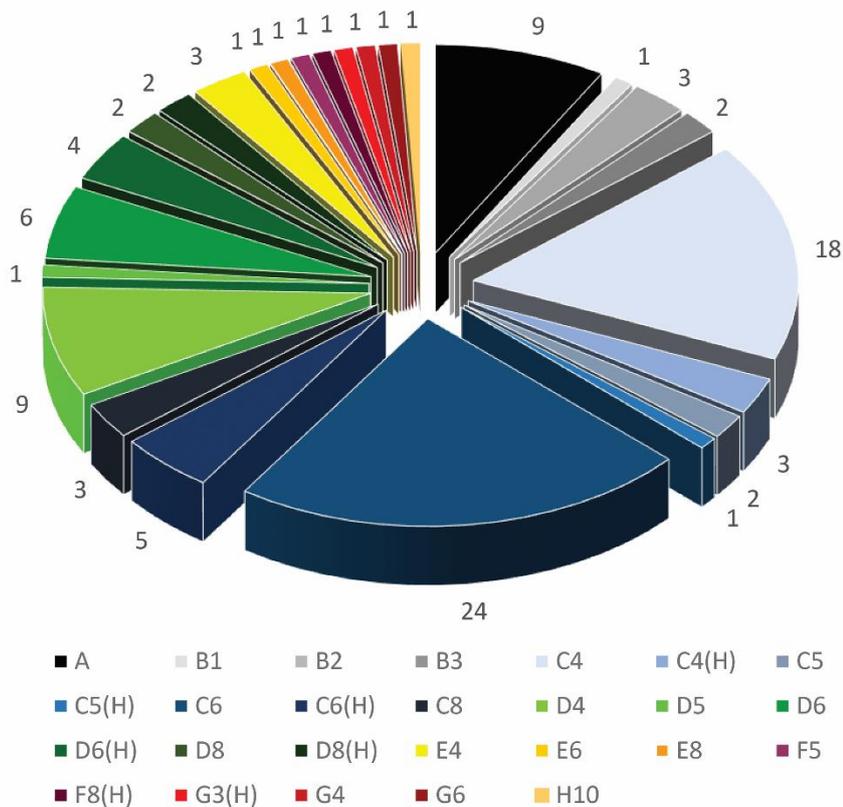


Abb. 5.23: Verteilung der unterschiedlich aufgebauten Klingen in Lauchheim.

Vier weitere zweilagige Klingen lassen sich aufgrund ihres individuellen Schweißmusters nicht ohne Weiteres in diesen Kategorien erfassen, weshalb sie detailliert beschrieben werden. Es handelt sich um drei Klingen mit in einer Lage zum Teil wellenförmigen untordierten Stäben, in deren Einbuchtungen sich D-förmige Flächen befinden. Die Klingen werden unter dem Typ G zusammengefasst (Typ G3(H), G4 und G6). Die Spatha aus Grab 1081 weist zum Teil quer verlaufende Torsionsstäbe auf (Typ H10).

Die Anzahl der beschriebenen Typen wird in Abbildung 5.23 dargestellt. Die häufigste Gruppe Typ F weist 24 Spathen auf, wobei in dieser Gruppe auch die Spatha aus Grab 99 aufgeführt ist, bei der ein Kern nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Die zweite Gruppe Typ E beinhaltet 17 Klingen, wobei hier bei vier Spathen der Gräber 236, 284, 360 und 589 ein Kern nicht eindeutig ausgeschlossen werden kann. Ein individueller Klingenaufbau liegt bei 14 Spathen vor.

Bei der Betrachtung des Klingenaufbaus und der Hohlkehlen wird deutlich, dass allein diese Merkmale zu 26 unterschiedlichen Typen in Lauchheim führen. Dabei sind hier weitere Kriterien wie Wendelungsrichtung und -winkel sowie ein Wechsel von tordierten und geraden Bereichen der Torsionsstäbe oder der Übergang der Torsionsstäbe und Schneiden in die Griffangel noch nicht berücksichtigt. Bei dem letztgenannten Konstruktionsmerkmal wurde festgestellt, dass bei den bestimmbareren Übergängen sowohl die Torsionsstäbe als auch die Schneiden bis auf eine Ausnahme alle in die Griffangel übergehen. Lediglich die Spatha aus Grab 1079 unterscheidet sich dadurch, dass neben den Kompositstäben nur die Schneide auf der rechten Seite in die Griffangel übergeht (Abb. 5.24), was am ehesten dem von Mäder (2009: 143) formulierten Typ C entspricht.

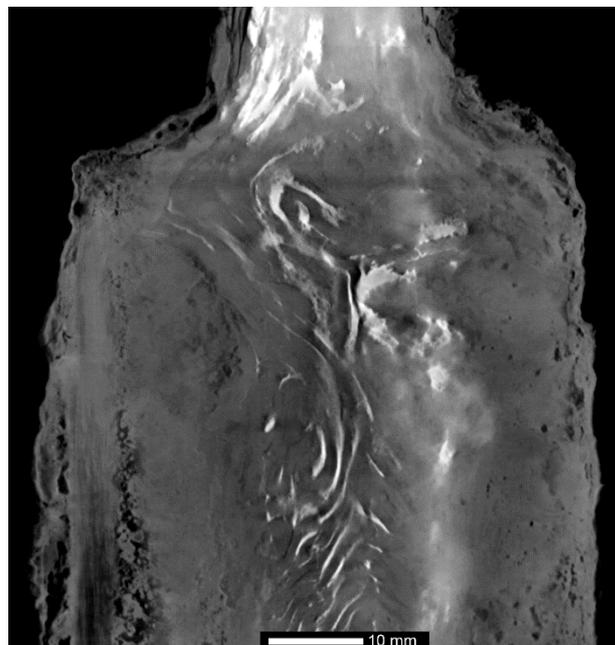


Abb. 5.24: Frontales µ-RCT-Schnittbild der Spatha aus Grab 1079. Die Kompositstäbe weichen vor dem Auflager nach links ab und gehen dann zusammen mit der rechten Schneide in die Griffangel über.

5.5.2 Schweißmuster mit tordierten Kompositstäben

Gerade das durch unterschiedlich tordierte Stäbe hervorgerufene Muster ist bei den Klingen aus Lauchheim sehr unterschiedlich. So variieren die Klingen in der Anordnung der tordierten Stäbe, zeigen zum Teil sehr unterschiedliche Wechsel von tordierten und untordierten Bereichen, und auch die Wendelungswinkel weichen zum Teil erheblich voneinander ab.⁴⁸ Betrachtet man die einzelnen Gruppen unter diesen Aspekten, so zeigt sich, dass sich die Klingen mit einlagigem Aufbau in ihrem Schweißmuster alle voneinander unterscheiden. Lediglich bei den zweilagigen Klingen mit zwei bzw. drei Stäben je Lage sind übereinstimmende Schweißmuster zu finden. Die Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die Anzahl der mehrfach auftretenden Schweißmuster und den zugehörigen Klingenaufbau. Bei den aufgeführten Klingen liegt der Torsionswinkel zwischen 50 und 70°. Die Spatha aus Grab 284 wurde aufgrund des erheblich abweichenden Winkels von 20 bis 30° nicht in die Auswahl mit aufgenommen. Ein weiteres Merkmal ist die vorhandene Schweißnaht. Bei den zweilagigen Klingen kommt diese sowohl verzahnt als auch glatt vor, wobei bei wechselnden tordierten und untordierten Stäben auch beides in einer Klinge anzutreffen ist. Auffällig ist hingegen, dass die sechs Spathen mit einlagigem Aufbau durchweg eine glatte Schweißnaht aufweisen.⁴⁹

Tab. 5.1: Mehrfach auftretende Schweißmuster mit zugehörigem Klingenaufbau.

Schweißmuster		Anzahl der Schweißmuster je Klingenaufbau				
<i>Klingen mit zwei Kompositstäben je Lage</i>						
Torsion Lage 1	Torsion Lage 2	C4	C4(H)	D4		
ZS	ZS	5	2	1		
ZS	SZ	5		4		
SZ	SZ	2	1	1		
<i>Klingen mit drei Kompositstäben je Lage</i>						
Torsion Lage 1	Torsion Lage 2	C6	C6(H)	D6	D6(H)	E6
SZS	SZS	5	1		1	1
SSS	SZS	2				
mehrf. SZS zu III	mehrf. SZS zu III	2	2		1	
mehrf. III zu SZS	mehrf. SZS zu III	2				
mehrf. SIS zu ISI	mehrf. SIS zu ISI	1	1			
mehrf. ISI zu SIS	mehrf. SIS zu ISI			2		
mehrf. ISI zu ZIZ	mehrf. ISI zu ZIZ	1	1			

5.5.3 Schweißmuster mit wellenförmigen untordierten Kompositstäben

Die drei Klingen, welche zum Teil ein wellenförmiges Schweißmuster aufweisen, bestehen aus zwei Lagen an Kompositstäben und haben keinen Kern. Die Schneiden sind angeschmiedet. Im Fall der Spatha aus Grab 765 liegt eine Lage in zwei durchgehend tordierten Stäben vor, und die

⁴⁸ Siehe Tabelle A.5 im Anhang.

⁴⁹ Ebd.

andere Lage zeigt ein wellenförmiges untordiertes Band. Hierbei handelt es sich um einen durchgehenden wellenförmigen Kompositstab, dessen Einbuchtungen auf beiden Seiten mit D-förmigen Flächen gefüllt sind, in denen zum Teil eine Wendung zu erkennen ist (Typ G3(H), Abb. 5.25a). Eine Spatha aus Waal bei Nijmegen (Prov. Gelderland, Niederlande) mit vergleichbarem Schweißmuster wird von Ypey (1982: 387; 1984: 199) beschrieben. Im zweiten Fall, der Spatha aus Grab 1004, liegt eine Lage in zwei durchgehend tordierten Kompositstäben vor, die zweite Lage zeigt ein zum Teil wellenförmiges Schweißmuster. Hier gehen zwei ansonsten SZ-tordierte Stäbe in zwei Bereichen zu wellenförmigen untordierten Stäben über (Typ G4, Abb. 5.25b). Die Einbuchtungen des wellenförmigen Bandes sind mit D-förmigen Flächen gefüllt, die im oberen Bereich eine wirbelartige Struktur zeigen und im unteren Bereich eine zum Teil Z-gedrehte Torsion aufweisen.

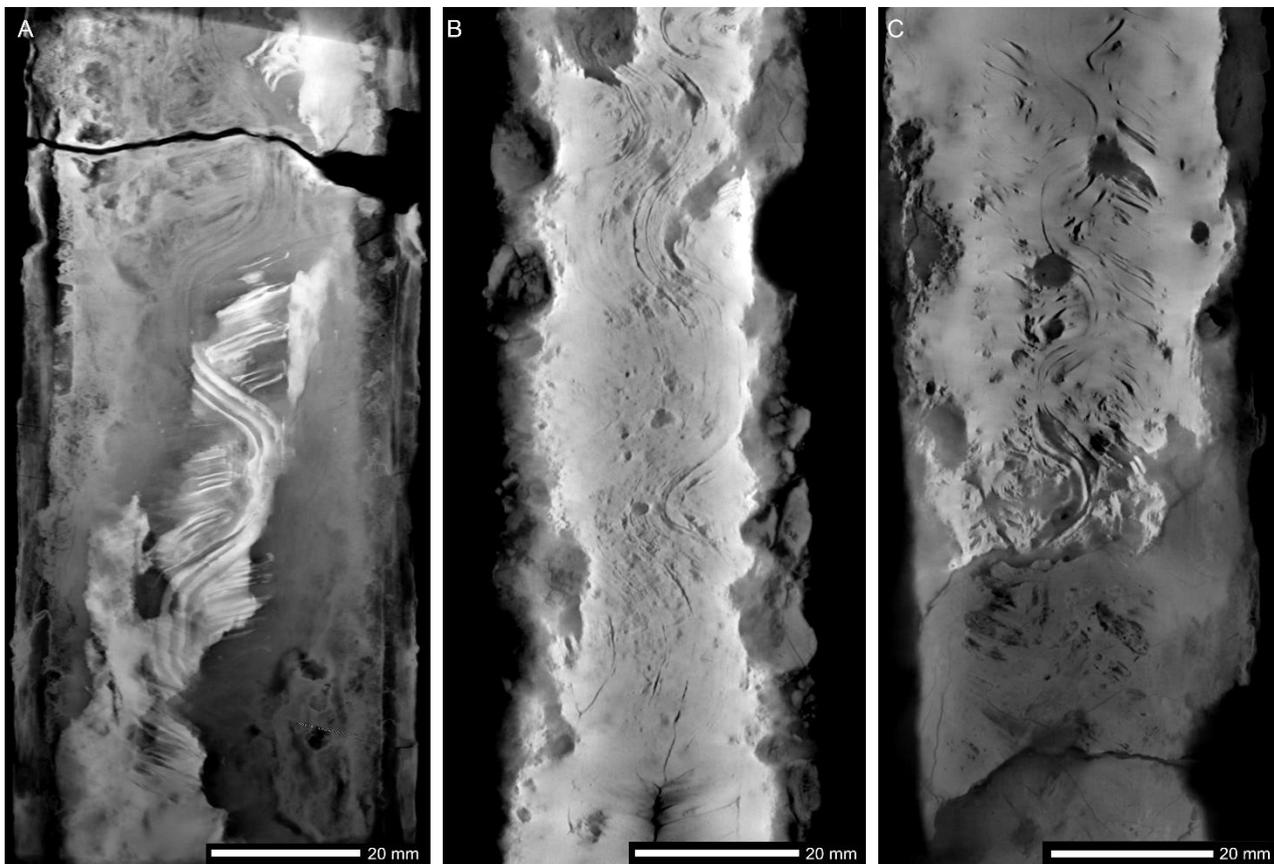


Abb. 5.25: Frontale μ -RCT-Schnittbilder der Schweißmuster mit wellenförmigen nicht tordierten Kompositstäben der Spathen aus Grab 765 (A), 1004 (B) und 858 (C).

Die Spatha aus Grab 858 (Typ G6) zeigt in einer Lage drei durchgehend tordierte Kompositstäbe und weist in der zweiten Lage einen wellenförmigen untordierten Stab mit D-förmigen Einbuchtungen auf, der 300 mm unter dem Auflager in einen Z-gedrehten Stab übergeht. Dieser Stab befindet sich zwischen zwei weiteren durchgehend S-tordierten Stäben (Abb. 5.25c).

Weitere bekannte Spathen, die ein wellenförmiges Schweißmuster aufweisen, sind die Goldgriffspatha aus Sindelfingen (Paysan 2005: 202; Mäder 2009: 116) sowie eine Spatha aus Pleidelsheim (Koch 2001: 323) und eine aus Iversheim (Ypey 1984: 199).

Die mögliche Herstellungstechnik solcher wellenförmiger Schweißmuster wird von Ypey (1984: 196–199) beschrieben. Entweder wurde ein wellenförmiges Band geschmiedet, in dessen Einbuchtungen dann weiteres Material eingebracht wurde – oder es wurden auf beiden Seiten des unterordneten Stabes weitere Stäbe angeschmiedet und diese dann gemeinsam wellenförmig verformt. Anschließend wurden die seitlichen Stäbe bis auf das Material in den Einbuchtungen abgetragen.

5.5.4 Schweißmuster mit quer verlaufenden Kompositstäben

Die Spatha aus Grab 1081, von der nur drei Fragmente erhalten sind, wurde aus zwei Lagen ohne Kern und mit angeschmiedeten Schneiden gefertigt. Sie weist ein vollkommen individuelles Schweißmuster (Typ H10) auf (Abb. 5.26).

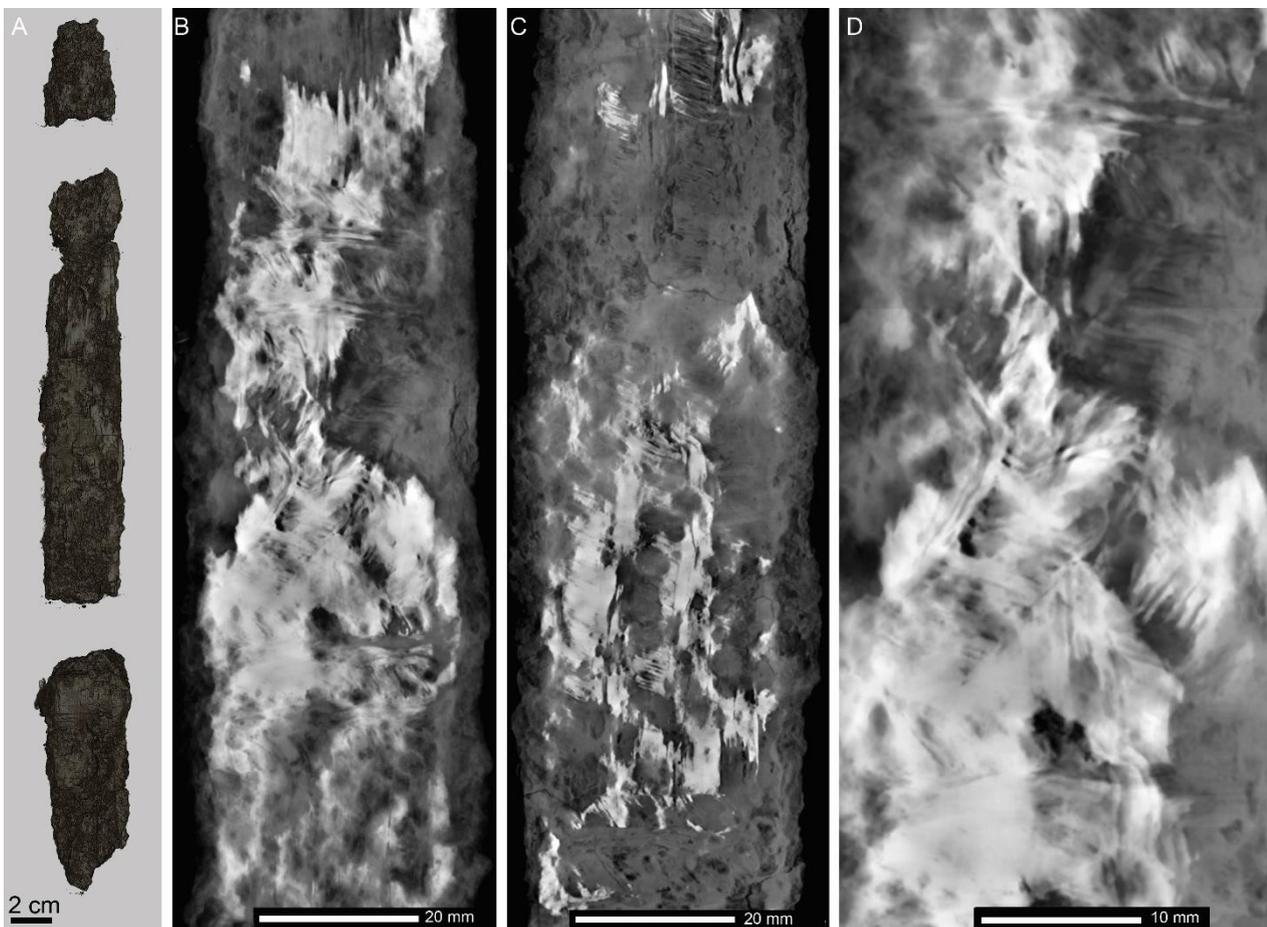


Abb. 5.26: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung (A) der fragmentierten Spatha aus Grab 1081 sowie frontale μ -RCT-Schnittbilder des Schweißmusters auf Vorder- (B) und Rückseite (C) des größten Fragments. Der frontale Schnitt (D) zeigt das aus tordierten Kompositstäben gefertigte X in der Vorderseite der Klinge im Detail.

Die erste Lage zeigt den mehrfachen Wechsel einiger gerader Bahnen zu quer verlaufenden Torsionsstäben, deren Torsionsrichtung als ZIZIZ zu erkennen ist. Da es sich hierbei um die zum Betrachter gerichtete Seite handelt und nur der untere Teil der Stäbe vorliegt, müssen diese Stäbe

SISIS tordiert sein. Zudem ist zwischen zwei Bereichen dieser quer verlaufenden Stäbe ein Abschnitt eingeschoben, in dem sich zwei Stäbe X-förmig kreuzen, welche eine Z-gedrehte Torsion aufweisen. Da nur der untere Teil der Stäbe vorliegt, bedeutet dies, dass die Stäbe in S-Richtung gedreht und anschließend abgeschliffen wurden. In den Aussparungen des X liegen oben und unten gerade Bahnen vor, in den Seiten sind es nach innen gekrümmte Bahnen. Die zweite Lage der Spatha aus Grab 1081 liegt in fünf Torsionsstäben vor, was für die untersuchten Spathen aus Lauchheim eine Ausnahme darstellt. Die Torsion wechselt hier mehrfach von ISISI zu SISIS und ist somit identisch zu den quer verlaufenden Bahnen der ersten Lage.

5.5.5 Einlagen im Schweißmuster

In fünf Fällen wurden in dem Schweißmuster Eiseneinlagen und in einem Fall eine Nichteiseneinlage aus Draht nachgewiesen (Abb. 5.27). Die Eiseneinlagen, die in vier Klingen eindeutig festgestellt wurden, unterscheiden sich alle voneinander. In der Klinge aus Grab 40 befindet sich womöglich ebenfalls eine Einlage, sie ist jedoch nicht eindeutig zu identifizieren. Diese wohl Z-förmige Eiseneinlage befindet sich in Längsrichtung 150 mm unterhalb des Auflagers.

Eine eindeutig nachzuweisende Eiseneinlage zeichnet sich hingegen in der Klinge der Spatha aus Grab 99 ab. Hier befinden sich 90 mm unter dem Auflager zwei gegenständige schlüssellochförmige Eiseneinlagen (Abb. 5.27a). In der Klinge aus Grab 284 ist eine S-förmige Schlinge in Längsrichtung 60 mm unter dem Auflager zu erkennen. (Abb. 5.27b).

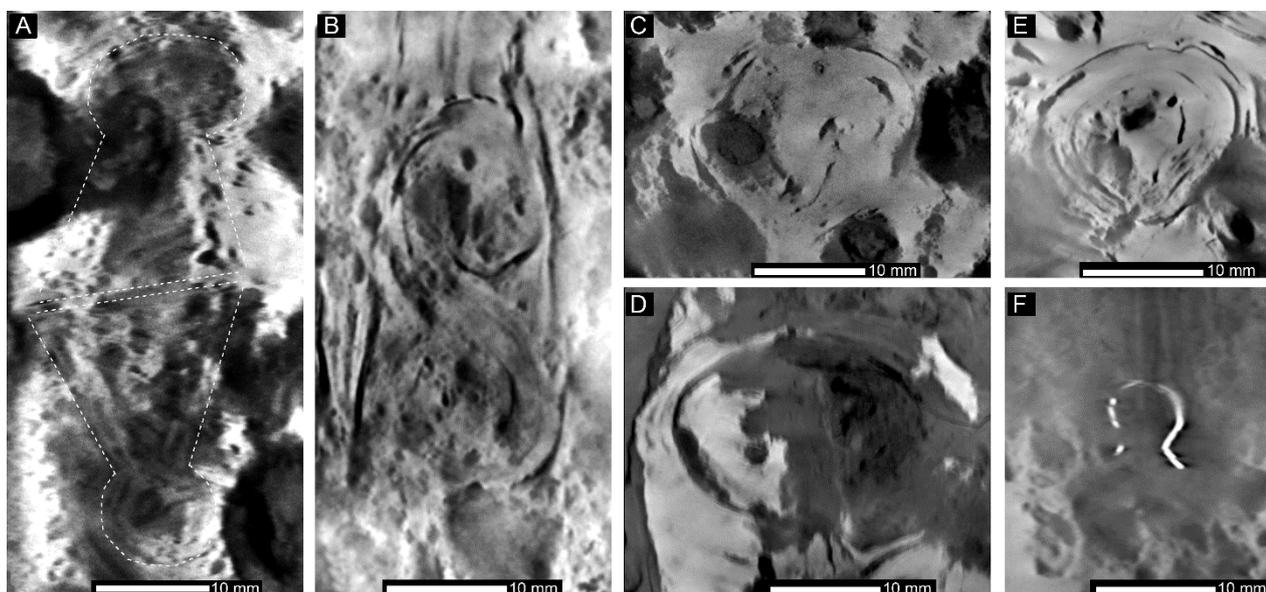


Abb. 5.27: Frontale μ -RCT-Schnittbilder der Eiseneinlagen in den Spathaklingen der Gräber 99 (A), 284 (B), 522 (C und D) und 774 (E) sowie der Drahteinlage in der Klinge der Spatha aus Grab 541 (F).

Eine weitere, wohl S-förmige Schlinge wurde in der Klinge aus Grab 522 nachgewiesen, wobei diese quer liegend in die Klinge 35 mm unter dem Auflager eingebracht wurde (Abb. 5.27c). Im Abstand von 30 mm befindet sich eine weitere quer liegende ovale bzw. C- oder G-förmige Einlage

(Abb. 5.27d), was womöglich als S-O zu interpretieren ist (Mäder 2009: 116 f.). Eine ebenfalls ovale, zum Ort hin offene Eiseneinlage ist im oberen Drittel der Klinge aus Grab 774 sichtbar (Abb. 5.27e).

Die Spatha aus Grab 541 zeigt, im Gegensatz zu den anderen Einlagen, eine Drahteinlage aus einem dichteren Metall. Hierbei handelt es sich um einen S-gedrehten Draht in Omegaform, der sich 100 mm unterhalb des Auflagers befindet (Abb. 5.27f). Ähnliche Einlagen aus Draht werden von Koch (1977: 99) als Messingeinlagen, von Westphal (1991b: 97 f.) und Lehmann (2014: 119) als Buntmetalleinlagen beschrieben.

5.6 Zusammenfassung und Ausblick

Grundsätzlich ist die μ -RCT eine nichtinvasive, effektive und präzise Methode zur Untersuchung von Spathaklingen. Die Ergebnisse der Messungen der 105 Spathen aus Lauchheim haben gezeigt, dass die μ -RCT ein Verfahren darstellt, durch das die gängigen Merkmale einer Spatha erfasst werden können. Darüber hinaus bietet die Methode die Möglichkeit, die Merkmalsbasis erheblich zu erweitern. Dies gilt auch bei Spathen, die sich in Blockbergungen befinden. Als Merkmale zu nennen sind hier vor allem der Klingenaufbau, das Schweißmuster und mögliche Einlagen sowie der Übergang der Schweißmusterbahnen in die Griffangel. Darüber hinaus könnten die charakteristischen Schmiedetexturen weitere Anhaltspunkte auf den Herstellungsprozess liefern.

Die Aussagekraft der Messungen wird durch mehrere Faktoren beeinflusst. Neben den technischen Voraussetzungen und den Messparameter sind die angewendeten Algorithmen zur Rekonstruktion der Daten, vor allem aber der Erhaltungszustand der Klinge selbst zu nennen. Ein bisher nicht gelöstes technisches Problem ergibt sich aus der Form der Klinge, die zu einem Artefakt aufgrund von Strahlauhfärtung führt. Dieses Artefakt tritt auf, sobald ein Metallkern der Klinge erhalten ist. Abgesehen von der Auflösung einer Messung und dem Erhaltungszustand einer Klinge besteht daher für die Beurteilung des Klingenaufbaus ein weiterer einschränkender Faktor.

Trotz des Artefakts ist eine Interpretation der Daten möglich. Anhand der Messungen der 105 Spathen aus Lauchheim mit der μ -RCT konnten weiterführende Merkmale über den Aufbau der Klingen und die Gestaltung der Schweißmuster frühmittelalterlicher Klingen gewonnen werden, die Einblick in die komplizierte Herstellungstechnik und vielfältige Gestaltung derselben liefern. Zieht man zu den hier angesprochenen Konstruktionsmerkmalen auch metrische Merkmale hinzu, etwa die Maße der Klinge und der Griffangel, die Breite des Schweißmusters und den Schneidenwinkel sowie formale Merkmale wie die Form des Auflagers, ist davon auszugehen, dass es sich bei den hier vorliegenden Klingen um sehr individuell hergestellte und gestaltete Objekte handelt.

Mit der nichtinvasiven Visualisierung des Klingenaufbaus und einer detaillierten systematischen Erfassung herstellungstechnischer Merkmale der Spathen des Gräberfeldes von Lauchheim stehen der Frühmittelalterforschung erstmals Informationen über eine Anzahl von Funden zur Verfü-

gung. Diese könnten zukünftig die Grundlage für Untersuchungen zu Produktions- und Verteilungsmechanismen dieser wichtigen Fundgattung darstellen und in der Folge auch bei der Konstruktion sozial- und handelsgeschichtlicher Modelle Eingang finden (Gauß 2013: 165 f.).

Einlagen in den Klingen könnten neben der angenommenen symbolischen Bedeutung (Mäder 2009: 116) auch als Marken eines Schmiedes verstanden werden, Gauß (2013: 165) zeigte eine Verbreitung S-förmiger Eiseneinlagen mit regionalem Schwerpunkt. Demzufolge könnten die Verteilung von Marken und ein Vergleich mit dem Klingenaufbau und herstellungstechnischen Merkmalen Hinweise auf Werkstätten oder Absatzgebiete liefern. Zieht man darüber hinaus auch die Knäufe und die Grabinventare hinzu, lassen sich womöglich auch Hinweise auf die von Lehmann (2014: 120) angenommene chronologische Entwicklungen in der Herstellungstechnik und Gestaltung gewinnen.

6 Weitere Untersuchungen ausgewählter Metallfunde

Neben den 105 Spathen wurden weitere Metallobjekte aus Lauchheim untersucht. Zum Einsatz kam hier die μ -RCT, aber auch die Sub- μ -RCT, wenn höhere Auflösungen an kleineren Objekten erzielt werden sollten.⁵⁰

6.1 Objektansprache stark korrodierter Funde

Die Untersuchung und Dokumentation der Funde in den Blockbergungen hat bereits gezeigt, dass eine Objektansprache von stark korrodierten Funden möglich ist. Die μ -RCT kann auch für bereits geborgene Einzelfunde angewendet werden, die zum Beispiel durch aufliegende Eisenkorrosionsschichten und aufgrund eines fragilen Erhaltungszustandes nicht ohne Weiteres freizulegen und zu restaurieren sind. Ein Beispiel hierfür ist ein filigranes Objekt aus Grab 911, das ohne die Untersuchung durch die CT kaum hätte identifiziert werden können. Aufgrund einer dicken Eisenkorrosionsschicht und seines stark korrodierten schlechten Erhaltungszustands riskiert eine Freilegung, das Objekt zu beschädigen. In den CT-Daten lässt sich hingegen die Form des Filigrans unter den Korrosionsschichten nachvollziehen (Abb. 6.1). Das fragmentarisch erhaltene Objekt kann anhand der CT-Daten, der sichtbaren Glaseinlage und durch Vergleichsfunde aus Gold (Last 1973: Taf. 34) und Bronze (Riemer 1992: 123 f.; 2000: 58–60) als ein Korbchenohrring mit Glaseinlage identifiziert werden, der in diesem Fall höchstwahrscheinlich aus Silber gefertigt wurde.

⁵⁰ Zum methodischen Vorgehen und den Messparametern siehe Kapitel 3.3.1 Mikro-Röntgencomputertomographie und Kapitel 3.3.2 Submikro-Röntgencomputertomographie. Im Anhang gibt die Tabelle A.4 eine Übersicht über die untersuchten Objekte und Materialien.

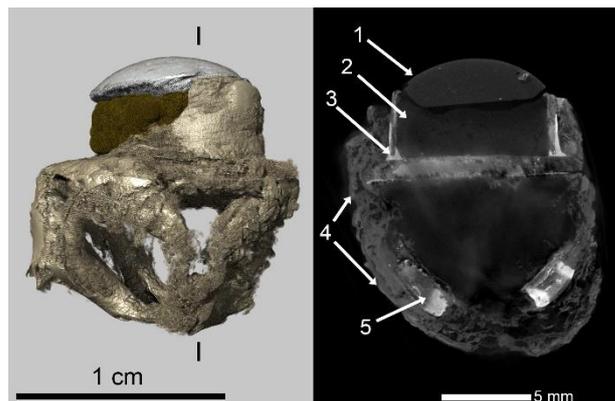


Abb. 6.1: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung (links) und sagittales μ -RCT-Schnittbild (rechts) des Körbchenohrrings aus Grab 911. Die Glaseinlage (1) befindet sich auf einer Füllmasse (2), die sich in der Fassung (3) befindet. Eisenkorrosion (4) bedeckt sowohl die Fassung als auch das Filigran (5) des Ohrrings. Die dreidimensionale Darstellung zeigt den nicht vollständig erhaltenen Ohrring ohne die aufliegende Eisenkorrosion. Auf der linken Seite ist die Bruchkante des ursprünglich anschließenden Rings zu erkennen.



Abb. 6.2: Photographie des Konglomerats aus zusammenkorrodierter Schnalle mit Beschlag und Riemendurchzug (links) sowie dreidimensionale μ -RCT-Darstellung der freigestellten Objekte (rechts) aus Grab 221/235.

Über die Objektansprache einzelner Funde hinaus bietet sich die CT vor allem auch für mehrere zusammenkorrodierte Funde an, da diese in den CT-Daten segmentiert und einzeln dargestellt werden können. Ein Beispiel hierfür ist die als Konglomerat zusammenkorrodierte Schnalle mit Beschlag und Riemendurchzug vom Typ Civezzano aus Grab 221/235, deren Teile aufgrund der Korrosion und ihrer miteinander verbundenen Lage nicht ohne Weiteres voneinander getrennt und freigelegt werden können (Abb. 6.2). Anhand der μ -RCT lassen sich diese Funde einzeln darstellen, ansprechen und dokumentieren.⁵¹

⁵¹ Siehe Anhang Dokumentation Schnalle mit Beschlag und Riemendurchzug Grab 221/235.

6.2 Objektaufbau komplexer Funde

Für die Untersuchung des Objektaufbaus und zur Erfassung von Konstruktionsmerkmalen und herstellungstechnischen Details bietet sich die μ -RCT sowohl für Objekte in Blockbergungen als auch für bereits geborgene Funde an. So konnte Oberhofer (2014) den Aufbau einer römischen Schnellwaage aus Eisen anhand der μ -RCT klären und in Lauchheim konnten zwei Bronzewaagen untersucht werden, die sich in Blockbergungen befinden. In einem Fall (Grab 151) liegt die Waage mit Waagschalen und Handhabe vor (Abb. 6.3). In beiden Fällen lässt sich die gleiche Konstruktion der Zunge und der Waaggabel darstellen und nachvollziehen.

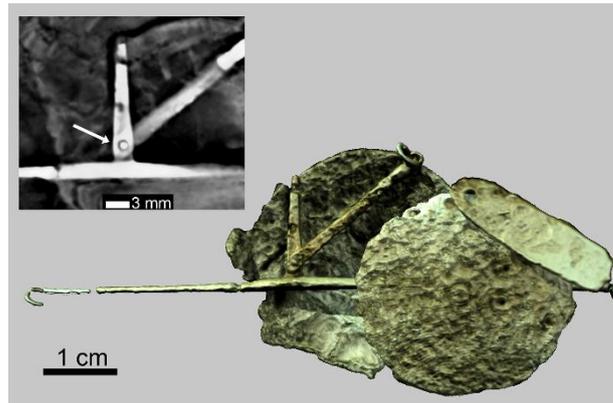


Abb. 6.3: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung der Waage mit Waagschalen und Handhabe aus Grab 151 in Fundlage sowie frontales μ -RCT-Detailschnittbild der Zunge mit der im unteren Bereich eingebrachten Achse (siehe Pfeil) der Waaggabel.

Anhand der CT-Daten ist zudem ist die Konstruktionsweise von Scheibenfibeln darstellbar. Abbildung 6.4 verdeutlicht den Aufbau der im Block geborgenen Scheibenfibeln mit Granateinlagen aus Grab 1220 und die unterschiedlichen Materialien, die hierfür Verwendung fanden. Auch bei bereits geborgenen und restaurierten Scheibenfibeln lassen sich anhand der CT-Daten weitere Informationen zur Konstruktion gewinnen. So ist neben den Granateinlagen, dem Waffelgoldblech und dem Perldraht ein weiteres Konstruktionsmerkmal bei der Fibel aus Grab 637 zu erkennen. In diesem Fall ist die Konstruktion der Spiralhalterung und der Nadelrast nachvollziehbar (Abb. 6.5). Jeweils zwei Bleche sind von unten durch eine Öffnung in der Grundplatte geführt (Abb. 6.5f), auf deren Oberseite nach außen hin gefalzt und durch ein Lot fixiert, das an den Gaseinschlüssen zwischen der Grundplatte und den Blechen der Nadelrast sowie der Spiralhalterung zu erkennen ist. Ebenfalls sichtbar ist das Lot, mit dem der Perldraht auf der Grundplatte fixiert wurde (Abb. 6.5e).

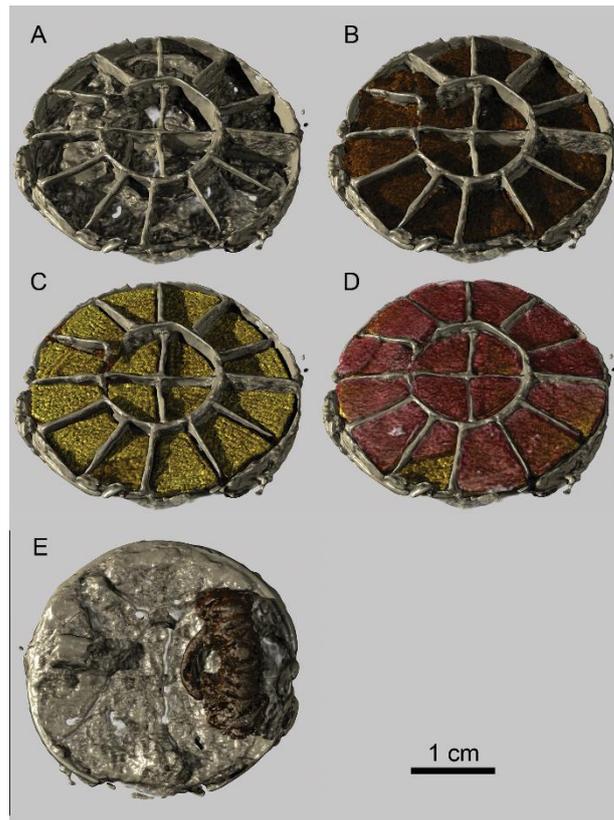


Abb. 6.4: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung des Aufbaus der im Block geborgenen Scheibenfibel aus Grab 1220: Zellwerk aus Silberstegen auf der Grundplatte (A), Füllmasse in dem Zellwerk (B), Goldfolie mit Waffelmuster auf der Füllmasse (C), Granatplättchen auf der Goldfolie (D) und Ansicht der Rückseite der mit zwei Nieten in der Grundplatte befestigten Spirale aus Eisen sowie der Nadelrast (E). Die Nadel ist nicht erhalten.

Eine für die Filigranscheibenfibel übliche Technik, das Deckblech über der Füllung mit der Grundplatte zu verbinden (Graenert 2007: 15), ist an der Fibel aus Grab 204 zu beobachten. Insgesamt fünf Bronzeniete stabilisieren die Konstruktion, wobei sich die Nietköpfe auf der Schauseite ursprünglich unter den Einlagen in der Mitte und am Rand verbargen (Abb. 6.6). Deutlich wird hier aber auch, dass die Materialien eine zu große Dichteabweichung aufweisen, als dass sie noch nebeneinander abgebildet werden könnten. So sind die Einlagen aus weniger dichtem Material (Glas?) in den Fassungen aus Goldblech wohl aufgrund der Überschreitung des dynamischen Bereichs des Detektors in den CT-Daten so gut wie nicht sichtbar.

Des Weiteren wurden herstellungstechnische Merkmale von Eisenobjekten, wie etwa einer Riemenzunge aus Grab 15, geklärt. Zur genaueren Untersuchung des Aufbaus wurde die Riemenzunge aus der Blockbergung entnommen, um sie mit einer höheren Auflösung zu messen. Abbildung 6.7 verdeutlicht hier den Qualitätsunterschied der Messung im Block und nach der Bergung.

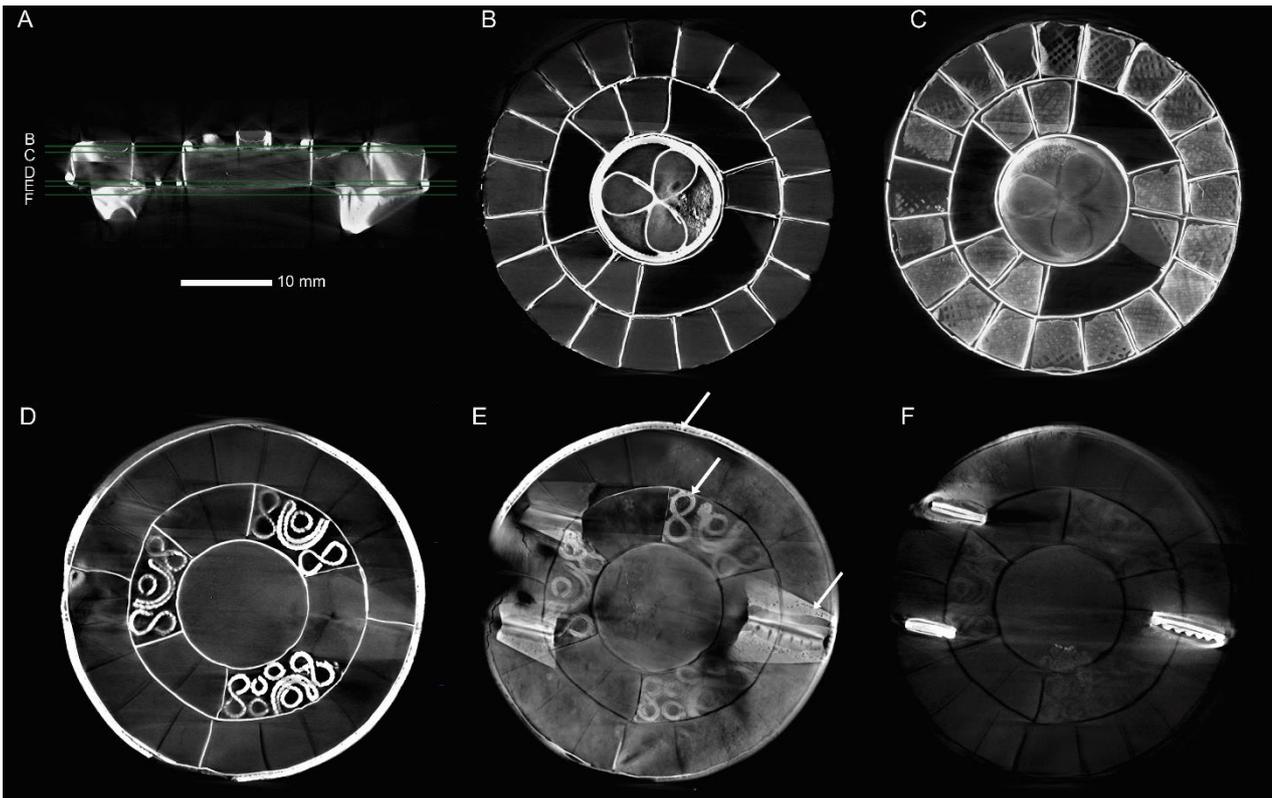


Abb. 6.5: μ -RCT-Schnittbilder der Scheibenfibel aus Grab 637. Das horizontale Schnittbild (A) verdeutlicht die Position der frontalen Schnitte (B–F), die von oben nach unten Folgendes darstellen: die Granateinlagen (B), das Goldwaffelblech (C), den Perldraht (D), die Oberseite der Bodenplatte (E) mit sichtbaren Lotstellen (siehe Pfeile) des Perldrahts und der gefalzten Bleche von Nadelrast und Spiralhalterung, welche durch Öffnungen in der Bodenplatte geführt sind (F).

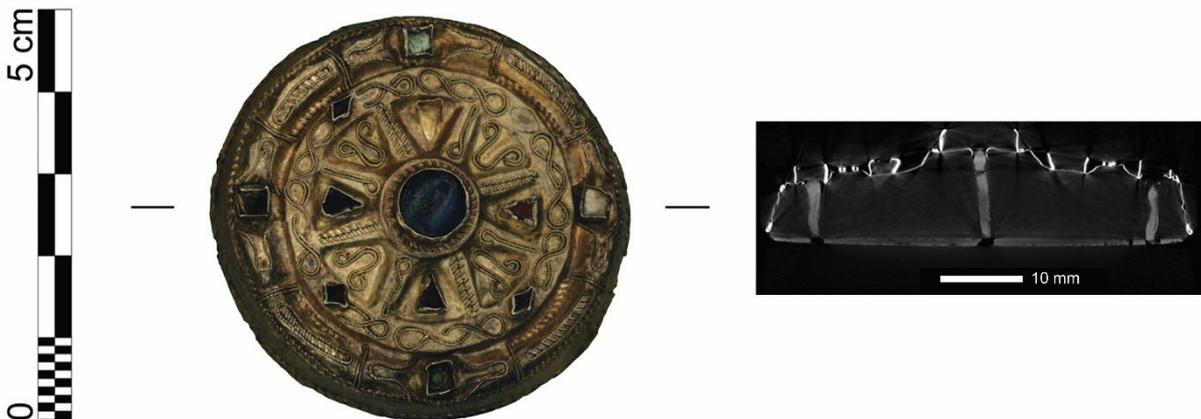


Abb. 6.6: Scan und horizontales μ -RCT-Schnittbild der Filigranscheibenfibel aus Grab 204. Der horizontale Schnitt zeigt drei der insgesamt fünf Bronzeniete, die das Deckblech aus Gold über der Füllmasse mit der Bronze Grundplatte verbinden. Die Nietköpfe auf der Schauseite befinden sich in den Fassungen in der Mitte und am Rand und waren ursprünglich unter den Einlagen verdeckt.

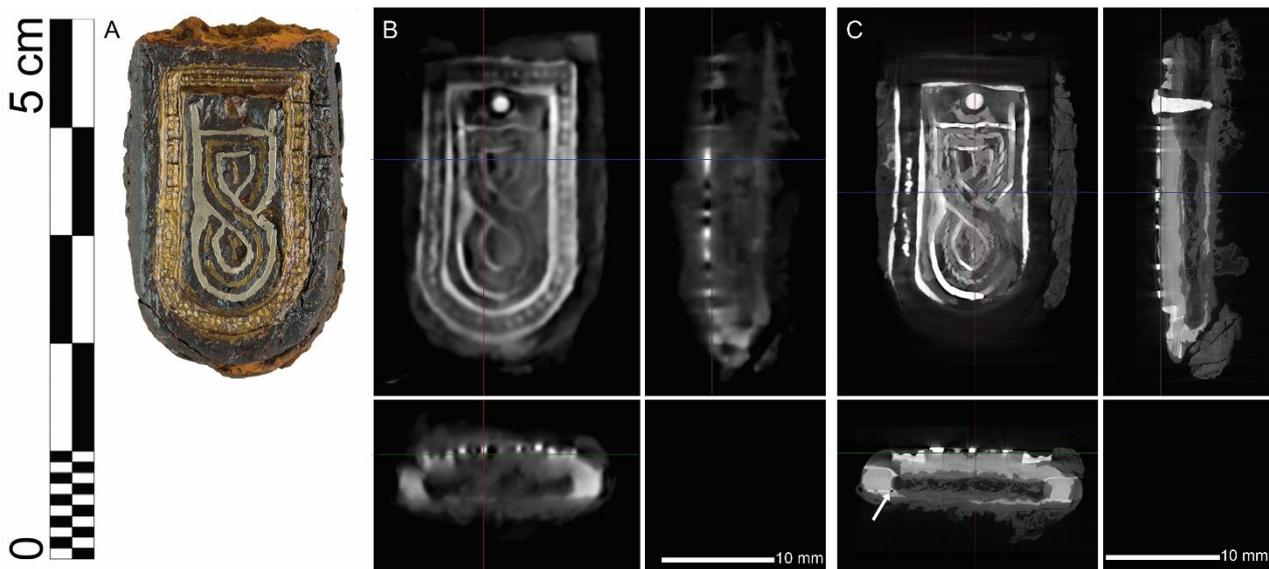


Abb. 6.7: Scan (A) der restaurierten Riemenzunge aus Grab 15 sowie μ -RCT-Schnittbilder der Messungen der Riemenzunge in der Blockbergung (B) und einzeln nach der Bergung (C). In dem horizontalen Schnittbild (C) sind die Kastenkonstruktion und die Verbindung der einzelnen Teile aus Eisen durch ein Lot zu erkennen, das sich heller darstellt und Gaseinschlüsse (siehe Pfeil) aufweist.

Hierbei wird zunächst deutlich, dass die Riemenzunge eine Kastenkonstruktion aufweist, wie sie anhand der μ -RCT von Illerhaus et al. (1994) an einer vergleichbaren Riemenzunge aus Truchtelringen visualisiert wurde. Die Konstruktion besteht aus einem Mittelsteg, auf den eine Deckplatte und eine Grundplatte gelötet sind. Das Lot ist an den Gaseinschlüssen in dem helleren Bereich zwischen diesen drei Lagen zu erkennen. In dem Hohlraum befand sich das Riemenende, das durch den Bronzeniet fixiert war (Gußmann 1994: 111). In der Deckplatte befindet sich eine Tauschierung. Diese besteht im inneren Bereich aus einem Silberdraht. Zudem ist ein Draht aus einem tordierten Messingblech zu erkennen, wohingegen die breitere Umrandung mit einer weiteren Kupferlegierung gefüllt ist. Für zusätzliche Untersuchungen der für die Tauschierung verwendeten Legierungen wurde die Riemenzunge mechanisch freigelegt, um die bereits gewonnenen Ergebnisse zu überprüfen und weitere Analysen vornehmen zu können.⁵²

Ein Beispiel für eine bis dahin in Lauchheim nicht anzutreffende Konstruktion eines Beschlags zeigt sich in der Blockbergung aus Grab 1131. Zu erkennen ist hier eine aus Eisenstegen gefertigte Filigranverzierung, die mittels Lot auf die Grundplatte fixiert ist. Das Lot (wohl Kupfer) wird in den CT-Daten heller dargestellt und ist zudem an den Gaseinschlüssen zu erkennen (Abb. 6.8). Die Reste möglicher Einlagen sind in den CT-Daten dagegen nicht zu identifizieren. Sie zeigten sich nach der Freilegung des Objekts unter dem Mikroskop. Bei diesen Einlagen handelt es sich wohl um Glas (Abb. 6.9).

⁵² Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Kapitel 6.4.1 Messingtauschierungen dargestellt.



Abb. 6.8: Photographie des Eisenbeschlags aus Grab 1131 (links, Abb. Y. Mühleis) und frontales μ -RCT-Schnittbild des Beschlags (rechts) auf der Ebene des Lotes, das sich heller und mit Gaseinschlüssen zwischen der Grundplatte und den Stegen der Filigranverzierung darstellt.



Abb. 6.9: Mikroskopaufnahme der Reste möglicher Glaseinlagen des Beschlags aus Grab 1131.

6.3 Oberflächendetails

6.3.1 Oberflächenveredelungen

Neben den bereits angesprochenen Oberflächenverzerrungen auf Metallobjekten⁵³ wie Tauschierungen, Gravuren oder Punzierungen lassen sich weitere Oberflächeninformationen aus den CT-Daten gewinnen. Eine Schwierigkeit kann hierbei die Identifizierung von Metallen darstellen, die zur Oberflächenveredelung einer Verzinnung, Versilberung oder Vergoldung verwendet wurden, da hiervon nur kleine Reste erhalten sein können. Aus Strahlauhärtungsartefakten, welche eine helle Umrandung in den CT-Daten zur Folge haben können, ergibt sich ein weiteres Problem, das eine Bestimmung erschwert.⁵⁴ Eindeutig nachgewiesen wurde eine Verzinnung in einer Blockbergung nur in einem Fall, da sich hier ein Muster auf dem Scheidenmundblech des Saxes aus Grab

⁵³ Siehe Kapitel 4.1.1 Metallfunde.

⁵⁴ Zu Strahlauhärtungsartefakten siehe Kapitel 2.4.3 Artefakte.

493 befindet. Dieses ist in den CT-Daten sichtbar und wurde bei der Öffnung der Blockbergung bestätigt. (Abb. 6.10).



Abb. 6.10: Detailaufnahme (oben) und frontales μ -RCT-Schnittbild (unten) der verzinnnten Griffzwinge des Saxes aus Grab 493.

Ein weiteres, bereits geborgenes und restauriertes Bronzeobjekt, auf dem sich eine Verzinnung befindet, wurde ebenfalls gemessen. Aufgrund seiner flachen Form sollte hier überprüft werden, inwieweit eine mögliche helle Umrandung durch Strahlaufhärtingsartefakte das Erkennen einer Verzinnung beeinträchtigt, welche die Strahlung stärker absorbiert als der Grundkörper aus Bronze. Im Fall der Fibel aus Grab 532 ist die Verzinnung gut zu erkennen und das Artefakt ist nicht allzu stark ausgeprägt (Abb. 6.11). Trotz dieses Ergebnisses ist es schwierig, Verzinnungen eindeutig an Objekten in Blockbergungen festzustellen, da das angesprochene Artefakt auch an nicht verzinnnten Objekten zu einer hellen Umrandung in den CT-Daten führen kann.⁵⁵

Versilberungen oder Vergoldungen konnten nicht nachgewiesen werden. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass die Objekte in Blockbergungen, die eine Versilberung oder Vergoldung aufweisen könnten, wie etwa Bügelfibeln, zumeist schon vor den hier durchgeführten Untersuchungen geborgen und manuell bearbeitet wurden. Ein Beispiel ist eine Bügelfibel aus Silber (Grab 1039), die bereits geborgen wurde und aufgrund des schlechten Erhaltungszustandes nach der Restaurierung

⁵⁵ Zur durch Artefakte verursachten hellen Umrandung siehe Kapitel 6.4.2 Hochlegierte Zinnbronzen.

mit der μ -RCT gemessen wurde. Hier zeigt sich, dass selbst Reste einer Vergoldung wegen des Dichteunterschieds sehr deutlich durch die μ -RCT visualisiert werden können (Abb. 6.12).⁵⁶

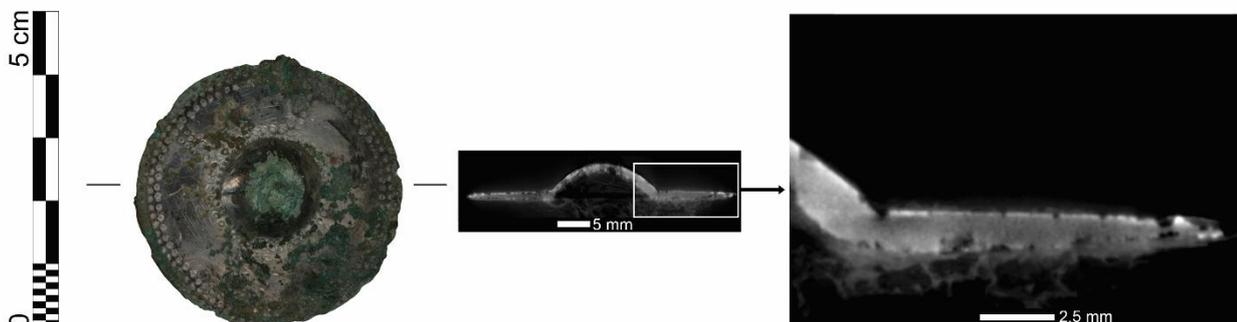


Abb. 6.11: Scan und horizontale μ -RCT-Schnittbilder der verzinnnten Bronzescheibenfibel aus Grab 532. In dem Detailschnittbild ist die Verzinnung als helle Umrandung zu erkennen.

In den Schnittbildern hebt sich des Weiteren ein Muster aus Dreiecken in der Oberfläche ab, welches anhand von Vergleichsfunden als Nielloeinlagen angesprochen werden kann. Diese Verzierungsform kann durch das Einschmelzen von Silber-, Kupfer- und Bleisulfiden erzeugt werden (Brepohl 2003), wobei Blei in römischen und frühmittelalterlichen Nielloeinlagen bislang nicht nachgewiesen werden konnte und erst in Objekten ab dem elften Jahrhundert n. Chr. anzutreffen ist (Oddy et al. 1983; Northover/La Niece 2009: 145). Dass sich die Einlagen hier dichter darstellen als das Grundmetall, könnte womöglich durch den schlechten Erhaltungszustand und/oder einen geringen Silberanteil der Legierung der Fibel zu begründen sein. Es ist aber auch nicht auszuschließen, dass ein dichteres Element wie Blei in den Einlagen vorliegt. Weitere Analysen könnten hier Aufschluss bringen.

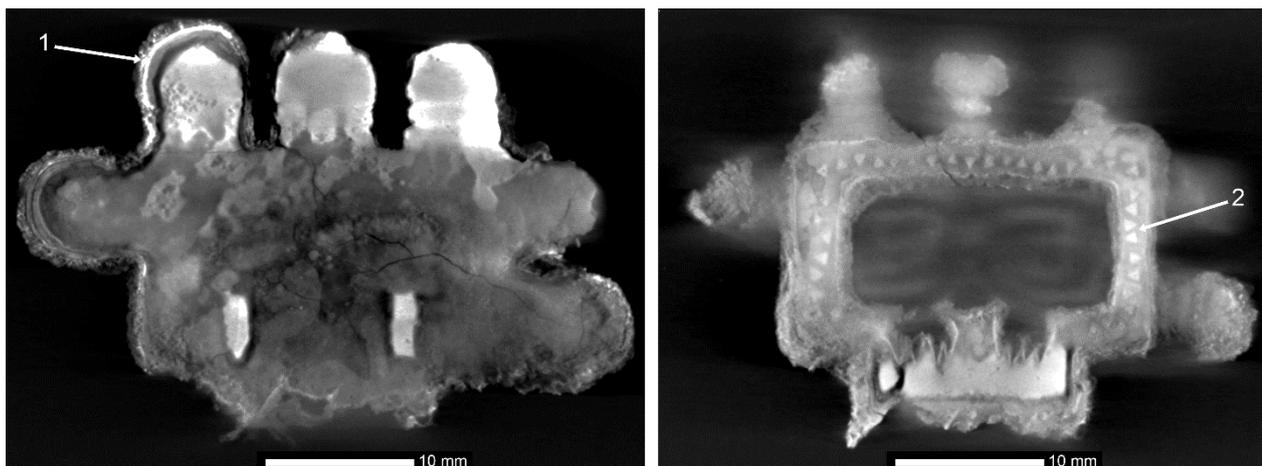


Abb. 6.12: Frontale μ -RCT-Schnittbilder der Kopfplatte der Silberbügelfibel aus Grab 1039. Sichtbar sind Reste der Vergoldung (1) und Einlagen aus Niello (2).

⁵⁶ Die Fibel wurde im Rahmen eines Seminars an der SABK Stuttgart von Lucie Selb bearbeitet, wobei aufgrund des schlechten Erhaltungszustandes der Fibel entschieden wurde, diese nicht freizulegen. Analysen im Rasterelektronenmikroskop mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM-EDX) an der SABK konnten eine Feuervergoldung in den Korrosionsschichten belegen.

6.3.2 Münzen

Weitere Oberflächeninformationen können Hinweise liefern, die eine numismatische Auswertung ermöglichen. Beispiele für die erfolgreiche Analyse von einzelnen oder zu einem Konglomerat zusammenkorrodierten Münzfunden anhand der CT wurden etwa von Nguyen et al. (2011), Berdoncini et al. (2011) und Bozzini et al. (2014) publiziert. Dass dies auch an Münzen in Blockbergungen möglich ist, zeigt die Bronzemünze aus Grab 1102 (Abb. 6.13).

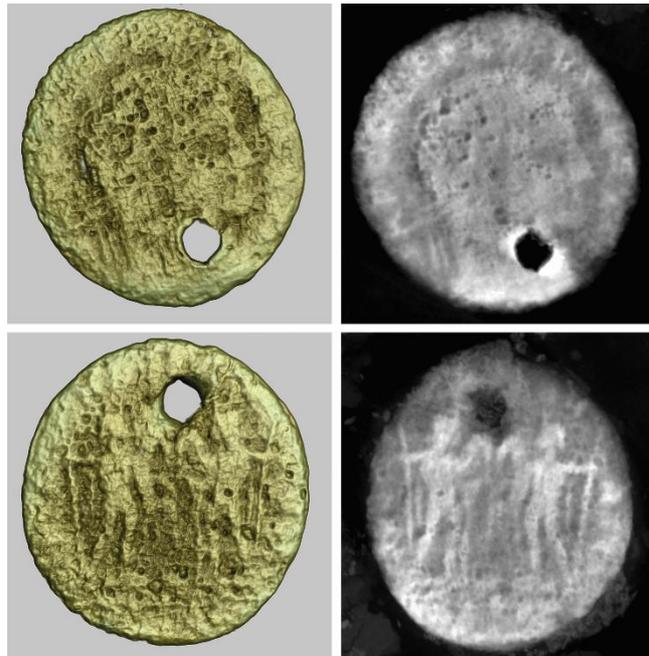


Abb. 6.13: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung (links) und frontale μ -RCT-Schnittbilder der im Block geborgenen Bronzemünze (Fol Maxentius I, Ostia, 309–312 n. Chr., Dm: 22,3 mm) aus Grab 1102.

Die dreidimensionale Darstellung der Oberfläche ist möglich. Jedoch zeigt dieses Beispiel, dass es bei stark korrodierten Oberflächen schwierig sein kann, die exakte Oberfläche im Detail darzustellen. Die Visualisierung in den zweidimensionalen Schnittbildern liefert eine aussagekräftigere Darstellung des Motivs, was eine Bestimmung der Münze zulässt. Insgesamt konnten vier von sieben Münzen in Blockbergungen auf diese Weise bestimmt werden.⁵⁷ Im Fall der Münze aus Grab 44 konnte auch die Freilegung und Restaurierung keine weiteren Ergebnisse liefern. Dies legt den Schluss nahe, dass eine Bestimmung von Münzen in Blockbergungen bei einem entsprechenden Erhaltungszustand grundsätzlich möglich ist.

6.3.3 Runen

Neben der Oberflächendarstellung der Prägungen von Münzen bietet sich die CT auch an, um feine Ritzungen in der Oberfläche von Objekten zu identifizieren. Dies erlaubt die Visualisierung von

⁵⁷ Die numismatische Bestimmung der Münzen erfolgte durch Dr. Marcus G. Meyer.

Runen. Überprüft wurde diese Möglichkeit an zwei bereits geborgenen und restaurierten Silberfibeln, auf denen Runen nachgewiesen wurden. Hierbei handelte es sich zum einen um eine Scheibenfibel (Grab 460), in deren Grundplatte aus Silberblech sich Runen befinden. Zum anderen um eine Bügelfibel aus Silber (Grab 66), in deren Unterseiten von Spiral- und Hakenplatte Runen nachgewiesen wurden. Die Runen an der Spiralplatte waren zum Teil von Eisenkorrosion der Spirale überdeckt und es war nicht eindeutig, ob sich weitere Runen unter dieser Korrosionsschicht befinden (Abb. 6.14).

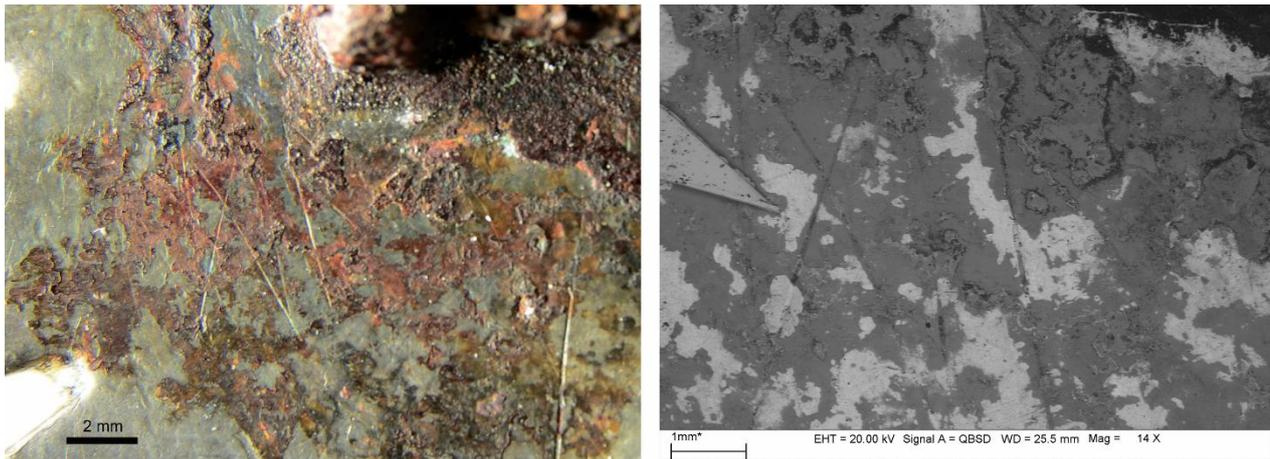


Abb. 6.14: Mikroskopaufnahme (links) und Aufnahme im Rasterelektronenmikroskop (rechts) der zum Teil mit Eisenkorrosion bedeckten Runen der Bügelfibel aus Grab 66.

Grundsätzlich lassen sich die Runen in dem dünnen Silberblech der Scheibenfibel klarer darstellen als die Runen in der massiven Bügelfibel, da aufgrund des dichten, stark absorbierenden Materials die Grauwerte in benachbarte Voxel überstrahlen und so zu Messartefakten führen (Abb. 6.15).⁵⁸ Dennoch ist es möglich, die Runen auch in der massiven Silberfibel zu identifizieren, wobei unter der Eisenkorrosionsschicht auf der Spiralplatte keine weiteren Runen sichtbar sind. Dies wurde durch die Freilegung der Oberfläche überprüft. Da das Entfernen der sehr harten Eisenkorrosion auf der verhältnismäßig weichen Silberoberfläche nicht ohne Schaden für die Oberfläche und die sich darin befindenden Runen möglich ist, wurde eine Versuchsreihe an Probekörpern mit unterschiedlichen Komplexbildnern durchgeführt.⁵⁹ Mithilfe des ermittelten Komplexbildners wurde die Oberfläche chemisch ohne manuelle Beanspruchung freigelegt. Es zeigten sich keine weiteren Runen unter der Korrosion. Damit war es möglich, anhand der μ -RCT alle vorhandenen Runen zu visualisieren. Zu beachten ist hierbei, dass die untersuchten Objekte bereits geborgen waren und somit einzeln mit einer höheren Auflösung gemessen wurden. Bislang fanden sich keine Objekte

⁵⁸ Zum Einfluss dichter Materialien auf die Qualität der CT-Daten und mögliche Artefakte siehe Kapitel 2.4.3 Artefakte.

⁵⁹ In der Versuchsreihe zur chemischen Freilegung der Silberoberfläche wurden die Komplexbildner Ethylendiamintetraacetat (EDTA), Cyclodiamintetraacetat (CDTA), Diethylentriaminpentaacetat (DTPA) und Desferrioxamin B (DFO-B) bei unterschiedlichen pH-Werten an den synthetischen Korrosionsprodukten Cuprit, Goethit und Silbersulfid sowie an Probekörpern aus Silberblech untersucht. Zur Vorgehensweise siehe Stelzner/Eggert (2008; 2014). Das Anlösen von Silber konnte in keinem Fall eindeutig nachgewiesen werden. Das beste Verhältnis von gelösten Eisen- zu Kupferionen wurde mit CDTA bei einem pH-Wert von 4,5 erzielt. Dieses wurde dann für die Freilegung mit einer Konzentration von 0,1 mol/L verwendet.

in Blockbergungen, an denen Runen identifiziert werden konnten. Es bleibt fraglich, ob eine so detaillierte Visualisierung der Ritzungen auch an Objekten in Blockbergungen möglich ist, da hier nur eine geringere Auflösung der CT-Daten zu erreichen ist. Abhängig ist die mögliche Visualisierung von der Größe der Blockbergung und der Qualität der Messungen. Beispielsweise wurden an Scheibenfibeln in Blockbergungen Kratzer auf deren Grundplatte detektiert, bei denen es sich zwar nicht um Runen handelt, die aber ein Hinweis darauf sind, dass solche womöglich auch dargestellt werden könnten.

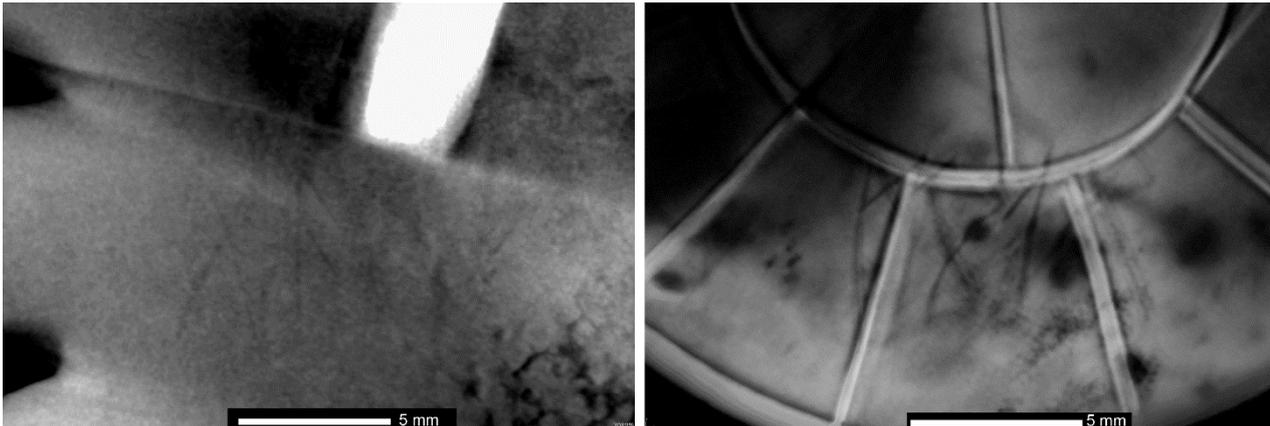


Abb. 6.15: Frontale μ -RCT-Schnittbilder der Runen auf der Bügelfibel (Rückseite Kopfplatte) aus Grab 66 (links) und der Runen auf der Scheibenfibel (Rückseite Grundplatte) aus Grab 460 (rechts).

6.4 Kupferlegierungen

6.4.1 Messingtauschierungen

Die unterschiedliche Absorption verschiedener Metalle und die Schwierigkeit, Legierungen voneinander zu unterscheiden, wurden bereits angesprochen. Dass sich Hinweise aus der unterschiedlich starken Schwächung der Strahlung in Bezug auf die Zusammensetzung von Kupferlegierungen ergeben können, zeigt sich an der bereits in Kapitel 6.2 beschriebenen Riemenzunge aus Grab 15. Für die Analyse der Legierungszusammensetzung der Tauschierung wurde der Fund der Blockbergung entnommen und restauriert. Die Freilegung bestätigte die angenommene bichrome Tauschierung aus Silber und Messing. Bei den Kupferlegierungen fällt auf, dass sich die Legierung in der Umrandung in den CT-Daten sehr viel heller darstellt als der tordierte Draht (Abb. 6.7). Eine mögliche Erklärung hierfür erbrachte eine RFA der Materialien, bei der sich in der Umrandung ein etwas höherer Bleianteil in der Messinglegierung nachweisen ließ (Tab. 6.1).⁶⁰

⁶⁰ Die Untersuchung der Oberflächen mittels RFA wurde am FEM in Schwäbisch Gmünd von Dipl.-Ing. (FH) A. Pfund durchgeführt.

Tab. 6.1: Chemische Zusammensetzung der mit RFA gemessenen Oberflächen der Tauschierungen und des Lotes der Riemenzunge aus Grab 15. Angaben in Masseprozent.

Material	Cu	Fe	Ni	Zn	Nb	Ag	Au	Pb
Silbertauschierung	5,32	1,44	n.d.	0,08	n.d.	91,81	0,83	0,51
Messingtauschierung (Innen)	78,30	5,24	0,40	15,75	n.d.	n.d.	n.d.	0,32
Messingtauschierung (Außen)	82,30	1,53	0,37	14,04	0,43	n.d.	n.d.	1,33
Lot	13,78	86,22	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Da die Analysen an der Oberfläche der Metalle durchgeführt wurden, liefert sie keine genaue Wiedergabe der Legierungszusammensetzungen. Zudem kann das Ergebnis auch durch Elemente von Bestandteilen des Beschlags in der Umgebung des untersuchten Materials verfälscht werden. Dennoch gibt dieses Ergebnis einen Hinweis darauf, wie die stärkere Absorption der Umrandung erklärt werden kann. Damit kann die Verwendung einer Legierung mit einem höheren Bleianteil abgeleitet werden. Untermauert wird diese Annahme zweier unterschiedlicher Legierungen auch dadurch, dass in den inneren Bereichen ein tordierter Messingdraht verwendet wurde, während sich das Material der breiteren Umrandung massiv darstellt. Diese Einlage wurde wohl aufgeschmolzen und nicht aus einem Draht oder Blech hergestellt (Born 1994: 74). Eine Probennahme und genaue Legierungsanalyse könnte weitere Rückschlüsse liefern, ob hier gezielt zwei unterschiedliche Legierungen hergestellt und auf welche Weise diese verarbeitet wurden.

Durch die Oberflächenanalysen konnte über die Tauschierung hinaus auch das in Kapitel 6.2 bereits angesprochene Lot näher bestimmt werden. Die Messung wird zwar durch das umgebende Eisen überlagert, dennoch konnte hier Kupfer nachgewiesen werden. Da keine weiteren Elemente zu bestimmen waren, ist anzunehmen, dass es sich um ein Kupferlot handelt, wie es üblicherweise zur Verbindung von Eisenteilen Verwendung fand (Westphal 1991b: 117; Gußmann 1994: 111).

6.4.2 Hochlegierte Zinnbronzen

Das Hinzuziehen der Grabungsdokumentation kann weitere Hinweise auf die Legierung von Objekten in Blockbergungen liefern. Diese Informationen in Kombination mit den vorliegenden CT-Daten und Vergleichsfunden können dann weitere Erkenntnisse nach sich ziehen, auch ohne die Blockbergung öffnen zu müssen, wie dies bei Grab 1268 der Fall ist (Abb. 6.16). So wurden die Schnallen und Gürtelhaften auf der Grabung als Silber angesprochen, was eine silberne oder dunkel angelaufene kompakte Oberfläche vermuten lässt. Die Auswertung und Bearbeitung der CT-Daten zeigten dann, dass es sich neben mehreren Eisenobjekten und einem Silex um zwei Schnallen und zwei Gürtelhaften handelt, die den Grauwerten nach aus Bronze gefertigt sind. Weitere Schnallen aus den Gräbern 990 und 994 (Abb. 6.17), die ebenfalls eine sehr gut erhaltene dunkle Patina aufweisen, legen den Schluss nahe, dass es sich hier um eine spezielle Bronzelegierung handelt.



Abb. 6.16: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung der fragmentierten Eisengeräte, des Silex und der zwei Schnallen und zwei Gürtelhaften aus hochlegierter Zinnbronze aus Grab 1268 in Fundlage. Das frontale μ -RCT-Schnittbild (rechts) zeigt den Ausschnitt der Blockbergung, in dem sich die Schnallen und Gürtelhaften befinden.



Abb. 6.17: Photographien der Schnallen aus hochlegierter Zinnbronze der Gräber 986 (links) und 990 (rechts, Abb. Y. Mühleis).

Legierungsanalysen mit energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse (EDRFA) der bereits geborgenen Schnallen zeigen, dass es sich in beiden Fällen um eine hochlegierte Zinnbronze mit einem Zinnanteil von 19 und einem Bleianteil von neun bis zehn Masseprozent handelt (Tab. 6.2).⁶¹

⁶¹ Die Analysen der Schnallen wurden am Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie (CEZ) in Mannheim an der Oberfläche mit einem portablen energiedispersiven Röntgenfluoreszenzspektrometer (p-EDRFA, Niton XL3t 900, der Firma Thermo Scientific) und an jeweils einer Bohrspitze mit EDRFA (ARL Quant'X, Thermo Scientific) von Dr. Daniel Berger und Dr. Joachim Lutz durchgeführt und ausgewertet.

Die häufig anzutreffende dunkle und kompakte Patina solcher Legierungen ist durch die Korrosion der Objekte und dem damit einhergehenden selektiven Herauslösen des Kupfers und einer Anreicherung stabiler Zinnoxide in der Oberfläche zu erklären (Geilmann 1956: 207 f.; Meeks 1993a: 70; Scott 2002: 340). Dies spiegelt sich in der Elementzusammensetzung der mit portabler energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse (p-EDRFA) untersuchten Oberfläche wieder (Tab. 6.3).⁶²

Tab. 6.2: Chemische Zusammensetzung der mit EDRFA gemessenen Legierungen der Schnallen aus Grab 990 und 994. Angaben in Masseprozent.

Legierung	Cu	Fe	Ni	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb
Schnalle Grab 990	70	0,13	0,05	0,6	0,08	0,264	19,2	0,075	9,4
Schnalle Grab 994	69	1,15	0,07	<0,1	0,08	0,818	19,3	0,128	9,9

Tab. 6.3: Chemische Zusammensetzung der mit p-EDRFA gemessenen Oberflächen der Schnallen aus Grab 990 und 994. Angaben in Masseprozent.

Oberfläche	Cu	Fe	Ni	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb
Schnalle Grab 990	33	5,7	n.d.	0,37	n.d.	0,61	53	0,20	6,8
Schnalle Grab 994	37	14,7	n.d.	0,06	n.d.	1,52	40	n.d.	0,32

Bisher sind frühmittelalterliche Schnallen aus hochlegierten Zinnbronzen wohl nur aus der Sammlung des British Museum bekannt (Meeks 1988: 125; 1993b: 250), was jedoch durch fehlende Analysen weiterer Schnallen zu begründen sein könnte. Nachfolgende Untersuchungen der Legierungen frühmittelalterlicher Objekte aus hochlegierter Zinnbronze könnten hier Aufschluss bringen und womöglich zu Erkenntnissen über Werkstätten oder Handelsbeziehungen führen.



Abb. 6.18: Radiographie (links) und Scan (rechts) der Schnalle aus Grab 23.

Eine weitere Besonderheit sind Schnallen aus hochlegierter Zinnbronze, bei denen die Kupferlegierung auf einen Eisenkörper gegossen wurde, wie dies Meeks (1993b: 250) beschreibt. Ein Beispiel dafür könnte die Schnalle aus Grab 23 sein, welche einen Eisenbügel und einen Eisendorn

⁶² Die nahezu übereinstimmende Elementzusammensetzung der Legierungen legt der Beurteilung von Dr. D. Berger und Dr. J. Lutz nach den Schluss nahe, dass es sich um die Produkte einer Werkstatt handeln könnte.

aufweist. Die Radiographie (Abb. 6.18) liefert jedoch kein aufschlussreiches Ergebnis und womöglich könnte hier die CT mehr Klarheit bringen.

Ein besonderer Fund, der ebenfalls die für hochlegierte Zinnbronzen typische glatte schwarze Oberfläche aufweist, ist das Fragment eines Spiegels aus Grab 771 mit einer auf der Rückseite zentral angebrachten erhabenen Öse und einer plastisch hervorgehobenen Verzierung. Diese besteht aus zwei konzentrischen Kreisen um die Öse und den Spiegelrand, in denen sich Radialleisten befinden (Abb. 6.19). In den Flächen zwischen den Leisten befinden sich Buckel. Ursprünglich hatte der Spiegel einen Durchmesser von 50 mm und wies wohl insgesamt acht Radialleisten mit dazwischen liegenden Buckeln auf (Abb. 6.20).

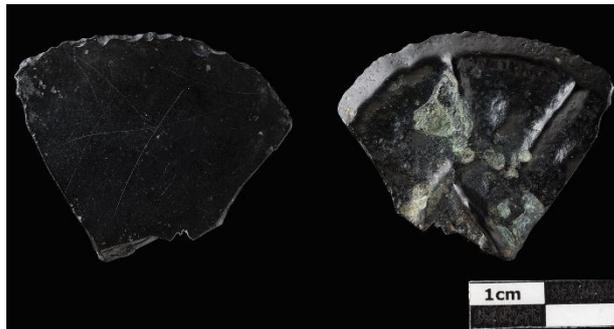


Abb. 6.19: Photographien des Spiegelfragments (Grab 771) von Vorder- und Rückseite (Abb. Y. Mühleis).

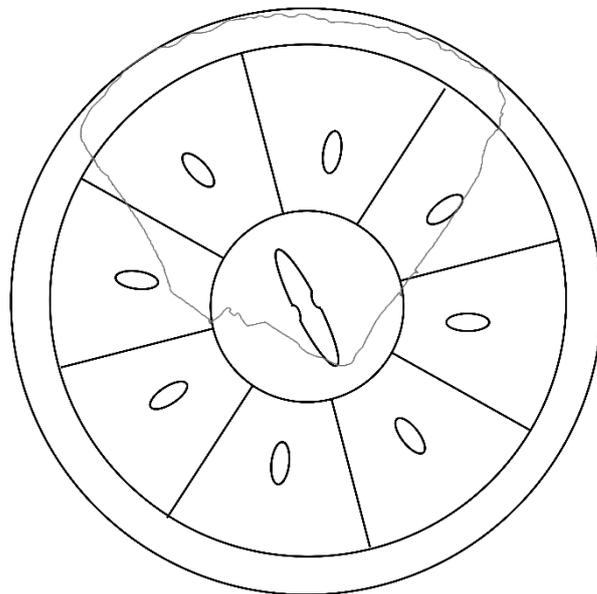


Abb. 6.20: Schematische Darstellung der angenommenen ursprünglichen Form des Spiegelfragments aus Grab 771.

Der Spiegel kann den völkerwanderungszeitlichen Ösenspiegeln zugeordnet werden, deren Verbreitung sich bis zum 5. Jahrhundert n. Chr. vom Nordkavkasus über Südrussland bis in die Donauländer erstreckt, mit weiteren vereinzelt Funden weiter westlich. Am häufigsten sind die Spiegel in den Ländern der mittleren Donau anzutreffen. Vollständige Spiegel mit ähnlichem Dekor mit

Buckeln zwischen den radialen Leisten sind aus Österreich (Deutsch-Altenburg, Carnuntum) und Ungarn (Pilismarót, Grab 19) bekannt (Anke 1998: Taf. 16; Taf. 20), wobei sich bei dem Spiegel aus Carnuntum die radialen Leisten bis zur Mitte fortsetzen und sich auf dem Spiegel aus Pilismarót zwölf Leisten und Buckel befinden. Ein ähnlicher Fund in einem merowingerzeitlichen Grab, in dem ebenfalls ein völkerwanderungszeitliches Spiegelfragment als „Altstück“ vorliegt, ist aus Meßstetten, Zollernalbkreis, bekannt (Schmitt 1989).

Im Folgenden wurde überprüft, ob anhand der CT weitere Informationen über die Materialbeschaffenheit und die Herstellungstechnik des Spiegelfragments gewonnen werden können. Für eine Überprüfung der Ergebnisse und für den Erhalt weiterer Informationen, wurde eine Elementanalyse der Oberfläche auf Vorder- und Rückseite vorgenommen. Zudem wurden an einer Probe, die an der Bruchkante entnommen wurde, eine Legierungsanalyse und eine metallographische Analyse im Rasterelektronenmikroskop (REM) durchgeführt.⁶³

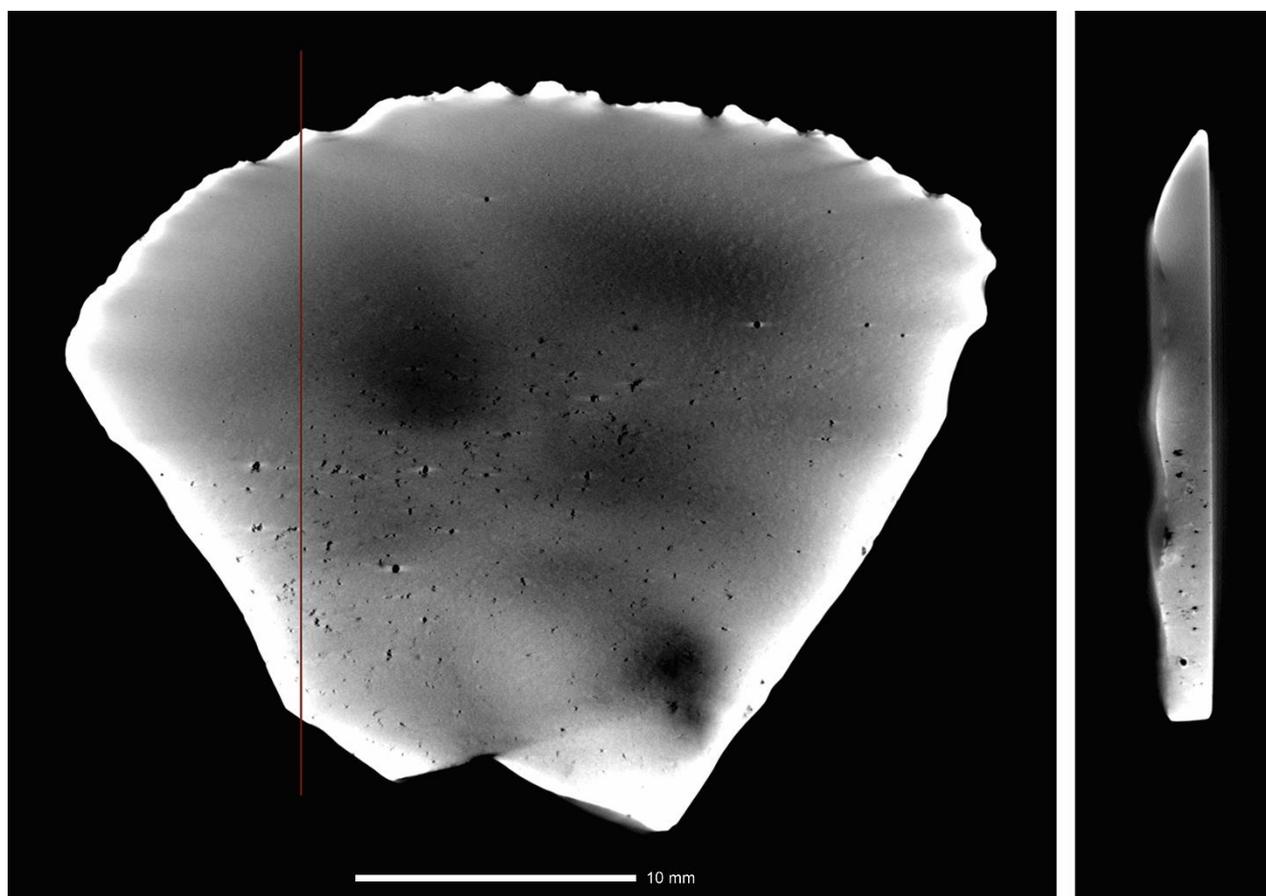


Abb. 6.21: Frontales (links) und sagittales (rechts) Sub- μ -RCT-Schnittbild des Spiegelfragmentes aus Grab 771.

⁶³ Die Analysen des Spiegels wurden wie die zuvor beschriebenen Schnallen am CEZ in Mannheim an der Oberfläche mit p-EDRFA, (Niton XL3t 900, Thermo Scientific) und an einer Kompaktprobe mit EDRFA (ARL Quant'X, Thermo Scientific) von Dr. D. Berger und Dr. J. Lutz durchgeführt und ausgewertet. Zudem wurde hier ein Feinschliff der Kompaktprobe im REM (EVO MA 25, Zeiss) metallographisch und anhand REM-EDX analysiert.

Die Elementanalysen bestätigten, dass es sich um eine ternäre Kupferlegierung mit hohem Zinnanteil und Blei handelt und sich in der Oberfläche Zinn angereichert hat (Tab. 6.4). Um bei der Untersuchung mit der CT eine möglichst hohe Auflösung zu erreichen, wurde der Spiegel mit der Sub- μ -RCT gemessen, die bereits zur metallographischen Analyse beispielsweise von Stahl oder Aluminiumlegierungen eingesetzt wurde (Brunke 2008; Kastner et al. 2010). Die erzielte Auflösung beträgt 19 μm und bietet einen Einblick in die inneren Strukturen des Spiegels (Abb. 6.21).

Tab. 6.4: Chemische Zusammensetzung der mit EDRFA gemessenen Legierung und der mit p-EDRFA gemessenen Oberflächen des Spiegelfragments aus Grab 771. Angaben in Masseprozent.

Spiegel	Cu	Fe	Ni	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb
Legierung	71	0,09	0,28	<0,1	<0,1	0,072	23,6	0,142	4,4
Oberfläche (Vorderseite)	49	0,65	0,34	0,08	0,20	0,13	45	0,12	4,5
Oberfläche (Rückseite)	46	0,50	0,38	0,08	0,26	0,13	48	0,13	4,5

Die Verteilung von Gaseinschlüssen ist zu erkennen. Darüber hinaus sind Bereiche unterschiedlich starken Schwächung sichtbar. Die Verteilung, Größe und Form der Hohlräume in der Bronze lassen sich über ein Modul zur Defektanalyse der Software VGStudio MAX visualisieren (Abb. 6.22), wobei es sich wohl um Gasporen und Gusslunker handelt, die beim Abkühlen und Erstarren der Schmelze entstehen.⁶⁴

Anhand solcher Hohlräume konnten Mödlinger (2008: 324) an einem bronzezeitlichen Schwert anhand der μ -RCT sowie Grolimund et al. (2011: 1016) und Berger et al. (2013: 39) an einer bronzezeitlichen Axt mit Hilfe der NCT die Eingussstellen bestimmen. Über die Verformung der Hohlräume ließ sich im Fall der Axt zudem eine Nachbearbeitung des Gusses nachweisen. Im Gegensatz zu diesen Beispielen sind die hier vorliegenden Lunker und Poren bedeutend kleiner. Eine Verformung der Hohlstellen, die auf eine Nachbearbeitung weisen würden, konnte nicht belegt werden. Eine Kaltverformung ist in diesem Fall aufgrund des zu spröden Materials ohnehin unwahrscheinlich. Es fällt jedoch auf, dass sich zum ursprünglichen Spiegelinneren eine Häufung der Poren befindet. Dies deutet darauf hin, dass in diesem Bereich, mit einer größeren Materialstärke als am Rand, die Schmelze zuletzt erstarrte, da sich Gasporen vor allem in der Restschmelze bilden. Da jedoch nur ein Fragment des Spiegels vorliegt, sind keine eindeutigen Aussagen zum Gussvorgang zu treffen. Die in den CT-Daten sichtbare und bereits angesprochene unterschiedlich starke Schwächung in der Legierung könnte bedeuten, dass hier die unterschiedlichen Phasen des Gefüges des Spiegels sichtbar sind, welches dann hypoeutektoid bis eutektoid sein könnte (Abb. 6.23).⁶⁵

Die metallographische Analyse bestätigt, dass es sich um eine hypoeutektoide Legierung handelt (Abb. 6.24). In dem Eutektoid, bestehend aus α - und δ -Phase, könnte die zinnreichere δ -Phase

⁶⁴ Ein ähnlicher Ansatz wurde von Eska et al. (2014) für Gasblasen in Glas vorgestellt. Das Gesamtvolumen kann als inverser Güteparameter für die Qualität der Produktion herangezogen werden.

⁶⁵ Freundliche Mitteilung Dr. Roland Schwab.

($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ mit 32,6 % Sn), welche sich als dendritische Gussstruktur neben dem ($\alpha+\delta$)-Eutektoid gebildet hat, aufgrund des höheren Zinnanteils in den CT-Daten sichtbar sein. Dies würde dem metallographischen Bild einer hochlegierten Zinnbronze entsprechen. Für eine genaue Darstellung der metallographischen Struktur ist die Auflösung jedoch nicht ausreichend. So ist auch das feindispers verteilte Blei, das wegen seiner geringen Mischbarkeit und der damit verbundenen Segregation, welche zur Folge hat, dass das Blei als eigene Phase in kleinen Kügelchen in der Legierung vorliegt (Scott 2011: 183), nur anhand hellerer Punkte zu vermuten.

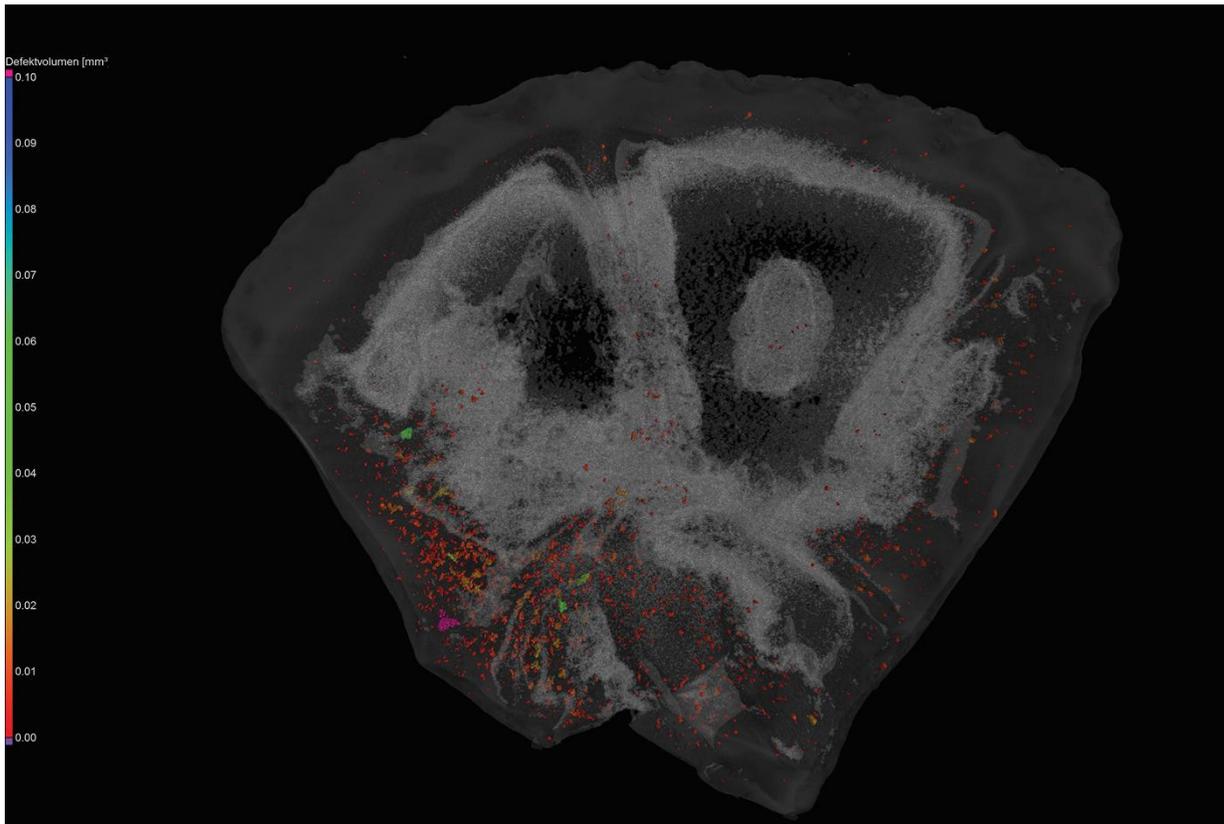


Abb. 6.22: Dreidimensionale Sub- μ -RCT-Darstellung der Hohlräume in dem Spiegelfragment aus Grab 771.

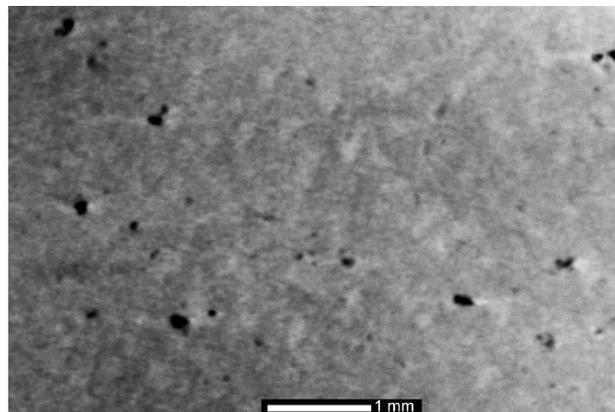


Abb. 6.23: Frontales Sub- μ -RCT-Schnittbild des möglichen Metallgefüges des Spiegelfragmentes aus Grab 771.

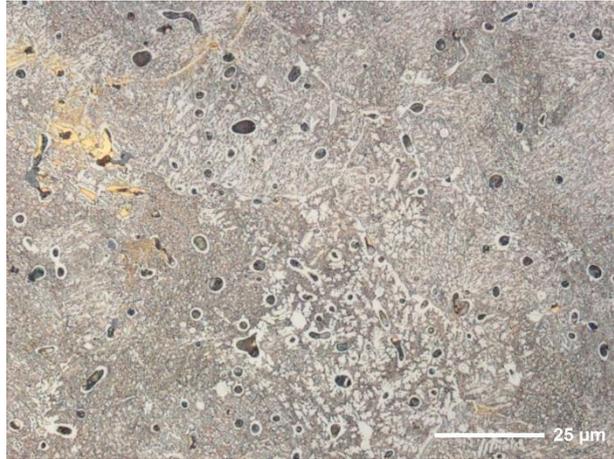


Abb. 6.24: Lichtmikroskopaufnahme des Metallgefüges aus ($\alpha+\delta$)-Eutektoid, δ -Dendriten und ursprünglich mit Blei gefüllten gerundeten Hohlräumen (durch Präparation teilweise herausgebrochen) des Spiegelfragmentes aus Grab 771. Hellfeld, geätzt mit salzsaurem FeCl_3 (Abb. Dr. D. Berger).

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse kann angenommen werden, dass der Spiegel in einer Keramik- oder temperierten Steinform gegossen und langsam abgekühlt wurde.⁶⁶ Anderenfalls sollte im Gefüge die β -Phase mit einer martensitischen Struktur vorliegen. Diese liegt bei einer Temperatur von über ca. 586 °C vor und bleibt durch Abschrecken erhalten. Oberhalb dieser Temperatur ist eine Bearbeitung von hochlegierten Zinnbronzen möglich und so kann das Abschrecken direkt nach dem Guss oder auch nach einem mit einer Wärmebehandlung verbundenen Schmieden erfolgen (Scott 2002: 339, 2011: 136). Diese Technik, die seit dem 8. Jahrhundert v. Chr. in Indien bekannt ist, wurde auch zur Herstellung von Spiegeln aus hochlegierter Zinnbronze ohne Blei genutzt und ist im 5. Jahrhundert v. Chr. bis in den Südural belegt (Ravich/Treister 2011). Aus Indien ist zudem eine weitere Bronzelegierung mit einem Anteil von über 30 % Zinn bekannt, deren Gefüge hauptsächlich aus der zinnreichen δ -Phase besteht, welche unter anderem zur Anfertigung von Spiegeln verwendet wurde (Srinivasan/Glover 2007: 35).

Der hier untersuchte Spiegel aus Lauchheim entspricht in seiner Legierungszusammensetzung römischen und chinesischen Bronzen, die zur Herstellung von Spiegeln verwendet wurden (Meeks 1993a: 65 f.; b: 250; Scott 2011: 190). Die Legierung kommt der von Scott (2011: 187) angegebenen idealen Zusammensetzung für chinesische Spiegel mit 71 % Kupfer, 26 % Zinn und 3 % Blei sehr nahe. In Bezug auf die Herstellungstechnik ergeben sich ebenfalls Übereinstimmungen zu den chinesischen Spiegeln, welche nicht abgeschreckt wurden. Es liegt lediglich ein Spiegel aus dem 6. Jahrhundert n. Chr. vor, der eine β -Phase aufweist und als ein exotischer Import angesehen wird (Scott 2011: 187 f.). Auch stilistisch ergeben sich Beziehungen zu den chinesischen Spiegeln, die mitunter als Vorbild der völkerwanderungszeitlichen Spiegel angesehen werden (Jenny 1928: 357; Werner 1956: 19 f.; Anke 1998: 17)

⁶⁶ Untersuchungsergebnis von Dr. D. Berger und Dr. J. Lutz.

Im Gegensatz zu den umfangreichen Studien an chinesischen Spiegeln liegen Metalluntersuchungen an völkerwanderungszeitlichen Spiegeln, soweit hier bekannt, nur vereinzelt vor. Ein vergleichbarer Spiegel aus dem spätrömischen Kastell Novi Banovci besteht aus 65 % Kupfer, 27 % Zinn und 7 % Blei sowie 1 % Beimengung (Werner 1956: 21 f.). Für das Spiegelfragment aus Meßstetten wird ebenfalls eine ternäre Legierung aus Kupfer, Zinn und Blei mit geringen Beimengungen beschrieben (Schmitt 1989: 476), wobei die schätzungsweise angegebenen 40 % Zinn sehr hoch sind und das 1 % Blei eher niedrig ist. Da hier keine Angaben über die Art und Weise der Analyse vorliegen, könnte es sich auch um ein Untersuchungsergebnis der Oberfläche handeln, das nicht unbedingt die genaue Legierungszusammensetzung wiedergibt (Pernicka 1989: 146). Eine weitere Legierungsanalyse liegt für einen Spiegel aus Krefeld-Gellep vor, der im Gegensatz zu dem hier vorliegenden Objekt eine seitliche Aufhängung aufweist und demnach einem früheren Typ völkerwanderungszeitlicher Spiegel angehört (Pirling 1988: 457). Die Analysen zeigen eine Legierungszusammensetzung von 54 % Kupfer, 27 % Zinn, 6,6 % Blei und Spuren von Eisen, Natrium und Kalium. Der Kupferanteil ist geringer als bei den anderen Spiegeln, jedoch fehlen bei der angegebenen Legierungszusammensetzung ungefähr 10 %, welche dem Kupferanteil einer mit den anderen Spiegeln vergleichbaren Zusammensetzung entsprechen würde. Die Oberfläche des Spiegels ist nicht korrodiert und weist die identische Elementzusammensetzung wie der Kern des Spiegels auf. Sie wird als silbern beschrieben, was dem ursprünglichen Erscheinungsbild wohl sehr nahe kommt, da Kupferlegierungen mit über 20 % Zinn eine silberne Farbe annehmen. Zu erklären ist dies durch die harte und spröde, silberweiße intermetallische δ -Phase (Meeks 1993a: 69). Im Gegensatz hierzu zeigt der Spiegel aus Lauchheim eine durch Korrosion hervorgerufene, überwiegend kompakte glatte und schwarze Oberfläche. In dem für die metallographische Analyse angefertigten Anschliff ist der durch Korrosion beeinträchtigte 40 bis 50 μm starke Bereich an der Oberfläche (Alterationsbereich) von dem unkorrodierten Kernmaterial zu unterscheiden (Abb. 6.25).

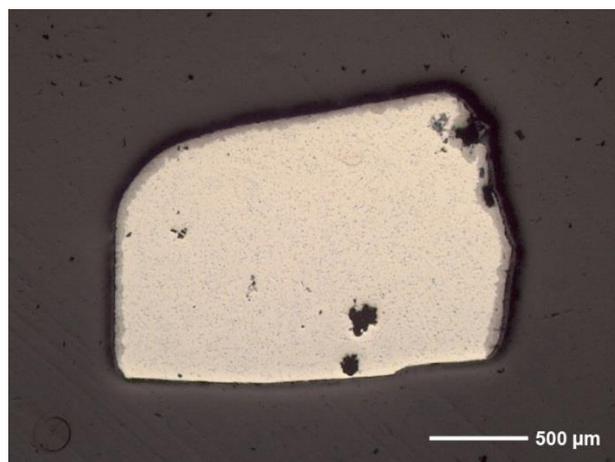


Abb. 6.25: Lichtmikroskopübersichtsaufnahme des metallographischen Anschliffs der Probe mit unkorrodiertem Metall im Kern und dem durch Korrosion entstandenen Alterationsbereich an der Oberfläche des Spiegelfragments aus Grab 771. Hellfeld, ungeätzt (Abb. Dr. D. Berger)

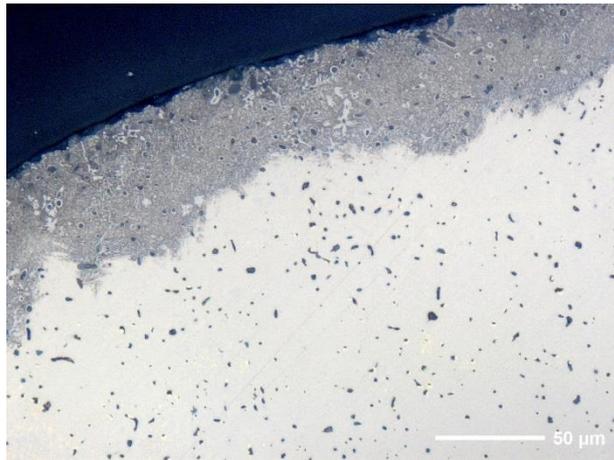


Abb. 6.26: Lichtmikroskopaufnahme des Alterationsbereichs an der Oberfläche des Spiegelfragments aus Grab 771 mit unkorrodierten δ -Kristallen. Hellfeld, ungeätzt (Abb. Dr. D. Berger).

In diesem Alterationsbereich liegt die zinnärmere α -Phase mineralisiert vor, während die korrosionsresistentere δ -Phase nur im äußersten Bereich ebenfalls mineralisiert vorliegt (Abb. 6.26; 6.27). Durch die Korrosion ist selektiv Kupfer und auch Blei gelöst worden und das Zinn ist als Oxid oder Oxidhydrat zurückgeblieben, was zu einer Zinnanreicherung in der Oberfläche geführt hat (Meeks 1993a: 70; Scott 2011: 192). Die Analyse der Oberflächenzusammensetzung des Spiegels aus Lauchheim bestätigt, dass die schwarze Patina durch eine hierfür typische Mineralisierung der δ -Phase mit einhergehender Zinnanreicherung der Oberfläche entstanden ist (Tab. 6.4).

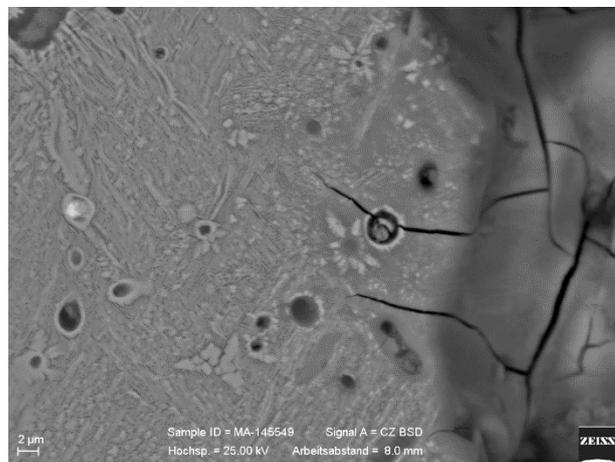


Abb. 6.27: REM-Aufnahme des oberflächennahen Alterationsbereichs mit korrodierter α -Phase und unkorrodierter δ -Phase (links) und vollständig mineralisierter Patina (rechts) des Spiegelfragments aus Grab 771. Rückstreuelektronenbild, ungeätzt (Abb. Dr. D. Berger).

In den CT-Daten ist eine helle Umrandung zu erkennen (Abb. 6.21), welche der Stärke nach ungefähr diesem Alterationsbereich entspricht. Da sich der mineralisierte Bereich wegen der enthaltenen Oxide und Hydroxide dunkler darstellen würde, ist hier davon auszugehen, dass Strahlauhfärbungsartefakte zu dieser Umrandung führen und den Alterationsbereich überlagern. Aus welchem Grund archäologische hochlegierte Zinnbronzen sowohl mit silberner als auch schwarzer Patina

vorliegen, wird durch die Bodenbeschaffenheit (Shoukang/Tankun 1993: 61), aber auch durch einen unterschiedlichen Herstellungsprozess (Ingo et al. 2004: 875), erklärt.

6.4.3 Kupferlegierungen mit hohem Bleianteil

Weitere Hinweise auf die Verwendung einer speziellen Legierung können die in den CT-Daten sichtbaren inneren Strukturen geben. So wurde in zwei unterschiedlichen Blockbergungen der Gräber 775 (Abb. 6.28) und 1298 (Abb. 6.29) ein besonderer Objekttyp festgestellt, der sich durch sein Metallgefüge von anderen Metallobjekten abhebt. Hierbei handelt es sich um runde bzw. ovale, gewölbte Bronzescheiben mit einer viereckigen zentralen Durchlochung. Durchweg sind in den Legierungen helle und dunkle Punkte zu erkennen, welche zum einen als Bleisegregation und zum anderen als Gaseinschlüsse interpretiert werden können. Die Vermutung liegt nahe, dass die Objekte aus einer Kupferlegierung mit einem beträchtlichen Anteil an Blei gegossen wurden. In einer dritten Blockbergung aus Grab 1014 (Abb. 6.30) befindet sich an einem Gürtelgehänge ebenfalls eine rundliche, gewölbte Bronzescheibe mit quadratischer Durchbrechung. Die CT-Daten dieser Messung haben jedoch nicht die erforderliche Auflösung, um die inneren Strukturen der Legierung sichtbar zu machen. Weitere Analysen könnten hier Aufschluss bringen und zusätzliche Informationen zu den Objekten liefern, deren Funktion bisher nicht geklärt ist und bei denen es sich vermutlich um „Altfunde“ handelt. Gerade in römischer Zeit waren Legierungen mit hohem Bleianteil, oft über 20 %, nicht unüblich (Craddock 1985: 61; Riederer 2001; 2004: 398).

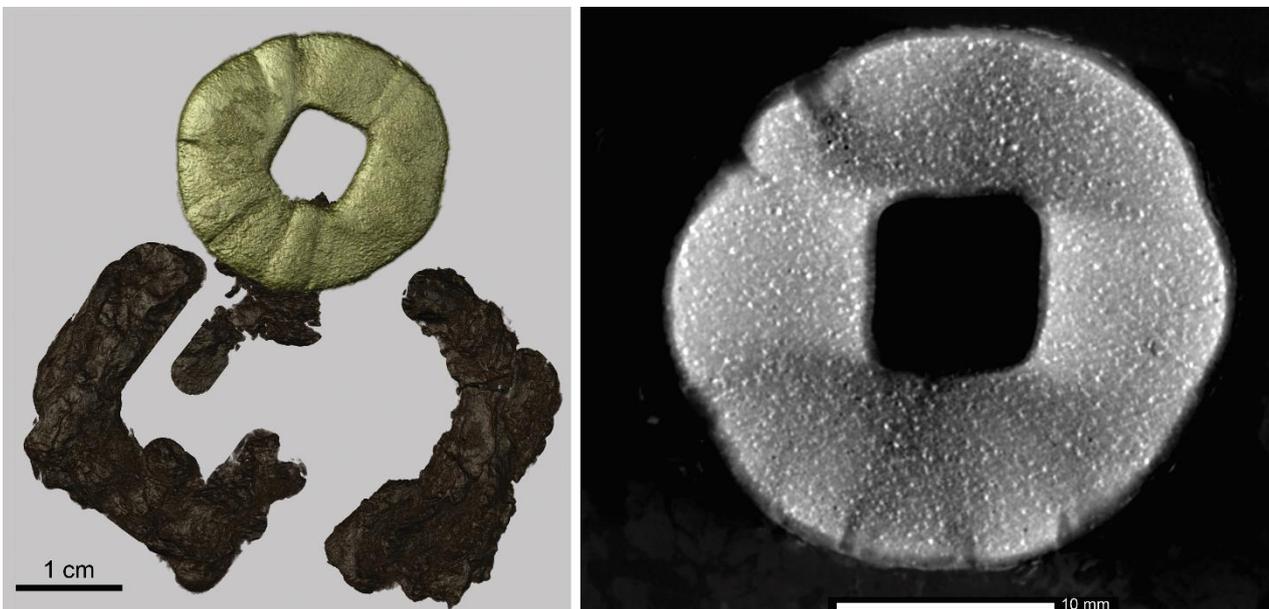


Abb. 6.28: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung (links) der im Block geborgenen Bronzescheibe und der fragmentierten Eisenschnalle aus Grab 775 sowie frontales μ -RCT-Schnittbild der Bronzescheibe (rechts).



Abb. 6.29: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung des im Block geborgenen Messers, außerdem Eisenwerkzeuge, zwei Silexe, Bleiobjekt und Bronzescheibe aus Grab 1298 sowie frontales μ -RCT-Schnittbild der Bronzescheibe (rechts).

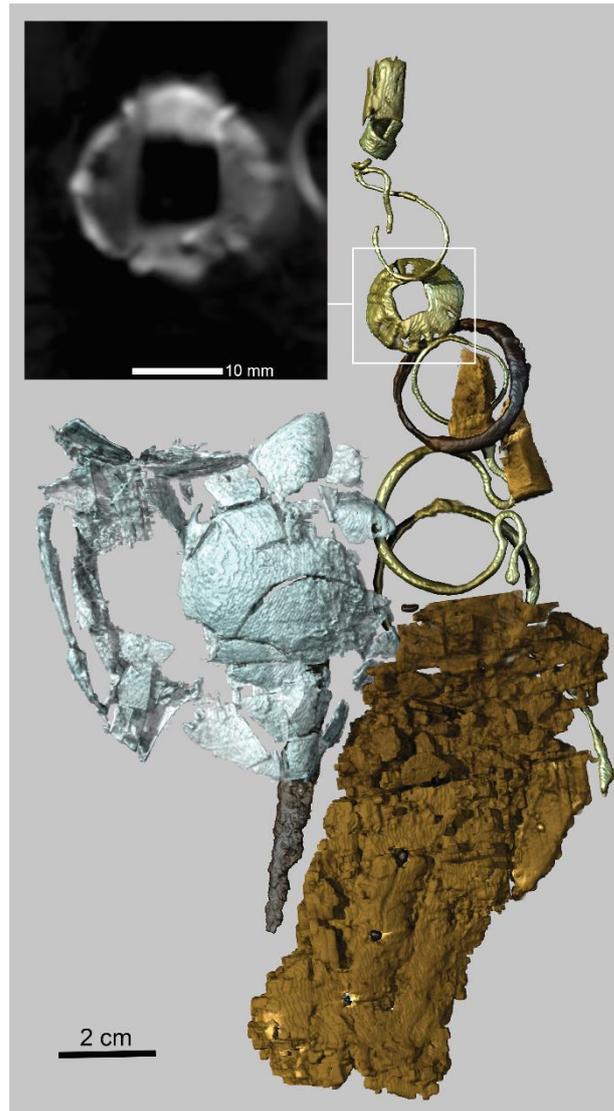


Abb. 6.30: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung des im Block geborgenen Glasgefäßes und der Bestandteile des Gürtelgehänges mit Bronzescheibe aus Grab 1017 sowie frontales μ -RCT-Schnittbild der Bronzescheibe.

6.5 Zusammenfassung

Die hier vorgenommenen Untersuchungen zeigen erneut, dass sich die μ -RCT als Untersuchungs- und Dokumentationsmethode für archäologische Objekte aus Metall sowohl in Blockbergungen als auch für Einzelfunde eignet, um Informationen über stark korrodierte Objekte zu erhalten. Zudem lassen sich Konstruktionsmerkmale, Oberflächendetails und herstellungstechnische Merkmale visualisieren. Auch Informationen zu den vorliegenden Materialien können gewonnen werden, wobei eine Bestimmung von Kupferlegierungen über die Dichte und die damit einhergehenden Grauwertunterschiede in den CT-Daten nicht möglich ist.

Detaillierte Informationen zur Elementverteilung und zu vorliegenden metallographischen Phasen sind nur analytischen Verfahren wie der RFA und metallographischen Analysen an Anschliffen zu

entnehmen (Scott 1991; Lutz/Pernicka 1996). Dennoch können anhand der μ -RCT und insbesondere der Sub- μ -RCT nichtinvasiv Hinweise auf herstellungstechnische Details gewonnen werden. Weitere Untersuchungen könnten möglicherweise Klarheit bringen, inwiefern über die Darstellung innerer Strukturen durch die CT genauere Erkenntnisse über mögliche Legierungsbestandteile wie etwa Blei gewonnen werden können. Des Weiteren könnte überprüft werden, ob sich Hinweise auf den Erhaltungszustand über die abweichende Dichte innerhalb der Randzonen ergeben und inwieweit Artefakte das Ergebnis beeinflussen. Ob anhand der Sub- μ -RCT eine Unterscheidung unterschiedlicher Gefüge möglich ist, erfordert ebenfalls weitere Analysen. Diese könnte zum Beispiel bei den hochlegierten Zinnbronzen Rückschlüsse auf den Herstellungsprozess und auch auf die Legierungszusammensetzung zulassen.

7 Holzanatomische und dendrochronologische Analysen

7.1 Stand der Forschung

Holz stellt in der Archäologie einen besonderen Informationsträger dar. Neben den Informationen, die auf der Art und Beschaffenheit des Objekts selbst beruhen, sowie der verwendeten Holzart und den damit verbundenen Eigenschaften ist insbesondere die Dendrochronologie ein zuverlässiges und genaues Werkzeug zur absolutchronologischen Datierung. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass eine herkömmliche dendrochronologische Datierung zumeist einen erheblichen Eingriff (Schnitt, Bohrung) in das Objekt voraussetzt, der in vielen Fällen aus konservatorischen Gründen ausgeschlossen ist.

Erste Ansätze einer nichtinvasiven Datierung wurden bereits in den 1980er Jahren mit der RCT verfolgt (Onoe et al. 1984). Die Auflösungen der für archäologische Hölzer verwendeten medizinischen Computertomographen waren jedoch zu gering, um auch Ringe unter 1 mm (Reimers et al. 1989; Preuss et al. 1991) und später unter 0,4 mm (Klein/Vogel 1994) Breite zu erfassen. Auch heute liefern medizinische Computertomographen keine ausreichende Auflösung für eine nichtinvasive Datierung (Bill et al. 2012: 229; Rigon et al. 2010: 72). Erst mit der Entwicklung der industriellen μ -RCT konnten die ersten Hölzer nichtinvasiv untersucht und erfolgreich datiert werden (Okochi et al. 2007). Hierzu zählen die Eichenfiguren aus Fellbach-Schmidlen, die auf 127 v.Chr. (+/- 10 Jahre) datiert werden konnten (Keefer et al. 2006). Grabner et al. (2007, 2009) gelang es, in Hallstatt geborgene Objekte aus Tanne (*Abies sp.*, Kochlöffel: 835 v.Chr., ohne Waldkante), Buche (*Fagus sylvatica* L., Knieholzschäftung: 1378 v.Chr., Waldkantendatum) und Weißtanne (*Abies alba* Mill., Gefäß: 1362 v.Chr., keine Angabe zur Waldkante) zu datieren.

Eine im großen Umfang angelegte Studie an über 90 Eichenobjekten bestätigte das Potential der nichtinvasiven dendrochronologischen Untersuchung anhand der μ -RCT, nur sechs Objekte konnten nicht datiert werden (Bill et al. 2012: 228). Ein entscheidender Faktor für die Aussagekraft ist der Zustand der Objekte. Die von Bill et al. (2012: 229) untersuchten Feuchtbodenfunde waren

luftgetrocknet, da die Messungen von sowohl wassergesättigten als auch mit hochmolekularem Polyethylenglykol (PEG) konservierten Hölzern nicht genügend Kontrast für eine Bestimmung der Ringbreiten lieferten. Die Problematik eines geeigneten Konservierungsmittels für archäologisches Nassholz in Bezug auf die nichtinvasive Dendrochronologie konnten Wiesner et al. (im Druck) an einem mit PEG konservierten und gefriergetrockneten Rad aus Ahorn bestätigen. Dieses ist aufgrund von Waldkantendatierungen von Buchenbrettern desselben Befundes im Zeitraum 2900–2897 v. Chr. einzuordnen. Genügend Kontrast für die Messung der Ringbreiten war nur an einigen Stellen im Zentrum des Rades gegeben, in denen das Konservierungsmittel nach der Gefrierdrying nicht vorlag und die Holzstruktur kollabierte. Zudem konnten in diesen Bereichen im Vergleich zur konventionellen Datierung nicht alle Ringe erfasst werden.

Auch Kastner et al. (2007: 64), Grabner et al. (2007: 102, 2009: 352) und Bill et al. (2012: 226) berichten von den Grenzen der Messbarkeit von Ringbreiten, wobei die Auflösung der Daten von der Objektgröße abhängig ist. So gelang es Grabner et al. (2009: 351), Ringbreiten bis zu 0,12 mm an einem 30 mm breiten hölzernen Werkzeug zu messen.

Die Darstellung der Baumringe ist mit der NCT ebenfalls möglich; diese Methode wurde wie auch die μ -RCT an Objekten aus Hallstatt überprüft, wobei ein Mikrotomographieaufbau mit kalten Neutronen eingesetzt wurde. Hierbei war es möglich, Ringbreiten bis zu 0,15 mm zu messen (Mannes 2009: 140). Eine höhere Auflösung wird bei der Computertomographie mit Synchrotron-Strahlung erreicht, die etwa bei der dendrochronologischen Datierung historischer Violinen (Rigon et al. 2010) oder zur Bestimmung der Holzart (Dreossi et al. 2009; Mizuno et al. 2010) eingesetzt wurde. Eine leichter zugängliche Alternative stellt die Sub- μ -RCT dar, die wegen der begrenzten Probengröße bisher ausschließlich zur Holzartenbestimmung eingesetzt wurde (Van den Bulcke et al. 2009; Grabner et al. 2009; Haneca et al. 2012).

Neben den untersuchten Hölzern, die sich als Feuchtbodenfund unter anaeroben Bedingungen (Keefer et al. 2006, Bill et al. 2012, Wiesner et al. im Druck) oder den Bedingungen eines Salzbergwerks (Grabner et al. 2007, 2009) erhalten haben, kann archäologisches Holz auch verkohlt oder in zumeist weit geringerem Umfang an bzw. in der Umgebung von Metallobjekten vorliegen (Cronyn 1990: 244). Bird et al. (2008) untersuchten anhand der μ -RCT interne Strukturen und mineralische Phasen von Holzkohle. Haneca et al. (2012) nutzten die Sub- μ -RCT zur Holzartbestimmung von durch Eisenkorrosion mineralisierten Holzproben, die sich an frühmittelalterlichen Waffen erhalten hatten.

7.2 Untersuchung der Hölzer

Neben durch Eisen oder auch Kupfer mineralisiertem Holz kann sich archäologisches Holz durch die bioziden Eigenschaften von Kupfer oder Blei auch in deren Nähe erhalten (Cronyn 1990: 244; Gillard et al. 1994). Derart erhaltenes Holz wird oft zusammen mit den Metallobjekten und dem

umgebenden Erdreich in Blockbergungen gesichert. Ziel dieser Untersuchung war es, die vielversprechende und nichtinvasive μ -RCT für die Analyse von Holz, welches sich in einer Blockbergung befindet, zu überprüfen. Zudem sollte mit der Sub- μ -RCT Holz analysiert werden, das sich durch Mineralisierung direkt an einem Eisenobjekt erhalten hat. Zentrale Fragestellungen waren in beiden Fällen insbesondere die Datierung und die hierfür notwendige Holzartenbestimmung (Stelzner/Million 2015).

Von den über 300 untersuchten Blockbergungen aus Lauchheim wurden zwei Blockbergungen aufgrund des erhaltenen Holzes für diese Studie ausgewählt. In der Blockbergung aus dem Grab 656 haben sich Holzreste der Grabkammer erhalten und in der Blockbergung eines Gürtelgehänges aus Grab 1127 fanden sich ebenfalls hölzerne Reste der Grabeinbauten. Sie stellen für die hier untersuchten Funde eine Ausnahme dar, da in den übrigen Blockbergungen aus Lauchheim zwar ebenfalls oft Holz vorliegt, eine weiterführende Untersuchung jedoch aufgrund des schlechten Erhaltungszustandes wenig bzw. nicht erfolgversprechend ist.

Eine spezielle Fundgruppe stellen die Spathen dar, welche, wie bereits dargestellt, ebenfalls mit der μ -RCT analysiert und dokumentiert wurden (Gauß 2013; Stelzner et al. 2015). Hier stehen wie beschrieben neben dem Gefäß- und Klingenaufbau auch die erhaltenen organischen Reste des Griffs und der Schwertscheide im Mittelpunkt. Die Holzreste der Handhabe, die sich an der Spatha aus Grab 40 erhalten haben, boten die Möglichkeit weiterführender Untersuchungen.

Die Messungen der Objekte wurden sowohl mit der μ -RCT als auch der Sub- μ -RCT am FEM in Schwäbisch Gmünd vorgenommen.⁶⁷ Entscheidenden Einfluss auf die Analyse von Holz hat die Qualität der Daten, weshalb hier nochmals auf die Messungen eingegangen werden soll und die Parameter zu den einzelnen Messungen in Tabelle 7.1 angegeben sind.

Tab. 7.1: Messparameter der μ -RCT und Sub- μ -RCT.

Objekt	Methode	Spannung kV	Stromstärke μ A	Projektio- nen	Filter
Blockbergung Grab 656	μ -RCT	280	400	1000	1,0 mm Cu
Blockbergung Grab 1127	μ -RCT	275	600	1000	0,5 mm Cu
Blockbergung Grab 1127	μ -RCT (ROI)	230	600	1000	--
Spatha Grab 40	μ -RCT	280	500	1000	0,5 mm Cu
Spathaknauf Grab 40	Sub- μ -RCT	170	150	1000	--
Holzprobe Grab 40	Sub- μ -RCT	60	60	1000	--
Holzprobe rezent	Sub- μ -RCT	100	130	1000	--

⁶⁷ Zum Vergleich der μ -RCT und der Sub- μ -RCT siehe auch Kapitel 3.3.2 Submikro-Röntgencomputertomographie.

Die Blockbergung aus Grab 656 mit einer Größe von 230 x 180 x 60 mm konnte in einer Messung erfasst werden, während die 325 x 200 x 95 mm große Blockbergung aus Grab 1127 in zwei Teilbereichen gemessen wurde. Zur Reduzierung von Artefakten durch Strahlaufhärtung wurden Kupferfilter verwendet. Zusätzlich wurde von dem Bereich mit Holzerhaltung eine Detailmessung (ROI) erstellt.

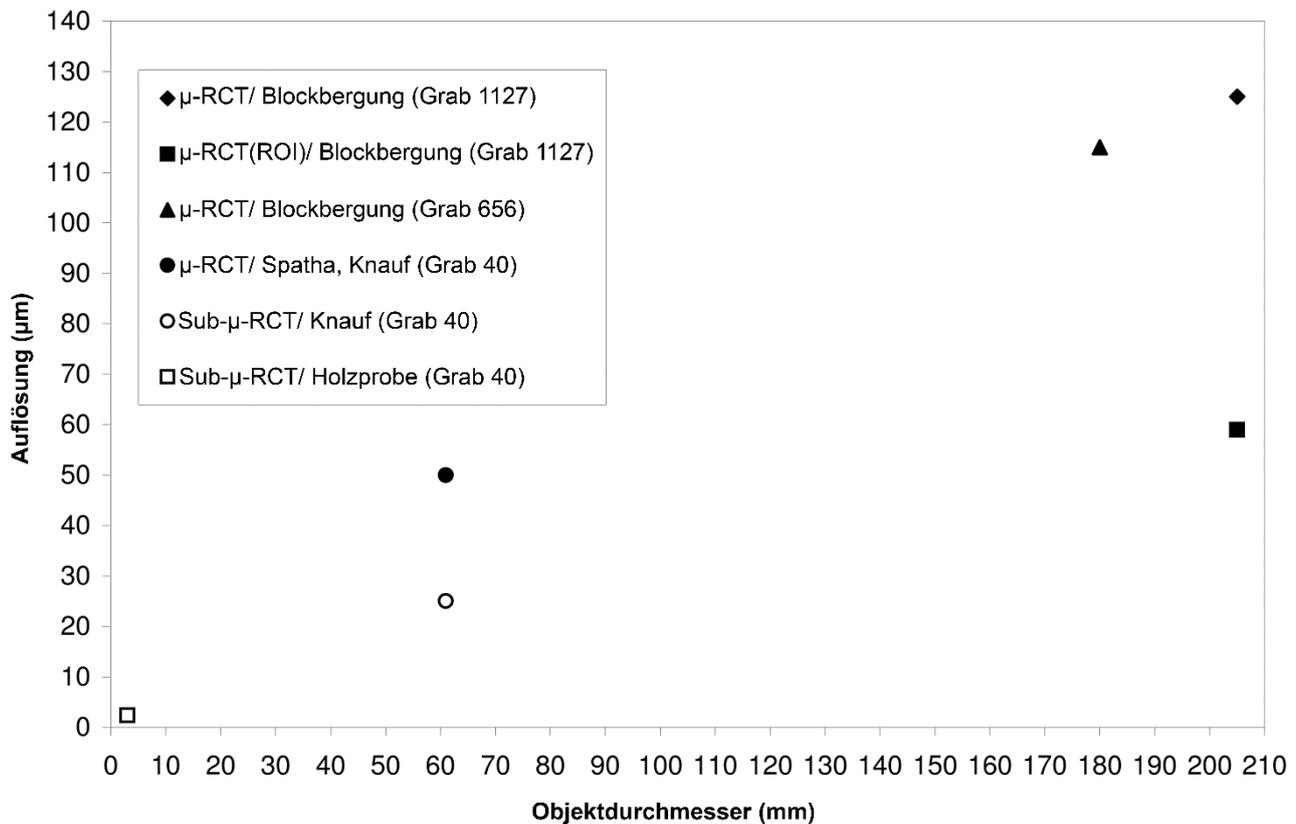


Abb. 7.1: Auflösungen der mit der µ-RCT und Sub-µ-RCT gemessenen Objekte in Abhängigkeit zu ihrem Durchmesser.

Die Spatha aus Grab 40 war vor der Untersuchung bereits mit der Alkali-Sulfit Methode (0,1 M/ 0,05 M) nach Schmidt-Ott/Oswald (2006) konserviert worden. Vor der Entsalzung waren die organischen Reste an Griff und Klinge mit Paraloid B-44 (5% in Aceton) fixiert. Die insgesamt 880 mm lange Spatha wurde in vier Teilbereichen gemessen. Zusätzlich wurde der Spathaknauf mit Teilen der Griffangel, an der sich die Reste des Holzgriffs erhalten haben, mit der Sub-µ-RCT gemessen. Für die Holzartbestimmung wurde eine 5 x 3 x 1 mm große Probe des Holzgriffs entnommen und mit der Sub-µ-RCT untersucht. Um die Bestimmung der Holzart abzusichern, wurde zudem rezentes Holz tomographiert. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse mit denen einer herkömmlichen Holzartenbestimmung des archäologischen Holzes sowie von rezentem Holz abgeglichen.⁶⁸ Entscheidenden Einfluss auf den Erfolg der Untersuchung von archäologischem Holz hat die Auflö-

⁶⁸ Die Holzartenbestimmung und dendrochronologische Datierung erfolgten durch Dipl.-Forstw. Sebastian Million.

sung der Messung, welche sowohl durch die angewendete Anlage sowie die Probengröße (Grabner et al. 2009: 352) bzw. Größe der Blockbergung (Stelzner et al. 2010: 97) bestimmt wird.⁶⁹ Die Graphik (Abb. 7.1) verdeutlicht hier nochmals den Zusammenhang von Objektdurchmesser und den hier mit der μ -RCT und der Sub- μ -RCT erreichten Auflösungen.

7.3 Ergebnisse der Holzanalysen

7.3.1 Holzreste in Blockbergungen

Die Messung der Blockbergung aus Grab 656 zeigte, dass sich nur ein geringer Teil des Holzes ausreichend gut erhalten hatte, um Informationen liefern zu können. Trotz der geringen Größe konnten bei einer Auflösung von 115 μm an diesem Holzfragment großlumige Frühholzgefäße mit einem durchschnittlichen Lumendurchmesser von 0,28 mm dokumentiert werden. Derart große Gefäßlumina weisen auf ein ringporiges Laubholz (Abb. 7.2). Es konnten keine weiteren Bestimmungsmerkmale erfasst werden, die auf die Holzart schließen lassen würden. Aufgrund der geringen Größe (30 x 10 x 4 mm) des gut erhaltenen Bereiches sind lediglich zwei bis drei Jahrringgrenzen sichtbar, weshalb auf eine weitere Untersuchung verzichtet wurde.

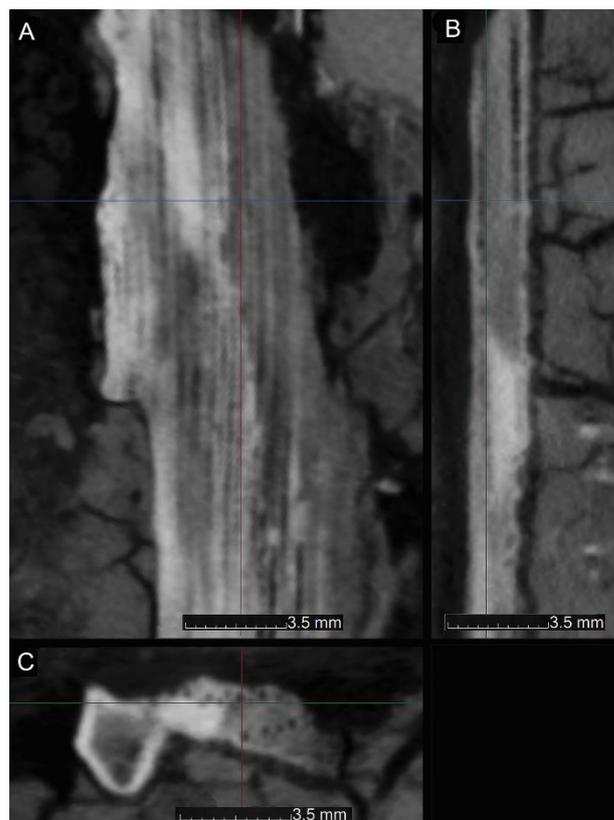


Abb. 7.2: μ -RCT-Schnittbilder der erhaltenen Holzstruktur in der Blockbergung aus Grab 656: Tangential- (A), Radial- (B) und Querschnitt (C).

⁶⁹ Zum Einfluss der Probengröße bzw. des Durchmessers der Blockbergung auf die Auflösung siehe Kapitel 2.4.1 Geometrische Auflösung.

Im Fall der Blockbergung aus Grab 1127 konnten anhand der μ -RCT neben den Metallobjekten aus Eisen und Bronze auch die organischen Materialien erkannt werden; das Holz hatte sich auf einer Fläche von 130 x 90 x 14 mm erhalten (Abb. 7.3). Die erreichte Auflösung von 125 μ m war jedoch nicht ausreichend, um die gewünschten Informationen sichtbar zu machen. Erst durch eine erneute Detailmessung (ROI) des Bereiches mit Holzerhaltung konnte eine entsprechende Auflösung von 60 μ m erzielt werden (Abb. 7.4). Wie in Grab 656 handelt es sich hierbei ebenfalls um großlumiges ringporiges Holz mit einem durchschnittlichen Durchmesser der Gefäßlumina von 0,20 mm. Ferner sind orthogonal zu den Jahrringgrenzen im Durchschnitt 0,34 mm breite Holzstrahlen erkennbar. Aufgrund beider Merkmale lässt sich das Holz als Eiche (*Quercus* sp.) identifizieren.



Abb. 7.3: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung der Objekte des Gürtelgehänges (Beinkamm, Bronzepingzette, Bronzeblech und zwei Eisenringe) in der Blockbergung aus Grab 1127 und der Holzschicht, die sich stratigraphisch unter den Bronzeobjekten erhalten hat und im Detail (ROI) erneut gemessen wurde.

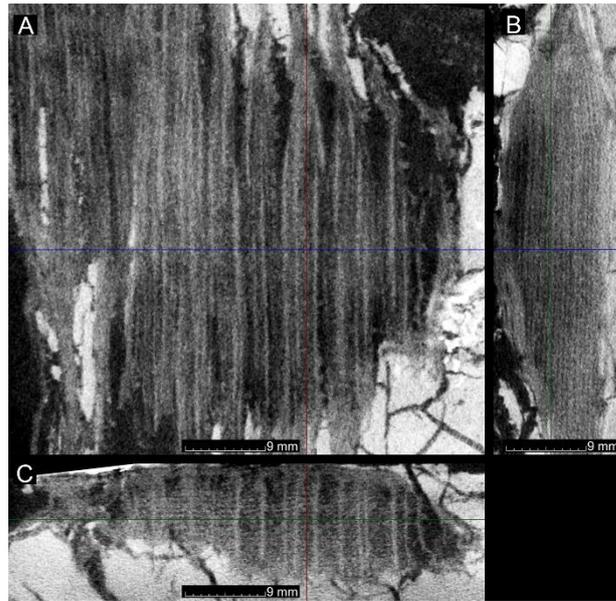


Abb. 7.4: μ -RCT(ROI)-Schnittbilder der erhaltenen Holzstruktur in der Blockbergung aus Grab 1127: Tangential- (A), Radial- (B) und Querschnitt (C)

Die Auflösung erlaubte es zudem, die Jahrringe bis zu einer Breite von 0,38 mm zu messen, was jedoch aufgrund des geringen Kontrasts einige Schwierigkeiten bereitete. Erleichtert wurde das Messen in VGStudio MAX 2.2® anhand der Möglichkeit, mehrere Schnittbilder übereinander darzustellen, wodurch die Abgrenzungen der Jahrringe deutlicher sichtbar werden. Auf diese Weise konnten insgesamt 18 Jahrringe mit einer mittleren Jahrringbreite von 0,59 mm gemessen werden. Aufgrund der bereits gut belegten Fundortchronologie aus Lauchheim „Wasserfurche“ (Billamboz/Becker 2001) konnte diese Jahrringfolge erfolgreich mit der Dendrogruppe 100 abgeglichen werden, wobei die Datierung aufgrund der geringen Anzahl an Ringen nicht als absolut angesehen werden kann (Abb. 7.5, nach Billamboz 2008 Datierungsgüte C). Der letzte gemessene Jahrring wurde im Jahr 500 n. Chr. gebildet. Da hierbei keine Unterscheidung zwischen Kern- und Splintholz getroffen werden kann, handelt es sich um eine Kernholzdatering, ohne die Möglichkeit, das Fäljahr zu präzisieren (Stelzner/Million 2015: 192).

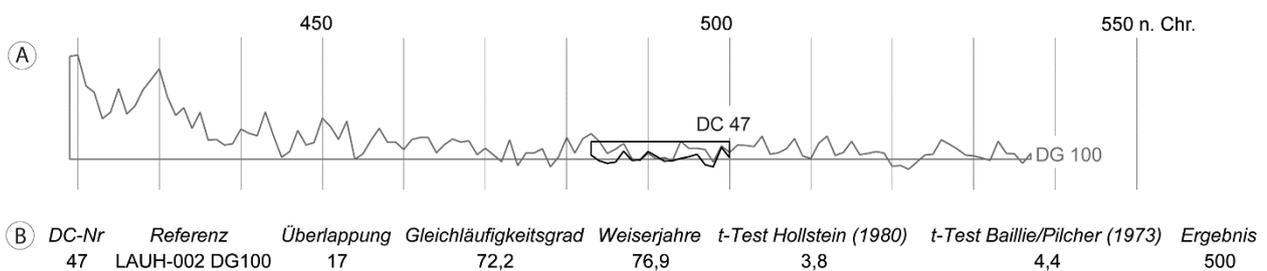


Abb. 7.5: A: Darstellung der Jahrringfolge von DC 47 in Synchronlage mit der Dendrogruppe (DG) 100. B: Tabellarische Darstellung der Datierungsergebnisse (Abb. S. Million).

7.3.2 Holzreste eines Spathagefäßes

Wie bereits beschrieben kann die μ -RCT von Spathen neben den Informationen zum Klingen- und Gefäßaufbau aus Metall auch Aufschluss über die organischen Bestandteile am Gefäß und den Aufbau der Spathascheide liefern. Dies trifft auch auf die Konstruktionsmerkmale im Inneren zu, wie etwa der Keil (L: 14 mm, B: 9 mm, S: 1 mm) aus organischem Material, der zur Fixierung des Knaufs der Spatha aus Grab 40 eingebracht wurde (Stelzner et al. 2015:). Erkennbar sind die Reste der Handhabe aus Holz mit einem ovalen Querschnitt, die sich sowohl im Bereich der Knaufplatte (L: 39 mm, B: 15 mm) als auch im Bereich der Parierplatte (L: 47 mm, B: 21 mm) erhalten haben. Im Fall der Spatha aus Grab 40 erlaubte es die zerbrochene Griffangel, den Knauf mit den Resten des Holzgriffs aufgrund seiner geringen Größe zudem mit der Sub- μ -RCT zu messen, um eine größere Auflösung zu erreichen. Dadurch konnte die Annahme bestärkt werden, dass es sich bei dem Keil zur Stabilisierung des Knaufs um Holz handelt. Die Strukturen, die dies vermuten lassen, konnten durch die Auflösung der Sub- μ -RCT von 25 μ m sichtbar gemacht werden. In diesem Fall konnten jedoch keine eindeutigen Merkmale erkannt werden, die Hinweise auf die Holzart geben könnten. Die Auflösung war auch für eine Bestimmung der Holzart an der Griffangel nicht ausreichend. Es konnte zwar ein zerstreutporiges Holz erkannt und ein Markstrahl mit 0,13 mm Breite gemessen werden (Abb. 7.6), für eine detaillierte anatomische Analyse musste jedoch eine Probe genommen werden, um die Größe für eine zusätzliche Messung weiter zu verkleinern. Die hierbei erzielte Auflösung von 2 μ m erlaubte die Untersuchung des Holzes, und die sichtbaren Merkmale in den drei Schnittrichtungen ließen eine Bestimmung der für die Handhabe verwendeten Buche (*F. sylvatica*) zu (Abb. 7.7).

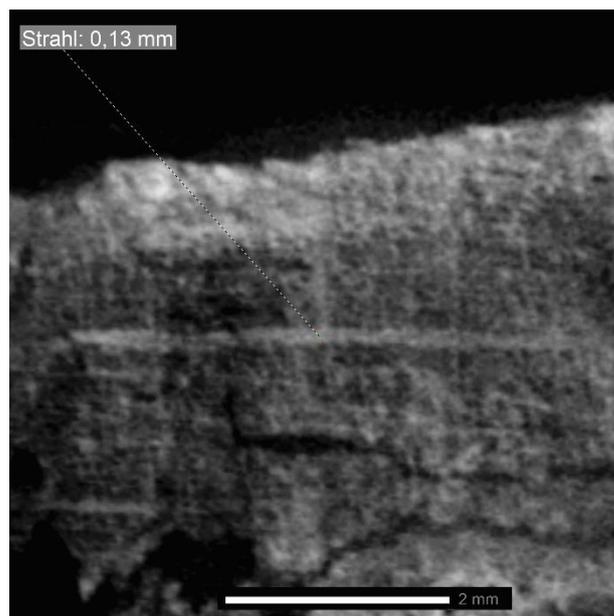
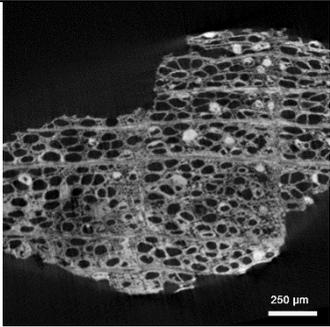
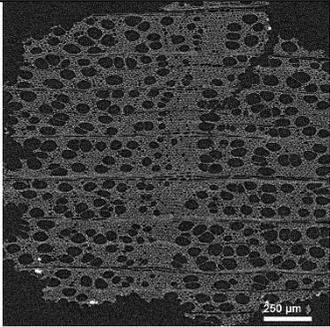
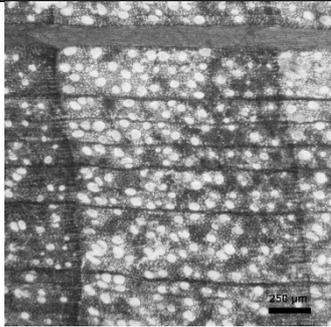
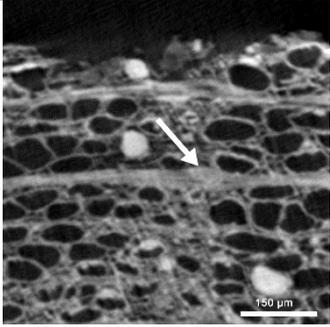
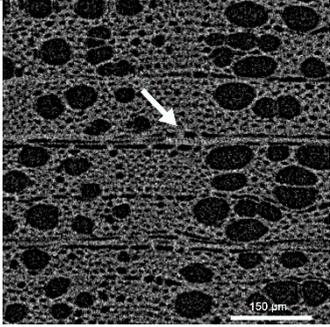
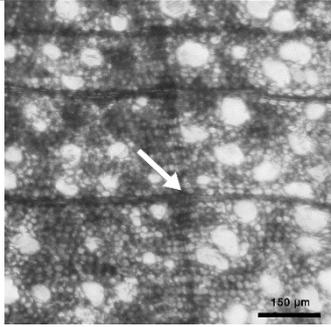
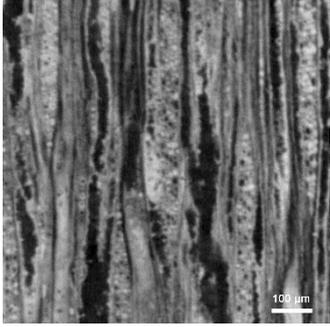
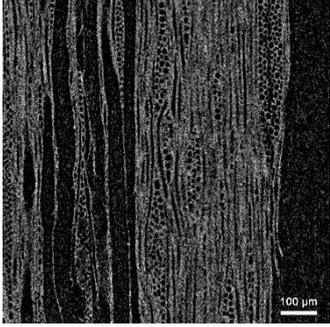
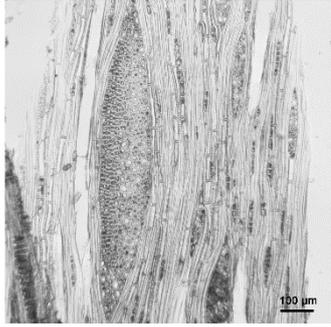
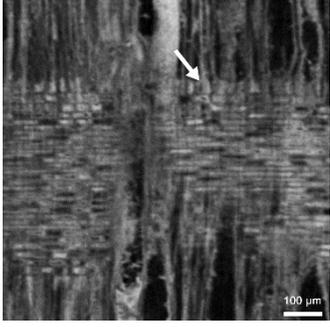
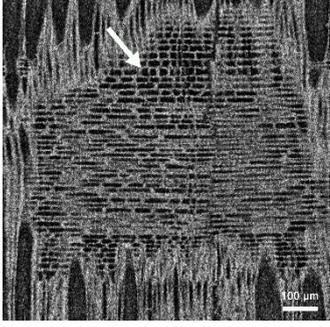
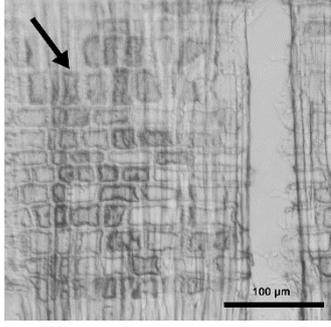
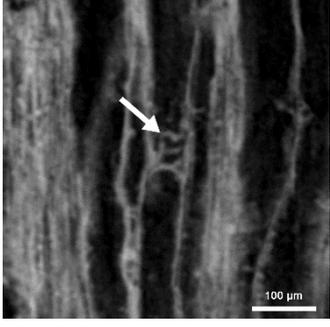


Abb. 7.6: Horizontales Sub- μ -RCT-Schnittbild des Holzquerschnitts mit 0,13 mm starkem Markstrahl an der Griffangel der Spatha aus Grab 40.

Tab. 7.2: Vergleich der Merkmale von archäologischem und rezentem Buchenholz.

Merkmal	arch. Holz (Sub- μ -RCT)	rezentes Holz (Sub- μ -RCT)	rezentes Holz (Mikroskopie)
Zerstreutporiges Holz (Querschnitt)			
Verdickter Markstrahl an der Jahrringgrenze (Querschnitt)			
Mehrringiger Markstrahl (Tangentialschnitt)			
Heterogener Markstrahl (Radialschnitt)			
Leiterförmige Durchbrechung an der Jahrringgrenze (Radialschnitt)			

Die Merkmale wurden mit denen einer zusätzlich tomographierten Holzprobe und von unter dem Mikroskop analysierten Feinschnitten einer rezenten Buche verglichen (Tab. 7.2). Charakteristische Merkmale konnten in allen Holzproben dargestellt werden. Lediglich die leiterförmigen Durchbrechungen an der Jahrringgrenze konnten in der rezenten Holzprobe nicht sichtbar gemacht werden. Zusätzlich konnte das Ergebnis durch eine herkömmliche Holzartenbestimmung des archäologischen Holzes bestätigt werden.⁷⁰

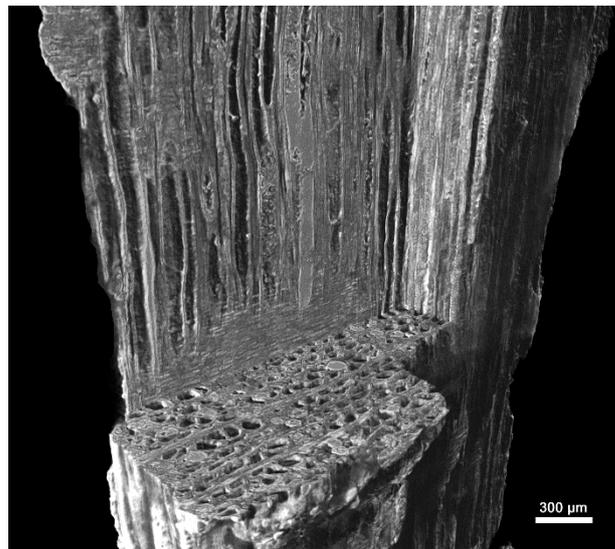


Abb. 7.7: Sub- μ -RCT-Darstellung der virtuell angeschnittenen Holzprobe aus Grab 40.

Sehr viel deutlicher als anhand der μ -RCT sind die Wachstumsringe des Holzes um die Griffangel in der Messung mit der Sub- μ -RCT bei einer Auflösung von 25 μ m zu erkennen (Abb. 7.8). Insgesamt konnten 51 Ringe bis zu einer Breite von 0,14 mm gemessen werden. Eine Einordnung der Kurve war bisher nicht möglich, da für diesen Zeitraum nur wenige Referenzen zur Verfügung stehen. Zudem besteht keine Gewissheit, ob in Bereichen mit engen Jahrringen auch alle Jahrringe erfasst werden konnten.

Im Querschnitt der Handhabe waren zwei breite, gut erkennbare Holzstrahlen sichtbar. Um den minimalen Durchmesser des verwendeten Stamms zu rekonstruieren, wurde ein Winkel in VGStudio MAX an diese Strahlen angelegt und eine Distanz von 19,9 cm von dem zuletzt gebildeten Ring zu dem imaginären Mark des Stamms bestimmt. Demnach wurde für die Herstellung der Handhabe ein Stück Holz von einer mindestens 40 cm starken Buche verwendet. Neben den hölzernen Bestandteilen konnte auch Textil am Knauf und auf dem Holz der Handhabe erkannt werden (Abb. 7.8d; Stelzner/Million 2015: 193).

⁷⁰ Die Holzartenbestimmung erfolgte durch Werner H. Schoch, Labor für quartäre Hölzer, Langnau, Schweiz. Hierfür wurde eine Probe des Holzgriffs genommen und anhand eines Auflichtmikroskops analysiert.

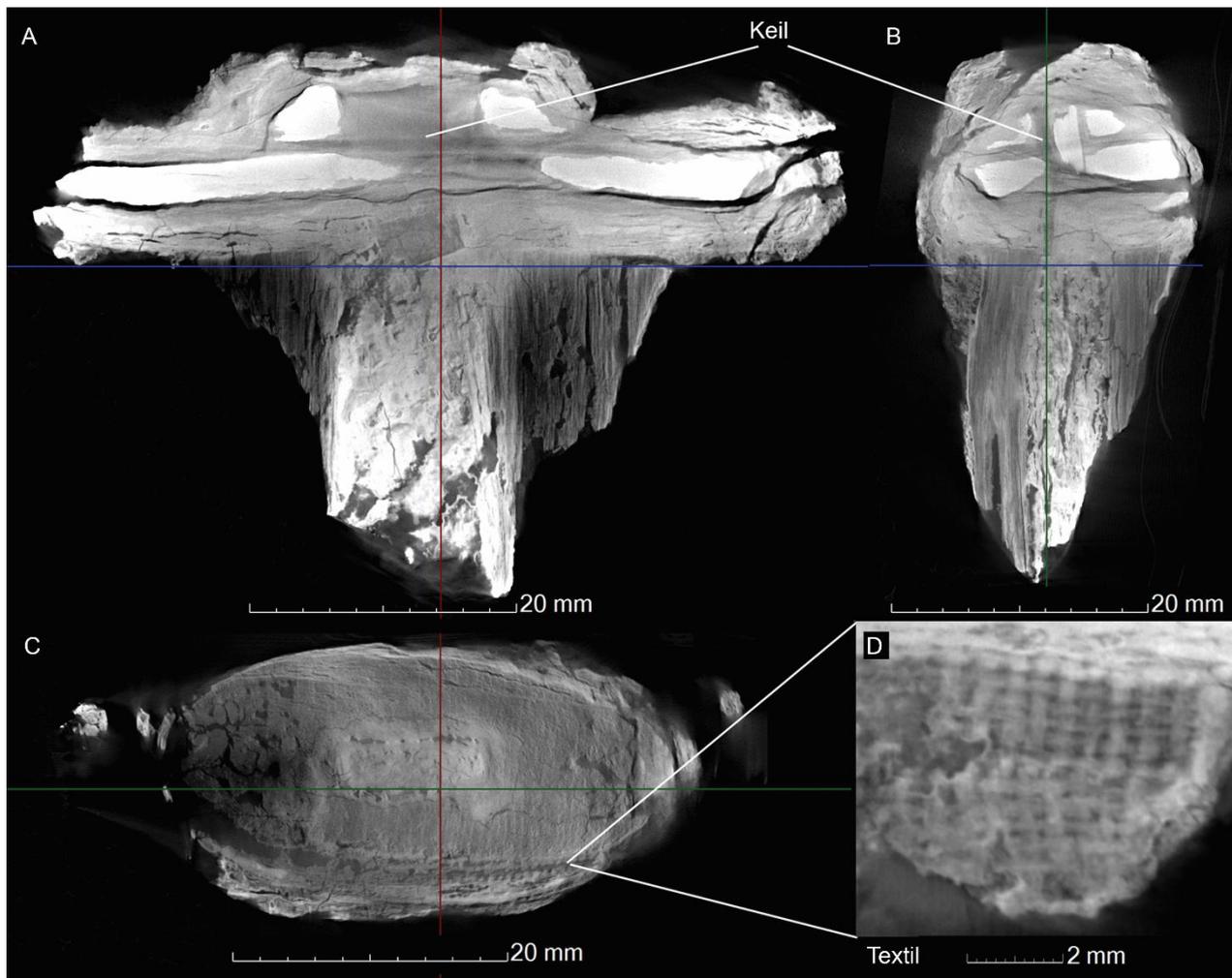


Abb. 7.8: Sub- μ -RCT-Schnittbilder des Knaufs mit Resten des Spathaholzgriffs aus Grab 40: Radial- (A), Tangential- (B), und Querschnitt (C). Zudem ist ein Holzkeil im Spathaknauf (A und B) und ein zweilagiges Textil in Leinwandbindung (C und D) auf dem Holz des Griffs zu erkennen.

7.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Versuche an den zwei Blockbergungen haben gezeigt, dass anhand der μ -RCT eine Holzartenbestimmung in Blockbergungen dann möglich ist, wenn der Erhaltungszustand dies zulässt und die Auflösung der Messung ausreichend ist. Im Fall der Blockbergung des Gürtelgehänges aus Grab 1127 war für eine Bestimmung der Holzart eine Detailmessung (ROI) erforderlich. Wie in dem Fall der Grabkammer aus Grab 656 kann die μ -RCT auch dann Schlüsse auf die Holzart zulassen, wenn nur kleine Reste erhalten sind. Zu beachten ist, dass dies nur für bestimmte Holzarten mit eindeutigen Merkmalen gelten kann, da eine detaillierte anatomische Analyse nur mit einer weitaus größeren Auflösung zu erreichen ist. Van den Bulcke et al. (2009: 508) etwa erreichten eine Voxelgröße von unter 1 μ m bei Proben, die kleiner als 1 mm waren. Deutlich wurde dieser Umstand an der Spatha aus Grab 40, deren Handhabe aus Buche nur über eine Probennahme und die Messung mit der Sub- μ -RCT sicher bestimmt werden konnte. Eine solche war trotz der bereits erfolgten

Festigung und Konservierung der Spatha möglich, was wohl auf den Mineralisierungsgrad des Holzes zurückzuführen ist. Ein Vergleich der Schwächungskoeffizienten der Histogramme von Messungen mit gleichen Messparametern von mineralisiertem archäologischem und rezentem Holz, wie dies von Haneca et al. (2012: 901) dargestellt wurde, kann den Mineralisierungsgrad verdeutlichen.

Nur ein kleiner Bereich in der Blockbergung des Gürtelgehänges aus Grab 1127 hatte sich so gut erhalten, dass die Ringbreiten gemessen werden konnten. Die Ringe der Eiche konnten bei einer Auflösung von 60 μm gemessen werden, wohingegen die Ringbreiten der Buche an der Spatha aus Grab 40 erst nach der Messung im Sub- μ -RCT und einer Auflösung von 25 μm deutlicher sichtbar waren. Entscheidend hierbei ist die untersuchte Holzart. So sind nach Grabner *et al.* (2009: 349) die Ringgrenzen von Nadelhölzern aufgrund der größeren Dichte des Holzgewebes am Ende des Jahrrings gut sichtbar. Bei ringporigen Harthölzern wie der hier untersuchten Eiche lassen sich die Jahrringgrenzen aufgrund der großen Gefäße (150–350 μm) und der Breite der Markstrahlen gut feststellen. Im Gegensatz hierzu sind die Jahrringgrenzen zerstreutporiger Hölzer wie der hier untersuchten Buche nicht so deutlich zu erkennen und erfordern wegen der geringen Gefäßgröße (8–85 μm) eine hohe Auflösung, um die Ringbreiten messen zu können. Dies stellt insofern ein methodisches Problem dar, da die Probengröße möglichst klein sein sollte, um hohe Auflösungen für die Erfassung auch der schmalsten Ringe zu erreichen. Dies trifft insbesondere auf die Sub- μ -RCT zu, die nur eine begrenzte Probengröße zulässt. Demgegenüber sind für die Datierung möglichst große Objekte mit vielen Ringen von Vorteil, um die entsprechenden Informationen zu erhalten. Erschwerend kommt hinzu, dass bei zerstreutporigen Laubhölzern keine sichtbaren Dichteunterschiede im Holzgewebe vorliegen und sich die Jahrringe nur durch kleine anatomische Details abgrenzen. Aufgrund des fehlenden Kontrasts wird das Erkennen der Jahrringgrenzen zusätzlich erschwert (Grabner et al. 2007). Hier bleibt abzuwarten, wie sich die Versuche automatisierter Jahrringmessungen entwickeln (Longuetaud et al. 2005; Entacher et al. 2007). Möglicherweise kann der sogenannte Phasenkontrasteffekt (Wilkins et al. 1996), der bereits für eine kontrastreichere Visualisierung der Mikrostrukturen von Holz genutzt wurde (Mayo et al. 2010; Haneca et al. 2012), auch zu einer kontrastreicheren Darstellung von Jahrringen eingesetzt werden. Dies könnte gerade dann zu aussagekräftigen Ergebnissen führen, wenn Ringe aufgrund eines Konservierungsmittels nicht sichtbar sind.

7.5 Zusammenfassung

Eine nichtinvasive Holzartenbestimmung in Blockbergungen mit der μ -RCT ist in bestimmten Fällen möglich. Abhängig ist dies von der Holzart und der erzielten Auflösung. So konnte hier Eiche identifiziert werden. Die Bestimmung der Handhabe der Spatha aus Buche hingegen erforderte eine Probennahme, um die notwendige Auflösung für eine umfassende anatomische Analyse zu errei-

chen. Diese Auflösung konnte mit der Sub- μ -RCT erzielt werden. Es war hierfür jedoch eine Probenahme erforderlich, um eine entsprechende Auflösung zu erreichen. Die Probengröße kann auf einige Millimeter beschränkt werden und ist damit minimalinvasiv. Zudem ist eine dreidimensionale Untersuchung ohne Präparation möglich. Was die Datierung der hier untersuchten Hölzer betrifft, ist grundsätzlich festzuhalten, dass die Auflösung der μ -RCT für die Messung der Breiten der Wachstumsringe der Eiche in einer Blockbergung bis zu 0,38 mm ausreichend war und eine Datierung ermöglichte. Hiermit eröffnet sich eine neue Perspektive für zukünftige Ausgrabungen, in denen womöglich besser erhaltene Hölzer in Blockbergungen gesichert und datiert werden können. Obwohl mit der Sub- μ -RCT Ringbreiten von bis zu 0,14 mm messbar waren, zeigte die Jahrringfolge des Holzgriffs der Spatha keine übereinstimmende Datierungslage mit den Referenzchronologien. Dennoch handelt es sich um ein vielversprechendes Beispiel für die Anwendung dieser Methode, um eine Datierung von an Metallobjekten mineralisiertem Holz zu ermöglichen. Eine herkömmliche Messung der Jahrringe wäre in einem solchen Fall nicht möglich gewesen. Darüber hinaus konnte anhand der Sub- μ -RCT der Baumdurchmesser am letzten gebildeten Jahrring rekonstruiert werden. Der Erfolg einer Untersuchung ist hierbei abhängig von der erzielten Auflösung und dem Kontrast einer Messung, was, neben den Eigenschaften der verwendeten Anlage, wiederum abhängt von der Objektgröße und der Holzart. Um alle Jahrringbreiten zu erfassen, sind sehr hohe Auflösungen notwendig, was bisher nur bei kleinen Proben zu erreichen ist. Dies stellt insofern ein Problem dar, da für die Dendrochronologie große Proben mit möglichst vielen Ringen anzustreben sind. Dennoch haben die Versuche gezeigt, dass mit der Sub- μ - und der μ -RCT eine nichtinvasive Untersuchungsmethode auch für diese hier vorgestellten, speziellen Fälle zur Verfügung steht.

8 Textiltechnologische Analysen

8.1 Textilien in Blockbergungen

Über die Identifizierung und stratigraphische Position von Textilien in den Blockbergungen hinaus erlauben die CT-Daten unter bestimmten Voraussetzungen auch die Analyse textiltechnologischer Merkmale (Peek et al. 2009: 571). Neben dem Erhaltungszustand des Gewebes ist hier vor allem die Auflösung der Messung ausschlaggebend. In den meisten Fällen lassen sich Gewebedichte und Fadenstärke messen und bei entsprechender Qualität der Daten und des Textils zumeist auch die Bindung ermitteln. Eine Möglichkeit, die erforderliche Auflösung zu erreichen, besteht darin, den Bereich des Textils im Detail zu messen.⁷¹

In dem Fall einer kleinen Blockbergung aus Grab 100, die mit einer hohen Auflösung gemessen werden konnte, war es an einem relativ groben Gewebe zudem möglich, die Fadendrehung zu

⁷¹ Zum Vergleich einer Detailmessung (ROI) mit einer normalen Messung siehe Kapitel 3.2.1 Mikro-Röntgencomputertomographie.

ermitteln (Abb. 8.1). Ist die dreidimensionale Darstellung des Fadens nicht aussagekräftig bzw. nicht möglich, ist bei der Betrachtung der zweidimensionalen Schnittbilder zu beachten, aus welcher Richtung das Gewebe gemessen wurde. Nur die zur Strahlungsquelle gerichtete Hälfte des Fadens entspricht seiner Drehrichtung, da sich diese im Inneren des Fadens in der zweiten Hälfte umkehrt (wie dies gleichermaßen auf die bereits unter Kapitel 5.3 beschriebenen Kompositstäbe der Spathaklingen zutrifft).⁷² Zudem ließen sich die Drehrichtungen verschiedener Zwirne und Schnüre nachvollziehen, die sich zur Verzierung auf Spathascheiden befinden. Ergebnisse lassen sich zumeist bei Textilien erzielen, die sich mineralisiert an Eisenobjekten befinden. Die Analyse von Textilien, die sich an Bronze oder Silberobjekten erhalten haben, kann wegen des zu großen Dichteunterschiedes und Strahlartefakten des Metalls unmöglich sein (Stelzner et al. 2010: 99). Dennoch gibt es Beispiele, in denen auch an Bronzeobjekten Textil identifiziert und analysiert werden konnte, was in diesen Fällen vermutlich durch einen hohen Mineralisierungsgrad der Textilien zu erklären ist. Eine Alternative kann die NCT darstellen, welche die organischen Materialien auch an Bronze und Silberobjekten visualisieren kann, wenn die Strahlung nicht zu stark durch den Gips und die umgebende Erde geschwächt wird.⁷³

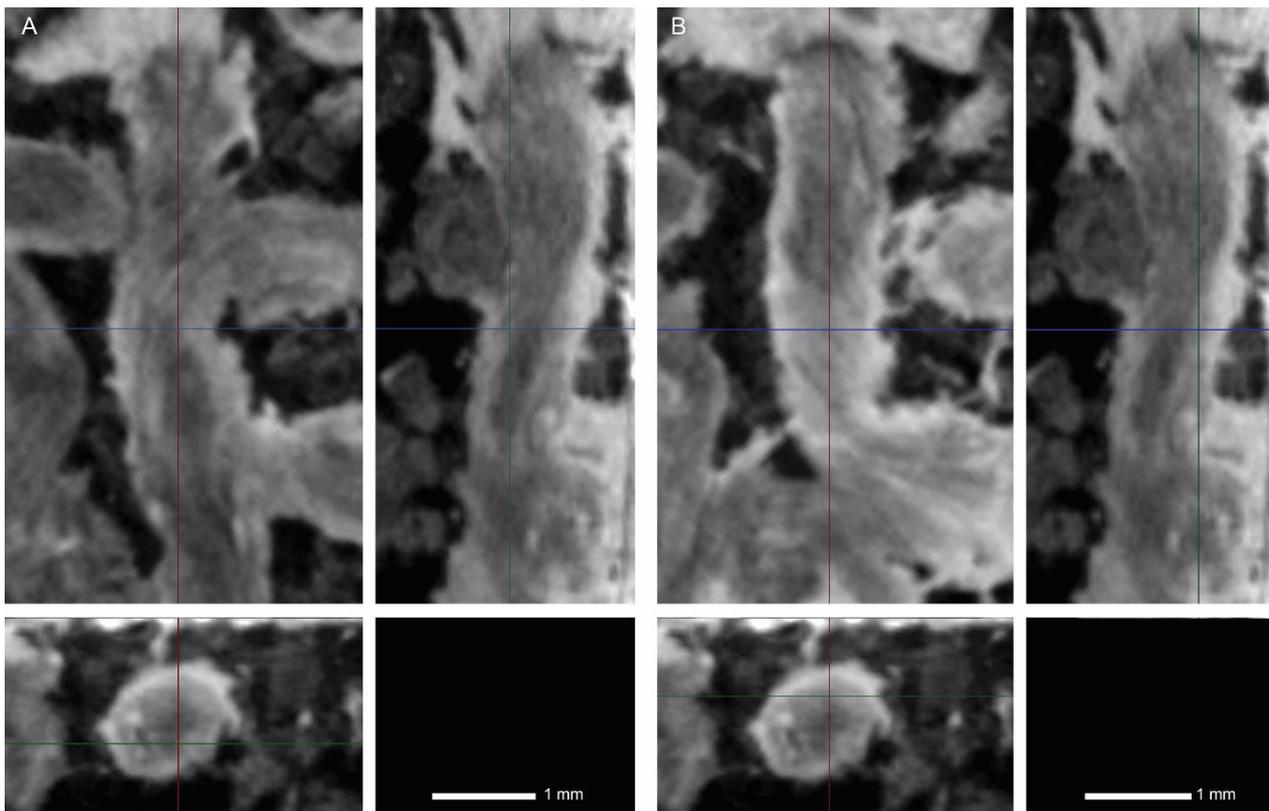


Abb. 8.1: μ -RCT-Schnittbilder eines Z-gedrehten Fadens in einer Blockbergung aus Grab 100. Die zur Strahlungsquelle gerichtete Seite des Fadens zeigt die Z-Drehung (A), während sich in der dahinter liegenden Hälfte (B) sich die Drehrichtung umkehrt und sich als S darstellt.

⁷² Bezüglich einer herkömmlichen Analyse sollte erwähnt werden, dass auch hier die entgegengesetzte Drehrichtung anzunehmen ist, wenn sich nur der untere Teil des Fadens erhalten hat bzw. dieser nur noch als Abdruck vorliegt.

⁷³ Zur Untersuchung von Blockbergungen anhand der NCT siehe Kapitel 3.2.2 Neutronencomputertomographie.

8.2 Textilien an Einzelobjekten

Die CT bietet sich insbesondere für die Analyse von mineralisierten Textilien an Einzelobjekten an, wenn diese etwa durch Korrosionsschichten bedeckt sind oder mehrere Lagen organischen Materials vorliegen. Wie bei den Textilien in Blockbergungen sind hier der Zustand des Materials, die erzielte Auflösung und das Material des Trägerobjekts entscheidend. So können textiltechnologische Merkmale von Geweben an Eisenobjekten mit der RCT sehr gut analysiert werden, wohingegen die Analyse von Textilien an dichteren Objekten wie Bronze und Silber nur schwer möglich ist, da das organische Material durch das Metall überstrahlt wird (Nowack-Böck et al. 2005: 143; Peek/Nowack-Böck 2007: 14).

Für solche Objekte bietet sich die NCT an, die auch eine Untersuchung organischer Materialien an sehr dichten Metallobjekten zulässt, wie dies an einer Pressblechriemenzunge aus Bronze (Grab 129) und einer vergoldeten S-Fibel aus Silber (Grab 1308) belegt werden konnte (Peek et al. 2009: 571–573; Stelzner et al. 2010: 102). An der Pressblechriemenzunge können die beidseitig erhaltenen Gewebeschichten sowie der Holzkern dargestellt werden (Abb. 8.2). Die zusätzliche Messung eines zugehörigen Textilfragments ermöglichte zudem Aussagen zu Fadenstärke, -drehung sowie Gewebedichte und eine Bestimmung des Gewebes als Rippenköper (Abb. 8.3). Auch an der S-Fibel wurde das Gewebe visualisiert und die Leinwandbindung bestimmt (Abb. 8.4).

Neben den organischen Bestandteilen ist in beiden Fällen auch das Metall im Detail zu erkennen. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass die organischen Materialien auf dem Objekt verbleiben können, auch wenn die darunterliegende Objektoberfläche genauer untersucht werden soll. Dass in bestimmten Fällen auch die μ -RCT die Analyse von Textilien an Silberobjekten zulässt, zeigt das Beispiel der Fibel aus Grab 1039. In diesem Fall ist die Fibel stark korrodiert und das Textil liegt mineralisiert in den Korrosionsschichten vor. Selbst nach der Restaurierung des Objekts war das Textil nicht bestimmbar. Wohl aufgrund des starken Mineralisierungsgrades ließ sich dieses Textil jedoch in der μ -RCT darstellen, analysieren und als Diamantkaroköper bestimmen (Abb. 8.5).

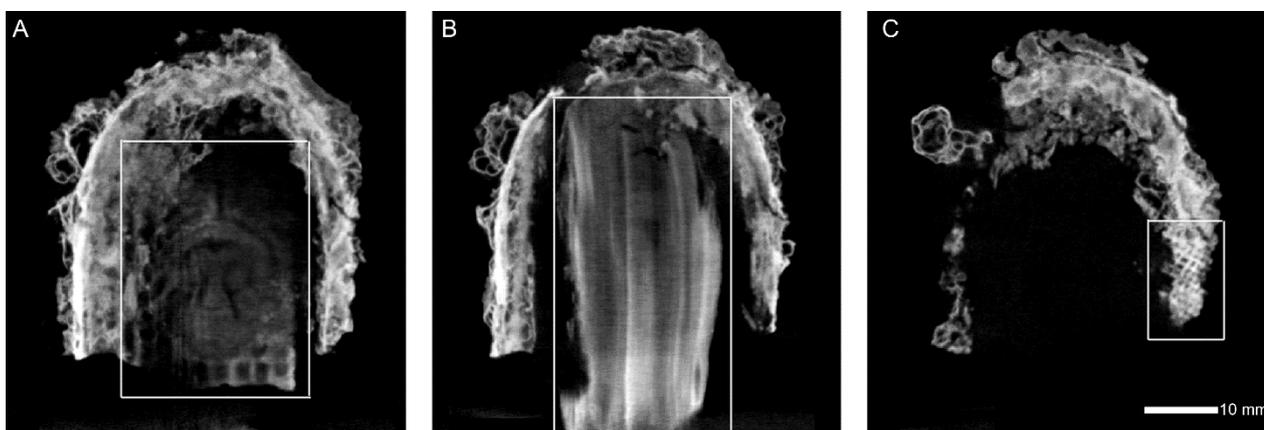


Abb. 8.2: Frontale NCT-Schnittbilder des Bronze-Pressbleches (A), des Holzkerns (B) und des Textils (C) auf der Oberfläche der Riemenzunge aus Grab 129.

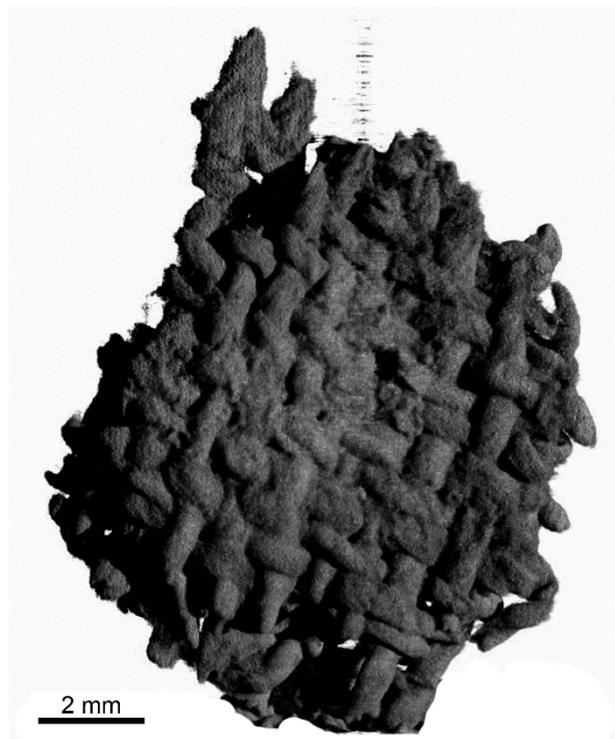


Abb. 8.3: Dreidimensionale NCT-Darstellung eines Gewebefragments aus Grab 129 (Abb. Dr. B. Schilling).

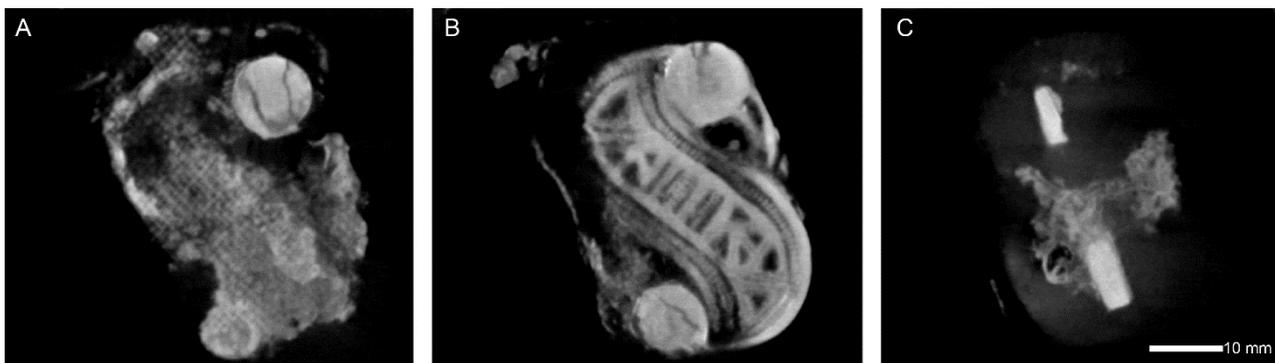


Abb. 8.4: Frontale NCT-Schnittbilder des Textils (A) auf der Oberfläche (B) der Silberfibel aus Grab 1308 sowie der organischen Reste auf der Rückseite (C).

Die CT eignet sich nicht nur für Textilien, die sich an Metallobjekten erhalten haben, sondern auch zur Untersuchung nicht mineralisierter Textilien. So konnten Wiesner et al. 2013 neolithische Textilien anhand der μ -RCT untersuchen und Erkenntnisse zu Aufbau und Herstellungstechnik verschiedener Gewebe gewinnen.

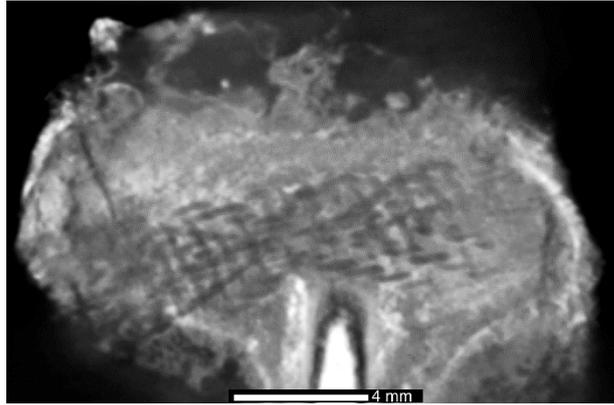


Abb. 8.5: Frontales μ -RCT-Schnittbild des Diamantkarokörpers auf der Hakenplattenunterseite der Bügelfibel aus Grab 1039.

8.3 Goldgewebe

Goldgewebe nehmen allein schon wegen des Materialwerts und der aufwendigen Herstellungstechnik eine herausragende Stellung unter den frühmittelalterlichen Textilfunden ein (Banck-Burgess 1997: 376; Stauffer/Weisse 1998: 734). An zwei unterschiedlichen Goldgeweben aus Lauchheim sollte überprüft werden, inwieweit die CT geeignet ist, diese besonderen Textilien zu analysieren. Hierbei handelt es sich um sechs einzeln vorliegende Fadenfragmente aus Grab 200 und um insgesamt 28 kleine Textilfragmente aus Grab 795 mit zum Teil noch anhaftender Erde und stark abgebauten organischen Resten. Um eine möglichst hohe Auflösung zu erreichen, wurden die Fadenfragmente aus Grab 200 und exemplarisch zwei Gewebereste aus Grab 795 mit der Sub- μ -RCT gemessen. Die erzielten Auflösungen lagen zwischen 5 und 16 μ m.

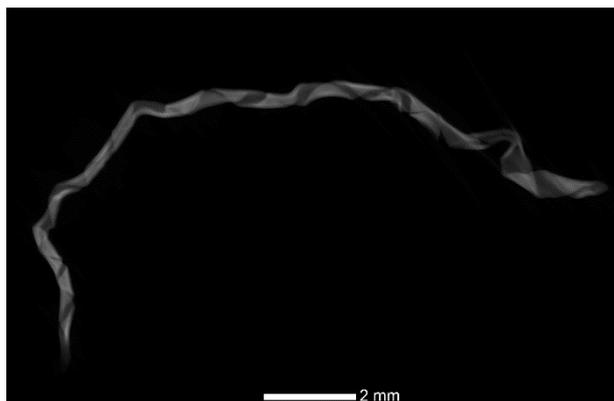


Abb. 8.6: Mehrere übereinander gelegte frontale Sub- μ -RCT-Schnittbilder eines Goldfadenfragments aus Grab 200.

Im Fall der Fadenfragmente ließen sich die textiltechnologischen relevanten Daten in den Schnittbildern ermitteln (Abb. 8.6). Die Länge der Fragmente aus ungleichmäßig S-tordierten Goldstreifen liegt zwischen 8 und 67,5 mm, der Durchmesser variiert zwischen 0,31 und 0,45 mm. Auf einer Länge von 5 mm konnten zwischen vier bis sechs Windungen der Goldfolie festgestellt werden, das selbst eine Breite von 0,55 bis 0,84 mm und eine Materialstärke von 0,05 mm aufweist. Die

angegebenen Maße variieren hier auch innerhalb der untersuchten Fäden, abschnittsweise sind diese flachgedrückt.

Das extrem feine Gewebe aus Grab 795 wurde bereits eingehend von Raub/Weiss (1994) sowie Stauffer/Weisse (1998) mikroskopisch und im REM analysiert und beschrieben. Elementanalysen der Goldfolie mittels EDX und eine metallographische Analyse an einem Anschliff ergaben, dass es sich um reines Gold handelt, in dem keine weiteren Legierungselemente nachgewiesen werden konnten. Das grobkörnige Gefüge weist auf eine starke Verformung und starkes Glühen bei der Herstellung hin (Raub/Weiss 1994: 219).

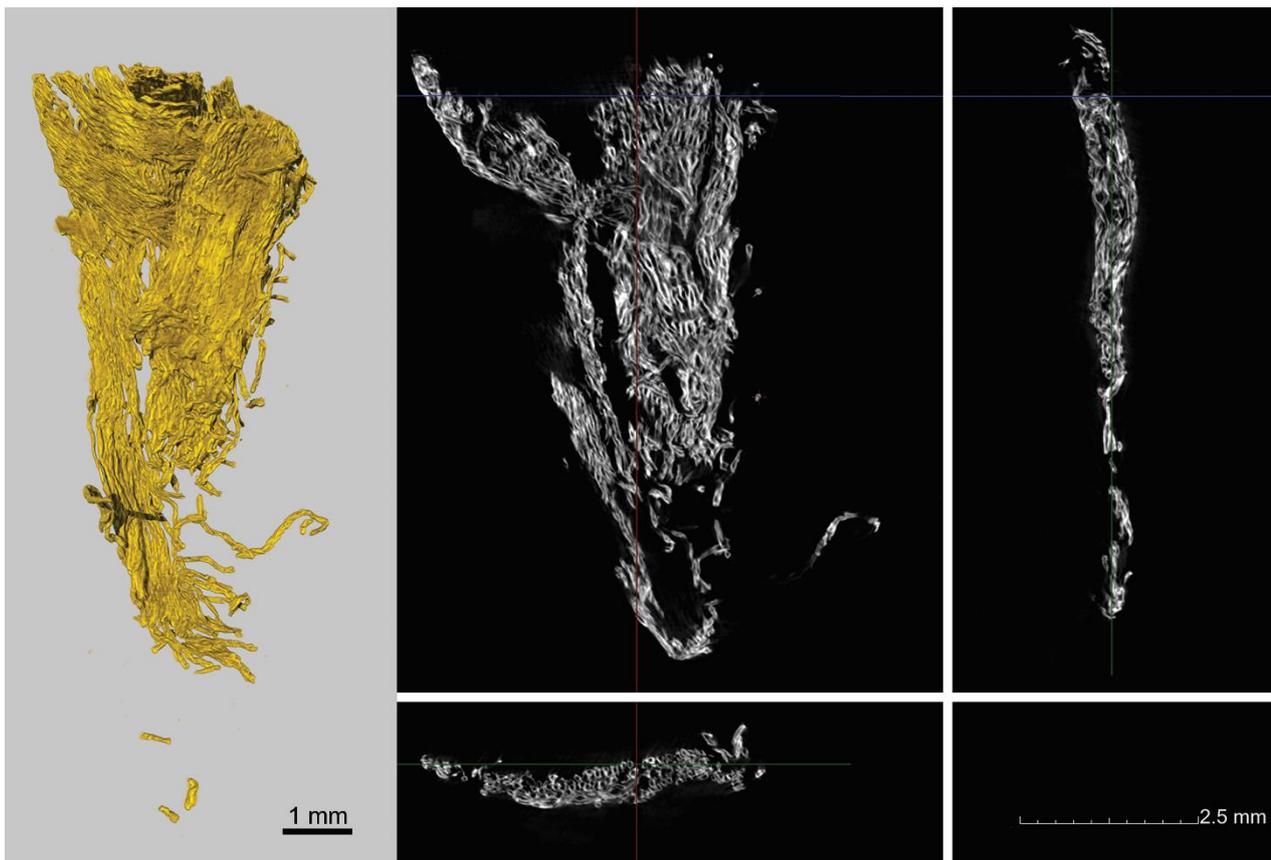


Abb. 8.7: Dreidimensionale Sub- μ -RCT-Darstellung (links) und Sub- μ -RCT-Schnittbilder (rechts) eines Fragments des Goldgewebes aus Grab 795.

Die Untersuchung der tomographierten Gewebefragmente bestätigt die bereits durchgeführten textiltechnologischen Analysen. Es handelt sich um eine Wirkerei, in der die Goldfäden als Schussfäden fungierten. Die hohe Dichte der Goldfäden von 16 Fäden auf 1 mm hat zur Folge, dass sich eine geschlossene goldene Oberfläche bildet (Abb. 8.7). Die einzelnen Fäden haben einen Durchmesser von ungefähr 0,08 mm und bestehen aus einer gleichmäßig überlappenden, in Z-Richtung tordierten Goldfolie. Es konnten vier bis fünf Windungen der Goldfolie festgestellt werden. Die Breite der Goldfolien liegt bei etwa 0,08 mm. Deren Stärke kann hier lediglich auf unter zehn μ m geschätzt werden, eine genauere Angabe ist aufgrund der zu geringen Auflösung und dem Über-

strahlen des dichten Materials in benachbarte Bereiche nicht möglich. Die mikroskopische Untersuchung an einem Feinschliff ergab hier eine Materialstärke von 1 bis 3 μm (Raub/Weiss 1994: 217).

Organische Reste des Seelfadens sind bei beiden hier untersuchten Goldgeweben nicht erhalten und wären anhand der Sub- μ -RCT aufgrund der abweichenden Materialdichte zu der Goldfolie wohl nur schwer nachzuweisen. Die von Stauffer/Weisse (1998: 733) als Boluspaste zur Fixierung der Goldfolie interpretierten rötlichen Ablagerungen auf der Innenseite der Goldfolie, in denen Eisen bestimmt werden konnte, sind hier nicht nachweisbar. Trotz gewisser Einschränkungen verdeutlichen diese Ergebnisse, dass eine textiltechnologische Analyse solch feiner Metallarbeiten anhand der CT möglich ist, ohne die Fäden freipräparieren oder Querschnitte anfertigen zu müssen.

9 Schlussbetrachtung

Bereits mehrfach wurde die RCT zur Untersuchung von Blockbergungen eingesetzt, die anschließend manuell freigelegt wurden (Jansen et al. 2006; O`Connor et al. 2008; Re et al. 2015). Die Methode kann hierbei Hinweise zur Lokalisierung der Objekte und für konservatorische Maßnahmen wie der Stabilisierung gefährdeter Bereiche liefern. Die Überprüfung der μ -RCT innerhalb dieser Arbeit zeigt zudem, dass diese sich auch für eine wissenschaftliche Ansprache der Funde in Blockbergungen eignet, die anschließend nicht freigelegt werden. Eine genaue Materialbestimmung über die μ -RCT ist zwar nicht gegeben, in den meisten Fällen lassen sich jedoch anhand der unterschiedlich starken Schwächung, der materialspezifischen Strukturen sowie der Form und Funktion des Objekts Rückschlüsse auf das Material ziehen. Anhand von Vergleichsfunden und der Zuhilfenahme der Grabungsdokumentation ist zumeist eine allgemeine Ansprache möglich. So lassen sich die wichtigsten Materialien bestimmen, aus denen frühmittelalterlichen Objekte gefertigt sind. Nur in Ausnahmefällen ist eine Öffnung der Blockbergung erforderlich, um nähere Informationen zu erhalten. Dies ist der Fall, wenn anhand des Grauwertes keine Aussage möglich ist, keine charakteristische Form vorliegt oder innere Strukturen nicht sichtbar sind. Ein weiterer Aspekt ist die Farbgebung, die etwa im Fall von Mineralien, Glas und Keramik von Bedeutung ist. Diese kann nicht über die μ -RCT ermittelt werden.

Abzuwarten bleibt, inwiefern sich weitere methodische Ansätze und Entwicklungen etwa im Bereich der Dual-Energy-CT (Nachtrab et al. 2011) oder bei der Kombination unterschiedlicher computertomographischer Verfahren auf die Materialbestimmung in Blockbergungen übertragen lassen. Aufgrund der Materialvielfalt, der Inhomogenität und unterschiedlichen Erhaltungszustände archäologischer Objekte besteht hier jedoch eine besondere Schwierigkeit für die Materialbestimmung (Ketcham/Carlson 2001: 389; Gostner et al. 2011).

Für die typologische Ansprache lässt sich die Form der Objekte durch das Segmentieren der entsprechenden Bereiche in den CT-Daten dreidimensional darstellen, durch Falschfarben lassen sich die unterschiedlichen Materialien voneinander abgrenzen. Neben der Objektform können so auch

Details der Oberfläche visualisiert werden. Zudem können fragmentierte Objekte rekonstruiert werden, wenn sie nicht zu feinteilig zerbrochen sind. In solchen Fällen ist das digitale Zusammenfügen der Bruchstücke zeitaufwendiger als eine manuelle Freilegung und Restaurierung. Zum Teil lassen sich feinteilig zerbrochene Objekte aber auch dokumentieren und typologisch einordnen, wenn sie nicht segmentiert vorliegen.

Entscheidenden Einfluss auf die Identifizierung und Dokumentation der Objekte, die Erfassung metrischer Merkmale sowie die Darstellung innerer Strukturen und Oberflächen hat die Qualität der Messungen. Maßgebend hierfür sind vor allem die Auflösung und der Kontrast, welche durch Faktoren wie den Durchmesser der Blockbergung, die enthaltenen Materialien und deren Erhaltungszustand, die Bodenbeschaffenheit sowie die verwendete CT-Anlage beeinflusst wird. Direkt auf der Ausgrabung können die zu erreichende Auflösung und der Kontrast dadurch beeinflusst werden, eine Blockbergung möglichst schmal und flach anzulegen, um so zum einen den Durchmesser klein zu halten und um zum anderen die Schwächung der Strahlung durch die enthaltene Erde und Steine zu begrenzen. Neben der verwendeten Anlage sind für die Qualität einer Messung insbesondere die Messparameter und die angewendeten Algorithmen zur Rekonstruktion der Daten von Bedeutung. Aufgrund der Vielfalt an unterschiedlichen Materialien und Erhaltungszuständen archäologischer Objekte gestaltet es sich jedoch schwer, hier generelle Regeln für die Erfassung von Merkmalen zu formulieren. Zudem können auftretende Artefakte die Qualität der Daten beeinträchtigen und die Oberflächendarstellung erschweren. Neben Artefakten macht der Erhaltungszustand und ein zu geringer Grauwertunterschied zur Umgebung in den meisten Fällen eine Nachbearbeitung durch manuelles Segmentieren notwendig, da die Freistellung allein über die Grauwerte zu einer verfälschten Darstellung der Oberfläche und somit womöglich zu Fehlinterpretationen führen kann.

Die Methode erlaubt es, neben der Objektansprache auch die Lage, die Ausrichtung und die stratigraphische Abfolge der Funde in den Blockbergungen zu erfassen, darzustellen und zu dokumentieren. Dadurch lassen sich Informationen gewinnen, die für die archäologische Forschung in zunehmendem Maße von Bedeutung sind (Brather 2013: 219). Unter bestimmten Voraussetzungen können etwa Rückschlüsse auf den Bestattungsvorgang gewonnen werden.

Die Ansprache und Dokumentation der stratigraphischen Abfolge organischer Materialien ist anhand der μ -RCT ebenfalls möglich, wenn der Erhaltungszustand und die Qualität der Messung ausreichend sind. Die Gegenwart dichter Metalle wie Silber oder Bronze kann hier jedoch zu Einschränkungen führen. Aufgrund von Artefakten, die durch Materialien hoher Dichte verursacht werden, oder wegen der Überschreitung des dynamischen Bereichs des Detektors kann das weniger dichte organische Material in der direkten Umgebung solcher Objekte nicht identifizierbar sein.

Eine Alternative kann in solchen Fällen die NCT darstellen, die oft komplementär zur RCT eingesetzt wird, da sich hiermit vor allem organische Materialien gut dargestellt lassen. Die Methode eignet sich zur Untersuchung von Organik, welche sich an Objekten aus dichtem Metall erhalten

hat, wenn diese bereits geborgen sind oder wenn sich diese in kleinen Blockbergungen befinden. Das enthaltene Wasser in Gips und Erde wirkt sich nachteilig aus, da es die Neutronen zu stark schwächt, als dass sie größere Blockbergungen durchdringen könnten. In Zukunft könnte überprüft werden, ob die Verwendung von gipsfreien Binden aus der Medizin eine Möglichkeit ist, die Schwächung der Neutronen zu verringern. Eine interessante Perspektive für die Untersuchung von organischem Material an Metallobjekten könnte sich durch die Kombination von Röntgenstrahlung und Neutronen ergeben, die bereits für die Visualisierung von organischen und anorganischen Bestandteilen eines Altarsteines (Mannes et al. 2014) und eines Schwertes (Schmidt-Ott et al. 2014) Anwendung fand.

Die μ -RCT bietet sich aufgrund der erreichbaren Auflösung für eine Vielzahl von Funden als Untersuchungsmethode an, um weitere Informationen über die Objektansprache sowie stratigraphische Position und Ausrichtung der Funde in Blockbergungen hinaus zu erlangen. Zumeist sind es innere Strukturen, welche durch die μ -RCT weitere Rückschlüsse zulassen – zum Beispiel auf die Herstellungstechnik oder spezifische Aussagen zum vorliegenden Material. Voraussetzung hierfür ist eine entsprechend gute Visualisierung, die etwa durch Detailmessungen ausgewählter Bereiche erreicht werden kann. In bestimmten Fällen müssen Objekte allerdings aus den Blockbergungen und somit aus dem Fundzusammenhang entnommen werden, um eine ausreichende Qualität zu erzielen. Für bereits geborgene Objekte bietet sich die μ -RCT gleichermaßen an, um bestimmte Fragestellungen etwa zur Materialbestimmung, Datierung, Konstruktion und zur Identifizierung von Oberflächen- oder herstellungstechnischen Details weiter zu verfolgen. Anhand der μ -RCT können auch sehr stark korrodierte Objekte dokumentiert werden. Mit der Sub- μ -RCT lassen sich noch höhere Auflösungen für die Untersuchung kleinerer Objekte erzielen. So konnte in dieser Arbeit beispielsweise ein außergewöhnlich feines Goldgewebe analysiert werden.

Die Ergebnisse der 105 untersuchten Spathen zeigen, dass sich die μ -RCT eignet, um neben den gängigen formalen und metrischen Merkmalen einer Spatha die Merkmalsbasis erheblich zu erweitern. Insbesondere die Visualisierung des Klingenaufbaus und der Schweißmusterverzierung liefert Informationen, die in diesem Umfang und vergleichbarer Qualität bisher nicht erfasst werden konnten. Ein bislang nicht gelöstes technisches Problem ergibt sich aus der Form der Klinge, die aufgrund von Strahlaufhärtung zu einem Artefakt führt, das die Interpretation der Daten erschweren kann.

Ebenfalls können an Bronzeobjekten Hinweise auf das vorliegende Material oder den Herstellungsprozess betreffende Informationen gewonnen werden. Jedoch waren selbst mit der Sub- μ -RCT die Auflösungen nicht ausreichend, um genauere Aussagen zur Legierung und zu dem Metallgefüge treffen zu können. Die genaue Elementverteilung einer Legierung und die metallographischen Phasen konnten nur über eine Beprobung und analytische Verfahren sowie mikroskopische metallographische Analysen an Feinschliffen gewonnen werden. Weitere Untersuchungen könnten hier möglicherweise Klarheit bringen, ob anhand der CT eine Unterscheidung unterschiedlicher Gefüge

möglich ist. Dies könnte beispielsweise bei den hier untersuchten hochlegierten Zinnbronzen Rückschlüsse auf den Herstellungsprozess und auch auf die Legierungszusammensetzung zulassen. Auch organische Objekte lassen sich über die μ -RCT detailliert untersuchen, wie dies die Messungen an Funden aus Textil und Holz zeigen. Gerade der Untersuchung von archäologischem Holz kommt hier aufgrund der zu erzielenden Informationen eine große Bedeutung zu. Insbesondere die Dendrochronologie ist eine wichtige Methode zur Datierung und Herkunftsbestimmung, setzt aber in herkömmlicher Weise zumeist einen großen Eingriff in das Objekt voraus. Mit der μ -RCT steht eine nichtinvasive Untersuchungsmethode zur Erfassung der Jahrringbreiten zur Verfügung, und auch die für die Datierung notwendige Holzartenbestimmung ist mit dieser Methode möglich. Überprüft werden konnte die Methode in zwei speziellen Fällen: zum einen an Holz, das mit der umgebenden Erde und anderen Objekten in Blockbergungen gesichert wurde, und zum anderen an Holz, welches sich durch Mineralisierung an Eisenobjekten erhalten hat. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Holzartenbestimmung auch in Blockbergungen unter bestimmten Voraussetzungen möglich ist und die Jahrringbreiten messbar sind. Abhängig sind die Ergebnisse von der erzielten Auflösung und dem Kontrast einer Messung, was von den Eigenschaften der verwendeten Anlage, der Holzart und der Objektgröße bestimmt wird.

Innerhalb dieser Arbeit konnten nicht alle Materialgruppen berücksichtigt werden. So war es nicht möglich, weiterführende Analysen zu Material und Herstellungstechnik an Keramik- oder Glasobjekten durchzuführen. Welche Informationen sich anhand der μ -RCT an Keramikobjekten gewinnen lassen, wurde etwa von Dammers et al. (2012), Kahl/Ramminger (2012) und Karl et al. (2013) beschrieben, für Glasperlen von Bretini et al. (2014). Die RCT wurde ebenso erfolgreich zur Untersuchung des Inhalts von Keramikurnen eingesetzt (Andersen/Fell 1995; Minozzi et al. 2010; Harvig/Lynnerup 2013).

Insgesamt hat sich der Einsatz der RCT für die Aufarbeitung der Blockbergungen und weiteren Objekte, wie der Spathen des Gräberfeldes Lauchheim „Wasserfurche“ bewährt und als erfolgreich erwiesen. So war es innerhalb des vorgegebenen Zeitrahmens von sechs Jahren möglich, 283 Blockbergungen und 105 Spathen zu untersuchen und zu dokumentieren. 22 Blockbergungen mit einzeln geborgenen, stark fragmentierten Schildbuckeln oder Glas- und Keramikgefäßen wurden auf herkömmliche Weise manuell bearbeitet.

Der zeitliche Aufwand für die Untersuchung und Dokumentation ergibt sich aus der notwendigen Anzahl der Messungen, von denen jede etwa eine Stunde dauert, der anschließenden Rekonstruktion, der Registrierung und Zusammenführung der Datensätze sowie der anschließenden Analyse und Dokumentation. Je nach Komplexität der Blockbergung bzw. des Spatha- oder Objektaufbaus ist dieser Ablauf in mehreren Tagen zu bewältigen. Die wissenschaftliche Vorlage ist hierdurch sehr viel schneller möglich als bei einer herkömmlichen Freilegung und Restaurierung. Den angesprochenen Einschränkungen, die etwa die Materialerkennung, die Farbgebung und die Darstellung

schwach absorbierender Materialien betreffen, stehen Informationen gegenüber, die durch die herkömmliche Bearbeitung nicht gewonnen werden können. Zu nennen sind hier etwa der Objektaufbau, materialspezifische Merkmale oder herstellungstechnische Details. Zudem ist ein Öffnen der Blockbergungen unter bestimmten Fragestellungen nach wie vor möglich und Ergebnisse können auf diese Weise gegebenenfalls überprüft und erweitert werden.

Abschließend sollte darauf hingewiesen werden, dass ein kritischer Umgang mit der Methode dennoch angebracht ist. Die Auswertung und auch die Bearbeitung der CT-Daten ist der subjektiven Wahrnehmung des Bearbeiters unterworfen. Eine Fragestellung hinsichtlich der Bearbeitung der Daten wäre in Zukunft, inwieweit Schritte in Richtung einer automatisierten Auswertung beispielsweise anhand automatischer Segmentieralgorithmen möglich sind. Bei der Auswertung der Daten ist auf die notwendige interdisziplinäre Zusammenarbeit hinzuweisen, ohne die umfangreiche Ergebnisse nicht gewonnen werden können. Ein weiterer Aspekt ergibt sich aus dem Datenumfang der Messungen und deren Langzeiterhaltung sowie der zukünftigen Lesbarkeit der bearbeiteten Datensätze, die bislang nicht gegeben ist. Eine weitere Aufgabe für die Zukunft besteht darin, eine geeignete digitale Publikationsform zu finden, um die Nachvollziehbarkeit der gewonnenen Ergebnisse zu gewährleisten und darüber hinaus die Möglichkeiten der dreidimensionalen Darstellung auszuschöpfen. Ein Beispiel für eine mögliche Umsetzung ist die interaktive Nespos-Datenbank zur Erforschung des Neandertalers (Gröning et al. 2007).

Zu beachten ist, dass anhand der Methode eine Freilegung und Restaurierung der Objekte, mit Ausnahme der genannten Beispiele, nicht notwendig und somit eine Dokumentation der Objekte in ihrem aktuellen Zustand gegeben ist. Die Objekte sind aber nach wie vor konservatorisch nicht bearbeitet. Die nicht freigelegten Blockbergungen und die nicht konservierten Objekte werden zwar weiterhin bei -20 °C gelagert, was die Korrosion von zum Beispiel Eisenobjekten und den Abbau organischer Materialien zwar erheblich verlangsamt, aber nicht verhindert (Rodgers 2004: 165; Kuhn/Eggert 2011). Die erhobenen Daten dokumentieren den aktuellen Erhaltungszustand und können in Zukunft als Vergleich dienen, um zu überprüfen, inwiefern sich der Zustand der Objekte verändert. Es bedarf jedoch weiterer Maßnahmen und Forschung, inwiefern die Objekte in den Blockbergungen in ihrer originalen Fundsituation dauerhaft bewahrt werden können.

10 Literatur

Amirkhanov 2012

A. Amirkhanov, Visualization of Industrial 3DXCT Data, Dissertation (Wien 2012).

Andersen/Fell 1995;

T. Anderson/C. Fell, Analysis of Roman cremation vessels by computerized tomography. *Journal of Archaeological Science* 22, 1995, 609–617.

Anke 1998

B. Anke, Studien zur reiternomadischen Kultur des 4. bis 5. Jahrhunderts. In: Beiträge zur Ur- und Frühgeschichte Mitteleuropas Band 8 (Weißbach 1998).

Anstee/Biek 1961

J. W. Anstee/L. Biek, A study in pattern-welding. *Medieval Archaeology* 5, 1961, 71–93.

Baillie/Pilcher

M. G. Baillie/J. R. Pilcher, A simple crossdating program for tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin* 33, 1973, 7–14.

Banhart 2008a

J. Banhart, Basic Concepts, Introduction. In: J. Banhart (Hrsg.), *Advanced Tomographic Methods in Materials Research and Engineering* (New York 2008) 3–18.

Banhart 2008b

J. Banhart, Basic Concepts, Radiation sources and interaction of radiation with matter. In: J. Banhart (Hrsg.), *Advanced Tomographic Methods in Materials Research and Engineering* (New York 2008) 107–138.

Banck 1998

J. Banck, Ein merowingerzeitlicher Baumsarg aus Lauchheim/ Ostalbkreis - Zur Bergung und Dokumentation der Textilfunde. In: L. Bender Jørgensen/C. Rinaldo (Hrsg.), *Textiles in European Archaeology, NESAT Symposium Borås 1996* (Göteborg 1998) 115–124.

Banck-Burgess 1997

J. Banck-Burgess, An Webstuhl und Webrahmen. Alamannisches Textilhandwerk. In: K. Fuchs/M. Kempa/R. Redies (Hrsg.), *Die Alamannen* (Stuttgart 1997) 371–378.

Banck-Burgess 2009

J. Banck-Burgess, Textilarchäologische Kleiderforschung in der Ur- und Frühgeschichte. Zum Potential von Feuchtbodenfunden. In: J. Biel/J. Heiligmann/D. Krause (Hrsg.), *Landesarchäologie. Festschrift für Dieter Planck zum 65. Geburtstag. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg* 100 (Stuttgart 2009) 641–653.

Banck-Burgess 2010

J. Banck-Burgess, Zur Auswertung stark zersetzter Organik (Artefakte und Ökofakte) am Beispiel eines frühmittelalterlichen Grabbefundes, In: J. Maik (Hrsg.), *Fasciculi Archaeologiae Historicae*, 23 (Lodz 2010) 19–24.

Barton 1977

C. F. Barton, Computerized axial tomography for neutron radiography of nuclear fuel. *Transactions of the American Nuclear Society* 9, 1977, 212-213.

Bartz/Meißner 2000

D. Bartz/M. Meißner, Voxels versus Polygons: A Comparative Approach for Volume Graphics. In: M. Chen/A.E. Kaufman/R. Yagel (Hrsg.), *Volume Graphics* (London 2000) 171–184.

Bente et al. 2015

K. Bente/A. König/D. Dehn/P. Krüger/R. Wirth/D. Hirsch/R. Münster/C. Berthold, Vergleichende computertomografische und elektronenmikroskopische Studien zu eisenzeitlicher Korallenzier. In: T. Gluhak/S. Greiff/K. Kraus/M. Prange (Hrsg.), Archäometrie und Denkmalpflege 2015, Metalla Sonderheft 7 (Bochum 2015) 59–61.

Berdondini et al. 2011

A. Berdondini/R. Brancaccio/V. D'Errico/A. Miceli/M. Bettuzzi/F. Casali/M. P. Morigi/M. Senn/A. Fleisch, The Use of Industrial Computed Tomography in the Study of Archaeological Finds. In: I. Turbanti-Memmi (Hrsg.), Proceedings of the 37th International Symposium on Archaeometry, 13th–16th May 2008, Siena, Italy (Heidelberg 2011) 575–578.

Berg 2010

I. Berg, Visualisierung von Computertomografien (CT) in der archäologischen Forschung. Einsatz von VG Studio MAX 2.0. *Restauro* 116, 2010, 242–244.

Berger/Pfeiffer-Schäller 2005;

U. Berger/I. Pfeiffer-Schäller, Rapid-Prototyping in der zerstörungsfreien Archäologie. *Horizonte* 27, 2005, 3–7.

Berger et al. 2013

D. Berger/K. Hunger/S. Bolliger-Schreyer/D. Grolimund/S. Hartmann/J. Hovind/F. Mueller/E. H. Lehmann/P. Vontobel/M. Woerle, New insights into the manufacturing process and decoration technique of the axe from Thun-Renzenbühl. *Antiquaries Journal* 93, 2013, 1–29.

Bergmann et al. 2006

R. B. Bergmann/F. T. Bessler/W. Bauer, Non-Destructive Testing in the Automotive Supply Industry. Requirements, Trends and Examples Using X-Ray CT. *ECNDT*, 2006, <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Th.1.6.1.pdf>. (30.09.2015).

Bertholon 2001

R. Bertholon, The Original Surface of Corroded Metallic Archaeological Objects: Characterization and Location. *La Revue de Métallurgie* 9, 2001, 817–823.

Bertini et al. 2014a

M. Bertini/A. D. Ball/C. Mellish/L. Burgio/B. Shah/B. Pretzel/V. Blagoderov/T. Goral/D. Sykes/R. Summerfield/D. C. Steart/R. J. Garwood/A. R. T. Spencer/A. Ross/D. Penney, Conservation vs investigation of amber: A risk assessment to determine whether amber is altered by micro-CT or confocal microscopy studies. Society for the Preservation of Natural History Collections (SPNHC), Cardiff, 2014, Poster, http://artspencer.uk/wp-content/uploads/2014/09/SPNHC_2014_Poster.pdf. (30.09.2015).

Bertini et al. 2014b

M. Bertini/R. Mokso/E. M. Krupp, Unwinding the spiral: discovering the manufacturing method of Iron Age Scottish glass beads. *Journal of Archaeological Science*. 43, 2014, 256–266.

Biel/Klonk 1998

J. Biel/D. Klonk, *Handbuch der Grabungstechnik* (Stuttgart 1998).

Bill et al. 2012

J. Bill/K. S. Dalen/A. Daly/Ø. Johnsen, DendroCT – Dendrochronology without damage. *Dendrochronologia*, 30, 2012, 223–230.

Billamboz/Becker 2001

A. Billamboz/B. Becker, Die frühmittelalterlichen Grabkammern von Lauchheim im dendrochronologischen Datennetz Südwestdeutschlands. *Fundberichte aus Baden-Württemberg* 25, 2001, 831–870.

Billamboz 2008

A. Billamboz, Stand der Dendrochronologie der Eisenzeit nördlich der Alpen mit neuen Daten aus der Heuneburg ‚Vorbürg‘. In: D.L. Krause (Hrsg.), *Frühe Zentralisierungs- Urbanisierungsprozesse. Zur Genese und Entwicklung frühkeltischer Fürstensitze und ihres territorialen Umlandes. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg* 101 (Stuttgart 2008) 229–248.

Bird et al. 2008

M. I. Bird/P. L. Ascough/I. M. Young/C. V. Wood/A. C. Scott, X-ray microtomographic imaging of charcoal. *Journal of Archaeological Science* 35, 2008, 2698–2706.

Blumer et al. 2005

R.-D. Blumer/J. Butenuth/B. Nowak- Böck/C. Peek, Dokumentation und Inventarisierung. Neue Einsatzmöglichkeiten digitaler Medien in der Archäologischen Denkmalpflege. *Denkmalpflege in Baden-Württemberg – Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege* 34, 2005, 29–36.

Böhne/Dannheimer 1961

C. Böhne/H. Dannheimer, Studien an Wurmbuntklingen des frühen Mittelalters. *Bayerische Vorgesichtsblätter* 26, 1961, 107–122.

Born 1994

H. Born, Terminologie und Interpretation von Tauschierarbeiten in der altvorderasiatischen, altägyptischen und alteuropäischen Metallkunst, In: W. Menghin (Hrsg.), *Tauschierarbeiten der Merowingerzeit* (Berlin 1994) 72–81.

Bozzini et al. 2014

B. Bozzini/A. Gianoncelli/C. Mele/A. Siciliano/L. Mancini, Electrochemical reconstruction of a heavily corroded Tarentum hemiobolus silver coin: a study based on microfocus X-ray computed microtomography. *Journal of Archaeological Science* 52, 2014, 24–30.

Brather 2007

S. Brather, Von der „Tracht“ zur „Kleidung“. Neue Fragestellungen und Konzepte in der Archäologie des Mittelalters. *Zeitschrift für Archäologie des Mittelalters* 35, 2007, 185–206.

Brather 2013

S. Brather, Deponierung im Grab. Neue Perspektiven der Frühmittelalterarchäologie. In: S. Brather & D.L. Krause (Hrsg.), *Fundmassen. Innovative Strategien zur Auswertung frühmittelalterlicher Quellenbestände. Materialhefte zur Archäologie in Baden-Württemberg* 97, 2013, 219–232.

Brepohl 2003

E. Brepohl, *Theorie und Praxis des Goldschmieds* (München, Wien ¹⁵2003).

Brunke 2008

O. Brunke, Mit nanoCT verborgene Mikrostrukturen dreidimensional analysieren. In: J. Kastner (Hrsg.), *Proceedings Industrielle Computertomografie, Fachtagung Wels, Austria*. (Aachen 2008) 65–70.

Buchta-Hohm et al. 1992

S. Buchta-Hohm/P. Hoffmann/B. Sasse Tateo, Zur Farbgebung merowingerzeitlicher Glasperlen: optische Farbklassifikation und Bestimmung der farbgebenden Komponenten mit Hilfe der zerstörungsfreien Röntgenfluoreszenzanalyse am Beispiel der Friedhöfe von Donaueschingen und Eichstetten. *Archäologisches Korrespondenzblatt* 22, 1992, 267–278.

Burstein/Bossi 1990

P. Burstein/R. H. Bossi, A Guide to Computed Tomography System Specifications. WRDC-TR-90-4026, 1990, <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA229998>. (30.09.2015).

Buzug 2008

T. Buzug, *Computed Tomography: From Photon Statistics to Modern Cone Beam CT* (Berlin 2008).

Carmignato 2012

S. Carmignato, Accuracy of industrial computed tomography measurements: Experimental results from an international comparison. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 61, 2012, 491–494.

Casali 2006

F. Casali, X-ray and neutron digital radiography and computed tomography for cultural heritage. In: D. Bradley/D. Creagh (Hrsg.) *Physical Techniques in the Study of Art, Archaeology and Cultural Heritage*, Volume 1, (Amsterdam 2006) 41–123.

Christlein 1978

R. Christlein, *Die Alamannen. Archäologie eines lebendigen Volkes* (Stuttgart, Aalen 1978).

Conroy/Vannier 1984

G. C. Conroy/M. W. Vannier, Noninvasive three-dimensional computer imaging of matrix-filled fossil skulls by high-resolution computed tomography. *Science* 226, 1984, 456–458.

Cormack 1963

A.M. Cormack, Representation of functions by its line integrals with some radiological applications. *Journal of Applied Physics* 34, 1963, 2722–2732.

Craddock 1985

P. T. Craddock, Three thousand years of copper alloys: from the Bronze Age to the industrial revolution. In: P. England/L. van Zelst (Hrsg.), *Application of Science in Examination of Works of Art* (Boston 1985) 59–67.

Cronyn 1990

J. M. Cronyn, *The Elements of Archaeological Conservation* (London 1990).

Dammers et al. 2012

B. Dammers/A. Franz/R. G. Sobott/K. Bente, Erste archäometrische Ergebnisse zur mittel- und spätneolithischen Keramik von Uivar (Rumänien) unter besonderer Berücksichtigung der 3D- μ -Röntgen-Computertomographie. In: B. Ramminger/O. Stilborg (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Analysen vor- und frühgeschichtlicher Keramik I: Methoden, Anwendungsbereiche, Auswertungsmöglichkeiten*. *Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie* 216 (Bonn 2012) 33–57.

Deschler-Erb et al. 2004

E. Deschler-Erb/E. H. Lehmann/L. Pernet/P. Vontobel/S. Hartmann, The complementary use of neutrons and X-rays for the non-destructive investigation of archaeological objects from Swiss collections. *Archaeometry* 46, 2004, 647–661.

Diethelm 1994

I. Diethelm, Gemmologie: eine Nachbarwissenschaft der Archäologie. In: Jahrbuch der Schweizerischen Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte 77 (Basel 1994) 155–157.

Drauschke/Banerjee 2007

J. Drauschke/A. Banerjee, Zur Identifikation, Herkunft und Verarbeitung von Elfenbein in der Merowingerzeit. Archäologisches Korrespondenzblatt 37, 2007, 109–128.

Dreossi et al. 2009

D. Dreossi/S. Favretto/M. Fioravanti/L. Mancini/ L. Rigon/N. Sodini/G. Tromba/F. Zanini, Synchrotron radiation micro-tomography: a non-invasive tool for the characterization of archaeological wood. In: L. Uzielli (Hrsg.), Wood Science for Conservation of Cultural Heritage (Florenz 2009) 34–39.

Ebinger-Rist et al. 2009

N. Ebinger-Rist/C. Peek/J. Stelzner, Gräber im virtuellen Flug erfasst. Kann die 3D-Computertomografie bei der Auswertung des frühmittelalterlichen Gräberfeldes von Lauchheim helfen? Denkmalpflege in Baden-Württemberg – Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege 38, 2009, 165–170.

Ebinger-Rist et al. 2011

N. Ebinger-Rist/C. Peek/J. Stelzner/F. Gauß, Computed tomography: a powerful tool for non-destructive mass documentation of archaeological metals. In: P. Mardikian/C. Chemello/C. Watters/P. Hull (Hrsg.), Metal 2010 (Charleston 2011) 342–347.

Ebinger-Rist/Stelzner 2013

N. Ebinger-Rist/J. Stelzner, Computertomografie trifft Fundmassen: Innovative Technik zur Freilegung und Auswertung des bedeutendsten frühmittelalterlichen Gräberfeldes Südwestdeutschlands. In: S. Brather/D. L. Krause (Hrsg.), Fundmassen. Innovative Strategien zur Auswertung frühmittelalterlicher Quellenbestände. Materialhefte zur Archäologie in Baden-Württemberg 97, 2013, 87–96.

Ehrenreich et al. 2005

R. M. Ehrenreich/E. Hamilton/S. K. Nash, Far from Barbaric: re-assessing the sophistication of Merovingian metalworking. JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society 57, 51–55.

Emmerling 1972

J. Emmerling, Technologische Untersuchungen an eisernen Bodenfunden. Alt-Thüringen 12, 1972, 267–320.

Entacher et al. 2007

K. Entacher/D. Planitzer/A. Uhl, Towards an automated generation of tree ring profiles from CT-images. In: M. Petrou/T. Saramäki/A. Ercil/S. Lončarić (Hrsg.) Proceedings of the 5th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis. IEEE (2007) 174–179.

Eska et al. 2014

M. Eska/N. Ebinger-Rist/G. Eggert, Size, shape and distribution: Analysing the production of glass objects by XCT of gas bubbles. In: J. Bridgland (Hrsg.), Preprints, 17th Triennial Meeting, Melbourne, ICOM Committee for Conservation (Paris 2014) Poster 0507.

Farges 1998

F. Farges, Mineralogy of the Louvres Merovingian garnet cloisonné jewelry: Origins of the gems of the first kings of France. American Mineralogist 83, 1998, 323–330.

Feldkamp et al. 1984

L. A. Feldkamp/L. C. Davis/J. W. Kress, Practical cone-beam algorithm. Journal of the Optical Society of America A 1, 1984, 612–619.

Fischer 1997

A. Fischer, Reste von organischen Materialien an Bodenfunden aus Metall - Identifizierung und Erhaltung für die archäologische Forschung. In: K.-W. Bachmann (Hrsg.), Schriftenreihe des Instituts für Museumskunde an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste 13 (Stuttgart 1997).

Flisch et al. 2010

A. Flisch/J. Hofmann/I. Jerjen/P. Schütz/P. Hanimann, Einfluss wichtiger Kenngrößen auf die Messunsicherheit bei der Datenerfassung mit Computertomographie. In: J. Kastner (Hrsg.), Proceedings Industrielle Computertomografie, Fachtagung Wels, Austria. (Aachen 2010) 145–154.

Flisch et al. 2012

A. Flisch/P. Schuetz/I. Jerjen/T. A. Lüthi, Influence of focal spot size of 450 kV X-ray tubes on spatial resolution of CT images. In: J. Kastner (Hrsg.), Proceedings Industrielle Computertomografie, Fachtagung Wels, Austria. (Aachen 2012) 113–114.

Freeth et al. 2006;

T. Freeth/Y. Bitsakis/X. Moussas/J. H. Seiradakis/A. Tselikas/H. Mangou/M. Zafeiropoulou/R. Hadland/D. Bate/A. Ramsey/M. Allen/A. Crawley/P. Hockley/T. Malzbender/D. Gelb/W. Ambrisco/M. G. Edmunds, Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism. *Nature* 444, 2006, 587–591.

Gauß et al. 2010

F. Gauß/N. Ebinger-Rist/C. Peek/J. Stelzner/V. Dröber, Das DFG-Projekt Lauchheim: Innovative Ansätze bei der Aufarbeitung großer Fundkomplexe. *Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg* 2009 (Stuttgart 2010) 38–41.

Gauß 2013

F. Gauß, Wieder nur ein weiteres Reihengräberfeld? Wissenschaftliche Perspektiven des DFG-Projektes „Lauchheim“. In: S. Brather/D. L. Krause (Hrsg.), *Fundmassen. Innovative Strategien zur Auswertung frühmittelalterlicher Quellenbestände. Materialhefte zur Archäologie in Baden-Württemberg* 97, 2013, 157–182.

Gauß/Stelzner 2013

F. Gauß/J. Stelzner, Zwischenergebnisse des DFG-Projekts „Lauchheim. Dokumentation, Auswertung und Publikation der Befunde und Funde des bedeutendsten frühmittelalterlichen Gräberfeldes Südwestdeutschlands“: Ein bemerkenswerter Tascheninhalt aus Grab 799, *Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg* 2012 (Stuttgart 2013) 62–64.

Gebhard et al. 2008

R. Gebhard/B. Haas-Gebhard/C. Thomas/E. Calzada/M. Mühlbauer/B. Schillinger, Untersuchung einer frühmittelalterlichen Spathascheide mit Neutronentomographie. *Restaurierung und Archäologie* 1, 2008, 89–98.

Geibig 1991

A. Geibig, Beiträge zur morphologischen Entwicklung des Schwertes im Mittelalter: Eine Analyse des Fundmaterials vom ausgehenden 8. bis zum 12. Jahrhundert aus Sammlungen der Bundesrepublik Deutschland (Neumünster 1991).

Geier et al. 2010

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. *ECNDT*, 2010, http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_09_23.pdf (30.09.2015).

Geilmann 1956

W. Geilmann, Verwitterung von Bronzen im Sandboden: Ein Beitrag zur Korrosionsforschung. *Angewandte Chemie* 68, 1956, 201–211.

Gillard et al. 1994

R. D. Gillard/S. M. Hardman/R. G. Thomas/D. E. Watkinson, The mineralization of fibres in burial environments. *Studies in Conservation* 39, 1994, 132–140.

Gostner et al. 2013

P. Gostner/ M. Bonelli/P. Pernter/A. Graefen/A. Zink, New radiological approach for analysis and identification of foreign objects in ancient and historic mummies. *Journal of Archaeological Science* 40, 2013, 1003–1011.

Grabner et al. 2007

M. Grabner/J. Kastner/A. Klein/J. Reschreiter/D. Salaberger, Dendrochronologische Datierung von Holzfunden aus Hallstatt mit Hilfe der Röntgen-Computertomographie. In: R. Karl/J. Leskovar (Hrsg.) *Interpretierte Eisenzeiten 2. Fallstudien, Methoden, Theorien. Studien zur Kulturgeschichte von Oberösterreich* 19, 2007, 99–108.

Grabner 2009

M. Grabner/D. Salaberger/T. Okochi, The Need of High Resolution μ -X-ray CT in Dendrochronology and in Wood Identification. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*. IEEE, 2009, 349–352.

Graenert 2007

G. Granert, Merowingerzeitliche Filigranscheibenfibeln westlich des Rheins, In: *Europe médiévale 7* (Montagnac 2007).

Greiff 1998

S. Greiff, Naturwissenschaftliche Untersuchungen zur Frage der Rohsteinquellen für frühmittelalterlichen Almandingranatschmuck rheinfränkischer Provenienz. *Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz* 45, 1998, 599–646.

Grieshaber et al. 2008

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, *Journal of Archaeological Science* 35, 2008, 681–687.

Grolimund et al. 2011

D. Grolimund/D. Berger/S. Bolliger Schreyer/C. N. Borca/S. Hartmann/F. Müller/J. Hovind/K. Hunger/E. H. Lehmann/P. Vontobel/H. A. O. Wanga, Combined neutron and synchrotron X-ray microprobe analysis: attempt to disclose 3600 years-old secrets of a unique bronze age metal artifact. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 26, 2011, 1012–1023.

Gröning et al. 2007

F. Gröning/J. F. Kegler/G.-C. Weniger, Die digitale Welt der Neandertaler. NESPOS, ein Online-Archiv für die Neandertalerforschung, *Archäologisches Korrespondenzblatt* 37, 2007, 321–333.

Gußmann 1994

S. Gußmann, Herstellungstechnisch-typologische Untersuchungen an tauschierten Metallarbeiten. In: W. Menghin (Hrsg.), *Tauschierarbeiten der Merowingerzeit* (Berlin 1994) 105–158.

Haibel 2008

A. Haibel, Synchrotron X-ray absorption tomography. In: J. Banhart (Hrsg.), *Advanced Tomographic Methods in Materials Research and Engineering* (New York 2008) 141–160.

Haneca et al. 2012

K. Haneca/K. Deforce/M. N. Boone/D. Van Loo/M. Dierick/J. Van Acker/J. Van den Bulcke, X-ray Sub-micron Tomography as a Tool for the Study of Archaeological Wood Preserved through the Corrosion of Metal Objects. *Archaeometry* 54, 2012, 893–905.

Härke 1992

H. Härke, Angelsächsische Waffengräber des 5. bis 7. Jahrhunderts. *Zeitschrift für Archäologie des Mittelalters*, Beiheft 6 (Köln, Bonn 1992).

Harvig/Lynnerup 2013

L. Harvig/N. Lynnerup, On the volume of cremated remains - a comparative study of archaeologically recovered cremated bone volume as measured manually and assessed by Computed Tomography and by Stereology. *Journal of Archaeological Science* 40, 2013, 2713–2722.

Harwood-Nash 1979

D. C. F. Harwood-Nash, Computed Tomography of Ancient Egyptian Mummies. *Journal of Computer Assisted Tomography* 3, 1979, 768–773.

Heck 2000

M. Heck, Chemisch-Analytische Untersuchungen an frühmittelalterlichen Glasperlen, Dissertation, (Darmstadt 2000).

Hiller/Kasperl 2010

J. Hiller/S. Kasperl, Zum Verhältnis von Bildqualität und Messgenauigkeit in der CT-Metrologie. In: J. Kastner (Hrsg.), *Proceedings Industrielle Computertomografie, Fachtagung Wels, Austria*. (Aachen 2010) 155–162.

Hollstein 1980

E. Hollstein, Mitteleuropäische Eichenchronologie. *Trierer Grabungen und Forschungen* 11 (Mainz 1980).

Hopkins et al. 2004

F. Hopkins/Y. Du/B. Lasiuk/A. Abraham/S. Basu, Analytical corrections for beam-hardening and object scatter in volumetric computed tomography systems. 16th WCNDT 2004, Montreal, Canada. 2004, http://212.8.206.21/article/wcndt2004/pdf/radiography/462_hopkins.pdf (08.03.2014).

Hounsfield 1973

G. N. Hounsfield, Computerized transverse axial scanning (tomography). Part I. Description of system. *The British Journal of Radiology* 46, 1973, 1016–1022.

Hsieh et al. 2013

J. Hsieh/B. Nett/Z. Yu/K. Sauer/J.-B. Thibault/C. A. Bouman, Recent advances in CT image reconstruction. *Current Radiology Reports* 1, 2013, 39–51.

Hubell/Seltzer 2004

J. H. Hubbell/S. M. Seltzer, Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients (version 1.4). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (2004), <http://physics.nist.gov/xaamdi> (29.03.2010).

Illerhaus et al. 1994

B. Illerhaus/H. Riesemeier/J. Goebels, Die dreidimensionale Computertomographie zur Erforschung archäologischer tauschierter Eisenfunde. In: W. Menghin (Hrsg.), *Tauschierarbeiten der Merowingerzeit* (Berlin 1994) 163–168.

Illerhaus et al. 2009

B. Illerhaus/A. Staude/D. Meinel, Das zweite Gesicht der Nofretete. *ZfP-Zeitung* 116, 2009, 52–56.

Ingo et al. 2004

G. M. Ingo/ E. Angelini/T. De Caro/G. Bultrini/A. Mezzi, Combined use of XPS and SEM + EDS for the study of surface microchemical structure of archaeological bronze Roman mirrors. *Surface and Interface Analysis* 36, 2004, 871–875.

Jansen et al. 2006

R. J. Jansen/M. Poulus/J. Kottman/T. de Groot/D. J. Huisman/J. Stoker, CT: A new nondestructive method for visualizing and characterizing glass fragments in situ in blocks of soil. *RadioGraphics* 26, 2006, 1837-1844.

Jenny 1928

W. A. Jenny, Verzierte Bronzespiegel aus nordkaukasischen Gräbern. *Prähistorische Zeitschrift* 19, 1928, 347–362.

Kahl/Ramminger 2012

W. A. Kahl/B. Ramminger, Zerstörungsfreie Analysen prähistorischer Keramik mittels hochauflösender Mikro-Computertomographie am Beispiel spätmesolithischer und neolithischer Funde aus Hamburg-Boberg. In: B. Ramminger/O. Stilborg (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Analysen vor- und frühgeschichtlicher Keramik I: Methoden, Anwendungsbereiche, Auswertungsmöglichkeiten*. Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie 216 (Bonn 2012) 59–96.

Kak/Slaney 1988

A.C. Kak/M. Slaney, *Principles of Computerized Tomographic Imaging*. (New York 1988).

Kalender 2006

W. A. Kalender, *Computed tomography* (München 2000).

Kardjilov et al. 2006

N. Kardjilov/F. Fiori/G. Giunta/A. Hilger/F. Rustichelli/M. Strobl/J. Banhart/R. Triolo, Neutron tomography for archaeological investigations. *Journal of Neutron Research* 14, 2006, 29–36.

Karl et al. 2013

S. Karl/D. Jungblut/J. Rosc, Berührungsfreie und nicht invasive Untersuchung antiker Keramik mittels industrieller Röntgen-Computertomografie. In: E. Trinkl (Hrsg.), *Interdisziplinäre Dokumentations- und Visualisierungsmethoden, Corpus Vasorum Antiquorum Österreich Beiheft 1* (Wien 2013) 73–114.

Kasperl 2005

Qualitätsverbesserungen durch referenzfreie Artefaktreduzierung und Oberflächennormierung in der industriellen 3D-Computertomographie, *Dissertation* (Erlangen 2005).

Klein/Vogel 1994

P. Klein/H. Vogel, Computertomografie – eine Hilfe für Dendrochronologie und Holzartenbestimmung? In: 4. Internationale Konferenz Zerstörungsfreie Untersuchungen an Kunst- und Kulturgütern. *DGZfP*, 2008, 85–91.

Kastner et al. 2006

J. Kastner/D. Heim/D. Salaberger/C. Sauerwein/M. Simon, Advanced applications of computed tomography by combination of different methods. In: 9th European Conference on NDT, Berlin, 25–29 September 2006, *DGZfP-Proceedings BB 103-CD* (2006) We.3.7.4, www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/We.3.7.4.pdf (29.03.2010).

Kastner et al. 2007

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

Kastner et al. 2010

J. Kastner/B. Harrer/G. Requena/O. Brunke, A comparative study of high resolution cone beam X-ray tomography and synchrotron tomography applied to Fe- and Al-alloys. *NDT & E International*, 2010, 599–605.

Keefer et al. 2006

E. Keefer/I. Pfeifer-Schäller/C. Sauerwein/H. Wälischmiller, Voxel and STL-Data in Service of Archaeology – Digital Celts. In: J. Völker/R. Link (Hrsg.), *EC NDT (Berlin 2006) Tu.3.2.4*.

Ketcham/Carlson 2001;

R. A. Ketcham/W. D. Carlson, Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Computers & Geosciences* 27, 2001, 381–400.

Koch 1977

U. Koch, *Das Reihengräberfeld bei Schretzheim. Germanische Denkmäler der Völkerwanderungszeit, Serie A, 13* (Berlin 1977).

Koch 2001

U. Koch, *Das alamannisch-fränkische Gräberfeld bei Pleidelsheim. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg* 60 (Stuttgart 2001).

Kory 2013

R.W. Kory, Rezension: Stefan Mäder, *Stähle, Steine und Schlangen. Zur Kultur- und Technikgeschichte von Schwertklingen des frühen Mittelalters*. *Zeitschrift für Archäologie des Mittelalters* 40, 207–209.

Krausse 2009

D. L. Krausse, *Archäologische Denkmalpflege in Baden-Württemberg. Stärken, Schwächen und Herausforderungen. Denkmalpflege in Baden-Württemberg – Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege* 38, 2009, 82–91.

Kress/Wicha 2008

T. Kress/J. Wicha, *Blockbergungen und 3D-Computertomographie, Archäologie in Deutschland Heft 1*, 2008, 60–61.

Kühn 2001

H. Kühn, *Erhaltung und Pflege von Kunstwerken* (München 2001).

Kuhn/Eggert 2010

C. Kuhn/G. Eggert, Keep cool? Deep freeze storage of archaeological iron. In: P. Mardikian/C. Chemello/C. Watters/P. Hull (Hrsg.), *Metal 2010* (Charleston 2011) 32–38.

Kyriakou et al. 2010

Y. Kyriakou/E. Meyer/D. Prell/M. Kachelrieß, Empirical beam hardening correction (EBHC) for CT. *Medical Physics* 37, 2010, 5179–5187.

Last 1973

M. Last: *Arnegunde-Grab*. In: H. Beck (Hrsg.), *Reallexikon der Germanischen Altertumskunde* 1 (Berlin, New York 1973) 426–432.

Lehmann et al. 2004

E. H. Lehmann/P. Vontobel/G. Frei/C. Bronnimann, Neutron imaging - detector options and practical results. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 531, 2004, 228–237.

Lehmann et al 2005

E. H. Lehmann/P. Vontobel/E. Deschler-Erb/M. Soares, Non-invasive studies of objects from cultural heritage. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 542, 2005, 68–75.

Lehmann/Kardjilov 2008

E. H. Lehmann/ N. Kardjilov, Neutron absorption tomography. In: J. Banhart (Hrsg.), *Advanced Tomographic Methods in Materials Research and Engineering* (New York 2008) 375–408.

Lehmann/Meier 2007

M. Lehmann/M. Meier, „Freilegung am Rechner“- Neue Wege bei der Bearbeitung des Fundmaterials aus den sächsischen Körpergräbern aus Immenbeck, *Archäologie in Niedersachsen* 10, 2007, 141–144.

Lehmann 2007

U. Lehmann, Organische Bestandteile merowingischer Spathascheiden und ihre Verzierung im Gebiet der Alamannen und rechtsrheinischen Franken. *Archäologisches Korrespondenzblatt* 37, 2007, 129–146.

Lehmann 2010

U. Lehmann, Eine merowingerzeitliche Spatha mit Scheide aus Bad Wünnenberg im CT-Scan. *Archäologie in Westfalen-Lippe* 2009 (Langenweißbach 2010) 185–188.

Lehmann/Müsch 2011

U. Lehmann/E. Müsch, Spatha oder Sax? CT-Untersuchung eines Schwertes aus Haltern-Flaesheim. *Archäologie in Westfalen-Lippe* 2010 (Langenweißbach 2011) 118–120.

Lehmann 2014

U. Lehmann, Die Klinge der frühmittelalterlichen Spatha. Computer-tomografische Untersuchungen an zweischneidigen Schwertern aus Gräbern des 6. bis 8. Jahrhunderts in Westfalen. In: L. Deutscher/M. Kaiser/S. Wetzler (Hrsg.), *Das Schwert – Symbol und Waffe*, *Freiburger archäologische Studien* 7 (Rahden/Westf. 2014) 111–126.

Lindegard-Andersen et al. 1988

A. Lindegard-Andersen/T. Vedel/L. Jeppesen/B. Gottlieb, Film-based X-ray tomography combined with digital image processing: investigation of an ancient pattern-welded sword. *NDT International* 21, 1988, 407–410.

Lehmann 2016

U. Lehmann, Wurmbunte Klagen. Studien zur Konstruktion, Herstellung und Wertigkeit der frühmittelalterlichen Spatha in Westfalen. *Veröffentlichungen der Altertumskommission für Westfalen* 21 (Münster 2016).

Longuetaud et al. 2005

F. Longuetaud/L. Saint-André/J.-M. Leban, Automatic detection of annual growth units on *Picea abies* logs using optical and X-ray techniques. *Journal of Nondestructive Evaluation* 24, 2005, 29–43.

Lutz/Pernicka 1996

J. Lutz/E. Pernicka, Energy dispersive X-ray fluorescence analysis of ancient copper alloys: empirical values for precision and accuracy. *Archaeometry* 38, 1996, 313–323.

Lynnerup et al. 1997

N. Lynnerup/H. Hjalgrim/L. R. Nielsen/ H. Gregersen/I. Thuesen, Non-invasive archaeology of skeletal material by CT scanning and three-dimensional reconstruction. *International Journal of Osteoarchaeology* 7, 1997, 91–94.

Maaß et al. 2007

C. Maaß/M. Knaup/S. Sawall/M. Kachelrieß, ROI-Tomografie (Lokale Tomografie). In: J. Kastner (Hrsg.), *Proceedings Industrielle Computertomografie, Fachtagung Wels, Austria. (Aachen 2010)* 251–260.

MacGregor 1985

A. MacGregor, *Bone, Antler, Ivory and Horn. The Technology of Skeletal Materials Since the Roman Period* (London 1985).

Mäder 2000

S. Mäder, Mado wo akeru – ein Fenster öffnen. Überlegungen zur Kategorisierung europäischer Klingen auf der Grundlage japanischer Begutachungskriterien. *Ethnographisch- Archäologische Zeitschrift* 41, 2000, 17–27.

Mäder 2009

S. Mäder, *Stähle, Steine und Schlangen. Zur Kultur- und Technikgeschichte von Schwertklingen des frühen Mittelalters. Schriftenreihe des kantonalen Museums Altes Zeughaus Solothurn 24* (Solothurn 2009).

Maisl 1992

M. Maisl, *Entwicklung und Aufbau eines hochauflösenden Röntgen-Computer-Tomographie-Systems für die Werkstoffprüfung, Dissertation* (Saarbrücken 1992).

Mannes 2008

D. Mannes, *Non-destructive testing of wood by means of neutron imaging in comparison with similar methods, Dissertation* (Zürich 2008).

Mannes et al. 2014

D. Mannes/C. Benoît/D. Heinzelmann/E. Lehmann, Beyond the Visible: Combined Neutron and X-ray Imaging of an Altar Stone from the Former Augustinian Church in Fribourg, Switzerland. *Archaeometry* 56, 2014, 717–727.

Markgraf/Matfield 1992

J. W. F. Markgraf/R. Matfield, Neutron beam. In: J. C. Domanus (Hrsg.), *Practical Neutron Radiography* (Dordrecht 1992) 26–50.

Maryon 1960

H. Maryon, Pattern-welding and Damascening of Sword-blades. Part 1 Pattern-Welding. *Studies in Conservation* 5, 1960, 25–37.

Mayo et al. 2010

S. C. Mayo/F. Chen/R. Evans, Micron-scale 3D imaging of wood and plant microstructure using high-resolution X-ray phase-contrast microtomography. *Journal of Structural Biology* 171, 2010, 182–188.

Meeks 1988

N. D. Meeks, Surface studies of Roman bronze mirrors, comparative high-tin bronze Dark Age material and black Chinese mirrors. In: R. M. Farquhar/R. G. V. Hancock/L. A. Pavlish (Hrsg.), *Proceedings of the 26th International Archaeometry Symposium Toronto 1988* (Toronto 1988) 124–127.

Meeks 1993a

N. D. Meeks, Patination phenomena on Roman and Chinese high-tin bronze mirrors and other artefacts. In: S. La Niece/P. T. Craddock (Hrsg.), *Metal Plating and Patination: Cultural, Technical and Historical Developments* (Oxford 1993) 63–84.

Meeks 1993b

N. D. Meeks, Surface characterization of tinned bronze, high-tin bronze, tinned iron and arsenical bronze In: S. La Niece/P. T. Craddock (Hrsg.), *Metal Plating and Patination: Cultural, Technical and Historical Developments* (Oxford 1993) 247–275.

Menghin 1983

W. Menghin, *Das Schwert im frühen Mittelalter* (Stuttgart 1983).

Minozzi et al. 2010;

S. Minozzi/V. Giuffra/J. Bagnoli/E. Paribeni/D. Giustini/D. Caramella/G. Fornaciari, An investigation of Etruscan cremations by computed tomography (CT). *Antiquity* 84, 2010, 195–201.

Mizuno et al. 2010

S. Mizuno/R. Torizu/J. Sugiyama, Wood identification of a wooden mask using synchrotron X-ray microtomography. *Journal of Archaeological Science* 37, 2010, 2842–2845.

Mödlinger 2008

M. Mödlinger, Micro-X-ray Computer Tomography in Archaeology: Analyses of a Bronze Age Sword. *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 50, 2008, 323–326.

Morigi et al. 2010

M. P. Morigi/F. Casali/M. Bettuzzi/R. Brancaccio/V. D'Errico, Application of X-ray Computed Tomography to Cultural Heritage diagnostics. *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 100, 2010, 653–661.

Mouze 1996

D. Mouze, X-ray microradiography. In: S. Amelinckx/D. Van Dyck/J. Van Landuyt/G. Van Tendeloo (Hrsg.), *Handbook of microscopy: Applications in Materials Science, Solid-State Physics, and Chemistry. Methods II* (Weinheim 1996) 130–147.

Müller/Eberli 2008

K. Müller/U. Eberli, Mit Schaufel, Leim und Röntgenstrahl. *Schriften des Kantonalen Museums für Urgeschichte(n) Zug* 46 (Zug 2008).

Nachtrab et al. 2011

F. Nachtrab/S. Weis/P. Keßling/F. Sukowski/U. Haßler/T. Fuchs/N. Uhlmann/R. Hanke, Quantitative material analysis by dual-energy computed tomography for industrial NDT applications. *Nuclear instruments and methods in physics research, Section A. Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment* 633, 2011, 159–162.

Northover/La Niece 2009

P. Northover/S. La Niece, New Thoughts on Niello. In: A. J. Shortland (Hrsg.), *From Mine to Microscope: Advances in the Study of Ancient Technology* (Oxford 2009) 145–154.

Nowak-Böck et al. 2005

B. Nowak-Böck/ C. Peek/I. Pfeifer-Schäller, Zur Untersuchung archäologischer Textilien mittels 3D-Computertomographie. *Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut* Heft 1, 2005, 134–147.

Nguyen et al. 2011

H.-Y. Nguyen/S. Keating/G. Bevan/A. Gabov/M. Daymond/B. Schillinger/A. Murray, Seeing through Corrosion: Using Micro-focus X-ray Computed Tomography and Neutron Computed Tomography to Digitally “Clean” Ancient Bronze Coins. In: P. B. Vandivier/W. Li/J. L. Ruvalcaba Sil/C. L. Reedy/L. D. Frame (Hrsg.), *Materials Issues in Art and Archaeology IX*, Materials Research Society Symposium Proceedings Volume 1319 (New York 2011) 305–318.

Oberhofer 2014

K. Oberhofer, Eine eiserne römische Schnellwaage aus der Weststeiermark. *Archäologisches Korrespondenzblatt* 43, 2014, 535–543.

O’Connor 1987

S. O’Connor, The identification of osseous and keratinaceous materials at York, In: K. Starling/D. Watkinson (Hrsg.), *Archaeological Bone, Antler and Ivory*, UKIC Occasional Papers 5, (London 1987) 9–21.

O’Connor et al. 2008

S. O’Connor/M. Brooks/M. J. Fagan/S. Bouret, Innovation in the X-radiography of textiles: Using computed tomography imaging techniques. In: J. Bridgland (Hrsg.), *Preprints Vol. II, 15th Triennial Meeting*, New Delhi, ICOM Committee for Conservation (New Delhi 2008) 995–1001.

O’Connor et al. 2015

S. O’Connor/C. Solazzo/M. Collins, Advances in identifying archaeological traces of horn and other keratinous hard tissues. *Studies in Conservation*, 2015, 393–417.

Oddy et al. 1983

W. A. Oddy/M. Bimson/S. La Niece, The composition of niello decoration on gold, silver and bronze in the antique and mediaeval periods. *Studies in Conservation* 28, 1983, 29–35.

Ohser/Schladitz 2008

J. Ohser/K. Schladitz, Visualization, processing and analysis of tomographic data. In: J. Banhart (Hrsg.), *Advanced Tomographic Methods in Materials Research and Engineering* (New York 2008) 37–105.

Okochi et al. 2007

T. Okochi/H. Fujii/T. Mitsutani, Nondestructive tree-ring measurements for Japanese oak and Japanese beech using micro-focus X-ray computed tomography. *Dendrochronologia* 24, 2007, 155–164.

Onoe et al. 1984

M. Onoe/J. W. Tsao/H. Yamada/H. Nakamura/J. Kogure/H. Kawamura/M. Yoshimatsu, Computed Tomography for Measuring the Annual Rings of a Live Tree. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 221, 1984, 213–220.

Patten et al. 2013

K. Patten/L. Gonzalez/C. Kennedy/D. Mills/G. Davis/T. Wess, Is there evidence for change to collagen within parchment samples after exposure to an X-ray dose during high contrast X-ray microtomography? a multi technique investigation, *Heritage Science* 1, 2013, 22.

Payne 2012

E.M. Payne, Imaging Techniques in Conservation. *Journal of Conservation & Museum Studies* 10, 2012, 17–29.

Paysan 2005

M. Paysan, Im Feuer geboren – dem Wasser geweiht. Technologische Untersuchung und Rekonstruktion der Herstellungstechnik keltischer Knollenknaufschwerter im Hinblick auf deren chronologische Einordnung. *Fundberichte aus Baden-Württemberg* 28, 2005, 93–206.

Peek/Nowack-Böck 2007

C. Peek/B. Nowack-Böck, 3D-Computertomographie - Neue Möglichkeiten zur Untersuchung archäologischer Textilien. in A. Rast-Eicher/R. Windler (Hrsg.), *NESAT IX. Archäologische Textilfunde - Archaeological Textiles (Ennenda 2007)* 79–85.

Peek et al. 2009

C. Peek/N. Ebinger-Rist/J. Stelzner, Zur Bearbeitung frühmittelalterlicher Grabfunde des Friedhofs von Lauchheim (Ostalbkreis). Möglichkeiten und Grenzen digitaler Untersuchungsmethoden. *Archäologisches Korrespondenzblatt* 39, 2009, 559–578.

Pirling 1988

R. Pirling, Ein sarmatischer Spiegel aus Krefeld-Gellep. *Germania* 66, 1988, 455–468.

Preuss et al. 1991

P. Preuss/K. Christensen/K. Peters, The use of computer-tomographical X-ray scanning in dendrochronology. *Norwegian Archaeological Review* 24, 1991, 123–130.

Pernicka 1989

E. Pernicka, Zur Probennahme von archäologischen Metallobjekten. *Arbeitsblätter für Restauratoren* 22, 1989, 138–148.

Purschke 2005

M. Purschke, DXR – Eine neue Generation röntgenempfindlicher Flächendetektoren. *DGZfP-Jahrestagung 2005*, <http://www.ndt.net/article/dgzfp05/v06.pdf> (06.10.2015).

Quast/Schüssler 2000

D. Quast/U. Schüssler, Mineralogische Untersuchungen zur Herkunft der Granate merowingerzeitlicher Cloisonnéarbeiten. *Germania* 78, 2000, 75–96.

Radon 1917

J. Radon, Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten. *Berichte über die Verhandlungen der Königlich-Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig* 69, 1917, 262–277.

Ramachandran/Lakshminarayanan 1971

G. N. Ramachandran/A. V. Lakshminarayanan, Three-dimensional Reconstruction from Radiographs and Electron Micrographs: Application of Convolutions instead of Fourier Transforms. *Proceedings of the National Academy of Science* 68, 1971, 2236–2240.

Ramsey 2007

A. T. Ramsey, The latest techniques reveal the earliest technology – A new inspection of the Antikythera Mechanism. In: *Proceedings of the International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography (Lyon 2007)* <http://www.ndt.net/article/dir2007/papers/2.pdf> (02.10.2015).

Raub/Weiss 1994

C. J. Raub/H. Weiss, Untersuchung von Resten der Goldfäden eines Brokatgewebes aus Lauchheim, Ostalbkreis, Gräberfeld "Wasserfurche", Grab 795. *Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg* 1993 (Stuttgart 1994) 217–220.

Ravich/Treister, 2011

I.G. Ravich/M. Treister, The Mirrors of the Early Nomads of South Urals: a Complex Archaeotechnological Study. In: A. Hauptmann/D. Modarressi-Tehrani/M. Prange (Hrsg.), *Archaeometallurgy in Europe III*, *Metalla Sonderheft 4* (Bochum 2011) 221–223.

Re et al. 2015

A. Re/J. Corsi/M. Demmelbauer/M. Martini/G. Mila/C. Ricci, X-ray tomography of a soil block: a useful tool for the restoration of archaeological finds. *Heritage Science* 3, 2015, 4.

Reiche et al. 2011

I. Reiche/K. Müller/A. Staude/J. Goebbels/H. Riesemeier, Synchrotron radiation and laboratory micro X-ray computed tomography - useful tools for the material identification of prehistoric objects made of ivory, bone or antler. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 26, 2011, 1802–1812.

Reimers/Goebbels 1983

P. Reimers/J. Goebbels, New possibilities of nondestructive evaluation by X-ray computed tomography. *Materials Evaluation* 41, 1983, 732–737.

Reimers et al. 1984

P. Reimers/J. Goebbels/H.-P. Weise/K. Wilding, Some aspects of industrial non-destructive evaluation by X- and γ -ray computed tomography. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 221, 1984, 201–206.

Reimers et al. 1989

P. Reimers/J. Riederer/J. Goebbels/A. Kettschau, Dendrochronology by means of X-ray computed tomography (CT). In: Y. Maniatis, (Hrsg.), *Archaeometry: Proceedings of the 25th International Symposium* (Amsterdam 1989) 121–125.

Riederer 1994

J. Riederer, Metallanalysen von Silber- und Messingeinlagen aus merowingerzeitlichen tauschiereten Eisenfunden. In: W. Menghin (Hrsg.), *Tauschierarbeiten der Merowingerzeit* (Berlin 1994) 159–162.

Riederer 2001

J. Riederer, Die Berliner Datenbank von Metallobjekten kulturgeschichtlicher Objekte. III. Römische Objekte. *Berliner Beiträge zur Archäometrie* 18, 2001, 139–259.

Riederer 2004

J. Riederer, 10 000 Jahre Kupfer und Kupferlegierungen. *Restauro* 110, 2004, 394–400.

Riemer 1992

E. Riemer, Byzantinische Körbchen- und Halbmondohringe im Römisch-Germanischen Museum Köln (Sammlung Diergardt). *Kölner Jahrbuch für Vor- und Frühgeschichte* 25, 1992, 121–136.

Riemer 2000

E. Riemer, Romanische Grabfunde des 5.-8. Jahrhunderts in Italien. *Internationale Archäologie* 57 (Rahden/Westfalen 2000).

Rigon et al. 2010

L. Rigon/E. Vallazza/F. Arfelli/R., Longo/D. Dreossi/A. Bergamaschi/B. Schmitt/R. Chen/M. A. Cova/R. Perabò/M. Fioravanti/L. Mancini/R. H. Menk/N. Sodini/G. Tromba/F. Zanini, Synchrotron-radiation microtomography for the non-destructive structural evaluation of bowed stringed instruments. *e-PreservationScience*, 7, 2010, 71–77.

Robbiola et al. 1998

L. Robbiola/J.-M. Blengino/C. Fiaud, Morphology and mechanisms of formation of natural patinas on archaeological Cu–Sn alloys. *Corrosion Science* 40, 1998, 2083–2111.

Rodgers 2004

B. A. Rodgers, *The Archaeologist's Manual for Conservation. A Guide to Non-Toxic, Minimal Intervention Artifact Stabilization* (New York 2004).

Röntgen 1896

W. C. Röntgen, On a new kind of rays. *Science* 3, 1896, 227–231.

Sachse 1978

M. Sachse, Die Restaurierung von Damaszenerstahl. *Arbeitsblätter für Restauratoren* 11, Gruppe 1, 1978, 113–123.

Salvemini et al. 2012

F. Salvemini/F. Grazzi/S. Peetermans/F. Civita/R. Franci/S. Hartmann/E. Lehmann/M. Zopp, Quantitative characterization of Japanese ancient swords through energy-resolved neutron imaging. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 27, 2012, 1494–1501.

Sasse 2001

B. Sasse, Ein frühmittelalterliches Reihengräberfeld bei Eichstetten am Kaiserstuhl. *Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg* 75 (Stuttgart 2001).

Sayer-Degen 2012

L. Sayer-Degen, Langzeiterhaltung von 3D-Röntgen-Computertomographien in der Archäologischen Denkmalpflege. *nestor-edition Vol 5*. <http://files.dnb.de/nestor/edition/05-sayer-degen.pdf>. (06.10.2015).

Scheschkewitz 2013

J. Scheschkwitz, Frühmittelalterliche Fundkomplexe als Herausforderung für die baden-württembergische Denkmalpflege. Lösungsansätze des DFG-Projektes „Lauchheim“. In: S. Brather/D. L. Krausse (Hrsg.), *Fundmassen. Innovative Strategien zur Auswertung frühmittelalterlicher Quellenbestände*. *Materialhefte zur Archäologie in Baden-Württemberg* 97, 2013, 11–18.

Schillinger et al. 1996

B. Schillinger/R. Gebhard/B. Haas/W. Ludwig/C. Rausch/U. Wagner, 3D computer tomography in material testing and archaeology. In: C.O. Fischer (Hrsg.), *Proceedings, 5th World Conference on Neutron Radiography including Radioscopy and Complementary Inspection Methods using Neutrons* (Berlin 1997) 688–693.

Schillinger/Bücherl 2004

B. Schillinger/T. Bücherl, Neutronen sehen, was Röntgenstrahlen verborgen bleibt. *ZfP-Zeitung* 89, 2004, 34–41.

Schillinger et al. 2006

B. Schillinger/E. Calzada/K. Lorenz, Modern neutron imaging: Radiography, tomography, dynamic and phase contrast imaging with neutrons. *Solid State Phenomena* 112, 2006, 61–72.

Schillinger et al. 2008

B. Schillinger/E. Calzada/M. Mühlbauer/M. Schulz, Neutronenbilder zeigen, was Röntgenstrahlen nicht sehen können. In: J. Kastner (Hrsg.), *Proceedings Industrielle Computertomografie, Fachtagung Wels, Austria*. (Aachen 2008) 71–77.

Schmidt-Ott/Oswald 2006

Schmidt-Ott, K. & Oswald, N. 2006. Neues zur Eisenentsalzung mit alkalischem Sulfit. Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut Heft 2, 2006, 126–133.

Schmidt-Ott et al. 2014

K. Schmidt-Ott/K. Hunger/D. Mannes, Die Konservierung des Degens von Oberwil unter Einbeziehung aktueller Analyseverfahren. Zeitschrift für schweizerische Archäologie und Kunstgeschichte 71, 2014, 129–140.

Schmitt 1989

G. Schmitt, Das Bruchstück eines hunnischen Metallspiegels von Meßstetten, Zollernalbkreis. Fundberichte aus Baden-Württemberg 14, 1989, 467–481.

Schmitt et al. 2008

R. Schmitt/P. Hafner/S. Pollmanns, Kompensation von Metallartefakten in tomographischen Aufnahmen mittels Bilddatenfusion. In: J. Kastner (Hrsg.), Proceedings Industrielle Computertomografie, Fachtagung Wels, Austria. (Aachen 2008) 117–122.

Schütz et al. 2013

P. Schütz/A. Miceli/I. Jerjen/A. Flisch/J. Hofmann/R. Broennimann/U. Sennhauser, Reducing environmental scattering in industrial computed tomography by system redesign. NDT & E International 58, 2013, 36–42.

Schütz et al. 2014

P. Schütz/I. Jerjen/J. Hofmann/M. Plamondon/A. Flisch/U. Sennhauser, Correction algorithm for environmental scattering in industrial computed tomography, NDT & E International 64, 2014, 59–64.

Scott 1991

D. A. Scott, Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals (Marina del Rey, California 1991).

Scott 2002

D. A. Scott, Copper and Bronze in Art: Corrosion, Colorants, Conservation (Los Angeles 2002).

Scott/Eggert 2009

D. A. Scott/G. Eggert, Iron and Steel in Art. Corrosion, Colorants, Conservation (London 2009).

Scott 2011

D. A. Scott, Ancient Metals: Microstructure and Metallurgy, Volume 1: Copper and Copper Alloys (Los Angeles 2011).

Scott 2014

D. A. Scott, Colour metallography in the examination of ancient metals. Studies in Conservation 59, 2014, 113–122.

Sears 1992

V. F. Sears, Neutron scattering lengths and cross sections. Neutron News 3, 1992, 26–37.

Segebade 1997

C. Segebade, Bemerkungen zum europäischen Damaszener Stahl. Arbeitsblätter für Restauratoren 30, 1997, 149–159.

Shepp/Logan 1974

L. Shepp/B. F. Logan, The Fourier Reconstruction of a Head Section. IEEE Transactions on Nuclear Science 21, 1974, 21–43.

Shoukang/Tankun 1993

Z. Shoukang/H. Tangkun, Studies of ancient Chinese mirrors and other bronze artefacts. In: S. La Niece/P. T. Craddock (Hrsg.), *Metal Plating and Patination: Cultural, Technical and Historical Developments* (Oxford 1993) 50–62.

Smith 1960

C. S. Smith, *A History of Metallography. The Development of Ideas on the Structure of Metals before 1890* (Cambridge, London 1960).

Stauffer/Weisse (1998)

A. Stauffer/F. Weisse, Ein frühmittelalterliches Goldgewebe aus Lauchheim. *Fundberichte aus Baden-Württemberg* 22, 1998, 729–736.

Stelzner 2006

J. Stelzner, Dokumentation über die Bearbeitung einer Blockbergung. Lauchheim Ost-Alb-Kreis, Gräberfeld „Wasserfurche“, Grab 75, Vordiplom. Unpublizierte studentische Arbeit an der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart (2006).

Stelzner/Eggert 2008

J. Stelzner/G. Eggert, Calcium Carbonate on Bronze Finds: safe sequestering with sodium tripolyphosphate? *Studies in Conservation* 53, 2008, 264–272.

Stelzner et al. 2010

J. Stelzner/N. Ebinger-Rist/Chr. Peek/B. Schillinger, The application of 3D computed tomography with X-rays and neutrons to visualize archaeological objects in blocks of soil. *Studies in Conservation* 55, 2010, 7–16.

Stelzner/Eggert 2014

J. Stelzner/G. Eggert, Kalksinter auf archäologischen Bronzen: Können Komplexbildner eine Alternative zur mechanischen Freilegung sein? *Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut Heft 1*, 2014, 134–147.

Stelzner/Million 2015

J. Stelzner/S. Million, X-ray Computed Tomography for Anatomical and Dendrochronological Analysis of Archaeological Wood. *Journal of Archaeological Science* 55, 2015, 188–196.

Stelzner et al. 2015

J. Stelzner/F. Gauß/P. Schütz, X-ray Computed Tomography for Non-destructive Analysis of Early Medieval Swords. *Studies in Conservation*, 2015, DOI:10.1179/2047058414Y.0000000157

Steuer 1987

H. Steuer, Helm und Ringschwert. Prunkbewaffnung und Rangabzeichen germanischer Krieger. Eine Übersicht. *Studien zur Sachsenforschung* 6, 1987, 189–236.

Steuer 2004

H. Steuer, Schwert § 6: Völkerwanderungs- und Merowingerzeit. In: H. Beck/D. Geuenich/H. Steuer (Hrsg.) *Reallexikon der Germanischen Altertumskunde* 27 (Berlin, New York 2004) 568–593.

Stock 2009

S. R. Stock, *MicroComputed Tomography: Methodology and Applications* (Boca Raton 2009).

Stork 1995

I. Stork, Fürst und Bauer. Heide und Christ. 10 Jahre archäologische Forschungen in Lauchheim/Ostalbkreis. *Archäologische Informationen Baden-Württemberg* 29 (Stuttgart 1995).

Stork 1997

I. Stork, Friedhof und Dorf, Herrenhof und Adelsgrab. In: K. Fuchs/M. Kempa/R. Redies (Hrsg.), *Die Alamannen* (Stuttgart 1997) 290–310.

Stork 2002

I. Stork, Lauchheim im frühen Mittelalter. In: W. Menghin/D. Planck (Hrsg.), *Menschen, Zeiten, Räume. Archäologie in Deutschland* (Stuttgart 2002) 321–330.

Theune-Großkopf 1994

B. Theune-Großkopf, Produkte von Kammachern und Beinschnitzern des frühen Mittelalters in Südwestdeutschland. In: M. Kokabi/B. Schlenker/J. Wahl (Hrsg.), *Knochenarbeit: Artefakte aus tierischen Rohstoffen im Wandel der Zeit. Archäologische Informationen aus Baden-Württemberg 27* (Stuttgart 1994) 41–55.

Theuws/Alkemade 2000

F. Theuws/M. Alkemade, A kind of mirror for men: sword depositions in late antique northern Gaul. In: F. Theuws/J.L. Nelson (Hrsg.), *Rituals of Power. From late Antiquity to the early Middle Ages. The transformation of the Roman world, Vol. 8* (Leiden 2000) 401–476.

Tout et al. 1979

R. E. Tout/W. B. Gilboy/A. J. Clark, The Use of Computerized X-ray Tomography for the Non-destructive Examination of Archaeological Objects. In: *Landschaftsverband Rheinland/Rheinisches Landesmuseum Bonn* (Hrsg.), *Proceedings of the 18th International Symposium on Archaeometry and Archaeological Prospection, Archaeo-Physika 10* (Bonn 1979) 608–616.

Tylecote/Gilmour 1986

R. F. Tylecote/B. J. J. Gilmour, *The Metallography of Early Ferrous Edge tools and Edged Weapons*. British Archaeological Reports, British Series 155 (Oxford 1986).

Van den Bulcke et al. 2009

J. Van den Bulcke/M. Boone/J. Van Acker/M. Stevens/L. Van Hoorebeke, X-ray tomography as a tool for detailed anatomical analysis. *Annals of Forest Science* 66, 2009, 508p1–12.

Velios/Harrison 2007

A. Velios/J. Harrison, Digital Reconstruction of Fragmented Archaeological Objects. *Studies in Conservation* 52, 2007, 19–36.

Vigneron 1999

A. Vigneron, Möglichkeiten der Typologisierung von damaszierten Schwertern mit Hilfe moderner computertomographischer Verfahren. *Arbeitsblätter für Restauratoren* 32, 1999, 305–309.

Werner 1956

J. Werner, *Beiträge zur Archäologie des Attila-Reiches*. Abhandlungen der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Philosophisch-Historische Klasse, N.F. 38a (München 1956).

Wessel et al. 1994

H. Wessel/C. Segebade/ J. Haid, Sichtbarmachung der Damasizierung in mittelalterlichen Schwertern. Visualization of the damascening of medieval swords. In: *Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung* (Hrsg.), *4th International Conference on non-Destructive Testing of works of Art. Berichtsband 45* (Berlin 1994) 396–399.

Westphal 1991a

H. Westphal, Untersuchungen an Saxklingen des sächsischen Stammesgebietes. *Schmiedetechnik, Typologie, Dekoration. Studien zur Sachsenforschung* 7, 1991, 271–365.

Westphal 1991b

H. Westphal, Beobachtungen bei der Restaurierung und Untersuchung ausgewählter Funde aus dem frühmittelalterlichen Gräberfeld von Wünnenberg-Fürstenberg. In: W. Melzer (Hrsg.), Das frühmittelalterliche Gräberfeld von Wünnenberg-Fürstenberg, Kreis Paderborn. Bodenaltertümer Westfalens 25 (Münster 1991) 91–119.

Weyl 1951

W.A. Weyl, Coloured Glasses (Sheffield 1951).

Wiesner et al. 2013

I. Wiesner/J. Stelzner/N. Ebinger-Rist, Virtual Analyses of Neolithic Textiles. In: J. Banck-Burgess/C. Nübold (Hrsg.). NESAT XI. The North European Symposium for Archaeological Textiles 2011 (Rahden/Westfalen 2013) 109–118.

Wiesner et al. im Druck

I. Wiesner/J. Stelzner/S. Million/K. Kuhnt/K. Bott, The First Wheels Go Round Again. In: International Council of Museums. Committee for Conservation Working Group on Wet Organic Archaeological Materials, WOAM, 2013 (Istanbul im Druck).

Wilkins et al. 1996

S. W. Wilkins/T. E. Gureyev/D. Gao/A. Pogany/A. W. Stevenson, Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays. *Nature* 384, 1996, 335–338.

Williams 2009

A. Williams, A metallurgical study of some viking swords. *Gladius* 29, 2009, 121–184.

Wind 1984

J. Wind, Computerized x-ray tomography of fossil hominid skulls. *American Journal of Physical Anthropology* 63, 1984, 265–282.

Ypey 1982

J. Ypey, Europäische Waffen mit Damaszierung. *Archäologisches Korrespondenzblatt* 12, 1982, 381–388.

Ypey 1984

J. Ypey, Damaszierung, In: H. Beck (Hrsg.) *Reallexikon der Germanischen Altertumskunde* 27 (Berlin, New York 1984) 191–213.

11 Anhang

A 11.1 Angaben zur Methodik und zu den Untersuchungsgegenständen

A 11.1.1 Angewendete Anlagen

Die Tabelle A.1 gibt einen Überblick über die CT-Systeme und deren Eigenschaften sowie die Institutionen, in denen Messungen vorgenommen wurden.

Tab. A.1: Angewendete CT-Systeme

Methoden	Anlage	Strahlenquelle	Detektor
μ -RCT	RayScan 200 (FHAA)	Mikrofokusröntgenröhre: 10–225 kV, 0,1–3 mA, \emptyset Brennfleck ab 3–5 μ m bis ca. 250 μ m bei max. 340 W.	a-Si Flachbilddetektor: 16bit Auflösung, 410 x 410 mm aktive Fläche, 400 μ m Pixelgröße, 1024 x 1024 Pixel, GOX Szintillator.
μ -RCT	RayScan 200E (Zeiss)	Mikrofokusröntgenröhre: 10–225 kV, 0,1–3 mA, \emptyset Brennfleck ab 3–5 μ m bis ca. 250 μ m bei max. 340 W.	a-Si Flachbilddetektor: 16bit Auflösung, 410 x 410 mm aktive Fläche, 200 μ m Pixelgröße, 2048 x 2048 Pixel, Szintillator DRZ.
μ -RCT	Vtomex 450 (DLR/ FEM)	Mikrofokusröntgenröhre: 10–300 kV, max. 500 W.	DXR 250 a-Si Flachbilddetektor: 14bit Auflösung, 410 x 410 mm aktive Fläche, 200 μ m Pixelgröße, 2048 x 2048 Pixel, CsJ Szintillator.
μ -RCT	μ -RCT-Aufbau (EMPA)	Viscom XT9225-TXD® Mikrofokusröntgenröhre: 10–225 kV, 0,1–3 mA, \emptyset Brennfleck \leq 7 μ m bei 320 W.	PerkinElmer XRD 1621 CN3 ES a-Si Flachbilddetektor: 16bit Auflösung, 410 x 410 mm aktive Fläche, 200 μ m Pixelgröße, 2048 x 2048 Pixel, CsJ Szintillator
Sub- μ -RCT	Nanotom M (FEM)	Mikrofokusröntgenröhre: 10–180 kV, \emptyset Brennfleck $<$ 1 μ m bei 15 W.	DXR 500L a-Si Flachbilddetektor: 14bit Auflösung, 410 x 410 mm aktive Fläche, 100 μ m Pixelgröße, 3072 x 2400 Pixel, CsJ Szintillator.
NCT	NCT Aufbau (FRM-II)	Flugrohrsystem mit einer maximalen Strahlungsfläche von 400 x 400 mm und unterschiedlichen Kollimatoren für L/D = 400 bei einem Neutronenfluss von 1×10^8 n/cm ² s und L/D = 800 mit $2,6 \times 10^7$ n/cm ² s.	Andor CCD Kamera mit Spiegel und Szintillatorschirm aus ZnS + LiF (Ag,Au,Cu): 16bit Auflösung, 410 x 410 mm aktive Fläche, 2048 x 2048 Pixel.

A 11.1.2 Übersicht über die untersuchten Blockbergungen

Die Tabelle A.2 gibt einen Überblick über die untersuchten Blockbergungen des Gräberfeldes Lauchheim „Wasserfurche“ sowie über die angewendeten CT-Systeme, Messmethoden und Auflösungen.

Tab. A.2: Übersicht der Blockbergungen mit Maßen und erzielten Auflösungen

Grab	Inventar-Nr.	Maße (mm)			Anlage	Anzahl Messungen	Messkreis- erweiterung	Auflösung (mm)	Auflösung ROI (mm)
		L	B	St					
1	1986-0008-0001-9000	190	120	65	Vtomex 450 (DLR)	1		0,09999	
1	1986-0008-0001-9001	185	80	55	Vtomex 450 (DLR)	1		0,10000	
15	1986-0008-0015-9000	755	125	45	Vtomex 450 (DLR)	3		0,12639	
39	1986-0008-0043-9000	735	330	115	Vtomex 450 (DLR)	3		0,16879	
39	1986-0008-0043-9001	140	120	90	Vtomex 450 (DLR)	1		0,08500	
44	1986-0008-0049-9000	280	280	95	RayScan 200E (Zeiss)	1		0,32303	0,17872
45	1986-0008-0057-9000	790	198	105	Vtomex 450 (DLR)	3		0,16627	
53	1986-0008-0056-9000	290	150	55	Vtomex 450 (DLR)	1		0,12552	
53	1986-0008-0056-9001	120	120	70	Vtomex 450 (DLR)	1		0,12599	
54	1986-0008-0060-9000	970	142	60	Vtomex 450 (DLR)	3		0,12627	
65	1986-0008-0076-9000	420	430	100	RayScan 200E (Zeiss)	2	X	0,59644	
65	1986-0008-0076-9001	430	320	100	Vtomex 450 (DLR)	2		0,16308	
69	1986-0008-0079-9000	650	260	108	Vtomex 450 (DLR)	3		0,14400	
71	1986-0008-0081-9000	273	80	55	Vtomex 450 (DLR)	1		0,10452	
75	1986-0008-0087-9000	380	310	117	RayScan 200 (FHAA)	1		0,33140	
96	1986-0008-0112-9000	160	130	70	Vtomex 450 (DLR)	1		0,11407	
99	1986-0008-0109-9015	190	100	40	RayScan 200E (Zeiss)	1		0,14008	
100	1986-0008-0111-9000	255	200	75	Vtomex 450 (DLR)	1		0,14001	0,03207
100	1986-0008-0111-9001	80	55	30	Vtomex 450 (FEM)	1		0,04129	
107	1986-0008-0117-9000	935	250	115	Vtomex 450 (DLR)	3		0,16469	
123	1986-0008-0137-9000	240	210	95	Vtomex 450 (DLR)	1		0,13516	
143	1986-0008-0155-9000	490	290	110	Vtomex 450 (DLR)	2		0,15664	
144	1986-0008-0159-9000	1030	370	180	Vtomex 450 (DLR)	5		0,16644	
151	1986-0008-0179-9000	425	265	110	Vtomex 450 (DLR)	2		0,15517	
164	1986-0008-0182-9000	570	270	135	RayScan 200E (Zeiss)	2		0,30943	
170	1986-0008-0196-0001	205	180	115	Vtomex 450 (DLR)	1		0,12530	
177	1986-0008-0205-9000	360	340	105	Vtomex 450 (DLR)	1		0,16176	
190	1986-0008-0224-9000	230	210	60	Vtomex 450 (DLR)	1		0,15174	
236	1986-0008-0276-9000	205	180	60	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10617	
237	1986-0008-0279-9000	157	128	50	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08427	
250	1986-0008-0293-9000	950	170	85	Vtomex 450 (FEM)	4		0,15448	
284	1986-0008-0338-9000	553	195	70	Vtomex 450 (FEM)	3		0,16606	
284	1986-0008-0338-9001	995	160	95	Vtomex 450 (FEM)	4		0,16166	
300	1986-0008-0356-9000	186	166	58	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09814	
315	1986-0008-0382-9000	350	210	68	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12607	
315	1986-0008-0382-9001	223	215	60	Vtomex 450 (FEM)	1		0,15448	
315	1986-0008-0382-9002	215	190	58	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10617	
335	1986-0008-0416-9000	1015	160	130	Vtomex 450 (FEM)	4		0,15009	
337	1986-0008-0421-9000	285	114	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,14226	
343	1986-0008-0415-9000	420	320	78	Vtomex 450 (FEM)	1		0,15871	

Grab	Inventar-Nr.	Maße (mm)			Anlage	Anzahl Messungen	Messkreis- erweiterung	Auflösung (mm)	Auflösung ROI (mm)
		L	B	St					
343	1986-0008-0415-9001	322	256	65	RayScan 200E (Zeiss)	2		0,30945	
345	1986-0008-0425-9000	921	189	89	Vtomex 450 (FEM)	3		0,16545	
346	1986-0008-0426-9000	173	130	58	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07956	
349	1986-0008-0427-9000	246	175	64	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12140	
350	1986-0008-0423-9000	250	175	73	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12833	
353	1986-0008-0422-9000	235	183	60	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12127	
354	1986-0008-0428-9000	120	70	42	Vtomex 450 (FEM)	1		0,06283	
365	1986-0008-0448-9000	360	200	70	Vtomex 450 (FEM)	2		0,11854	
373	1986-0008-0444-9000	230	115	40	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11620	
377	1986-0008-0457-9000	127	75	35	Vtomex 450 (FEM)	1		0,06567	
387	1986-0008-0452-9000	165	110	65	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08501	
393	1986-0008-0472-9000	475	115	70	Vtomex 450 (FEM)	2		0,13351	
403	1986-0008-0475-9000	180	160	60	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09982	
407	1986-0008-0493-9000	450	450	110	RayScan 200E (Zeiss)	2	X	0,62257	0,20245
419	1986-0008-0490-9000	144	100	44	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07579	
442	1986-0008-0522-9000	916	145	90	Vtomex 450 (FEM)	4		0,12457	
442	1986-0008-0522-9001	235	150	80	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12000	
447	1986-0008-0529-9000	540	150	70	RayScan 200E (Zeiss)	3		0,18579	
451	1986-0008-0531-9000	920	130	70	Vtomex 450 (FEM)	4		0,13072	
465	1986-0008-0541-9000	165	90	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08025	
474	1986-0008-0562-9000	205	170	50	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10572	
480	1986-0008-0557-9000	150	110	35	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07466	
485	1986-0008-0566-9000	120	75	45	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07306	
487	1986-0008-0568-9000	230	190	75	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12553	
487	1986-0008-0568-9001	340	100	35	Vtomex 450 (FEM)	2		0,09578	
492	1986-0008-0572-9000	220	110	60	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11141	
493	1986-0008-0595-9000	395	140	90	Vtomex 450 (FEM)	2		0,13295	
493	1986-0008-0595-9001	265	115	50	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11996	
494	1986-0008-0573-9000	990	220	130	Vtomex 450 (FEM)	4		0,15005	
495	1986-0008-0574-9000	110	70	65	Vtomex 450 (FEM)	1		0,06479	
500	1986-0008-0580-9000	970	125	125	Vtomex 450 (FEM)	4		0,13295	
504	1986-0008-0596-9000	465	250	100	Vtomex 450 (DLR)	2		0,13593	
505	1986-0008-0584-9000	200	125	60	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10061	
530	1986-0008-0617-9000	205	100	55	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11006	
539	1986-0008-0614-9000	95	80	35	Vtomex 450 (FEM)	1		0,05993	
552	1986-0008-0644-9000	320	275	145	Vtomex 450 (FEM)	1		0,15343	
552	1986-0008-0644-9001	700	300	105	Vtomex 450 (FEM)	3		0,16070	
553	1986-0008-0634-9000	150	60	35	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08022	
554	1986-0008-0639-9000	105	100	45	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08963	
561	1986-0008-0636-9000	140	70	30	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07504	
571	1986-0008-0655-9000	135	90	40	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07607	
575	1986-0008-0656-9000	175	130	50	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10017	
580	1986-0008-0665-9000	590	235	85	Vtomex 450 (FEM)	2		0,15674	
584	1986-0008-0669-9000	300	205	85	Vtomex 450 (FEM)	1		0,15005	
586	1986-0008-0668-9000	300	205	85	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11032	
587	1986-0008-0671-9000	100	100	50	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07119	
588	1986-0008-0735-9001	155	130	50	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09036	
589	1986-0008-0670-9017	185	85	60	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09963	
590	1986-0008-0672-9000	55	40	25	Vtomex 450 (FEM)	1		0,03929	

Grab	Inventar-Nr.	Maße (mm)			Anlage	Anzahl Messungen	Messkreis- erweiterung	Auflösung (mm)	Auflösung ROI (mm)
		L	B	St					
590	1986-0008-0672-9001	245	135	90	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13515	
595	1986-0008-0677-9000	180	115	35	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10228	
600	1986-0008-0697-9000	250	210	140	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13011	
602	1986-0008-0689-9000	250	110	95	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12816	
606	1986-0008-0686-9000	310	165	80	Vtomex 450 (FEM)	1		0,14891	
608	1986-0008-0688-9000	310	230	125	Vtomex 450 (FEM)	1		0,15492	
636	1986-0008-0724-9000	175	95	40	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09575	
639	1986-0008-0729-9000	190	135	75	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09129	
640	1986-0008-0734-9000	440	335	165	Vtomex 450 (FEM)	2		0,13930	
646	1986-0008-0730-9000	150	125	65	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07629	
651	1986-0008-0731-9000	130	105	45	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07106	
656	1986-0008-0742-9000	315	195	60	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11460	
656	1986-0008-0742-9001	230	180	60	Vtomex 450 (FEM)	1		0,15758	
658	1986-0008-0739-9000	165	100	80	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11171	
670	1986-0008-0754-9000	245	230	85	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12655	
687	1986-0008-0773-9000	140	90	60	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09940	
693	1986-0008-0778-9000	230	170	60	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11909	
693	1986-0008-0778-9001	225	90	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12021	
695	1986-0008-0781-9000	390	190	65	RayScan 200E (Zeiss)	2		0,24697	
698	1986-0008-0782-9000	235	190	85	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12816	
701	1986-0008-0790-9000	340	160	75	Vtomex 450 (FEM)	2		0,12309	
704	1986-0008-0789-9000	250	170	70	Vtomex 450 (DLR)	1		0,11743	
704	1986-0008-0789-9000	250	170	70	RayScan 200E (Zeiss)	1		0,23485	0,11743
725	1986-0008-0803-9000	320	200	75	RayScan 200E (Zeiss)	1		0,26670	
726	1986-0008-0807-9000	270	125	65	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13528	
727	1986-0008-0817-9000	170	145	85	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09776	
731	1986-0008-0823-9000	165	160	60	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10913	
737	1986-0008-0820-9001	150	110	90	RayScan 200E (Zeiss)	1		0,15882	
740	1986-0008-0832-9000	190	145	90	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10501	
752	1986-0008-0838-9000	180	160	70	RayScan 200E (Zeiss)	1		0,21394	
757	1986-0008-0836-9000	210	70	45	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07849	
775	1986-0008-0856-9000	110	95	65	Vtomex 450 (FEM)	1		0,06523	
786	1986-0008-0877-9000	165	50	25	Vtomex 450 (FEM)	1		0,06902	
799	1986-0008-0886-9000	200	115	50	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10791	
801	1986-0008-0887-9000	255	120	40	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13458	
803	1986-0008-0891-9000	265	135	100	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13323	
808	1986-0008-0890-9000	260	190	80	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13575	
810	1986-0008-0896-9000	300	165	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,14805	
812	1986-0008-0899-9000	225	140	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12556	
817	1986-0008-0900-9001	235	125	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12593	
818	1986-0008-0906-9000	233	150	65	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12731	
821	1986-0008-0921-9000	185	120	75	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10827	
828	1986-0008-0914-9000	210	130	80	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10986	
829	1986-0008-0908-9000	170	105	50	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08812	
831	1986-0008-0916-9000	395	240	105	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12713	
831	1986-0008-0916-9001	235	150	65	Vtomex 450 (FEM)	2		0,14303	
831	1986-0008-0916-9002	265	140	80	Vtomex 450 (FEM)	1		0,14527	
839	1986-0008-0926-9000	180	150	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10828	
840	1986-0008-0925-9000	200	125	65	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10324	

Grab	Inventar-Nr.	Maße (mm)			Anlage	Anzahl Messungen	Messkreis- erweiterung	Auflösung (mm)	Auflösung ROI (mm)
		L	B	St					
848	1986-0008-0931-9000	275	155	100	Vtomex 450 (FEM)	1		0,14111	
854	1986-0008-0949-9000	330	160	90	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10379	
861	1986-0008-0936-9000	180	150	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10828	
862	1986-0008-0938-9000	115	85	45	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07257	
868	1986-0008-0956-9000	240	130	80	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12713	
868	1986-0008-0956-9001	120	75	50	Vtomex 450 (FEM)	1		0,06698	
869	1986-0008-0954-9000	185	100	90	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11361	
874	1986-0008-0970-9000	240	160	105	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13100	
875	1986-0008-0958-9000	175	125	75	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09782	
876	1986-0008-0966-9000	385	155	115	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11096	
876	1986-0008-0966-9001	185	185	105	Vtomex 450 (FEM)	2		0,11497	
877	1986-0008-0957-9000	185	110	65	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09868	
878	1986-0008-0960-9000	265	130	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13387	
879	1986-0008-0964-9000	150	120	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10107	
881	1986-0008-0971-9000	410	325	150	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12759	
881	1986-0008-0971-9001	150	120	115	Vtomex 450 (FEM)	2		0,09015	
887	1986-0008-0969-9000	130	85	35	Vtomex 450 (FEM)	1		0,06820	
888	1986-0008-0967-9000	300	290	115	RayScan 200E (Zeiss)	1		0,32817	
888	1986-0008-0967-9001	165	140	55	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09231	
891	1986-0008-0994-9000	165	110	55	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09341	
892	1986-0008-0975-9000	330	175	85	Vtomex 450 (FEM)	2		0,13065	
893	1986-0008-0976-9000	145	65	20	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07126	
894	1986-0008-0977-9000	95	50	25	Vtomex 450 (FEM)	1		0,05198	
898	1986-0008-0983-9000	130	60	25	Vtomex 450 (FEM)	1		0,06536	
899	1986-0008-0986-9000	80	70	35	Vtomex 450 (FEM)	1		0,04736	
901	1986-0008-0984-9000	190	180	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11988	
901	1986-0008-0984-9001	230	145	110	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11175	
902	1986-0008-0992-9000	230	120	60	RayScan 200E (Zeiss)	1		0,17061	
903	1986-0008-0985-9000	170	150	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12045	
903	1986-0008-0985-9001	225	100	75	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09678	
904	1986-0008-0987-9000	155	100	50	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08461	
907	1986-0008-0990-9000	225	190	90	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11776	
909	1986-0008-0998-9000	135	100	50	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07344	
910	1986-0008-0995-9000	150	120	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08580	
911	1986-0008-1018-9000	70	70	40	RayScan 200E (Zeiss)	1		0,07883	
918	1986-0008-1000-9000	200	130	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10405	
922	1986-0008-1007-9000	175	115	85	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10639	
923	1986-0008-1008-9000	115	100	30	Vtomex 450 (FEM)	1		0,06829	
924	1986-0008-1004-9000	125	60	30	Vtomex 450 (FEM)	1		0,06311	
925	1986-0008-1009-9000	195	100	45	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10540	
928	1986-0008-1011-9000	195	130	80	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09799	
932	1986-0008-1026-9000	85	60	55	Vtomex 450 (FEM)	1		0,05170	
932	1986-0008-1026-9001	85	75	45	Vtomex 450 (FEM)	1		0,06152	
932	1986-0008-1026-9002	160	100	50	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08581	
937	1986-0008-1022-9000	135	100	55	Vtomex 450 (FEM)	1		0,06829	
946	1986-0008-1032-9000	235	170	100	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11621	
954	1986-0008-1043-9000	280	180	95	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13551	
955	1986-0008-1041-9000	170	100	35	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09086	
979	1986-0008-1064-9000	230	65	65	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08587	

Grab	Inventar-Nr.	Maße (mm)			Anlage	Anzahl Messungen	Messkreis- erweiterung	Auflösung (mm)	Auflösung ROI (mm)
		L	B	St					
988	1986-0008-1074-9000	310	165	100	Vtomex 450 (FEM)	2	0,11188		
992	1986-0008-1078-9000	220	115	55	Vtomex 450 (FEM)	1	0,11957		
1001	1986-0008-1087-9000	85	80	45	Vtomex 450 (FEM)	1	0,05170		
1001	1986-0008-1087-9001	180	140	70	Vtomex 450 (FEM)	1	0,09072		
1014	1986-0008-1100-9000	390	250	100	RayScan 200E (Zeiss)	2	0,28290	0,15223	
1014	1986-0008-1100-9001	95	90	40	Vtomex 450 (FEM)	1	0,05497		
1019	1986-0008-1105-9000	210	120	50	Vtomex 450 (FEM)	1	0,10540		
1021	1986-0008-1107-9000	170	160	65	Vtomex 450 (FEM)	1	0,10268		
1022	1986-0008-1108-9001	165	105	35	Vtomex 450 (FEM)	1	0,08894		
1028	1986-0008-1114-9000	350	175	85	Vtomex 450 (FEM)	2	0,11621		
1033	1986-0008-1119-9000	260	250	115	Vtomex 450 (FEM)	1	0,13060		
1033	1986-0008-1119-9001	120	105	35	Vtomex 450 (FEM)	1	0,06829		
1034	1986-0008-1120-9000	190	80	55	Vtomex 450 (FEM)	1	0,09799		
1036	1986-0008-1122-9000	235	160	70	Vtomex 450 (FEM)	1	0,11703		
1041	1986-0008-1126-9000	200	110	80	Vtomex 450 (FEM)	1	0,10385		
1044	1986-0008-1131-9000	170	130	55	Vtomex 450 (FEM)	1	0,10639		
1048	1986-0008-1133-9000	120	100	70	Vtomex 450 (FEM)	1	0,06017		
1049	1986-0008-1134-9000	155	130	85	Vtomex 450 (FEM)	1	0,10228		
1051	1986-0008-1136-9000	185	125	80	Vtomex 450 (FEM)	1	0,10208		
1056	1986-0008-1142-9000	400	250	115	Vtomex 450 (FEM)	1	0,14570		
1061	1986-0008-1146-9000	315	155	70	Vtomex 450 (FEM)	2	0,13060		
1064	1986-0008-1150-9000	360	165	105	Vtomex 450 (FEM)	1	0,11994		
1069	1986-0008-1155-9000	120	60	40	Vtomex 450 (FEM)	1	0,06010		
1072	1986-0008-1158-9000	185	140	85	Vtomex 450 (FEM)	1	0,10536		
1076	1986-0008-1162-9000	265	125	45	Vtomex 450 (FEM)	1	0,13504		
1079	1986-0008-1165-9000	275	245	90	Vtomex 450 (FEM)	1	0,13823		
1080	1986-0008-1166-9000	170	145	55	Vtomex 450 (FEM)	1	0,09890		
1086	1986-0008-1171-9000	220	140	70	Vtomex 450 (FEM)	1	0,11904		
1086	1986-0008-1171-9001	190	120	50	Vtomex 450 (FEM)	1	0,10117		
1090	1986-0008-1176-9000	210	210	40	Vtomex 450 (FEM)	1	0,10837		
1092	1986-0008-1179-9000	115	90	60	Vtomex 450 (FEM)	1	0,06536		
1093	1986-0008-1185-9010	105	130	40	Vtomex 450 (FEM)	1	0,11425		
1094	1986-0008-1177-9000	140	110	60	Vtomex 450 (FEM)	1	0,07784		
1098	1986-0008-1187-9000	165	80	55	Vtomex 450 (FEM)	1	0,08581		
1102	1986-0008-1186-9000	110	100	50	Vtomex 450 (FEM)	1	0,07361		
1103	1986-0008-1189-9000	175	150	60	Vtomex 450 (FEM)	1	0,11229		
1106	1986-0008-1191-9000	270	85	65	Vtomex 450 (FEM)	1	0,09557		
1110	1986-0008-1192-9000	200	145	65	Vtomex 450 (FEM)	1	0,11992		
1115	1986-0008-1203-9000	295	80	60	Vtomex 450 (FEM)	2	0,08583		
1119	1986-0008-1219-9000	355	95	50	Vtomex 450 (FEM)	3	0,07459		
1122	1986-0008-1209-9000	325	210	90	Vtomex 450 (FEM)	2	0,12487		
1123	1986-0008-1206-9000	105	70	45	Vtomex 450 (FEM)	1	0,06843		
1125	1986-0008-1205-9000	230	220	80	RayScan 200E (Zeiss)	1	0,28164		
1127	1986-0008-1220-9000	325	205	95	Vtomex 450 (FEM)	2	0,12555	0,05911	
1130	1986-0008-1221-9000	255	170	90	Vtomex 450 (FEM)	2	0,10934		
1131	1986-0008-1213-9000	140	100	60	Vtomex 450 (FEM)	1	0,07475		
1131	1986-0008-1213-9001	95	75	60	Vtomex 450 (FEM)	1	0,06879		
1131	1986-0008-1213-9002	155	110	65	Vtomex 450 (FEM)	1	0,08501		
1131	1986-0008-1213-9003	270	90	60	RayScan 200E (Zeiss)	1	0,09729		

Grab	Inventar-Nr.	Maße (mm)			Anlage	Anzahl Messungen	Messkreis- erweiterung	Auflösung (mm)	Auflösung ROI (mm)
		L	B	St					
1132	1986-0008-1214-9000	115	115	30	Vtomex 450 (FEM)	1		0,06488	
1134	1986-0008-1217-9000	170	105	60	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09560	
1134	1986-0008-1217-9001	75	60	55	Vtomex 450 (FEM)	1		0,06826	
1139	1986-0008-1225-9000	270	90	65	Vtomex 450 (FEM)	2		0,07625	
1148	1986-0008-1239-9000	360	180	90	Vtomex 450 (FEM)	2		0,12343	
1152	1986-0008-1235-9000	200	100	80	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11540	
1155	1986-0008-1240-9000	165	100	55	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08810	
1158	1986-0008-1253-9000	205	165	110	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13374	
1158	1986-0008-1253-9001	240	115	80	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11538	
1166	1986-0008-1256-9000	140	115	45	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07790	
1169	1986-0008-1254-9000	150	125	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09964	
1172	1986-0008-1257-9000	270	155	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,14869	
1177	1986-0008-1261-9000	215	160	85	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11367	
1178	1986-0008-1262-9000	150	110	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09593	
1181	1986-0008-1266-9000	260	180	90	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13977	
1182	1986-0008-1269-9000	140	75	45	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07406	
1182	1986-0008-1269-9001	120	100	65	Vtomex 450 (FEM)	1		0,09250	
1183	1986-0008-1270-9000	205	175	80	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13396	
1186	1986-0008-1271-9000	275	175	110	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13611	
1189	1986-0008-1275-9000	180	120	80	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10902	
1191	1986-0008-1274-9000	135	120	80	Vtomex 450 (FEM)	1		0,07843	
1204	1986-0008-1291-9000	180	130	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10460	
1209	1986-0008-1296-9000	160	120	30	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08458	
1220	1986-0008-1309-9000	210	165	85	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11932	
1227	1986-0008-1314-9000	325	175	80	Vtomex 450 (FEM)	2		0,11077	
1231	1986-0008-1320-9000	375	260	130	Vtomex 450 (FEM)	3		0,09203	
1232	1986-0008-1317-9000	150	80	45	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08864	
1260	1986-0008-1366-9000	220	210	115	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12446	
1267	1986-0008-1351-9000	205	130	75	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12046	
1268	1986-0008-1357-9000	315	275	90	Vtomex 450 (FEM)	2		0,12356	
1272	1986-0008-1353-9000	230	185	85	Vtomex 450 (FEM)	1		0,12194	
1277	1986-0008-1364-9000	420	215	115	Vtomex 450 (FEM)	2		0,12806	
1278	1986-0008-1363-9000	215	135	85	Vtomex 450 (FEM)	1		0,14111	
1279	1986-0008-1365-9000	385	190	100	Vtomex 450 (FEM)	2		0,12352	
1281	1986-0008-1367-9000	320	170	130	Vtomex 450 (FEM)	2		0,11550	
1285	1986-0008-1368-9000	245	120	100	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13220	
1286	1986-0008-1374-9000	295	200	90	Vtomex 450 (FEM)	1		0,15494	
1286	1986-0008-1374-9001	125	100	65	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08464	
1290	1986-0008-1376-9000	470	280	130	Vtomex 450 (FEM)	2		0,14882	
1291	1986-0008-1378-9000	260	215	140	Vtomex 450 (FEM)	2		0,08855	
1297	1986-0008-1383-9000	175	160	95	Vtomex 450 (FEM)	1		0,11932	
1298	1986-0008-1384-9000	310	220	90	Vtomex 450 (FEM)	2		0,09207	
1299	1986-0008-1385-9000	350	195	165	Vtomex 450 (FEM)	2		0,14098	
1299	1986-0008-1385-9001	130	90	65	Vtomex 450 (FEM)	1		0,08341	
1299	1986-0008-1385-9002	195	110	70	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10989	
1301	1986-0008-1389-9000	270	145	95	Vtomex 450 (FEM)	1		0,14210	
1303	1986-0008-1392-9000	280	190	100	Vtomex 450 (FEM)	1		0,10031	
1305	1986-0008-1391-9000	250	135	80	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13072	
1308	1986-0008-1395-9000	245	145	120	Vtomex 450 (FEM)	1		0,13999	

A 11.1.3 Übersicht über die untersuchten Einzelobjekte

Die Tabelle A.3 gibt einen Überblick über die untersuchten Spathen, über die Anzahl der Messungen und die mit dem μ -RCT-System Vtomex 450 erzielten Auflösungen. In der Tabelle A.4 sind alle weiteren Objekte aufgeführt, die anhand der μ -RCT (Vtomex 450), der Sub- μ -RCT und der NCT gemessen wurden.

Tab. A.3: Übersicht der Spathen mit Klingenmaßen und erzielten Auflösungen

Grab	Inventar-Nr.	Maße (mm)			in Block- bergung	Anzahl Messungen	Auflösung (mm)
		L (Klinge + Griffangel)	B (Klinge)	St (Klinge)			
15	1986-0008-0015-0003	850	47	5		4	0,15219
38	1986-0008-0040-0019	~ 830 (fragm.)	48	5		8	0,07973
39	1986-0008-0043-0001	843	49	5		4	0,15063
40	1986-0008-0045-0006	881	55	7		4	0,06000
45	1986-0008-0057-0002	~ 880 (fragm.)	48	6	X	3	0,16627
46	1986-0008-0050-0001	921	48	5		7	0,08023
54	1986-0008-0060-0001	930	59	7	X	3	0,12627
65	1986-0008-0076-0001	844	45	6		4	0,15665
99	1986-0008-0109-0013	911	49	5		7	0,07156
107	1986-0008-0117-0012	821	55	6	X	3	0,16469
120	1986-0008-0129-0008	879	48	6		4	0,12738
144	1986-0008-0159-0008	872	60	7	X	5	0,16644
151	1986-0008-0179-0006	928	48	5		9	0,07973
202	1986-0008-0244-0010	896	52	6		4	0,12633
205	1986-0008-0247-0002	820	42	7		7	0,06484
221/235	1986-0008-0270-0019	749	48	5		4	0,15712
236	1986-0008-0276-0001	824	41	4		8	0,07973
242	1986-0008-0285-0014	880	50	6		5	0,13789
250	1986-0008-0293-0001	897	52	8	X	4	0,15448
262	1986-0008-0302-0014	875	51	5		7	0,08023
273	1986-0008-0325-0001	853	46	6		8	0,08023
284	1986-0008-0338-0017	940	47	6	X	4	0,16166
305	1986-0008-0381-0001	840	40	5		8	0,08023
314	1986-0008-0369-0001	836	48	5		8	0,07973
320	1986-0008-0406-0001	830	42	4		8	0,07973
335	1986-0008-0416-0001	910	52	6	X	4	0,15009
345	1986-0008-0425-0010	875	55	6	X	3	0,16545
360	1986-0008-0433-0001	830	46	5		8	0,08023
370	1986-0008-0447-0001	846	46	5		6	0,08009
372	1986-0008-0453-0001	914	49	5		8	0,08009
383	1986-0008-0458-0001	904	58	6		8	0,08023
438	1986-0008-0514-0007	830	52	4		8	0,07973
442	1986-0008-0522-0008	870	51	6	X	4	0,12457
450	1986-0008-0528-0002	883	47	6		4	0,12567
451	1986-0008-0531-0001	813	45	5	X	4	0,13072
468	1986-0008-0542-0001	820	48	5		8	0,07973
493	1986-0008-0595-0008	~ 940 (fragm.)	52	6		5	0,12865
494	1986-0008-0573-0002	928	61	8	X	4	0,15005
499	1986-0008-0573-0012	~ 960 (fragm.)	48	5		7	0,07972

Grab	Inventar-Nr.	Maße (mm)			in Block- bergung	Anzahl Messungen	Auflösung (mm)
		L (Klinge + Griffangel)	B (Klinge)	St (Klinge)			
500	1986-0008-0580-0011	850	65	6	X	4	0,13295
505	1986-0008-0584-0001	915	50	5		9	0,08023
507	1986-0008-0602-0009	898	48	5		7	0,07964
522	1986-0008-0604-0001	898	48	5		10	0,07973
525	1986-0008-0616-0001	~ 870 (fragm.)	50	6		9	0,08023
538	1986-0008-0628-0001	~ 820 (fragm.)	46	6		7	0,07372
539	1986-0008-0614-0003	~ 760 (fragm.)	45	4		8	0,08023
541	1986-0008-0624-0001	874	49	4		8	0,07973
545	1986-0008-0627-0001	~ 930 (fragm.)	52	5		7	0,08009
552	1986-0008-0644-0001	873	50	5		8	0,07973
555	1986-0008-0632-0002	845	50	5		7	0,07973
564	1986-0008-0638-0002	748	42	4		7	0,07973
565	1986-0008-0640-0001	938	45	4		8	0,07973
586	1986-0008-0668-0002	869	47	4		8	0,07973
589	1986-0008-0670-0016	884	56	6		4	0,13957
591	1986-0008-0675-0001	922	48	4		9	0,07973
638	1986-0008-0719-0001	744	45	4		7	0,07973
659	1986-0008-0750-0007	889	51	5		7	0,07973
680	1986-0008-0767-0006	895	47	5		8	0,07973
704	1986-0008-0789-0001	918	50	5		9	0,08023
714	1986-0008-0800-0001	894	50	4		9	0,07973
721	1986-0008-0802-0001	905	50	5		8	0,08023
724	1986-0008-0813-0001	868	44	4		8	0,08002
729	1986-0008-0814-0001	844	54	5		9	0,08002
748	1986-0008-0830-0008	878	47	4		8	0,08002
765	1986-0008-0853-0001	871	48	5		8	0,08002
774	1986-0008-0851-0003	~ 920 (fragm.)	45	3		9	0,07970
784	1986-0008-0866-0001	~ 840 (fragm.)	48	5		8	0,07970
792	1986-0008-0873-0001	~ 850 (fragm.)	47	5		8	0,07970
799	1986-0008-0886-0005	900	48	5		8	0,07970
801	1986-0008-0887-0009	901	47	4		9	0,07970
833	1986-0008-0915-0002	810	48	5		8	0,07970
836	1986-0008-0923-0001	881	45	4		9	0,07970
839	1986-0008-0926-0002	860	45	4		8	0,07970
845	1986-0008-0929-0001	895	50	5		9	0,07970
858	1986-0008-0962-0005	892	49	4		8	0,07970
862	1986-0008-0938-0017	870	48	5		8	0,07970
876	1986-0008-0966-0002	858	50	4		8	0,07970
886	1986-0008-0972-0002	782	46	4		8	0,07970
898	1986-0008-0983-0002	852	39	3		8	0,07970
900	1986-0008-0991-0001	~ 860 (fragm.)	40	4		9	0,07970
906	1986-0008-0989-0002	816	48	5		8	0,07970
917	1986-0008-1005-0001	877	48	5		8	0,07970
931	1986-0008-1019-0001	848	43	4		8	0,07970
942	1986-0008-1037-0001	884	48	5		8	0,07970
956	1986-0008-1042-0002	862	47	4		8	0,07970
977	1986-0008-1061-0001	810	40	4		8	0,07970
1000	1986-0008-1086-0006	841	47	5		8	0,07970
1004	1986-0008-1090-0001	~ 870 (fragm.)	45	4		8	0,07970

Grab	Inventar-Nr.	Maße (mm)			in Block- bergung	Anzahl Messungen	Auflösung (mm)
		L (Klinge + Griffangel)	B (Klinge)	St (Klinge)			
1017	1986-0008-1103-0011	913	53	5		8	0,07970
1019	1986-0008-1105-0002	861	39	4		8	0,07970
1029	1986-0008-1115-0001	895	50	5		8	0,07970
1046	1986-0008-1132-0003	934	50	4		9	0,07970
1068	1986-0008-1156-0001	912	48	4		8	0,07970
1069	1986-0008-1155-0001	870	40	4		8	0,07970
1079	1986-0008-1165-0001	863	52	4		8	0,07970
1081	1986-0008-1172-0010	~ 370 (fragm.)	40	4		4	0,07970
1098	1986-0008-1187-0001	867	50	5		8	0,07970
1101	1986-0008-1188-0001	850	40	4		5	0,13706
1119	1986-0008-1219-0016	~ 800 (fragm.)	32	?		8	0,07970
1119	1986-0008-1219-9003	278 (Fragm.)	40	4		8	0,07970
1129	1986-0008-1212-0001	877	50	5		8	0,07970
1185	1986-0008-1276-0002	837	44	4		8	0,07970
1188	1986-0008-1273-0007	908	50	4		9	0,07970
1283	1986-0008-1371-0006	~ 800 (fragm.)	39	4		8	0,07970
1286	1986-0008-1374-0005	~ 870 (fragm.)	46	5		8	0,07970

Tab. A.4: Übersicht über die untersuchten Einzelobjekte, Methoden und erzielten Auflösungen

Grab	Inventar.-Nr.	Objekt	Material	Maße (mm)			Methode	Auflösung
				L	B	St		
15	1986-0008-0015-9038	Riemenzunge	Ag, Cu-Leg., Fe	19	12	4	μ-RCT	0,02447
40	1986-0008-0045-0006	Spathaknauf	Fe, Holz	61	41	20	Sub-μ-RCT	0,02500
40	1986-0008-0045-0006	Probe	Holz	5	3	1	Sub-μ-RCT	0,00240
42	1986-0008-0046-0002	Beschlag	Cu-Leg., Fe	58	53	3	μ-RCT	0,05125
66	1986-0008-0077-0003	Fibel	Ag, Au, Cu-Leg.	60,5	60,5	8	μ-RCT	0,06804
66	1986-0008-0077-0013	Fibel	Ag, Au, Fe, Niello	106	42	3	μ-RCT	0,06492
129	1986-0008-0146-0002	Riemenzunge	Cu-Leg., Holz, Textil	42	32	3	NCT	0,10000
129	1986-0008-0146-0002	Fragment	Textil	12	7,5	2	NCT	0,03000
144	1986-0008-0159-0004	Riemenzunge	Ag, Cu-Leg., Fe	65,5	27,5	4,5	μ-RCT	0,07193
144	1986-0008-0159-0005	Beschlag	Ag, Cu-Leg., Fe	35	27	4,5	μ-RCT	0,07077
144	1986-0008-0159-0006	Beschlag	Ag, Cu-Leg., Fe	38	22	4	μ-RCT	0,07077
144	1986-0008-0159-0007	Beschlag	Ag, Cu-Leg., Fe	31,5	25	3	μ-RCT	0,07193
144	1986-0008-0159-9001	Riemenzunge	Ag, Cu-Leg., Fe	38,5	28	4,5	μ-RCT	0,08063
144	1986-0008-0159-9002	Riemenzunge	Ag, Cu-Leg., Fe	28,5	26,5	8	μ-RCT	0,08063
144	1986-0008-0159-9003	Riemenzunge	Ag, Cu-Leg., Fe	37,5	26,5	6	μ-RCT	0,08063
169	1986-0008-0192-0001	Sax	Fe	663	59	30	μ-RCT	0,12688
200	1986-0008-0240-0017	Goldfaden	Au	15	8	0,4	μ-RCT	0,03944
200	1986-0008-0240-0037	Goldfaden	Au	29	8	0,4	Sub-μ-RCT	0,01400
200	1986-0008-0240-9004	Goldfaden	Au	18	8	0,4	Sub-μ-RCT	0,01572
203	1986-0008-0245-0007	Riemenzunge	Ag, Fe, Textil	95	35	4,5	μ-RCT	0,09294
204	1986-0008-0246-0001	Fibel	Au, Cu-Leg., Glas, Granat	51,5	51,5	15	μ-RCT	0,06804
221/235	1986-0008-0270-0049	Schnalle	Ag, Cu-Leg., Fe	90	42	25	μ-RCT	0,05011
401	1986-0008-0483-0020	Riemenzunge	Ag, Cu-Leg.	80	27	4	μ-RCT	0,04996
450	1986-0008-0528-0006	Sax	Cu-Leg., Fe	362	82	20	μ-RCT	0,11044
450	1986-0008-0528-9000	Saxscheide	Cu-Leg., Fell, Holz, Leder		65		μ-RCT	0,10097
460	1986-0008-0535-0001	Fibel	Ag, Au, Granat	33	33	4,5	μ-RCT	0,06012
532	1986-0008-0610-0001	Fibel, Perlen	Cu-Leg., Glas, Sn	42,5	42,5	12	μ-RCT	0,05601
637	1986-0008-0726-0134	Fibel	Ag, Au, Granat	40,5	40,5	5	μ-RCT	0,04327
695	1986-0008-0781-0010	Goldfaden	Au	27	27	2	Sub-μ-RCT	0,00776
771	1986-0008-0862-0004	Spiegel	Cu-Leg.	35,5	33	3	Sub-μ-RCT	0,01860
778	1986-0008-0857-0017	Fibel	Cu-Leg.	36,5	36,5	4	μ-RCT	0,02933
795	1986-0008-0881-9000	Goldgewebe	Au	12	7	4	Sub-μ-RCT	0,00475
817	1986-0008-0900-9000	Anhänger	Cu-Leg.	16	16	1	μ-RCT	0,01539
911	1986-0008-1018-9011	Ohring	Ag, Glas	17	14	14	Sub-μ-RCT	0,01500
972	1986-0008-1059-0012	Anhänger	Ag, Cu-Leg., Mineral	41,5	32	32	Sub-μ-RCT	0,02193
1010	1986-0008-1096-0008	Anhänger	Cu-Leg., Mineral	24,5	21	21	Sub-μ-RCT	0,01365
1039	1986-0008-1129-0017	Fibel	Ag, Au, Fe, Niello, Textil	50	40	2,5	μ-RCT	0,06475
1039	1986-0008-1129-0018	Fibel	Ag, Au, Niello	95	40	2,5	μ-RCT	0,07327
1232	1986-0008-1317-0002	Schnalle	Au/ Cu-Leg./ Fe/ Glas	44	31	9	μ-RCT	0,03409
1308	1986-0008-1395-0005	Fibel	Ag, Au, Textil	24	16,5	1	NCT	0,10000

A 11.2 Dokumentationsbeispiele

A 11.2.1 Blockbergung Grab 799 (Fundbuch Nr. 886, Befund Nr. 908)

A 11.2.1.1 Übersicht

Objektnr. 9000. Blockbergung, Lage: Beckenbereich, Oberschenkel. Maße: L 200, B 115, St 50.



Abb. A.1: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung der Fundsituation, Grab 799, Blockbergung 9000.

A 11.2.1.2 Stratigraphie

Beschreibung frontales Schnittbild 1:

In Planum 1 befindet sich im oberen Bereich der Blockbergung das Messer 9001, das mit der Klingenspitze nach rechts oben und der Klingenschneide nach links oben ausgerichtet ist. Links der Griffangel des Messers 9001 liegt die Bronzeschnalle 9005 mit der Schauseite nach unten (Grabsohle) und dem Dorn nach links. Rechts des Messers 9001 liegt parallel zu diesem die Ahle 9006 aus Eisen. Die Spitze weist nach rechts oben und wird stratigraphisch von der Klinge des Messers

9001 überlagert. Rechts der Ahle 9006 befindet sich ebenfalls in etwa parallel zu diesem der Feuerstahl 9002, dessen spitz zulaufenden Enden nach links oben ausgerichtet sind. Das obere Ende liegt stratigraphisch unter der Klinge des Messers 9001. Unterhalb des Feuerstahls 9002 und rechts der Öse der Ahle 9006 liegt der Silex 9007. Rechts davon verlaufen parallel zueinander zwei Bronzestäbe von rechts oben nach links unten. Der obere Stab 9003 ist an seinen Enden mit Kreuzen verziert. Am unteren Stab 9004 lässt sich eine Punktverzierung am oberen Ende vermuten. Zwischen den Metallobjekten und stratigraphisch über den Eisenobjekten 9002 und 9006 hat sich eine unbestimmbare organische Schicht 9008 großflächig erhalten, bei der es sich um Leder handeln könnte.

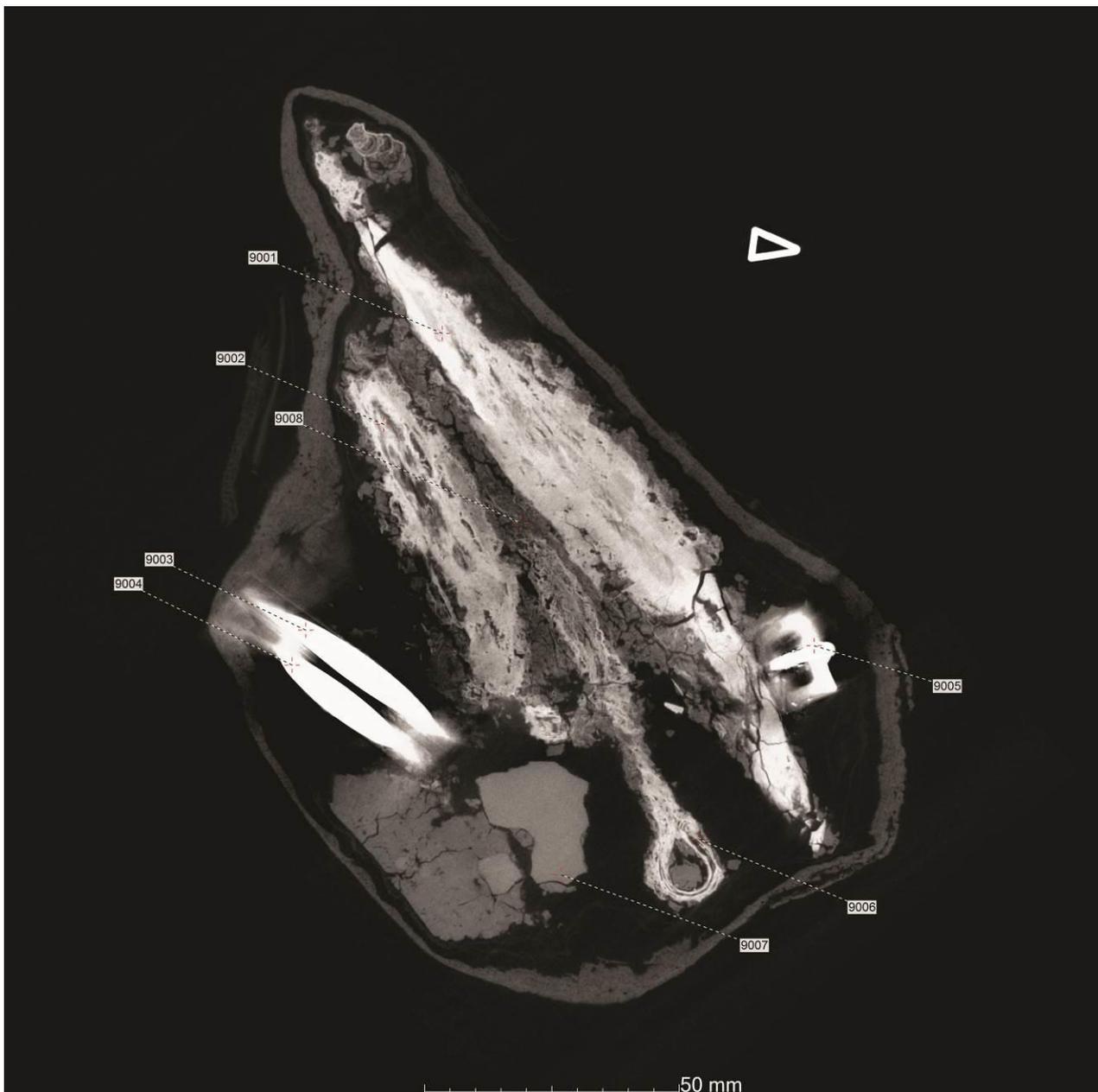


Abb. A.2: Frontales µ-RCT-Schnittbild Planum 1, Grab 799, Blockbergung 9000.

Beschreibung frontales Schnittbild 2:

In Planum 2 befindet sich links unten in der Blockbergung, stratigraphisch unter der Schnalle 9005 (Planum 1), eine Fläche mit organischen längsgerichteten Strukturen 9005_Schicht-A. Rechts oberhalb davon sind stratigraphisch unter der Klinge des Messers 9001 organische Strukturen 9001_Schicht-A zu erkennen, die vermutlich von einer Messerscheide aus Leder stammen. Des Weiteren befindet sich stratigraphisch unter den Eisenobjekten 9001, 9002 und 9006 (Planum 1) eine unbestimmbare organische Schicht 9009, bei der es sich wie bei der Schicht 9008 (Planum 1) um Leder handeln könnte.

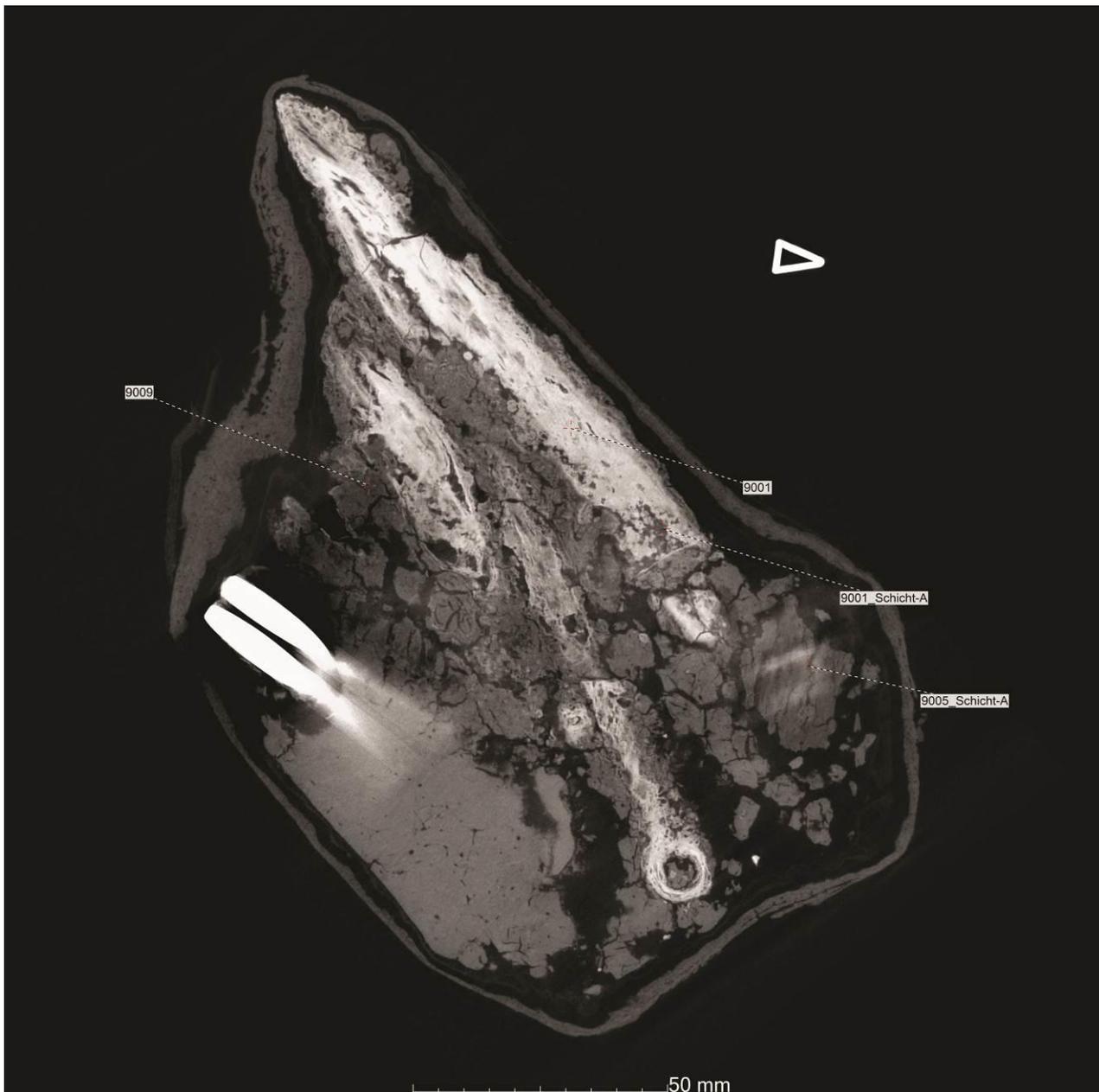


Abb. A.3: Frontales µ-RCT-Schnittbild Planum 2, Grab 799, Blockbergung 9000.

A 11.2.1.3 Objekte

Objektnr. 9001. Messer. Fe, Rücken im vorderen Bereich geknickt, Schneide gebogen; Griffangel mittelständig. L 184, L Klinge 125, B Klinge 28.

Objektnr. 9001_Schicht-A. Die Klinge des Messers wird einseitig von einer Schicht sehr stark abgebauten Leders (A) bedeckt.

Objektnr. 9002. Feuerstahl. Fe. Enden gekrümmt u. spitz zulaufend; Oberkante gewölbt. L 103, B 23, St 4.

Objektnr. 9003. Orakelstäbchen. Cu-Legierung. Länglich mit rundem Qschn. Auf den Enden/Stirnseite unregelmäßiges Kreuz (Gravur). L 54, St 5,5.

Objektnr. 9004. Orakelstäbchen. Cu-Legierung. Länglich mit rundem Qschn. Auf 1 Ende/Stirnseite evtl. unregelmäßige Punktverzierung (Gravur). L 54, St 5,5.

Objektnr. 9005. Schnalle. Cu-Legierung. Rechteckiger Bügel mit flachrechteckigem Qschn., Dornachse abgesetzt. L 12,5, B 19, W 11.

9005_Schicht-A. Die Schauseite des Schnallenbügels wird flächig von sehr stark abgebauten organischen Materialien (A) bedeckt.

Objektnr. 9006. Ahle. Fe. Länglich mit vierkantigem Qschn., 1 Ende spitz zulaufend, 1 Ende zu Öse gebogen; Schaft unterhalb Öse tordiert. L 115, B 12, St 5.

Objektnr. 9007. Silex. L 28, B 24.

Objektnr. 9008 Organik. Unbestimmbar. ca. L 70 B 30 St 3.

Objektnr. 9009 Organik. Unbestimmbar. ca. L 80 B 80 St 5.

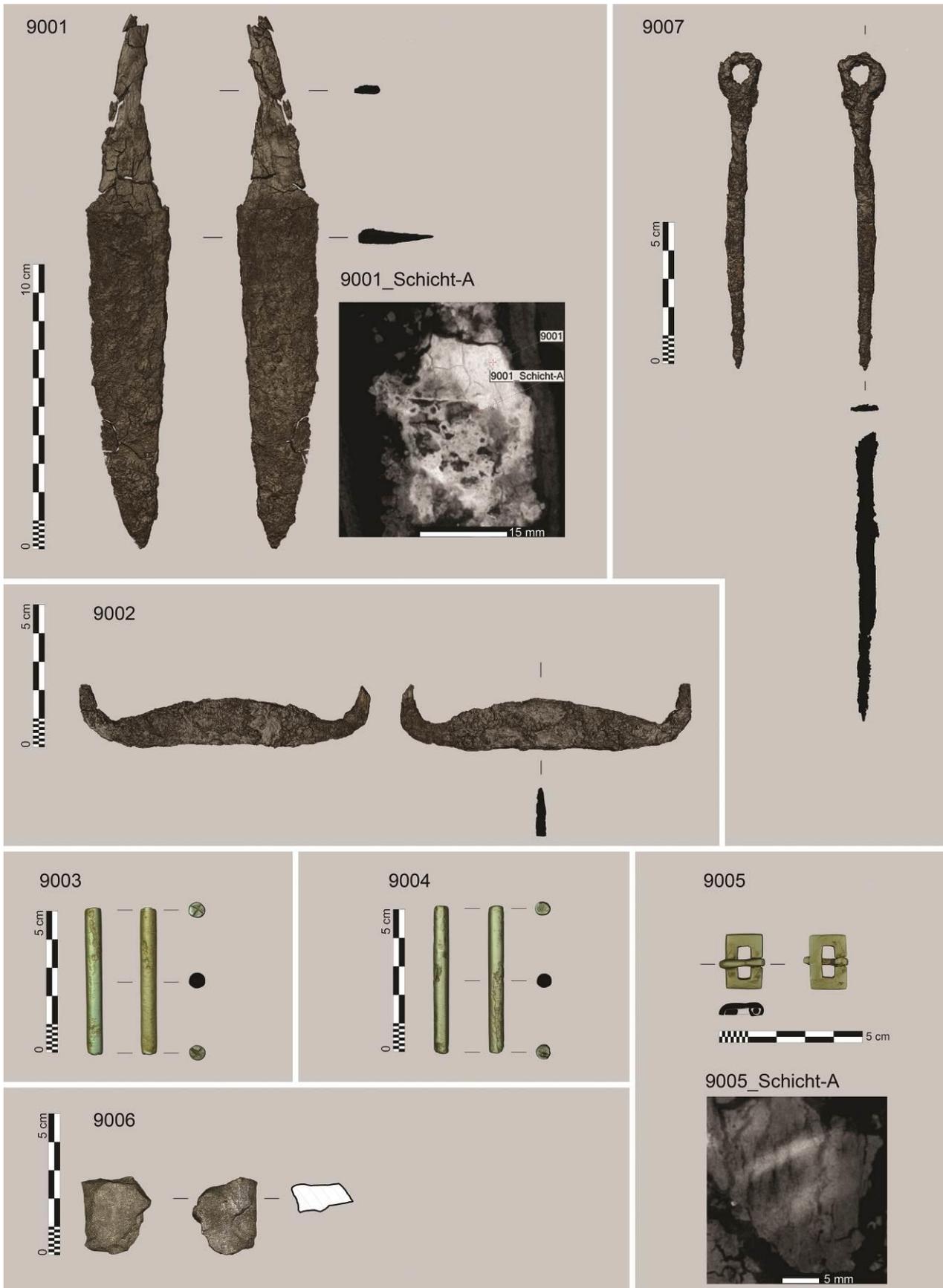


Abb. A.4: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung und Katalogisierung der Objekte in der Blockbergung 9000 aus Grab 799.

A 11.2.2 Blockbergung Grab 821 (Fundbuch Nr. 921, Befund Nr. 906)

A 11.2.2.1 Übersicht

Objektnr. 9000. Blockbergung, Lage: links neben Oberschenkel. Maße: L 185, B 120, St 75.

A 11.2.2.2 Stratigraphie

Beschreibung Schnittbild 1:

In Planum 1 befindet sich der zweireihige Dreilagenkamm 0021 aus Bein in einem mit Kreisaugen verzierten Klappfutteral. Die Reihe mit den feineren Zinken weist nach rechts.



Abb. A.5: Frontales μ -RCT-Schnittbild Planum 1, Grab 821, Blockbergung 9000.

Beschreibung Schnittbild 2:

In Planum 2 hat sich stratigraphisch unter dem Kamm 0021 eine organische Schicht 9001 aus Holz großflächig erhalten.



Abb. A.6: Frontales μ -RCT-Schnittbild Planum 2, Grab 821, Blockbergung 9000.

A 11.2.2.3 Objekte

Objektnr. 21. Kamm. Bein, Fe. Dreilagenkamm, zweireihig mit Futteral. 6 Nieten (Fe) in Mittelleiste, 4 Nieten (Fe) in Futteral. Beidseitig auf Futteralleisten Zirkelornament u. Dreiecke mit Kreisaugenfüllung. Futteral teilw. fragmentiert. nZinken grob 4, nZinken fein 7 auf 10 mm; L gesamt 135, B gesamt 55, St gesamt 9, L Futteralplatte 119, B Futteralplatte 19, L Kamm 100, B Kamm 52, L Mittelleiste 97, B Mittelleiste 14.

Objektnr. 9001. Holz. Grabeinbauten, Sarg

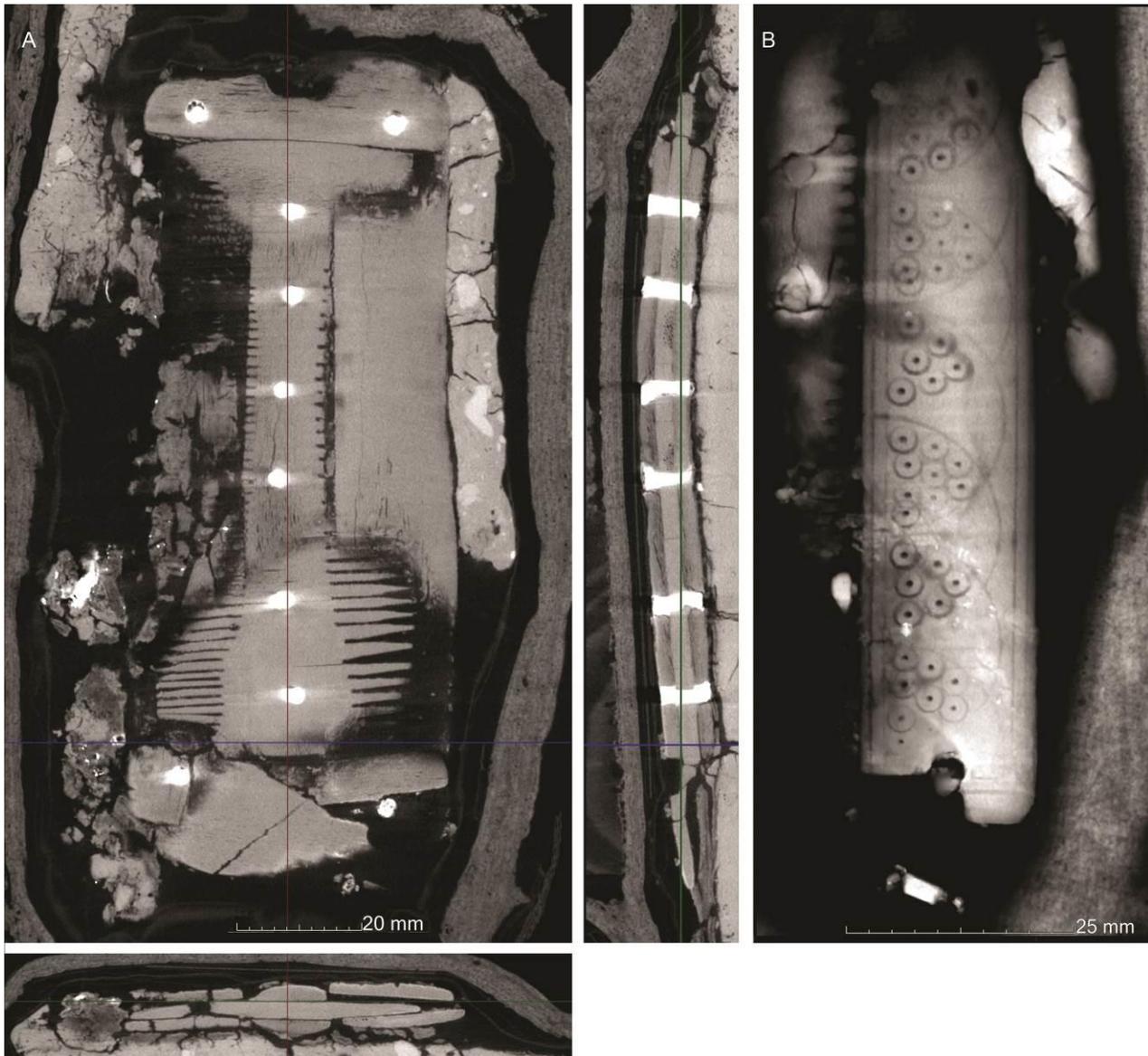


Abb. A.7: μ -RCT-Schnittbilder (A) sowie frontales μ -RCT-Schnittbild (B) der Verzierung auf der Futteralleiste des Kamms in der Blockbergung 900 aus Grab 821.

A 11.2.3 Spatha Grab 801 (Fundbuch Nr. 887, Befund Nr. 915)



Abb. A.8: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung und Katalogisierung der Spatha aus Grab 801.

Objektnr. 9. Spatha. Knauf: Cu-Legierung; massiv, geschwungen pyramidenförmig. Knauf- und Parierplatte nicht vorh., Qsch. Griffangel rechteckig. Klinge: Fe. Anordnung Schulterbereich B nach Mäder (2009); Auflager Form A nach Emmerling (1972; Abb. A.9a). Kein Kern, Schneiden angeschmiedet, keine Hohlkehlen, Qschn. Klinge spitzoval (Abb. A.9b). Schweißmuster: 2 Lagen von je 3 Kompositstäben (tordiert/gerade), Seite 1 Z/I-I/Z-Z/I, mehrfacher Wechsel Z-I-Z zu I-Z-I (Abb. A.9d), Seite 2 I/S-S/I-I/S, mehrfacher Wechsel I-S-I zu S-I-S (Abb. A.9e); Wendungswinkel Seite 1 65°, Seite 2 65°; Halbkreis muster in der Oberfl. teilw. sichtbar (Abb. A.9c); Schweißnaht glatt, Schmiedetextur Schneide längs (Abb. A.9c,d,e). Klinge gebrochen.

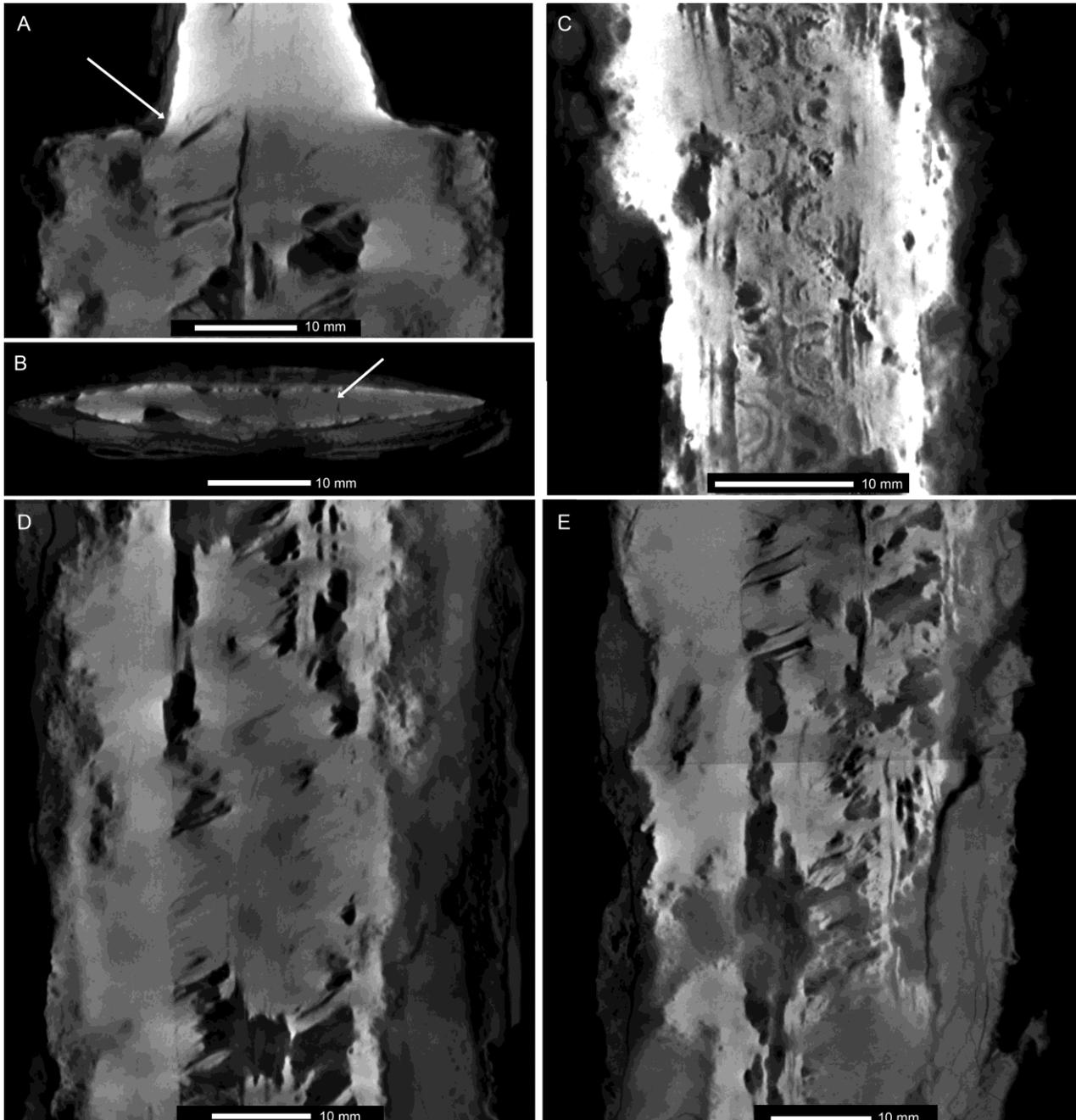


Abb. A.9: μ -RCT-Schnittbilder der Spathaklinge aus Grab 801: Der frontale Schnitt (A) stellt den Übergang der Schneiden und der Kompositstäbe in die Griffangel sowie die Form des Auflagers dar. Der horizontale Schnitt zeigt den Querschnitt der Klinge und den Klingenaufbau mit der Schweißnaht der angeschmiedeten Schneiden. Die horizontalen Schnittbilder (C-E) zeigen das Schweißmuster der Klinge an der Oberfläche (C) sowie ober (D) und unterhalb (E) der Klingenspitze.

Maße: Gesamtlänge Klinge 901, L bis Auflager 777, B Klinge Auflager 47, B Klängenmitte 45, B Klinge 5 cm von Spitze 31, St Klinge Auflager 4, St Klängenmitte 4 St Klinge 5 cm von Spitze 4, B Schweißmuster 19, L Knauf 39, B Knauf 12, St Knauf 11, Schneidenwinkel 19°.

Organische Bestandteile (Abb. A.10): Scheidenaufbau nachweisbar: beidseitig Fell (0009_Schicht-A), stratigraphisch darüber Holz (0009_Schicht-B), stratigraphisch darüber Leder (0009_Schicht-C); Scheidenaufbau rekonstruiert: Fell-Holz-Leder. Gefäß nachweisbar: um Griffangel Holz (0009_Schicht-D), im Bereich des Auflager quergefasertes Holz (0009_Schicht-E); Gefäß rekonstruiert: handhabe aus Holz, evtl. Parierplatte aus Holz.

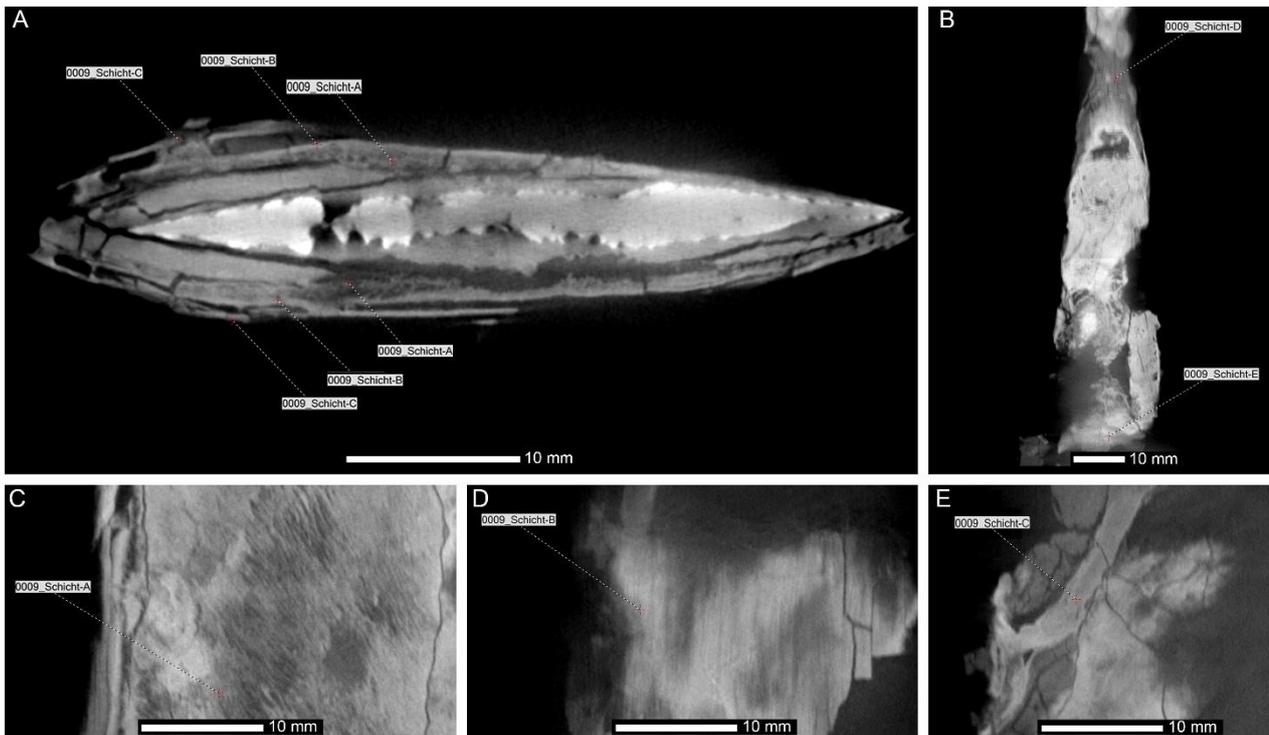


Abb. A.10: μ -RCT-Schnittbilder der organischen Schichten der Spatha aus Grab 801: Der horizontale Schnitt zeigt den Querschnitt der Klinge und die Schichtenabfolge der organischen Materialien, welche in den horizontalen Schnitten im Detail (C-E) dargestellt sind: Fell (C), Holz (D) und Leder (E). Der horizontale Schnitt (B) stellt die hölzernen Reste an der Griffangel dar.

A 11.2.4 Schnalle Grab 221/235 (Fundbuch Nr. 270, Befund Nr. 212)

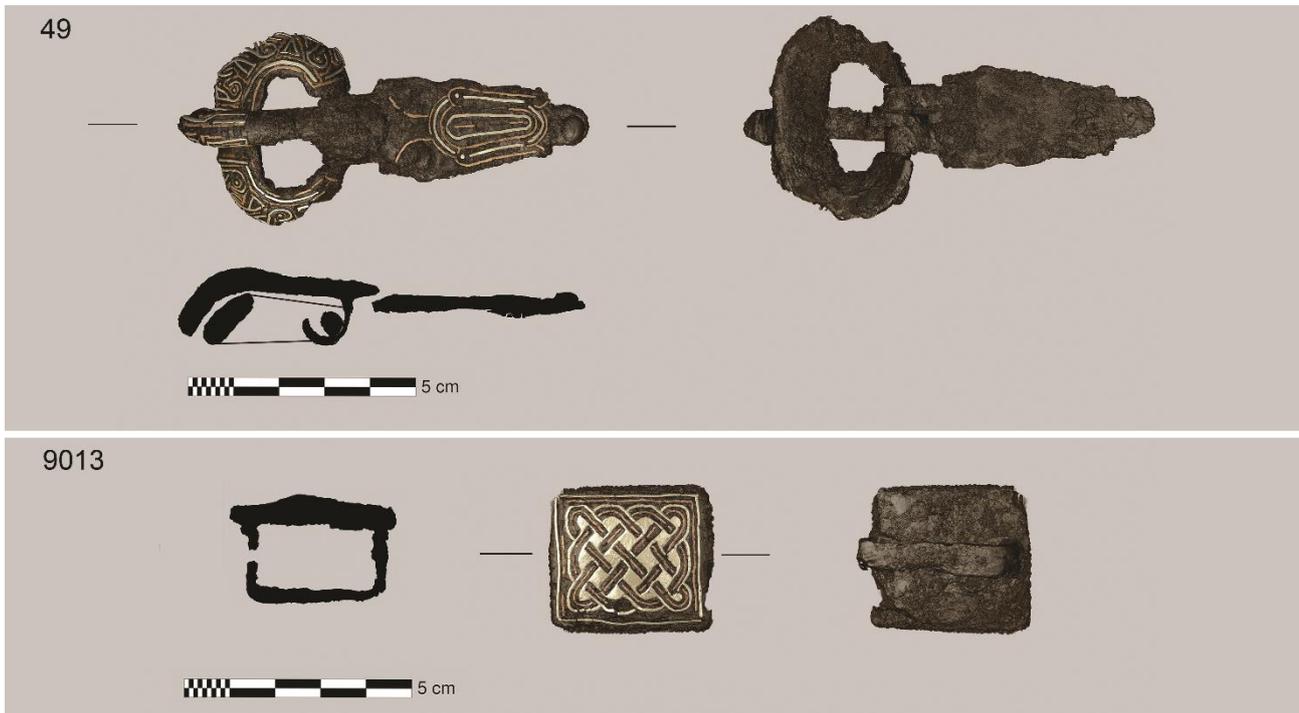


Abb. A.11: Dreidimensionale μ -RCT-Darstellung und Katalogisierung der Schnalle mit Angelbeschlag und des Riemendurchzugs aus Grab 221/235.

Objektnr. 49. Schnalle mit Angelbeschlag. Fe, Ag, Messing. Ovaler Bügel mit geneigtem Qschn., Beschlag trapezförmig mit Endrundel, 3 gewölbte Niete (Fe); bichrome Tauschierung auf Bügel, Dornspitze und Beschlag. L 90, L Schnalle 30, B Schnalle 42, B Bügel 10, Bügelstärke 10, IB Bügel 26, L Beschlag 59, B Beschlag 22, L Dorn 43, B Dorn 7, Dornstärke 5,5, L Dornplatte 15, B Dornplatte 13, Dm Niet 5.

Objektnr. 9013. Riemendurchzug. Fe, Ag, Messing. Rechteckig, bandförmiger Bügel auf Rückseite; bichrome Tauschierung/Plattierung. L 30, B 34, St 5.

A 11.3 Übersicht über die Spathen mit den Merkmalen des Klingenaufbaus

In der Tabelle A.5 sind die untersuchten Spathen und deren Klingenaufbau aufgelistet. Zudem die Angaben zum Schweißmuster und den Kompositstäben.

Tabelle A.5: Merkmale des Klingenaufbaus und des Schweißmusters der Spathen

Grab	Obj. Nr.	Klingen-aufbau	Torsion Lage 1	Torsion Lage 2	Wendelungswinkel	Schweißnaht
15	3	C4	ZS	ZS	beids. 55°	verzahnt
38	19	C5(H)	ZIS	ZS	Lage 1: 60°, Lage 2: 50°	glatt
39	1	A				
40	6	D4	SZ	ZS	beids. 55°	n. best.
45	2	C6	mehrf. SZS zu III	mehrf. SZS zu III	beids. 60°	verzahnt
46	1	C4	ZS	SZ	beids. 70°	verzahnt
54	1	C6	ZSZ	ZSZ	beids. 60°	glatt
65	1	D4	ZS	ZS	beids. 60°	verzahnt
99	13	C6	III zu ZSZ 45 mm u. Aufl.	mehrf. ZSZ zu III	beids. 70°	glatt
107	12	D8	SZSZ	SZSZ	beids. 60°	verzahnt
120	8	D4	SZ	ZS	beids. 60°	glatt
144	8	C4	SZ	SZ	beids. 50°	verzahnt
151	6	C6(H)	mehrf. ISI zu ZIZ	mehrf. ISI zu ZIZ	beids. 60°	glatt
202	10	D6(H)	SZS	SZS	beids. 60°	glatt
205	2	A				
221/235	19	C5	mehrf. ZSZ zu III	SZ	beids. 60°	verzahnt
236	3	C4	SZ	ZS	beids. 60°	glatt
242	14	A				
250	1	C4	ZS	SZ	beids. 60°	glatt
262	14	A				
273	1	A				
284	17	C4	SZ	ZS	beids. 30°	verzahnt
305	1	A				
314	1	C4	SZ	ZS	beids. 50°	glatt
320	1	C4	mehrf. ZI zu IS	SZ	beids. 60°	verzahnt/glatt
335	1	C6(H)	mehrf. SIS zu ISI	mehrf. ISI zu SIS	beids. 60°	glatt
345	10	C4	ZS	ZS	beids. 60°	n. best.
360	1	C4	SZ	ZS	beids. 70°	verzahnt
370	1	C4	mehrf. SI zu IZ	mehrf. SI zu IZ	beids. 70°	verzahnt/glatt
372	1	D4	SZ	SZ	beids. 60°	verzahnt
383	7	D5	mehrf. SZS zu SIS	SZ	Lage 1: 50°, Lage 2: 60°	glatt
438	7	C6	SSS	SZS	beids. 60°	verzahnt
442	8	C4(H)	SZ	SZ	beids. 65°	verzahnt
450	2	D6(H)	SZS	SZS	beids. 60°	verzahnt
451	1	C4(H)	ZS	ZS	beids. 60°	verzahnt
468	1	C4	SZ	SZ	beids. 60°	verzahnt
493	8	C6	mehrf. IZI zu ZIZ	mehrf. SZS zu III	beids. 60°	glatt
494	2	C5	SZ	SZS	Lage 1: 40°, Lage 2: 60°	n. best.
499	12	C6	mehrf. ISI zu ZIZ	mehrf. ISI zu ZIZ	beids. 70°	glatt
500	11	F8(H)	SIZIS (I einlagig)	SIZIS (I einlagig)	beids. 70°	glatt
505	1	C6	SSS	SZS	beids. 70°	verzahnt
507	9	C6(H)	mehrf. SZS zu III	mehrf. SZS zu III	beids. 60°	verzahnt/glatt
522	1	D6	SZS	mehrf. SIZ zu SSZ	beids. 75°	verzahnt
525	1	C4	ZS	ZS	beids. 60°	verzahnt
538	1	C4(H)	ZS	ZS	beids. 65°	verzahnt

Grab	Obj. Nr.	Klingen-aufbau	Torsion Lage 1	Torsion Lage 2	Wendelungswinkel	Schweißnaht
539	3	C8	mehrf. SZSZ zu IIII	mehrf. SZSZ zu IIII	beids. 50°	glatt
541	1	C4	ZZ	SS	beids. 65°	verzahnt
545	1	C4	ZS	ZS	beids. 70°	verzahnt
552	1	C4	ZS	mehrf. SZ zu II	beids. 60°	glatt
555	2	C4	ZS	mehrf. SI zu IZ	beids. 70°	glatt
564	2	B2	SZ		60°	glatt
565	1	C6	mehrf. III zu SZS	mehrf. SZS zu III	beids. 65°	verzahnt/glatt
586	2	C8	mehrf. SZSZ zu IIII	mehrf. ZSZS zu IIII	beids. 60°	verzahnt/glatt
589	16	C4	ZS	ZS	beids. 60°	verzahnt
591	1	C6	mehrf. III zu SSS	mehrf. SSS zu III	beids. 60°	verzahnt/glatt
638	1	B2	II-ZS-II-SS-II-ZS		50°, unterer Teil ZS 30°	glatt
659	7	C6(H)	mehrf. SZS zu III	mehrf. SZS zu III	beids. 70°	glatt
680	6	D8(H)	mehrf. SSSS zu IIII	mehrf. SSSS zu IIII	beids. 60°	verzahnt/glatt
704	1	C6	mehrf. IZI zu SIS	mehrf. IZI zu SIS	beids. 60°	glatt
714	1	D4	SZ	mehrf. IS zu ZI	beids. 70°	verzahnt/glatt
721	1	C6	mehrf. III zu SZS	mehrf. SZS zu III	beids. 60°	verzahnt/glatt
724	1	C6	mehrf. SIS zu IZI	mehrf. IZI zu SIS	beids. 60°	glatt
729	1	C6(H)	SZS	SZS	beids. 60°	verzahnt
748	8	C8	SZSZ	SZSZ	beids. S50°/ZS25°/Z50°	glatt
765	1	G3(H)	s. Besch. S. ???	SZ	Lage 1: 65°, Lage 2: 60°	glatt
774	3	C6	SZS	SZS	beids. 60°	verzahnt
784	1	C6	mehrf. III zu ZSZ	mehrf. ZSZ zu III	beids. 60°	verzahnt/glatt
792	1	E4	SZ	mehrf. SZ zu II	beids. 70°	glatt
799	5	E8	mehrf. IIZZ zu ZZII	mehrf. ZZII zu IIZZ	beids. 60°	glatt
801	9	C6	mehrf. SIS zu ISI	mehrf. ISI zu SIS	beids. 65°	glatt
833	2	C6	SZS	SZS	beids. 70°	verzahnt
836	1	C6	SZS zu III 70 mm u. Aufl.	SZS zu III 70 mm u. Aufl.	beids. 60°	verzahnt/glatt
839	2	C6	SZS	SZS	beids. 60°	verzahnt
845	1	C6	mehrf. SZS zu III	mehrf. SZS zu III	beids. 65°	verzahnt/glatt
858	5	G6	ZSZ	s. Beschr. S. ???	beids. 65°	verzahnt/glatt
862	17	C6	SZS	mehrf. SZS zu III	beids. 65°	glatt
876	2	C6	III zu SZS 180 mm u. Aufl.	III zu SZS 180 mm u. Aufl.	beids. 65°	verzahnt/glatt
886	2	B2	ZS		40°	glatt
898	2	B1	I zu Z 50 mm u. Aufl.		45°	glatt
900	1	E4	ZS	mehrf. unregelm. IS zu ZS zu ZI	beids. 60°	glatt
906	2	D4	SZ	ZS	beids. 50°	verzahnt
917	1	D6	SZS	SSZ	beids. 60°	verzahnt
931	1	D4	mehrf. ZS zu II	ZS	beids. 60°	verzahnt/glatt
942	1	D8	mehrf. IZIS zu SIZI	mehrf. SIZI zu ISIZ	beids. 60°	glatt
956	2	A				
977	1	D4	mehrf. ZS zu II	mehrf. SZ zu II	beids. 70°	verzahnt/glatt
1000	6	D6(H)	mehrf. SZS zu III	mehrf. SZS zu III	beids. 60°	verzahnt/glatt
1004	1	G4	ZS	s. Beschr. S. ???	beids. 70°	verzahnt
1017	11	D6	mehrf. ISI zu SIS	mehrf. ISI zu SIS	beids. 60°	glatt
1019	2	E4	mehrf. SI zu SZ, mittig einf. IZ	mehrf. ZS zu II	beids. 65°	verzahnt/glatt
1029	1	D6	ZSZ	mehrf. ZSZ zu III	beids. 60°	verzahnt/glatt
1046	3	E6	SZS	SZS	beids. 65°	verzahnt
1068	1	C6	SZS	SZS	beids. 65°	verzahnt
1069	1	A				
1079	1	C6	III zu SZS 50 mm u. Aufl.	III zu SZS 35 mm u. Aufl.	beids. 65°	verzahnt/glatt
1081	10	H10	s. Besch. S. ???	mehrf. ISISI zu SISIS	beids. 70°	
1098	1	D6	mehrf. ISI zu SIS	mehrf. ISI zu SIS	beids. 65°	glatt
1101	1	D4	ZS	SZ	beids. 60°	verzahnt
1119	16	C6	SZS	SZS	beids. 60°	verzahnt

Grab	Obj. Nr.	Klingen-aufbau	Torsion Lage 1	Torsion Lage 2	Wendelungswinkel	Schweißnaht
1119	9003	B3	mehrf. SZS zu III		50°	glatt
1129	1	B3	SZS		45°	glatt
1185	2	A				
1188	7	F5	ZIZ (I einlagig)	ZIZ (I einlagig)	beids. 60°	glatt
1283	6	D6(H)	mehrf. SZS zu III	mehrf. SIS zu IZI	beids. 60°	verzahnt/glatt
1286	5	D6	mehrf. SSS zu III	mehrf. SSS zu III	beids. 70°	verzahnt/glatt