Rekonstruktion bronzezeitlicher Gießereitechniken mittels numerischer Simulation, gießtechnologischer Experimente und werkstofftechnischer Untersuchungen an Nachguss und Original

Von der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von Diplom-Ingenieurin

Monika Wirth aus Heidelberg

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing.e.h. Peter R. Sahm

Univ.-Prof. em. Dr.rer.nat. Wolfgang Bunk

Tag der mündlichen Prüfung: 17.07.2002

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Gießerei-Institut: Forschung, Entwicklung, Ergebnisse

Band 40

Monika Wirth

Rekonstruktion bronzezeitlicher Gießereitechniken mittels numerischer Simulation, gießtechnologischer Experimente und werkstofftechnischer Untersuchungen an Nachguss und Original

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Shaker Verlag Aachen 2003

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <u>http://dnb.ddb.de</u> abrufbar.

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2002

Copyright Shaker Verlag 2003 Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2045-3 ISSN 1435-6198

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen Telefon: 02407/9596-0 • Telefax: 02407/9596-9 Internet:www.shaker.de • eMail:info@shaker.de

Dank

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des von der VW-Stiftung im Schwerpunkt Archäometallurgie geförderten Projektes "Gießerei in der Bronzezeit – Rekonstruktion der Technik und Untersuchung der wechselseitigen Abhängigkeit von technischem Wissen und Gestaltung der Objekte –".

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e. h. Peter R. Sahm danke ich für die Möglichkeit zur Durchführung dieser Arbeit, deren Gelingen ich nicht zuletzt seinem entgegengebrachten Vertrauen, der kontinuierlichen Unterstützung sowie der gewährten Gestaltungsfreiheit zuzuschreiben habe.

Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Wolfgang G. J. Bunk danke ich für die Übernahme des Korreferats sowie für sein kontinuierliches Interesse am Fortgang meiner Arbeit und seine offene Diskussionsbereitschaft.

Das Gelingen dieser Arbeit verdanke ich auch den Mitarbeiter/innen des Gießerei-Instituts und ACCESS, deren Hilfsbereitschaft ich nicht nur bei der Lösung fachlicher Probleme erfahren durfte. Mein besonderer Dank gilt neben Herrn Dr.-Ing. Rainer Ellerbrok, der mit seinem Interesse am historischen Metallhandwerk immer offen für Diskussionen und Ideen war, auch Joachim Wittich für seine Mitarbeit als studentische Hilfskraft sowie meinen Kolleg/innen Georg Ehlen, Angela Goldbach, Jürgen Wolf und Michael Plagge für ihre freundschaftliche Unterstützung. Nicht vergessen möchte ich an dieser Stelle die Mitarbeiter/innen der Metallographie, insbesondere Elke Schaberger, des Fotolabors und des Sekretariats.

Da diese Arbeit aus einem interdisziplinären Forschungsprojekt hervorging, war ich auf eine konstruktive Zusammenarbeit mit meinen Kolleg/innen von der Prähistorischen Staatssammlung München angewiesen. Ich danke Rupert Gebhard und Ute Steffgen nicht nur für ihren tatkräftigen Einsatz und ihre Diskussionsbereitschaft hinsichtlich der Lösung fachlicher Fragestellungen, sondern auch für den persönlichen Kontakt, der hoffentlich bestehen bleibt.

Abschließend gilt mein Dank meinen Eltern, die mein Studium ermöglicht haben, meinem Ehemann Walter Aretz und allen guten Freunden und Freundinnen, die mich durch Motivation und Rückhalt unterstützt haben.

Inhaltsverzeichnis

0	Kurzfa	ssung	I
1	Einfüh	rung	1
	1.1 Mot	ivation und Zielsetzung	
	1.2 Geo	granhischer und historischer Rahmen	2
	12 000	Randleistanheile	2 1
	1.2.1.	Lappenbeile	
	1.2.3	Bronzekokillen für Lappenbeile	11
	1.2.4	Schwertgriffe	
2	Unters	uchungen zur Herstellung von Randleistenbeilen	
	2.1 Fors	chungsstand	
	2.2 Unte	rsuchungen an den Referenzstücken	
	2.3 Sim	ılation	
	2.3.1	Ermittlung der thermophysikalischen Datensätze	
	2.3.2	Geometrieeingabe und Netzgenerierung	
	2.3.3	Simulationsrechnungen	
	2.3.4	Automatische Parameteroptimierung	
	2.4 Nacl	1güsse	
	2.4.1	Vorbereitende Arbeiten	
	2.4.2	Herstellung der Wachsmodelle	
	2.4.5	Die Formherstellung	
	2.4.5	Das Wachsausschmelzen	
	2.4.6	Der Abguβ	
	2.5 Unte	rsuchungen an Originalfragmenten und Nachgüssen	
	2.5.1	Schmiedeversuche	
	2.5.2	Metallographische Schliffe	
	2.5.3	Härteprüfungen an Originalfragmenten und Nachgüssen	
	2.6 Erge	bnisse	41
	2.6.1	Untersuchungen an den Referenzstücken	41
	2.6.2	Simulationsergebnisse	
	2.0.3	Bewertung aer Nachgusse Fraabnissa aus dan Schmiddovarsuchan	
	2.0.4	Brgeomsse aus den Schnnedeversuchen Rechachtungen an den Schliffhildern	
	2.6.6	Ergebnisse der Härteprüfungen	
	2.7 Zusa	mmenfassung und Interpretation der Ergebnisse	

3	Lappen	beilherstellung in Bronzekokillen	65		
	3.1 Forse	chungsstand	65		
	3.2 Simu	lation des Abgusses in Bronze-, Lehm- und Steinformen	67		
	3.3 Expe	rimentelle Abgüsse in Bronze- und Lehmformen	67		
3.3.1		Nachguß in die Kopie der Bronzekokille			
	3.3.2	Nachguß in Lehmformen			
	3.3.3	Untersuchungen an den Nachgüssen			
	3.4 Best	immung des Formmaterials an Originalbeilen	71		
	3.5 Erge	bnisse	72		
	3.5.1	Simulationsergebnisse			
	3.5.2	Untersuchungen an den Nachgüssen	75		
	3.5.5	Veraleich der Simulationsergehnisse mit den Nachaüssen	,		
	3.5.5	Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Nachguss mit den Beoba	chtungen		
		an den Originalen.			
	3.6 Zusa	mmenfassung und Interpretation der Ergebnisse	84		
4.	Herstel	ung von Bronzekokillen für Lappenbeile			
	4.1 Forse	chungsstand			
	4.2 Hers	tellungstechnische Hinweise an Originalgußformen			
	4.3 Simulationen zur Kokillenrekonstruktion				
	4.3.1	Modellvorstellung nach Hodges			
	4.3.2	Wachsausschmelzverfahren mit kompletter Lehmform			
	4.4 Expe	rimente zur Kokillenrekonstruktion	95		
	4.4.1	Versuch 1: Modellvorstellung nach Hodges			
	4.4.2	Versuch 2: Wachsausschmelzverfahren mit kompletter Lehmform			
	4.4.3	Versuch 3: Modifikation von Hodges mit Guss gegen Tonmodell	100		
	4.5 Eige	Simulationers during	101		
	4.5.1	Simulationsergeonisse Praktische Rekonstruktion	101 108		
	4.5.3	Vergleichende Röntgenaufnahmen von Originalen und Nachgüssen	110		
	4.5.4	Gebrauchsfähigkeit der rekonstruierten Kokille	112		
	4.6 Zusa	mmenfassung und Interpretation der Ergebnisse	112		
5.	Griffhe	rstellung bronzezeitlicher Schwerter	114		
	5.1 Forse	chungsstand	114		
	5.1.1	Die Griffgußform von Erlingshofen	114		
	5.1.2	Röntgenaufnahmen von Mörigen-Schwertern	116		
	5.2 Gußs	simulation des Schwertgriffs aus der Form von Erlingshofen	119		
	5.2.1	Geometrieeingabe und Vernetzung	119		
	5.2.2	Guβ in eine Lehmform	119		
	5.2.3	Guß in die Bronzekokille	119		

5.3 Experimenteller Nachguss des Schwertgriffs	121
5.3.1 Guss in Lehmformen	
5.3.2 Guss in die Kopie der Bronzeform	
5.4 Ergebnisse	123
5.4.1 Simulationsergebnisse	
5.4.2 Experimentelle Nachgüsse	
5.5 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse	
6 Diskussion und Ausblick	
7 Literaturverzeichnis	
Anhang 1	A1-1
L. Thelen u. a.: Nachschmieden eines bronzezeitlichen Randleistenbeils im Rahmen des smîde-Projekts an der Mies-van-der -Rohe-Schule, Aachen.	
Anhang 2	A2-1
Beschreibung der untersuchten Randleistenbeile.	
Anhang 3	A3-1
Tafala 1, 20: Röntganaufnahman von Originalan und Nachgüssen	

0 Kurzfassung

Motivation und Zielsetzung

Archäologische Funde interessieren uns nicht nur als Ausstellungsobjekte. Erkenntnisse über ihre technischen Eigenschaften und den Herstellungsprozess gewähren uns vor allem Einblicke in die Handwerkskunst, das Leben und den Entwicklungsstand unserer prähistorischen Vorfahren. Fundsituation, Erhaltungszustand und konservatorische Restriktionen ermöglichen jedoch oft nur selektierte Untersuchungen und archäologische Experimente, sodass systematische und technisch fundierte Arbeiten bisher selten blieben.

Hier bietet die Bronzezeit, aus der im Gegensatz zu anderen Zeitperioden zahlreiche, meist gegossene, Metallgegenstände überliefert sind, eine sowohl in archäologischer als auch in technischer Hinsicht außergewöhnlich gute Forschungssituation. Vor allem die einheimischen Bronzeobjekte zeugen von einem weit entwickelten Metallhandwerk. Die Untersuchungen dieser Arbeit richten sich insbesondere auf die Gießerei- und Schmiedetechnik der in der Bronzezeit gebräuchlichen Randleisten- und Lappenbeile sowie den Einsatz und die Herstellung ihrer Gussformen aus Lehm, Stein und Bronze. Ein abschließendes Kapitel behandelt die Herstellung bronzezeitlicher Schwertgriffe.

Äußere Merkmale wie Bearbeitungsspuren oder Gussfehler geben meist erste wichtige Hinweise auf die Herstellungsweise der Originale. Weitere Details verraten Untersuchungen der inneren Strukturen wie Porositätsausbildungen oder Kornverteilungen. Hierbei werden zum Erhalt des Kulturgutes möglichst zerstörungsfreie Methoden, z. B. die Röntgenographie, eingesetzt. Simulationen des Formfüll- und Erstarrungsvorgangs ermöglichen auf unkomplizierte Weise, gießtechnisch relevante Parameter wie Gießzeit, Anschnittsystem, Formmaterial oder Gieß- und Formtemperatur im für die Bronzezeit wahrscheinlichen Rahmen so lange zu variieren, bis das Erscheinungsbild des Originals optimal angenähert ist. Ergänzende Gießversuche verifizieren die aus den Objektuntersuchungen und der Simulation erhaltenen Erkenntnisse und erschließen die über die Simulation nicht zugänglichen Bereiche wie Formaufbau, Schmelztechnik und Nachbearbeitung.

Die Gesamtheit aller Ergebnisse aus den archäologischen Recherchen, den Untersuchungen am Original sowie den virtuellen und experimentellen Abgüssen ermöglichen idealerweise nicht nur Einblicke in den bronzezeitlichen Herstellungsprozess, sondern auch in die zeitlichen und räumlichen Entwicklungen, sowohl des bronzezeitlichen Metallhandwerks als auch der bronzezeitlichen Gesellschaft, *Abb. I.*

Geographischer und historischer Rahmen

Unter der "Bronzezeit" versteht man in der Archäologie einen Zeitabschnitt der Geschichte, der geprägt ist durch die Verwendung des Materials Bronze zur Herstellung von Gerät, Werkzeug, Schmuck und Waffen.



Abb. I: Systematischer Ablauf zur Untersuchung des bronzezeitlichen Herstellungsprozesses und der kulturhistorischen Hintergründe.

Die Anfänge der Kupferverarbeitung und Bronzetechnik sind zunächst außerhalb des hier gewählten Untersuchungsgebietes, im Vorderen Orient, festzustellen. Bedingt durch die Grenzenlosigkeit der damaligen Zeit breitete sich die Technologie, nicht zuletzt auch durch die Suche nach Rohstoffen, in den Westen aus. Hier wurde zunächst der Mittelmeerraum (ca. 2200 v. Chr.) erfasst, bevor das Wissen um die Bronzeherstellung und -verarbeitung Mittel-(ca. 1800 v. Chr.) und Nordeuropa (ca. 1700 v. Chr.) erreichte.

Einmal etabliert, entwickelte das bronzeverarbeitende Handwerk besonders in Mitteleuropa eine Eigendynamik, die unabhängig von den Ursprungsgebieten, auf der ständigen Suche nach Verbesserungen, zum Ende des 2. Jahrtausends vor Christus zu einem Kenntnisstand führte, der für die nachfolgende Zeit Standard bleiben sollte.

Trotz der zeitlichen Verschiebungen und den kulturell spezifischen Eigenheiten führte der Kontakt und Austausch zwischen den einzelnen bronzezeitlichen Gesellschaften in Europa doch zu ähnlichen Entwicklungen und Phänomenen, *Abb. II.* Entsprechend lässt sich die Epoche den regionalen kulturellen und chronologischen Gliederungen übergeordnet in folgende Abschnitte unterteilen:

Frühe Bronzezeit(ca. 2200 v. Chr. - ca. 1500 v. Chr.)Mittlere Bronzezeit(ca. 1500 v. Chr. - ca. 1300 v. Chr.)Jüngere Bronzezeit(ca. 1300 v. Chr. - ca. 800 v. Chr.)

Teilweise findet eine weitere Gliederung der Jüngeren Bronzezeit in eine Jung- (ca. 1300 v. Chr. - ca. 940 v. Chr.) und eine späte Bronzezeit (ca. 940 v. Chr. - ca. 750 v. Chr.) statt.

Als regionaler Arbeitsschwerpunkt wurde hier zunächst Süddeutschland gewählt. Die Untersuchungen der Bronzekokillen jedoch erforderten eine kulturübergreifende Ausweitung des Arbeitsgebietes vor allem nach Westen bis zum Atlantik und nach Norden bis Jütland.

Untersuchungen zur Herstellung von Randleistenbeilen

Während die ersten als Werkzeuge anzusprechenden Metallbeile formal den gleichzeitig noch eingesetzten Steinbeilen entsprachen, wurden mit der Entwicklung der Randleistenbeile erstmals die Werkstoffeigenschaften des Metalls zur Optimierung dieses Gerätetyps genutzt. Dabei ermöglichten die Randleisten nicht nur eine bessere Schäftung, der "doppel-T-förmige" Querschnitt erhöhte auch die Stabilität des Werkstücks.

Randleistenbeile sind im Materialbestand der frühen und mittleren Bronzezeit zahlreich und mit vielfältigen Geometrien vertreten. Gussformen sind jedoch selten und nur aus der jüngeren Phase des Produktionszeitraums bekannt. Es handelt sich dabei um Fragmente zweiteiliger Steinformen. Bei weiteren, möglicherweise älteren Steinkokillen sind die Randleisten nicht im Guss angelegt. Ob in ihnen Barren oder Ausgangsformen für Randleistenbeile gegossen wurden, ist umstritten. Weiterhin stellt sich die Frage, ob die wenigen Steinkokillen tatsächlich das gängige Herstellungsverfahren anzeigen oder ob nicht überwiegend in einteiligen Lehmformen produziert wurde.



Kurzfassung

Für die Untersuchungen wurden aus dem Bestand der Prähistorischen Staatssammlung München 17 Randleistenbeile als Vertreter der vier wichtigsten geometrischen Formen ausgewählt, *Abb. III*:

Typ Neyruz(ältere Frühbronzezeit)Typ Langquaid(jüngere Frühbronzezeit)Typ Mägerkingen(mittlere Bronzezeit, gerade Schmalseiten)Typ Unterbimbach(mittlere Bronzezeit, eingezogene Schmalseiten)

Optische Untersuchungen an den Originalen

Eine eingehende optische Untersuchung ergab zwar kaum äußere Hinweise auf das Gussverfahren selbst, ließ aber bei vielen Stücken eine intensive mechanische Überarbeitung erkennen. Diese wurde durch die in den Röntgenaufnahmen beobachtete Porenausrichtung bestätigt. Die erkennbaren Porositäten erlauben zudem eine Bewertung der Qualität und Rückschlüsse auf die Anschnittposition. Eindeutig am Nacken angeschnitten wurden die qualitativ schlechteren Beile der Typen Langquaid I und II, *Abb. IV*. Hinweise auf andere Anschnittpositionen gibt es nicht.

Autopsie und Röntgenbilder der Originale bildeten die Grundlage für Simulationen und Gießversuche. Die "kalten" und "warmen" Abgüsse erfolgten für je ein Referenzstück der vier Grundtypen.

Simulationsrechnungen, Tab. I

Simuliert wurde der Abguss mit der Legierung CuSn10; bei dem Typ Neyruz aufgrund der Zusammensetzung des Referenzstückes auch mit reinem Kupfer (Rechnung N 18). Sandstein, Lehm und Bronze dienten als mögliche Formstoffe. Variiert wurden die Gießtemperatur, die Vorwärmtemperatur der Form und die Gießzeit; für den Typ Neyruz auch die Anschnittposition. Eine automatische Parameteroptimierung sollte die Temperaturverhältnisse für die Lunkerausprägung in der Schneide der Beile vom Typ Langquaid beim Guss in Lehmformen ermitteln.

Grundsätzlich zeigten sich alle Beilgeometrien gießtechnisch reproduzierbar, wobei sich hohe Gieß- (1080°C) und Formtemperaturen (500°C) bei geringen Gießzeiten (2-3s) als günstigste Parameter erwiesen. Abweichungen hiervon beeinflussten den Gusserfolg in der gut wärmeleitenden Bronzeform erheblich, während er in den isolierenden Formen aus Stein und Lehm in weiten Bereichen gesichert blieb, *Abb. V*. Ebenfalls aufgrund der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der Formstoffe, zeigten die in mineralischen Formen gegossenen Beile im Schaft eher ausgedehnte Porositätszonen, während die Bronzeform eng umgrenzte Mittellinienlunker begünstigte. Ferner bewirkte die Verschiebung des Anschnitts vom Nacken zu einer Position seitlich über der Schneide eine längere Nachspeisung und damit Minimierung der Lunkerbildung. Die Parameteroptimierung errechnete für die Originale relativ hohe Form- (450°C-500°C) bei niedrigen Gießtemperaturen (1050°C).



Abb. III: Zeitliche Stellung der untersuchten Randleistenbeiltypen innerhalb der Bronzezeit.



Abb. IV: Röntgenbild eines Randleistenbeils vom Typ Langquaid. Die Poren konzentrieren sich am Nacken, wo der Anschnitt lag. Die Ausrichtung der länglichen Poren parallel zur Schaftgeometrie zeugt von einer intensiven mechanischen Nachbearbeitung.

Beiltyp	Rech-	Formstoff	Form-	Gieß-	Anschnitt-	Gieß-
	nung		temperatur	temperatur	position	zeit
Neyruz	N 1	Antikton	20°C	1050°C	oben	4s
··	N 2	Antikton	20°C	1050°C	seitlich, Richtung Schneide	4s
.,	N 3	Antikton	300°C	1050°C	oben	2s
.,	N 4	Antikton	300°C	1050°C	seitlich, Richtung Schaft	2s
.,	N 5	Antikton	300°C	1050°C	seitlich, Richtung Schneide	2s
.,	N 6	Antikton	500°C	1050°C	oben	4s
	N 7	Antikton	500°C	1050°C	seitlich, Richtung Schneide	4s
.,	N 8	Sandstein	20°C	1050°C	oben	4s
	N 9	Sandstein	20°C	1050°C	seitlich, Richtung Schneide	4s
.,	N 10	Sandstein	300°C	1050°C	oben	4s
	N 11	Sandstein	300°C	1050°C	seitlich, Richtung Schneide	4s
.,	N 12	Sandstein	300°C	1080°C	oben	4s
	N 13	Sandstein	300°C	1080°C	seitlich, Richtung Schneide	4s
	N 14	CuSn10	500°C	1050°C	oben	4s
	N 15	CuSn10	500°C	1050°C	seitlich, Richtung Schneide	4s
··	N 16	CuSn10	500°C	1080°C	oben	4s
.,	N 17	CuSn10	500°C	1080°C	seitlich, Richtung Schneide	4s
.,			Antikton 300°C	1100°C		3s
Gusswerkstoff	N 18	Antikton			oben	
Kupfer						
Langquaid II	L 1	Antikton	20°C	1050°C	oben	2s
.,	L 2	Antikton	20°C	1050°C	seitlich	2s
,,	L 3	Sandstein	20°C	1050°C	oben	2s
,,	L 4	CuSn10	20°C	1050°C	oben	2s
,,	L 5	CuSn10	300°C	1050°C	oben	2s
Mägerkingen	M 1	Antikton	20°C	1050°C	oben	2s
,,	M 2	Antikton	300°C	1050°C	oben	2s
.,	M 3	Antikton	500°C	1050°C	oben	4s
.,	M 4	Antikton	500°C	1080°C	oben	3s
.,	M 5	Sandstein	20°C	1050°C	oben	2s
.,	M 6	Sandstein	300°C	1050°C	oben	2s
,,	M 7	Sandstein	500°C	1050°C	oben	4s
,,	M 8	Sandstein	500°C	1080°C	oben	3s
,,	M 9	CuSn10	20°C	1050°C	oben	4s
	M 10	CuSn10	300°C	1050°C	oben	4s
,,	M 11	CuSn10	500°C	1050°C	oben	4s
<u> </u>		1080°C	oben	3s		
,,	M 13	CuSn10) 500°C 1080°C oben		4s	
	M 14	CuSn10	500°C	1080°C	oben	2s
	M 15	CuSn10	500°C	1080°C	oben	3s
	M 16	CuSn10	500°C	C 1050°C oben		3s
	M 17	CuSn10	500°C	1080°C	oben	4s
Unterbimbach	U 1	Sandstein	20°C	1080°C	oben	4s
	U 2	Sandstein	300°C	1080°C	oben	2s
	U 3	Sandstein	300°C	1080°C	oben	4s
.,	U 4	Sandstein	500°C	1080°C	oben	4s

Tabelle I: Simulierte Parametervariationen für die vier Randleistenbeiltypen.



Abb. V: Die optimalen Gießparameter wurden mit $T_{gieß}=1080^{\circ}$ C, $t_{gieß}=2.3$ s und $T_{form}=500^{\circ}$ C ermittelt. Während bei mineralischen Formen der Gusserfolg auch noch beim Guss einer gerade schmelzflüssigen Bronze (1050°C) in eine kalte Form (20°C) gewährt bleibt, führt beim Guss in Bronzeformen bereits eine Erniedrigung der Formtemperatur auf 300°C zu unvollständiger Formfüllung. Dargestellt ist jeweils die Temperaturverteilung im Gussstück bei 100% Formfüllung. Die roten Bereiche sind noch flüssig, die grünen befinden sich im Liquidus-Solidus-Intervall, die blauen sind bereits erstarrt.



Abb. VI: Röntgenaufnahmen eines unterschiedlich stark überarbeiteten Nachgusses (a, b) des Referenzstück 1 vom Typ Neyruz und des Originalbeils (c).

- a) Gussrohling: typische, "schaumig-lagige" Gussstruktur. Gut erkennbarer Speisungslunker am Anschnitt (Nacken).
- b) Selbes Exemplar nach drei Schmiedegängen: Die lagige Struktur verschwindet, die Lunker werden langsam verschmiedet und schwerer erkennbar.
- c) Originalbeil: Gussstrukturen oder Lunker sind nicht eindeutig identifizierbar. Offensichtlich wurde das Beil intensiv überschmiedet.

Gießtechnologische Experimente und Schmiedeversuche

Im Experiment wurde das Wachsausschmelzverfahren mit Lehmformen nachvollzogen. Die Formtemperaturen lagen bei ca. 300°C, die Gießtemperatur bei 1080°C (1100°C bei Kupfer) und die Gießzeit bei ca. 3s. Wie bereits die Simulationsergebnisse, bewiesen auch die Nachgüsse eine grundsätzliche Gießbarkeit der belegten Beilgeometrien. Der Vergleich von Röntgenaufnahmen zeigte jedoch bei den Originalen ein deutlich dichteres Gefüge, was darauf schließen lässt, dass letztere in beträchtlichem Maße mechanisch überarbeitet wurden.

Schmiedeversuche an Nachgüssen aus Kupfer und Bronze sollten eine Abschätzung der Art und des Umfangs der mechanischen Überarbeitung von Randleistenbeilen ermöglichen. Zur Klärung des Zusammenhangs zwischen dem Schmiedegrad und der Gefügestruktur wurden zusätzlich drei Nachgüsse des Referenzstückes 1 vom Typ Neyruz komplett überschmiedet und nach jeder Bearbeitungsstufe geröntgt.

Die Nachgüsse ließen sich durch Freiformschmieden mit einem Treibhammer gut bearbeiten. Dabei erwies sich das Ausschmieden der nur ansatzweise vorhandenen Randleisten als so problemlos, dass auch die in der Regel als Barren angesprochenen Gussstücke als Halbzeug für Randleistenbeile in Frage kommen. Des weiteren erklärten die Schmiedeversuche Detailbeobachtungen an der Oberfläche von Originalbeilen. So können Schlagspuren und Fältelungen an Langquaidbeilen dem Ausschmieden des Nackenausschnitts und der Randleisten zugeschrieben werden. Ein anschließender Anschliff erzeugte die Kanten und die gute Oberfläche. Die Röntgenaufnahmen der unterschiedlich stark bearbeiteten Referenzstücke ließen mit fortschreitendem Überarbeitungsgrad eine zunehmende Verdichtung des Gussstücks erkennen. Entsprechend der Originale waren gegen Ende des Schmiedeprozesses kaum noch lockere Gefügestrukturen zu beobachten, *Abb. VI*.

Metallographische Untersuchungen und Härtemessungen

Alle bislang getroffenen Aussagen zur Herstellung von Randleistenbeilen beruhen auf zerstörungsfreien Prüfmethoden. Diese Beschränkung ergab sich aus konservatorischen Gründen und wird sicher auch in Zukunft zumindest für Reihenuntersuchungen eine Grundbedingung bleiben. Ziel der weiteren Untersuchungen war es, die Tragfähigkeit dieser Aussagen mittels sicherer und genauerer, aber eben nicht zerstörungsfreier Methoden zur Bestimmung von Eigenschaften und Strukturen eines Gusstückes zu prüfen. Dazu wurden Schliffe von Nachgüssen und zwei Originalfragmenten, *Abb. VII*, angefertigt und sowohl metallographisch untersucht als auch einer Härteprüfung unterzogen. Bei den Originalen handelt es sich um typologisch nicht näher bestimmbare Fragmente, wobei Fragment 1 eher einem frühen und Fragment 2 eher einem späten Abschnitt der Randleistenbeilproduktion zuzurechnen ist.

Bei Fragment 1 zeugen die Schliffbilder von einem dichten Gefüge mit vergleichsweise geringer Porosität, *Abb. VIIa*. Die kontinuierliche Abnahme der Korngröße von innen nach außen sowie Zwillingsbildung im gesamten Gefüge sprechen für eine starke mechanische



Abb. VII: Für metallographische Untersuchungen standen zwei originale Beilfragmente zur Verfügung. Gefügebilder der Randleistenbereiche zeigen, dass in der Bronzezeit einerseits eine intensive Aus- und Nacharbeitung der Randleisten stattfand (Fragment 1: Rekristallisationsgefüge), letztere aber auch im Guss angelegt wurden (Fragment 2: reines Gussgefüge).



Abb. VIII: Absatzbeil mit erhaltener originaler Holzschäftung. Ab ca. 1500 v. Chr. wurde in N- u. NW-Europa ein Quersteg zwischen den Schaftlappen eingeführt. Er fixierte den Schaft und verhinderte ein Eintreiben der Klinge beim Gebrauch. [Fundort: Vester-Vamdrup "Guldhoej", DK].

Abb. IX: Schemazeichnung eines Lappenbeils. Diese neue Art der Schäftung setzte sich etwas später in Mitteleuropa durch. Die ausgezogenen Seitenpartien, die sogenannten Schaftlappen, wurden zur besseren Klingenfixierung um den Schaft geschmiedet.

Bearbeitung der Randleisten und der Schneide. Unterstützt wird diese Interpretation durch die Verformung nicht metallischer Einschlüsse in diesen Bereichen. Die stärkste Lunkerbildung im mittleren, dicken Beilbereich entspricht den Ergebnissen der Simulationen zu dem formähnlichen Typ Neyruz. Eine vergleichbare Gefügestruktur weist das in den Versuchen überschmiedete Bronzebeil in den umgeformten Bereichen der Randleisten auf.

Das Fragment 2 trägt demgegenüber das typische Erstarrungsgefüge einer Gussbronze, *Abb. VIIb*. Es sind weder Rekristallisationskörner noch Verformungen zu erkennen. Da es sich um einen qualitativ schlechten Guss handelt, ist zu vermuten, dass das Stück als Fehlproduktion ausgesondert wurde.

Die mechanische Überarbeitung eines Körpers beeinflusst mit der Gefügeausbildung auch seine Härte. Zur Abschätzung der erreichbaren Härtesteigerungen durch Kaltbearbeitung von Kupfer- und Bronzegussstücken und den damit verbundenen Einsatzmöglichkeiten in der Bronzezeit wurden Mikrohärteprüfungen nach Vickers durchgeführt. Als Proben dienten je ein Querschnitt der überschmiedeten Nachgüsse und drei Querschnitte des Fragments 1. Nach Einzelprüfungen in den verschieden stark verformten Gefügebereichen wurde zur Veranschaulichung des Härteverlaufs mit einem automatischen Härteprüfgerät ein feines Netz von Prüfpunkten über den gesamten Probenquerschnitt gelegt. Die Ergebnisse zeigten, dass bei Gussstücken aus Kupfer und Bronze durch Freiformschmieden eine Härtesteigerung von 200 bis 300 % erreicht werden kann.

Interpretation der Ergebnisse

Für den bronzezeitlichen Guss der Randleistenbeile kann vom Gebrauch mineralischer Formen ausgegangen werden, wobei neben den überlieferten Steinkokillen wahrscheinlich auch einteilige Lehmformen zum Einsatz kamen. Auch wenn der Guss in Bronzekokillen theoretisch möglich erscheint, ist ihr Gebrauch sowohl wegen der zu erwartenden hohen Ausschussrate als auch aufgrund des Fehlens entsprechender archäologischer Hinweise auszuschließen. Für die Anschnittposition war offensichtlich der aus gießtechnologischer Sicht ungünstige Beilnacken üblich. Obwohl die überlieferten Randleistenbeile mit damals verfügbaren Mitteln im Guss darstellbar waren, entsprach ihre Gebrauchsgeometrie in den wenigsten Fällen der Gussgeometrie. Bis zum tatsächlichen Einsatz erfuhren die Rohlinge noch eine starke Überarbeitung durch Schmieden. Dadurch wurde dem Werkzeug nicht nur eine funktional optimierte Gestalt gegeben, sondern zusätzlich sein Gebrauchswert durch Härten gesteigert.

Lappenbeilherstellung in Bronzekokillen

In der mittleren Bronzezeit begannen Bestrebungen, durch formale Veränderungen die Funktionalität von Beilklingen zu erhöhen. Seit ca. 1500 v.Chr. unterbrach man im nördlichen und nordwestlichen Mitteleuropa die durchgehende Bahn durch einen Quersteg, der ein Eintreiben der Klinge in das Schaftholz beim Gebrauch des Gerätes verhinderte, *Abb. VIII.* In Zentraleuropa setzte sich etwas später mit dem Lappenbeil eine ganz neue Art der Schäftung

durch, indem die Seitenbereiche so stark ausgezogen wurden, dass sie um den Schaft geschmiedet werden konnten, *Abb. IX*.

Gleichzeitig wird für diesen Zeitraum der Guss in Dauerformen überregional archäologisch nachweisbar. Verwendet wurden Stein-, Lehm- und Bronzekokillen. Letztere entstanden mit einiger Sicherheit in Westeuropa, wobei die vergleichsweise flache Geometrie der dort üblichen Absatzbeile dem Kokillenguss eher entgegenkam als die Lappenbeile Zentraleuropas. Trotzdem wurden im Laufe der Zeit entsprechende Bronzekokillen entwickelt. Dies zeugt von Bestrebungen, die Produktion zu standardisieren und zu beschleunigen. Bezeichnenderweise dominieren unter den Dauergussformen solche für die in großen Mengen hergestellten Beile, während sie für andere Objekte die Ausnahme bleiben.

Das heutige Verbreitungsbild der Bronzekokillen zeigt eine Konzentration im westlichen Frankreich und England. Ihre Verwendung ist aber auch für den Nordischen Kreis und in den jüngeren Phasen der Bronzezeit auch für die Lausitzer Kultur und die westlichen Urnenfelderkulturen gesichert. Quellenbedingt lässt sich der quantitative Stellenwert dieser Gießtechnik jedoch nicht vollständig erschließen.

Hier wäre eine Identifikation des Formmaterials durch Untersuchungen am Gussstück selbst ein wesentlicher Fortschritt für die Beantwortung der Frage nach dem Umfang, in dem bestimmte Formstoffe eingesetzt wurden. Im Rahmen dieser Arbeit sollte daher eine möglichst zerstörungsfreie Methode zur Bestimmung des Formmaterials an Originalbeilen gefunden werden. Detaillierter untersucht wurde die Herstellung von oberständigen Lappenbeilen der ausgehenden Bronzezeit anhand einer Originalkokille aus der Höhensiedlung auf dem Bullenheimer Berg in Mainfranken, *Abb. X.* Für zusätzliche Untersuchungen stand ein im gleichen Gebiet deponierter, umfangreicher Lappenbeilbestand zur Verfügung.

Simulationsrechnungen

Über Formfüll- und Erstarrungssimulationen in Formen aus Lehm, Sandstein und Bronze konnten formstoffspezifische Qualitätsmerkmale für gegossene Lappenbeile errechnet werden. Durch die gute Wärmeleitfähigkeit sind dem Bronzekokillenguss unter bronzezeitlichen Bedingungen enge Grenzen gesetzt. Bei einer Gießtemperatur von 1080°C und einer Gießzeit von 3 s sollte die Vorwärmtemperatur der Form nicht unter 350°C fallen.

In den dünnen Geometriebereichen der Schaftlappen und der Öse muss jedoch auch bei diesen optimalen Parametereinstellungen damit gerechnet werden, dass die eingegossene Bronze vorzeitig erstarrt und Fehlstellen oder Kaltschweißen entstehen, *Abb. XIa.* Da sehr schnell abgekühlte Bronze schalenartig erstarrt, ist darüber hinaus zwischen den Schaftlappen ein ausgeprägter Mittellinienlunker zu erwarten, *Abb. XIIa.*

In den mineralischen Formstoffen Lehm und Sandstein hingegen verläuft die Erstarrung langsam und gleichmäßig über den Querschnitt des Gussstücks. Dadurch kann innerhalb



Abb. X: Bronzegussform für oberständige Lappenbeile. Bullenheimer Berg, Mainfranken.



Abb. XI: Simulation (a) und Experiment (b) stellten die an Originalen (c) häufig auftretenden Fehlstellen an Ösen und Schaftlappen als Hinweis auf den Bronzekokillenguss heraus.



Abb. XII: Erstarrungszeiten und daraus resultierende Lunker- bzw. Porositätszonen beim Abguss in eine Bronze- (a) und eine Lehmform (b). $(T_{gieb}=1080^{\circ}C;T_{form}=300^{\circ}C;t_{gieb}=3s)$



Abb. XIII: Senkrecht zur Mittelachse in Höhe der Schaftlappen angefertigte metallographische Schliffe zeigen die Unterschiede in der Erstarrungsmorphologie. V = 50.

- a) Bronzeform: Die feinen Dendriten (weiß) und der ausgeprägte Mittellinienlunker (schwarz) zeugen von einer schnellen, schalenartigen Erstarrung.
- b) Lehmform: Die Ausbildung dickerer Dendriten und eines zwar lockeren, aber zusammenhängenden Gefüges belegt eine langsame, breiartige Erstarrung.

weiter Parametergrenzen von einer fehlerfreien Formfüllung ausgegangen werden. Ferner wird sich zwischen den Schaftlappen eine ausgedehnte Porositätszone ausbilden *Abb. XIIb.*

Geometriebedingt ist zusätzlich bei allen Formstoffen mit einem Speisungslunker in der Schneidenmitte zu rechnen.

Gießtechnologische Experimente

Gießversuche in eine Kopie der Bronzekokille und in Lehmformen sollten die Nachvollziehbarkeit der Simulationsergebnisse am realen Gussstück überprüfen. Die Gießparameter entsprachen mit $T_{gieß}$ = 1080°C; T_{form} = 350°C und $t_{gieß}$ = 3s den simulierten Einstellungen, die erfolgreiche Abgüsse ergaben.

Das Herauslösen der Beile aus der Bronzekokille erwies sich aufgrund der sehr fest sitzenden Schaftlappen zunächst als schwierig. Ein Schlichten dieses Bereichs verringerte jedoch den Widerstand. Einfallstellen in der Bahn zwischen den Schaftlappen wiesen bei allen acht Exemplaren auf den errechneten Mittellinienlunker hin. Drei der Beile bestätigen die Simulationsergebnisse zusätzlich dahingehend, dass ihre Schaftlappen aufgrund der schnellen Erstarrung nicht vollständig ausgelaufen sind, *Abb. XIb.* Die Gussform zeigte keine Verschleißerscheinungen.

Die zwei nach dem Wachsausschmelzverfahren gegossenen Beile aus den Lehmformen ließen äußerlich keine Besonderheiten erkennen. Die oberflächlichen Schülpen waren leicht abzutragen.

Zur genaueren Bestimmung der formstoffspezifischen Gussqualität wurden die Nachgüsse sowohl geröntgt als auch metallographisch untersucht. Beide Untersuchungsmethoden zeigten, dass Porositäten tatsächlich vor allem zwischen den Lappen und in der dicken Beilmitte auftreten, wobei die Beile aus der Bronzekokille enger umgrenzte Mittellinienlunker und die aus den Lehmformen ausgedehntere Porositätszonen aufwiesen. Ferner belegen die Schliffbilder die durch die Abkühlzeiten bedingten Unterschiede im Kornwachstum, *Abb. XIII.* Die geringere Korngröße der in der Kokille gegossenen Beile war bereits makroskopisch durch Oberflächenätzungen darstellbar.

Vergleichende Untersuchungen an Originalen

In einem nächsten Schritt wurde versucht, die Ergebnisse auf das archäologische Material zu übertragen. Auffällig ist zunächst ein partiell dunkler Belag auf der Innenseite (Matrix) der Originalgussform, der als Rest einer Schlichteschicht interpretiert werden kann. Ein Vergleich der Lappenbeile des Typs Homburg vom Bullenheimer Berg mit den Nachgüssen zeigte, dass unter den Beilen keine Exemplare vorhanden sind, die aus der im selben Gebiet gefundenen Bronzekokille stammen. Es konnten jedoch acht gussgleiche Stücke identifiziert werden, die offensichtlich aus einer Form stammen.

Äußerlich zeigen rund ein Drittel der Beile Fehlstellen an Ösen und Schaftlappen (s.a. *Abb. XIc*), die als typische Kokillenfehler entsprechend der Ergebnisse aus Simulation und Experiment zu interpretieren sind. Einfallstellen zwischen den Schaftlappen können nicht beobachtet werden. Ihre Identifikation ist jedoch dadurch eingeschränkt, dass dieser Bereich durch das Umschmieden der Lappen nachträglich stark verformt ist. Ursprüngliche Strukturen sind sowohl äußerlich als auch auf Röntgenbildern nur schwer oder nicht mehr erkennbar. Entsprechend ergaben letztere keine eindeutigen formstoffspezifischen Porositäten, zumal die gebogenen Schaftlappen zusätzlich einen großen Teil des entscheidenden Bahnbereichs überdeckten.

Zum weiteren Vergleich mit den Untersuchungsergebnissen der Nachgüsse wurden an zwei Originalen Oberflächenätzungen durchgeführt. Die aus konservatorischen Gründen sehr kleinen behandelten Ausschnitte von ca. 5 x 5 mm lagen im wenig bearbeiteten Schneidenbereich knapp unterhalb des Schaftlappenansatzes. Das Oberflächengefüge ließ keine genaue Zuordnung der Korngröße zu einem im Experiment eingesetzten Formstoff (Lehm oder Bronze) zu. Die Betrachtung eines größeren Ausschnitts der Oberfläche könnte die Korngrößenverteilung als weiteres Kriterium einbeziehen, würde jedoch das Original mehr in Mitleidenschaft ziehen.

Interpretation der Ergebnisse

Simulation und Experiment zeigen, dass Lappenbeile sowohl in mineralischen Formen als auch in Bronzekokillen erfolgreich gegossen werden können. Bei letzteren müssen jedoch mit extrem kurzen Gießzeiten und recht hohen Gieß- und Formtemperaturen strengere Parametergrenzen eingehalten werden. Entsprechend ist für einen Großteil der Abgüsse vor allem in den dünnen Geometriebereichen von Schaftlappen und Öse mit Formfülldefekten und Kaltschweißen zu rechnen.

Für die Formmaterialbestimmung am Original erwies sich dieses Kriterium als sicherstes und zusätzlich ohne weitere Hilfsmittel bei einer Autopsie erkennbares Merkmal eines in einer Bronzekokille gegossenen Lappenbeils. Formstoffspezifische Porositätsausprägungen ließen sich in der Simulation und in den Röntgenbildern der Nachgüsse gut herausstellen. Beim Röntgen der Originale überschatteten jedoch die Schaftlappen den entscheidenden Schaftbereich. Ferner haben das Umschmieden der Schaftlappen und die Alterung das ursprüngliche Erscheinungsbild verändert. Ähnliche Einschränkungen gelten für Formstoffbestimmungen über die Gefügestruktur, die zusätzlich konservatorischen Restriktionen unterlagen.

Technologisch konnte herausgestellt werden, dass beim Kokillenguss zum zerstörungsfreien Auslösen eines erstarrten Beils aus der Bronzeform ein Schlichten derselben notwendig ist. Dies lässt den dunklen Belag auf den Innenseiten der originalen Gussformhälften als Rest einer bronzezeitlichen Schlichteschicht interpretieren.

Herstellung von Bronzekokillen für Lappenbeile

Mit der Rekonstruktion des Gusses in Metallkokillen konnten formmaterialbedingte Charakteristika herausgestellt werden, die qualitative Vergleiche mit Gussstücken aus anderen Formmaterialen erlauben. Eine endgültige Beurteilung des Verfahrens, vor allem im Vergleich mit anderen Techniken, ist jedoch nur möglich, wenn auch die Gussformherstellung als wesentliches Element des Produktionsprozesses einbezogen wird.

Erfahrungsberichte zur Kokillenherstellung mittels bronzezeitlicher Fertigungsmethoden stehen noch aus und entsprechende Überlegungen blieben bislang theoretisch. Das detaillierteste Modell legte H.W.M. Hodges vor. Seine Ausgangsbasis war die Gussform für Absatzbeile von Wiltshire, deren Verzierung er als mitgegossene Umwicklung einer zweiteiligen Lehmform anspricht. Die Herstellung der Form rekonstruiert er wie folgt, *Abb. XIV*:

- 1. Um ein Originalbeil wird eine zweiteilige Tonform geformt und zusammengebunden.
- Darüber wird ein weiterer zweiteiliger Tonmantel mit Eingusstrichter rechts oder links oben modelliert. Die Verschnürung drückt sich in den äußeren Mantel ein.
- Anschlie
 ßend wird die zweischalige Formh
 älfte auf der Seite des Trichters entfernt und nach Ausl
 ösen des inneren Formmantels der
 äu
 ßere wieder angepasst.
- 4. a) Ausgießen der 1. Formhälfte.

b) Der Abdruck der Verschnürung wird mitgegossen.

- 5. Alle Tonformen werden abgenommen, eine neue halbe Tonform um das Originalbeil geformt und versetzt mit der fertigen Bronzeformhälfte verschnürt.
- Die zweischalige Formhälfte auf der Seite des Trichters wird entfernt und nach Auslösen des inneren Formmantels der äußere wieder angepasst.
- 8. a) Ausgießen der 2. Formhälfte.
 - b) Auf der fertigen Gußform bilden sich die mitgegossenen, versetzten Verschnürungen ab.

Die plastischen Leisten der Gussform aus Wiltshire bleiben eine singuläre Erscheinung. Üblicherweise sind herstellungsrelevante Merkmale weit weniger auffällig. Auf den rauhen Außenseiten der Gussform vom Bullenheimer Berg sind Abdrücke der Magerung des Formmantels aus Ton erhalten. Im unteren Bereich scheint die Außenseite des Modells mit einem spatelartigen Gerät geglättet worden zu sein, was auf Wachs als Modellmaterial schließen lässt, zumal Lehmmodelle wegen dem geschlossenen Henkel nicht auszulösen wären. Ähnlich facettiert ist die sonst völlig glatte Außenseite einer Form von Gössenheim. Bei einigen Gussformen konnte anhand der nicht vollständig entfernten Füllung des Gusskanals die Anschnittsposition bestimmt werden, die auffallenderweise jeweils an den



Abb. XIV: Rekonstruktionsmodell nach Hodges zur Herstellung der Bronzegussform von Wiltshire für Absatzbeile. Abbildung 8b zeigt die originale Bronzeform.



Abb. XV: Umsetzung des Rekonstruktionsmodells nach Hodges für die Simulation des Gusses der ersten Kokillenhälfte (Schritt 4). Vorlage ist hier allerdings keine Absatzbeilkokille, sondern die Bronzekokille für Lappenbeile vom Bullenheimer Berg.

Unterkanten der Formschalen lag (s. a. Abb. X). Als Referenzstück für die weiteren Untersuchungen diente die Bronzekokille vom Bullenheimer Berg.

Simulation zweier Rekonstruktionsmodelle

Zunächst wurde das Gießen der ersten Kokillenhälfte (Schritt 4) nach dem von Hodges vorgeschlagenen Verfahren nachvollzogen, *Abb. XV*. Die äußere Kontur der zu gießenden Kokillenhälfte wird von einer Lehmform bestimmt. Die innere Begrenzung bildet die in den Formhohlraum ragende Hälfte eines Prototyps der später in der Metallform herzustellenden Lappenbeile aus CuSn10. Für den Eingusstrichter wurde angenommen, dass er mit Lehm angeformt war. Die verbleibenden Formmantelhälften aus den Schritten 1 und 2 fixieren diesen "Kern" und bilden den Formabschluss an den Stoßkanten. Der Anschnitt befindet sich auf dem oberen Kokillenrand.

Um die Grenzen für eine erfolgreiche Formfüllung auszuloten, wurden für die Form Vorwärmtemperaturen von 300°C und 450°C simuliert, Gießzeit und –temperatur blieben mit 3 s, bzw. 1080°C konstant. Eine Variation von Lage und Anzahl der Anschnitte trugen dem archäologischen Befund Rechnung, wonach die Lappenbeilkokille vom Bullenheimer Berg einen und die aus Wallerfangen drei Anschnitte an der Unterkante trägt.

Beim Guss der Kokillenhälften gegen ein Bronzebeil als Formbestandteil stellt sich die Frage nach dem Aufschmelzen der Beiloberfläche und der damit verbundenen Gefahr des Verbindens oder Verklebens mit dem Gussstück. Dies wäre der Fall, wenn das Beil für eine ausreichend lange Zeit die Solidustemperatur überstiege. Besonders gefährdet erscheinen die dünnen Lappenspitzen und der Bereich des auftreffenden Gießstrahls. Dort wurden virtuelle Thermoelemente eingesetzt, die den Temperaturverlauf während des gesamten Gieß- und Erstarrungsvorgangs aufzeichneten, *Abb. XVI*.

Das Rekonstruktionsmodell von Hodges erscheint zwar sehr ausgeklügelt und elegant. Es muss aber auch das "herkömmliche" Wachsausschmelzverfahren für die Kokillenherstellung in Betracht gezogen werden, bei dem die Wachsmodelle der Kokillenhälften einzeln mit Lehm ummantelt werden. Die hierzu durchgeführten Simulationen entsprachen in der Parameterwahl denen der vorangegangenen Rechnungen. Zusätzlich sollten Spannungssimulationen den Ursprung von in ersten Experimenten aufgetretenen starken Deformationen und Rissen in der Schneidenmatrix klären.

Für Hodges' Verfahren konnte erst ab einer Vorwärmtemperatur der Form von 450°C eine sichere Formfüllung errechnet werden. Die Temperaturaufzeichnungen im Bronzemodell zeigten jedoch, dass hier die Lappenspitzen am Ende der Formfüllung (3 s) bereits die Solidustemperatur (830°C) um 10°C überschreiten und diese Überhitzung bis gegen Ende der Erstarrungszeit (20 s) beibehalten, *Abb. XVIb.* Diese Verhältnisse bewirken wahrscheinlich noch kein Verkleben des Gussstücks mit der Oberfläche. Sie zeigen jedoch eine obere Grenze für Form- und Gießtemperatur auf und bescheinigen dieser Rekonstruktionsmethode einen



Abb. XVI: Lage der virtuellen Thermoelemente in den Schaftlappen (a) mit dem zugehörigen Temperaturverlauf (b) für die Parameter $T_{gieß}=1080^{\circ}$ C, $T_{form}=450^{\circ}$ C und $t_{gieß}=3s$. Die Erhitzung der Schaftlappenspitzen über die Solidustemperatur zeigt eine obere Grenze für Form- und Gießtemperatur auf und erlaubt dieser Rekonstruktionsmethode damit einen nur geringen Spielraum in der Parameterwahl.



Abb. XVII: Für den Guss in Lehmformen stimmt die Lage der in der Simulation errechneten Restspannungen (a) mit den am Nachguss auftretenden Rissen in den Kanten der Schneidenmatrix überein (b). Diese können entsprechend als Kaltrisse interpretiert werden.

nur geringen Spielraum in der Parameterwahl. Ob der Anschnitt am Trichterrand oder auf der Seite der Beilschneide liegt, nimmt kaum Einfluss auf den Gusserfolg.

Bei der Gusssimulation in Lehmformen ergaben sich für keine Parameterkombination Probleme. Über die Spannungssimulation konnte die Endverformung als so gering berechnet werden, dass sie am realen Gussstück kaum nachzuprüfen wäre und durch Unregelmäßigkeiten im Modell und andere Effekte, wie z.B. Abplatzungen an der Form, überdeckt werden kann. Bei größeren Abweichungen muss davon ausgegangen werden, dass bereits die Wachsmodelle verzogen waren oder beim Einformen deformiert wurden. Hohe Restspannungen bauen sich im Bereich der Beilklinge in den Kanten der Innenkontur (Matrix) auf. Dort ist mit der Entstehung von Kaltrissen zu rechnen, *Abb. XVIIa*.

Praktische Kokillenrekonstruktion

Basierend auf den Simulationsergebnissen wurde die Fertigung der Kokille vom Bullenheimer Berg experimentell nachvollzogen. Der ersten Versuchsreihe lag Hodges' Modell zugrunde, die zweite berücksichtigte das Wachsausschmelzverfahren. Entsprechend den Befunden am Original wurde der Eingusstrichter an der Unterkante angebracht. Eine Übersicht der experimentellen Varianten gibt *Tabelle II*.

Bei den Experimenten zur Versuchsreihe 1 wurde zunächst das Wachsmodell einer Kokillenhälfte auf ein Bronzebeil mit noch nicht umgeschmiedeten Schaftlappen modelliert, *Abb. XVIII.* Für den anschließend aufgebrachten Lehmformmantel, der Beil und Wachsmodell umgibt, erwies sich eine teilbare Konstruktion als günstig (Versuch 1c). Dies ermöglichte ein Schlichten des Bronzebeils vor dem Abguss, um später die erstarrte Kokillenhälfte leichter ablösen zu können. Die Teilung verlief entlang der Stoßkante des Wachsmodells.

Der zweitägigen Trocknung des ca. 1,5 cm dicken Formmantels folgte das Wachsausschmelzen und ein etwa zweitägiges Glühen der hohlen Formen im keramischen Ofen. Nach einer langsamen Abkühlung wurde das innenliegende Bronzebeil mit einer auch für die Bronzezeit denkbaren Schlichte aus Knochenasche und Ton bestrichen. Die wieder zusammengebundenen Formhälften wurden mit Lehm verschmiert und bei ca. 350°C getrocknet. Der Abguss erfolgte mit CuSn10 in die noch ca. 300°C heiße Form. Die Gießtemperatur lag bei 1080°C.

In der zweiten Versuchsreihe wurden direkt das gesamte Wachsmodell der Kokille als aneinander passende Hälften gefertigt, *Abb. XIX*. Das Wiederaufpassen einer nach dem Wachsausschmelzverfahren gegossenen Hälfte auf das Beil ist nicht möglich. Um Deformationen vorzubeugen, mussten die perfekt aufeinander passenden Wachsmodellhälften nach dem Abnehmen vom Beil zunächst zum mehrtägigen Aushärten zusammengebunden werden (Versuch 2c). Es folgte das getrennte Einformen der Formhälften mit einem ca. 1,5 cm dicken Lehmformmantel. Nach dessen Trocknung wird das Wachs ausgeschmolzen und

Versuch	Modellvorstellung und Umsetzung	Legierung	$T_{form} \left[^{\circ} C \right]$	$T_{gie\beta}$ [°C]	$t_{gie\beta}\left[s\right]$
1 a	Hodges, mit innenliegendem Bronzebeil und Wachs als Modellwerkstoff für die Kokillenhälfte.	CuSn10	300	1060	ca. 3
1 b	Hodges, mit innenliegendem Bronzebeil und Lehm als Modellwerkstoff für die Kokillenhälfte.	CuSn10	350	1080	ca. 3
1 c	Hodges, mit innenliegendem Bronzebeil und Wachs als Modellwerkstoff für die Kokillenhälfte. Eine teilbare Lehmform ermöglicht ein Schlichten des Prototyps vor dem Abguss.	CuSn10	350	1080	ca. 3
2 a	Wachsausschmelzverfahren, es wird zunächst nur eine Kokillenhälfte als Wachsmodell erstellt.	CuSn10	350	1060	ca. 3
2 b	Wachsausschmelzverfahren, es werden direkt beide Kokillenhälften als Wachsmodelle erstellt.	CuSn10	350	<u>1:</u> 1060 <u>2:</u> 1080	ca. 3
2 c	Wachsausschmelzverfahren, es werden direkt beide Kokillenhälften als Wachsmodelle erstellt. Zum Erhalt der Passgenauigkeit werden sie vor dem Weiterverarbeiten zusammengebunden und ausgehärtet.	CuSn10	350	1080	ca. 3

Tabelle II: Übersicht der durchgeführten Experimente zur Kokillenrekonstruktion.



Abb. XVIII: Auf den Prototypen eines Abb. XIX: Passend zusammengesetztes Bronzelappenbeils modelliertes Wachsmo- Wachsmodell der Kokille (Versuch 2c). Für dell (Versuch 1c). Im nächsten Schritt das Wachsausschmelzverfahren werden die werden Beil und Modell mit einer teilbaren Hälften separat eingeformt. Lehmform umgeben.



die hohlen Formen gebrannt. Der Abguss erfolgte entsprechend der ersten Versuchsreihe in die noch ca. 350°C heißen Formen.

Die in Versuch 1c gegossene Kokillenhälfte, *Abb. XX*, ist vollständig ausgelaufen und das Beil ließ sich zerstörungsfrei auslösen. Die Innenseite (Matrix) ist sehr glatt und weist keinerlei Gussfehler auf. Am Übergang zwischen Lehmform und Beil sowie zwischen den Lehmformhälften haben sich dünne Grate ausgebildet, die aber leicht zu befeilen waren. Zum Erhalt der zweiten Kokillenhälfte müsste das Beil wieder in die erste eingesetzt und entsprechend dem Versuch 1c für den Abguss vorbereitet werden.

Die beiden im Wachsausschmelzverfahren rekonstruierten Kokillenhälften sind ebenfalls komplett ausgelaufen und passen gut aufeinander. Die kleineren Grate und Schülpen könnten auch mit den in der Bronzezeit verfügbaren Steinwerkzeugen beseitigt werden. Auffällig sind Risse in der Beilmatrix, deren Lage in den Kanten der späteren Beilklinge mit den errechneten Positionen der hohen Restspannungen übereinstimmt (s.a. *Abb. XVIIb*).

Zur Prüfung der Gebrauchsfähigkeit dieser erfolgreich rekonstruierten Bronzekokille wurden die Kokillenhälften zunächst von innen mit Schlichte bestrichen. Die zusammengesetzte Kokille wurde dann bei 350°C einige Stunden getrocknet. Der Abguss erfolgte mit einer 10%-igen Zinnbronze (1100°C) in die noch ca. 300°C heiße Kokille. Das erhaltene Lappenbeil kann als gelungener Abguss bezeichnet werden, *Abb. XXI.*

Interpretation der Ergebnisse

Zunächst fällt auf, dass bei den Originalen alle nachvollziehbaren Anschnittpositionen auf der unteren Außenseite der Form liegen. Hinweise auf einen aus heutiger Sicht gießtechnisch sinnvolleren Anschnitt im mittleren Gussstückbereich oder gar den steigenden Guss gibt es nicht.

Die virtuellen und realen Abgüsse machen sowohl die von Hodges' vorgeschlagene Methode als auch das Wachsausschmelzverfahren als Herstellungsverfahren für Bronzekokillen denkbar. Als die wesentlich elegantere Methode erscheint die Verwendung eines bronzenen Beilmodells als Formbestandteil kombiniert mit dem direkten, passgenauen Guss der zweiten Kokillenhälfte auf die erste. Das Verfahren setzt jedoch eindeutig Kenntnisse über Schlichten voraus und erfordert die genaue Einhaltung der gießtechnisch relevanten Parameter. Ferner setzt es das Vorhandensein eines bronzenen Beilprototypen voraus.

Die Herstellung von Kokillen nach dem Wachsausschmelzverfahren ist demgegenüber wesentlich einfacher. Thermische Parameter können weit großzügiger variiert werden und bei dem Material für den Beilprototypen ist man nicht auf Bronze angewiesen, sondern kann auch auf andere Materialien wie Holz, Wachs oder Ton zurückgreifen. Allerdings ist auch hier beim Herstellen und Weiterverarbeiten der wächsernen Formmodelle handwerkliches Geschick vonnöten.



Abb. XX: Innen- und Außenseite der erfolgreich rekonstruierten ersten Kokillenhälfte nach der Modellvorstellung von Hodges.



Abb. XXI: Nach dem Wachsausschmelzverfahren rekonstruierte Kokille mit darin gegossenem Lappenbeil.



Abb. XXII: Vollgriffschwerter. 1: Achtkantschwert, 2: Dreiwulstschwert; 3: Mörigenschwert.

Simulation und Experiment ergeben als Kriterium für das Wachsausschmelzverfahren Rissbildung in den Matrixkanten. Fehlende Hinweise an den Originalen widerlegen es jedoch nicht automatisch. Entstandene Spannungsrisse können durch Schlichteschichten und Patina überdeckt sein. Für die Kokille vom Bullenheimer Berg legt der zusätzliche Vergleich der Röntgenaufnahmen der Nachgüsse mit denen des Originals jedoch nahe, dass sie direkt auf ein Bronzebeil gegossen wurde. Welches das gängige Herstellungsverfahren für Beilkokillen war, lässt sich anhand der wenigen ausreichend erhaltenen und eingehend untersuchten Exemplare nicht klären. Möglicherweise ist die Entwicklung der Methode, gegen ein Metallbeil zu gießen, auch das Resultat zunehmender Erfahrung mit dem Guss in Bronzekokillen, und die Verfahren lösten sich zeitlich ab.

Die erfolgreiche Rekonstruktion der Herstellung von Bronzekokillen legt eine Neubewertung des Vergleichs mit zweiteiligen Steingussformen nahe. In der archäologischen Literatur werden Metallgussformen gerne mit dem Hinweis auf den Aufwand bei der Herstellung als die wertvolleren Werkzeuge betrachtet. Die Rekonstruktion hat aber gezeigt, dass die Herstellung von Bronzekokillen zwar Erfahrung und Geschick aber keine über das Metallhandwerk hinausgehende Fertigkeiten erfordert. Die benötigten Werkstoffe waren den Gießern vertraut und Fehler lassen sich in jeder Phase des Herstellungsprozesses ohne Materialverlust beheben. Demgegenüber setzt die Herstellung von Steinformen ganz andere Kenntnisse und Fertigkeiten voraus und Fehler bei der Zurichtung des Steins sind schwer zu korrigieren. Darüber hinaus stellte eine Steinkokille vor allem in Regionen ohne entsprechende Rohstoffvorkommen einen erheblichen materiellen Wert dar. Aus diesen Gründen bedeutete die Entwicklung der Bronzekokillen vor allem eine Produktionsvereinfachung und damit einen technischen und gesellschaftlichen Fortschritt. Ihr materieller Wert ist aber nicht automatisch höher zu bewerten.

Untersuchungen zur Griffherstellung bronzezeitlicher Schwerter

Das Schwert wurde in der mittleren Bronzezeit zum wichtigsten Bestandteil der Individualbewaffnung. Es handelte sich dabei nicht um eine reine Zweckform, sondern auch um ein Statussymbol. Damit unterlag seine Gestaltung nicht nur funktionalen Gesichtspunkten, sie war auch vom Repräsentationsbedürfnis des Schwertträgers bestimmt, was sich vor allem in der Griffgestaltung manifestierte.

Bronzezeitliche Schwerter lassen sich in Exemplare mit organischen Griffbelägen und solche mit Metallgriff, sogenannte Vollgriffschwerter, unterteilen. Letztere differenziert man nach Form und Verzierung des Griffes, *Abb. XXII.* In Süddeutschland wurden Vollgriffschwerter von der Hügelgräberbronzezeit bis zum Beginn der Eisenzeit gefertigt. Während die frühen Exemplare sehr individuell für einen kleinen Abnehmerkreis angefertigt zu sein schienen, prägten später wenige, aber in großen Stückzahlen überlieferte und weitverbreitete Typen das Bild. Die hier näher untersuchten späturnenfelderzeitlichen Mörigen-Schwerter existierten zum Beispiel von Skandinavien bis Südfrankreich.

Die Rekonstruktion der Herstellung von Mörigen-Schwertgriffen wird durch die Metallgussform von Erlingshofen, Lkr. Eichstätt, erheblich erleichtert, *Abb. XXIII.* Bei dem singulären Fund handelt es sich um eine ursprünglich vierteilige Kokille für Griffe der Variante Preinersdorf. Erhalten sind der Metallkern und zwei Formschalen, die obere Abdeckplatte fehlt. Mehr noch als bei den Beilkokillen stellt sich hier die Frage, ob die Form zum direkten Guss verwendet wurde oder ob sie zur Herstellung von Wachsmodellen diente. Probleme können sich bei der Formfüllung durch die dünnen Wandpartien am Heft und beim Herauslösen des innenliegenden Metallkerns aus dem erstarrten Gussstück ergeben.

Simulationsrechnungen

Um beide mögliche Produktionsweisen bronzezeitlicher Schwertgriffe zu prüfen und zu bewerten, wurden jeweils die Parameter Gießzeit und Vorwärmtemperatur der Form variiert, *Tab. III.* Die Gießtemperatur blieb mit 1080°C konstant.

Beim direkten Abguss in die Bronzekokille ist zu beachten, dass höhere Vorwärmtemperaturen zwar die Formfüllung positiv beeinflussen, der Kern aber durch die eingegossene Bronze zusätzlich so überhitzt werden kann, dass seine Oberfläche anschmilzt und mit dem Gussstück verklebt. Um eine obere Grenze für die Kokillentemperatur auszuloten, wurden in der Kernspitze entlang der Mittelachse und ca. 0,5 mm unterhalb der Stelle, auf die der Gießstrahl trifft, virtuelle Thermoelemente eingesetzt, *Abb. XXIV*.

Eine vollständige Formfüllung konnte mit keiner der gewählten Parametereinstellungen errechnet werden. Bereits bei 40% - 50% Formfüllung ist die Schmelztemperatur in den dünnen Heftschultern so weit abgefallen, dass eine weitere Füllung der Heftflügel behindert wird. Insgesamt sinkt die Temperatur so früh in das Erstarrungsintervall und darunter ab, dass zusätzlich mit Kaltschweißen in der Knaufplatte zu rechnen ist. Am Ende einer theoretischen Formfüllung sind bereits weite Teile der Griffgeometrie erstarrt (s.a. Tab. III, Spalte 4). Schwierigkeiten bezüglich einer zu starken Erhitzung des Metallkerns sind oberhalb einer Vorwärmtemperatur der Kokille von 450°C zu erwarten, *Abb. XXV*.

Auch bei dem Guss in Lehmformen sind bei einer Gießzeit von 3 s einzelne Partien der Gussstücke schon unter die Liquidustemperatur (1020°C) abgekühlt. Mit Formfülldefekten ist für das tatsächliche Gussstück dadurch aber nur in einzelnen Fällen zu rechnen, da die effektive Viskosität der erstarrenden Bronze erst unterhalb ca. 1000°C stark zunimmt. Einen sicheren Gusserfolg verspricht Parameterkombination 4, wobei eine Gießzeit von 2 Sekunden jedoch für den realen Abguss extrem kurz ist. Aufgrund der Erstarrungsverläufe ist jeweils im Übergang zwischen Schaft und Knaufplatte mit Porositäten zu rechnen, da die schneller abkühlende Knaufplatte eine Nachspeisung vom Anschnitt her behindert

Experimentelle Nachgüsse

Praktisch nachvollzogen wurde der Guss des Schwertgriffs im Kokillenguss und im Wachsausschmelzverfahren. Hierzu wurden von den erhaltenen Teilen der Gussform zunächst


Abb. XXIII: Bronzekokille von Erlingshofen mit einer zeichnerischen Rekonstruktion der in ihr gegossenen Schwertgriffe. Typ Mörigen, Variante Preinersdorf.

Tabelle III: Jeweils für den Guss in Bronzekokille und Lehmform durchgeführte Simulationen sowie der beim Kokillenguss am Ende der theoretischen Formfüllung bereits erstarrte Bronzeanteil.

Variation	Gießzeit [s]	Formtemperatur [°C]	Erstarrter Bronzeanteil beim Kokillenguss [%]
1	3	300	83
2	3	350	80
3	3	450	74
4	2	450	57



Abb. XXIV: Längsschnitt durch die vernetzte Griffform (hellgrau) mit eingesetzten virtuellen Thermoelementen zur Temperaturkontrolle während Abguss und Erstarrung.



Abb. XXV: Temperaturverlauf im Kern der Bronzekokille für die Variationsrechnung 3. In der Spitze und im Bereich des auftreffenden Gießstrahls wird die Solidustemperatur (830°C) kurzzeitig (2s) überschritten.

originalgetreue Kopien angefertigt und die fehlende Abdeckplatte an der Griffoberseite ergänzt. Die Plattenmitte erhielt eine Vertiefung, in die abgesetzte Spitze des Kerns zu dessen Fixierung greift.

Für den direkten Abguss in die Kokillenkopie wurden der Kern und die Innenseiten der übrigen Formteile zunächst mit der bereits bei dem Nachguss der Beilkokille benutzten Schlichte bestrichen. Sie soll sowohl als Isolationsschicht die Formfüllung begünstigen und ein Verkleben des Kerns verhindern als auch als Trennmittel das Herauslösen des Kerns aus dem erstarrten Gussstück erleichtern. Die zusammengesetzten Kokillenteile wurden durch eine Drahtverschnürung fixiert und die Fügenähte mit einer ca. 1 cm dicken Lehmschicht abgedichtet. Nach der 10-stündigen Trocknung bei 250°C wurde die heiße Form in einen Kasten gesetzt und mit losem Sand hinterfüllt. Die Formtemperatur unmittelbar vor dem Abguss lag bei 220°C. Die Gießtemperatur der 10 %-igen Zinnbronze betrug ca. 1080°C, die Gießzeit ca. 3s.

Die Wachsmodelle für die Lehmformen wurden in der Kokillenkopie gegossen und vor dem Formaufbau versäubert. Den Tonkern bildete eine eingedrückte "erdfeuchte Stampfmasse" aus Lehm. Um ein Verrutschen des Kerns in der Form nach dem Ausschmelzen des Modells zu verhindern, wurden als Kernhalter je ein Draht von unten und oben so in den Kern geschoben, dass noch ca. 2 cm überstanden. Dem Aufkneten des zweischichtigen Formmantels folgte dessen Trocknung und das Wachsausschmelzen. Der Abguss erfolgte in die ausgeglühten, noch ca. 350°C heißen Formen. Die übrigen Parameter entsprachen dem Abguss in die Kokille.

Der direkt in die Kokillenkopie gegossene Schwertgriff kann als gelungen bezeichnet werden, *Abb. XXVI*. Die Form ist vollständig ausgelaufen und der Metallkern ließ sich durch kräftige Schläge auf den außenliegenden Absatz heraustreiben. Die glatte und saubere Oberfläche des Gussstücks bildet alle Konturen ab. Auch die Innenkontur erscheint vollständig. Zwischen die Fügenähte der Form ist Schmelze eingedrungen und hat schmale Grate ausgebildet, die jedoch leicht zu befeilen waren. Die Knaufplatte weist eine leicht poröse Einfallstelle in Richtung Einguss auf. An dem durch die Kernfixierung entstandenen Loch ist leichte Rissbildung zu erkennen.

Die beiden in Lehmformen hergestellten Schwertgriffe sind ebenfalls vollständig ausgelaufen und weisen abgesehen von den für das Verfahren üblichen Oberflächenrauhigkeiten äußerlich keine Gussfehler auf. Bei einem Exemplar ist jedoch unterhalb der Griffplatte ein etwa stecknadeldickes "Loch" auszumachen. Ein Längsschnitt entsprechend der Formteilung zeigte, dass es sich dabei um die Öffnung einer Luftblase handelt, die sich am oberen Ende des Formkerns unterhalb der Griffplatte ausgebildet hat, *Abb. XXVII*. Dadurch weicht der Griffhohlraum deutlich von der Innenkontur des Wachsmodells ab. In der Röntgenaufnahme des zweiten Abgusses ist entsprechend der Simulationsergebnisse Lunkerbildung im Übergangsbereich Griffstange/Knaufplatte zu beobachten. Die Innenkontur erscheint korrekt.



Abb. XXVI: In der rekonstruierten Kokille gegossener Schwertgriff nach dem Abtragen der Gussgrate und Säubern der Oberfläche.



Abb. XXVII: Längsschnitt durch einen nach dem Wachsausschmelzverfahren gegossenen Schwertgriff (a). Auf der dem Anschnitt zugewandten Seite wurde von der erstarrenden Schmelze eine Luftblase eingeschlossen (Pfeile). Die ursprüngliche Innenkontur zeigt ein entsprechender Schnitt durch das Wachsmodell (b).

Interpretation der Ergebnisse

Den Simulationsrechnungen zufolge sind Lehmformen aufgrund ihrer guten Isolationswirkung auch für dünnwandige Gussstücke geeignet und lassen wenig Schwierigkeiten bei der Formfüllung erwarten. Bei Bronzeformen muss hingegen mit einer fehlerhaften Formfüllung gerechnet werden. Positiv würde sich sowohl eine Verkürzung der Gießzeit als auch eine Erhöhung der Formvorwärmtemperatur auswirken. Kürzere Gießzeiten sind allerdings in der Praxis kaum zu realisieren und einem extremen Vorheizen der Kokille steht die Gefahr entgegen, dass der Metallkern mit dem Gussstück verklebt.

Die Versuche belegen jedoch, dass, bei Verwendung einer gut isolierenden Schlichte, ein direkter Abguss in die Kopie der Form aus Erlingshofen möglich ist. Gleichzeitig ist aber auch der Einsatz der Kokille als Gussform für Wachsmodelle denkbar. Der Vorteil dieses Verfahrens läge darin, dass die Wachsmodelle leicht zu unterschiedlichen Typen modifiziert werden könnten.

Ferner zeigen Röntgenbilder von Originalen oft eine den Simulationen und Experimenten in Lehmformen entsprechende poröse Zone unterhalb der Knaufplatte. Auch eine Deformation des Kernholraums, wie es der erste Abguss aus der Lehmform zeigt, ist häufig zu beobachten. Möglicherweise existierten, wie bei der Lappenbeilproduktion, beide Produktionsverfahren.

Diskussion und Ausblick

Ausgehend von der guten Fundsituation in der Bronzezeit wurden in dieser Arbeit mit Hilfe moderner Methoden der Werkstoffprüfung, der numerischen Simulation und verifizierender gießtechnologischer Experimente neue Ansätze zur Lösung technikgeschichtlicher Fragestellungen beleuchtet. Im Mittelpunkt stand die Produktion von Randleisten- und Lappenbeilen sowie deren mögliche Gussformen aus Lehm, Stein und Bronze. Mit den Schwertgriffen wurde ein Objekt berücksichtigt, dem neben der praktischen auch eine repräsentative Aufgabe zukam.

- Für die Gießtechnik der Randleistenbeile ergab sich der Gebrauch von mineralischen Formen. Die Anschnittposition lag gewöhnlich am Nacken. Elementares Bestandteil der Randleistenbeilfertigung war das Schmieden, wodurch die Gebrauchsgeometrie erheblich von der Gussgeometrie abwich.
- Die in der mittleren Bronzezeit aufkommenden Lappenbeile scheinen zwar ein funktional ausgereiftes Werkzeug gewesen zu sein, die hohen Schaftlappen erwiesen sich jedoch als ungünstige Geometrie bezüglich des Auslösens aus den eingesetzten Dauerformen. Die an den Originalbeilen häufig beobachteten Fehlstellen an Ösen und Schaftlappen konnten als typische Gussfehler für den Guss in Bronzekokillen herausgestellt werden.
- Für die Herstellung von Bronzekokillen scheint sowohl das Wachsausschmelzverfahren mit kompletten Lehmformen existiert zu haben als auch die Methode, ein bronzenes

Beilmodell als Formbestandteil zu nutzen und die zweite Kokillenhälfte direkt auf die erste zu gießen. Möglicherweise löste letzteres das Wachsausschmelzverfahren zeitlich ab.

- Die Erkenntnisse über Kokillenguss und –produktion relativieren die allgemein viel höhere Wertschätzung von Bronzekokillen gegenüber solchen aus Stein. Die Entwicklung von Bronzekokillen stellte zwar eine Vereinfachung des Verfahrens und damit einen technischen und gesellschaftlichen Fortschritt dar, nicht aber automatisch einen höheren materiellen Wert.
- Für den dünnwandigen Schwertgriff aus der Gussform von Erlingshofen ist neben dem Wachsausschmelzverfahren auch der direkte Guss in die Kokille denkbar. Welches der gängige Formstoff für die Schwertgriffproduktion war, oder ob verschiedene Verfahren parallel existieren, bleibt unklar.

Obwohl über die systematische Hinterfragung der Entstehung einzelner Objekte weitreichende Erkenntnisse zum bronzezeitlichen Metallhandwerk gewonnen wurden, bleiben noch einige Fragen offen:

- Waren die Geometrie und die Randleisten eines Randleistenbeils weitestgehend im Guss angelegt, oder wurden wenige existierende Grundformen individuell ausgeschmiedet?
- In welchem Umfang wurden die nachgewiesenen Formstoffe eingesetzt, und welche Wertschätzung kam ihnen zu?
- War das Schlichten von Bronzeformen ein gängiges Hilfsmittel, und welchen Einfluss hatte es auf die bronzezeitliche Gießereitechnik?

Die in den theoretischen und praktischen Untersuchungen gefundenen Antworten für das bronzezeitliche Gießerei- und Schmiedehandwerk bezeugen ein großes technisches Wissen und die Beherrschung komplizierter Fertigungsverfahren. Ferner lässt sich ein Streben nach effizienten Lösungen erkennen.

1 Einführung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Archäologische Funde interessieren uns nicht nur als reine Ausstellungsobjekte. Unweigerlich stellt sich auch die Frage, wie und wann die überlieferten Werkzeuge, Waffen, Gebrauchsoder Schmuckgegenstände produziert und eingesetzt wurden, welche Bedeutung ihnen zukam und wie das damalige Leben aussah.

Vor allem die seit den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts verstärkten Aktivitäten der experimentellen Archäologie setzten hier entscheidende Impulse in Richtung eines besseren Verständnisses kulturgeschichtlicher Zusammenhänge, indem sie begannen, die klassische Archäologie durch Erkenntnisse über das in einer prähistorischen Gesellschaft verfügbare technische Wissen zu ergänzen. Fundsituation, Erhaltungszustand und konservatorische Restriktionen erschweren jedoch oft systematische und technisch fundierte Untersuchungen, sodass die Experimente häufig dem "Trial and Error"-Verfahren unterliegen. Beispiele, in denen Analyse und Versuch verstärkt kombiniert wurden, beschreiben Autoren wie Drescher [1957], Schneider u. Zimmer [1984], Zwicker [1984], Jantzen [1991], Fasnacht [1995] und wenige andere.

Mit einer ungewöhnlich guten Fundsituation bietet die Bronzezeit, aus der im Gegensatz zu anderen Zeitperioden zahlreiche, überwiegend gegossene Metallgegenstände überliefert sind, die Möglichkeit einer breitgefächerten und sehr detaillierten Untersuchung, sowohl im archäologischen als auch im gießtechnischen Sinne [Sahm, Gebhard, 1995]. Besonders die anspruchsvollen Erzeugnisse der einheimischen Metallgießer belegen ein großes technisches Wissen und die Beherrschung komplizierter Herstellungsverfahren.

Ausgehend von diesen guten Forschungsvoraussetzungen befasst sich die vorliegende Arbeit mit der Gießerei- und Schmiedetechnik der in der Bronzezeit gebräuchlichen Ranldeistenund Lappenbeile sowie mit der Herstellung und dem Einsatz ihrer Gussformen aus Lehm, Stein und Bronze. Ein abschließendes Kapitel widmet sich mit der Herstellung bronzezeitlicher Schwertgriffe einer Objektgattung die, anders als das Werkzeug Beil, nicht nur funktionale sondern auch repräsentative Ziele verfolgte.

Erste wichtige Hinweise auf die Herstellungstechnik der Originale geben meist schon äußere Merkmale. Hierbei sind gussspezifische Eigenheiten wie Formfülldefekte oder Abdrücke des Formmaterials ebenso hilfreich wie Spuren der Nachbearbeitung. Letztere belegen zum Beispiel, dass das Gießen in seiner Eigenschaft als "Urformtechnik" oft nur einen Teilproduktionsschritt darstellte. Innere Strukturen wie Gefügeausbildungen oder Porositätsverteilungen verraten weitere Details über Gussqualität, Anschnittposition, Grad der mechanischen Überarbeitung oder den Formstoff. Ein entscheidendes Kriterium für Auswahl und Einsatz der geeigneten Prüfmethode (Röntgenographie, Elektronenmikroskopie, Metallographie,...) stellt der Erhalt des Kulturguts und damit ein weitestgehend zerstörungsfreies Arbeiten dar.

Vor dem Hintergrund der archäologischen Kontexte (Werkstattfunde, Literaturrecherchen,...) werden erste Aussagen über die Produktion der bronzezeitlichen Gegenstände möglich, die aber immer noch eine recht große Anzahl von Theorien bezüglich der eigentlichen Herstellungstechnik und der gießtechnischen Parameter zulassen. Eine effiziente Methode ihrer Eingrenzung bietet die Simulation des Gieß- und Erstarrungsprozesses, die es erlaubt, am Rechner verschiedene gießtechnische Parameter wie Gießzeit, Anschnittsystem, Formmaterial oder Gieß- und Formtemperatur so lange zu variieren, bis das Erscheinungsbild des Originals optimal angenähert ist. Dadurch beschränken sich zeitaufwendige reale Abgüsse auf die Verifizierung der aus den Objektuntersuchungen und der Simulation erhaltenen Erkenntnisse und auf solche Bereiche, die sich mit der Simulation nicht erschließen lassen. Dies sind beispielsweise der Formaufbau, die Schmelztechnik und die Nachbearbeitung [Wirth u.a.,1999].

Das Gießen war zwar in der Bronzezeit ganz offensichtlich ein weit verbreitetes Handwerk. Zur Abschätzung, welcher Stellenwert ihm jedoch im gesamtem Herstellungsprozess zukam und unter welchen Bedingungen die überlieferten Objekte entstanden sind, wird sowohl der Gießprozess praktisch nachvollzogen als auch ergänzende Versuche zum Freiformschmieden durchgeführt. Letztere sollen Rückschlüsse auf die Ursprungsgeometrie ermöglichen. Um eine Bewertung der Aussagekraft der theoretischen Überlegungen und der Simulationen in Bezug auf den prähistorischen Entstehungsprozess zu erhalten, werden die möglichst originalgetreuen Kopien den gleichen Materialprüfungen unterzogen wie die Originale sowie die Ergebnisse verglichen. Ferner sollen Experimente zur Herstellung und zum Einsatz von Gussformen aus verschiedenen Materialien deren Einsatzmöglichkeiten und Wertstellung näher beleuchten. Hierbei werden auch Methoden erprobt, anhand des Originals zu bestimmen, in welchem Formstoff es gegossen wurde.

Im Idealfall erschließt die Gesamtheit aus den archäologischen Recherchen, den Untersuchungen am Original sowie den virtuellen und den experimentellen Abgüssen den bronzezeitlichen Herstellungsprozess, *Abb. 1.1.* Auch wenn die untersuchten Objekte im Vergleich zur Gesamtzahl bekannter bronzezeitlicher Gusserzeugnisse nur eine sehr geringe Auswahl repräsentieren, lassen sich aus den gezielt ausgesuchten Formenkomplexen doch Antworten sowohl zur Vielfalt der technischen Lösungen als auch zur fortschreitenden zeitlichen und räumlichen Entwicklung des Metallhandwerks in der bronzezeitlichen Gesellschaft finden.

1.2 Geographischer und historischer Rahmen

Unter der "Bronzezeit" versteht man in der Archäologie einen Zeitabschnitt der Geschichte, der geprägt ist durch die Verwendung des Materials Bronze zur Herstellung von Gerät, Werkzeug, Schmuck und Waffen. Die Definition des Geschichtsabschnitts nach dem Material



Abb. 1.1: Systematischer Ablauf zur Untersuchung des bronzezeitlichen Herstellungsprozesses und der kulturhistorischen Hintergründe.

ist rein forschungsgeschichtlich bedingt. Sie gibt nicht die umwälzenden gesellschaftlichen und geschichtlichen Ereignisse und Entwicklungen dieser Epoche wieder, zu denen beispielsweise die Blütezeit der minoischen und mykenischen Kultur zählte.

Die Anfänge der Kupferverarbeitung und Bronzetechnik sind zunächst außerhalb des hier gewählten Untersuchungsgebietes, im Vorderen Orient, festzustellen. Bedingt durch die Grenzenlosigkeit der damaligen Zeit breitete sich die Technologie, vor allem auch durch die Suche nach Rohstoffen, in Richtung Abendland aus. Hier wurde zunächst der Mittelmeerraum (ca. 2200 v. Chr.) erfasst, bevor das Wissen um die Bronzeherstellung und -verarbeitung Mittel- (ca. 1800 v. Chr.) und Nordeuropa (ca. 1700 v. Chr.) erreichte [Mohen, Eluère, 2000].

Einmal etabliert, entwickelte das bronzeverarbeitende Handwerk besonders in Mitteleuropa eine Eigendynamik, die unabhängig von den Ursprungsgebieten, auf der ständigen Suche nach Verbesserungen, zum Ende des 2. Jahrtausends vor Christus zu einem Kenntnisstand führte, der für die nachfolgende Zeit Standard bleiben sollte. [Steffgen, 1997-2000].

Trotz der zeitlichen Verschiebungen und den kulturell spezifischen Eigenheiten führte der Kontakt und Austausch zwischen den einzelnen bronzezeitlichen Gesellschaften in Europa, *Abb. 1.2*, doch zu ähnlichen Entwicklungen und Phänomenen. Entsprechend lässt sich die Epoche den regionalen kulturellen und chronologischen Einteilungen übergeordnet in drei Teilepochen gliedern [Jockenhövel, 1994]:

Frühe Bronzezeit	(ca. 2200 v. Chr ca.	1500 v. Chr.)
Mittlere Bronzezeit	(ca. 1500 v. Chr ca.	1300 v. Chr.)
Jüngere Bronzezeit	(ca. 1300 v. Chr ca.	800 v. Chr.)

Andere Autoren [z.B. Steffgen u.a.,1997] unterscheiden innerhalb der Jüngeren Bronzezeit zwischen einer Jung- (ca. 1300 v. Chr. - ca. 940 v. Chr.) und einer späten Bronzezeit (ca. 940 v. Chr. - ca. 750 v. Chr.). Die individuellen Unterteilungen für die Fundgebieten der hier untersuchten Objektgattungen zeigt *Abb. 1.3.*

Als regionaler Arbeitsschwerpunkt wurde zunächst Süddeutschland gewählt. Die Behandlung der Bronzekokillen jedoch erforderte eine kulturübergreifende Ausweitung des Arbeitsgebietes, vor allem nach Westen bis zum Atlantik und nach Norden bis Jütland.

1.2.1. Randleistenbeile, Abb. 1.4

Randleistenbeile sind vor allem in der frühen und mittleren Bronzezeit anzusiedeln. Während die ersten als Werkzeuge anzusprechenden Metallbeile formal den gleichzeitigen Steinbeilen entsprachen, wurden mit der Entwicklung der Randleistenbeile erstmals die Werkstoffeigenschaften des Metalls zur Optimierung dieses Gerätetyps genutzt. Dabei ermöglichen die Randleisten nicht nur eine sicherere Schäftung, der so entstehende doppel-T-förmige Querschnitt verbessert auch die Stabilität des Werkstücks bei einer Reduzierung des Materialbedarfs.



600	Allgemein	gemein Frankreich		Mitteleuropa	Süddeutschland	Nordeuropa
000	Eisen-	Hallstatt Ancien		Hallstatt C2	Bubesheim	
700	zeit	Amoricanische Tüllenbeile	attze	allstatt C1 sp	Mindelheim	Periode VI
800	Späte	Karpfenzungen Komplex	Hallst	Hallstatt C1 fr.	Gündlingen	Periode Vb
900	Bronzezeit	Bronze Final IIIb III Atlantique	Hallstatt B 2/3		Mauern Kelheim III	Periode Va
1000		Bronze Final IIIa II Atlantique		Hallstatt B1	Kelheim II	
1100	00 Jung- bronzezeit	Bronze Final IIb II Atlantique	erzeit	Hallstatt A2	Kelheim I Münchner Urnf. II	Periode IV
1200		Bronze Final IIa II Atlantique	henfeld	Hallstatt A1	Hart Münchner Urnf. I	Periode IIIb
1200		Bronze Final I I Atlantique	Ľ	Bronze D	Riegsee	Periode IIIa
1300	a et 1	Bignan	Bronze C2		Asenkhofen	
1400	Bronzezeit	Bronze Moyen		Bronze B2/C1 Bronze B1	Lochham	Periode II
1500				Drongo A 2		
1600		iische		D A2		
1800		Bretor		Bronze A2	Malching	Periode I
2000	Frühe Bronzezeit	Bronze Angion				
2200	Bronzezen	Bronze Anelen		Bronze A1	Straubing	
2400					-	

Abb. 1.3: Unterteilung der Bronzezeit im untersuchten Raum. (Jahresangaben: v. Chr.)



Abb. 1.4: Schema eines Randleistenbeils mit Detailbezeichnungen [B.-U. Abels, 1972, Abb.1].

Randleistenbeile sind im Materialbestand der frühen und mittleren Bronzezeit zwar zahlreich und in großer Formenvielfalt vertreten. Die Quellensituation zur Rekonstruktion des Gießverfahrens ist jedoch wesentlich ungünstiger als bei jüngeren Beilformen. Gussformen sind selten und nur aus der jüngeren Phase des Produktionszeitraums bekannt. Es handelt sich dabei um Fragmente zweiteiliger Steinformen. Bei weiteren, möglicherweise älteren Steinkokillen sind die Randleisten nicht im Guss angelegt. Ob in ihnen Ausgangsformen für Randleistenbeile oder Barren gegossen wurden, ist umstritten. Rohgüsse sind aus beiden Kokillenformen bekannt; es stellt sich dennoch die Frage, ob die wenigen Steinkokillen tatsächlich das gängige Herstellungsverfahren anzeigen oder ob nicht überwiegend in einteiligen Lehmformen produziert wurde [Steffgen, 1997-2000].

Für die Untersuchungen standen 17 Randleistenbeile aus dem Bestand der Prähistorischen Staatssammlung München zur Verfügung, von denen vier rekonstruiert wurden (s. Abb. 2.2.1). Sie repräsentieren den Produktionszeitraum und die geometrischen Grundformen von Randleistenbeilen nach Kibbert [1980, Tab. 6]. Ihre zeitliche Stellung innerhalb der Bronzezeit ist in *Abb. 1.5* dargestellt.

1.2.2 Lappenbeile

In der mittleren Bronzezeit setzte sich mit den Kupfer-Zinn-Legierungen nicht nur ein verarbeitungstechnisch und funktional besserer Werkstoff durch, die Gießer und Schmiede versuchten auch, durch formale Veränderungen die Funktionalität von Beilklingen zu erhöhen. Dies führte zu regional sehr unterschiedlichen Ergebnissen, *Abb. 1.6.*

Recht früh unterbrach man im nördlichen und nordwestlichen Mitteleuropa die durchgehende Bahn von Randleistenbeilen durch einen Quersteg, der den Schaft am unteren Ende fixierte und so ein Eintreiben der Klinge in das Holz beim Gebrauch des Geräts verhinderte, *Abb. 1.7.* Zweckmäßiger und daher langlebiger waren Absatzbeile, deren seitlich erhöhte Bahn deutlich von der im oberen Teil dicken Schneidenpartie abgesetzt war. Eine ganz neue Klingenform setzte sich in Zentraleuropa und Italien im Laufe der Zeit mit den Lappenbeilen durch. Hier sind Bereiche der Seiten beidseitig so stark ausgezogen, dass sie um den Holzschaft geschmiedet werden konnten [Steffgen, 1997-2000], *Abb. 1.8.* Hierbei unterscheidet man je nach Position dieser "Lappen" zwischen "mittelständigen" (Bahnmitte) und "oberständigen" Lappenbeilen (oberes Bahnende).

Zu Beginn der Urnenfelderzeit setzten sich die Verbreitungsgebiete von Absatz- und Lappenbeilen noch scharf voneinander ab. Die Grenze verlief entlang der Rhône und zog sich etwa im Bereich der Saône-Mündung nach Nordwesten bis zur mittleren Seine. Die Nordgrenze der geschlossenen Lappenbeilverbreitung verlief im Mittelgebirge [Hansen 1994, 159 Abb. 87]. In Mähren und im Osten Österreichs stieß das Verbreitungsgebiet der Lappenbeile an Regionen, in denen fast ausschließlich Tüllenbeile verwendet wurden. Diese Beilform zeichnet sich durch eine Art Trichter (Tülle) am oberen Beilende aus, die das Holz zur Schäftung aufnimmt.



Abb. 1.5: Zeitliche Stellung der untersuchten Randleistenbeiltypen innerhalb der Bronzezeit.



Abb. 1.6: Grundzüge der formalen Entwicklung von Bronzebeilen im Verbreitungsgebiet der Bronzekokillen.



Abb. 1.7: Absatzbeil mit erhaltener, originaler Holzschäftung. Vester-Vamdrup "Guldhoej", DK. [E.Aner/K.Kersten, Bd. 8, Neumünster 1986, Taf. 15].



Abb. 1.8: Schemazeichnung eines Lappenbeiles. Die ausgezogenen Seitenpartien nennt man "Lappen". Zur stabileren Schäftung wurden sie um den Schaft geschmiedet.

Im anschließenden Zeitraum wurden diese Grenzen durchlässiger, sodass im Westen und Norden mit dem Tüllenbeil eine neue Komponente hinzukam. Gleichzeitig dehnte sich das Verbreitungsgebiet von Lappenbeilen nach Westen aus und umfasste am Ende der Bronzezeit ganz Frankreich. Jüngere Lappenbeilformen fanden sich auch im norddeutschen Flachland, seltener in England und Dänemark. Im Gegensatz zu Frankreich ist für diese Gebiete eine eigene Produktion nicht gesichert. Hier dominierten eindeutig die Tüllenbeile, deren Herstellung sich in Norddeutschland bis ins 14. Jahrhundert v. Chr. zurückverfolgen lässt. Auch im deutschen Mittelgebirgsraum waren jetzt sowohl Tüllen- als auch Lappenbeile in Gebrauch, wenngleich letztere im Fundbestand überwiegen und erstere von Nordwest nach Südost so stark ausdünnen, dass sie in Süddeutschland zahlenmäßig keine Rolle mehr spielen.

So groß die formalen Unterschiede zwischen den einzelnen Beilen sein mögen, allen gemeinsam ist, dass sie in großer Zahl in mehrteiligen Gussformen hergestellt wurden. Diese konnten aus Stein, Metall oder Lehm bestehen. Aus dem südöstlichen Europa sind bislang nur Formen aus mineralischen Formstoffen bekannt. Im westlich anschließenden Raum kommen Metallkokillen hinzu, deren vermehrtes Auftreten als Entwicklung hin zur "Massenproduktion" interpretierbar ist [Steffgen, 1997-2000].

Detaillierter untersucht wurde die Herstellung von oberständigen Lappenbeilen der ausgehenden Bronzezeit anhand einer Originalkokille aus der Höhensiedlung auf dem Bullenheimer Berg in Mainfranken.

1.2.3 Bronzekokillen für Lappenbeile

Eine systematische archäologische Bearbeitung der Metallformen steht bislang aus. Bisher ist man bei Angaben zur Verbreitung dieser Technik in der Bronzezeit einzig auf die Verbreitung der Gussformen selbst angewiesen.

• Mittelständige Lappenbeile

Unter den Bronzegussformen sind solche für mittelständige Lappenbeile mit 11 Exemplaren zahlenmäßig nur schwach vertreten. Sie sind eine überwiegend zentraleuropäische Erscheinung. Im Westen und Norden deckt sich ihre Verbreitung in etwa mit dem geschlossenen Auftreten der Beile, im Süden und Südosten dürften andere Formmaterialien verwendet worden sein [Steffgen, 1997-2000].

Mittelständige Lappenbeile wurden vorwiegend als Fertigprodukte einzeln deponiert [Hansen 1994, 188f., Abb. 116]. Dies und die durch die mechanische Bearbeitung stark veränderte Form des Rohlings machen individuelle Zuweisungen zu Gussformen praktisch unmöglich.

• Oberständige Lappenbeile

Metallgussformen für oberständige Lappenbeile stammen zum überwiegenden Teil aus den französischen Hortfunden des Karpfenzungenschwerthorizontes. Kleinere Konzentrationen

finden sich in der Schweiz und im Rhein-Main-Gebiet. Im Osten reicht das Gebiet bis Mitteldeutschland. Räumlich isoliert bleiben zwei Formen aus der Adriaregion.

Anhand der Schalenfixierung und der Form der Handhaben lassen sich zwei Typen definieren. Bei dem ersten verläuft ein Nutverschluss um die Beilkontur, *Abb. 1.9a.* Sie haben in der Regel große, parallel zur Längsachse der Form stehende Henkel am stets hohen, trichterförmigen Einguss. Zum zweiten Typ werden Formen mit Steckverschlüssen und einem Steg zwischen den Wölbungen der Schaftlappen als Handhabe gerechnet, *Abb. 1.9b.* Die Zahl der Verschlüsse liegt zwischen zwei und sieben. Unabhängig vom Grundtyp folgen bei allen Formen der Umriss und die Gestaltung der Außenseiten weitgehend der Beilkontur und der Form des Eingusses. Dementsprechend verlaufen, bedingt durch die Kontur der seitlichen Beilöse, die Längsseiten nicht symmetrisch, und die Wölbungen der Schaftlappen sind auf der Außenseite deutlich ausgeprägt.

Die beiden Gussformtypen setzen sich räumlich und damit kulturell gut voneinander ab, *Abb. 1.10.* Formen mit parallel zur Längsachse ausgerichteten Henkeln am Einguss und Nutverschluss oder einer Kombination von Nut- und Steckverschlüssen sind in Westeuropa die Regel. Steckverschlüsse kombiniert mit Querstegen sind dagegen charakteristisch für die Formen östlich des Rheins. Gussformen, die sich keinem der beiden Typen zuweisen lassen, sind selten und stammen aus Regionen, in denen die Verbreitungsgebiete des westlichen und östlichen Typs aneinander stoßen. Dies zeigt, dass sich die Verbindung zwischen Nordwestfrankreich und dem westlichen Urnenfelderbereich nicht nur auf das Fundgut beschränken, sondern auch auf technologischer Ebene bestanden. Unterschiedlich ist einzig die Gestaltung der Gussformen, die ihrerseits aber enge Kontakte der Werkstätten innerhalb der Regionen belegt [Steffgen, 1997-2000].

Wie bei den mittelständigen Lappenbeilen ist auch hier die Zuweisung von Beilen zu bestimmten Gussformen durch die formalen Veränderungen des Rohlings bei der Fertigstellung des Beils schwierig. Einander zuzuordnende Stücke sind bislang nicht bekannt.

Zum Verständnis der Fundsituation und des bronzezeitlichen Handwerks ist neben der Beilauch die Kokillenherstellung interessant. Ausgehend von der Gussform vom Bullenheimer Berg wurden die Untersuchungen zur Beilproduktion durch solche zur Rekonstruktion der Kokille ergänzt.

1.2.4 Schwertgriffe

Das Schwert, *Abb. 1.11*, war in Mitteleuropa seit der mittleren Bronzezeit eine geläufige Waffenform. Als Totenausstattung charakterisierte es den waffenfähigen Mann und war bereits damals wie in dem gesamten Zeitraum, in dem es wichtigster Bestandteil der Individualbewaffnung war, nicht nur eine reine Zweckform, sondern auch Statussymbol. Seine Gestaltung unterlag daher nicht nur funktionalen Gesichtspunkten, sie war auch



Abb. 1.9: Bronzekokillen für oberständige Lappenbeile.a) Typ I mit umlaufender Nut und senkrechten Henkeln. Form: Meschers.b) Typ II mit Steckverschlüssen und waagerechten Handhaben. Form: Bullenheimer Berg, Mainfranken.



- Vertikaler Henkel + Nut- oder Nut- und Steckverschluss
- Horizontaler Henkel + Steckverschluss
- O Horizontaler Henkel + Nutverschluss
- O Vertikaler Henkel + Steckverschluss

Abb. 1.10: Verbreitung der Bronzekokillen für oberständige Lappenbeile.



Abb. 1.11: Schemazeichnung eines Schwertes mit den Detailbezeichnungen.

bestimmt vom Repräsentationsbedürfnis des Schwertträgers. Dies manifestierte sich vor allem in der Griffgestaltung, gelegentlich auch in der Verzierung der Klinge.

Bronzezeitliche Schwerter lassen sich in Exemplare mit Metallgriff, sogenannte Vollgriffschwerter, und solche mit Griffbelägen aus Holz oder Knochen unterteilen. Letztere werden je nach Gestaltung des oberen Klingenabschlusses als Heftplatten-, Griffzungen- oder Griffangelschwerter bezeichnet, *Abb. 1.12*. Vollgriffschwerter differenziert man nach Form und Verzierung des Griffes, *Abb. 1.13*. In Süddeutschland wurden Vollgriffschwerter von der Hügelgräberbronzezeit bis zum Übergang zur Eisenzeit gefertigt. Dabei war die Anfangsphase von recht individuell anmutenden Schwertern für einen wohl noch kleinen Abnehmerkreis geprägt. Später beherrschten wenige, aber in großen Stückzahlen überlieferte und weitverbreitete Schwerttypen das Bild, *Abb. 1.14* [Steffgen, 1997-2000].

Die Verbreitung der hier näher betrachteten Mörigen-Schwerter reichte von Skandinavien bis ins südliche Frankreich. Bezüglich ihres Herstellungsverfahrens zeigen Röntgenbilder eine im Vergleich zu älteren Exemplaren weniger stabile Schäftung. Das obere Klingenende wurde zu einer kleinen, dreieckigen Platte reduziert, die keinen Kontakt zur Griffwandung mehr hat, sondern nur noch durch zwei Niete und die angeschmiedeten Heftunterkanten gehalten wird. Für Hundt [1965] belegt dies zusammen mit der dünnen Griffwandung eine späturnenfelderzeitliche Massenproduktion zu Lasten der Qualität.

Eingehend untersucht wurde die Herstellung der dünnwandigen Griffe für Mörigen-Schwerter. Als Rekonstruktionsvorlage diente die Gussform von Erlingshofen, *Abb. 1.15*. Bei dem singulären Fund handelt es sich um eine ursprünglich vierteilige Kokille für Griffe der Variante Preinersdorf. Erhalten sind der Metallkern und zwei Schalen, die obere Abdeckplatte fehlt.



Abb. 1.12: Differenzierung der Schwerter mit Griffen aus organischem Material. 1 Griffplattenschwert; 2 Griffzungenschwert; 3 Griffangelschwert



Abb. 1.13: Differenzierung der Vollgriffschwerter. 1 Achtkantschwert; 2 Dreiwulstschwert; 3 Mörigen-Schwert



Abb. 1.14: Klingenschäftung bei Vollgriffschwertern. Umzeichnungen nach Röntgenbildern. 1 Typ Spatzenhausen; 2 Achtkantschwert; 3 Mörigenschwert



Abb. 1.15: Bronzekokille von Erlingshofen mit einer zeichnerischen Rekonstruktion der in ihr gegossenen Schwertgriffe.

2 Untersuchungen zur Herstellung von Randleistenbeilen

2.1 Forschungsstand

Im Gegensatz zu anderen bronzezeitlichen Beilformen sind für Randleistenbeile keine vollständigen Gussformen überliefert. Bei der Rekonstruktion des Gießverfahrens ist man daher auf wenige Steinformfragmente, vor allem aber auf Rohgüsse und herstellungsrelevante Detailbeobachtungen an den Fertigprodukten angewiesen.

Trotz der Seltenheit der Funde wird in der Literatur die Verwendung von Dauerformen als allgemein übliche Technik vorausgesetzt. Einzig Abels [1972, 88] erwägt den Guss in verlorener Form. Lehmformreste, die ein Wachsausschmelzverfahren belegen, sind zwar nicht bekannt, ihr Erhalt ist aber auch recht unwahrscheinlich. Durch die Jahrtausende lange Lagerung im Erdreich werden sich die meist nur schwach gebrannten Gussformen zersetzt haben und von der Erde nicht mehr zu unterscheiden sein. Ein beilförmiger Rohguss aus Kissing, Lkr. Aichach-Friedberg könnte aufgrund der fehlenden Gussnaht aus einer einteiligen Form stammen [Pászthory, Mayer 1998, 51, Nr. 187; Taf. 14].

Die wenigen bekannten Kokillen, die eindeutig zum Guss von Randleistenbeilen dienten, sind räumlich weit gestreut. Für den zentraleuropäischen Raum sind vier Sandsteinformen bekannt. In einer Siedlung der älteren Hügelgräberbronzezeit fand sich die Form von Kiblitz in Niederösterreich [Mayer 1977, 102, Nr. 310; Taf. 22]. Sie trägt am Nacken der Beilkontur einen trichterförmigen Einguss. Eine weitere, ebenfalls aus Niederösterreich stammende Formhälfte ist stark verwittert [Mayer 1977, 105, Nr. 313; Taf. 22]. Sie scheint keinen von der Beilkontur abgesetzten Einguss zu haben. Auf der gegenüberliegenden Formfläche befindet sich die Kontur eines Absatzbeiles der älteren Hügelgräberzeit. Eine weitere Sandsteinform aus der Hügelgräberzeit, die sich heute im Museum von Bratislava befindet, trägt auf der gegenüberliegenden Seite ebenfalls die Kontur eines Absatzbeiles [Novotná 1970, 101 Nr. 845, Taf. 44]. Die letzte bekannte Steinformhälfte stammt aus Soldvadkert in Ungarn.

Weitere Formen stammen aus dem westlichen Verbreitungsgebiet der Randleistenbeile. Der mittelbronzezeitliche Hortfund von Plumieux in der nördlichen Bretagne besteht aus 11 fragmentarischen Sandsteinformen [Briard 1984,141f], *Abb. 2.1.* Der Einguss erfolgte über den oben offenen Beilnacken. Eine Granitform aus Vilhonneur, Dépt. Charente [Mohen 1980/81,27, Fig.1] trägt mehrere Gießkonturen. Zunächst auf zwei gegenüberliegenden Seiten je eine für Beile des südwestfranzösischen Typs médocain. In sekundärer Verwendung wurde die Form der Länge nach geteilt und die Kontur einer Lanzenspitze herausgearbeitet. Rohgüsse mit seitlichen Gussnähten und Gusszapfen belegen, dass der Anschnitt auch bei Kokillen für Médoc-Beile im Nackenbereich lag und über die gesamte Breite der Kontur verlief, *Abb. 2.2.*

Betrachtet man diese wenigen sicheren Funde zusammenfassend, fällt zunächst die einheitliche Konstruktion auf. Der Einguss erfolgte immer von oben, wobei jedoch die später



Abb. 2.1: Fragmente von Steingussformen für Randleistenbeile aus **Abb. 2.2**: Rohguss eines dem Hortfund von Plumieux. Der Einguss erfolgte über den offe- Randleistenbeils aus Stnen Beilnacken. Ausgearbeitete Eingusstrichter sind nicht bekannt. Vivien-de-Médoc.



Abb. 2.3: Rohguss eines Neyruz-Beiles aus dem Hortfund Ternay.



Abb. 2.4: Steinformfragment ohne Randleistenkontur. Das darin zu gießende Objekt besitzt ansonsten jedoch eine den Beilen entsprechende Form.

üblichen ausgearbeiteten Eingüsse eine Ausnahme blieben. Die für jüngere Gussformen typischen Dübellöcher zur Fixierung der zweiten Hälfte fehlten noch völlig. Ferner stammen alle Formen aus der Spätphase der Produktion von Randleistenbeilen und bleiben räumlich auf periphere Gebiete beschränkt. Dies bedeutet allerdings nicht zwingend, dass die Produktion in Kokillen erst in der mittleren Bronzezeit einsetzte oder im übrigen Verbreitungsgebiet der Randleistenbeile generell mit anderen Verfahren gearbeitet wurde [Steffgen 1997]. Frühbronzezeitlicher Guss in zweiteilige Formen mit in der Kontur angelegten Randleisten ist für Mitteldeutschland durch das Beil von Jessen-Wauden – ein Fehlguss aus zwei nicht genau aneinandergelegten Formhälften – und die beiden Beile aus Griefstedt, bei denen die Gussnähte mit Querbalken verziert sind, belegt [Billig 1956/57, Abb. 10, Abb. 4,8]. In größerer Zahl liegen Rohgüsse aus zweiteiligen Formen mit Randleistenkontur aus Südostfrankreich vor [Nicolardot, Verger 1998, 13f, Fig. 1,3,5,6].

Für den süd- und südwestdeutschen Raum sind die Neyruz-Beile des Hortfundes Ternay I, Dépt. Isère von besonderem Interesse, *Abb. 2.3* [Bocquet 1969, 350 Nr. 1-4]. Auch bei den Formen, aus denen diese Beile stammen, erfolgte der Einguss über den oben offenen Beilnacken. Ein richtiger Anschnitt existierte nicht.

Bei allen bislang genannten Beilen sind die Randleisten mitgegossen und, soweit erkennbar, auch die Schneide bereits in ihrer endgültigen Form im Guss angelegt. Dennoch wird kontrovers diskutiert, ob es sich dabei um das generell übliche Herstellungsverfahren gehandelt hat. So findet sich auch die Ansicht, dass die Randleisten ausgeschmiedet wurden. Hinweise auf diese Praxis geben Treibrisse auf den asymmetrisch verlaufenden Randleisten des Beils von Halle-Bruckdorf [Billig 1956/57, Abb.10]. Hundt [1973, 208] führt als Beleg für das Ausschmieden von Randleisten eine Reihe von Steinformfragmenten auf, bei denen keine Randleisten angelegt sind, deren Gießkontur ansonsten aber den Umrissen der Beile folgt. Die meisten dieser Exemplare besitzen flachmuldenförmige Konturen, *Abb. 2.4*. Der Querschnitt eines Gussstücks aus einer solchen Form ist entweder spitzoval (bei gleichartiger Gegenformhälfte) oder plankonvex (bei flacher Abdeckplatte). Beide Formen sind unter der Bezeichnung Zungenbarren bekannt, wobei Exemplare mit spitzovalem Querschnitt überwiegen [Steffgen 1997].

Im Gegensatz zu Hundt sieht Mayer [1977,68] wegen des für das Stauchen der Schmalseiten ungünstigen Querschnitts in den Barren keine Halbfabrikate von Randleistenbeilen. Auch Abels [1972, 88f] modifiziert Hundts Ansicht dahingehend, dass er von Rohlingen ausgeht, bei denen die Randleisten zumindest schwach angelegt waren, um nachträglich zur gewünschten Höhe und Form ausgeschmiedet zu werden. Wenn er dies allerdings mit den Beilen des Hortes von Griesheim untermauert, übersieht er, dass es sich hierbei nicht um Rohlinge, sondern um Stücke mit z.T. erheblichen Gebrauchsspuren handelt, die zudem alle nach ihrer Auffindung intensiv mechanisch bearbeitet wurden [Wahle 1925, 44f].

Da Schmiedeversuche ausstehen, bleiben Überlegungen anderer Autoren weitgehend theoretisch. Der heutige Kenntnisstand lässt demnach nur wenige verbindliche Aussagen zur

Herstellungsweise von Randleistenbeilen zu. Die in dieser Arbeit durchgeführten systematischen praktischen und theoretischen Untersuchungen leisten einen wissenschaftlichen Beitrag zur Klärung der Produktionsweise dieser in der Bronzezeit offenbar gängigen Gebrauchsgegenstände und der Anfänge des seriellen Bronzegusses.

2.2 Untersuchungen an den Referenzstücken

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Herstellung von vier Referenzstücken, *Abb. 2.5*, rekonstruiert, und ihr Guss mittels Simulation und Experiment nachvollzogen, die den Produktionszeitraum und die geometrischen Grundformen von Randleistenbeilen nach Kibbert [1980, Tab.6] abdecken (s. a. Abb. 1.3).

- <u>Typ Neyruz</u>: Beil der älteren Frühbronzezeit.
- Typ Langquaid II: Beil der jüngeren Frühbronzezeit mit eingezogenen Schmalseiten.
- Typ Unterbimbach: Beil der mittleren Bronzezeit mit eingezogenen Schmalseiten
- Typ Mägerkingen: Beil der mittleren Bronzezeit mit geraden Schmalseiten.

Da gleichzeitig deponierte Exemplare eines Typs noch am ehesten aus einer Hand stammen und regelhafte werkstattspezifische Eigenheiten zeigen, werden zusätzlich die Beile aus den Hortfunden Langquaid, Lkr. Kelheim, und Waging, Lkr. Traunstein, in die Untersuchungen einbezogen, *Anhang 2, Abb. A2-2 - A2-5*.

Alle Objekte stammen aus dem Bestand der Prähistorischen Staatssammlung, München. Zu ihrer genauen Beschreibung werden sie eingehend optisch auf herstellungsrelevante Eigenheiten untersucht. Röntgenaufnahmen geben weitere Aufschlüsse über die Gussqualität und das Gießverfahren. Mittels digitaler Bildanalyse sollen die Röntgenbilder optimiert werden. Die Materialanalysen basieren auf den Angaben des Württembergischen Landesmuseums Stuttgart [Junghans, Sangmeister, Schröder 1968], des Instituts für Gießereiforschung, Düsseldorf (Inv. Nr. HV 107) und des Max-Planck-Instituts für Kernphysik, Heidelberg (Inv. Nr. 1994,1679; 1928,5). Die Autopsie der Referenzstücke erfolgte durch die Prähistorische Staatssammlung München [Steffgen 1997], *Anhang 2.*

2.3 Simulation

Die Untersuchungen an den antiken Originalen und die archäologischen Fundkontexte ermöglichen nur wenige Rückschlüsse auf die tatsächliche Gusstechnik der Bronzezeit. Experimentelle Reihenuntersuchungen zur Bestimmung der prähistorischen Gießparameter stellen einen großen Zeit- und Kostenaufwand dar. Hier kommt die Simulation des Gießprozesses am Rechner zur Hilfe.

Die den Gusserfolg beeinflussenden Parameter können innerhalb der technisch sinnvollen und archäologisch wahrscheinlichen Grenzen beliebig variiert werden, um ein optimales



Abb. 2.5: Referenzstücke für die Untersuchungen an Randleistenbeilen.1) Typ Neyruz, Inv.-Nr.: HV 872) Typ Langquaid II, Inv.-Nr. 1924,13) Typ Unterbimbach, Inv.-Nr.: 1928,54) Typ Mägerkingen, Inv.-Nr.: 1994,1679

Prozessfenster zu finden. Optimal heißt hier, ein Ergebnis zu erzielen, das den Befunden an den Originalen möglichst nahe kommt. Die praktischen Nachgüsse können so auf die Verifizierung der Simulationsergebnisse und die Bereiche, die mittels Simulation nicht erfassbar sind (z. B. Schmelztechnik oder Aufbau mineralischer Formen), beschränkt werden.

2.3.1 Ermittlung der thermophysikalischen Datensätze

Für die Simulation des Gieβ- und Erstarrungsprozesses müssen thermophysikalische Datensätze der Guss und Formmaterialien vorliegen. Sie beschreiben das Verhalten des Werkstoffes in Abhängigkeit von der Temperatur. Für die Berechnungen konnte auf Datensätze zurückgegriffen werden, die aus früheren archäometallurgischen Untersuchungen am Gießerei-Institut vorliegen [Sahm u.a. 1997, Klaasen 1997]. Diese umfassen neben CuSn10 als Gusslegierung, *Abb. 2.6*, sowie CuSn10, Sandstein und Lehm als Formmaterialien, auch die Wärmeübergänge zwischen der Gusslegierung und den Formstoffen, *Abb. 2.7*. Zusätzlich steht aus der Datenbank der Simulationssoftware (MAGMAsoft[®]) reines Kupfer als Gusswerkstoff zur Verfügung. Aufgrund der Materialanalyse wird dieser Datensatz für die Simulation des Beils vom Typ Neyruz verwendet.

2.3.2 Geometrieeingabe und Netzgenerierung

Das eingesetzte Simulationsprogramm MAGMAsoft[®] bietet mit seinem Preprocessing-Modul die Möglichkeit einer CAD-Konstruktion aus geometrischen Grundelementen und Freiformflächen. Zum Erhalt der benötigten Geometriedaten werden Gipsnachgüsse der Referenzbeile in Scheibchen von 0,5 cm zersägt, deren Konturen vermessen und maßstabsgetreu eingegeben. Die Konstruktion eines Anschnittes und der Gussform erfolgt im Anschluss, *Abb. 2.8.*

Unter Berücksichtigung der vom Anwender eingestellten Feinheit unterteilt das Programm die Geometrien automatisch nach der Finite-Differenzen-Methode (FDM) in kleine Quader, die die Berechnungsgrundlage bilden. Hierbei muss ein sinnvolles Verhältnis zwischen der Genauigkeit der Rechnung und dem Rechenaufwand gewahrt bleiben. Zur hinreichend genauen Simulation der Formfüllung ist eine Unterteilung der Gusswandstärke in wenigstens drei Vernetzungselemente erforderlich.

Da die CAD-Geometrien der Beile spiegelsymmetrisch sind, genügt es, je nach Anschnittposition ein Viertel oder die Hälfte zu berechnen, *Abb. 2.9*. Dieses Vorgehen minimiert bei identischen Ergebnissen Rechenaufwand und -zeit.

2.3.3 Simulationsrechnungen

Mit innerhalb der technisch sinnvollen und archäologisch wahrscheinlichen Grenzen variierten Parametern erfolgen Formfüll- und Erstarrungssimulationen, *Tab. 2.1*. Insbesondere folgende Parameter beeinflussen insbesondere den Gusserfolg:



Abb. 2.6: Temperaturabhängige thermophysikalische Datensätze einer 10%-igen Zinnbronze.



Abb. 2.7: Temperaturabhängige Wärmeübergänge. Sie beschreiben den maximal möglichen Wärmefluss von der Bronze in den Formstoff.

- a) CuSn10 => CuSn10
- b) CuSn10 => Lehm
- c) CuSn10 => Sandstein



Abb. 2.8: Oberflächenmodell des Randleistenbeils HV 87, Typ Neyruz, mit seitlichem Anschnitt. Diese im Preprocessing-Modul konstruierte Geometrie wird dem automatischen Netzgenerator übergeben.



Abb. 2.9: Vernetzte Geometrie des Randleistenbeils HV 87. Zur Minimierung des Rechenaufwandes wird nur eine Hälfte der Geometrie berücksichtigt. Der Schnitt geht entlang der Mittelachse durch die y-z-Ebene. Da der hier abgebildete "vordere" Teil absolut symmetrisch zum hinteren ist, werden adiabatische Verhältnisse angenommen.

Beiltyp	Rech-	Formstoff	Form-	Gieß-	Anschnitt-	Gieß-
	nung		temperatur	temperatur	position	zeit
Neyruz	N 1	Antikton	20°C	1050°C	oben	4s
· · ·	N 2	Antikton	20°C	1050°C	seitlich, Richtung Schneide	4s
	N 3	Antikton	300°C	1050°C	oben	2s
	N 4	Antikton	300°C	1050°C	seitlich, Richtung Schaft	2s
	N 5	Antikton	300°C	1050°C	seitlich, Richtung Schneide	2s
	N 6	Antikton	500°C	1050°C	oben	4s
	N 7	Antikton	500°C	1050°C	seitlich, Richtung Schneide	4s
	N 8	Sandstein	20°C	1050°C	oben	4s
	N 9	Sandstein	20°C	1050°C	seitlich, Richtung Schneide	4s
<i>,,</i>	N 10	Sandstein	300°C	1050°C	oben	4s
	N 11	Sandstein	300°C	1050°C	seitlich, Richtung Schneide	4s
<i>,,</i>	N 12	Sandstein	300°C	1080°C	oben	4s
	N 13	Sandstein	300°C	1080°C	seitlich, Richtung Schneide	4s
	N 14	CuSn10	500°C	1050°C	oben	4s
	N 15	CuSn10	500°C	1050°C	seitlich, Richtung Schneide	4s
	N 16	CuSn10	500°C	1080°C	oben	4s
	N 17	CuSn10	500°C	1080°C	seitlich, Richtung Schneide	4s
· ·						
Gusswerkstoff	N 18	Antikton	300°C	1100°C	oben	3s
Kupfer						
Langquaid II	L 1	Antikton	20°C	1050°C	oben	2s
.,	L 2	Antikton	20°C	1050°C	seitlich	2s
	L 3	Sandstein	20°C	1050°C	oben	2s
	L 4	CuSn10	20°C	1050°C	oben	2s
	L 5	CuSn10	300°C	1050°C	oben	2s
Mägerkingen	M 1	Antikton	20°C	1050°C	oben	2s
	M 2	Antikton	300°C	1050°C	oben	2s
	M 3	Antikton	500°C	1050°C	oben	4s
	M 4	Antikton	500°C	1080°C	oben	3s
	M 5	Sandstein	20°C	1050°C	oben	2s
	M 6	Sandstein	300°C	1050°C	oben	2s
	M 7	Sandstein	500°C	1050°C	oben	4s
	M 8	Sandstein	500°C	1080°C	oben	3s
	M 9	CuSn10	20°C	1050°C	oben	4s
	M 10	CuSn10	300°C	1050°C	oben	4s
,,	M 11	CuSn10	500°C	1050°C	oben	4s
	M 12	CuSn10	300°C	1080°C	oben	3s
,,	M 13	CuSn10	500°C	1080°C	oben	4s
,,	M 14	CuSn10	500°C	1080°C	oben	2s
.,	M 15	CuSn10	500°C	1080°C	oben	3s
	M 16	CuSn10	500°C	1050°C	oben	3s
.,	M 17	CuSn10	500°C	1080°C	oben	4s
Unterbimbach	U 1	Sandstein	20°C	1080°C	oben	4s
	U 2	Sandstein	300°C	1080°C	oben	2s
·· ·	U 3	Sandstein	300°C	1080°C	oben	4s
.,	U 4	Sandstein	500°C	1080°C	oben	4s

Tabelle 2.1: Parametervariationen für die Simulation der Randleistenbeile.

• Gusswerkstoff

Aufgrund unvollständiger thermophysikalischer Datensätze für andere prähistorische Bronzelegierungen wird CuSn10 als Gusslegierung eingesetzt. In Anlehnung an die Analyse des Beils HV 87 vom Typ Neyruz wird für diesen Fall zusätzlich eine Simulation mit reinem Kupfer durchgeführt.

• Formmaterial

Die archäologischen Kontexte belegen, dass sowohl in Stein- und Lehmformen als auch, wie spätere Funde nahe legen, in Bronzeformen gegossen wurde. Allen drei möglichen Formstoffen wird mit Sandstein, Antikton (Lehm) und CuSn10 Rechnung getragen.

• Gießtemperatur

Die mögliche Bandbreite der Gießtemperatur wird von der Legierung und dem bronzezeitlichen Tiegelmaterial bestimmt. Der minimale Wert ergibt sich aus der Liquidustemperatur der Gusslegierung, ab der die Erstarrung beginnt. Bei CuSn10 ist dies 1020°C. Der Abguss muss demnach heißer erfolgen. Zusätzlich verliert die Schmelze beim Transport vom Tiegel zur Form und beim Abguss selbst an Temperatur, sodass eine minimale Überhitzung von 30°C (Gießspanne) vorauszusetzen ist. Die maximale Gießtemperatur begrenzt das Material der Tiegel, die in der Bronzezeit aus Lehm bestanden. Ab ca. 1100°C beginnen Materialien mit keramischer Bindung zu sintern. Während dieses chemischen Prozesses verlieren sie ihre Dauerstandfestigkeit, das heißt sie erweichen unter Last. Die Gießtemperaturen müssen somit in der Bronzezeit zwischen 1050°C und 1080°C gelegen haben [Ratka 1997]. Mit beiden "Grenztemperaturen" wurde gerechnet. Kupfer schmilzt erst bei einer Temperatur von 1083°C. Hier muss mit der Gießtemperatur an die Grenzen des Tiegelmaterials gegangen werden um eine hinreichende Gießspanne zu erreichen. Es wird mit 1100°C gerechnet.

• Vorwärmtemperatur der Form

Die Vorwärmtemperatur der Form wird nach oben hin durch die maximale Heiztemperatur der Holzkohlefeuer begrenzt, die man mit ca. 700°C annehmen kann. Wird noch ein Transport oder zumindest ein Ausrichten der Form in eine für den Gießer günstige Position einkalkuliert, lag die Formtemperatur kaum über 500°C. Nach unten begrenzt der Formstoff die Temperatur. Eine kalte Lehm- oder Steinform kann durch den Einfluss der heißen Schmelze platzen. Gerechnet wird mit 20°C, 300°C und 500°C, wobei eine Spanne zwischen 300°C und 500°C am wahrscheinlichsten ist. Der Abguss in die kalte Form wird zur Untersuchung der Formfüllung und des Abkühlverhaltens mit einbezogen.

•Gießzeit

Die praktischen Voruntersuchungen ergaben, abhängig vom Formvolumen und dem individuellen Tempo des Gießers, Gießzeiten zwischen 2 und 4 Sekunden, sodass Rechnungen mit 2, 3 und 4 Sekunden erfolgen.

• Geometrie des Gussstücks

Die Geometrie des Gussstücks ist durch die Originale festgelegt. Optische Untersuchungen, Röntgen- und Schliffbilder belegen jedoch eine teilweise Überarbeitung nach dem Guss. Eine Vereinfachung der Ursprungsgeometrie kann Einflüsse auf den Gusserfolg haben. Da keine klaren Erkenntnisse über die den jeweiligen Beilen zugrunde liegenden Ursprungsgeometrien vorliegen, wird dieser Aspekt in der Simulation nicht berücksichtigt.

• Position des Anschnitts

Der Anschnitt, bzw. bei größeren Gussobjekten das Anschnittsystem, dient in erster Linie der Schmelzezufuhr zum Formhohlraum. Er kann aber auch Speisungsfunktion übernehmen. Das heißt, das Volumendefizit, das durch die Volumenkontraktion des Metalls bei der Erstarrung entsteht, kann durch noch nicht erstarrte Schmelze im dicken und dadurch langsamer erstarrenden Anschnitt ausgeglichen werden.

Aufgrund dieser Überlegungen ist es sinnvoll, den Anschnitt an einer Stelle des Gussstücks zu positionieren, an der die Schmelze im Vergleich zu den anderen Stellen spät erstarrt. So kann möglichst lange "nachgespeist" werden. Die Speisungslunker verlagern sich vom Gussstück in den Anschnitt. Ungünstig hingegen ist es, wenn der Anschnitt durch einen früh erstarrenden Gussstückbereich von dem zuletzt erstarrenden abgeschnitten ist. Die Speisung erfolgt dann aus der Massenkonzentration im Gussstück (dicke Partie, meist in der Mitte) heraus und führt dort zu Schwindungsporositäten.

Im Falle der Randleistenbeile ist der gießtechnisch günstigste Ansatzpunkt für einen Anschnitt auf der Seite über dem Übergangsbereich Blatt/Schaft [Klaasen 1997]. Die auf Röntgenaufnahmen erkennbaren elliptischen, parallel zur Längsachse ausgerichteten Gasporen (s. Taf. 2) und die feinen Lunker im Nackenbereich (s. Taf. 13) legen jedoch bei den meisten der hier untersuchten Beile nahe, dass der Einguss vom Nacken erfolgte. Diese Technik birgt die Gefahr der Lunkerbildung in der Mitte des Blattes, die ebenfalls auf einigen Röntgenaufnahmen erkennbar ist (s. Anhang 3). Die elliptische Form der Poren weist weiterhin auf eine Nachbearbeitung durch Schmieden hin.

Unter allen Randleistenbeilen der Prähistorischen Staatssammlung findet sich nur ein Exemplar mit einer leichten, porösen Vertiefung an der Seite über der dicksten Stelle, die als Anschnittpunkt gedeutet werden kann. Es handelt sich um ein sächsisches Randleistenbeil aus dem Hortfund von Wolnzach, Lkr. Pfaffenhofen. Weil sächsische Randleistenbeile in der Grundgeometrie dem Typ Neyruz ähneln und das Beil HV 87 weder äußerlich noch im Röntgenbild Hinweise auf die Anschnittposition zeigt, wurde für dieses Exemplar auch ein seitlicher Einguss berücksichtigt.

2.3.4 Automatische Parameteroptimierung

Im Rahmen einer am Gießerei-Institut von J. Wolf [1999, S. 88-90] durchgeführten Doktorarbeit zur automatischen rechnerischen Optimierung von Gießprozessen wurde als Anwendungsbeispiel der Guss zweier Beile des Typs Langquaid (1924,1 und NM 3546) nach dem Wachsausschmelzverfahren in Lehmformen nachvollzogen. Die Zielsetzung der Optimierung war, die Prozessparameter der Simulation so einzustellen, dass die Ergebnisse der Simulation möglichst weit mit den Röntgenaufnahmen der Originale übereinstimmen. Als Optimierungskriterium wurde die Lunkerneigung im Zentrum des Blattes sowie im äußeren Blattbereich eingesetzt. Die variablen Prozessgrößen bildeten die Gießtemperatur und zwei separate Vorwärmtemperaturen für einen oberen und einen unteren Formteil. Idee hierbei war, dass die im Holzkohlefeuer ausgebrannte Form nicht aus der Glut entfernt, sondern zum Abguss nur in Position gebracht wurde und dann ca. zur Hälfte aus der Feuerstelle ragte.

2.4 Nachgüsse

Autopsie, Röntgenaufnahmen und die Ergebnisse der Gusssimulation dienten als Grundlage fiir die experimentellen Nachgüsse der vier Grundformen nach dem Wachsausschmelzverfahren. Dabei werden Wachspositive des zu gießenden Objektes mit Formmaterial umgeben. In der Bronzezeit war dies Lehm, heute wird im Kunstguss Gips verwendet. Dem vollständigen Trocknen (bzw. Abbinden bei Gips) des Formmaterials folgt das Wachsausschmelzen. Die verbleibende Form wird zur Festigung und zum Austreiben einer Wärmebehandlung im keramischen Brennofen unterzogen. Der Abguss erfolgt in die heiße Form. Zum Erhalt des Gussstückes muss nach der Erstarrung die Form zerstört werden.

2.4.1 Vorbereitende Arbeiten

Als Grundlage zur Reproduktion der Geometrien wird von jedem Exemplar ein teilbares Silikonnegativ abgenommen. Um die originale Oberfläche nicht zu beschädigen, erhält diese vorher eine spezielle, abwaschbare Schutzlackierung. Eine Gipshinterfütterung stabilisiert die flexiblen Silikonnegative beim Eingießen der Wachs- und Gipsmodelle. Die Gipsbeile standen zur Geometriedefinition für die Simulation zur Verfügung. Die Wachsexemplare dienen als Positive für die Nachgüsse.

2.4.2 Herstellung der Wachsmodelle

Als Modellwachs dient ein in der Kunstgießerei verwendetes, synthetisches Wachs, dem zur Festigkeitserhöhung und zum besseren Erkennen von Fehlern, vor allem durch beim Eingießen eingeschlossene Bläschen entstandene Poren, Kohlenstoff zugesetzt wird. Bereits früher am Gießerei-Institut durchgeführte vergleichende Versuche zwischen Bienenwachs und dem Modellwachs ergaben keine Unterschiede im Gusserfolg [Sahm, Zimmer u. a. 1997].

Zum Erhalt der Wachsmodelle wird das geschmolzene Wachs in die zusammengesetzten Silikonnegative gegossen und etwa eine Stunde zum Aushärten stehengelassen. Mit einem erhitzten Metallspatel werden dann die Grate an den Nähten der Modellhälften entfernt und eventuelle Oberflächenfehler ausgebessert. Ein kleiner anmodellierter Wachskegel bildet den späteren Eingusstrichter.
2.4.3 Formentlüftung

Die einströmende Schmelze verdrängt die im Formhohlraum befindliche Luft. Kann diese nicht entweichen, bleibt sie als Gaspore im Gussstück zurück. Aus diesem Grund muss für eine Entlüftung an der höchsten Stelle der Form gesorgt werden. Aus der Bronzezeit sind lediglich Randleistenbeile bekannt, die von oben angeschnitten waren und keine separate Formentlüftung aufweisen. Es schien zu genügen, die Form während des Abgusses schräg zu stellen, was im Versuch überprüft wird. Bei seitlich angeschnittenen Beilen muss auf der höchsten Stelle des Blattes eine Öffnung nach außen, eine sog. "Entlüftungspfeife" vorgesehen werden.

2.4.4 Die Formherstellung

Der entsprechend der archäologischen Vorgaben gewählte Formstoff ist Lehm, der als Formmantel aufgeknetet wird. Letzterer hat die Aufgabe, das Wachsmodell in allen seinen Einzelheiten abzubilden und während des gesamten folgenden Prozesses eine stabile Form darzustellen. Zusätzlich soll die Lehmform während Trocknung, Wachsausschmelzen und Brand möglichst wenig schwinden und vor allem keine Risse bekommen. Schließlich muss sie nach dem Brand möglichst porös sein, um Restfeuchte, Luft und entstehende Gase beim Guss leicht entweichen zu lassen [Schneider, Formigli 1993]. Diesen weitgehenden Ansprüchen an die Form wird einerseits durch die Wahl des Formmaterials und andererseits durch einen Schichtaufbau entsprochen.

Für die Wahl des Formstoffes wird auf zwei Lehmmischungen zurückgegriffen, die sich bei vorherigen Untersuchungen zu antiken Gießtechniken als günstig erwiesen [Sahm, Zimmer u. a. 1997].

• Formstoffkomponenten

Zum Erhalt von Formlehmen mit reproduzierbaren Zusammensetzungen werden tonhaltige Grundstoffe mit definierten Mengen an mineralischen und organischen Magerungsstoffen versetzt:

- Als <u>tonhaltige Grundstoffe</u> dienen ein natürlicher, bentonithaltiger Formsand (Anteil an bindefähigem Ton: ca. 12 Gew.-%) und ein halbfettes Tonmehl (Anteil an bindefähigem Ton: ca. 34 Gew.-%).
- Zur <u>mineralischen Magerung</u> wird grober Quarzsand mit Korngrößen von 0,2 bis 2,0 mm eingesetzt.
- Als <u>organische Magerungszuschläge</u> dienen Flachsfasern und Menschenhaare. Beide werden den Lehmmassen gleichmäßig verteilt und in einer Länge von ca. 2 cm zugegeben.

• Formstoffzusammensetzung, Tab. 2.2

Der Anforderung an die *feine innere Schicht*, die Oberfläche genau abzubilden und rissfrei zu trocknen, entspricht eine Mischung aus natürlichem Formsand, Tonmehl und

Formmantel-	Tonhaltiger	Grundstoff	Minera	alische M	agerung	Organische N	Tongehalt	
schicht	[Gew	v%]	[Gew%]				[Gew%]	
	Formsand	Tonmehl	Quarzsand der Korngröße			Flachsfasern	Haare	
			I*	II*	III*			
Innen	60	15	10	15			+**	ca. 12
Aussen	60	15	5	10	10	+**	+**	ca. 12

Tabelle 2.2: Zusammensetzung der Formlehme.

* = Quarzkorngrößen; I: 0,2 - 0,6 mm; II: 0,4 - 0,8 mm; III: 1,5 - 2,0 mm.

** = Die Flachsfasern und Haare haben eine Länge von ca. 2 cm und werden gleichmäßig im Lehm verteilt, so dass eine gute Durchsetzung vorliegt. Der Anteil beträgt ca. 2 Gew.-%.



Abb. 2.10: Wachsausschmelzen mittels Gasflamme. Dabei ist darauf zu achten, dass das Wachs langsam vom Anschnitt her aufschmilzt, um ein freies Auslaufen zu ermöglichen und eine Beschädigung der Form zu vermeiden.

Abb. 2.11: Abguss der Randleistenbeile. Die noch heißen Formen werden in Metallkästen gesetzt und mit losem Sand hinterfüllt, um einem Bersten vorzubeugen. Die schräge Stellung ermöglicht eine ausreichende Formentlüftung.

feinem Quarzsand. Der Anteil an bindefähigem Ton ist mit ca. 12% ein Kompromiss zwischen der Eigenschaft magerer, tonarmer Lehme, wenig zur Rissbildung zu neigen und fetter, tonreicher Lehme, eine höhere Abriebfestigkeit aufzuweisen. Zur Verbesserung der Standfestigkeit der Form im feuchten Zustand und der Gewährleistung einer hinreichenden Porosität nach dem Formbrand, werden ca. 2% Haare beigemischt.

Für die größere *äußere Mantelschicht* wurde ein Teil des feinen Quarzsandes durch groben ersetzt. Die größeren Quarzkörner stellen eine Barriere für die Rissfortpflanzung dar und stabilisieren so die äußere Formschale zum Schutz der inneren. Als organische Magerung werden zusätzlich Flachshaare eingemischt um die Schwindung zu verringern und nach dem Brand eine hinreichende Porosität für die Entgasung beim Guss zu erreichen.

• Schichtaufbau

Unmittelbar auf die Wachsoberfläche wird der ca. 0,5 cm dicke *inneren Formmantel* aus der feinkörnigen Lehmmischung aufgetragen, die die Oberfläche genau abbildet. Nach seiner vollständigen und rissfreien Trocknung erfolgt der Auftrag des grobkörnigeren *äußeren Formmantels* aus zwei je 1 cm dicken Schichten. Um die vollständige Trocknung der Form zu gewährleisten und durchgehende Risse zu vermeiden, müssen die einzelnen Schichten vor dem Auftrag der folgenden vollständig trocken sein und entstehende Schwindungsrisse immer wieder mit Lehm und Lehmschlicker verschlossen werden.

2.4.5 Das Wachsausschmelzen

Nach der vollständigen Trocknung der Form wird das Wachs mit Hilfe einer Gasflamme ausgeschmolzen. Wichtig hierbei ist, dass das Wachs vom Anschnitt her aufschmilzt und frei auslaufen kann, *Abb. 2.10*. Werden weiter entfernte Partien flüssig, während der Abflussweg noch verschlossen ist, kann das Wachs durch seine Wärmedehnung die Form beschädigen. Die hohlen Formen werden 24 Stunden bei 500°C im keramischen Ofen "gebrannt". Es folgt eine langsame Abkühlung auf 350°C.

2.4.6 Der Abguss

Zum Abguss werden die heißen Lehmformen in Metallkästen gesetzt und, um einem Bersten durch thermische Spannungen und den Druck der einströmenden Schmelze vorzubeugen, mit losem Sand hinterfüllt, *Abb. 2.11*. Ihre Temperatur unmittelbar vor dem Abguss beträgt ca. 310°C. Entsprechend vieler Analysen bronzezeitlicher Legierungen wird, wie in den Simulationsrechnungen, eine 10 %-ige Zinnbronze vergossen. Die Gießtemperatur liegt bei etwa 1080 °C. Die Gießzeit beträgt ca. 3s. Ein Exemplar des Typs Neyruz wird entsprechend der Analyse mit reinem Kupfer abgegossen. Hier beträgt die Abgusstemperatur 1100°C.

Nach einer Abkühlzeit von 2 Stunden werden die Formen zerschlagen und die Gussstücke geborgen. Einer Säuberung mittels Drahtbürste folgt die erste äußerliche Begutachtung des Gusserfolgs. Weitere Untersuchungen schließen sich in Form von Röntgenaufnahmen und metallographischen Schliffen an. Zusätzlich erfolgt ein Vergleich mit den Originalen und den Ergebnissen aus der Simulation.

2.5 Untersuchungen an Originalfragmenten und Nachgüssen

Um genauere Erkenntnisse über die Herstellungstechnik von Randleistenbeilen zu gewinnen, werden die folgenden Untersuchungen sowohl an Originalen als auch an Nachgüssen durchgeführt. Dadurch dass der Werdegang der Nachgüsse nachvollziehbar ist, werden die Ergebnisse interpretierbar und lassen Rückschlüsse auf die Herstellungsweise des Originals zu. Besonderes Augenmerk liegt auf der Anschnitttechnik und dem Grad der mechanischen Überarbeitung, vor allem durch Schmieden.

Bisher wurden zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden eingesetzt, um Aussagen über die Herstellungstechnik von Randleistenbeilen zu treffen. Diese Beschränkung ergibt sich aus konservatorischen Gründen und wird, zumindest für Reihenuntersuchungen, immer eine Grundbedingung bleiben. Ziel der hier durchgeführten Untersuchungen ist es, die Tragfähigkeit der gewonnenen Erkenntnisse zu prüfen. Für diese sichereren und genaueren, jedoch nicht zerstörungsfreien Methoden zur Bestimmung von Eigenschaften und Strukturen eines Gussstücks konnte auf die Nachgüsse und zwei Originalfragmente aus dem Bestand der Prähistorischen Staatssammlung München zurückgegriffen werden.

2.5.1 Schmiedeversuche

Die theoretischen Überlegungen zur Formgebung, die Gefügeunterschiede zwischen den Nachgüssen und den Originalen sowie die an letzteren häufig beobachteten Bearbeitungsspuren, machten Schmiedeversuche zur Interpretation der Beobachtungen notwendig. Die Schmiedearbeiten wurden von der archäometallurgischen Arbeitsgruppe der Mies-van-der-Rohe-Berufsschule, Aachen, unter Leitung von Lutz Thelen ausgeführt, *Anhang 1*.

Da von den Mitgliedern der Arbeitsgruppe die vielfach als Halbzeug für Randleistenbeile angesprochenen Barren mit spitzovalem oder plankonvexem Querschnitt als arbeitstechnisch ungünstig angesehen wurden, wählte man als Rohlinge mehrere Nachgüsse eines Randleistenbeils des Typs Neyruz mit nur schwach ausgeprägten Randleisten (Referenzstück 1, HV 87). Für die Nachgüsse wurde originalgetreu Kupfer und eine Zinnbronze verwendet, die der eines Beiles aus dem Hortfund von Langquaid (1908,76; s. Anhang 2) entspricht. Letzteres diente den Schmieden als Vorlage. Es wurde aufgrund der symmetrischen Form und der guten Oberfläche einem geschickten und erfahrenen bronzezeitlichen Handwerker zugewiesen.

Im Gegensatz zu den Nachgüssen, die meist ein lockeres Gussgefüge und oft auch ausgeprägten Lunkerzonen aufweisen, erscheint die Struktur der bronzezeitlichen Originale auf Röntgenaufnahmen häufig dicht gespeist und ohne größere Porositätsstellen. Dies legt zusammen mit den äußeren Bearbeitungsspuren nahe, dass die bronzezeitlichen Beile in hohem Maße nachbearbeitet sind und dadurch die Poren gestaucht oder zugeschmiedet wurden. Um einen Zusammenhang zwischen dem Schmiedegrad und dem Erscheinungsbild der Röntgenaufnahme herzustellen, wurden drei Rohlinge des Grundtyps Neyruz gegossen und unterschiedlich stark überschmiedet. Als Legierung diente eine 6%-ige Zinnbronze. Diese Zusammensetzung kommt häufig in den Analysen bronzezeitlicher Randleistenbeile vor und ist sowohl gut gießbar als auch kaltverformbar. Als Schmiedewerkzeuge dienten 250 - 300 Gramm schwere Polierhämmer und im Bereich der Randleisten teilweise Setzhämmer. Gearbeitet wurde vorwiegend auf einer Buchenholzunterlage. Die Bearbeitungsstufen waren, *Abb.2.12*:

- 1.) Ein Kaltverformungsgang bis zum ersten Zwischenglühen.
- 2.) Zwischenglühen (vgl. Anhang 1) und zweiter Kaltverformungsgang.
- 3.) Zwischenglühen und dritter Kaltverformungsgang.

Von den drei Rohlingen und jeweils einer Bearbeitungsstufe werden Röntgenaufnahmen angefertigt.

2.5.2 Metallographische Schliffe

Mittels der Metallmikroskopie kann das aus einzelnen Kristallkörnern aufgebaute Gefüge eines Werkstoffs sichtbar gemacht werden. Die Form der Gefügeausbildung hängt nicht nur von der Legierungszusammensetzung ab, sondern auch von der mechanisch-thermischen Behandlung des Metalls [Schumann 1969, Kap. 1.1.1]. Durch Kaltverformung befindet sich das Metallgefüge beispielsweise in einem Zwangszustand. Ab einer bestimmten Temperatur der primären Rekristallisation (Anlasstemperatur) heilen diese Gitterstörungen aber wieder aus, und es bilden sich neue polygonale Kristallite. Diese sind um so kleiner, je größer der Verformungsgrad war. Auch die benötigte Anlasstemperatur nimmt mit steigender Gitterstörung ab [Schumann 1969, Kap. 3.2.2].

Um nähere Aufschlüsse über die Herstellungstechnik von Randleistenbeilen zu erhalten, konnte auf die Nachgüsse und zwei Originalfragmente aus dem Bestand der Prähistorischen Staatssammlung zurückgegriffen werden, von denen Schliffe angefertigt und metallographisch untersucht wurden.

a) Fragment eines Randleistenbeils, Abb. 2.13

Maße:	
Länge:	noch 90 mm
Breite der Schneide:	56 mm
Dicke:	10 mm
Höhe der Randleisten:	bis 16 mm
Gewicht:	220 g
Analyse:	9,32% Sn, 0,25% As, 0,023% Sb, 0,043% Pb
Fundort:	Unterdolling, Landkreis Eichstätt
Verbleib:	Prähistorische Staatssammlung München; Inventar-Nr.: HV 107
Literatur:	Pászthory, Maier 1998, 75 Nr. 354, Taf. 24
Autopsie:	

• Das Fragment zeigt äußerlich einen guten Zustand.



ZWEITER VERFORMUNGSGANG

DRITTER VERFORMUNGSGANG

Abb. 2.12: Nachgüsse des Referenzstücks 1 im unbearbeiteten Zustand und in den drei verschiedenen Schmiedestadien.



Abb. 2.13: Zu Härtemessungen und metallographischen Untersuchungen herangezogenes Beilfragment HV 107.



Abb. 2.14: Umzeichnung des Fragments HV 107 und Aufsicht auf die Schnittflächen. Die grauen Segmente (1-5) entsprechen den Proben für die Schliffbilder.

- Auffällig ist die Struktur der Bruchfläche, die sich auf die Mittellinie ausrichtet, *Abb.* 2.13c.
- Typ nicht bestimmbar.
- Deutlich eingezogene Schmalseiten.
- Randleisten zur Mitte hin verdickt und erhöht.
- Schneide rundlich ausgezogen mit beidseitiger Schneidenfacette.
- Der Beginn der Schneide ist eindeutig abgesetzt und sie läuft sehr scharf zu.

Probenahme:

Zur Anfertigung der Schliffproben werden senkrecht zur Mittelachse, jeweils im Abstand von 1 cm, fünf Scheiben einer Dicke von 2 mm entnommen, *Abb. 2.14*, und die Überreste für weitere Untersuchungen aufbewahrt. Als Ätzmittel dient eine Eisen-III-Chlorid-Lösung. Die Bohrproben zur Materialanalyse stammen aus dem Bereich 3^c.

b) Fragment eines Randleistenbeils, Abb. 2.15.

noch 130 mm
34 mm
4 mm
bis 10 mm
110 g
4.7% Sn, 0.61% As, 0.11% Sb, 0.79% Ni
Simbach, Landkreis Rottal/Inn
Prähistorische Staatssammlung München, Inventar-Nr.: 1943,1
Junghans, Sangmeister, Schröder 1968, Nr. 15 892.

Autopsie:

- Stark korrodiert
- Oberes Drittel fehlt
- Annähernd parallelseitig, unten leicht ausgestellt.
- Schwach ausladende Schneide
- Der Beginn der Schneide ist nicht abgesetzt und die Kante läuft stumpf aus.
- Möglicherweise Typ Mägerkingen
- Keine Nachbearbeitungsspuren erkennbar.

Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, Taf. 17:

Im stark korrodierten Grundgefüge sind einige feine und gröbere Poren zu erkennen.

Probenahme:

Die fünf Proben werden als 5 mm dicke Scheiben senkrecht zur Mittelachse im Abstand von 1 cm entnommen, *Abb. 2.16*, und die Überreste für weitere Untersuchungen aufbewahrt. Geätzt wird wiederum mit einer Eisen-III-Chloridlösung.

38





Abb. 2.15: Von dem stark korrodierten Beilfragment 1943,1 ist etwas mehr als die untere Hälfte erhalten. Die Schneide läuft sehr stumpf aus und es trägt Spuren einer Nachbearbeitung.

Abb. 2.16: Umzeichnung des Fragments 1943,1 und Aufsicht auf die Schnittflächen. Die grauen Segmente (1-5) entsprechen den metallographischen Schliffproben.



Abb. 2.17: Schema der Probenahme aus den überschmiedeten Nachgüssen.

c) Schliffbilder überschmiedeter Nachgüsse

Zum Vergleich der Gefügeausbildungen in den unterschiedlich stark verformten Partien werden von den überschmiedeten Beilen aus Kupfer und Bronze im Bereich der Randleisten Längs- und Querschnitte angefertigt und metallographisch untersucht, *Abb. 2.17*. Als Ätzmittel dient zunächst entsprechend den Originalfragmenten eine Eisen-III-Chlorid-Lösung; bessere Ergebnisse werden durch eine zweite Ätzung mit einer Kupfer-Ammonium-Chlorid-Lösung erzielt.

2.5.3 Härteprüfungen an Originalfragmenten und Nachgüssen.

"Härte" kann als die Eigenschaft eines Körpers bezeichnet werden, dem Eindringen eines anderen Widerstand zu leisten. Dieser ist einerseits vom Material selbst und andererseits von dessen Gefügeausbildung abhängig. Durch eine Kaltbearbeitung erfährt das gesamte Kristallhaufwerk eine Gestaltänderung und Verlagerung, zum Beispiel in Form von Verdichtung und Kornverfeinerung. Diese bewirken eine Härtesteigerung. Letztere kann jedoch durch Erhitzen wieder vernichtet werden [v. Weingraber 1952, Kap. 1]. Bei Kupfer-Zinn-Legierungen nimmt die Härte sowohl mit steigendem Zinngehalt als auch mit steigendem Kaltumformungsgrad zu. Je nach Zusammensetzung und Kaltumformungsgrad liegt die Brinellhärte zwischen 60 und über 225 HB. [DKI-Informationsdruck].

Zum Vergleich der "Formänderungswiderstände" kommen bei metallischen Werkstoffen statische Eindringhärteprüfverfahren zur Anwendung. Ein genormter Prüfkörper wird mit einer Prüfkraft stoßfrei in einer bestimmten Zeit auf das zu prüfende Material gedrückt. Der verbleibende Eindruck ist ein Maß für die Härte. Berücksichtigt wird hierbei der plastische Verformungsanteil einer Probe [v. Weingraber 1952, Kap. 1].

Entsprechende Prüfungen werden zur Abschätzung der erreichbaren Härtesteigerungen durch Kaltbearbeitung von Kupfer- und Bronzegussstücken und den damit verbundenen Einsatzmöglichkeiten in der Bronzezeit durchgeführt. Als Proben dienen je ein Querschnitt der überschmiedeten Nachgüsse und drei Querschnitte des Originalfragments HV 107. Aufgrund der geringen Ausdehnung der unterschiedlich verformten Gefügebereiche kommt die Mikrohärteprüfung nach Vickers zum Einsatz, die mit einer regelmäßigen, vierseitigen Diamantpyramide als Eindringkörper arbeitet. Die durch die gewählte Auflast von 100 g entstandene Eindruckoberfläche wird optisch vermessen und die zugehörige Vickershärte $\underline{HV}_{0.1}$ einem genormten Tabellenwerk entnommen. Beim Einsatz der Mikrohärteprüfung muss beachtet werden, dass zum einen die Gefahr besteht, einzelne Gefügebestandteile und nicht den Werkstoff an sich zu messen und zum anderen mit zunehmenden Härten und abnehmender Auflast die Messwerte gegenüber der Makrohärteprüfung häufig erhöht sind [v. Weingraber 1952, Kap. 2]. Durch die Menge der Prüfpunkte in ähnlich ausgebildeten Gefügebereichen und die noch relativ hohe Auflast bei vergleichsweise geringen Härten können die ermittelten Werte jedoch durchaus als Vergleichswerte dienen.

Die Härteprüfungen erfolgen zunächst als Einzelprüfungen in den verschieden stark verformten Gefügebereichen, *Abb. 2.18-2.20a.* Zur Veranschaulichung der Härteausprägung über einen ganzen Querschnitt kommt für weitere Messungen ein automatisches Härteprüfgerät zum Einsatz. Dabei wird ein Netz von Prüfpunkten in einem Abstand von jeweils 0,5 mm über den Probenquerschnitt gelegt, *Abb. 2.20b.* Messungen zur Bestimmung der Oberflächenhärte am Originalbeil 1924,1 vom Typ Langquaid II sollen Aufschluss darüber geben, ob dies eine quasi zerstörungsfreie Methode zur Abschätzung des Grades einer mechanischen Überarbeitung darstellen kann.

a) Originalfragment HV 107 (Probenbezeichnung: s. Abb. 2.14)

- Probe 2: Die Pr
 üfpunkte liegen entlang der Mittellinie von der Beilmitte bis an die Kontur der Randleiste und parallel zur Randleistenkontur (Abstand ca. 0,5 mm), *Abb.* 2.18.
- <u>Schneidenspitze, Schnitt durch Probe 5'</u>: Die Prüfpunkte verlaufen entlang der Mittellinie von der Spitze zur Mitte. Zwei Punkte liegen an der Schneidenkontur (Abstand ca. 0,5 mm), *Abb. 2.19*.

b) Bronzebeil, Nachguss

Die Prüfpunkte 6-12 liegen im stark verdichteten Bereich der überschmiedeten Randleiste, die Punkte 1-5 und 13/14 in nicht überarbeiteten Querschnittsbereichen.

c) Kupferbeil, Nachguss

Die Prüfpunkte 1-17 liegen im stark verdichteten Bereich der überschmiedeten Randleiste, die Punkte 18-22 in nicht überarbeiteten Querschnittsbereichen, *Abb. 2.20a*.

d) Oberflächenhärte am Beil 1924,1

Entlang der Mittelachse wird im Abstand von 5 mm eine Reihe von Messpunkten von der Blattmitte bis zur Schneidenkante gelegt.

2.6 Ergebnisse

2.6.1 Untersuchungen an den Referenzstücken

Als Folge des Erhaltungszustandes sind bei den meisten Stücken äußerlich kaum Hinweise auf die Herstellungstechnik zu finden. Gelegentlich zeugen Schmiedespuren am Nacken und Fältelungen an den Innenseiten der Randleisten von einer mechanischen Überarbeitung (s. *Anh. 1, Abb. A1-1* u. *Anh. 2, Abb. A2-2,2*). Eindeutig originäre Gussgeometrien sind selten.

Weiterreichende Aussagen bezüglich einer Beurteilung der Gussqualität und der Herstellungstechnik erlauben die Röntgenaufnahmen, *Taf. 1a-16a*. Teilweise geben die lokale



Abb. 2.18: Einzelprüfpunkte am Querschnitt der Probe 2 des Originalfragments HV107 für die Mikrohärteprüfung nach Vickers. Die Punkte 1-4 wurden auf gering und die Punkte 6-14 auf stark verformte Gefügebereiche gesetzt. Punkt 5 liegt im Übergangsbereich.



Abb. 2.19: Einzelprüfpunkte am Querschnitt der Schneidenspitze (Schnitt durch Probe 5') des Originalfragments HV107 für die Mikrohärteprüfung nach Vickers. Die Punkte 1-9 liegen entlang der Mittellinie von der Spitze zu Mitte, die Punkte 10 und 11 an der Schneidenkontur (Abstand zur Oberfläche ca. 0,5 mm).



Abb. 2.20: Querschnitt des nachgegossenen Kupferbeils.

a) Die Prüfpunkte 1-17 liegen im Bereich der überschmiedeten Randleiste, im Abstand von ca. 0,5 mm zur Beilkontur, die Punkte 18-22 in nicht überarbeiteten Geometriebereichen.

b) Abdrücke der Prüfpunkte zur Veranschaulichung der Härteausprägung über einen ganzen Probenquerschnitt. Der Abstand der Messpunkte untereinander beträgt 0,5 mm. Anordnung von Poren und deren Form Hinweise auf herstellungstechnische Details. So lassen die bei vielen Beilen des Typs Langquaid zum Schaftende hin konzentrierten Gasporen auf einen Einguss vom Nacken her schließen (s. Taf. 5a, 11a, 13a). Elliptische, parallel zum Schaft ausgerichtete Poren zeugen von einer intensiven mechanischen Überarbeitung (s. Taf. 5a-8a u. 12a, 13a).

Die digitale Analyse der Röntgenbilder konnte deren Aussagekraft nur bedingt verbessern, *Taf. 1b u. 3b-15b.* Bereits in der Originalaufnahme gut erkennbare Porositäten ließen sich zwar optisch hervorheben, bei unklaren Befunden bestand jedoch die Gefahr einer stark interpretativen Wiedergabe des Objektes. Dies gilt vor allem bei qualitativ guten Gussstücken, weil bei einer hohen Auflösung feine Porositäten kaum von korrosionsbedingten Oberflächenveränderungen zu unterscheiden sind.

Eine ausführliche Beschreibung aller 17 untersuchten Randleistenbeile erfolgt in *Anhang 2*. Zusätzlich gibt *Tabelle 2.3* eine Übersicht über die wichtigsten Details der vier für die Rekonstruktion ausgewählten Referenzstücke. Letztere weisen eine recht gute Qualität auf. Überraschend sind die qualitativen Unterschiede der optisch sehr ähnlichen Beile aus den beiden Hortfunden von Langquaid.

2.6.2 Simulationsergebnisse

Anhand der Simulationsergebnisse lässt sich der Einfluss der variierten Parameter auf Formfüllung und Erstarrung sowie die daraus resultierenden möglichen Gussfehler und typischen Lunkerzonen im Gussstück nachvollziehen.

• Variation des Formstoffes

Auffällig ist die rasche Abkühlung der in Bronzeformen gegossenen Beile. Die Schmelze kühlt bereits während des Formfüllvorgangs auf Temperaturen in der sog. "mushy-zone" zwischen Liquidus- und Solidustemperatur ab, in den dünnen Randleisten sogar darunter. Dort ist mit Gussfehlern wie Fehlstellen oder Kaltschweißen zu rechnen. Lehm- und Sandsteinformen halten die Bronze während des gesamten Gießvorgangs oberhalb der Liquidustemperatur, sodass keine Formfülldefekte zu erwarten sind.

Die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten von Bronze- und Lehm-, bzw. Sandsteinformen beeinflussen auch die Erstarrungsmorphologie der eingegossenen Bronze. Während die gut wärmeleitende Bronzekokille eine schalenartige Erstarrung begünstigt, führt die langsame, gleichmäßig über das Gussstück verlaufende Abkühlung in den mineralischen Formen zu einer eher breiartigen Erstarrung [Engler, Göckmann 1971]. Bei den gegebenen Beilgeometrien ist für die in Bronzekokille gegossenen Beile mit einem Mittellinienlunker entlang der Geometrieachse zu rechnen. Die langsamer erstarrenden Beile aus Lehm- und Sandsteinformen lassen eine ausgedehnte poröse Zone im mittleren Geometriebereich erwarten, *Abb. 2.21*.

Tabe	lle 2.3	: Besch	nreib	ung de	r vier	nähe	r unte	rsuch	iten u	nd zu	Rekc	nstru	lktion	ISVETSU	ichen	hera	Ingezogenen	Referenzstücke.	
	Abmes	sungen	[mm		Mae-					Analys	se[Ge	w%					Fundart	Autonsie	Renhachtungen
Län-	Breite	Breite	Dik-	Höhe	se	נ	2	•	3	•	1	1	נ	į	1	•		- moloure	aus den
ge	Nak- ken	Schnei- de	ke	Rand- leisten	[g]	Sn	Рb	As	Sp	Ag	Ž	Fe	Co	Bi	Zn	Au			Röntgenaufnahmen
1 Ra	ndleist	enbeil]	[yp]	Veyruz	(Inv	Nr. E	IV 87), Abb	. 2.5 a), Taf.	I		1						
			N	N													bei Fürsten-	 keine herstel- 	•Geringe Porosität in
132,5	23	57	10,2	14	260,1	0,03	Spur	1,65	4,1	0,57	1,9	Spur	0,13	0,043	-		feldbruck, Oberbayern	lungsrelevanten Details erkennbar	der Beilmitte
2 Ra	ndleist	enbeil]	[yp I	angqu	iaid II	(Inv.	Ż	1942,1), Abl	5. 2.5b), Taj								
			IV	١٨		u											Schönramer	 Nackenzange mit 	 Insgesamt fein
190	22	78	8,7	12,5	367	10		0,04	Spur	Spur	60,09			Spur			Filz, Gde. Ringham,	•Randleisten mit	verteilte Porosität, im Blatt erhöht
																	Lkr.	schwachem	•Gas- oder Schwin-
																	Traunstein	•Beidseitige	dungsporen: Uber- gang Blatt/Schaft
3 Ra	ndleist	enbeil 7	[yp]	Mägerl	kingen	, (Inv	Nr.	1994,	1679)	Abb.	2.5c),	Taf.	3						
			N	\geq											\wedge	\wedge	Inn,	•Kanten:	•Feine Poren, ver-
156	24	34,5	6,3	12	209,9	6,9	0,56	0,28	0,11	0,01	0,17	0,2	800,0	0,006	0,1	0,01	zwischen	lagerungsbedingt	Leichte Konzentra-
																	Jettenbach	und abgerundet	tion an Gas- oder
																		•Beidseitige Schneidenfacette	Schwindungsporen
4 Ra	ndleist	enbeil]	[yp l	Interb	imbac	h, Va	riant	e Neh	ren (L	nvNi	:: 19	28,5)	Abb.	2.5d),	Taf. 4	-			
			١٨	١٨										\wedge	\wedge	\wedge	München-	•Eine Seite: kleine	•Feine Poren ver-
192	21	41	9	15	274,6	6,6	0,12	0,279	0,298	610,0	0,34	0,23	800,0	0,005	0,1	0,01	⊖nter- föhring	•Blatt. zwischen	•Oberes Schaftende:
																		den auslaufenden	lockeres Gefüge
																		Randleisten und	aufgrund frühzeiti-
																		Schneide: Zwei	ger Erstarrung im
																		Schlagflächen	
Ī																			

44



Abb. 2.21: Bei identischen Gießparametern ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Erstarrungsbedingungen für die einzelnen Formstoffe spezifische Lunkerzonen. Während das in die Bronzeform gegossene Beil zur Ausbildung eines Mittellinienlunkers neigt, weisen die in die mineralischen Formen gegossenen Beile ausgedehnte poröse Bereiche auf.



Abb. 2.22: Formstoff Bronze: Temperaturverteilung in der Schmelze bei 90% Formfüllung. Bei einer zu kalten Form erstarrt die Schmelze vorzeitig (blau) und vor allem die Randleisten werden unvollständig gefüllt (graue Bereiche). Weitere Parameter: $T_{gieß}=1080^{\circ}$ C, $t_{gieß}=3$ s.

• Variation der Gießtemperatur

Die innerhalb der archäologisch wahrscheinlichen und technisch möglichen Grenzen liegende Differenz von 30°C in der Gießtemperatur macht sich bei ansonsten gleichbleibenden Parametern geringfügig bemerkbar. Wählt man eine Abgusstemperatur von 1050°C, befindet sich zwar am Ende des Formfüllvorgangs schon mehr Bronze in der "mushy-zone" (Lehm- und Sandsteinform), oder ist bereits erstarrt (Bronzeform) als bei 1080°C. Die Erstarrungszeiten und die Temperaturverteilung nach der Formfüllung liegen jedoch sehr nah beieinander.

• Variation der Formvorwärmtemperatur

Die Vorwärmtemperatur der Form beeinflusst sowohl die Formfüllung als auch die Ausdehnung der Lunkerzonen.

Bei CuSn10 als Formstoff ist eine vollständige Formfüllung nur durch eine hinreichende Vorwärmtemperatur zu erreichen. Anderenfalls friert die Schmelze aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit der Bronzeform in den dünnen Randleisten ein und trennt noch nicht gefüllte Formhohlräume vom Schmelzefluss ab, *Abb. 2.22*. Die minimale Temperatur ist abhängig von den übrigen Gießparametern, vor allem von der Gießzeit. Unabhängig von der Formtemperatur ist ein eng umgrenzter Mittellinienlunker zu erwarten.

Bei den gut isolierenden Formstoffen Lehm und Sandstein ist in jedem Fall eine vollständige Formfüllung zu erwarten. Die Formvorwärmtemperatur beeinflusst vor allem die Ausdehnung der Porositätszone. Während kältere Formen aufgrund der schnelleren Erstarrung abgegrenzte poröse Bereiche erwarten lassen, findet bei den heißeren Formen ein Temperaturausgleich über einen größeren Geometriebereich statt und es wird sich ein insgesamt lockeres Gefüge ausbilden.

• Variation der Gießzeit

Während Lehm- und Sandsteinformen bei variierten Gießzeiten keine Unterschiede im Gusserfolg erwarten lassen, wirkt sich ihre Verkürzung bei Metallformen positiv auf die Formfüllung aus. Bei einer Gießtemperatur von 1080°C und einer Vorwärmtemperatur von 500°C entstehen zum Beispiel bei 4 Sekunden Gießzeit noch Fehlstellen an den Randleisten, bei 3 Sekunden und darunter wird eine vollständige Formfüllung berechnet.

• Variation der Anschnittposition

Am Beispiel der Randleistenbeile vom Typ Langquaid und Neyruz zeigt sich, dass die Anschnittposition auf der Randleiste der dicken Schneidenmitte am günstigsten ist. Dieser zuletzt erstarrende Geometriebereich kann so möglichst lange nachgespeist werden. Eine Verschiebung des Anschnitts Richtung Schaft führt zu einer frühzeitigen Unterbrechung dieser Verbindung. Im Extremfall des Anschnitts am Hals ist aufgrund von Massenspeisung aus der Gussstückmitte heraus mit ausgeprägter Schwindungsporosität im mittleren Beilbereich zu rechnen, *Abb. 2.23*.



Abb. 2.23: Die gießtechnisch beste Anschnittposition liegt auf der Randleiste über der dicksten Beilstelle (a). Eine Verschiebung in Richtung Schaft (b) bedingt ein frühzeitiges Zufrieren der Verbindung zwischen Anschnitt und zuletzt erstarrendem Bereich. Am ungünstigsten ist der in der Bronzezeit übliche Einguss vom Hals (c). Dargestellt ist die zur Durchschreitung des Erstarrungsintervalls (830-1020°C) benötigte Zeit.



Abb. 2.24: Im optimierten Gießprozess konzentrieren sich die lunkergefährdeten Bereiche entlang der Mittellinie des Beils. Die im Zentrum des vorderen Blattes liegende Lunkerposition ist deckungsgleich (links). Das rechts erkennbare äußere Band von Lunkern ist andeutungsweise auch in der Simulation erkennbar. [J. Wolf, 1999, S. 90, Bild 6.15].

• Variation des Gusswerkstoffes

Reines Kupfer unterscheidet sich in seiner Erstarrungsmorphologie von seinen Legierungen mit Zinn. Es erstarrt nahezu exogen-glattwandig [Engler, Göckmann, 1971], das heißt schalenartig, von der Formwand her. Dadurch bilden sich selbst bei langsamer Erstarrung eng umgrenzte Mittellinienlunker aus. Hier wird auch für die Formstoffe Lehm und Sandstein eine langgezogenen Fehlstelle im Schaft berechnet.

• Automatische Parameteroptimierung

Um detaillierte Aussagen über den Gießprozess treffen zu können, würde das Optimierungsprogramm mehr Vorgaben über die tatsächlichen Rahmenbedingungen (Anschnittposition, Formstoff, Gießzeit) benötigen. Der Verlauf der Optimierung zeigt jedoch Tendenzen, die auf eine relativ hohe Formtemperatur (ca. 450°C-500°C) für beide angenommenen Formteile bei einer minimalen Gießtemperatur (ca. 1050°C) schließen lassen, *Abb. 2.24* [J. Wolf, 1999, 88-90].

Insgesamt zeigt sich der Gusserfolg bei den gut wärmeleitenden Bronzeformen anfälliger gegenüber Parameterveränderungen als bei den isolierenden Formen aus Sandstein und Lehm. Die einflussreichsten Faktoren sind dabei die Vorwärmtemperatur der Form und die Gießzeit. Die Anschnittposition wirkt sich in beiden Fällen auf die lokale Porositätsbildung aus. Da auch die Erstarrungsmorphologie des vergossenen Metalls den Gusserfolg erheblich beeinflusst, sollte die Legierung des nachzugießenden Objektes mit ihren Eigenschaften möglichst genau bekannt sein um Aussagen über die vermutlichen bronzezeitlichen Gießparameter zu treffen.

2.6.3 Bewertung der Nachgüsse

•Autopsie der Nachgüsse

Die vom Nacken angeschnittenen Beile des Typs Neyruz lassen bereits äußerlich Einfallstellen im Bahnbereich erkennen, *Abb. 2.25 a, b*. Hier war die erstarrte Randschale noch nicht genügend ausgebildet und wurde in den bei der weiteren Erstarrung entstehenden Speisungslunker gesogen. Das Bronzebeil weist eine etwa 2 mm tiefe, trichterförmige Vertiefung (Durchmesser ca. 5 mm) in Höhe der Bahnmitte auf. Bei dem Exemplar aus Kupfer weist eine lange(ca. 5 mm breit und ca. 2 mm tief), entlang der Bahn verlaufende Vertiefung auf die Ausbildung eines Mittellinienlunkers hin.

Das von der Seite angeschnittene Exemplar des Typ Neyruz sowie die Nachgüsse der anderen Referenzstücke weisen, abgesehen von auch mit bronzezeitlichen Mitteln (Sandstein) leicht abtragbaren Oberflächenrauhigkeiten, wo die Schmelze das vergleichsweise grobe Formmaterial abgebildet hat, keine äußerlich erkennbaren Gussfehler auf *Abb. 2.25c-f*.





e) REF.-ST. 3, TYP UNTERBIMBACH f)REF.-ST. 4, TYP MÄGERKINGEN Anschnitt am Nacken, Bronze Anschnitt am Nacken, Bronze

Abb. 2.25: Nachgüsse der vier Referenzstücke. Bei den vom Nacken angeschnittenen Beilen des Typs Neyruz weisen Einfallstellen im Bahnbereich auf Speisungslunker hin (a, b); besonders ausgeprägt ist der bei dem Kupferexemplar (b) bereits mittels Simulation vorhergesagte Mittellinienlunker. Die übrigen Abgüsse (c-f) tragen lediglich die für Lehmformen typischen oberflächlichen Schülpen, die leicht abgetragen werden können.

•Vergleich der Röntgenbilder von Nachgüssen und Originalen

Auffällig ist das im Vergleich zu den Originalbeilen (s. Taf. 1-4) weniger dicht gespeiste Gefüge der Nachgüsse, *Taf. 18-20 und Tabelle 2.4*. Obwohl viele der vorhandenen Poren bei den Originalen wahrscheinlich durch die bronzezeitliche Überarbeitung gestaucht oder zugeschmiedet wurden, zeigen die Röntgenaufnahmen gießtechnisch relevante Parallelen.

Während die von oben angeschnittenen Nachgüsse des Typs Neyruz, insbesondere das der Originalzusammensetzung entsprechende Exemplar aus Kupfer, Speisungslunker in der Schneide und dem Schaft aufweisen, *Taf. 18a,b*, sind am Original keine Speisungseffekte zu beobachten. Eine gute Übereinstimmung zeigt hingegen das seitlich angeschnittene Beil mit nur geringer Porositätsbildung in der Schneidenmitte, *Taf. 18c.*

Das Röntgenbild des von oben angeschnittenen Exemplars des Typs Langquaid, *Taf. 19a*, zeigt trotz schlechter Gussqualität weitgehende Übereinstimmung mit den Originalbeilen, vor allem bezüglich der Konzentration von (Schwindungs-) Poren im oberen Bahnbereich.

Auffällig erscheint die Übereinstimmung der lokalen Porenbildung in der Schneide beim Typ Mägerkingen, *Taf. 20a.* Die Röntgenaufnahmen des Beils vom Typ Unterbimbach ermöglichen keine Aussagen zur Gießtechnik, *Taf. 20b.*

•Vergleich mit den Simulationsergebnissen

Die Qualität der Nachgüsse bestätigt weitestgehend die Simulationsergebnisse. Besondere Übereinstimmung zeigt die Lunkerbildung in der dicken Schneidenmitte des Beils vom Typ Neyruz. Das seitlich angeschnittene Exemplar belegt, dass ein Verschieben des Anschnitts Richtung Schneide die Nachspeisung begünstigt (vgl. Abb. 2.23 u. Taf. 18). Ein Mittellinienlunker wurde hingegen bei Lehmformen nur für das Kupferbeil errechnet. Die Frage nach einem Anschnitt auf der Seite bleibt speziell für diesen Beiltyp berechtigt.

Die ausgeprägte Lunkerbildung in der Schneide des Langquaid-Beils scheint, zumindest bei einem Anschnitt vom Nacken, geometrietypisch zu sein. Auch die erhöhte Lunkerneigung am Anschnitt konnte errechnet werden (vgl. Abb. 2.24 u. Taf. 19a). Eine entsprechende Anschnittposition ist daher zumindest für diesen Typus anzunehmen. Ein Mittellinienlunker in der Bahn ist auf der Röntgenaufnahme jedoch nicht zu erkennen.

Für das gleichmäßig starke, fast parallelseitige Referenzstück vom Typ Mägerkingen wurde ein lockeres Gefüge in der Bahn ohne umgrenzte Lunkerzonen errechnet. Dies entspricht auch den Röntgenbildern von Original und Nachguss (vgl. Abb. 2.25f u. Taf. 20a). Das Originalbeil wurde vermutlich wenig überarbeitet.

Bei dem Typ Unterbimbach erstarrt die Schmelze zuerst an den sehr dünnen Querschnitten direkt unterhalb des Anschnittes und in der Beilmitte. Dadurch muss die Speisung aus dem Gussstück heraus erfolgen. Dies erklärt die Lunkerbildung in der Schneidenmitte und dem oberen Beilbereich (vgl. *Abb. 2.26* u. Taf. 20b). Die geringe Übereinstimmung mit dem Original legt eine extreme bronzezeitliche Überarbeitung des sehr filigranen Beils nahe.

Nachguss	Röntgenbild	Beschreibung der Röntgenbilder
Typ Neyruz Anschnitt von oben Bronzenachguss	Tafel 18a	 Dichtes Gefüge vom Schneidenbereich bis zur Mitte. Lunker in der dicken Beilmitte, der sich, teilweise äußer- lich als Einfallstelle erkennbar, durch den Schaft bis zum Anschnitt zieht.
Typ Neyruz Anschnitt von oben Kupfernachguss	Tafel 18b	 Dichtes Gefüge bis zur Schneidenmitte. Einfallstelle im Schaftbereich ist gut zu erkennen (dunkler Schatten); zusätzlich weist er Poren auf. Bereich mit kleineren Lunkern kurz über der dicken Schneidenmitte.
Typ Neyruz Anschnitt auf der Seite Bronzenachguss	Tafel 18c	 Insgesamt sehr dichtes Gefüge Leichte Porositätsbildung /weniger dichtes Gefüge in der dicksten Stelle der Schneide. Leichte Rissbildung an den Randleisten im Bereich des Anschnitts.
Typ Langquaid II Anschnitt von oben	Tafel 19a	 Schlechter Guss. Viele und große Gas- und/oder Schwindungsporen im Blattbereich, die sich in den Schaft hinein ziehen und im Übergang Blatt/Schaft konzentrieren. Dichteres mittleres Schaftstück. Im oberen Bereich hohe Schwindungsporosität, die sich bis zum Anschnitt zieht.
Typ Langquaid II Anschnitt auf der Seite	Tafel 19b	 Mäßiger Guss. Drei poröse Bereiche im Blattbereich. Direkt unter dem Anschnitt und zum Blatt hin weniger dichtes Gefüge. Leichte Lunkerbildung am Nacken.
Typ Mägerkingen	Tafel 20a	 Insgesamt sehr lockeres Gefüge. Keine größeren Poren. Im Schneidenbereich dichteres Gefüge mit einzeln abgegrenzten Poren, es kann sich dabei sowohl um Schwindungs- als auch um Gasporositäten handeln. Kleine Schwindungsporen auch im mittleren Bereich und zum Anschnitt hin.
Typ Unterbimbach	Tafel 20b	 Sehr lockeres, poröses Gussgefüge. Etwas dichteres Gefüge im Schneidenbereich, jedoch durchsetzt mit kleinen Gas- oder Schwindungsporen. Es folgt bis kurz unterhalb der Mitte ein sehr poröser Bereich, wohl durch Speisung aus dem Gussstück heraus. An der Einschnürung, wo die Schmelze zuletzt erstarrt, dichtes Gefüge. Oberhalb wieder zunehmend lockerer und poröser werdendes Gefüge; besonders direkt unterhalb des Anschnitts

Tabelle 2.4: Beschreibung der Röntgenbilder der Nachgüsse



Abb. 2.26: Simulierte Lunkerzonen im oberen und unteren Geometriebereich des Beils vom Typ Unterbimbach.

		Rohguss	Überschmiedet		
Exemplar	Tafel	Beschreibung	Tafel	Beschreibung	
3	21a	 Dichtes Gefüge in der Schneide. Lockereres Gefüge im Schaft (stellt sich wie "in Lagen" dar). Eine große Pore auf der Schaft- seite, Im Randleistenbereich. Einige eng umgrenzte Poren in der Schneidenmitte. 	21b	 Einmal überarbeitet. Insgesamt dichteres Gefüge. Die lagenartige Ausprägung ist nur noch im Bereich der großen Pore gut erkennbar. Die umgrenzten Poren sind weiterhin erkennbar. Hammerspuren als Schatten erkennbar. 	
4	22a	 Dichtes Gefüge in der Schneide. Ab der Schneidenmitte wird das Gefüge lockerer. Lokale Lunkerbildung in der Schneidenmitte, kurz darüber im Schaft und kurz unterhalb des Anschnittes. 	22b	 Zweimal überarbeitet. Insgesamt viel dichteres Gefüge. Die Lunker sind nur noch im Ansatz als kleine dunkle Schatten zu erkennen. Der Lunker im Anschnitt stellt sich rissähnlich dar. 	
5	23a	 Sehr lockeres Gefüge im Schaft. Lunkerbildung unterhalb des Anschnitts bis ca. ¼ in den Schaft. Weiterer Lunkeransatz in ca. der Schaftmitte. Schatten in der dicken Schneidenmitte zu erkennen. Einzelne umgrenzte Poren in der Schneide und in den Randleisten. 	23b	 Dreimal überarbeitet. Lockeres Gussgefüge ist nur noch im Bereich der Lunkeransätze zu erkennen. Der Lunker in der Schaftmitte bleibt als dünner horizontaler Schatten. Der Lunker im Schaft erscheint nur noch als leichte Porosität. Die Schneide weist dichtes Gefüge auf. Umgrenzte Poren sind weiterhin zu erkennen. 	

Tabelle 2.5: Beschreibung der überschmiedeten Nachgüsse.

2.6.4 Ergebnisse aus den Schmiedeversuchen

•Schmiedetechnik, Anhang 1

Die Beilrohlinge ließen sich durch Stauchen und anschließendes Freiformschmieden (Ziehbewegungen) gut bearbeiten. Der dabei eingesetzte Treibhammer (Ballhammer) entsprach mit einem Gewicht von etwa 350 g einigen bekannten Funden [Hundt 1973, 1976]. Schwerere Schmiedehämmer mit einem Gewicht um 1000 g, wie sie Hundt [1976, 121] für diese Arbeiten voraussetzte, erwiesen sich im Versuch als unzweckmäßig. Neben Stein- oder Metallhämmer wurden möglicherweise auch Sonderwerkzeuge oder Hilfsmittel aus Stein oder anderen harten Materialien benutzt. Ein anschließender Anschliff zur Erzeugung der Kanten und der guten Oberfläche ist vorauszusetzen.

Durch die Versuche konnten auch Detailbeobachtungen bei der Autopsie der Randleistenbeile erklärt werden. So zeugen die Schlagspuren und Fältelungen bei den Langquaid-Beilen vom Ausschmieden des Nackenausschnitts, *Anhang 1: Abb. 4*. Bei den Fältelungen an den Innenseiten der Randleisten handelt es sich um Stauchungen, die durch das Verziehen des Materials beim Herausarbeiten der Randleisten entstanden sind.

•Röntgenaufnahmen der überschmiedeten Beile

Um einen Zusammenhang zwischen dem Grad der mechanischen Überarbeitung und dem Erscheinungsbild der Röntgenaufnahme herzustellen, wurden zunächst die drei Rohlinge des Grundtyps Neyruz geröntgt. Weitere Röntgenbilder entstanden bei Exemplar 3 nach dem ersten, bei Exemplar 4 nach dem zweiten und bei Exemplar 5 nach dem dritten Schmiedegang. Die Beschreibung der Röntgenbilder, *Taf. 21-23*, erfolgt in *Tabelle 2.5*.

Ein nicht 100%-ig dichtgespeistes Gussstück ist im Röntgenbild durch eine "schaumige" oder "lagige" Struktur als Rohguss zu erkennen. Diese Ausprägung verschwindet mit zunehmendem Überarbeitungsgrad, da das Gefüge verdichtet wird. Dabei werden auch kleine Speisungslunker zugeschmiedet. Je größer das Volumendefizit ist, desto länger dauert dieser Vorgang. Weniger leicht lassen sich die eng umgrenzt abgebildeten Gasporen

verschmieden. Da sich auch Oberflächenstrukturen im Röntgenbild abzeichnen, erscheinen die durch hämmern bearbeiteten Objekte zusätzlich kompakter als die Rohgüsse.

Da die bronzezeitlichen Randleistenbeile in der Regel vom Schaftnacken her angeschnitten wurden, ist anzunehmen, dass diese ungünstige Position auch damals zu vielen weniger dicht gespeisten Abgüssen führte. Die typischen "schaumigen" Strukturen sind in den Röntgenbildern jedoch selten zu beobachten. Häufiger sind dagegen die anscheinend weniger gut verschmiedbaren Gasporen.

Berücksichtigt man die Autopsie vieler Funde, ist davon auszugehen, dass die Endgeometrie in den wenigsten Fällen der Gussgeometrie entsprach, sondern eine erhebliche Umformarbeit geleistet wurde und dem Guss der Stellenwert eines Zwischenproduktionsschrittes eingeräumt werden muss.

2.6.5 Beobachtungen an den Schliffbildern

a) Beilfragment HV107

Die makroskopische Betrachtung der Schliffe lässt neben Poren in der Probenmitte auch oberflächennahe "Risse" im Übergang vom Schaft zu den Randleisten und an der Schneide erkennen. Sie sind entweder parallel oder senkrecht zur Oberfläche ausgerichtet und folgen den Korngrenzen. In den Randleisten folgen sie der äußeren Geometrie.

In der mikroskopischen Vergrößerung fällt zunächst eine kontinuierlich Abnahme der Korngröße sowohl von innen (Beilmitte) nach außen (Randleisten und Schneidenkante) auf, *Abb. 2.27*, als auch vom Schaft in Richtung Schneide. Das feinste Gefüge liegt dann in der Schneidenkante vor. Reste von originalem Gussgefüge sind lediglich in der dicken Beilmitte erhalten, im übrigen Gefüge haben sich polygonale Körner mit teilweiser Zwillingsbildung ausgebildet. Die Größe der im Schaft und im mittleren Schneidenbereich erkennbaren Mikrolunker nimmt, wie die Korngröße, nach außen hin ab.

Neben dem Grundgefüge existieren Einschlüsse einer nichtmetallischen Phase. Sie sind im Schaft tropfenförmig ausgebildet und verlaufen in den Randleisten und der Schneide länglich, parallel zur äußeren Geometrie, *Abb. 2.28*. Eine Mikrosondenanalyse ergab, dass es sich um eine sulfidische Kupferverbindung handelt.

Deutung:

Bei den oben als "Risse" beschriebenen Gefügestörungen handelt es sich wahrscheinlich um korrosiven Angriff, vor allem an den Korngrenzen [Anemüller 1997]. Ausgangspunkte können Oberflächenstörungen sein.

Die kontinuierliche Abnahme der Korngröße von innen nach außen sowie die ausgeprägte Zwillingsbildung lassen auf eine starke mechanische Bearbeitung der Randleisten und der Schneide schließen, die durch wiederholte Wärmebehandlungen, wie etwa dem Zwischenglühen beim Schmieden, unterstützt wurde. Zusätzlich belegt die Verformung der Einschlüsse eine entsprechende Nachbehandlung des Gussstücks. Die vermehrte Lunkerbildung im mittleren Beilbereich entspricht den Simulationsergebnissen an dem formähnlichen Typ Neyruz mit Anschnitt von oben.

Die Zusammensetzung der nichtmetallischen Einschlüsse lässt schließen, dass sie schmelztechnisch begründet sind und aus der Schlacke stammen. Eine Entmischung von Kupfer aus der Legierung während der Erstarrung oder einer nachfolgenden Wärmebehandlung kann aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften des Stoffsystems ausgeschlossen werden.

b) Beilfragment 1943,1

Erkennbar ist das typische Erstarrungsgefüge einer Gussbronze mit Kristallseigerungen, bei dem zinnarme primäre Dendriten während der Erstarrung von zinnreicher interdendritischer Restschmelze umgeben waren, *Abb. 2.29*. Das poröse Gefüge weist sowohl starke





a) Schaftmitte: Neben dem originalen Gussgefüge (hellgrau) existieren polyedrische Körner mit Zwillingsbildung (umgrenzte, gestreifte Körner). Die Mikrolunker (schwarz), die sich zwischen den Dendriten des Ursprungsgefüges ausgebildet haben, blieben bei der Gefügeumwandlung erhalten.

b) Übergang Schaft/Randleiste: Feines, polyedrisches Rekristallisationsgefüge mit vermehrter Zwillingsbildung. Die Mikrolunker sind kleiner und feiner verteilt als in der Probenmitte.



Abb. 2.27: Schliffbilder aus verschiedenen Querschnittsbereichen der Probe 4 des Beilfragments HV 107. V=200. Die Korngrößen nehmen von innen nach außen ab.



a) Fragment HV 107, Probe 4. V=500 b) Fragment HV 107, Probe 4. V=500 Abb. 2.28: Die Einschlüsse einer sulfidischen Kupferphase (Pfeile) aus der Schlacke bezeugen zusätzlich eine nachträgliche Bearbeitung des Beils:

a) Rundliche bis tropfenförmig Ausbildung in der Schaftmitte.

b) Länglich und parallel zur äußeren Geometrie ausgerichtet im feinen Gefüge der Randleiste.



Fragment 1943,1, Probe 1. V=200

Abb. 2.29: Das Beilfragment 1943,1 weist ein reines Gussgefüge auf. Zwischen den Dendritenarmen haben sich Mikrolunker ausgebildet (schwarz). Zusätzlich liegt neben dem metallischen Gefüge eine nichtmetallische Phase vor. Sie ist tröpfchenförmig ausgebildet (Pfeile) und weist im Gegensatz zu dem Beilfragment HV 107 im gesamten Gussstück keinerlei Verformungsmerkmale auf.

Lunkerbildung als auch durch Gasblasen entstandene Poren auf. Dichter stellt sich lediglich der äußere Bereich der Randleisten dar. Zwischen den Dendritenarmen hat sich die gleiche nichtmetallische Phase eingelagert wie im Beilfragment HV 107. Sie ist jedoch im ganzen Gussstück rundlich ausgebildet und weist keine Verformungsmerkmale auf.

Deutung:

Die dendritische Struktur mit sichtbaren Kornseigerungen lässt auf ein originales Gussgefüge schließen. Ferner legen die unverformten Einschlüsse und die im Vergleich zu anderen Artefakten stumpfe Schneidenkante nahe, dass keine Überarbeitung des Beilfragments stattgefunden hat.

Da es sich um einen schlechten Guss handelt und das lockere Gefüge keine große Stabilität des einstigen Beils vermuten lässt, ist es gut möglich, dass es schon vor Weiterverarbeitung und Gebrauch Ausschuss darstellte. Letztlich ist dies nicht mehr festzustellen, zumal die im Laufe der Jahrhunderte stattgefundene extreme Korrosion nicht außer Acht gelassen werden darf.

c) Kupferbeil, Nachguss

Makroskopisch lässt sich zunächst ein grobes dendritisches Gefüge mit hoher interdendritischer Porosität erkennen, in dem vereinzelt auch größere Poren eingeschlossen sind. Der überschmiedete Randleistenbereich zeichnet sich deutlich ab.

Das Gefüge ist im überschmiedeten Bereich der Randleisten so stark verdichtet, dass die interdendritischen Poren auch mikroskopisch kaum noch erkennbar sind, *Abb. 2.30*. Dieser Bereich ragt ca. 1 mm ins Probeninnere. Es folgt eine Übergangszone von ca. 0,5 mm. Danach liegt das unverformte Gussgefüge vor. Die Bildung von polygonalen Körnern ist lediglich im Bereich einer Pore an der Oberfläche im Übergangsbereich Randleiste/Schaft zu erkennen.

d) Bronzebeil, Nachguss

Makroskopisch lässt sich feststellen, dass das Gefüge feiner ausgebildet ist als bei dem Kupferbeil. Die Überschmiedung lässt sich nur an der Geometrie, nicht aber als Kompaktierung des Gefüges erkennen.

Unter dem Mikroskop betrachtet weist die überschmiedete Randleiste ein typisches Umwandlungsgefüge mit polygonalen Körnern auf, deren Größe zum Rand hin abnimmt. In den feinsten Körnern an der Oberfläche tritt vereinzelt Zwillingsbildung auf, *Abb. 2.31a*. Der Kristallisationsbereich reicht von der bearbeiteten Oberfläche ca. 2 mm ins Probeninnere, Einer Übergangszone von ca. 1 mm schließt sich originales Gussgefüge mit feiner interdendritischer Porosität an, *Abb. 2.31b*. Reste von Dendritenästen sind im gesamten Gefüge erhalten geblieben.



Abb. 2.30: Überschmiedete Randleiste des Kupferbeils, V=25. In einem ca. 1cm in das Probeninnere ragenden Bereich ist das Gefüge so stark verdichtet, dass die Makrolunker fast komplett "verschmiedet" sind



Abb. 2.31: Längsschnitt des überschmiedeten Bronzebeilnachgusses im Übergangsbereich zwischen Umwandlungs- und Gussgefüge. V=100. Im Bereich der überschmiedeten Oberfläche (links) hat sich ein typisches Umwandlungsgefüge mit polygonalen Körnern und vereinzelter Zwillingsbildung (Pfeil) ausgebildet. Zur Probenmitte (rechts) hin werden die Kristallite größer und der Anteil an originalem Gussgefüge nimmt zu.

e) Schlussfolgerungen

Die metallographischen Untersuchungen der beiden Originalfragmente zeigen, dass in der Bronzezeit Randleisten sowohl mitgegossen wurden als auch starke Überarbeitungen derselben stattfanden. Inwieweit bei dem Fragment HV 107 die Randleisten schon im Guss angelegt waren und ob es sich um eine Ausarbeitung oder eine bloße Überarbeitung handelt, ist nicht nachzuvollziehen.

Die Schliffbilder der Nachgüsse legen nahe, dass das Freiformschmieden ein gebräuchlicher Arbeitsgang in der bronzezeitlichen Beilproduktion war. Die Gefügeausbildung in den ausgeschmiedeten Bereichen des Bronzebeils entspricht in etwa den Beobachtungen am Beilfragment HV 107. Dieses ist jedoch komplett überarbeitet und weist ein feineres Gefüge mit stärkerer Zwillingsbildung auf.

2.6.6 Ergebnisse der Härteprüfungen

a) Originalfragment HV107

In der Schaftmitte, wo teilweise noch originales Gussgefüge vorlag, blieb die Vickershärte unter 100 $\underline{HV}_{0.1}$. Im Bereich der stark überarbeiteten Randleisten stiegen die Werte auf 120-130 $\underline{HV}_{0.1}$. Extremwerte von über 150 waren Ausnahmen, *Tab. 2.6 u. 2.7*. Diese Beobachtung lässt sich auf den gesamten Querschnitt übertragen, *Abb. 2.32*. Stärker nimmt die Härte erwartungsgemäß nur am Rand zu, wo einzelne Extremwerte zu beobachten sind. Im feinen Gefüge der Schneidenspitze stiegen die Werte auf 240-280 $\underline{HV}_{0.1}$, *Tab. 2.8*. Die Messung über den Gesamtquerschnitt verdeutlicht nochmals die extreme Härte dieses Beilbereichs, *Abb. 2.33*.

b) Bronzebeil, Nachguss

Die Härte im originalen Gussgefüge lag bei ca. 70 $\underline{HV}_{0.1}$, im stark überschmiedeten Bereich stieg sie mit Werten von 130-150 $\underline{HV}_{0.1}$ auf etwa das Doppelte, *Tab. 2.9.* Die Prüfungen über den ganzen Querschnitt bestätigen dieses Ergebnis. Allerdings war es hier durch die automatische Vorgehensweise möglich, näher an der Oberfläche zu prüfen, wo extreme Härten auftreten können, *Abb. 2.34.* Dies gilt nicht nur für den überschmiedeten Bereich selbst, sondern auch für die gegenüberliegenden Oberflächen, die beim Verformungsvorgang auf der Schmiedeunterlage auflagen. Deutlich zu erkennen ist der starke Härteabfall in der Schaftmitte (hellgraues Viereck in der Projektion).

c) Kupferbeil, Nachguss

Während die Härte im originalen Gussgefüge zwischen 40 und 50 HV0.1 lag, stieg sie im stark überschmiedeten Bereich mit 110-130 HV0.1 auf etwa den dreifachen Wert an, *Tab. 2.10*.

d) Oberflächenhärte am Beil 1924,1

An stärker gewölbten oder tief liegenden Oberflächen war die Bedingung eines senkrechten Aufsetzens des Prüfkörpers nicht erfüllt. Dort und an der stark abfallenden

Prüfstelle	D_1	D ₂	D _m	<u>HV_0.1</u>
1	41	41	41	110
2	52	54	53	66
3	44	43	43,5	98
4	36	38	37	135
5	37	37	37	135
6	40	40	40	116
7	36	37	36,5	139
8	37	38	37,5	132
9	38	38	38	128
10	39	39	39	122
11	38	40	39	122
12	35	32	33,5	165
13	30	32	31	193
14	44	44	44	95,8

Tab. 2.6: Ergebnis der Einzelprüfungen zur Bestimmung der Vickershärte an der Probe 2 des Beilfragments HV 107

Tab. 2.7: Ergebnis der Einzelprüfungen zur Bestimmung der Vickershärte an der Probe 4 des Beilfragments HV 107

Prüfstelle	D1	D ₂	Dm	<u>HV_0.1</u>
1	40	42	41	110
2	38	38	38	128
3	41	39	40	116
4	50	47	48,5	78,8
5	43	43	43	100
6	31	34	32,5	176
7	37	36	36,5	139

Tab. 2.8: Ergebnis der Einzelprüfungen zur Bestimmung der Vickershärte an der Schneide des Beilfragments HV 107.

Prüfstelle	D ₁	D ₂	Dm	<u>HV</u> _{0.1}
1	26	25	25,5	285
2	27	27	27	254
3	26	26	26	274
4	26	26	26	274
5	29	27	28	237
6	31	30	30,5	199
7	30	30	30	206
8	33	32	31,5	187
9	35	36	35,5	147
10	29	29	29	221
11	26	25	25,5	285

Tab. 2.9: Ergebnis der Einzelprüfungen zur Bestimmung der Vickershärte am überschmiedeten Bronzenachguss.

Prüfstelle	D1	D2	D _m	<u>HV_0.1</u>
1	52	47	49,5	75,7
2	50	48	49	77,2
3	46	45	45,5	89,6
4	50	52	51	71,3
5	53	52	52,5	67,3
6	35	35	35	151
7	36	36	36	143
8	37	36	36,5	139
9	37	37	37	135
10	38	35	36,5	139
11	41	43	42	105
12	39	39	39	122
13	53	52	52,5	67,3
14	50	50	50	74,2

Tab. 2.10: Ergebnis der Einzelprüfungen zur Bestimmung der Vickershärte am überschmiedeten Kupfernachguss.

Prüfstelle	D ₁	D2	Dm	<u>HV_0.1</u>
1	37,5	38,5	38	128
2	39	39,5	39,25	120,5
3	36,5	37	36,75	137,5
4	40,4	36,25	38,3	126
5	37,5	39	38,25	120,5
6	40	38	39	122
7	39	36	37,5	132
8	41	39,5	40,25	115
9	41,5	39	39,75	118
10	40	40	40	116
11	37	40	38,5	125
12	41	41	41	110
13	38,5	37	37,75	130
14	41	38,5	39,75	117
15	41	39	40	116
16	39	42	40,5	113
17	38	40	39	122
18	68	66	67	41,3
19	56	56	56	59,1
20	66	66	66	42,6
21	59	61	60	51,5
22	64	64	64	45,3



Abb. 2.32: Graphische Darstellung der Härteverteilung über den gesamten Querschnitt der Probe 2 des Originalfragments HV107. Sie weist insgesamt recht gleichmäßige geringe Härtewerte auf, die nur zur Oberfläche hin leicht ansteigen.

Abb. 2.33: Härtemessung über den Gesamtquerschnitt der Schneidenspitze (Schnitt durch Probe 5') von Fragment HV107. Es werden sehr hohe Härtewerte erreicht, die nur in der Mitte auf ca. 150 HV sinken

Abb. 2.34: Graphische Darstellung der Härteverteilung über den gesamten Querschnitt des überschmiedeten Bronzenachgusses.

Schneidenfacette ermittelte das Gerät keine Messwerte ("error"). Die erhaltene Messreihe zeigt einen Bereich mit extrem hohen Werten auf, der mit der vorhandenen Patina korrelierte.

e) Schlussfolgerungen

Zunächst ist zu beobachten, dass eine Überarbeitung durch Freiformschmieden bei Kupfer und Bronze Härtesteigerungen von 200% bis 300% bewirken kann. Extremwerte werden unmittelbar an der Oberfläche erreicht. Dass die Härte nicht nur vom Material selbst, sondern auch von dessen Gefügeausbildung abhängig ist, zeigt vor allem das Beispiel des Kupferbeils. Naheliegend ist, dass der letzte Bearbeitungsschritt vor dem Endschliff immer das Hämmern sein muss, da die bewirkte Härtesteigerung beim Erhitzen wieder vernichtet würde. Für Gegenstände, die eher elastische Eigenschaften haben sollen, kann dies hingegen erwünscht sein, da die Bruchdehnung mit abnehmender Härte zunimmt.

Bei der in den Versuchen angewendeten Mikrohärteprüfung ist zu beachten, dass es sich nicht um absolute Vergleichswerte, sondern um eine allgemeine Einschätzung handelt. Grundsätzlich können die ermittelten Daten jedoch im Bereich der für heutige Bronzelegierungen angegebenen Härten angesiedelt werden. Vergleicht man die Härten der Beilschneiden mit denen von heute üblichen Werkzeugen, können sie zum Beispiel mit der eines Küchenmessers aus Karbonstahl (nicht rostfrei) verglichen werden. Letzteres hat laut Herstellerangabe eine Rockwellhärte von ca. 60 [Roselli, 1999], was einer Vickershärte von ca. 200 [Damerow/Herr, 1955] entspricht. Dies kann allerdings nur als grober Anhaltspunkt dienen, da das unterschiedliche Eindringverhalten der einzelnen Werkstoffe keinen direkten Vergleich der umgerechneten, nach unterschiedlichen Verfahren gemessenen Werte erlaubt [DKI, 1999].

Die Prüfung der Oberflächenhärte konnte lediglich auf einer vergleichsweise ebenen Fläche der Beilschneide durchgeführt werden. Für Objekte mit korrodierten und nicht planen Oberflächen stellt diese Prüfung keine geeignete Methode zur Abschätzung des Überarbeitungsgrades dar.

2.7 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Randleistenbeile sind im Materialbestand der frühen und mittleren Bronzezeit zahlreich und in großer Formenvielfalt vertreten. Gussformen sind dagegen selten und nur aus der jüngeren Phase des Produktionszeitraums bekannt. Es stellt sich somit die Frage, ob die wenigen Steinkokillen tatsächlich das gängige Herstellungsverfahren anzeigen oder ob nicht überwiegend im Wachsausschmelzverfahren mit einteiligen Lehmformen gearbeitet wurde. Darüber hinaus lassen in ihren Umrissen beilförmige Rohlinge ohne Randleisten mit den dazugehörigen Steingussformen vermuten, dass die Randleisten nicht generell bereits im Guss angelegt waren, sondern nachträglich ausgeschmiedet wurden.

62

Zur Rekonstruktion der Herstellung von Randleistenbeilen wurden 17 Exemplare näher auf herstellungsrelevante Merkmale untersucht. Dabei ließen sich gelegentlich an der Oberfläche Spuren einer mechanischen Bearbeitung feststellen. Äußerliche Hinweise auf das Gussverfahren sind dagegen nur selten vorhanden, doch erwiesen sich Röntgenaufnahmen als sehr aufschlussreich. Vor allem bei den qualitativ schlechten Beilen der Typen Langquaid I und II lassen Form und Verteilung von Porositäten auf eine Anschnittposition am Beilnacken schließen. Bei den übrigen Beilen geben weder die Autopsie noch die Röntgenbilder entsprechende Hinweise.

Rechnerisch und experimentell nachvollzogen wurde die Fertigung von vier Grundgeometrien der Randleistenbeile, die durch die Referenzstücke 1-4 repräsentiert sind. Sie erwiesen sich dabei jeweils als gießtechnisch reproduzierbar. Die Gießversuche in Lehmformen und die Simulation der Formfüllung in den Formstoffen Bronze, Lehm und Sandstein machen die Röntgenaufnahmen der Originale dahingehend interpretierbar, dass mineralische Formstoffe für die Randleistenbeilproduktion wahrscheinlicher sind als Bronze. Dies entspricht auch dem archäologischen Befund.

Für die Anschnittposition wurde entsprechend der überlieferten Steinformen und Rohgüsse sowie aufgrund der Röntgenaufnahmen der Beilnacken gewählt. Geometriebedingt wäre nach der Simulation zumindest für Beile vom Typ Neyruz (Referenzstück 1) ein seitlicher Anschnitt auf den Randleisten über der dicken Beilmitte günstiger. Entsprechende Anhaltspunkte finden sich aber bislang im archäologischen Material lediglich an einem hier nicht weiter untersuchten sächsischen Randleistenbeil, das auf einer Seite eine kreisförmige poröse Vertiefung zeigt, die wahrscheinlich von einem Anschnitt stammt. Formen, die den Gießtrichter auf der Seite tragen, müssen jedoch an ihrer höchsten Stelle entlüftet werden um Fehlstellen aufgrund eingeschlossener Luft zu vermeiden. Möglicherweise war die Technik, Entlüftungspfeifen zu setzen in der frühen und mittleren Bronzezeit noch nicht hinlänglich bekannt und man verzichtete deshalb nach wenigen Fehlgüssen auf seitliche Anschnitte.

Röntgenbilder belegen für die Originalbeile ein im Vergleich zu den Nachgüssen deutlich dichteres Gefüge. Kombiniert mit den Hammerspuren und Stauchungen an einigen originalen Oberflächen lag die Vermutung nahe, dass beim überwiegenden Teil der hier untersuchten Beile die endgültige Formgebung durch Ausschmieden erfolgt sein muss. Schmiedeversuche an Nachgüssen des Referenzstückes 1 mit nur schwach ausgeprägten Randleisten lieferten mit einfachen Werkzeugen und in relativ kurzer Zeit gute Ergebnisse. Dabei ließen sich nicht nur die Randleisten problemlos ausschmieden, eine Bearbeitung des Beilkörpers führte auch zu einer deutlichen Verdichtung des Gefüges. Dies konnte sowohl an metallographischen Schliffen als auch an Röntgenaufnahmen der bearbeiteten Nachgüsse nachvollzogen werden, die weitgehende Übereinstimmungen mit entsprechenden Untersuchungen an Originalen zeigten.

Es ist anzunehmen, dass das dicht erscheinende Gefüge der gewählten Referenzstücke aus einer intensiven mechanischen Nachbearbeitung resultiert und das Ausschmieden von Nacken, Randleisten und Schneide als gängige Arbeitsmethode angesehen werden muss. Dies könnte eine Erklärung für die Seltenheit von Kokillen mit Konturen geben. Da das untersuchte Beilfragment mit schwach ausgeprägten Randleisten im Schliffbild allerdings keinerlei Spuren von mechanischer Überarbeitung zeigt und auch Kokillen mit Randleisten bekannt sind, war das Maß, in dem Form und Umriss der Beile bereits im Guss angelegt wurden, vermutlich individuell verschieden.

Eine Erklärung für die im Fundbestand vergleichsweise geringe Anzahl an Gussformen im Gegensatz zur großen Anzahl gegossener Beile könnte sein, dass neben dem Guss in Steinformen auch das Wachsausschmelzverfahren mit einteiligen Lehmformen angewendet wurde. Überreste entsprechender Formfragmente sind nach Jahrhunderte langer Lagerung im Boden allerdings kaum oder nicht mehr identifizierbar.

Für die Weiterverarbeitung war die Form des Rohlings von sekundärer Bedeutung. Zwar reduzieren sich Arbeit und Zeitaufwand, je näher die Ursprungsgeometrie der endgültigen Form steht, doch dürften sich trotz der ungünstigen Geometrie auch aus "Barren" mit spitzovalem Querschnitt Randleistenbeile schmieden lassen. Das damals übliche Freiformschmieden war aber nicht nur eine Methode, gegossene Rohlinge umzuformen, sondern auch ihren Gebrauchswert durch Härten zu steigern. Sofern diese Werkstoffeigenschaft erwünscht war, konnten Härtesteigerungen von 200 % bis 300 % erreicht werden. Zur Bearbeitung der Beilklingen wurden wahrscheinlich Hämmer mit Gewichten um 300g benutzt, die aus Stein oder Metall im Fundmaterial gelegentlich vertreten sind.

64

3 Lappenbeilherstellung in Bronzekokillen

3.1 Forschungsstand

Der regelhafte Einsatz von Kokillen zeugt von Bestrebungen, möglichst schnell weitgehend standardisierte Produkte zu erzeugen. Gegenüber den Steingussformen bieten solche aus Metall nicht nur eine längere Haltbarkeit sondern aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit auch die Möglichkeit, das Gießverfahren zu beschleunigen. Die Entwicklung und Verwendung von Bronzekokillen setzt jedoch ein großes Maß an spezifischem technischen Wissen und handwerklichem Geschick voraus. Sie kann daher als Indiz einer weit fortgeschrittenen Arbeitsteilung innerhalb der Gesellschaft gewertet werden.

Bislang ist man bei Angaben zur Verbreitung des Kokillengusses in der Bronzezeit auf die Verbreitung der Gussformen selbst angewiesen. Die Erhaltung solcher Funde ist aber von zahlreichen Faktoren abhängig. Zum Beispiel ist damit zu rechnen, dass unbrauchbare Metallformen wieder eingeschmolzen wurden. Die Funde konzentrieren sich dort, wo umfangreiche Metalldepots das Bild beherrschen. Steinformen erscheinen dagegen im heutigen Verbreitungsbild vor allem in Regionen mit einem hohen Anteil an Siedlungsfunden im archäologischen Fundbestand, wie etwa in der Schweiz. Ebenso zum Siedlungsmaterial gehören Lehmformen. Ihre Überlieferung unterliegt jedoch einer doppelten Selektion. Zunächst ist der nur schwach gebrannte Lehm stark witterungsanfällig. Ferner sind die unscheinbaren Reste für Sammler weniger attraktiv als Gegenstände aus Stein oder Metall [Steffgen 1997-2000].

Eine systematische Erfassung und archäologische Bearbeitung der bronzezeitlichen Metallgussformen West- und Mitteleuropas steht bislang aus. Erste Zusammenstellungen finden sich bei Evans [1881] und Déchelette [1910, App. II]. Detailliertere Beschreibungen bieten Hodges [1960] für die englischen und Mohen [1978] für die französischen Gussformen. Die wenigen west- und süddeutschen Kokillen wurden im Rahmen der monographischen Bearbeitung der Beile dieser Regionen mitberücksichtigt [Kibbert, 1980 u. 1984; Pászthory, Maier 1998]. Einen guten Überblick über die räumliche Verteilung von Metallkokillen gibt die Verbreitungskarte bei Hansen [1991, Abb.49], *Abb. 3.1.*

Die Verbreitung von Gussformen und anderen Werkzeugen gibt zwar wichtige Hinweise auf die eingesetzten Gießtechniken. Der quantitative Stellenwert der einzelnen Gussformmaterialien im bronzezeitlichen Europa lässt sich dennoch nicht vollständig erschließen. Die Identifikation des Formmaterials durch Untersuchungen am Gussstück selbst wäre ein wesentlicher Fortschritt für die Beantwortung der Frage nach dem Umfang, in dem bestimmte Formstoffe eingesetzt wurden. Auch im Bezug auf die Technik des Gießens in Kokille selbst ist das Quellenmaterial noch nicht ausgeschöpft. Die Untersuchungen blieben bisher auf einzelne Gießversuche in Originalen oder Kopien beschränkt.


Die ersten dokumentierten Gießversuche in Bronzeformen für Beile führte E. Voce mit der Gussform aus Mâcon für oberständige Lappenbeile im Pitt Rivers Museum Oxford durch [Voce 1951]. Er goss erfolgreich mit einer 7%-igen Zinnbronze in die Originalkokille, die vorher mit einer Graphitpaste geschlichtet und bei 150°C getrocknet wurde. Etwa zur gleichen Zeit unternahm H. Drescher Gießversuche in Nachgüssen von zwei Kokillen für Absatzbeile und einer Kokille für Tüllenbeile [Drescher 1957, 52-75]. Er setzte als Gusslegierung CuSn10 ein und bestrich die Formen vor dem Abguss mit Ruß. Er hält es aber auch für möglich, ohne Präparierung der Form erfolgreich zu gießen.

Trotz der mittlerweile gewachsenen Zahl an gelungenen Gießversuchen und den dokumentierten Gebrauchsspuren an originalen Kokillen, ist die Verwendung von Bronzekokillen für den Guss von Bronzeobjekten in der archäologischen Literatur umstritten. Oft werden sie als Formen für Wachs-, Blei- und Zinnmodelle angesprochen [z.B. Harrison 1980, Goldmann 1985]. In den hier durchgeführten Untersuchungen werden beide Möglichkeiten berücksichtigt, mit dem Ziel einer Identifikation des Formmaterials über das Gussobjekt selbst. Als Vorlage dient die Originalkokille für oberständige Lappenbeile des Typs Homburg vom Bullenheimer Berg, einer befestigten Höhensiedlung in Mainfranken, *Tab. 3.1* und *Abb. 3.2* (s.a. Abb. 1.7b). In die Untersuchungen einbezogen wird ein in der Nähe deponierter Hortfund von 60 oberständigen Lappenbeilen aus dem Bestand der Prähistorischen Staatssammlung München und des Mainfränkischen Museums Würzburg [Diemer 1995, 65 f].

3.2 Simulation des Abgusses in Bronze-, Lehm- und Steinformen

Mit dem Ziel, ein gelungenes oberständiges Lappenbeil (s. Abb. 3.2) zu erhalten, werden zur Abschätzung der geeigneten Gießparameter verschiedene Rechnungen für die Formstoffe Bronze, Lehm und Sandstein durchgeführt. Ferner sollen das Erstarrungsverhalten und die Ausbildung typischer Lunkerzonen Aufschluss über formstoffspezifische Merkmale an den Gussobjekten selbst geben.

Variiert werden jeweils die Parameter Formtemperatur, Gießzeit und Gießtemperatur, *Tab.* 3.2. Die Gusslegierung bleibt mit CuSn10 konstant. Während bei der gut wärmeleitenden Bronzekokille eine vollständige Formfüllung nur mit Parametern zu erwarten ist, die an der Obergrenze der bronzezeitlichen Möglichkeiten liegen (Rechnung 3), könnten bei den isolierenden mineralischen Formstoffen auch ungünstigere Bedingungen zu einem gelungenen Abguss führen. Die Grenzen sollen mit einer verlängerten Gießzeit und erniedrigten Form- und Gießtemperaturen ermittelt werden (Rechnung 6).

3.3 Experimentelle Abgüsse in Bronze- und Lehmformen

Um Beschädigungen am Original zu vermeiden, wird in den Experimenten eine originalgetreue Kopie aus CuSn10 eingesetzt.

	SCHALE A	SCHALE B			
LÄNGE	175 mm	178 mm			
BREITE	40 mm - 53,3 mm	40,5 mm - 54 mm			
WANDSTÄRKE	4,5 mm - 15,5 mm	4,5 mm - 16,5 mm			
GEWICHT	849 g.	774 g			
AUTOPSIE	 Leicht bestoßene Kanten. 	 Leicht bestoßene Kanten. 			
		 Ausbruch an der Unterkante 			
	 Partiell dunkler Belag auf den Innen- 	Partiell dunkler Belag auf den Innensei-			
	seiten, wahrsch. Reste einer Schlichte.	ten, wahrsch. Reste einer Schlichte.			
	• Außenseite, unten: Rechteckige Erhöh-	• Außenseite, unten: Rechteckige, poröse			
	ung. Vermutlich Rest des Gusskanals. Vertiefung. Vermutlich vom Abtr				
		des Gusskanals.			
	 Abdrücke der organischen Magerung 	 Abdrücke der organischen Magerung 			
	des Formmantels aus Lehm.	des Formmantels aus Lehm.			
	 Spuren eines spatelartigen Geräts, 	 Spuren eines spatelartigen Geräts, 			
	anscheinend vom Glätten des	anscheinend vom Glätten des			
	Wachsmodells.	Wachsmodells.			
ANALYSE	92% Cu; 5,1% Sn; 1,27%	o Pb; 0,45% As; 0,82% Sb			
	[Max-Planck-Institut für	Kernphysik, Heidelberg]			

 Tabelle 3.1: Beschreibung der Bronzegussform für oberständige Lappenbeile des Typs

 Homburg vom Bullenheimer Berg, Mainfranken.



Abb. 3.2: Originale Bronzekokille mit der für die Simulation vernetzten Geometrie des darin gegossenen oberständigen Lappenbeils.

Rechnung, Nr.	Formstoff	Vorwärmtemperatur der Form [°C]	Gießtemperatur [°C]	Gießzeit [s]
1	Bronze (CuSn10)	300	1080	3
2	Bronze (CuSn10)	350	1080	3
3	Bronze (CuSn10)	450	1080	3
4	Lehm	300	1080	3
5	Sandstein	300	1080	3
6	Sandstein	25	1050	5

 Tabelle 3.2: Parametervariationen f
 ür die Gusssimulation der oberst
 ändigen Lappenbeile in der Form vom Bullenheimer Berg.

 Tabelle 3.3: Materialzusammensetzung der vier geröntgten Lappenbeile vom Bullenheimer

 Berg. [Analysewerte ermittelt vom Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg]

InvNr.	Cu	Sn	Pb	As	Sb	Ag	Ni	Bi	Au	Co	Fe
1993,5035a	89	7.2	1.97	0.35	0.96	0.32	0.299	0.032	< 0.01	0.083	0.06
1995,1096t	87	9.6	1.71	0.36	0.61	0.228	0.216	0.030	< 0.01	0.067	< 0.05
1993,5035b	91	4.2	1.87	0.41	1.35	0.38	0.33	0.044	< 0.01	0.089	0.05
1995,1096u	93	3.3	0.85	0.44	1.24	0.39	0.34	0.014	< 0.01	0.091	0.07

Tabelle 3.4: Abmessungen der nachgegossenen Lappenbeilrohlinge aus der Kokillenkopie.

Gesamt-	Schi	neide	Unterer Schaftlappenansatz		Breiteste	Höhe d. Scha	ftlappenpaare	Gewicht
länge	Breite	Dicke	Breite	Dicke	Stelle	Ösenseite	Andere Seite	[g]
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
145	35	6	24	18	27	46	42	460

Tabelle 3.5: Abmessungen der acht gussgleichen Lappenbeile vom Bullenheimer Berg.

Gesamtlänge	Schneidenbreite	Breite, unterer Schaftlappenansatz	Breite, Höhe Ösenmitte	Gewicht
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]
144-152	33-34,5	18-18,5	35,2-36	242-295

3.3.1 Nachguss in die Kopie der Bronzekokille

Um eine isolierende Trennschicht aufzubringen, werden die Innenseiten der Kokille zunächst über der Flamme eines mit Terpentin getränkten Lappens berußt. Zwei Drahtverschnürungen, oben und unten, verbinden die Formhälften, und eine Verschmierung mit Lehm dichtet die Fügenaht ab. Nach einer 5-stündigen Trocknung bei 350°C erfolgt das Bereitstellen der Form für den Guss. Zur Gewährleistung der Entlüftung wird sie schräg in einen Kasten gestellt und zur Sicherung gegen eventuell auslaufende Schmelze bis zur Hälfte mit Sand hinterfüllt. Mit einer Formtemperatur von ca. 300°C unmittelbar vor dem Abguss, einer Abgusstemperatur der 10%-igen Zinnbronze von 1080°C und einer Gießzeit von ca. 3 s entsprechen die Parameter den Annahmen aus der Simulationsrechnung 1.

Bei dem ersten Abguss saßen die Schaftlappen sehr fest in der Form, so dass das Auslösen schwierig war. Diesem Problem kann damit erfolgreich begegnet werden, dass im Schaftlappenbereich eine Schlichte aufgebracht wird. Ein schwarzer Belag auf der Innenseite der Originalform ist entsprechend zu interpretieren. Die hier eingesetzte Mischung ist auch für die Bronzezeit denkbar und besteht aus 80% Knochenasche und 20% Töpferton. Sie wird vor dem Berußen der Form dünn aufgestrichen und im Ofen bei ca. 100°C getrocknet. Nach insgesamt neun Abgüssen zeigt die Bronzekokille noch keine Anzeichen von Verschleiß.

3.3.2 Nachguss in Lehmformen

Die für das Wachsausschmelzverfahren benötigten Wachspositive des Lappenbeils werden in der Kopie der Form vom Bullenheimer Berg hergestellt. Nach dem Aushärten werden sie versäubert und mit einem dreischichtigen, ca. 2 cm dicken Lehmformmantel umgeben. Seiner Trocknung folgt das Wachsausschmelzen und das Brennen der hohlen Form. Die genaue Verfahrensbeschreibung ist in Kapitel 2.4 zum Abguss der Randleistenbeile nachzulesen.

Die fertig gebrannten Lehmformen werden wiederum heiß in einen Kasten gesetzt und mit Sand hinterfüllt, um einem Bersten beim Eingießen der heißen Schmelze entgegenzuwirken. Ein Schrägstellen gewährleistet die Formentlüftung. Die Gießparameter entsprechen dem Abguss in die Bronzekokille sowie der Simulationsrechnung Nr. 3. Es werden zwei Beile gegossen.

3.3.3 Untersuchungen an den Nachgüssen

Die erhaltenen Nachgüsse werden nun hinsichtlich ihrer formstoffspezifischen Merkmale untersucht. Hierbei sollen Kriterien gefunden werden, die auch an den Originalen eindeutig identifizierbar sind. Die Exemplare werden zunächst eingehend optisch untersucht und geröntgt.

Zur Beurteilung der Gefügeausbildung in Abhängigkeit vom Formstoff wird jeweils ein in der Kokille und ein in einer Lehmform gegossenes Beil im Bereich der Lappen senkrecht zur Mittelachse durchtrennt und die Schnittfläche metallographisch untersucht.

Das Durchtrennen von Originalen zur Probenahme für metallographische Schliffe ist aus konservatorischen Gründen nur selten möglich. Es wird daher geprüft, ob Untersuchungen an geätzten Oberflächen eine Alternative zur Probenahme für Schliffbilder darstellen können. Die Präparation erfolgt an einer ca. 30 mm hohen, über die gesamte Schneidenbreite reichende Fläche direkt unterhalb des Schaftlappenansatzes. Die Stelle wird gewählt, weil sie gut zugänglich ist und an den Originalen nur gering überarbeitet wurde. Zur Herausstellung des Gefüges wird die Oberfläche angeschliffen, poliert und mit einer alkoholischen Fe-III-Chlorid-Lösung geätzt.

3.4 Bestimmung des Formmaterials an Originalbeilen

Ausgangsbasis für die Versuche, an Originalbeilen das Material der für ihre Herstellung verwendeten Gussform zu bestimmen, sind die Untersuchungen an den in Lehm- und Bronzeformen gefertigten Nachgüssen und die Ergebnisse der entsprechenden Simulationsrechnungen. Als archäologisches Material dienen die Lappenbeile aus dem späturnenfelderzeitlichen Depot vom Bullenheimer Berg in Unterfranken. Die meisten dieser 60 Beile gehören wie die Nachgüsse formal zu dem in der Endbronzezeit geläufigen Typ Homburg.

Neben der Identifikation des verwendeten Formmaterials ist die Bestimmung eventuell gussgleicher, das heißt aus einer Form stammender Exemplare von Interesse. Ferner wird anhand eines Vergleichs mit den nachgegossenen Rohlingen untersucht, ob ein oder mehrere Beile aus der im selben Depot gefundenen, hier untersuchten Kokille stammen.

Da es sich bei den zu untersuchenden Gussstücken um Originale und damit um zu erhaltendes Kulturgut handelt, müssen die Untersuchungsmethoden möglichst zerstörungsfrei sein. Neben der gründlichen Autopsie steht vor allem die Röntgenographie zur Verfügung. Für die Röntgenaufnahmen werden zwei Exemplare mit hohem Zinnanteil (Inv.-Nr. 1993,5035a und 1995,1096t) und zwei mit deutlich geringerem Zinngehalt (Inv.-Nr. 1993,5035b und 1995,1096) ausgewählt, *Tab. 3.3.*

Ein wichtiges Unterscheidungskriterium zwischen Gussstücken, die in mineralischen Formen gegossen wurden und solchen, die aus einer Metallkokille stammen, ist aufgrund der unterschiedlichen Abkühlzeiten die Korngröße des Erstarrungsgefüges. Die Anfertigung von metallographischen Schliffen an gesamten Querschnitten ist wegen der unvermeidlichen Zerstörung selten möglich. Schonender sind Untersuchungen an geätzten Oberflächen.

Zum Vergleich mit den Nachgüssen werden an zwei Originalen Oberflächenätzungen durchgeführt. Es handelt sich um ein vollständiges Lappenbeil (Inv.-Nr. 1995,1098c) und ein Schneidenfragment (Inv.-Nr. 1995, 1098n). Um die Originale möglichst wenig zu beschädigen, werden jeweils nur Ausschnitte von ca. 5 mm X 5 mm von der Patina befreit, poliert und geätzt. Als Ätzmittel dient eine alkoholische Fe-III-Chlorid-Lösung. Die untersuchten Felder liegen bei dem vollständig erhaltenen Beil am Nacken und an der

dicksten Stelle, unterhalb der Schaftlappen. Bei dem Schneidenfragment wird ein Feld knapp unterhalb der Bruchkante freigelegt, das etwa am Ende der Schaftlappen liegen dürfte.

3.5 Ergebnisse

3.5.1 Simulationsergebnisse

Die Rechenergebnisse zeigen die Schwierigkeit einer vollständigen Formfüllung bei Bronzekokillen auf und verdeutlichen das unterschiedliche Erstarrungs- und Lunkerverhalten beim Abguss in metallische und mineralische Formen.

a) Bronzekokille

Die Gießbedingungen der ersten Simulationsrechnung (s. Tab. 3.2) erlauben keine vollständige Formfüllung. Bereits während des Füllvorgangs kühlt das Gussstück auf Temperaturen im Erstarrungsintervall (1020°C - 830°C) ab. Für die dünnen Schaftlappen und die Befestigungsöse werden am Rand sogar vollständig erstarrte Bereiche und entsprechende Fehlstellen berechnet, *Abb. 3.3a*. Da kürzere Gießzeiten in der Praxis kaum möglich sind und die bronzezeitlichen Keramiktiegel eine deutliche Erhöhung der Gießtemperatur nicht gestatten, kann der Gusserfolg nur über eine Erhöhung der Formtemperatur auf mindestens 450°C (Rechnung 3)erzielt werden. Jedoch ist auch hier schon das gesamte Gussstück in das Erstarrungsintervall abgekühlt, und es muss mit Fehlstellen gerechnet werden, *Abb. 3.3b*.

Auf Lage und Ausdehnung der zu erwartenden Lunkerzonen zeigt die Variation der Formtemperatur keinen erkennbaren Einfluss. Insgesamt leitet die Metallform die Wärme so schnell ab, dass die eingegossene Bronze schalenartig erstarrt und sich im Schaft ein langgezogener Mittellinienlunker ausbildet, *Abb. 3.4a*. Dies wird dadurch unterstützt, dass einerseits die dünnen, schnell erstarrenden Schaftlappen zuerst Schmelze aus dem dickeren Schaft abziehen und andererseits der Anschnitt so schnell zufriert, dass keine Nachspeisung vom Einguss her erfolgen kann. Zusätzlich lunkergefährdet ist als dickster und zuletzt erstarrender Geometriebereich die Schneidenmitte.

b) Lehmform

Da Lehm eine guter Wärmeisolator ist, reicht bei ansonsten gleichen Parametern eine Vorwärmtemperatur der Form von 300°C (Rechnung 4) aus, um eine vollständige Formfüllung zu erreichen, *Abb.3.3c.*

Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Lehms bewirkt eine langsame und gleichmäßig über den Querschnitt des Gussstücks verlaufende Erstarrung. Dadurch erweitert sich der für die in Bronzekokille gegossenen Beile errechnete Mittellinienlunker zu einer ausgedehnten Porositätszone zwischen den Schaftlappen. Geometriebedingt bleibt auch hier ein Hot-Spot in der dicken Schneidenmitte, wo mit Lunkerbildung gerechnet werden muss, *Abb. 3.4b.*



Abb. 3.3: Einfluss der verschiedenen Formstoffe auf die Temperaturverteilung am Ende des Formfüllvorgangs. In der Bronzeform kühlt die Schmelze selbst bei einer hohen Formtemperatur von 450°C schon während des Formfüllvorgangs auf Temperaturen im Erstarrungsintervall (grün) ab. Mit Fehlstellen muss in den dünnen Schaftlappen und der Befestigungsöse gerechnet werden, die sogar die Solidustemperatur unterschreiten (blau). Dort. Die Simulationen für Lehm- und Sandsteinformen versprechen vollständige Formfüllungen. Weitere Parameter: T_{gieß}=1080°C; t_{gieß}=3s.

F	F (1)	Porositätsausbildung				
Formstoff	Erstarrungszeiten	Mittellinienlunker	Aufgeweitete Porositätszonen			
a) BRONZE	Solid. Time [s] 5.39 5.23 5.07 4.91 4.75 4.59 4.43 4.28 4.12 3.96 3.60 3.64 3.32 3.16		Porosity [%] 20.0 18.6 17.1 15.7 14.3 12.9 11.4 10.0 8.6 7.1 5.7 4.3 2.9 1.4 0.0			
b) Lенм	Solid. Time [s] 65.8 64.0 62.1 60.3 56.5 56.6 54.8 52.9 51.1 49.3 47.4 45.6 43.7 41.9 40.0		Porosity [%] 20.0 18.6 17.1 15.7 14.3 12.9 11.4 10.0 8.6 7.1 5.7 4.3 2.9 1.4 0.0			
c) SAND- STEIN	Solid. Time I [s] 28.22 27.30 26.38 25.47 24.55 23.63 22.71 21.79 20.88 19.96 19.04 18.12 17.21 17.21 16.29 15.37 27		Porosity [%] 20.0 18.6 17.1 15.7 14.3 12.9 11.4 10.0 8.6 7.1 5.7 4.3 2.9 1.4 0.0			

Abb. 3.4: Erstarrungszeiten und daraus resultierende Lunkerzonen beim Abguss in Formen aus Bronze (a), Lehm (b) und Sandstein (c). Parameter: T_{gied} = 1080°C; T_{form} = 300°C; t_{gied} = 3 s.

c) Sandsteinform

Durch die gegenüber Lehm etwas höhere Wärmeleitfähigkeit kühlt die Schmelze in Sandsteinformen bei ansonsten identischen Gießparametern (Rechnung 4 und 5) geringfügig schneller ab, sodass die Temperatur der äußersten Geometriebereiche (Schaftlappenspitzen und Öse) am Ende des Füllvorgangs knapp unterhalb der Liquidustemperatur liegt. Oberhalb von 1000°C ist die Schmelze aber noch so wenig viskos, dass eine vollständige Formfüllung erwartet werden kann, *Abb. 3.3d.* Selbst bei den extrem ungünstigen Verhältnissen eines langsamen Abgusses einer nur schwach überhitzten Schmelze in eine kalte Form (Rechnung 6) ist der Erhalt eines gelungenen Beiles wahrscheinlich. In der Praxis würde das Gelingen jedoch eher am Zerplatzen der nicht vorgewärmten Form scheitern.

Der Erstarrungsverlauf entspricht in etwa dem in der Lehmform. Auch hier ist mit Lunkern und ausgedehnten Porositäten zwischen den Schaftlappen sowie in der Schneidenmitte zu rechnen. Die etwas schnellere Abkühlung führt bei identischen Parametern zu einer Einengung der Porositätszonen, *Abb. 3.4c*. An den realen Gussstücken wird dies aber nicht eindeutig zu unterscheiden sein, zumal es sich bei den hier zugrunde gelegten thermophysikalischen Daten um Werte für einen ganz bestimmten Lehm bzw. Sandstein handelt. Tatsächlich wird es je nach Beschaffenheit des Steins oder des Lehms zu Abweichungen kommen, die sich jedoch in einem engen Bereich bewegen, da mineralische Formstoffe generell gute Isolatoren sind.

3.5.2 Untersuchungen an den Nachgüssen

3.5.2.1 Beschreibung der Nachgüsse

a) Nachgüsse aus der Bronzekokille

Beim ersten Abguss saßen die Schaftlappen so fest, dass das Auslösen schwierig war und auf den Außenseiten Kratzspuren der Form entstanden. Das Bestreichen des Schaftlappenbereichs mit Schlichte verringerte das Problem (s. Kap. 3.3.1). Bei einem weiteren Exemplar ist Sand vom Hinterfüllen in die Form eingedrungen und hat ein vollständiges Auslaufen verhindert. Die restlichen acht Abgüsse können jedoch als soweit gelungen betrachtet werden, dass sie für weitere Untersuchungen zur Verfügung stehen.

Bei allen Nachgüssen lief Schmelze zwischen die Formhälften und bildete einen für den Kokillenguss typischen, bis zu einem Millimeter starken Grat. Außerdem weisen die Beile zwischen den Schaftlappen poröse Einfallstellen auf, die eine starke Lunkerbildung in diesem Bereich belegt, *Abb. 3.5a*. Bei drei Exemplaren waren einzelne Schaftlappen nicht vollständig ausgelaufen, *Abb. 3.5b*. Die Maße der Rohgüsse sind in *Tabelle 3.4* aufgeführt.

Fertiggestellt können die Beile in der Länge um einige Millimeter variieren, je nach dem wie weit das am Anschnitt poröse Material beim Abtrennen des Gusszapfens ausbricht. Durch das Schärfen der Schneide wird sich beim Fertigprodukt die untere Beilhälfte stärker



Abb. 3.5: Lappenbeilnachgüsse aus der Kopie der Kokille vom Bullenheimer Berg. Zu erkennen sind der Grat, wo Schmelze zwischen die Formhälften geflossen ist, und die Einfallstelle zwischen den Lappen (a, Pfeil). Bei einigen Exemplaren sind die Schaftlappen nicht vollständig ausgelaufen (b).



a)

Abb. 3.6: Schnitte durch den mittleren Schaftlappenbereich. Bereits die Makroaufnahmen lassen die Unterschiede in der Erstarrungsmorphologie zwischen einem in einer Bronze- (a) und einem in einer Lehmform (b) gegossenen Lappenbeil erkennen:

- a) Von der eng umgrenzten Lunkerzone zwischen den Schaftlappen setzt sich ein Riss zur Oberfläche hin fort.
- b) Zwischen den Schaftlappen hat sich eine weitläufigere Porositätszone gebildet, die nach außen hin in dichteres Gefüge übergeht. Die Lappenspitzen erscheinen dichtgespeist.

verjüngen als beim Rohguss. Die stärkste Veränderung der Geometrie ergibt sich aus dem Umschmieden der Schaftlappen.

b) Nachgüsse aus den Lehmformen

Die beiden Abgüsse können insgesamt als gelungen bezeichnet werden. Sie weisen einige oberflächliche Schülpen auf, die leicht zu entfernen sind. Hinweise auf Lunkerbildung sind äußerlich nicht zu erkennen.

3.5.2.2 Röntgenaufnahmen

b) Nachgüsse aus der Bronzekokille; Taf. 24a

Die Röntgenaufnahmen lassen regelhaft einen langgestreckten Mittellinienlunker erkennen, der über die äußerlich erkennbare Einfallstelle hinausgeht. Ihm schließen sich oben und unten poröse Zonen an. Ansonsten weisen die Beile ein dichtes Gefüge auf.

c) Nachgüsse aus den Lehmformen; Taf. 24b

Das Gussgefüge stellt sich deutlich lockerer dar als bei den Beilen aus der Bronzekokille. Starke Lunkerbildung ist im Bereich zwischen den Schaftlappen zu beobachten. Ferner befinden sich Porositäten in der Schneidenmitte.

3.5.2.3 Metallographische Schliffe

Zur Unterscheidung der Gussgefüge reichte das Schleifen und Polieren der Querschnittsflächen aus. Eine Ätzung war nicht erforderlich.

a) Nachguss aus der Bronzeform

Die Makroaufnahme, *Abb. 3.6a*, erklärt bereits die bei der Autopsie beobachteten Einfallstellen und bestätigt die Röntgenbilder bezüglich der Porositätsverteilung. Die Probe zeigt einen sehr porösen Bereich zwischen den Lappen, von dem sich ein Riss bis an die Oberfläche fortsetzt. Es handelt sich wahrscheinlich um einen Warmriss, der durch das Aufschrumpfen der Lappen auf die unnachgiebige Bahn der Kokille entstanden ist.

Unter dem Mikroskop ist in den Lappen ein sehr dichtes Gefüge mit feiner interdendritischer Porosität zu beobachten. Zusätzlich lassen sich durch Gasblasen entstandene Poren identifizieren, *Abb. 3.7a.* Zur Mitte hin werden die Dendriten dicker und die Größe der Mikrolunker nimmt zu. Zwischen den Lappen, in der Schaftmitte, befindet sich eine ausgeprägte Lunkerzone. Im lockeren Gefüge sind separierte Dendritengebilde zu beobachten und es haben sich zusammenhängende Hohlräume von über 5 mm Länge gebildet, *Abb. 3.7b.*

b) Nachguss aus einer Lehmform

Die Makroaufnahme, *Abb. 3.6b*, bestätigt die in den Röntgenbildern beobachtete hohe Porosität in der Probenmitte. Sie setzt sich verringert bis in die Lappen fort. In den Lappenspitzen und am Probenrand ist das Gefüge dicht ausgebildet.



Abb. 3.7: Ungeätzter Schliff des Schnitts durch das in Kokille gegossene Lappenbeil. V = 50.a) Lappenspitze: Es hat sich ein dichtes Gefüge mit feiner interdendritischer Porosität

ausgebildet. Bei der Erstarrung wurden zudem Gasblasen eingeschlossen (runde Poren).b) Schaftmitte: Durch die schnelle Erstarrung ist in der Probenmitte ein Mittellinienlunker entstanden. Im lockeren Gefüge liegen auch separierte Dendritengebilde vor.



Abb. 3.8: Ungeätzter Schliff des Schnitts durch das in einer Lehmform gegossene Lappenbeil. V = 50. Durch die langsamere Erstarrung konnte sich ein homogeneres Gefüge mit dickeren Dendriten ausbilden als bei den in Kokille gegossenen Beilen.

- a) Lappenspitze: Gleichmäßige, fein verteilte interdendritischer Porosität.
- b) Schaftmitte: Das Gefüge ist locker ausgebildet und es sind zusammenhängende Porengebilde entstanden.

Mikroskopisch lassen die Schliffe im Lappenbereich ein dichtes Gefüge mit feiner interdendritischer Porosität erkennen, *Abb. 3.8a*, das zur Probenmitte hin lockerer wird und größere Poren aufweist. In der Schaftmitte haben sich durch Speisungseffekte zusammenhängende Hohlräume bis zu ca. 0,5 mm Länge ausgebildet, *Abb. 3.8b*. Ferner werden die Dendriten zur Mitte hin dicker. Insgesamt ist das Dendritennetz grober ausgebildet als bei dem Nachguss aus der Bronzekokille.

3.5.2.4 Gefügeuntersuchungen an geätzten Oberflächen

Durch die Oberflächenätzungen konnten die Erstarrungsgefüge der beiden Beile bereits makroskopisch sehr gut voneinander unterschieden werden. Die langsamere Abkühlung und das dadurch bedingte längere Kornwachstum führte bei dem in der Lehmform gegossenen Beil zu recht großen Kristalliten, *Abb. 3.9a*, während die schnelle Erstarrung des in der Kokille gegossenen Beils eine eindeutig feinere Kornstruktur hervorrief, *Abb. 3.9b*.

3.5.3 Untersuchungen an den Originalen

3.5.3.1 Autopsie

Die Durchsicht des Materials ergab, dass etwa ein Drittel der Beile an der Öse oder den Schaftlappen -teilweise auch beiden- Fehlstellen aufweisen, *Abb. 3.10*. Da diese Stücke, ebenso wie die vollständig ausgelaufenen Exemplare bis zur Gebrauchsfähigkeit weiterverarbeitet sind, schränkten die Gussfehler die Funktionsfähigkeit der Beile offensichtlich nicht ein [Steffgen, 1997-2000]. Aufgrund der Simulationsergebnisse und der Beobachtungen an den Nachgüssen sind die Fehlstellen als typische Kokillenfehler zu interpretieren. Es ist davon auszugehen, dass die Beile in einer Bronzekokille gegossen wurden.

Ein Vergleich der vorhandenen Originale mit den Nachgüssen aus der Bronzeform vom Bullenheimer Berg ergab keine markanten Ähnlichkeiten. Es ist auszuschließen, dass eines der deponierten Beile in der untersuchten Form gegossen wurde.

Identifiziert werden konnten acht gussgleiche Stücke aus dem Bestand der Prähistorischen Staatssammlung München (Inv.-Nr. 1993,5035a-b; 1995,1096t-u; 1995,1098a-d), die offensichtlich aus einer Form stammen. Bei allen acht Exemplaren sind die Gussnähte auf der Schmalseite mit der Öse nach links und auf der gegenüberliegenden Seite nach rechts versetzt (s. Abb. 3.10). Die Schalen der Gussform, aus der die Beile stammen, hatten offensichtlich unterschiedlich tiefe Konturen. Auch lagen bei der flacheren Formhälfte die Lappen tiefer als bei der höheren. Der asymmetrische Verlauf der Längsseiten unterhalb des Lappenansatzes findet sich bei allen acht Beilen und scheint daher ebenfalls in der Kontur angelegt gewesen zu sein. Übereinstimmungen lassen sich auch bei der Überarbeitung nach dem Guss feststellen: Die Gussnähte sind verhältnismäßig dick und unregelmäßig breit, weil das beim Abguss zwischen die Stoßkanten der Form gelaufene Material nicht vollständig entfernt, sondern nur



Abb. 3.9: Geätzte Oberflächen der Nachgüsse vom Typ "Bullenheimer Berg" im Schneidenbereich. V=20. Das schnell erstarrte Beil aus der Kokille (a) weist ein deutlich feiner ausgebildetes Erstarrungsgefüge auf als das in einer Lehmform gegossene (b).



Abb. 3.10: Zwei der acht gussgleichen oberständigen Lappenbeile (Inv.-Nr.: 1995,1096 t & u). Zu erkennen ist die asymmetrisch verlaufende Gussnaht sowie Fehlstellen an den Schaftlappen.

flachgehämmert wurde. Die beidseitig rauhe Bahnpartie zwischen den Lappen wurde nicht nachbearbeitet. Am Nacken schließen sieben der Beile mit Bruchkanten ab, die beim Abtrennen des Gusszapfens entstanden sind. Nur bei einem Exemplar (1995,1098d) wurde die Kante geglättet.

Die differierende Länge der Stücke, *Tab. 3.5*, entspricht der eher zufälligen Nackengestaltung. Die Unterschiede im Gewicht sind einerseits auf die Längenunterschiede sowie auf Beschädigungen und die Gussfehler im Lappenbereich zurückzuführen. Andererseits differieren mit den Materialanalysen auch die Dichten, *Abb. 3.11* (s. Tab. 3.3, S. 65). Auffallend sind die ähnlichen Schneidenbreiten, die wahrscheinlich darauf zurückzuführen sind, dass die Stücke zwar bis zum Schärfen der Schneide fertiggestellt, aber im Anschluss kaum oder nicht benutzt wurden. Nach intensivem Gebrauch dürften gussgleiche Beile anhand der Schneidenform und -breite kaum noch als solche zu erkennen sein. Von Gebrauch und Nachbearbeitung nicht oder wenig betroffen sind dagegen die Breiten am unteren Schaftlappenansatz und auf der Höhe der Ösenmitte. Entsprechend sind diese Maße fast identisch [Steffgen, 1997-2000].

3.5.3.2 Materialanalysen

Mittels RF-Analyse wurden 50 Objekte aus den Hortfunden vom Bullenheimer Berg untersucht [durchgeführt vom Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg]. In Bezug auf die Zinn- und Bleigehalte zeigen die analysierten Beile ein recht breites Spektrum (s. Abb. 3.10). Die Zinngehalte der Legierungen variieren zwischen 2% und 10%, wobei sich die Werte zwischen 2% und 4% sowie 6% und 8% konzentrieren. Blei ist regelhaft im Material enthalten, ein Anteil von 3% wird jedoch selten überschritten. Auffallenderweise zeigen sich deutliche Unterschiede im Material der acht gussgleichen Homburg-Beile, die aus drei verschiedenen Chargen zu stammen scheinen [Steffgen, 1997-2000].

3.5.3.3 Röntgenaufnahmen

Bei allen vier untersuchten Lappenbeilen zeigen die Röntgenbilder zwischen den Schaftlappen eine Anhäufung von kleinen Poren, die bei den Stücken 1993,5035a und 1995,1096t feiner verteilt sind als bei den Beilen 1993,5035b und 1995,1096u, *Taf. 25.* Wahrscheinlich handelt es sich dabei um Luftblasen, die auf schlecht entgaste und / oder zu kalte Schmelze zurückzuführen sind.

Während sich das Formmaterial bei den Nachgüssen mittels Röntgenaufnahmen gut bestimmen ließ, ist dies hier vor allem wegen der umgebogenen Schaftlappen nicht möglich, die den entscheidenden Bereich der Bahn überschatten. Aber auch schwer rückverfolgbare und undefinierte Faktoren wie z. B. die Schmelzequalität, Deformationen beim Umschmieden der Lappen und Alterungserscheinungen erschweren eine formstoffspezifische Zuordnung der Originale. Die Ähnlichkeit der vier Röntgenaufnahmen belegt jedoch, dass bei gussgleichen Exemplaren auch gleiche gießtechnische Merkmale vorhanden sind.



● Gußgleiche Homburg-Beile ■ Gußgleiche Beile o. Öse O Beile aus verschiedenen Formen ▲ Ringsatz aus Komplex F

Abb. 3.11: Zinn- und Bleigehalte ausgewählter Objekte vom Bullenheimer Berg, Mainfranken. Auffällig ist der unterschiedliche Zinngehalt der acht gussgleichen oberständigen Lappenbeile (schwarzer Punkt), die aus drei Chargen zu stammen scheinen.



Abb. 3.12: Geätzte Oberflächen des Originals 1995,1098c. V=20. Obwohl die Autopsie eindeutig auf den Guss in eine Bronzekokille hinweist, liegt die Korngröße des Oberflächengefüges näher am Nachguss in die Lehmform. Am Schaftlappenansatz (a) sind die Kristallite etwas feiner ausgebildet als im Nackenbereich (b).

3.5.3.4 Gefügeuntersuchungen an geätzten Oberflächen

Aufgrund des kleinen Gefügeausschnitts gaben Makroaufnahmen noch wenig Aufschluss. Am aussagekräftigsten hinsichtlich eines Vergleichs mit den Oberflächenätzungen an den Nachgüssen erwies sich die Darstellung unter dem Stereomikroskop mit 20-facher Vergrößerung. Das Gefüge weist, vor allem im Nackenbereich, eine dem Abguss in die Lehmform ähnliche Korngröße und Dendritenstruktur auf, *Abb. 3.12a* (vgl. Abb. 3.8a). Etwas feiner ist die Kornstruktur in der Mitte des Beils direkt unter den Schaftlappen, *Abb. 3.12b*. Das Gefüge des Beilfragments stellt sich zwar etwas feiner dar, gleicht aber immer noch eher dem Erscheinungsbild der in Lehm gegossenen Beile. Möglicherweise handelte es sich um eine Steinform. Diese Beobachtungen stehen im Gegensatz zu der Autopsie der gussgleichen Exemplare, die den Gebrauch von Bronzekokillen nahe legt. Diese Gussstücke standen jedoch nicht für Oberflächenätzungen zur Verfügung. Es ist durchaus möglich, dass die Beile jeweils in Formen aus unterschiedlichem Material gegossen wurden. Auch sind der Einsatz von isolierenden Schlichten sowie die mechanische und thermische Nachbearbeitung als mögliche Einflussfaktoren auf die Oberflächenstruktur nicht zu vernachlässigen.

3.5.4 Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Nachgüssen

Die Untersuchungen an den Nachgüssen bestätigen weitestgehend die Simulationsergebnisse. So treten Porositäten vor allem zwischen den Lappen und in der dicken Beilmitte auf, wobei im Bereich zwischen den Lappen bei den Beilen aus der Bronzekokille enger umgrenzte Mittellinienlunker und bei solchen aus einer Lehmform ausgedehntere Porositätszonen vorhanden sind. Auch die drei in Kokille gegossenen Exemplare mit nicht vollständig ausgelaufenen Schaftlappen bestätigen die Simulation, die der vollständigen Formfüllung beim Kokillenguss unter quasi-bronzezeitlichen Bedingungen enge Grenzen setzt. Bei einer Gießtemperatur von 1080°C und einer Gießzeit von 3 s sollte eine Vorwärmtemperatur der Form von 350°C nicht unterschritten werden.

Da kürzere Gießzeiten praktisch nicht umsetzbar sind, lassen sich weniger vorgeheizte Bronzekokillen nur mit stärker überhitzten Schmelzen erfolgreich ausgießen. So vergoss Voce [1951] siebenprozentige Zinnbronze bei ca. 1150°C in eine nur 150°C warme Form (vgl. Kap. 3.1). Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass mit dieser Temperatur die Grenzen eines bronzezeitlichen Tiegels erreicht, bzw. überschritten sind.

Die Ergebnisse der Simulationen korrespondieren auch mit Dreschers Erfahrung, dass die Schmelze möglichst schnell eingegossen werden sollte und die Qualität der Gussstücke sich bei einer Erhöhung der Vorwärmtemperatur verbessert. Versuche mit einer nicht vorgewärmten Bronzeform für Absatzbeile schlugen fehl. Weitere Abgüsse mit Vorwärmtemperaturen von 50°C bis 320°C waren dagegen erfolgreich. Allerdings berichtet auch Drescher von Schwindungslunkern im Bahnbereich oberhalb des Absatzes und nicht vollständig ausgelaufenen Randleisten [Drescher 1957, 52-75].

Sowohl die virtuellen als auch die realen Abgüsse zeigen hier eindeutig, dass Metallkokillen gießtechnisch wesentlich anspruchsvollere Werkzeuge sind als Gussformen aus mineralischen Formstoffen. Das exakte Einhalten der relevanten Gießparameter dürfte für die bronzezeitlichen Gießer eine große Herausforderung und schwer zu beherrschende Kunst dargestellt haben.

3.5.5 Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Nachguss mit den Beobachtungen an den Originalen.

Die Untersuchungen an den Originalen geben keine so klaren Auskünfte über die Entstehungsgeschichte und das eingesetzte Formmaterial wie die definierten virtuellen und experimentellen Nachgüsse. Sowohl die bronzezeitliche Nachbearbeitung und der anschließende Gebrauch als auch die jahrtausende lange Lagerung im Freien und die Ausbildung von Patina verwischen die metallographischen Merkmale.

Die Röntgenbilder der Nachgüsse geben zwar Lage und Ausdehnung der Porositäten vergleichsweise gut wieder. Einer Formstoffbestimmung mittels Röntgenaufnahmen setzen bei fertiggestellten Originalen dagegen die über die entscheidenden Bereiche gebogenen Schaftlappen enge Grenzen. Auch das bei den Nachgüssen eindeutige Ergebnis der Oberflächenätzungen ist nicht direkt übertragbar, da die bronzezeitlichen Prozessführungen nicht bekannt sind. Um umfangreichere Aufschlüsse über den Einsatz der einzelnen Formstoffe zu erhalten, müsste gezielt untersucht werden, inwieweit eine sehr gut isolierende Schlichte die Abkühlung des Gussstücks in der Form verlangsamt und ein entsprechendes Kornwachstum erlaubt. Ferner wäre die Ausweitung dieser Untersuchungsmethode auf weitere Objekte insoweit sinnvoll, als sowohl Stein- wie auch Bronzekokillen eingesetzt wurden.

Den eindeutigsten Hinweis auf den Formstoff bieten die Fehlstellen in Randbereichen der Gussstücke. Sie sind sowohl durch Simulation und Nachguss ausschließlich für Bronzekokillen als häufiger Gussfehler nachgewiesen als auch vermehrt an Originalen zu finden. Zusätzlich kommt ihnen bei der Suche nach Kriterien zur Bestimmung des Formmaterials besondere Bedeutung zu, weil sie leicht und ohne weitere Hilfsmittel bei einer Autopsie erkennbar sind.

3.6 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Die Herstellung von Beilen in Bronzekokillen beginnt in der frühen mittleren Bronzezeit. Damit ist diese Phase nicht nur durch eine zunehmende Standardisierung des Materials und vielfältige Versuche gekennzeichnet die Beilklingenform in Hinblick auf ihre Schäftung zu optimieren, sondern auch durch Veränderungen in der Produktionsweise.

In der späten Bronzezeit waren zwar mit den ober- und endständigen Lappenbeilen effektive Werkzeuge entwickelt. Aus gießtechnischer Sicht stellten sie jedoch nicht die Idealgeometrie für wiederverwendbare Formen dar, da die tiefe Kontur der Schaftlappen das Herauslösen des Rohlings aus der Form stark behindert. Im Experiment konnte durch ein Schlichten der Form der Widerstand zwar verringert aber nicht beseitigt werden. Es ist daher anzunehmen, dass die für Originalformen (auch solchen aus Stein) typischen horizontalen Brüche dicht unterhalb der Schaftlappenkontur beim Öffnen zum Bergen des Gussstücks entstanden sind. Keine eindeutigen Hilfen stellten diesbezüglich die Handhaben ("Henkel") in Schaftlappenhöhe dar.

Nicht nur der Guss selbst, sondern auch die mechanische Nachbearbeitung der Beilrohlinge stellte einen im Vergleich zu flacheren Vorgängerformen (z.B. Randleistenbeile) höheren Herstellungsaufwand dar. Die Gießer hatten also eine große Nachfrage nach einem funktional ausgereiften Gerät zu befriedigen, dessen Geometrie jedoch einer Massenfertigung enge Grenzen setzt. Stellt man einen schnellen Verschleiß durch thermische und mechanische Belastung in Rechnung, bieten Bronze- gegenüber Steinkokillen den Vorteil, dass zerbrochene Stücke in der selben Werkstatt wieder eingeschmolzen und neu gegossen werden konnten (s.a. Kap. 4). Unter diesen Voraussetzungen wird die Zunahme der Metallkokillen am Ende der Urnenfelderzeit verständlich.

Technologisch konnte herausgestellt werden, dass beim Kokillenguss zum zerstörungsfreien Auslösen eines erstarrten Beils aus der Bronzeform ein Schlichten derselben notwendig ist. Dies lässt den dunklen Belag auf den Innenseiten der originalen Gussformhälften als Rest einer bronzezeitlichen Schlichteschicht interpretieren.

Mit den Fehlstellen an Ösen und Schaftlappen, die den Simulationen, Experimenten und Untersuchungen am zufolge auf den Bronzekokillenguss beschränkt bleiben, wurde ein Kriterium herausgearbeitet, das eine Bestimmung des Formstoffes bei Lappenbeilen ermöglicht. Auch Dreschers Beschreibung seiner Nachgüsse von Absatzbeilen lässt schließen, dass nicht vollständig ausgelaufene Randleisten und große Schwindungslunker im Bahnbereich klare Hinweise auf Bronzegussformen sind. Mit diesen Beobachtungen erfasst man zwar nur einen Teil der aus Metallkokillen stammenden Beile, es scheint bislang jedoch die sicherste Methode der Formstoffbestimmung.

Die ebenfalls formstoffspezifische Ausprägung des Lunkers in der Bahn zwischen den Schaftlappen ließ sich zwar über Simulation und Experiment eindeutig bestimmen, bei den Röntgenaufnahmen der Originale werfen jedoch die gebogenen Schaftlappen Schatten über den entscheidenden Bereich. Ferner haben das Umschmieden der Schaftlappen und die Jahrtausende lange Lagerung im Freien das ursprüngliche Erscheinungsbild verändert. Ähnlichen Einschränkungen unterliegt die Formstoffidentifikation anhand der Korngröße geätzter originaler Oberflächen, die eine Zuordnung bei den hier untersuchten Stücken ebenfalls nicht eindeutig ermöglichte.

Die eingehende Durchsicht des Hortfundes vom Bullenheimer Berg ermöglichte den Ausschluss, dass eines der Beile aus der im selben Gebiet deponierten Bronzekokille stammt. Ferner konnten acht gussgleiche oberständige Lappenbeile identifiziert werden. Bestätigt wird diese Beobachtung durch Röntgenaufnahmen von vier dieser Beile. Besonders geeignet zum äußeren Vergleich vermeintlich gussgleicher Exemplare sind ihre Abmessungen an nicht bearbeiteten Stellen wie die Breite am unteren Schaftlappenansatz und auf der Höhe der Ösenmitte. Weniger geeignet sind Längenangaben und Gewichte. Sie variieren stark durch die Materialzusammensetzung sowie die Fertigstellung und den späteren Gebrauch des Objekts. Eindeutige Anhaltspunkte sind auch kleinere Fehler oder Nachlässigkeiten, vor allem bei der Herstellung der Gussform, die sich dann regelhaft an den aus dieser Form stammenden Gusstücken abzeichnen.

Der Einfluss von eingesetzten bronzezeitlichen Hilfsmitteln wie Schlichten könnte in weiterführenden Untersuchungen nähere Erkenntnisse über die eingesetzten Gussformen sowie deren quantitativen Stellenwert bringen. Ferner würden erst Reihenuntersuchungen an Originalformen und -beilen den genauen Informationsgehalt der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden klären. Diese sind mit der Priorität der Erhaltung des Kulturguts am ehesten mit zerstörungsfreien Methoden wie Autopsie und Röntgenographie möglich.

4. Herstellung von Bronzekokillen für Lappenbeile

Mit der Rekonstruktion des Gusses in Metallkokillen konnten formmaterialspezifische Charakteristika herausgestellt werden, die es erlauben, die Verbreitung und den quantitativen Stellenwert dieser Technik besser zu beschreiben, als es durch die wenigen erhaltenen Originalkokillen möglich ist. Eine umfassende Beurteilung des Verfahrens, vor allem im Vergleich mit anderen Techniken, ist jedoch nur möglich, wenn auch die Gussformherstellung als wesentliches Element des Produktionsprozesses einbezogen wird.

4.1 Forschungsstand

Gussformen aus Metall werden in der archäologischen Literatur durchgängig materiell höher bewertet als Steinkokillen. Begründet wird dies in erster Linie mit einer zeitaufwendigen und komplizierten Herstellung und dem hohen Materialbedarf. Letzterer ist unbestritten und bezieht sich nicht nur auf das Metall, sondern auch auf die Energie. Erfahrungsberichte zur Herstellung mittels bronzezeitlicher Fertigungsmethoden liegen allerdings noch nicht vor. Entsprechende Überlegungen blieben bislang theoretisch. Das bisher detaillierteste Modell legte H.W.M. Hodges [1960, 157] vor. Seine Ausgangsbasis war eine Gussform für Absatzbeile von Wiltshire, *Abb.4.1*, deren Verzierung er als mitgegossene Umwicklung einer zweiteiligen Lehmform anspricht.

Die Herstellung der Form rekonstruiert er wie folgt, Abb.4.2:

- 1. Um ein Originalbeil wird eine zweiteilige Tonform geformt und zusammengebunden.
- Darüber wird ein weiterer zweiteiliger Tonmantel mit Eingusstrichter rechts oder links oben modelliert. Die Verschnürung drückt sich in den äußeren Mantel ein.
- Anschlie
 ßend wird die zweischalige Formh
 älfte auf der Seite des Trichters entfernt und nach Ausl
 ösen des inneren Formmantels der
 äu
 ßere wieder angepasst.
- 4. a) Ausgießen der 1. Formhälfte.b) Der Abdruck der Verschnürung wird mitgegossen.
- 5. Alle Tonformen werden abgenommen, eine neue halbe Tonform um das Originalbeil geformt und versetzt mit der fertigen Bronzeformhälfte verschnürt.
- 6. Um die beiden Hälften wird ein neuer Formmantel mit einem Einguss für die zu gießende Formhälfte modelliert.
- 7. Die zweischalige Formhälfte auf der Seite des Trichters wird entfernt und nach Auslösen des inneren Formmantels der äußere wieder angepasst.
- 8. a) Ausgießen der 2. Formhälfte.b) Auf der Bronzegussform bilden sich die mitgegossenen, versetzten Verschnürungen ab.

Kibbert [1980, 215] geht davon aus, dass nach diesem Verfahren auch Kokillen für Lappenbeile hergestellt wurden, übersieht dabei jedoch, dass sich Lehmmodelle mit Henkel nicht auslösen lassen, ohne den äußeren Formmantel zu zerstören. Drescher [1994, 94]



Abb. 4.1: Gussform für Absatzbeile von Wiltshire mit mitgegossener Verzierung. [Hodges 1960, 157]. a) Innenkonturen, b) Außenseiten, c) zusammengesetzte Form.



Abb. 4.2: Rekonstruktionsmodell nach Hodges zur Herstellung der Bronzegussform.

variiert daher Hodges' Modell, indem er Lehm- gegen auszuschmelzende Wachsmodelle ersetzt. Im übrigen sieht auch er im Gegeneinandergießen der beiden Formhälften die einzige Möglichkeit, die charakteristische Passgenauigkeit auf den Stoßflächen zu erzielen.

4.2 Herstellungstechnische Hinweise an Originalgussformen

Die plastischen Leisten der Gussform aus Wiltshire bleiben eine singuläre Erscheinung. Üblicherweise sind herstellungsrelevante Merkmale weit weniger auffällig und nur bei einer detaillierten Autopsie erkennbar. Im Fall der Gussform vom Bullenheimer Berg sind auf den rauhen Außenseiten Abdrücke der Magerung des Formmantels aus Ton erhalten, *Abb. 4.3a*. Im unteren Bereich scheint die Außenseite des Modells mit einem spatelartigen Gerät geglättet worden zu sein, was auf Wachs als Formstoff schließen lässt, *Abb. 4.3b*, zumal Lehm hier wegen des Henkels als Material ausscheidet.

Bei einigen Gussformen konnte die Position des Anschnitts bestimmt werden. Auf der Außenseite einer Schale der Form vom Bullenheimer Berg befindet sich beispielsweise ein rechteckiger Zapfen von 7 x 14 mm direkt über der Mitte der Unterkante (s. Tab. 3.1 u. Abb. 3.2), der als nicht vollständig entfernte Füllung des Gusskanals zu deuten ist. Wahrscheinlich verzichtete man auf diese Nachbearbeitung, um jedes Risiko einer Beschädigung der an dieser Stelle zwangsläufig poröseren Wandung zu vermeiden. Entsprechende Überreste finden sich auch auf den beiden Gussformhälften von Wallerfangen [Kolling 1968], *Abb. 4.4,* die durch drei nebeneinanderliegende Gusskanäle gespeist wurden, und den Schalen der Tüllenbeilform von Karbow mit je zwei rechteckigen Zapfen von 9 x 6 mm [Schuldt 1959, Sprockhoff 1956].

Bei der zweiten Schale der Form vom Bullenheimer Berg markiert eine rechteckige poröse Vertiefung von 4 x 8 mm dicht über der Unterkante die Lage des Anschnitts. Hier wurde entweder die überschüssige Bronze vollständig entfernt, oder das Schmelzvolumen war so knapp bemessen, dass kein Rest im Anschnitt blieb. Ähnliche poröse Stellen befinden sich an den Unterkanten der Schalen einer Form aus Neuvy-sur-Barangeon [Cordier 1996]. Auffallenderweise liegen alle bislang nachgewiesenen Anschnitte an den Unterkanten der Formschalen und nicht, wie gießtechnisch sinnvoller, in der Mitte einer der Längskanten. Einzig bei zwei Tüllenbeilformen aus England sitzen ein bzw. zwei Zapfen an der Unterkante und zwei in der oberen Hälfte der Außenseite (Harty [Inv. Arch. GB 18,3 (1) Nr. 2], Heathery Burns [Schmidt, Burgess 1981, Pl. 95 Nr. 1478]). Anhand der vorliegenden Zeichnungen ist jedoch nicht zu entscheiden, ob es sich tatsächlich um Reste der Gusskanalfüllung handelt [Steffgen 1997-2000].

4.3 Simulationen zur Kokillenrekonstruktion

Für die Rekonstruktion einer Bronzekokille sind sicherlich diverse Methoden denkbar. Hier dient zunächst die in Kapitel 4.1 ausgeführte Vorstellung von Hodges für die Rekonstruktion einer Absatzbeilkokille als Grundlage. Weiterhin wird das bereits in der frühen Geschichte verbreitete "normale" Wachsausschmelzverfahren mit kompletter Lehmform berücksichtigt. Als Vorlage dient die Bronzegussform für oberständige Lappenbeile vom Bullenheimer Berg.



Abb. 4.3: Details der Außenseiten der Gussform vom Bullenheimer Berg, Mainfranken.

- a) Die rauhen Außenseiten zeugen mit positiven Abdrücken von Haaren und Holzspänen von einen mit organischen Stoffen gemagerten Formmantels aus Lehm.
- b) Das fertige Gussstück belegt auch die Bearbeitung des Wachsmodells mit einem spatelartigen Gerät.



Abb. 4.4: Außenseiten der Gussform von Wallerfangen, Kr. Saarlouis. An den Unterkanten der Formhälften befinden sich jeweils drei nebeneinanderliegende Zapfen, die Reste des Anschnitts darstellen.

4.3.1 Modellvorstellung nach Hodges

Nachvollzogen wird das Gießen der ersten Kokillenhälfte (Schritt 4). Die äußere Kontur der zu gießenden Kokillenhälfte (der in Schritt 3 durch das Auslösen der inneren Formmantelhälfte entstandene Hohlraum) wird von einer Lehmform (äußere Formmantelhälfte in Schritt 3) bestimmt. Die innere Begrenzung bildet die in den Formhohlraum ragende Hälfte eines Prototyps der in der Metallform herzustellenden Lappenbeile aus CuSn10. Die verbleibenden Formmantelhälften aus den Schritten 1 und 2 fixieren diesen "Kern" und bilden den Formabschluss an den Stoßkanten, *Abb. 4.5*. Der spätere Beileingusstrichter wird aus Lehm an den Prototypen angeformt (Schritt 2). Der Anschnitt für die Formhälfte befindet sich auf dem oberen Kokillenrand, *Abb. 4.6*.

4.3.1.1 Parametervariationen

Detailbeobachtungen an den Originalen, Erfahrungswerte aus vorangegangenen Experimenten und weitergehende theoretische Überlegungen bilden die Grundlage der folgenden Simulationsrechnungen, *Tabelle 4.1*.

a) Variation der Formtemperatur

Zunächst wird eine Formtemperatur von 450°C (Rechnung 1) angenommen. Um jedoch die Grenze für eine noch erfolgreiche Formfüllung auszuloten, erfolgt eine zusätzliche Simulation mit einer Vorwärmtemperatur von 300°C (Rechnung 2). Die übrigen Parameter bleiben mit T_{gieb} = 1080°C und t_{gieb} = 3 s konstant.

b) Variation von Lage und Anzahl der Anschnitte

Rechnungen mit unterschiedlicher Lage und Anzahl der Anschnitte sollen die gießtechnische Relevanz dieses in der Bronzezeit variabel auftretenden Parameters überprüfen. Geläufig scheint das Anschneiden auf der Seite der Beilschneide (Unterkante) gewesen zu sein. Dieser Beobachtung wird mit einem Anschnitt nach dem Vorbild "Bullenheimer Berg" (Rechnung 3) und drei Anschnitten nach dem Vorbild "Wallerfangen" (Rechnung 5) nachgekommen. Die Gießparameter entsprechen der Rechnung 1, die die von Hodges vorgesehene Anschnittposition am Trichterrand berücksichtigt.

4.3.1.2 Erhitzung des Bronzebeils als Bestandteil der Form

Im Zusammenhang mit dem Bronzeguss in Bronzeformen kommt immer wieder die Frage nach dem Aufschmelzen der Formoberfläche und der damit verbundenen Gefahr des Verbindens oder Verklebens mit dem Gussstück auf. Dies wäre der Fall, wenn die Form für eine ausreichend lange Zeit die Solidustemperatur überstiege. Normalerweise ist die Wärmeleitung der Bronzekokille zu groß um entsprechende Verhältnisse zu schaffen. Das hier als innere Formbegrenzung dienende Bronzebeil ist aber durch den umliegenden Formlehm so gut isoliert, dass die Temperaturverteilung genauer zu betrachten ist.

Besonders gefährdet erscheinen die dünnen Lappenspitzen und der Bereich des auftreffenden Gießstrahls. Dort werden zur genaueren Überprüfung der auftretenden Temperaturen virtuelle Thermoelemente eingesetzt, *Abb. 4.7*, und der Temperaturverlauf während des gesamten



Abb. 4.5: Simulationsgeometrie nach der Modellvorstellung von Hodges. Die äußere Kontur der zu gießenden Kokillenhälfte wird von einer Lehmform bestimmt. Die innere Begrenzung bildet die in den Formhohlraum ragende Hälfte eines Prototyps der später in der Metallform herzustellenden Lappenbeile aus CuSn10. Dieses ist mit einer Lehmunmantelung fixiert, die sowohl den Formabschluss an den Stoßkanten bildet als auch den Beileingusstrichter formt.



Abb. 4.6: Der nach dem Zusammensetzen der Formhälften verbliebene Hohlraum wurde mit Bronze ausgegossen. Der Einguss erfolgte über den Kokillenrand.

- a) Äußere Formmantelhälfte (s. Schritt 4) mit der gegossenen Kokillenhälfte (grau). Die gegenüberliegende Hälfte mit dem Originalbeil wurde bereits entfernt.
- b) Fertige Kokillenhälfte nach dem Entfernen der Lehmform.

Rechnung Nr.	T _{gieβ} [°C]	t _{gieβ} [s]	T _{form} [°C]	Anzahl und Position der Anschnitte	Rekonstruktionsmodell
1	1080	3	450	1 Anschnitt: "oben" (nach Hodges)	Hodges
2	1080	3	300	1 Anschnitt: "oben" (nach Hodges)	Hodges
3	1080	3	450	1 Anschnitt: "unten" (nach Bullenh. Berg)	Hodges
4	1080	3	300	1 Anschnitt: "unten" (nach Bullenh. Berg)	Hodges
5	1080	3	450	3 Anschnitte: "unten" (nach Wallerfangen)	Hodges
6	1080	3	350	1 Anschnitt: "unten" (nach Bullenh. Berg)	Wachsausschmelzverfahren
7	1080	3	450	1 Anschnitt: "unten" (nach Bullenh. Berg)	Wachsausschmelzverfahren

 Tabelle 4.1: Simulationsrechnungen zur Kokillenrekonstruktion. Die Gusslegierung war in allen Fällen CuSn10.

Tabelle 4.2: Übersicht der durchgeführten Experimente zur Rekonstruktion der Kokille vom Bullenheimer Berg.

Versuch	Modellvorstellung und Umsetzung	Legierung	$T_{form} [^{\circ}C]$	$T_{gie\beta}$ [°C]	t _{gieß} [s]
1 a	Hodges, mit innenliegendem Bronzebeil und Wachs als Modellwerkstoff für die Kokillenhälfte.	CuSn10	300	1060	ca. 3
1 b	Hodges, mit innenliegendem Bronzebeil und Lehm als Modellwerkstoff für die Kokillenhälfte.	CuSn10	350	1080	ca. 3
1 c	Hodges, mit innenliegendem Bronzebeil und Wachs als Modellwerkstoff für die Kokillenhälfte. Eine teilbare Lehmform ermöglicht ein Schlichten des Prototyps vor dem Abguss.	CuSn10	350	1080	ca. 3
2 a	Wachsausschmelzverfahren, es wird zunächst nur eine Kokillenhälfte als Wachsmodell erstellt.	CuSn10	350	1060	ca. 3
2 b	Wachsausschmelzverfahren, es werden direkt beide Kokillenhälften als Wachsmodelle erstellt.	CuSn10	350	<u>1.:</u> 1060 <u>2.:</u> 1080	ca. 3
2 c	Wachsausschmelzverfahren, es werden direkt beide Kokillenhälften als Wachsmodelle erstellt. Zum Erhalt der Passgenauigkeit werden sie vor dem Weiterverarbeiten zusammengebunden und ausgehärtet.	CuSn10	350	1080	ca. 3
3	Hodges, jedoch mit innenliegendem Keramikbeil als Prototyp. Als Modellwerkstoff für die Kokil- lenhälfte dient Wachs.	CuSn10	350	1080	ca. 3



Abb. 4.7: Lage der virtuellen Thermoelemente in dem bei der Kokillenrekonstruktion als innere Formbegrenzung dienenden Bronzebeil. Die auftretenden Temperaturen werden überprüft, um einem Anschmelzen von Oberflächenbereichen beim realen Abguss vorzubeugen.

Gieß- und Erstarrungsvorgangs aufgezeichnet. Als Grundlage dient die Simulationsgeometrie mit einem Anschnitt an der Unterseite ("Bullenheimer Berg") Um den Bereich problematischer Vorwärmtemperaturen einzugrenzen, wurde mit 450°C (Rechnung 3) ein oberer und mit 300°C (Rechnung 4) ein unterer Wert gewählt.

4.3.2 Wachsausschmelzverfahren mit kompletter Lehmform

Die Rekonstruktionsvorstellung nach Hodges ist zwar eine sehr ausgeklügelte und elegante Methode, es ist aber anzunehmen, dass sie nicht die allgemein übliche oder gar einzige war, eine bronzezeitliche Dauergussform herzustellen. Das "normale" Wachsausschmelzverfahren, bei dem ein Wachsmodell des zu gießenden Objekts komplett mit Lehm ummantelt wird (s. Beschreibung der Experimente in Kap. 4.4 muss auch hier in Betracht gezogen werden.

4.3.2.1 Parametervariation (s. Tabelle 4.1)

Es werden zwei Rechnungen mit den Vorwärmtemperaturen 350°C (Rechnung 6) und 450°C (Rechnung 7) durchgeführt. Die übrigen Parameter entsprechen den vorangegangenen Rechnungen. Mit der Position eines Anschnittes an der Unterkante wird den Beobachtungen an der Gussform vom Bullenheimer Berg Rechnung getragen.

4.3.2.2 Spannungssimulation

Die Erstarrung der Schmelze ist mit einer Dichtezunahme und damit Kontraktion verbunden. Wird letztere, z.B. durch Teile der Form, behindert, bauen sich Spannungen auf, die sich in Verformungen und Rissbildung äußern können. Im Fall der Kokillenhälfte bildet die Beilkontur eine starke Restriktion bei der Erstarrung.

Die starken Deformationen bei den ersten praktischen Rekonstruktionsversuchen und die beobachteten Risse in der erfolgreich nachgegossenen Kokille nach dem Wachsausschmelzverfahren gaben den Anlass, eine Spannungssimulation durchzuführen. Augenmerk liegt hier sowohl auf der Entwicklung der Spannungen während der Erstarrung (Warmrisse) und der nachfolgenden Abkühlung (Restspannungen) als auch auf der zu erwartenden Endverformung. Dadurch soll geklärt werden, um welche Art von Rissbildung es sich bei den in der Matrix beobachteten Rissen handelt, und ob auftretende Verformungen dem Herstellungsprinzip an sich oder unzulänglicher handwerklicher Sorgfalt zuzuschreiben sind. Gerechnet wird der Abguss einer Kokillenhälfte aus CuSn10 in eine Lehmform entsprechend der Rechnung 6.

4.4 Experimente zur Kokillenrekonstruktion

Während die Versuchsreihe 1 die Modellvorstellung von H.W. Hodges berücksichtigt, wird das herkömmliche Wachsausschmelzverfahren in Versuchsreihe 2 umgesetzt. Versuch 3 zieht den Gebrauch von Prototypen aus nichtmetallischem Material in Betracht. Eine kurze Übersicht der im folgenden ausführlich beschriebenen Rekonstruktionsversuche und die eingesetzten Gießparameter gibt *Tabelle 4.2*.

4.4.1 Versuch 1: Modellvorstellung nach Hodges

Der Guss der Kokillenhälfte erfolgt gegen den Prototypen eines Bronzelappenbeils. Eine Lehmform bildet den äußeren Formabschluss und fixiert das Beil.

Dabei ergeben sich zwei Änderungen aus dem Umstand, dass keine Absatz-, sondern eine Lappenbeilkokille hergestellt werden soll. Da alle Originalfunde Henkel besitzen, scheidet Ton als Fornmaterial für das Modell aus. Der Henkel wäre nicht aus dem äußeren Mantel auszulösen. Zur Modellherstellung wird daher Wachs verwendet (Versuch 1a). Um zu prüfen, ob bei anderen Geometrien mit Ton gearbeitet werden kann, werden auch Tonmodelle –ohne Henkel– gefertigt (Versuch 1b). Die zweite Modifizierung betrifft die Formgebung der Beilkontur. Anders als bei Absatzbeilen kann hier nicht auf ein Fertigprodukt modelliert werden, sondern nur auf ein Beil mit geraden, also noch nicht umgeschmiedeten Schaftlappen. Des weiteren wird, entsprechend den Befunden an den Originalen, der Eingusstrichter nicht am oberen Rand, sondern an der Unterkante angebracht. In Versuch 1c wird das innenliegende Bronzebeil vor dem Abguss mit Schlichte bestrichen, um ein besseres Ablösen der gegossenen Formhälften zu erzielen.

• Modellherstellung

Zur Erstellung der ersten Kokillenhälfte wird der Prototyp aus Bronze bis zur Hälfte mit dem Modellwerkstoff ummantelt. Die Wandstärke entspricht mit 50-60 mm der Originalgussform, *Abb. 4.8*.

- a) Das Wachs wird einmal durch Aufkneten und einmal durch Aufpinseln aufgetragen. Beides beansprucht jeweils ca. 1 Stunde Zeit, zuzüglich ca. ½ Stunde für das Anformen von Henkel, Eingusstrichter und den Verschlüssen an den Stoßkanten. Bessere Oberflächen werden durch den Pinselauftrag erzielt. Versuche dünne Wachsplatten aufzulegen, sind nicht erfolgreich, sie brechen an den Beilkanten. Die Verarbeitung von Bienenwachs ist etwas schwieriger, führt aber zum gleichen Ergebnis.
- b) Als Modellformstoff dient eine Lehmmischung aus Töpferton, Schamotte und Haaren. Das Aufkneten dauert ca. 1½ Stunden; die Trockenzeit ist 12 Stunden. Ein Henkel darf nicht mit angeformt werden, da er nicht aus der anschließend aufgebrachten Lehmform ausgelöst werden könnte.

c) wie 1a.

• Gussformherstellung

Als Material für den Lehmmantel dient eine Mischung aus natürlichem Formsand, Haaren und feinem Quarzsand.

a) Wachspositiv und Bronzebeil werden zusammen mit einem ca. 1,5 cm dicken Lehmformmantel umgeben, *Abb. 4.9 u. 4.10.* Der Zeitaufwand beträgt ca. 1 Stunde. Nach 2-tägiger Trockenzeit wird das Wachs langsam vom Einguss her ausgeschmolzen. Das Wachsausschmelzen erfolgte problemfrei ohne Rissbildung. Die hohlen Formen



Abb. 4.8: Auf den Prototypen des Lappenbeiles aufgeknetetes Wachsmodell einer Gussformhälfte.

Abb. 4.9: Der Prototyp des Bronzebeils und das aufgeformte Wachsmodell der zu gießenden Formhälfte sind mit der ersten Schicht des Lehmformmantels umgeben.



Abb. 4.10: Fertig ummantelter Formaufbau mit angeformtem Eingusstrichter an der Unterkante (Schneidenseite). Die Ummantelung am Einguss wurde lediglich zur anschaulichen Dokumentation abgenommen.

werden innerhalb von 10 Stunden langsam auf 500°C erhitzt, 36 Stunden auf dieser Temperatur gehalten und langsam auf 350°C abgekühlt.

- b) Zunächst wird nur die Außenseite des Lehmmodells mit einem 1,5 cm dicken Formmantel versehen, *Abb. 4.11*, bei dem der spätere Eingusstrichter ausgespart bleibt. Ein vorheriges Einölen des Modells verhinderte das Verkleben der zwei Lehme. Nach dem Trocknen (1 Tag) werden die Stoßflächen eingeölt und die freie Beilhälfte mit Lehm ummantelt, sodass die beiden Formhälften bündig abschließen. Nach einer Trockenzeit von 2 Tagen wird die Formhälfte mit dem Lehmmodell abgenommen und letzteres ausgelöst. Eine Lehmverschmierung fixiert die anschließend wieder zusammengesetzten Formteile, *Abb. 4.12*. Fertigstellung wie 1a.
- c) wie 1a, jedoch wird die Lehmform teilbar hergestellt, da das innenliegende Bronzebeil vor dem Abguss noch geschlichtet wird um ein besseres Ablösen der gegossenen Kokillenhälfte zu erreichen. Die Trennlinie verläuft entlang der Stoßkante des Wachsmodells, sodass nach dem Wachsausschmelzen und Brennen die eine Formhälfte abgenommen werden kann und die zu schlichtende Hälfte des Bronzebeils freiliegt. Das Wachsausschmelzen und die folgende Wärmebehandlung entsprechen Versuch 1a. Die freiliegende Hälfte des Bronzebeils wird mit einer in Wasser gelösten Schlichte aus 80% Knochenasche und 20% Töpferton bestrichen. Anschließend wird die Form wieder zusammengesetzt, dünn mit Lehm verstrichen und bei 350°C einige Stunden getrocknet. Die Trennung der Arbeitsschritte ergibt sich daraus, dass die Schlichte der Wärmebehandlung der Lehmform nicht standhält.

• Abguss

- a) Die 350°C heißen Formen werden in Kästen gestellt und mit Sand hinterfüllt. Der Abguss erfolgt mit CuSn10, *Abb. 4.13*. Die Formtemperaturen liegen bei ca. 300°C. Die Gießtemperatur wird mit 1060°C bewusst sehr niedrig gewählt, um ein Verbacken der dünnen Lappen des Originalbeils mit der Schmelze zu verhindern.
- b) Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Formfüllung in Versuch 1a wird die Gießtemperatur auf 1080°C erhöht. Auch die Formtemperatur liegt mit ca. 350°C etwas höher.
- c) wie b.

4.4.2 Versuch 2: Wachsausschmelzverfahren mit kompletter Lehmform

Hier wird das Wachsmodell der Kokillenhälfte nach dem Aufformen auf den Prototypen wieder abgenommen und komplett in Lehm eingeformt. Dabei werden zwei Verfahren angewandt:

- 1. Es wird zunächst nur eine Kokillenhälfte als Wachsmodell erstellt (2a).
- Die gesamte Kokille, bestehend aus den zwei aneinander passenden Formhälften, wird als Wachsmodell erstellt (2b u. 2c).



Abb. 4.11: Das Lehmmodell einer Gussformhälfte wurde auf den Prototypen des Bronzebeils aufgeknetet und mit der ersten Schicht des Lehmformmantels umgeben (Versuch 1b).

Abb. 4.12: Wieder zusammengesetzte Form nach dem Entfernen des Lehmmodells der Kokillenhälfte (Versuch 1b).



Abb. 4.13: Abguss der ersten Formhälften. Die 350°C heißen Formen stehen in Kästen und sind als Vorbeugung gegen ein Bersten beim Abguss mit Sand hinterfüllt.



Abb. 4.14: Um einer Deformation vorzubeugen, werden die Wachsmodellhälften vor dem Einformen passend zusammengebunden und einige Tage aushärten lassen (Versuch 2c).

• Modellherstellung

- a) Wie 1a; jedoch wird das Beil zuvor eingeölt, um ein besseres Ablösen des Wachsmodells zu erreichen.
- b) Wie 2a; jedoch werden direkt zwei aufeinander passende Kokillenhälften als Wachsmodelle über das Bronzebeil geformt. Dies dauert pro Hälfte ca. 3 Stunden, inklusive Anbringen von Einguss, Henkel und Verschlüssen. Ein weiteres Modell wurde durch Eintauchen des gesamten Beils in ein Wachsbad hergestellt. Die Wandstärke ist in etwa einer Stunde aufgebaut. Das Aufschneiden und Überarbeiten des Modells nimmt zusätzlich 3-4 Stunden in Anspruch. Das Eintauchen des Beils in Wachs hat den Vorteil, dass die Form in gleichmäßigen, sehr dünnen Wachsschichten aufgebaut wird und das Glätten der Außenseiten entfällt. Allerdings müssen die Kanten intensiv nachgearbeitet werden, weil sich die Formhälften beim Aufschneiden und anschließenden Ablösen stark verziehen. Zu berücksichtigen ist auch, dass beim Eintauchen wesentlich mehr Wachs benötigt wird als beim Aufkneten.
- c) Wegen mangelnder Passgenauigkeit der Formhälften im ersten Abguss werden nochmals Wachsmodelle der Kokillenhälften entsprechend des Versuchs 2b hergestellt (Das Wachs wird aufgeknetet). Um ein Verformen der Modelle schon vor oder während des Einformens auszuschließen, werden die Hälften nach dem Abnehmen vom Beil passend zusammengebunden und einige Tage zum Aushärten in den Kühlschrank gelegt, *Abb. 4.14*.

• Gussformherstellung

- a) Das Wachsmodell der Kokillenhälfte wird vom Beil abgelöst und mit einem 1-2 cm dicken Formmantel umgeben (Lehmmischung wie Versuch 1). Nach der ca. zweitägigen Trockenzeit erfolgt das Wachsausschmelzen wie unter 1a. Auch die folgende Wärmebehandlung entspricht der Beschreibung in Versuch 1a.
- b) Nach dem Ablösen der Wachsmodelle vom Bronzebeil wird das genaue Aufeinanderpassen der zwei Formhälften überprüft bevor sie einzeln mit einem Lehmformmantel umgeben werden. Das weitere Vorgehen entspricht 2a.
- c) Die passgenau aufeinandergebundenen und ausgehärteten Formhälften werden getrennt und das Aufeinanderpassen nochmals überprüft. Das weitere Vorgehen entspricht 2b.

• Abguss

- a und erste Kokille b: Die heißen Formen werden in Kästen gestellt und mit Sand hinterfüllt. Der Abguss erfolgt mit CuSn10. Die Gießtemperatur liegt wie bei Versuch la bei 1060°C, die Formtemperatur bei ca. 350°C.
- zweite Kokille b und c: Die Gießtemperatur wird auf 1080°C erhöht.

4.4.3 Versuch 3: Modifikation von Hodges mit Guss gegen Tonmodell

Der Aufbau entspricht im wesentlichen Versuch 1. Als innenliegendes Beilmodell dient aber kein Prototyp aus Bronze sondern ein Tonmodell des Lappenbeils.

• Modellherstellung

Die innere Begrenzung der zu gießenden Kokillenhälfte bildet ein Keramikmodell des Lappenbeils. Es besteht aus grob schamottiertem Töpferton, mit starker organischer Magerung aus Flachsfasern um eine höhere Formstabilität während der Trocknung zu gewährleisten und die Schrumpfung während des Brands zu reduzieren. Das reine Töpfern nimmt ca. 2 Stunden in Anspruch, die anschließende Trocknung an der Luft 4 Tage. Die Überarbeitung des getrockneten Modells dauert ca. 3 Stunden. Schwierigkeiten ergeben sich beim Erzielen einer glatten und ebenen Oberfläche und bei der Vermeidung von Hinterschneidungen im Bereich der Lappen. Das fertig überarbeitete Tonbeil wird im keramischen Ofen bei 850°C gebrannt. Nach dem Abkühlen entspricht die weitere Verfahrensweise Versuch 1a.

• Gussformherstellung und Abguss

Wie Versuch 1a, die Gießtemperatur liegt bei 1080°C und die Formtemperatur bei ca. 350°C.

Die erhaltenen Abgüsse aus den Versuchen 1-3 werden optisch eingehend untersucht und die als "gelungen" zu bezeichnenden Exemplare vergleichenden Röntgenuntersuchungen mit den Originalformhälften der Gussform vom Bullenheimer Berg unterzogen. Ferner erfolgt der Abguss eines oberständigen Lappenbeils in eine möglichst gut rekonstruierte Kokille.

4.5 Ergebnisse

4.5.1 Simulationsergebnisse

Die Simulationsrechnungen bescheinigen beiden Modellvorstellungen eine grundsätzliche gießtechnische Umsetzbarkeit und ermöglichen jeweils eine Abschätzung in der Parameterwahl.

4.5.1.1 Modellvorstellung nach Hodges

a) Einfluss der Formtemperatur

Für eine Formvorwärmtemperatur von 450°C (Rechnung 1) werden zum Ende des Füllvorgangs zwar einige Geometriebereiche berechnet, die die Liquidustemperatur knapp unterschreiten, die Schmelze weist oberhalb einer Temperatur von ca. 1000°C aber noch eine so geringe effektive Viskosität auf, dass eine vollständige Formfüllung zu erwarten ist.

Bei einer Vorwärmtemperatur der Form von 300°C (Rechnung 2) kühlt die Schmelze im dünnen Henkel und der Öse sowie im direkten Kontakt zum Bronzebeil bereits ab ca. 50% Formfüllung in den Bereich des Erstarrungsintervalls ab, *Abb. 4.15*. Hier sind Schwierigkeiten beim weiteren Füllverlauf und die damit verbundenen Gussfehler wie nicht ausgelaufene Geometriebereiche und Kaltschweißen wahrscheinlich.

Setzt man eine vollständige Formfüllung voraus, wirkt sich die Variation der Formtemperatur kaum auf das Erstarrungsverhalten und die zu erwartenden Porositäten aus.



Abb. 4.15: Formfüllsimulation für eine Vorwärmtemperatur der Form von 300°C nach dem Modell von Hodges (Rechnung 2). In der dünnen Handhabe und im direkten Kontakt zum Bronzebeil kühlt die Schmelze schon bei 50% Formfüllung in den Bereich des Erstarrungsintervalls ab (grün in der Skala). Gussfehler wie nicht ausgelaufene Partien und Kaltschweißen sind wahrscheinlich.



Abb. 4.16: Zeiten zum Durchlaufen des Erstarrungsintervalls bei den drei Anschnittvarianten. Da keine Möglichkeit der Nachspeisung vom Einguss her besteht, ist in der jeweils unteren Gussstückgeometrie im Bereich der Hot-Spots mit Lunkerbildung zu rechnen. Bei einem Anschnitt von der Unterkante her ist dies im Trichter und bei einem Anschnitt von der Oberkante her in der Formwand des Schneidenbereichs.
b) Einfluss von Lage und Anzahl der Anschnitte

Bei allen drei Anschnittvarianten erfolgt die Formfüllung gleichmäßig und vollständig. Aufgrund des Bronzebeils als Formbestandteil kühlt die Schmelze jedoch sehr schnell ab. Zuerst friert der Bereich des Übergangs zwischen Schneide und Lappen zu. Bei einem Anschnitt von der Oberkante her (Rechnung 1) führt dies zu einer Aufteilung des Gussstücks in eine kalte mittlere und zwei heiße äußere Zonen, *Abb. 4.16a*. Während der obere Bereich nachgespeist werden kann, ist in der Schneide die Verbindung zum Einguss schon früh zugefroren. Hier ist ein Speisungslunker zu erwarten. Bei den von der Unterkante angeschnittenen Kokillenhälften (Rechnung 4 u. 5) erstarrt der gesamte obere Bereich schnell und schließt die Möglichkeit der Nachspeisung des unteren Drittels aus, *Abb. 4.16b u. c.* Der lunkergefährdete Bereich liegt dementsprechend am Eingusstrichter.

Gießtechnisch sinnvoller wäre ein dicker Anschnitt im mittleren Gussstückbereich oder der steigende Guss, bei dem die Schmelze zunächst am Gussstück vorbei geführt wird um es dann langsam von unten her zu füllen. Entsprechende Hinweise gibt es im Fundmaterial jedoch nicht.

c) Erhitzung des Bronzebeils als Bestandteil der Form

Bei einer Vorwärmtemperatur der Form von 300°C bleibt die Temperatur sowohl in den Lappen als auch im Bereich des auftreffenden Gießstrahls unterhalb der Solidustemperatur von 830°C, *Abb.* 17.

Wird die Form auf 450°C vorgewärmt, erreichen die Lappenspitzen jedoch zum Ende der Formfüllung (3s) eine Temperatur von 840°C, die sie bis gegen Ende der Erstarrung beibehalten, *Abb. 4.18a.* Die Gesamtzeit der Überhitzung beträgt ca. 17s. Ob diese Temperaturverhältnisse schon zu einem Verkleben der Lappenspitzen mit der gegossenen Kokille führen, ist unklar, der Temperaturverlauf zeigt aber Grenzen in der Parameterwahl auf. Höhere Gieß- und Formtemperaturen sollten im realen Abguss vermieden werden. Im Bereich des auftreffenden Gießstrahls wird die Solidustemperatur nicht erreicht, *Abb. 4.18b.*

4.5.1.2 Wachsausschmelzverfahren mit kompletter Lehmform

a) Einfluss der Formtemperatur

Dem Verlauf der Formfüllungen ist zu entnehmen, dass hierbei keine Schwierigkeiten zu erwarten sind. Die Schmelze läuft gleichmäßig ein und behält während des gesamten Füllvorgangs eine Temperatur oberhalb T_{liquid} (1020°C).

Aufgrund der Isolationswirkung des Formlehms erstarrt das gesamte Gussstück langsam, lediglich der dünne Anschnitt friert schneller zu. Durch diese gleichmäßigen Erstarrungsverhältnisse mit mangelnder Nachspeisungsmöglichkeit vom Anschnitt her wird sich ein relativ homogenes, aber lockeres Gefüge ausbilden. Porositäten sind vor allem im Bereich der späteren Beilschneide zu erwarten. Zuletzt erstarrt der dicke Geometriebereich zwischen den Schaftlappen, wo die Bildung eines Makrolunkers wahrscheinlich ist.



Abb. 4. 17: Temperaturverlauf in den überhitzungsgefährdeten Bereichen bei einer Formvorwärmtemperatur von 300°C (Hodges, Rechnung 2). Die Temperaturen bleiben während des gesamten Gieß- und Erstarrungsprozesses sowohl in den Schaftlappen (a) als auch im Bereich des auftreffenden Gießstrahls (b) unterhalb der Solidustemperatur. Es besteht keine Gefahr des Verklebens mit dem Gussstück. Zur besseren Anschaulichkeit sind nur die höchsten Temperaturen dargestellt.



Abb. 4. 18: Temperaturverlauf bei einer Formvorwärmtemperatur von 450°C (Hodges, Rechnung 1).

- a) In den Schaftlappenspitzen wird die Solidustemperatur (830°C) im Verlauf der Erstarrung für ca. 20s um 10°C überschritten. Wahrscheinlich bewirkt diese Überhitzung noch kein Verkleben der Lappenspitzen mit der gegossenen Kokillenhälfte. Es wird jedoch eine obere Grenze in der Parameterwahl aufgezeigt.
- b) Im Bereich des auftreffenden Gießstrahls bleiben die Temperaturen im Solidusbereich.

b) Endverformung:

- Die Höhe (x-Richtung) verringert sich um ca. 1 %, wobei sich eine leichte Verformung derart einstellt, dass sich die Form im Bereich des Eingusstrichters und der Schneidenmatrix stärker zusammenzieht als in der Mitte. Hierdurch entsteht eine leichte Wölbung nach außen, *Abb. 4.19a*.
- Die Breite (y-Richtung) verringert sich um ca. 1,5 %, im Bereich der Schaftlappenmitte etwas weniger. Dadurch erhält die Innenkontur eine leicht konische Form, *Abb. 4.19b*.
- In der Länge (z-Richtung) schrumpft das Gussstück um ca. 1,5 %, Abb. 4.19c.

Die errechneten Deformationen sind so gering, dass sie am realen Gussstück kaum nachzuprüfen wären und durch Unregelmäßigkeiten im Modell und andere Effekte, wie z.B. Abplatzungen an der Form, überdeckt werden können. So wird sich real die leicht ausgewölbte Form an den Lappen, die sich positiv auf das Ausformen der später in der Kokille gegossenen Beile auswirken würde, nicht bemerkbar machen. Bei größeren Abweichungen, wie zum Beispiel in Versuch 2b, muss davon ausgegangen werden, dass bereits die Wachsmodelle verzogen waren oder beim Einformen deformiert wurden.

c) Spannungsentwicklung

Hinweis für das Entstehen von Warmrissen ist eine hohe Dehnungsrate senkrecht zur Abkühlrichtung. Während des Erstarrungsvorgangs ist weder eine derartige Entwicklung noch ein Aufbau von Spannungsspitzen zu beobachten. Höhere Spannungen entstehen erst während der weiteren Abkühlung nach der Erstarrung. Vor allem in den Kanten der Matrix für die spätere Beilklinge bleiben erhöhte Restspannungen (bis zu ca. 100 MPa) bestehen, *Abb. 4.20*. Dies deutet auf die Gefahr von Kaltrissbildung hin.

4.5.1.3 Vergleich der Modelle

Über die Simulationsrechnungen konnte gezeigt werden, dass beide Rekonstruktionsmethoden theoretisch zu gießtechnischem Erfolg führen.

Bei der Modellvorstellung von Hodges sind die thermischen Parameter jedoch enger gesteckt. Während unter ansonsten gleichen Bedingungen (s. Rechnung 1 und 2) eine Vorwärmtemperatur von 450°C bereits zu einem oberflächlichen Verschmelzen der Beillappen mit dem Gussstück führen kann, ist bei einer Vorwärmtemperatur von 300°C eine vollständige Formfüllung schon nicht mehr gesichert. Nimmt man eine komplette Lehmform für die zu gießenden Kokillenhälften an, sind im technisch möglichen und archäologisch wahrscheinlichen Rahmen diesbezüglich keine Schwierigkeiten zu erwarten.

Aufgrund des unterschiedlichen Isolationsvermögens der eingesetzten Formstoffe unterscheiden sich bei den zwei Modellen auch die Erstarrungsbedingungen in den Gussstücken. Die schnellere Abkühlung bei Hodges' Modell führt eher zu umgrenzten Lunkern in den dickeren Gussstückbereichen während die langsame und gleichmäßige Abkühlung bei der kompletten Lehmform die Ausbildung eines insgesamt lockeren Gefüges begünstigt.



Abb. 4.19: Verbleibende Verformung (20-fach übertrieben dargestellt) am Ende des Abkühlvorgangs. Die errechneten Deformationen sind so gering, dass sie am realen Gussstück kaum nachzuprüfen sind. Bei größeren Abweichungen (z.B. Versuch 2b) muss davon ausgegangen werden, dass die Wachsmodelle bereits vor oder während des Einformens deformiert wurden.



Abb. 4.20: Entwicklung der Hauptspannungen von 95% Erstarrung bis zur Abkühlung auf Raumtemperatur. Zunächst sind die noch geringen Hauptspannungen an den Seiten des Gussstücks konzentriert. Zum Erstarrungsende verteilen sie sich über das gesamte Gussstück. Bei weiterer Abkühlung erfolgt eine zunehmende Konzentration auf die Kanten in der Matrix für die Beilschneide und die Schaftlappen. Dabei werden bis zum Erreichen der Raumtemperatur Werte erreicht, die zu Kaltrissen führen können.

4.5.2 Praktische Rekonstruktion

Die Experimente bestätigen die Simulationsergebnisse, wonach sowohl die Modellvorstellung nach Hodges als auch das Wachsausschmelzverfahren mit kompletter Lehmform gießtechnisch realisierbar sind. Beide Varianten verlangen jedoch handwerkliches Geschick und die Kenntnis um die technologischen Parameter. Die erfolgreich rekonstruierten Gussstücke wiegen zwischen 700 und 1000 g und entsprechen damit in etwa den Originalfunden (vgl. Tab. 3.1)

4.5.2.1 Versuch 1: Modellvorstellung nach Hodges

- a) Aufgrund der zu niedrig gewählten Gießtemperatur ist der Formhohlraum nicht vollständig ausgelaufen, *Abb. 4.21*.
- b) Entgegen ursprünglichen Befürchtungen verklebte das Beil nicht mit dem Gussstück. Die Kokillenhälfte schrumpfte aber so stark auf das Originalbeil auf, dass es kaum mehr auszulösen war. Die mit modernen Hilfsmitteln und großem Kraftaufwand abgelöste Kokillenhälfte zeigte, vermutlich wegen der niedrigen Gießtemperatur, eine sehr schlechte innere Oberfläche. Außen entsprach sie in etwa den Originalformen.
- c) Die Kokillenhälfte ist vollständig ausgelaufen, und das Beil lässt sich mit leichteren Anstrengungen (Hammerschläge auf den Kokillenrand) zerstörungsfrei auslösen. Am Übergang zwischen Lehmform und Beil sowie zwischen den Lehmformhälften haben sich dünne Grate ausgebildet, die aber leicht zu befeilen waren. Die Außenseite bildet, wie auch das Original, die Spuren der Bearbeitung des Wachsmodells ab, *Abb. 4.22a*. Die Innenseite (Matrix) ist sehr glatt und weist keinerlei Gussfehler auf, *Abb. 4.22b*. Das Beil kann jetzt wieder in die Kokillenhälfte eingesetzt werden, *Abb. 4.22c*, um den Abguss für die zweite Kokillenhälfte entsprechend vorzubereiten: Das Wachsmodell der zweiten Kokillenhälfte müsste über das Beil und gegen die erste Hälfte geformt und entsprechend dem ersten Produktionsschritt eine teilbare Tonform hergestellt werden. Wärmebehandlung, Schlichten und Abguss entsprächen dem Vorgehen bei der ersten Kokillenhälfte.

4.5.2.2 Versuch 2: Wachsausschmelzverfahren

- a) Das Beil ist nicht mehr in die gegenüber der Ursprungsgeometrie geschrumpfte Kokillenhälfte einzupassen. Die Herstellung einer gegengleichen, passenden Formhälfte nach dem gleichen Verfahren ist nicht möglich.
- b) <u>Erste Kokille</u>: die Gussqualität war durch die niedrige Gießtemperatur so schlecht, dass eine Beurteilung des Verfahrens nicht möglich ist. <u>Zweite Kokille</u>: Mit der erhöhten Gießtemperatur wurde eine akzeptable Gussqualität erzielt. Die Kokillenhälften passen in Länge und Breite gut aufeinander. Sie haben sich jedoch in Längsrichtung nach außen gewölbt, sodass der Guss eines Beils in diese Bronzekokille nicht möglich ist.
- c) Die erhaltene Kokille kann als gelungene Rekonstruktion bezeichnet werden. Beide Kokillenhälften sind vollständig ausgelaufen und passen gut aufeinander. Die auftretenden Gussfehler in Form von kleineren Graten und Schülpen könnten auch mit in der Bronzezeit



Abb. 4.21: Missglückter Versuch 1 a): Die zu kalt eingegossene Bronze ist vorzeitig eingefroren, sodass die Kokillenhälfte nicht vollständig auslaufen konnte.



Abb. 4.22: Erfolgreich rekonstruierte Kokillenhälfte aus Versuch 1c).
a) Auf der Außenseite sind die Bearbeitungsspuren des Wachsmodells zu erkennen.
b) Die Innenseite (Matrix) der Kokillenhälfte ist sehr glatt und für Beilabgüsse geeignet.
c) Zur Fertigung der zweiten Kokillenhälfte wird das Bronzebeil wieder eingesetzt.

verfügbaren Werkzeugen aus Stein beseitigt werden. Hier wurde ein kleines Handschleifgerät eingesetzt. Auffällig sind Risse in der Matrix, die entlang der Kanten der späteren Beilklinge verlaufen, *Abb. 4.23*. Die über die Simulation errechneten Restspannungen erklären sie als während der weiteren Abkühlung nach der Erstarrung entstandene Kaltrisse.

4.5.2.3 Versuch 3: Modifikation von Hodges mit Guss gegen Tonmodell

Der Formhohlraum ist vollständig ausgelaufen. Die Lappen der nicht eingeformten Hälfte des Keramikbeiles sind jedoch abgeplatzt, sodass der Guss der zweiten Kokillenhälfte nicht mehr möglich ist. Offensichtlich haben sich aufgrund der ungleichmäßigen Temperaturverteilung und der starken Wandstärkenunterschiede des Beiles zu große Spannungen aufgebaut.

Zusätzlich lässt sich das sehr hoch gebrannte Keramikbeil nicht aus dem Gussstück lösen und es sind Blasenbildungen im Kontaktbereich Keramikbeil/Kokillenhälfte zu beobachten. Wahrscheinlich kam es zu Reaktionen zwischen der Keramik und der flüssigen Bronze.

4.5.3 Vergleichende Röntgenaufnahmen von Originalen und Nachgüssen

a) Nachguss aus Versuch 1c), Taf. 26:

- Die Kokillenhälfte weist ein insgesamt dichtes Gussgefüge auf.
- Weniger dicht erscheinen die Einguss und Beilnackenmatrix, eine kleine Stelle unterhalb des Schaftlappenansatzes und ein größerer Bereich unterhalb des Anschnittes.
- An der Eingussmatrix sind schwach vereinzelte Poren erkennbar.

b) Nachgüsse aus Versuch 2c), Taf. 27.

- Die Röntgenaufnahmen zeigen ein deutlich lockereres Gussgefüge.
- Es sind wenige konkrete Lunker erkennbar.
- Beide Hälften weisen Risse in den Matrixkanten auf.

• "Schlechtere Hälfte":

Stark poröse Zonen befinden sich direkt unterhalb des Anschnitts und ab der Unterkante des Lappenansatzes bis ca. in die Schneidenmitte, *Taf. 27a*. Offensichtlich fror der Anschnitt sehr früh zu und die Nachspeisung erfolgte aus dem zuletzt erstarrenden Schneidenbereich.

• "Bessere Hälfte":

Das Gefüge erscheint insgesamt locker aber homogen. Lokale Porositäten befinden sich direkt unterhalb des Anschnittes und in etwa auf Höhe der Schneidenmitte, *Taf. 27b.*

c) Kokillenhälften der Originalform vom Bullenheimer Berg, Taf. 28.

- Beide Hälften erscheinen insgesamt als gute Abgüsse.
- Eine Hälfte weist ein lockereres Gefüge im Schneidenbereich auf, *Taf. 28a*. Im Schneidenbereich konzentrieren sich kleine abgegrenzte Poren (Gasporosität).
- Die andere, dichter gegossene Hälfte lässt eine entsprechende Porenbildung im Bereich des Eingusstrichters erkennen, *Taf. 28b*.



Abb. 4.23: Erfolgreich rekonstruierte Kokille aus Versuch 2c).

a) Innenseiten der beiden Formhälften.

b) Detailaufnahme der Innenseite mit Rissen in der Matrixkante (Pfeile).



Abb. 4.24: Der in der Kokille gegossene Beilrohling. Er kann ebenso wie die Exemplare aus der modern rekonstruierten Kokille als gelungener Lappenbeilnachguss betrachtet werden.

Das lockere Gefüge im Schaftbereich der Nachgüsse aus Versuch 2c) entspricht den angezeigten Porositätszonen aus den Simulationen für die komplette Lehmform. Ein Lunker im Steg zwischen den Lappen ist jedoch im Röntgenbild nicht zu erkennen.

Die Originalkokille und die Kokillenhälfte aus Versuch 1c weisen ein dichteres Gefüge auf als die Nachgüsse in kompletter Lehmform (2c). Da auch die Simulation für diesen Fall geringere Porosität vorhersagt, liegt die Vermutung nahe, dass die Originale entsprechend des Versuchs 1c hergestellt wurden. Weitere (Reihen-) Untersuchungen in dieser Richtung wären hier interessant und zweckmäßig. Die höhere Gasporosität des Originals ist wahrscheinlich schmelztechnisch bedingt oder eine Folge des niedrigeren Zinngehaltes der Legierung.

4.5.4 Gebrauchsfähigkeit der rekonstruierten Kokille

Durch den Abguss eines Beiles in die in Versuch 2c rekonstruierte Bronzekokille sollte deren Gebrauchsfähigkeit überprüft werden. Die Vorgehensweise entspricht den Abgüssen in die modern rekonstruierte Kopie (Kap. 3.3). Hierzu wurden die Kokillenhälften zunächst von innen mit einer Schlichte aus 80% Knochenasche und 20% Töpferton bestrichen und über einer Terpentinflamme berußt. Die zusammengesetzte Kokille wurde dann an den Stoßkanten mit etwas Ton abgedichtet und bei 350°C einige Stunden getrocknet. Der Abguss erfolgte mit einer 10%-igen Zinnbronze in die noch heiße Kokille (ca. 300°C). Die Schmelztemperatur betrug ca. 1100°C.

Das erhaltene Lappenbeil kann als gelungener Abguss bezeichnet werden, der mit den Nachgüssen aus der neuzeitlich rekonstruierten Kokille vergleichbar ist, *Abb. 4.24*.

4.6 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Der Nachweis des Kokillengusses für die Bronzezeit machte eine Auseinandersetzung mit der Kokillenherstellung selbst notwendig. Als äußeres Detail fiel zunächst auf, dass alle an Originalen nachvollziehbaren Anschnittpositionen auf der unteren Außenseite der Form liegen. Als mögliche Produktionsverfahren für bronzezeitliche Kokillen bieten sich sowohl das Wachsausschmelzverfahren mit kompletten Lehmformen an als auch eine speziell für die Bronzegussform vom Bullenheimer Berg modifizierte Variante von Hodges' theoretischem Modell zur Herstellung einer Absatzbeilform. Wesentlich eleganter und ausgereifter erschien dabei letztere Methode, ein Bronzemodell des in der Kokille zu gießenden Objekts als Formbestandteil zu verwenden und die zweite Kokillenhälfte direkt auf die erste zu gießen.

Simulation und Experiment belegen jedoch auch die Kompliziertheit dieses Verfahrens. Eine erfolgreiche Kokillenrekonstruktion erforderte gleichermaßen das Einhalten enger Parametergrenzen für den Abguss und, zum zerstörungsfreien Ablösen des erstarrten Gussstücks vom Prototypen, den Einsatz geeigneter Schlichten. Wobei letzteres bei flacheren Geometrien, wie etwa Absatzbeilformen, weniger entscheidend gewesen sein dürfte. Ferner wies die erhaltene Kokillenhälfte zwar eine fehlerfreie innere Oberfläche auf, es war jedoch schwierig, die Lehmform spaltfrei auf das Modell aufzubringen, sodass Grate entstanden, die ein Aufgießen der zweiten Kokillenhälfte ohne vorherige Bearbeitung der ersten unmöglich machten. Weiterhin ist zu bedenken, dass ein unbearbeiteter Prototyp des in der Kokille zu gießenden Objekts vorliegen muss.

Die Produktion von Kokillen nach dem Wachsausschmelzverfahren erwies sich als eindeutig einfacher. Die Vorteile liegen vor allem in der größeren Toleranz bei den Gießparametern und darin, dass man bei dem Modell der in der Kokille herzustellenden Objekte nicht auf einen Prototypen aus Bronze angewiesen ist, sondern auf Modelle aus anderen Materialien wie Holz, Stein oder gebrannten Ton zurückgreifen kann. Natürlich erfordert auch dieses Verfahren handwerkliches Geschick und detaillierte technologische Kenntnisse, besonders beim Herstellen und Weiterverarbeiten der Wachsmodelle. Die hier entstandenen kleineren, für den Formstoff Lehm typischen Oberflächenfehler waren leicht abzutragen. Auch die bronzezeitlichen Gießer dürften hier kaum Probleme gehabt haben, zumal sie sicherlich eine größere Erfahrung mit geeigneten Formlehmen und ihrer Verarbeitung besaßen.

Als Kriterium für den Guss in komplette Lehmformen konnte über Simulation und Experiment Rissbildung in den Matrixkanten herausgestellt werden. Fehlen entsprechende Hinweise an Originalen widerlegt dies iedoch nicht automatisch das Wachsausschmelzverfahren, da entstandene Spannungsrisse zum Beispiel durch Schlichteschichten und Patina überdeckt sein können. Für die Kokille vom Bullenheimer Berg legen allerdings zusätzlich die Simulationen sowie die vergleichenden Röntgenaufnahmen der Nachgüsse und der Originalkokille nahe, dass letztere entsprechend Hodges' Modell direkt auf ein Bronzelappenbeil gegossen wurde.

Welches das gängige bronzezeitliche Herstellungsverfahren war, lässt sich anhand der wenigen ausreichend erhaltenen und eingehend untersuchten Exemplare nicht klären. Ausgedehnte (Reihen-) Untersuchungen in dieser Richtung könnten jedoch weitere verfahrensspezifische Regelmäßigkeiten und Unterschiede an Nachgüssen herausstellen und auf die Originale übertragbar machen. Möglicherweise ist die Entwicklung der Methode, gegen ein Metallbeil zu gießen, das Resultat zunehmender Erfahrung mit dem Guss in Bronzekokillen, und die Verfahren lösten sich zeitlich ab.

In der archäologischen Literatur werden Metallgussformen gerne mit dem Hinweis auf den Aufwand bei der Herstellung als die wertvolleren Werkzeuge betrachtet (z.B. [Hansen, 1991, 147]). Die erfolgreichen Rekonstruktionen haben jedoch gezeigt, dass die Herstellung von Bronzekokillen zwar Erfahrung und Geschick erfordert, ansonsten aber keine über das Metallhandwerk hinausgehenden Fertigkeiten. Die benötigten Werkstoffe waren den Gießern vertraut und Fehler ließen sich in jeder Phase des Herstellungsprozesses ohne Materialverlust beheben. Demgegenüber setzte die Herstellung von Steinformen ganz andere Kenntnisse und Fertigkeiten voraus und Fehler bei der Zurichtung des Steins sind schwer zu korrigieren. Darüber hinaus stellte eine Steinkokille vor allem in Regionen ohne entsprechende Rohstoffvorkommen einen erheblichen materiellen Wert dar. Aus diesen Gründen bedeutete die Entwicklung der Bronzekokillen vor allem eine Produktionsvereinfachung und damit einen technischen und gesellschaftlichen Fortschritt. Ihr materieller Wert ist aber nicht automatisch höher zu bewerten [Steffgen 1997-2000].

5 Griffherstellung bronzezeitlicher Schwerter

In der mittleren Bronzezeit wurde das Schwert zum wichtigsten Bestandteil der Individualbewaffnung. Es war jedoch nicht nur eine reine Zweckform, sondern auch Statussymbol. Damit unterlag seine Gestaltung neben funktionalen Gesichtspunkten auch dem Repräsentationsbedürfnis des Schwertträgers, was sich vor allem in der Griffgestaltung manifestierte (s.a. Kap. 1.2.4). Eingehender untersucht wird hier die Herstellung der Griffe des Typs Mörigen.

5.1 Forschungsstand

Unter der Vielzahl späturnenfelderzeitlicher Schwerter stehen die Mörigen-Schwerter gießtechnisch den süddeutschen Vollgriffschwertern am nächsten. Kennzeichnend ist die elliptische und eingezogene Knaufplatte, die in der Mitte ausgebauchte Griffstange und ausladende Heftflügel (vgl. Abb. 1.11).

Eine weitere Gliederung in Varianten wird durch die ornamentale Gestaltung der Griffstange möglich. Grundelement der Verzierung ist die Unterteilung der Griffstange durch horizontale Rippengruppen. Gelegentlich finden sich Eiseneinlagen auf der Knaufplatte und der Griffstange sowie eiserne Niete zur Klingenbefestigung. Die Klingen sind schilfblattförmig mit linsenförmigem Querschnitt, häufig zum Heft hin verbreitert. Zwei bis vier schmale mitgegossene Rippen verlaufen annähernd parallel zu den Schneiden. Das Ricasso ist glatt oder schwach gezähnt.

Die Verbreitung von Mörigen-Schwertern reicht von Skandinavien bis ins südliche Frankreich, wobei einzelne Varianten weit streuen und sich in ihrer Verbreitung meist überschneiden. Konzentrationen finden sich in der Schweiz und im Rhein-Main-Gebiet. Außer einer Gussform von Erlingshofen, Lkr. Eichstätt, *Abb. 5.1* (s.a. Abb. 1.13), gibt es keine Hinweise auf Werkstätten.

5.1.1 Die Griffgussform von Erlingshofen

Die Rekonstruktion der Herstellung von Mörigen-Schwertgriffen wird durch die Metallgussform von Erlingshofen, Lkr. Eichstätt, *Tab. 5.1*, erheblich erleichtert. Bei dem Fund handelt es sich um eine ursprünglich vierteilige Kokille für Griffe der Variante Preinersdorf. Erhalten sind der Metallkern und zwei Schalen. Ihr Umriss folgt der Griffkontur, der Einguss liegt seitlich an der Knaufplatte. Etwa in der Mitte der Außenseiten befindet sich ein rundstabiger Henkel mit schlecht verstrichenen Ansatzstellen. Bei zwei unregelmäßigen Verdickungen dicht unter der Oberkante und unter dem Henkel handelt es sich wahrscheinlich um Ausbesserung von Fehlstellen, dort weicht das Material von dem der Schalen ab [Drescher 1958, 78]. Geschlossen wurde die Form mit zwei Steckverbindungen an beiden Seiten der Griffstangenkontur und je zwei Kerben an der Oberkante zur Aufnahme einer heute fehlenden oberen Platte.



Abb. 5.1: Erhaltene Teile des Originalfundes von Erlingshofen mit rekonstruiertem Schwert. Von der Griffform für Schwertgriffe des Typs Mörigen, Variante Preinersdorf sind die zwei Formschalen und der Kern erhalten. Die obere Abdeckplatte fehlt [Archiv, Präh. Staatss., M].

	SCHALEN	Kern
Нöне	bis 115 mm	112 mm mit Öse (12 mm)
WANDSTÄRKE	5 – 12 mm	
GEWICHT	577,6 g und 553,1 g	130,5 g
ANALYSE	Form: 83,1% Cu; 13% Sn;	0,7% Pb; 0,8% Ag; 0,05% Ni;
(Spektralanalyse:	1,5% As; 0,9% Sb; 0,5% Fe; Spur Bi.	
H. Otto, Leuna,	Flickung: 85% Cu; 10,5% Sn	; 0,9% Pb; 0,6% Ag; 0,1% Ni;
[Drescher 1958, 162])	1,8% As; 1,1% Sb; (),05% Bi; Spur Fe.
INVENTAR-NUMMER	1937,4 (Prähistorische Staatssammlung München)	
LITERATUR	v. Quillfeldt 1995, 241 Nr. 281 mit älterer Lit.	

Tabelle 5.1:	Beschreibung	der Bron	zegussform	von	Erlingshofen
	Deberneroung				



Abb. 5.2: Umzeichnung der Röntgenaufnahmen eines Flussfundes aus dem Rhein bei Mainz-Weisenau. Das Schwert gehört wie die Gussform von Erlingshofen zu dem Typ Mörigen, Variante Preinersdorf. Der kleine Hohlraum in der Griffstange ist unregelmäßig geformt und mündet in einen im Knauf schräg verlaufenden Luftkanal. Die dreieckige Heftplatte ist zweifach mit dem Griff vernietet [Hundt 1965, Taf. 13]. Die Innenseiten der Schalen sind glatt, die Profilierung der Griffstangenkontur erscheint flach. Zwei beidseits des Heftausschnittes ursprünglich vorhandene Stiffe zur Aussparung der Nietlöcher wurden bereits antik abgefeilt. Eine Vertiefung an einer Schale auf der Höhe des Scheitelpunkts des Heftausschnitts entspricht einem Scheinniet im Abguss.

Der Metallkern schließt unten in einer Platte mit Öse ab, die auf den Unterkanten der Schalen aufliegt. Zusätzlich wird er mit einer der Schalen über einen rechteckigen Steckverschluss fixiert. Im unteren Bereich folgt die Form des Kerns der Heftkontur, anschließend zieht er nach oben stark ein. Die deutlich abgesetzte Spitze passte vermutlich in eine entsprechende Öffnung auf der Innenseite der oberen (fehlenden) Abdeckplatte [Steffgen 1997-2000].

Bei der Kokille handelt es sich um einen singulären Fund. Mehr noch als bei den Beilkokillen wurden hier Zweifel laut an der Verwendbarkeit der Form zum direkten Guss. Diese können auch durch die von Drescher [1958, 78] durchgeführten Gießversuche nicht ausgeräumt werden, da er mit 20%-iger Zinnbronze gearbeitet hat, eine Legierung, die von Originalschwertgriffen nicht bekannt ist. Hauptprobleme beim direkten Guss sind zum einen die dünnen Wandpartien am Heft, die eine unvollständige Formfüllung erwarten lassen, zum anderen das Anschmelzen des Materials an der Stelle, wo der Gießstrahl auf den Metallkern trifft. Weiterhin sind Schwierigkeiten beim Auslösen des Kerns aus dem bei der Erstarrung aufschrumpfenden Gussstück zu erwarten. Entsprechende Simulationen und Experimente sollen im Folgenden näheren Aufschluss geben.

5.1.2 Röntgenaufnahmen von Mörigen-Schwertern

Ob als Kokille für den direkten Guss oder als Form für Wachsmodelle, die Bronzeform von Erlingshofen diente zum Guss von hohlen Griffen. Diese sind im Fundmaterial häufig nachgewiesen und werden von Hundt [1965, 52] als typisch für Mörigen-Schwerter beschrieben. Allerdings sind seit geraumer Zeit auch Exemplare mit massiven Griffen bekannt. Zu der Schwertvariante Preinersdorf, deren Griffprofilierung der Kontur der Erlingshofer Gussform entspricht, lassen sich herstellungstechnische Hinweise aus einigen publizierten Röntgenaufnahmen gewinnen [Steffgen, 1997-200]:

- Ein Flussfund aus dem Rhein bei Mainz-Weisenau besitzt einen kleinen, in der Griffstange unregelmäßig geformten Hohlraum, der in einen im Knauf schräg verlaufenden Luftkanal mündet, *Abb. 5.2*. Die Klinge endet in einem kurzen, schmalen Fortsatz dicht unterhalb der Griffmitte. Die dreieckige Heftplatte ist zweifach mit dem Griff vernietet [v. Quillfeldt 1995 Nr. 267, Hundt 1965, Taf. 13].
- Ebenso unregelmäßig ist der oben offene Griffinnenraum eines Schwerts aus Gransee, Kr. Gransee [Sprockhoff 1934, 118 Nr, 26, Wüstemann 1992, 46f., Abb. 2], *Abb. 5.3*. Die Klinge ist dreifach mit dem Heft vernietet. Auf der Umzeichnung der Röntgenaufnahme bei Wüstemann ist die Griffstange von der oberen Hälfte des oberen Niets bis zu Mitte mit Blei gefüllt das durch die Öffnung in der Knaufplatte eingegossen worden sein muss. Drei weitere Bleieinschlüsse sind fest im oberen Bereich des Innenraums verkeilt. Der Sinn der



Abb. 5.3: Umzeichnung der Röntgenaufnahme eines ebenfalls zum Typ Mörigen zählenden Schwerts aus Gransee. Die Klinge ist dreifach mit dem Heft vernietet. Die Griffstange ist von der oberen Hälfte des oberen Niets bis zu Mitte mit Blei gefüllt, das durch die Öffnung in der Knaufplatte eingegossen worden sein muss. Drei weitere Bleieinschlüsse sind fest im oberen Bereich des Innenraums verkeilt. Der Sinn der Bleiverfüllung ist unklar. [Wüstemann 1992, S.45, Abb. 2].



Abb. 5.4: Kopie der erhaltenen Teile (unten) der Gussform von Erlingshofen sowie die ergänzte Abdeckplatte (oben). Zu erkennen ist die in der Plattenmitte eingearbeitete Vertiefung zur Kernarettierung über den Dorn (1). Der waagerechte Steg an der unteren Seite des Dorns passt in die Vertiefung an der Innenseite der linken Formschale (2).

Bleiverfüllung ist unklar. Denkbar wäre eine zusätzliche Sicherung der Klinge im Griff, wenngleich Wüstemann [1992, 47] zu Recht darauf hinweist, dass die drei kräftigen Niete für die Fixierung völlig ausreichend sind. Auch sind Schwerter bekannt, bei denen die Bleifüllung nicht zur Sicherung der Klinge diente [Wüstemann 1992,47, Abb. 1, Driehaus 1961, 27f; Taf. 11] Daher zieht Wüstemann [1992, 48] eine magische Bedeutung in Betracht, während Driehaus [1961, 28] analog zu den Bleiauflagen bei Griffzungenschwertern ihren Zweck in der Griffbeschwerung sieht.

- Etwa bis zur Mitte des hohlen Griffs reicht die Klinge eines Schwerts vom Neuenburger See [Mohen 1971, 39, Fig. 6]. Sie ist jedoch nur durch einen über dem Heftausschnitt sitzenden Niet mit dem Griff verbunden. Abweichend von den beschriebenen Stücken verläuft hier der Griffinnenraum gerade bis zur Knaufplatte durch, wo er ebenfalls gerade endet. In der Mitte der Knaufplatte verschließt ein Metallstift eine bis zum Griffinnenraum reichende, etwa 0,5 cm breite Öffnung.
- Auch gerade, am oberen Ende jedoch abgerundet, verläuft der Hohlraum bei einem Schwert aus dem Hortfund von Kehmstedt, Kr. Nordhausen [Sprockhoff 1934, 119 Nr. 34, Taf. 19,4]. Die Auswertung der Röntgenaufnahme fasst Wüstemann [1992, 46, Abb. 2.3] zusammen: Aus dem Heftbereich des hohl gegossenen Griffes wurde der Kern entfernt. Die am Übergang zur Griffstange spitz zulaufende Klinge ist zweifach mit dem Heft vernietet. Oberhalb der Klinge ist der Tonkern bis etwa zur Mitte der Griffstange erhalten. Es schließt sich eine durch eine ca. 5 mm breite Öffnung in der Knaufplatte eingegossene Bleifüllung an, die bis zur Oberkante des Griffstangen. Die Öffnung ist mit einem Niet mit halbrundem Kopf verschlossen.
- Beschädigungen der Wandung lassen Details des Griffs eines Schwerts aus Mühlheim, Kr. Tuttlingen, erkennen [v. Quillfeldt 1995, Nr. 269]. Die schräge Orientierung des Innenraums lässt auf einen beim Guss verrutschen Kern schließen. In der Knaufplatte befindet sich ein ca. 2 cm langer Schlitz. Zwei Niete fixieren die Klinge, deren Form und Länge aus der Zeichnung allerdings nicht hervorgeht.

Unter den Schwertern der Variante Preinersdorf gibt es jedoch auch Exemplare mit massivem Griff. Der Griff des Schwerts aus Kuckenburg, Kr. Querfurt, ist mittels Überfangguss mit der Klinge verbunden [Drescher 1958, 77f., Taf. 35]. An einer Heftschulter befindet sich eine 25 mm lange, gegossene Reparaturstelle, und der Heftrand weist an mehreren Stellen Unregelmäßigkeiten auf. Hier hatte man versucht, das aus der Form gedrungene Material mit einem schmalen Meißel zu entfernen. Die Klinge endet in einer 40 mm langen, leicht verbogenen Griffangel. Drescher [1958, 78] spricht sich für eine sekundäre Verwendung der Klinge aus. Eindeutig ist dies der Fall bei einem bei Toul, Dép. Meurthe-et-Moselle, aus der Mosel ausgebaggerten Schwert. Hier wurde der Griff über eine oberhalb des Hefts abgebrochene Klinge eines Karpfenzungenschwerts gegossen [Liéger, Morguet 1974, 225f., Fig. 5-6].

5.2 Gusssimulation des Schwertgriffs aus der Form von Erlingshofen

Bei den Simulationen zur Rekonstruktion des Schwertgriffs steht zunächst die Frage nach der vollständigen Formfüllung im Vordergrund. Eine Geometrie mit derart dünnen Wandstärken lässt, vor allem beim Einsatz der gut wärmeleitenden Bronzeform als Kokille, mit Formfülldefekten aufgrund frühzeitig zugefrorener und nicht ausgelaufener Partien rechnen. Durch erhöhte Vorwärm- und Gießtemperaturen kann zwar die Formfüllung positiv beeinflusst werden, es besteht aber die Gefahr, dass der Kern durch die eingegossene Bronze zusätzlich so überhitzt wird, dass seine Oberfläche anschmilzt und mit dem Gussstück verklebt.

5.2.1 Geometrieeingabe und Vernetzung

Für die Geometrieeingabe wird eine Kopie der Form, *Abb. 5.4*, und ein darin gegossenes Wachsmodell des Griffes vermessen und maßstabsgetreu eingegeben. Die extrem dünnen Wandstärken erfordern eine sehr feine Vernetzung, *Abb. 5.5*. Zur Minimierung der benötigten Rechenkapazität wird entsprechend der originalen Formteilung nur eine der Geometriehälften berechnet. Für die andere, absolut symmetrische Hälfte gelten identische Verhältnisse und damit auch Ergebnisse (vgl. Kap.2.3.2).

5.2.2 Guss in eine Lehmform

Bislang hat sich der Parameter "Vorwärmtemperatur" der Form als der einflussreichste und gemessen an den bronzezeitlichen Gegebenheiten am ehesten variable erwiesen. Aus diesem Grund wird eine Einschätzung des zu erwartenden Gusserfolgs über Rechnungen mit Formvorwärmtemperaturen von 300°C, 350°C und 450°C vorgenommen, *Tab. 5.2.* Die übrigen Parameter bleiben mit der Legierung CuSn10, einer Gießtemperatur von 1080°C und einer Gießzeit von 3 s zunächst unverändert.

Da ein schneller Abguss die Formfüllung zusätzlich positiv beeinflusst, wird für die Vorwärmtemperatur von 450°C auch eine Füllzeit von 2 s simuliert. Dies sind gemessen an den bronzezeitlichen Möglichkeiten in etwa die optimalsten Bedingungen für eine vollständige Formfüllung, wobei eine Füllzeit von nur 2 s real nicht immer erreichbar sein wird.

5.2.3 Guss in die Bronzekokille

Beim direkten Abguss in die Bronzekokille müssen zwei gegenläufige Tendenzen berücksichtigt werden:

a) Aufgrund der guten Leitfähigkeit der Metallform kann in dünnen Geometriebereichen, wie z.B. den Heftschultern, die Schmelze bereits während des Füllvorgangs einfrieren und das vollständige Auslaufen des Formhohlraumes behindern. Gussfehler wie nicht ausgelaufene Stellen oder Kaltschweißen, wo die bereits höher viskose Schmelze zwar noch den Formhohlraum ausfüllt, zwei aufeinander treffende Schmelzeströme sich aber nicht mehr verbinden, sind die Folge.



Abb. 5.5: Für die Simulationsrechnungen vernetzte Geometrien der Griffform von Erlingshofen (a) und des darin zu gießenden Schwertgriffs (b).

 Tabelle
 5.2:
 Für den Guss in Bronze- und Lehmformen durchgeführte

 Simulationsrechnungen (Spalten 1-3) sowie die beim Guss in die Kokille am Ende einer theoretischen Formfüllung bereits erstarrten Bronzeanteile (Spalte 4).

Variation Nr.	Gießzeit [s]	Vorwärmtemperatur der Kokille [°C]	Erstarrter Bronzeanteil [%]
1	3	300	83
2	3	350	80
3	3	450	74
4	2	450	57



Abb. 5.6: Zur Kontrolle der Temperaturentwicklung während Abguss und Erstarrung wurden im Bronzekern virtuelle Thermoelemente eingesetzt. Die Messpunkte 1-8 liegen auf der Mittelachse, die Messpunkte 9-11 im Bereich der Stelle, wo der Gießstrahl auf den Kern trifft.

b) Bei einer zu hohen Formtemperatur kann der Kern durch die eingegossene Bronze so stark erhitzt werden, dass seine Oberfläche anschmilzt und sich mit dem Gussstück verbindet.

Als Gussfehler sind sowohl eine unvollständige Formfüllung als auch ein verklebter, nicht auslösbarer Kern denkbar. Im schlechtesten Fall beides. Um eine obere Grenze für die Formtemperatur auszuloten, bei der der Kern noch nicht anschmilzt, wurden in der Kernspitze entlang der Mittelachse und ca. 0,5 mm unterhalb der Stelle, auf die der Gießstrahl trifft, virtuelle Thermoelemente eingesetzt, *Abb. 5.6.* Die Gießparameter werden entsprechend der Simulationen für die Lehmform gewählt (s. Tab. 5.2).

5.3 Experimenteller Nachguss des Schwertgriffs

Für den bronzezeitlichen Einsatz der Form ist einerseits denkbar, dass sie zur Herstellung von Wachsmodellen für das Wachsausschmelzverfahren diente, andererseits, dass sie direkt als Kokille für den Griffguss Verwendung fand. Beide Varianten werden nicht nur simuliert, sondern auch praktisch nachvollzogen.

Um eine Beschädigung des Originals auszuschließen, kam bei diesen Untersuchungen, wie bereits bei der Vermessung der Simulationsgeometrie, eine originalgetreue Kopie aus CuSn10 zum Einsatz (s. Abb. 5.4). Für ihre Herstellung wurden vom Original Silikonnegative abgenommen sowie die fehlende Abdeckplatte rekonstruiert und ergänzt. Für die abgesetzte Spitze des Kerns wurde zu dessen Fixierung eine Vertiefung in der Plattenmitte eingearbeitet.

5.3.1 Guss in Lehmformen

a) Herstellung der Wachsmodelle

Zum leichteren Auslösen des erstarrten Wachsmodells werden die Formteile zunächst mit Öl eingepinselt. Dieses Trennmittel wäre auch für die Bronzezeit denkbar. Nach dem Zusammensetzen der Formteile werden die Fügenähte mit Töpferton abgedichtet und das flüssige Wachs eingegossen. Die Entnahme des erstarrten Wachsmodells erfolgt, solange Form und Modell noch warm sind. Nach einer Aushärtzeit von ca. 2 h wird es versäubert und steht für das weitere Vorgehen nach dem Wachsausschmelzverfahren zur Verfügung.

b) Formherstellung

Bei der Herstellung der Form stellt sich die Frage nach dem Einbringen und Trocknen des schmalen Tonkerns. Bei einem früher am Gießerei-Institut der RWTH-Aachen durchgeführten Projekt wurden für solche Fälle gute Erfahrungen mit "erdfeuchten Stampfmassen" aus Lehm gemacht, die erst im Wärmeprozess nach dem Wachsausschmelzen vollständig trocknen [Sahm u.a. 1997, Kap. 4]. Diese Lehmmassen enthalten die minimal notwendige Feuchte, um mittels Druck eine gute Kompaktierung und Standfestigkeit zu erhalten. Sie werden als Kern eingedrückt oder -gestampft. Die enthaltene Wassermenge bereitet beim Wachsausschmelzen keine Schwierigkeiten. Die Zusammensetzung des hier verwendeten Formlehms entspricht der des inneren Formmantels der Randleistenbeile (s. Tabelle 2.2).

Um ein Verrutschen des Kerns in der Form nach dem Wachsausschmelzen und während des Abgusses zu verhindern, wird je ein Draht von unten und oben so durch das Wachsmodell in den eingestampften Kern geschoben, dass noch ca. 2 cm überstehen. Über diese sogenannten Kernhalter wird durch den anschließend aufgekneteten Lehmmantel eine Verbindung zwischen Formschale und Formkern hergestellt, die den Kern in seiner Position fixiert. Das Vorgehen beim Aufkneten des zweischichtigen Formmantels und die Lehmzusammensetzung entsprechen den Experimenten zur Reproduktion der Randleistenbeile.

c) Wachsausschmelzen und Abguss

Nach der vollständigen Trocknung der Form wird das Wachs mit Hilfe einer Gasflamme langsam vom späteren Einguss her ausgeschmolzen. Die hohlen Formen werden 24 Stunden bei 500°C im keramischen Ofen "gebrannt". Es folgt eine langsame Abkühlung auf 400°C.

Zum Abguss werden die heißen Lehmformen in Metallkästen gesetzt und mit losem Sand hinterfüllt, um einem Bersten durch thermische Spannungen und den Druck der einströmenden Schmelze vorzubeugen. Die Temperatur der Formen unmittelbar vor dem Abguss beträgt 350°C. Vergossen wird eine 10%-ige Zinnbronze mit einer Temperatur von ca. 1080°C. Die Gießzeit liegt bei ca. 3s. Es werden zwei Lehmformen ausgegossen.

5.3.2 Guss in die Kopie der Bronzeform

Für den direkten Abguss in die Bronzeform muss, wie bereits für die Simulation erläutert, einerseits die Schmelztemperatur ausreichend hoch gewählt werden um eine vollständige Formfüllung zu erreichen, andererseits muss sie niedrig genug sein, um den dünnen Kern nicht an der Oberfläche anzuschmelzen und damit eine Verbindung zwischen Form und Gussstück zu riskieren.

Diesen Gefahren soll mit einer in dieser oder ähnlicher Zusammensetzung wahrscheinlich auch in der Bronzezeit bekannten Schlichte aus 80% Knochenasche und 20% Töpferton begegnet werden (s. a. Kap. 3 u. 4). Zunächst werden der Kern und die Innenseiten der Formteile mit der Schlichte bestrichen und nach deren Trocknung über einer Terpentinflamme eingerußt. Nach dem Zusammensetzen der Kokille wird diese mit einem Draht umbunden und zur Abdichtung der Fügenähte mit einer 1 cm dicken Lehmschicht umgeben. Es folgt eine 10-stündige Trocknung bei 250°C. Die niedrige Temperatur soll eine Beschädigung der Kokille und der Schlichteschicht verhindern. Bei unvollständiger Formfüllung soll sie in einem Folgeversuch erhöht werden.

Die heiße Kokille wird entsprechend des Vorgehens bei den Lehmformen in einen Kasten gesetzt und mit Sand hinterfüllt. Die Formtemperatur unmittelbar vor dem Abguss beträgt ca. 220°C. Vergossen wird wieder eine 10%-ige Zinnbronze mit einer Temperatur von ca. 1080°C. Die Gießzeit liegt bei ca. 3 s.

5.4 Ergebnisse

5.4.1 Simulationsergebnisse

Während in Lehmformen ein erfolgreicher Abguss des dünnwandigen Schwertgriffs möglich erscheint, muss für die Bronzekokille mit erheblichen Formfülldefekten gerechnet werden. Neben der Wärmeleitfähigkeit des Formmaterials erwiesen sich die Formvorwärmtemperatur und die Gießzeit als wichtigste Parameter für den Gusserfolg.

5.4.1.1 Guss in eine Lehmform

Bei einer Gießzeit von 3 s befinden sich einzelne Partien der Gussstücke mit Temperaturen um 1000°C schon in der sog. mushy-zone zwischen Liquidus- und Solidustemperatur, *Abb. 5.7a,b.* Da die effektive Viskosität der Schmelze aber erst unterhalb von ca. 900°C stark zunimmt [Sahm u.a. 1997, 70, Bild 5.2] (s.a. Abb.2.10), ist eine vollständige Formfüllung noch wahrscheinlich. Um Formfülldefekte wie unausgelaufenen Stellen oder Kaltschweißen zu vermeiden, sollte jedoch beim realen Abguss eine möglichst hohe Vorwärmtemperatur und eine kurze Gießzeit gewählt werden. Ideale Bedingungen zeigt die Variationsrechnung 4 (2 Sekunden Gießzeit, Vorwärmtemperatur 450°C), bei der nur die äußeren Kanten der Griffplatte knapp unter 1020°C abkühlen, *Abb. 5.7c*.

Im Erstarrungsverlauf stellen sich die simulierten Griffabgüsse sehr ähnlich dar. Zuletzt erstarren der obere Griffwulst und der Übergang zwischen Griffstange und Knaufplatte, *Abb.* **5.8a**. Da die schneller abkühlende Knaufplatte die Nachspeisung vom Anschnitt her verhindert, übernimmt der darunterliegende Geometriebereich diese Funktion. Dementsprechend ist im oberen, dem Einguss zugewandten Übergangsbereich zwischen Griffstange und Knauf Lunkerbildung zu erwarten, *Abb.* **5.8b**.

5.4.1.2 Guss in die Bronzekokille

a) Formfüllung

Bei den als realistisch anzunehmenden Parametern einer Gießzeit von 2-3 s und einer Gießtemperatur von 1080°C kann bei keiner der gewählten Vorwärmtemperaturen, die nach den bisherigen Erkenntnissen ebenfalls als im Rahmen der bronzezeitlichen Gegebenheiten liegen, eine vollständiger Formfüllung errechnet werden.

Bereits bei 40%-50% Formfüllung ist die Schmelztemperatur in den dünnen Heftschultern unter die Solidustemperatur von 830°C gefallen, *Abb. 5.9*. Dadurch wird die weitere Füllung der Heftflügel behindert. Insgesamt sinkt die Temperatur so früh in das Erstarrungsintervall und darunter ab, dass zusätzlich zu den Fehlstellen in den Heftflügeln mit Kaltschweißen in der Knaufplatte zu rechnen ist. Am Ende einer theoretischen Füllung ist bereits über die Hälfte der eingefüllten Bronze erstarrt (*Tab. 5.2, Spalte 4*).

b) Kernerhitzung

Der Temperaturverlauf lässt bei einer Gießzeit von 3 s und Vorwärmtemperaturen von 300°C und 350°C sowie bei der Kombination 450°C Formtemperatur und 2 s Gießzeit keine



Abb. 5.7: Temperaturverteilung am Ende des Formfüllvorgangs für den Abguss in Lehmformen. Bei einer Gießzeit von 3s (a, b) befinden sich bei allen Vorwärmtemperaturen schon größere Gussstückbereiche unterhalb der Liquidustemperatur (1020°C). Erst eine extrem kurze und im Experiment kaum realisierbare Gießzeit von 2s kombiniert mit einer Vorwärmtemperatur von 450°C (c) reicht zur sicheren Formfüllung aus. Hier kühlen nur die äußersten Ränder der Griffplatte in das Erstarrungsintervall (grün) ab.



Abb. 5.8: Erstarrungszeiten (a) und zu erwartende Porositäten (b) bei den in Lehmformen gegossenen Schwertgriffen. Im oberen, dem Einguss zugewandten Übergangsbereich Schaft/Platte ist eine poröse Zone zu erwarten.



Abb. 5.9: Temperaturverteilung in der Schmelze bei 40% Füllung der Bronzeform. Bei allen Parametervariationen ist die Schmelze bereits so weit in das Erstarrungsintervall (grün) oder darunter (blau) abgekühlt, dass eine vollständige Füllung der Heftflügel durch die dünnen Heftschultern hindurch unwahrscheinlich ist. (s.a. Tabelle 5.2).



Abb. 5.10: Temperaturverlauf im Kern der Bronzeform während Formfüllung und Erstarrung bei einer Vorwärmtemperatur der Form von 450°C und einer Gießzeit von 3s (Parametervariation Nr. 3). Der Metallkern erreicht im Bereich des auftreffenden Gießstrahls für ca. 2s Temperaturen oberhalb $T_{solidus}$. Um ein Verkleben mit dem Gussstück zu vermeiden, sollten kürzere Gießzeiten bei etwas niedrigeren Vorwärmtemperaturen angestrebt werden.

Schwierigkeiten bezüglich einer Überhitzung des Metallkerns erwarten. Die Thermoelemente zeigen während des gesamten Formfüll- und Erstarrungsvorgangs Temperaturen unterhalb der Solidustemperatur von 830°C an.

Bei der Parameterkombination 3 (Vorwärmtemperatur 450°C, Gießzeit 3 s) erreicht der Metallkern jedoch im Bereich des auftreffenden Gießstrahls Werte über 830°C, *Abb. 5.10*. Die Überhitzung beginnt für die heißesten Bereiche an der Oberfläche ca. 2,5 s nach Füllbeginn und hält ca. 2 s an. Ein Temperaturmaximum von 850°C wird am Ende des Formfüllvorgangs (3 s) erreicht. Ob diese Temperaturverhältnisse real ein Verkleben der Kernspitze mit dem Gussstück bewirken, ist unklar. Es wird jedoch eine obere Grenze für die Formtemperatur und die Gießzeit deutlich.

5.4.2 Experimentelle Nachgüsse

5.4.2.1 Abgüsse aus den Lehmformen

Beide Schwertgriffe sind vollständig ausgelaufen und lassen abgesehen von den für das Wachsausschmelzverfahren üblichen Oberflächenrauhigkeiten äußerlich keine Gussfehler erkennen. Ein Exemplar weist jedoch unterhalb der Griffplatte ein etwa stecknadeldickes "Loch" auf, dessen Lage in etwa der simulierten Porositätszone entspricht.

Die Röntgenaufnahme, *Taf.* 29, lässt erkennen, dass die innere Kontur nicht der Form des Kerns folgt, sondern zur defekten Oberflächenstelle hin aufweitet. Ein Längsschnitt durch den Griff entlang der Formteilung zeigt, dass sich am oberen Ende des Formkerns unterhalb der Griffplatte eine Luftblase ausgebildet hat, die an dem kleinen Loch eine Öffnung nach außen bildet, *Abb. 5.11*. Ein entsprechender Schnitt durch das Wachsmodell lässt die ursprüngliche Innenkontur des Griffs erkennen, *Abb. 5.12*.

Vergleichbare "Deformationen" der Innenkontur sind auch für Röntgenbilder von Originalen dokumentiert (Kap. 5.1.2). Diese langgezogenen "Luftkanäle" zur Griffoberseite sind ebenfalls mit aufsteigenden Gasblasen zu erklären, die von der erstarrenden Schmelze eingeschlossen wurden.

5.4.2.2 Abguss aus der Kopie der Bronzeform

Die Kokille ist vollständig ausgelaufen und der Metallkern ließ sich durch kräftige Schläge auf den außenliegenden Absatz desselben heraustreiben. Die glatte Oberfläche bildet alle Konturen ab, *Abb. 5.13*. Auch die Innenkontur erscheint vollständig. Zwischen die Fügenähte der Form ist Schmelze eingedrungen und hat schmale Grate ausgebildet, die jedoch leicht zu befeilen waren. Für entsprechende Korrekturarbeiten bediente man sich in der Bronzezeit natürlicher rauher Materialien wie etwa Sandstein. Die Knaufplatte weist eine leicht poröse Einfallstelle in Richtung Einguss auf. An dem durch die Kernfixierung entstandenen Loch ist leichte Rissbildung zu erkennen, wo die Bronze aufgeschrumpft ist.



Abb. 5.11: Entlang der Formteilung aufgeschnittener Nachguss des Schwertgriffs aus einer Lehmform. Die erstarrende Schmelze hat am oberen Ende des Formkerns unterhalb der Griffplatte eine aufsteigende Luftblase eingeschlossen (Pfeile).



Abb. 5.12: Das entlang der Formteilung Abb. 5.13: Erfolgreich in der Kopie der aufgeschnittene Wachsmodell zeigt die ursprüngliche Innenkontur des Schwertgriffes aus der Form von Erlingshofen.

Gussform von Erlingshofen gegossener Schwertgriff nach Abtrag der Gussgrate. Die vergleichsweise glatte Oberfläche bildet alle Konturen ab.

5.5 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Ein erfolgreicher Abguss des Schwertgriffes nach der Form von Erlingshofen ist den Simulationsrechnungen zufolge nur nach dem Wachsausschmelzverfahren in Lehmformen möglich. Sie sind aufgrund ihrer guten Isolationswirkung auch für dünnwandige Gussstücke geeignet und lassen im Rahmen der als realistisch anzunehmenden Parameter wenig Schwierigkeiten bei der Formfüllung erwarten. Bei den Bronzeformen ist hingegen kaum mit einem Gusserfolg zu rechnen. Die Möglichkeit ihre gute Wärmeleitfähigkeit mit einer starken Erhöhung der Formvorwärmtemperatur zu kompensieren ist durch den innenliegenden Metallkern begrenzt. Es besteht die Gefahr, dass er sich während Abguss und Erstarrung so stark erhitzt, dass die Oberfläche unlösbar mit dem Gussstück verklebt.

Der experimentelle Guss in die Kopie der Bronzegussform von Erlingshofen belegt jedoch, dass ein direkter Abguss mit einer für Mörigen-Schwerter nachgewiesenen Legierung (CuSn10) möglich ist. Erforderlich ist allerdings die Verwendung einer gut isolierenden Schlichte, um die Formfüllung zu sichern und ein Verkleben des Metallkerns mit dem Gussstück zu verhindern. Für die eingesetzte, oder ähnliche Schlichten liegen keine thermophysikalischen Daten vor. Um entsprechend korrigierte Simulationen durchzuführen, müssten zunächst Untersuchungen in dieser Richtung unternommen werden.

Die erfolgreich nach dem Wachsausschmelzverfahren gegossenen Griffe machen gleichzeitig die Verwendung der Griffform von Erlingshofen als Gussform für Wachsmodelle denkbar. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die Wachsmodelle leicht zu unterschiedlichen Typen modifiziert werden können.

Unabhängig vom gewählten Formstoff lässt sich geometriebedingt sowohl in den virtuellen als auch in den realen Abgüssen eine bevorzugte Porositätsstelle im dem Einguss zugewandten Übergang zwischen Schaft und Knauf ausmachen. Dieser relativ spät erstarrende Gussstückbereich übernimmt einerseits Speisungsfunktion, andererseits sammeln sich hier aufsteigende Gasblasen, da die darüberliegende Knaufplatte bereits sehr früh erstarrt. Entsprechend des Nachgusses aus der Lehmform zeigen auch Röntgenaufnahmen von Originalfunden der Mörigen-Schwerter mit hohl gegossenen Griffen häufig unregelmäßige Hohlräume.

Neben hohlen Griffen existieren auch solche, die massiv und meist auf die Klinge aufgegossenen sind. Dieses Verfahren stellte wahrscheinlich eine Möglichkeit dar, Klingen zu verwenden, die ursprünglich nicht für Mörigen-Schwerter hergestellt wurden.

6 Diskussion und Ausblick

In dieser Arbeit sollten mit Hilfe moderner Methoden der Werkstoff-Forschung und Gießereitechnologie sowie gießtechnologischen Experimenten neue Ansätze zur Lösung technikgeschichtlicher Fragestellungen gefunden werden. Ausgangspunkt war die gute Fundsituation in der Bronzezeit, aus der zahlreiche gegossene Metallgegenstände überliefert sind. Die Auswahl der Objekte erfolgte auf Grundlage einer makroskopischen und mikroskopischen Autopsie, die insbesondere gießtechnisch relevante Merkmale berücksichtigte. Zur Objekterfassung gehörten zusätzlich die Anfertigung von Röntgenaufnahmen sowie metallographische Untersuchungen. Die formenkundliche, archäologische Einordnung erfolgte durch die Prähistorische Staatssammlung München [Steffgen, 1997-2000].

Kernstück der Rekonstruktion bronzezeitlicher Gießtechniken war die numerische Simulation, deren Ergebnisse die Ausgangsbasis für die anschließenden "quasibronzezeitlichen" Gießversuche bildeten. Die erhaltenen Objekte wurden nach den gleichen Kriterien erfasst wie die Originale und mit ihnen verglichen.

Die Untersuchungen erstreckten sich hauptsächlich auf Randleistenbeile und Lappenbeile sowie deren Gussformen aus Lehm, Sandstein und Bronze. Dabei standen zwei Fragenkomplexe im Vordergrund:

- 1. Ausgehend von den Randleistenbeilen eine genaue Analyse der Techniken bei Gus und Nachbearbeitung.
- Die Untersuchung von Bronzekokillen, die maßgeblich der Perfektionierung des Gusses seit der mittleren Bronzezeit dienten. Hierbei wurde neben dem Gus in die Kokille auch deren Herstellung selbst beleuchtet.

Mit den Schwertgriffen wurde schließlich ein Teil einer Objektgattung (Schwerter) einbezogen, die in ihrer Zeit einen nicht nur praktischen sondern auch repräsentativen Zweck erfüllte. Von besonderem Interesse war das bronzezeitlich eingesetzte Formmaterial.

Für die Randleistenbeile zeigte bereits die Autopsie Hinweise auf eine mechanische Überarbeitung. Metallographische Untersuchungen und vergleichende Röntgenaufnahmen an unterschiedlich stark überschmiedeten Nachgüssen bestätigten diese Beobachtungen. Das Ausschmieden von Nacken, Randleisten und Schneide muss aber nicht nur als gängige Arbeitsmethode angesehen werden, gegossene Rohlinge umzuformen, sondern auch ihren Gebrauchswert durch Härten zu steigern.

Für das Gussverfahren selbst konnte aufgrund des Vergleichs der Röntgenaufnahmen mit den Simulationsergebnissen und den Nachgüssen ein Anschnitt am Beilnacken und der Gebrauch mineralischer Formen favorisiert werden. Gießtechnisch sinnvoller wäre zwar ein seitlicher Anschnitt über der Beilmitte, entsprechende Hinweise gibt es jedoch im hier untersuchten archäologischen Material nicht. Für die Gussformen ist wahrscheinlich, dass neben den überlieferten Exemplaren aus Stein auch solche aus Lehm zur Beilproduktion im Wachsausschmelzverfahren eingesetzt wurden.

Die in der mittleren Bronzezeit aufkommenden und später weit verbreiteten Lappenbeile scheinen zwar ein, besonders in bezug auf die Schäftung, funktional ausgereiftes Werkzeug gewesen zu sein, die hohen Schaftlappen erwiesen sich jedoch gießtechnisch als ungünstige Geometrie bezüglich des Auslösens aus den eingesetzten Dauerformen. Obwohl der Einsatz von geeigneten Schlichten dieses Problem verringerte und auch für die Bronzezeit anzunehmen ist, belegen die an Originalformen typischen horizontalen Brüche dicht unterhalb der Schaftlappenkontur eine hohe mechanische Beanspruchung der Form beim Öffnen und beim Auslösen des Rohlings. Für die Bestimmung des eingesetzten Formstoffes am Lappenbeil selbst konnte mit den Fehlstellen an Ösen und Schaftlappen ein Kriterium für die Identifikation des Bronzekokillengusses herausgearbeitet werden.

Die Herstellung von Bronzekokillen konnte mittels Simulationsmodellen und anschließenden Experimenten in zwei möglichen bronzezeitlichen Verfahren rekonstruiert werden:

- Ein Prototyp des in der Kokille zu gießenden Bronzebeils bestimmt als Formbestandteil die innere Kokillenkontur. Ferner wird die zweite Kokillenhälfte direkt auf die erste gegossen. Diese Methode setzt zwar der Parameterwahl enge Grenzen und erfordert die Verfügbarkeit eines bronzenen Prototypen, erscheint aber als ausgereift in bezug auf die innere Oberfläche und die Passgenauigkeit der Formhälften.
- 2. Das einfachere Wachsausschmelzverfahren erforderte zwar handwerkliches Geschick im Umgang mit den Wachsmodellen, hat aber neben einer größeren Parametertoleranz den Vorteil, dass man bei dem Material für das Modell der in der Kokille herzustellenden Objekte auf verschiedene Materialien zurückgreifen kann.

Möglicherweise existierten beide Verfahren, oder Modell 1 löste das Wachsausschmelzverfahren im Laufe der Zeit mit zunehmender Erfahrung im Kokillenguss ab. Untersuchungen an der Originalkokille vom Bullenheimer Berg legten im Vergleich mit den Nachgüssen und Simulationsergebnissen nahe, dass sie nach dem ersten Verfahren hergestellt wurde.

Die Erkenntnisse über Kokillenguss und -herstellung legten eine neue Beurteilung der Wertschätzung von Bronzekokillen nahe, die im Vergleich zu solchen aus Stein allgemein, vor allem mit dem Hinweis auf den Herstellungsaufwand, als wertvollere Werkzeuge betrachtet werden. Die Rekonstruktion hat aber gezeigt, dass die Bronzekokillenfertigung zwar Erfahrung und Geschick erforderte, aber im Gegensatz zur Steinkokillenproduktion keinerlei über das Metallhandwerk hinausgehende Fertigkeiten. Außerdem waren die benötigten Werkstoffe den Gießern vertraut und Fehler ließen sich in jeder Phase des Herstellungsprozesses ohne Materialverlust beheben. Die Entwicklung der Bronzekokille dokumentiert somit vor allem eine Produktionsvereinfachung und damit einen technischen und gesellschaftlichen Fortschritt. Materiell war sie aber nicht automatisch höher zu bewerten. Für den Gus des dünnwandigen Schwertgriffes nach der Form von Erlingshofen belegt das Experiment zwar im Gegensatz zu den Simulationsrechnungen, dass ein direkter Abguss in die Bronzekokille möglich ist. Denkbar ist aber auch, vor allem in Hinblick auf ähnliche Gussfehler bei Nachgüssen aus Lehmformen und Originalen, die Verwendung der Griffform von Erlingshofen als Gussform für Wachsmodelle. Der Vorteil des Wachsausschmelzverfahrens liegt darin, dass die Modelle leicht zu unterschiedlichen Typen modifiziert werden können.

Über die systematische Hinterfragung der Entstehung einzelner Objekte konnten unter Einbeziehung bereits existierender Ergebnisse weitreichende Erkenntnisse zur bronzezeitlichen Beilproduktion, dem Kokillenguss und der Kokillenproduktion gewonnen werden. Dennoch bleiben Fragen offen, die eine nähere Betrachtung verdienen:

- Anhand der bisherigen Erkenntnisse ist die ursprüngliche Gussgeometrie eines Randleistenbeils nicht letztlich zu bestimmen. Auch ist nicht klar, in wieweit Randleisten bereits im Gus angelegt wurden. Wie die beiden untersuchten Originalfragmente belegen, war dieser Aspekt offensichtlich individuell gelöst. Interessant wäre eine automatische Parameteroptimierung, die einen Zusammenhang zwischen dem Verformungsgrad von nichtmetallischen Einschlüssen und der äußeren Geometrie herstellt.
- Eine Identifikation des Formmaterials bei originalen Beilen anhand von Röntgenaufnahmen und geätzten Oberflächen war nicht eindeutig möglich. Ausgedehnte Reihenuntersuchungen könnten hier weitreichendere Aussagen über den genauen Informationsgehalt der Untersuchungsmethoden ermöglichen. Ähnliches gilt für die Herausstellung des gängigen Herstellungsverfahrens für Lappenbeile.
- Beim praktischen Gus in Bronzeformen erwies sich das vorherige Schlichten der Kokille als vorteilhaft. Untersuchungen über den Einfluss von Schlichten auf das Fließ- und Erstarrungsverhalten der Bronze und damit auch auf ihre innere Struktur würden sicherlich zusätzliche Erkenntnisse über die bronzezeitlichen Gießtechniken und die eingesetzten Formstoffe bringen. Um entsprechend korrigierte Simulationen durchzuführen, müssten zunächst thermophysikalische Daten für die eingesetzte oder ähnliche, prähistorisch denkbare Schlichten ermittelt werden.

Die in dieser Arbeit mit oft modernster Technik gewonnenen Erkenntnisse über die prähistorischen Produktionstechniken bescheinigen den bronzezeitlichen Metallhandwerkern ein großes technisches Wissen und die Beherrschung komplizierter Fertigungsverfahren mit in unseren Augen einfachsten Hilfsmitteln. Wenngleich die untersuchten Objekte im Vergleich zur Gesamtzahl bekannter bronzezeitlicher Gusserzeugnisse nur einen geringen Ausschnitt repräsentieren, lässt sich in der Vielfalt der technischen Umsetzungen doch eine Evolution hin zu den besten Lösungen erkennen.

Literaturverzeichnis 7

[Abels 1972]	BU. Abels: "Die Randleistenbeile in Baden-Württemberg, dem Elsaß, der Franche-Comté und der Schweiz." PBF IX, 4. München.
[Anemüller 1997]	U. T. Anemüller: "Metallkundliche Untersuchungen an Bronzebeilen - ein Beitrag zur Technologie der Bronzezeit", Ungedruckte Dissertationschrift, Fakultät f. Maschinenwesen Univ. Hannover.
[Billig 1956/57]	G. Billig: "Das Prunkbeil von Schweta", Arbeits- und Forschungsber. sächs. Bodendenkmalpflege 6, 1956/57, 285-316.
[Bocquet 1969]	A. Bocquet: "Isère préhistorique et protohistorique", Gallia Préhist. 12, 1969, 273-400.
[Briard 1984]	J. Briard: "L'outillage des fondeurs de l'âge du bronze en Armorique", in: Paléometallurgie de la France Atlantique. Age du Bronze I (Rennes) 139-168.
[Cordier 1996]	G. Cordier: "Le Dépôt de l'Âge du Bronze Final du Petit-Villatte à Neuvy-sur-Barangeon (Cher) et son contexte régional", Joué-lès-Tours.
[Damerow, Herr 1955]	"Hilfsbuch für die praktische Werkstoffabnahme in der Metallindustrie", 4. verbesserte Auflage von O. Niezoldi, Berlin/Göttingen/Heidelberg.
[Déchelette 1910]	J. Déchelette: "Manuel d'Archéologie préhistorique, celtique et gallo- romaine II", Archéologie celtique ou protohistorique, Âge du Bronze. Appendices. Paris.
[Diemer 1995]	G. Diemer: "Der Bullenheimer Berg und seine Stellung im Siedlungsgefüge der Urnenfelderkultur Mainfrankens", Materialh. Bayer. Vergesch., Reihe A, Bd. 70. Kallmünz.
[DKI 1999]	Internet-Information des Deutschen Kupferinstitutes Düsseldorf, www.kupfer.org : "Härtewerte-Vergleich, Umrechnung in Festigkeit".
[DKI- Informationsdruck]	Deutsches Kupfer-Institut, Informationsdruck "Kupfer-Zinn- Legierungen (Zinnbronzen, Rotguß, Guß-Zinn-Bleibronzen)", Kap. 4.
[Drescher 1957]	H. Drescher: "Der Bronzeguß in Formen aus Bronze", Die Kunde N.F. 8, 1957, 52-74.
[Drescher 1958]	H. Drescher: "Der Überfangguß. Ein Beitrag zur vorgeschichtlichen Metalltechnik", Mainz.
[Drescher 1994]	H. Drescher: "Gutachten zur Gußform vom Bullenheimer Berg", in: A. Braun: "Vier neue Depotfunde der Urnenfelderzeit – Versuch einer Herkunftsbestimmung", ungedruckte Magisterarbeit Univ. Würzburg, 92-101.
[Driehaus 1961]	J. Driehaus: "Röntgenuntersuchungen an bronzenen Vollgriffschwertern", Germania 39, 1961, 22-31.
[Engler, Göckmann 1971]	S. Engler, K. Göckmann: "Erstarrungs- und Lunkerverhalten von Kupfer und Kupferlegierungen", Metall 25, 1971, 1225-1237.

[Evans 1881]	J. Evans: "Ancient bronze implements, weapons and ornaments of Great Britain and Ireland", London.	
[Fasnacht 1995]	W. Fasnacht: "4000 Jahre Kupfer- und Bronzeguß im Experiment" in: Experimentelle Archäologie Bilanz 1994. Arch. Mitt. Nordwestdeutschland Beih. 8 (Oldenburg) 237-246.	
[Fasnacht 1998]	W. Fasnacht: "Experimentelle Archäologie in der Schweiz", Archäologie der Schweiz 21, 1998, 72-76.	
[Goldmann 1985]	K. Goldmann: "Bronzegußtechniken im prähistorischen Mitteleuropa", in: H. Born (Hrsg.), Archäologische Bronzen. Antike Kunst. Moderne Technik (Berlin) 52-57.	
[Hansen 1991]	S. Hansen: "Studien zu den Metalldeponierungen während der Urnenfelderzeit im Rhein-Main-Gebiet", Bonn.	
[Hansen 1994]	S. Hansen: "Studien zu den Metalldeponierungen während der älteren Urnenfelderzeit zwischen Rhônetal und Karpatenbecken", Bonn.	
[Harrison 1980]	R.J. Harrison: "A Late Bronze Age Mould from Los Oscos (Prov. Oviedo)", Madrider Mitt. 21, 1980, 131-139.	
[Hodges 1960]	H.W.M. Hodges: "The Bronze Age Moulds of the British Isles. Part 2: England and Wales - Moulds of stone and bronze", Sibrium 5, 1960, 153-162.	
[Hundt 1965]	HJ. Hundt: "Produktionsgeschichtliche Untersuchungen über den bronzezeitlichen Schwertguß", Jahrb. RGZM 12, 1965, 41-58.	
[Hundt 1973]	HJ. Hundt: "Rezension BU. Abels, Die Randleistenbeile in Baden- Württemberg, dem Elsaß, der Franche-Comté und der Schweiz", PBF IX,4. Jahrb. RGZM 20, 1973, 203-211.	
[Hundt 1976]	HJ. Hundt: "Ein frühbronzezeitlicher Kupferhammer aus Meckenheim, Kr. Neustadt/Weinstraße", Arch. Korresbl. 6, 1976, 117-122.	
[Jantzen 1991]	D. Jantzen: "Versuche zum Metallguß in der nordischen Bronzezeit", Experimentelle Archäologie. Bilanz 1991. Archäologische Mitteilungen aus Norddeutschland, Beiheft 6, 305-316.	
[Jockenhövel 1994]	A. Jockenhövel: "Raum und Zeit – Gliederung der Bronzezeit", Sonderheft Bronzezeit in Deutschland der Zeitschrift Archäologie in Deutschland, C. Konrad Theiss Verlag GmbH & Co., Stuttgart, 1994.	
[Junghans u.a. 1968]	S. Junghans, E. Sangmeister, M. Schröder: "Kupfer und Bronze in der frühen Metallzeit Europas", Studien zu den Anfängen der Metallurgie 2,1-3. Berlin.	
[Kibbert 1980]	K. Kibbert: "Die Äxte und Beile im mittleren Westdeutschland I", PBF IX, 10. München.	
[Kibbert 1984]	K. Kibbert: "Die Äxte und Beile im mittleren Westdeutschland II" PBF IX, 13. München.	
[Klaasen 1997]	O. Klaasen: "Archäometallurgische Untersuchungen bronzezeitlicher Beile unter Verwendung der numerischen Simulation", Studienarbeit am Gießerei-Institut der RWTH Aachen.	

[Kolling 1968]	A. Kolling: "Späte Bronzezeit an Mosel und Saar", Bonn.
[Liéger, Morguet 1974]	A. Liéger, R. Morguet: "Découvertes recentes dans les Dragages de Toul et de Chaudeney-sur-Moselle (Meurthe-et-Moselle)", Rev. Arch. Est et Centre-Est 25, 1974, 215f.
[Mayer 1977]	E.F. Mayer: "Die Äxte und Beile in Österreich", PBF IX, 9. München.
[Mohen 1971]	JP. Mohen: "Quelques épées à poignée métallique de l'âge du bronze conservées au Musée des Antiquités Nationales" Antiquités Nationales 3, 1971, 29-46.
[Mohen 1978]	JP. Mohen: "Moules en bronze de l'Âge du Bronze", Antiquités Nationales 10, 1978, 23-32.
[Mohen 1980/81]	JP. Mohen: "Moules multiples des fondeurs de l'âge du bronze", Antiquités Nationales 12/13, 1980/81, 27-33.
[Mohen, Eluère, 2000]	JP. Mohen, Ch. Eluère: "The Bronze Age in Europe: Gods, Heroes and Treasures", Chapter 2, Thames & Hudson, London 2000.
[Nicolardot, Verger 1998]	J. P. Nicolardot, S. Verger: "Le dépôt des Granges-sous-Grignon (Côte-d'Or)", in: C. Mordant, M. Permot, V. Rychner (Hrsg.), L'Atelier du bronzier en Europe du XXe au VIIIe siècle avant notre ère. Production, circulation et consommation du bronze (Paris) 9-32.
[Novotná 1970]	M. Novotná: "Die Äxte und Beile in der Slowakei", PBF IX,3. München.
[Pászthory, Mayer 1998]	K. Pászthory, E.F. Mayer: "Die Äxte und Beile in Bayern", PBF IX, 20, Stuttgart.
[v. Quillfeldt 1995]	I. v. Quillfeldt: "Die Vollgriffschwerter in Süddeutschland", PBF IV, 11. Stuttgart.
[Ratka 1997]	M. Ratka: "Gießtechnologische Experimente und numerische Simulation zur Bestimmung der Fertigungstechnik hellenistischer Bronzestatuen", S. 68. Dissertation am Gießerei-Institut der RWTH Aachen, Mainz-Verlag Aachen 1997.
[Ratka, Sahm 1997]	M. Ratka, P.R. Sahm: "Antike Gußtechnik in der numerischen Simulation", in G. Zimmer, N. Hackländer (Hrsg.), Der Betende Knabe. Original und Experiment (Frankfurt/M. 1997) 76-80.
[Roselli 1999]	Internet-Herstellerinformation: www.roselli.fi.
[Sahm, Gebhard 1995]	P.R. Sahm, R. Gebhard: "Gießerei in der Bronzezeit - Rekonstruktion der Technik und Untersuchung der wechselseitigen Abhängigkeit von technischem Wissen und Gestaltung der Objekte", Antrag für das Förderprojekt II/71795 - VW Stiftung, Förderschwerpunkt Archäometallurgie. Gießerei-Institut der RWTH Aachen und Prähistorische Staatssammlung München.
[Sahm, Gebhard u.a. 1997]	P.R.Sahm, R.Ellerbrok, M.Wirth und R.Gebhard, U.Steffgen: "Gießerei in der Bronzezeit - Rekonstruktion der Technik und Untersuchung der wechselseitigen Abhängigkeit von technischem Wissen und Gestaltung der Objekte", Förderprojekt II/71795 - VW

	Stiftung, Jahresbericht 1997, S. 6-14. Gießerei-Institut der RWTH Aachen und Prähistorische Staatssammlung München.
[Sahm, Zimmer u.a. 1997]	P.R. Sahm, M. Ratka, R. Ellerbrok, G. Zimmer, N. Hackländer: "Bestimmung der Gußtechnik und Werkstattorganisation bei der Herstellung antiker Großbronzen mittels numerischer Simulation und experimentellem Abguß", Abschlußbericht 1997 zum Förderprojekt II/68819 - VW-Stiftung, Gießerei-Institut, RWTH Aachen und Antikensammlung Berlin.
[Schauer 1971]	P. Schauer: "Die Schwerter in Süddeutschland, Österreich und der
[Schneider, Formigli 1993]	E. Formigli, G. Schneider: "Antichi terre di fusione (dt.: G. Schneider). "Antichi officini di bronzo-materiali, strumenti, technichi" (Siena) Kap. 5.
[Schneider, Zimmer 1984]	G. Schneider, G. Zimmer: "Technische Keramik aus antiken Bronzegußwerkstätten in Olympia und Athen. Berliner Beitrag Archäometrie 9, 1984, 17-60.
[Schuldt 1959]	E. Schuldt: "Mecklenburgische Altertümer", Abb. 33, Schwerin.
[Schumann 1969]	H. Schumann: "Metallographie", Leipzig.
[Sprockhoff 1934]	E. Sprockhoff: "Die germanischen Vollgriffschwerter der jüngeren Bronzezeit", Röm. Germ. Forsch. 9. Berlin, Leipzig.
[Sprockhoff 1956]	E. Sprockhoff: "Jungbronzezeitliche Hortfunde der Südzone des Nordischen Kreises (Periode V)", Kat. RGZM 16, S. 34, Taf. 9.6. Mainz.
[Steffgen 1997]	U. Steffgen: Archäologische Ausarbeitungen in [Sahm, Gebhard u.a. 1997]
[Steffgen 1997-2000]	Persönliche Gespräche und zur Verfügung gestellte Unterlagen im Rahmen des Förderprojekts II/71795 - VW Stiftung "Gießerei in der Bronzezeit - Rekonstruktion der Technik und Untersuchung der wechselseitigen Abhängigkeit von technischem Wissen und Gestaltung der Objekte", Gießerei-Institut der RWTH Aachen und Prähistorische Staatssammlung München.
[Steffgen, Wirth 1999]	U. Steffgen, M. Wirth: "Eine bronzene Gußform für Lappenbeile vom Bullenheimer Berg/Mainfranken", in: Dedicatio. Hermann Dannheimer zum 70. Geburtstag. Kat. Prähist. Staatsslg. Beih. 5 (Kallmünz) 35-56.
[Voce 1951]	E. Voce: "Bronze castings in ancient moulds", in: H.H. Coghlan, Notes on the Prehistoric Metallurgy of Copper and Bronze in the Old World. Occ. Pap. Technology 4 (Oxford) 112-115.
[Wahle 1925]	E. Wahle: "Schatzfund der Bronzezeit von Griesheim", BezA. Offenburg. Badische Fundber. 1, 1925, 44-46.
[v. Weingraber 1952]	H. v. Weingraber: "Technische Härtemessung", München.
[Wirth 1995]	M.Wirth: "Untersuchungen keramischer Kern- und Formmantel- werkstoffe zur Rekonstruktion hellenistischer Gießtechniken bei

dünnwandigen Großbronzen", S.XX. Diplomarbeit am Gießerei-Institut der RWTH Aachen.

- [Wirth u.a. 1999] M.Wirth, R.Ellerbrok, P.R.Sahm, 1999: "Archäometallurgie, Gießen in der Bronzezeit", Gießerei Forschung 51, S. 105-109
- [Wolf 1999] J. Wolf: "Multifunktionales Konzept zur automatischen rechnergestützten Optimierung von Gießprozessen", S. 88-90. Dissertation am Gießerei-Institut der RWTH Aachen, Shaker-Verlag Aachen 1999.
- [Wüstemann 1992] H. Wüstemann: "Jungbronzezeitliche Vollgriffschwerter mit Bleifüllung", Arbeits- u. Forschungsber. sächs. Bodendenkmalpflege 35, 1992, 39-49.
- [Wüstemann 1994/95] H. Wüstemann: "Die radiographische Auswertung der Schwertfunde aus dem Hort von Berlin-Buch", Acta Arch. Praehist. 26/27, 1994/1995, 122-128.
- [Zwicker 1984] U. Zwicker: "Metallographische und analytische Untersuchungen aus den Grabungen der Bronzegießerei in der Phidias-Werkstatt von Olympia und Versuche zum Schmelzen von Bronze in flachen Tiegeln. Berliner Beitrag Archäometrie 9, 1984, 61-94.

Anhang 1 Nachschmieden eines bronzezeitlichen Randleistenbeils

Die Arbeiten wurden im Rahmen des smîde-Projekts an der Mies-van-der-Rohe-Schule, Aachen, durchgeführt. Im einzelnen waren dies: Lothar Ahrensmeier, Jörg Bontenbroich (Schmiede) Roger Mürkens (Schmiedemeister). Den Bericht verfasste der Projektverantwortliche, Herr Lutz Thelen.

Vorbemerkungen

In unserem Bericht zur Herstellung des bronzeitlichen Beils gehen wir davon aus, dass heute bekannte Arbeitstechniken des Freiformschmiedens auch vor 3500 Jahren angewendet wurden. Es werden Werkzeuge zugrundegelegt, die mit den damaligen Möglichkeiten herstellbar waren oder direkt genutzt werden konnten (z.B. Steine, Holz).

Für das vorliegende bronzezeitliche Beil, *Abb. A1-1*, sind folgende Merkmale für die Bestimmung des Herstellungsverfahrens und der Arbeitstechniken wesentlich:

- 1. mit Ausnahme der Schneide sehr gleichmäßige, symmetrische Form,
- 2. scharfe Kanten an den Randleisten und der Schneide
- 3. bisher angenommene Herstellung: vorgegossen und nachgeschmiedet, kaltverfestigt
- 4. bisher angenommenes Werkzeug zur Bearbeitung: großer Bronzeammer (Muster lag vor)
- 5. Werkstoff Bronze: Cu mit 1,2% Sn; 0,4% As; 0,6% Sb; 0,4% Ni
- 6. Alter ca. 3500 Jahre





Abb. A1-1: Bronzezeitliches Randleistenbeil

Detailaufnahme einer überschmiedeten Randleiste.

Durchführung des Schmiedeversuchs

Die vorgegossenen Rohteile wurden im kalten Zustand ausgeschmiedet. Die Randleisten, die für die Schmiededemonstration, *Abb. A1-2*, gewählt wurden, sind durch Stauchen und anschließendes Freiformschmieden gut herausschmiedbar. Gearbeitet wurde mit einem

Polierhammer (ballförmiger Hammer, ca. 350 gr.) auf einer Holz- bzw. Steinunterlage. Besondere Hilfsmittel und spezielle Werkzeuge wurden von uns nicht benutzt. Die Verwendung von Sonderwerkzeugen oder Hilfsmitteln aus Stein oder Kupfer bei der Herstellung des Originals sind aber nicht auszuschließen. Die Anfertigung von Sonderwerkzeugen oder Hilfsmittel zur schnelleren Erzeugung genauer Formen ist auch heute üblich. Möglich wäre z.B. ein scharfkantiger Stein als "Amboss" zur Erzeugung der genauen Kontur.

Ein anschließender Anschliff zur Erzeugung der Kanten und der guten Oberfläche kann beim Original stattgefunden haben.

Eine Randleiste zeigt deutlich erkennbare, quer verlaufende Riefen an der Kante. Wenn es sich um Schleifspuren handelt, dann ist nicht längs zum Beil geschliffen worden, was fertigungstechnisch sinnvoll wäre. Die Innenseite der Randleiste entsteht durch Stauchen des Werkstoffes, ggf. ist die Kante über einen scharfkantigen Stein fertiggeschmiedet worden.

Der Auslauf der Randleiste im Schneidenbereich zeigt die gute und exakte Arbeit der damaligen Schmiede. Das Herausarbeiten der Kontur erfordert Geschicklichkeit, eine Arbeit die von einem erfahrenen Schmied aber zu leisten ist. Die Riefen im Schneidenbereich können Schleifspuren sein, die durch die Fertigbearbeitung der Schneide entstanden sind. Warum diese Riefen bis in die Innenseite der Randleiste reichen, ist fertigungstechnisch nicht sinnvoll erklärbar, ggf. handelt es sich um Gebrauchsspuren.



Abb. A1-2: Schmiedeversuch mit einem Schlichthammer¹ auf einer Holzunterlage

¹ Solche oder ähnliche Hämmer werden auch als Polierhämmer mit hoch gewölbter Bahn bezeichnet.
Durch das Schmieden im kalten Zustand, entstehen Gitterbaufehler, die eine Festigkeitssteigerung (Kaltverfestigung) hervorheben. Die dabei eintretende Verringerung der Bruchdehnung macht ein Weichglühen erforderlich. Hierbei wird das Rohteil mehrere Minuten lang auf eine Temperatur von 400 – 600 °C erwärmt. In der Industrie verwendete Glühzeiten von z.T. mehreren Stunden sind beim Freiformschmieden oder bei Cu-Treibarbeiten nicht üblich. Die Temperaturführung erfolgt subjektiv durch den Schmied, z.B. anhand der Glutfarbe. Eine Temperaturprüfung durch ein trockenes Holzstäbchen, das an der heissen Oberfläche verkohlt, ist möglich. Erkennbare Risse auf den Randleisten könnten durch Fehler beim Weichglühen entstanden sein. Eine genauere Analyse lässt sich nur mit vorliegendem Original und ggf. Schmiedeversuchen durchführen.

Bisher wurde in der Literatur davon ausgegangen, dass relativ große Hämmer zur Herstellung benutzt wurden. Zwei Bronzehämmer lagen als Muster vor. Eine Fertigung des Beils mit den bisher zugeordneten, vergleichsweise großen Hämmern ist mit hoher Sicherheit auszuschließen. Bei der Herstellung wurde wahrscheinlich ein kleiner Hammer aus Bronze oder Stein verwendet. Die Arbeit konnte damit auf Holz- oder Steinunterlagen ausgeführt werden. Ein Holzhammer aus Astholz erbrachte im Versuch keine brauchbaren Ergebnisse, *Abb. A1-3*, die Verwendung eines Holzhammers zum Schmieden ist daher unwahrscheinlich.



Abb. A1-3: Schmiedeversuch mit einem Holzhammer aus einem Baumabschnitt

Möglich wäre jedoch der Einsatz eines Holzhammers in Verbindung mit einem Stemmer oder einer Handfaust aus Stein, Bronze oder ähnlich harten Materialien. Dies bedeutet, dass zwei Personen zur Herstellung eines Beil erforderlich waren. Die Herstellung des Beilkopfes (Nacken) ist durch Schmieden möglich. Hierzu werden die Ecken des Rohteils zur Werkstückmitte hin geschmiedet, *Abb. A1-4*. Die dann entstehende Bucht ist offen. Ein Zusammenschmieden zu einem geschlossenen Loch ist möglich, wurde aber offensichtlich bewusst nicht gemacht.



Abb. A1-4: Schematische Darstellung zur Herstellung des Beil-Kopfstückes

Zusammenfassung

Auf der Grundlage der uns vorgestellten wissenschaftlichen Untersuchungen, unterstützt durch Schmiedeversuche an vorgegossenen Rohlingen können zusammenfassend folgende Rückschlüsse gezogen werden:

Das Beil wurde von einem guten Handwerker hergestellt. Dies zeigt sich in der sehr symmetrischen Form und der guten Oberfläche. Ein geübter Schmied kann das Beil aus verschiedenen Halbzeugen in der vorliegenden Genauigkeit herausschmieden. Das Halbzeug zur Herstellung des historischen Beils könnte vorgegossen, ein rechteckiges Halbzeug oder vorgeschmiedet worden sein. In allen Fällen ist ein Verschmieden bis zur endgültigen Form des Fundstücks möglich. Die Herstellung durch Freiformschmieden bereitet keine grundsätzlichen Schwierigkeiten, sondern ist lediglich vom Geschick und der Sorgfalt des Schmieds abhängig. Die Asymmetrie der Schneide ist mit großer Wahrscheinlichkeit bewusst herausgeschmiedet worden, um z. B. eine bestimmte Funktion zu erfüllen oder ist ein Zeichen dafür, dass das Beil verschleißbedingt nachgearbeitet wurde. Eine zufällige Asymmetrie ist bei der insgesamt guten handwerklichen Arbeit wenig wahrscheinlich. Ob eine abschließende Bearbeitung der Schneide oder der Randleisten durch Schleifen stattgefunden hat, lässt sich nicht genau sagen. Die alleinige Herstellung durch Freiformschmieden ist aber möglich.

Anhang 2 Beschreibung der untersuchten Randleistenbeile

Die Autopsie der Referenzstücke erfolgte durch die Prähistorische Staatssammlung München [Steffgen 1997].

Die für die Rekonstruktion ausgewählten Randleistenbeile

1 Randleistenbeil Typ Neyruz, Abb. A2-1,1), Taf. 1.

Maße:	
Länge:	132,5 mm
Breite Nacken:	23 mm
Breite Schneide:	57 mm
Dicke:	bis 10,2 mm
Höhe der Randleisten:	bis 14 mm
Gewicht:	260,1 g
Analyse:	0.03% Sn, Spur Pb, 1.65% As, 4.1% Sb, 0.57% Ag, 1.9% Ni,
	0.043% Bi, 0.13% Co, Spur Fe
Fundort:	Umgebung von Fürstenfeldbruck, Oberbayern
Verbleib:	Prähistorische Staatssammlung München, Inventar-Nr.: HV 87
Literatur:	Koschik 1981 152 Nr. 20, Taf. 8.11 und
	Junghans, Sangmeister, Schröder 1968, Nr. 15 804

Autopsie:

• keine herstellungsrelevanten Details erkennbar.

Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, Taf. 1:

- Guter Guss.
- Keine erkennbaren Lunker.
- Geringe Porosität im dicken Bereich der Beilmitte.

2 Randleistenbeil Typ Langquaid II, Abb. A2-1,2), Taf. 2.

Maße:	
Länge:	190 mm
Breite Nacken:	22 mm
Breite Schneide:	78 mm
Dicke:	bis 8,7 mm
Höhe der Randleisten:	bis 12,5 mm
Gewicht:	367 g
Analyse:	ca. 10% Sn, 0.04% As, Spur Sb, Spur Ag, 0.09% Ni, Spur Bi
Fundort:	Schönramer Filz, Gemeinde Ringham, Landkreis Traunstein
Verbleib:	Prähistorische Staatssammlung München, Inventar-Nr.: 1924,1
Literatur:	Stein 1979, 61 Nr. 123, Taf. 39.13 und
	Junghans, Sangmeister, Schröder 1968 Nr. 15 911

Autopsie:

- Nackenzange mit Schlagspuren.
- Randleisten mit schwachem Mittelgrat.
- Beidseitig Schneidenfacette.

Beobachtungen aus den Röntgenaufnahmen, Taf.2:

- Guter Guss.
- Im gesamten Gussstück fein verteilte Porosität, erhöht im Blattbereich.

 Etwas größere Poren im Übergangsbereich Blatt/Schaft; dabei kann es sich sowohl um Gas- als auch um Schwindungsporosität handeln.

3 Randleistenbeil Typ Mägerkingen, Abb. A2-1,3, Taf. 3

Maße:	
Länge:	156 mm
Breite Nacken:	24 mm
Breite Schneide:	34,5 mm
Dicke:	bis 6,3 mm
Höhe Randleisten:	bis 12 mm
Gewicht:	209,9 g
Analyse:	6.9% Sn, 0.56% Pb, 0.28% As, 0.11% Sb, 0.01% Ag, 0.17% Ni,
	0.006% Bi, < 0.01% Au, < 0.1% Zn, 0.008% Co, 0.20% Fe
Fundort:	Aus dem Inn zwischen Mühldorf und Jettenbach
Verbleib:	Prähistorische Staatssammlung München, Inventar-Nr.: 1994, 1679
Literatur:	Unpubliziert
Autopsie:	

- Kanten lagerungsbedingt stark verschliffen und abgerundet.
- Beidseitige Schneidenfacette.
- Sonst keine herstellungsrelevanten Details erkennbar.

Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, Taf.3:

- Guter Guss.
- Einzelne feine Poren verteilt im ganzen Gussstück.
- Leichte Konzentration an Poren im Schneidenbereich; dies können sowohl Schwindungsals auch eingeschlossene Gasporen sein.

4 Randleistenbeil Typ Unterbimbach, Variante Nehren, Abb. A2-1,4), Taf. 4.

Maße:	
Länge:	192 mm
Breite Nacken:	21 mm
Breite Schneide:	41 mm
Dicke:	bis 9 mm
Höhe der Randleisten:	bis 15 mm
Gewicht:	274,6 g
Analyse:	9.9% Sn, 0.12% Pb, 0.279% As, 0.298% Sb, 0.019% Ag, 0.34% Ni,
	< 0.005% Bi, < 0.01% Au, < 0.1% Zn, 0.008% Co, 0.23% Fe
Fundort:	München-Unterföhring
Verbleib:	Prähistorische Staatssammlung München, Inventar-Nr.: 1928,5
Literatur:	Koschik 1981, 196 Nr. 152, Taf. 67.7
Autopsie:	

- Mehrere kleine Schlagflächen auf einer Seite.
- Zwei größere verschliffene Schlagflächen auf dem Blatt zwischen den auslaufenden Randleisten und der Schneide.
- Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, Taf.4:
- Guter Guss.
- Vereinzelte Poren verteilt im ganzen Gussstück.
- Am oberen Schaftende ein Bereich nicht sehr dichten Gefüges, wahrscheinlich durch Zufrieren der Schmelze im Anschnittbereich entstanden.



Abb. A2-1:Referenzstücke für die Untersuchungen an Randleistenbeilen.1) Typ Neyruz, Inv.-Nr.: HV 872) Typ Langquaid II, Inv.-Nr. 1924,13) Typ Unterbimbach, Inv.-Nr.: 1928,54) Typ Mägerkingen, Inv.-Nr.: 1994,1679

Die Randleistenbeile der Typen Langquaid I und II aus dem Hortfund von Langquaid, Lkr. Kelheim (Prähistorische Staatssammlung, Inventar-Nr.: 1908,71-77)

Typ Langquaid I

1908,74; Abb. A2-2,1), Taf. 5

Maße:	
Länge:	160 mm
Breite Nacken:	19 mm
Breite Schneide:	61,5 mm
Dicke:	bis 7 mm
Höhe der Randleisten:	bis 12 mm
Gewicht:	214,3 g
Analyse:	3.2% Sn, 1.9% Pb, 1.6% As, 0.5% Sb, 1.25% Ni
Literatur:	Stein 1979, 51 Nr. 96, Taf. 33.12
	Junghans, Sangmeister, Schröder Nr. 15 862

Autopsie:

- Beidseitig Schneidenfacette.
- Spuren mechanischer Bearbeitung im Bereich der Nackenzange.
- Fältelung an den Innenseiten der Randleisten.
- Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, Taf. 5:
- Mäßiger Guss.
- Viele, fein verteilte Gasporen.
- Ein großer Schwindungslunker im Bereich oberes Blatt/unterer Schaft.

1908,75; Abb. A2-2,2)

Maße:	
Länge:	153 mm
Breite Nacken:	19,5 mm
Breite Schneide:	55 mm
Dicke:	bis 7,5 mm
Höhe der Randleisten:	bis 12,5 mm
Gewicht:	205,1 g
Analyse:	4.7% Sn, 1.25% Pb, 0.64% As, 0.36% Sb, 0.1 Ag, 0.61% Ni
Literatur:	Stein 1979, 51 Nr. 96, Taf. 33.11 und
	Junghans, Sangmeister, Schröder 1968, Nr. 15 861

Autopsie:

- Beidseitig Schneidenfacette.
- Fältelung an den Innenseiten der Randleisten (s. Detail Abb. A2-2,2)

Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme:

- Guter Guss.
- Geringe Porosität.
- Einige kleine Poren im Übergangsbereich Schaft/Blatt.
- Ebenfalls im Übergangsbereich Schaft/Blatt: Zusammenhängendes Porengebilde; es handelt sich um durch Nachbearbeitung deformierte Lunker oder Risse.

1908,76; Abb. A2-2,3), Taf. 6

Maße:	
Länge:	143 mm
Breite Nacken:	20 mm
Breite Schneide:	62 mm
Dicke:	bis 8 mm
Höhe der Randleisten:	bis 13 mm
Gewicht:	191,4 g
Analyse:	1.3% Sn, 0.42% As, 0.79% Sb, 0.45% Ni
Literatur:	Stein 1979, 51 Nr. 96, Taf. 33.10 und
	Junghans, Sangmeister, Schröder 1968, Nr. 15 860

Autopsie:

• Beidseitig Schneidenfacette.

• Fältelung an den Innenseiten der Randleisten.

Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, Taf. 6:

- Mäßiger Guss.
- Hohe, gleichmäßig verteilte Gasporosität im kompletten Gussstück.
- Die Poren sind vorne rund und im hinteren Schaftbereich flach elliptisch ausgebildet.
- Im Übergangsbereich Schaft/Blatt eine größere, wahrscheinlich durch Speisung entstandene Pore.

1908,77; Abb. A2-2,4), Taf. 7

Maße:	
Länge:	145 mm
Breite Nacken:	16 mm
Breite Schneide:	59 mm
Dicke:	bis 4,2 mm
Höhe der Randleisten:	bis 11 mm
Gewicht:	120,4 g
Analyse:	0.05%Sn, 0.47% As, 0.14% Sb, 0,71% Ni
Literatur:	Stein 1979, 51 Nr. 96, Taf. 33.14 und
	Junghans, Sangmeister, Schröder 1968, Nr. 15 859

Autopsie:

- Beidseitig Schneidenfacette.
- Spuren mechanischer Bearbeitung im Nackenbereich: Beidseitig, von der Mitte des Ausschnitts ausgehend, je zwei Risse parallel zu Außenkante.
 Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, *Taf.* 7:
- Mäßiger Guss.
- Fein verteilte Gasporosität. Im Blatt- und unteren Schaftbereich sind die Poren rundlich, zum oberen Schaftbereich hin werden sie länglich und feiner.
- Große Schwindungspore im oberen Blattbereich zwischen Mitte und Rand.



Abb. A2-2:Randleistenbeile des Typs Langquaid I aus dem Hortfund Langquaid.1) 1908,742) 1908,753) 1908,764) 1908,77

Typ Langquaid II

1908,71; Abb. A2-3,1), Taf. 8

Maße:	
Länge:	200 mm
Breite Nacken:	28 mm
Breite Schneide:	87 mm
Dicke:	bis 10 mm
Höhe der Randleisten:	bis 17 mm
Gewicht:	562,9 g
Analyse:	4.1% Sn, Spur Pb, 0.1% As, 0.2% Sb, 0.03% Ag, 0.43% Ni,
	0.001% Bi, ca. 0.01% Fe
Literatur:	Stein 1979, 51 Nr. 96, Taf. 34.1 und
	Junghans, Sangmeister, Schröder 1968, Nr. 166

Autopsie:

- Beidseitig Schneidenfacette.
- Sonst keine herstellungsrelevanten Details erkennbar.

Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, Taf. 8:

- Mäßiger Guss.
- · Hohe, im ganzen Stück verteilte Gasporosität.
- Die Gasporen sind im Blattbereich rundlich, zum Schaftende hin wird ihre Form elliptisch.
- Schwindungsporosität im Übergangsbereich Blatt/Schaft und in der Mitte des Schaftes.
- Auffällig ist die Anordnung der Poren im Blattbereich parallel zum Schneidenrand.

1908,72; Abb. A2-3,2), Taf. 9.

Maße:	
Länge:	180 mm
Breite Nacken:	26 mm
Breite Schneide:	73,5 mm
Dicke:	bis 9,3 mm
Höhe der Randleisten:	bis 17 mm
Gewicht:	406,1 g
Analyse:	3.9% Sn, 0.17% Pb, 0.46% As, 0.43% Sb, 0.02% Ag, 0.48% Ni,
	Spur Bi, < 0.01% Fe
Literatur:	Stein 1979, 51 Nr. 96, Taf. 34.2 und
	Junghans, Sangmeister, Schröder 1968, Nr. 167

Autopsie:

- Beidseitig Schneidenfacette.
- Partiell unebene Oberfläche an den Innenseiten der Randleisten.

Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, Taf. 9:

- Relativ guter Guss.
- Fein verteilte Gasporosität im gesamten Gussstück.
- Die Gasporen sind im Blattbereich rundlich, zum Schaftende hin wird ihre Form elliptisch.
- Höhere Porendichte im Bereich des oberen Schaftdrittels.
- Schwindungsporosität im Übergangsbereich Blatt/Schaft.
- Weniger dichtes Gefüge im Nacken.

1908,73; Abb. A2-3,3), Taf. 10.

Maße:	
Länge:	170 mm
Breite Nacken:	23 mm
Breite Schneide:	73 mm
Dicke:	bis 8 mm
Höhe der Randleisten:	bis 15 mm
Gewicht:	291,7 g
Analyse:	0.47% Sn, Spur Pb, 0.6% As, 0.07% Sb, 0.01% Ag, 0.55% Ni,
	Spur Co
Literatur:	Stein 1979, 51 Nr. 96, Taf. 33.13 und
	Junghans, Sangmeister, Schröder 1968, Nr. 15 863

Autopsie:

· Beidseitig Schneidenfacette.

• Fältelungen an den Innenseiten der Randleisten, durch Korrosion nur schwach erkennbar. Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, *Taf. 10*:

- Sehr schlechter Guss.
- · Hohe Gasporosität im ganzen Gussstück.
- Lunkerbildung im Übergangsbereich Blatt/Schaft.

Die Randleistenbeile des Typs Langquaid II aus dem Hortfund von Waging, Lkr. Traunstein (Prähistorische Staatssammlung München, Inventar-Nr.: 13/1422, 13/1425, 1904,1, 1920,3, NM 3546, NM 3547)

13/142; Abb. A2-4,1), Taf. 11.

Maße:	
Länge:	187 mm
Breite Nacken:	27,5 mm
Breite Schneide:	79 mm
Dicke:	bis 9,2 mm
Höhe der Randleisten:	bis 16 mm
Gewicht:	417,2 g.
Analyse:	ca. 10% Sn, Spur Pb, 0.24% As, 0.23% Sb, 0.03 Ag, 0.22% Ni
Literatur:	Stein 1979, 69f. Nr. 143, Taf. 51.1 und
	Junghans, Sangmeister, Schröder 1968, Nr. 15 188

Autopsie:

- Oberfläche stark verkrustet.
- Schneide und Randleistenkanten mit Ausbrüchen.
- Keine herstellungsrelevanten Details erkennbar.
- Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, Taf. 11:
- · Relativ guter Guss.
- · Geringe, fein verteilte Gasporosität im Bereich Blatt/unterer Schaft.

13/1425; Abb. A2-4,2), Taf. 12

Maße:	
Länge:	190 mm
Breite Nacken:	30 mm
Breite Schneide:	69 mm
Dicke:	bis 9 mm
Höhe der Randleisten:	bis 16 mm
Gewicht:	430,7 g
Analyse:	ca.10% Sn, 0% Pb, 0.48% As, 0.03% Sb, 0.04 Ag, 0.2% Ni, Spur Bi
Literatur:	Stein 1979, 69f. Nr. 143, Taf. 50.7 und
	Junghans, Sangmeister, Schröder 1968, Nr. 15 189 (dort irrtüml. Inv.
	Nr. 13/1423)

Autopsie:

- Oberfläche stark verkrustet.
- Schneide und Randleistenkanten mit Ausbrüchen.
- Keine herstellungsrelevanten Details erkennbar.

Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, Taf. 12:

- Mäßiger Guss.
- Grobe, gleichmäßig verteilte Porosität im ganzen Gussstück.
- Am Nacken gruppieren sich Poren um den Ausschnitt.

1904,1; Abb. A2-4,3), Taf. 13

Maße:	
Länge:	185 mm
Breite Nacken:	27 mm
Breite Schneide:	72 mm
Dicke:	bis 8,7 mm
Höhe der Randleisten:	bis 16 mm
Gewicht:	365,8 g
Analyse:	ca. 10% Sn, 0% Pb, 0.03% As, Spur Sb, Spur Ag, 0.21% Ni, Spur Bi,
	Spur Fe
Literatur:	Stein 1979, 69f. Nr. 143, Taf. 50.8 und
	Junghans, Sangmeister, Schröder 1968, Nr. 15 191

Autopsie:

- Oberfläche stark verkrustet.
- Schneide und Randleistenkanten mit Ausbrüchen.
- · Rand Nackenausschnitt leicht wulstig.

Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, Taf. 13:

- Guter Guss.
- Sehr fein verteilte Gasporosität in der Schneide und der unteren Schafthälfte.
- Länglich gezogene Poren in der oberen Schafthälfte.
- · Konzentration der Poren geometrisch um den Nackenausschnitt.
- Die Porenkonzentration ist eindeutig am oberen Ende zu identifizieren; es handelt sich sowohl um Gas- als auch, vor allem im Nackenbereich, um Schwindungsporen.



Abb. A2-3:Randleistenbeile des Typs Langquaid II aus dem Hortfund Langquaid.1) 11908,71;2) 1908,72,3) 1908,73





Abb. A2-4:Randleistenbeile des Typs Langquaid II aus dem Hortfund von Waging.1) 13/142;2) 13/1425;3) 1904,1

1920,3; Abb. A2-5,1), Taf. 14

Maße:	
Länge:	194 mm
Breite Nacken:	26,5 mm
Breite Schneide:	80 mm
Dicke:	bis 9,3 mm
Höhe der Randleisten:	bis 15 mm
Gewicht:	414,8 g
Analyse:	ca. 10% Sn, 0% Pb, 0.02% As, ca. 0.009% Sb, Spur Ag, 0.08% Ni,
	Spur Bi, Spur Fe
Literatur:	Stein 1979, 69f. Nr. 143, Taf. 49.5 und
	Junghans, Sangmeister, Schröder 1968, Nr. 15 912 (dort Fundort
	Laufen)

Autopsie:

- Oberfläche verkrustet.
- Schneide und Kanten der Randleisten mit Ausbrüchen.
- Beschädigungen an den Randleisten zum Teil ausgefugt.
- Kleine rezente Kerben an den Randleisten und im Nackenausschnitt.
- Kante des Nackenausschnitts auf einer Seite leicht wulstig.

Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, Taf. 14:

- Guter Guss.
- Fein verteilte Gasporosität, geringe Porosität im Schneidenbereich.
- Die Porenhäufigkeit nimmt im oberen Schaftdrittel zu, bleibt aber fein verteilt.
- Porenkonzentration im Bereich des Nackenausschnitts; es handelt sich sowohl um Gas- als auch um Schwindungsporen.

NM 3546; Abb. A2-5,2), Taf. 15

Maße:	
Länge:	190 mm
Breite Nacken:	27 mm
Breite Schneide:	72 mm
Dicke:	bis 8,7 mm
Höhe der Randleisten:	bis 16 mm
Gewicht:	361,1 g
Analyse:	0.88% Sn, Spur Pb, 0.4% As, 0.08 Sb, 0.01 Ag, 0.4% Ni, Spur Bi
Literatur:	Stein 1979, 69f. Nr. 143, Taf. 49.3 und
	Junghans, Sangmeister, Schröder 1968, Nr. 15 192 (dort ist sowohl für
	Nr. 15 192 als auch für Nr. 15 193 die Inventarnr. NM 3547
	angegeben. Es ist demnach möglich, dass sich die Werte auf das Beil
	NM 3547 beziehen)

Autopsie:

- Stark beschädigte Schneide, ca. 30 mm unterhalb des Nackenausschnitts horizontal gebrochen.
- Nackenausschnitt glatt.

Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, Taf. 15:

- Schlechter Guss und schlechte Erhaltung.
- Die hohe Gasporosität verteilt sich im ganzen Gussstück.

• Einige Risse und die Bruchstelle bestätigen die Instabilität.

NM 3547; Abb. A2-5,3), Taf. 16.

Maße:	
Länge:	180 mm
Breite Nacken:	25 mm
Breite Schneide:	73 mm
Dicke:	bis 9,8 mm
Höhe der Randleisten:	bis 16 mm
Gewicht:	411,0 g
Analyse:	ca. 10% Sn, 0% Pb, 0.46% As, 0.05 Sb, 0.01Ag, 0.15% Ni, Spur Bi,
	Spur Fe
Literatur:	Stein 1979, 69f. Nr. 143, Taf. 49.4 und
	Junghans, Sangmeister, Schröder 1968, Nr. 15 193 (s. Bemerkung zu
	NM 3546)

Autopsie:

- Schneide stark abgenutzt.
- Nackenausschnitt glatt.
- Kanten der Randleisten stark bestoßen.
- Beobachtungen aus der Röntgenaufnahme, Taf. 16:
- Mäßiger Guss.
- Die Schatten auf dem Röntgenbild lassen auf ein nicht dichtgespeistes Gefüge schließen.
- Feine Gasporen sind im vorderen Schneidenbereich, im Übergangsbereich Blatt/Schaft und im Schaft zu erkennen.



Abb. A2-5:Randleistenbeile des Typs Langquaid II aus dem Hortfund von Waging.1) 1920,3;2) NM 3546;3) NM 3547

Anhang 3 Tafeln 1-29

Röntgenaufnahmen von Originalen und Nachgüssen.



Tafel 1: Randleistenbeil HV87: Röntgenbild (links) und Grauwertanalyse (rechts)



Tafel 2: Randleistenbeil 1924,1: Röntgenbild

Tafel 3: Randleistenbeil 1924,1679: Röntgenbild (links) und Grauwertanalyse (rechts)



Tafel 4: Randleistenbeil 1928,5: Röntgenbild (links) und Grauwertanalyse (rechts).





Tafel 5: Randleistenbeil 1908,74: Röntgenbild (links) und Grauwertanalyse (rechts)



Tafel 6: Randleistenbeil 1908,76: Röntgenbild (links) und Grauwertanalyse (rechts)



Tafel 7: Randleistenbeil 1908,77: Röntgenbild (links) und Grauwertanalyse (rechts)



Tafel 8: Randleistenbeil 1908,71: Röntgenbild (links) und Grauwertanalyse (rechts)

l



Tafel 9: Randleistenbeil 1908,72: Röntgenbild (links) und Grauwertanalyse (rechts)



Tafel 10: Randleistenbeil 1908,73: Röntgenbild (links) und Grauwertanalyse (rechts)



Tafel 11: Randleistenbeil NM 13/1422: Röntgenbild (links) und Grauwertanalyse (rechts)



Tafel 12: Randleistenbeil NM 13/1425: Röntgenbild (links) und Grauwertanalyse (rechts)





Tafel 13: Randleistenbeil 1904,1: Röntgenbild (links) und Grauwertanalyse (rechts)



Tafel 14: Randleistenbeil 1920,3: Röntgenbild (links)und Grauwertanalyse (rechts)



Tafel 15: Randleistenbeil NM 3546: Röntgenbild (links) und Grauwertanalyse (rechts)



Tafel 16: Randleistenbeil NM 3547: Röntgenbild



Tafel 17: Randleistenbeilfragment 1943,1: Röntgenbild.



Tafel 18: Röntgenbilder der Nachgüsse des Beiltyps Neyruz mit Anschnitt am Nacken aus Bronze (a) und Kupfer (b) sowie mit Anschnitt auf der Beilseite aus Bronze (c).



Tafel 19: Nachgüsse des Beiltyps Langquaid II mit Anschnitt von oben (a) und von der Seite (b). Original: Inv.-Nr. 1924,1 (s. Tafel 2)







- Tafel 20: Nachgüsse der Beiltypen
 a) Mägerkingen, Original: Inv.-Nr. 1924,1679 (s. Tafel 3)
 b) Unterbimbach, Original: Inv.-Nr. 1928,5 (s. Tafel 4)



Tafel 21: Röntgenaufnahme des Exemplars 3 (Referenzstück 1, Typ Neyruz) aus dem Schmiedeversuch.

a) Rohling.

b) Nach einem Schmiedegang, vor dem Zwischenglühen.



Tafel 22: Röntgenaufnahme des Exemplars 4 (Referenzstück 1, Typ Neyruz) aus dem Schmiedeversuch.

a) Rohling.

b) Nach zwei Schmiedegängen, vor dem nächsten Zwischenglühen.



Tafel 23: Röntgenaufnahme des Exemplars 5 (Referenzstück 1, Typ Neyruz) aus dem Schmiedeversuch.

a) Rohling.

b) Nach drei Schmiedegängen.



Tafel 24: Röntgenaufnahmen der Lappenbeilnachgüsse nach der Form vom Bullenheimer Berg. a) Bronzekokille

b) Lehmform

a)



Tafel 25: Röntgenaufnahmen von vier der acht gussgleichen Lappenbeile aus dem Hortfund vom Bullenheimer Berg, Lkr. Kitzingen.


Tafel 26: Röntgenaufnahme der nach dem modifizierten Verfahren "Hodges" rekonstruierten Kokillenhälfte aus dem Versuch 1c).





Tafel 27: Röntgenbilder der nach dem normalen Wachsausschmelzverfahren rekonstruierten Kokille aus Versuch 2c).

a) "Schlechtere" Hälfte b) "Bessere" Hälfte



Tafel 28: Kokillenhälften der Originalkokille vom Bullenheimer Berg. Die linke Hälfte (a) weist im Schneidenbereich ein lockereres Gefüge auf als die rechte (b).



Tafel 29: Nachguss des Schwertgriffs nach der Form von Erlingshofen aus einer Lehmform.

Lebenslauf

Name:	Monika Wirth
Geburtsdatum:	24. Oktober 1967
Geburtsort:	Heidelberg

Schulausbildung:

August 1974 - Juli 1978	Grundschule Laufenselden
August 1978 - Juli 1984	Staatliche Realschule Katzenelnbogen
August 1984 - Juni 1987	Staatl. anerk. priv. Hildegardisschule Bingen
Januar 1988 - Juli 1988	South London College, GB: Erwerb des
	"Cambridge Certificate of Proficiency in English"

Studium

1988 - 1995	Metallurgie und Werkstofftechnik RWTH Aachen
Vertiefungsrichtung:	Gesteinshüttenkunde
Oktober 1995	Abschluss: Diplom

Berufliche Tätigkeiten

Januar 2000 - Juli 2002

17. Juli 2002

Dezember 1995 - Januar 2000	Wissenschaftliche Mitarbeiterin
	am Gießerei-Institut der RWTH Aachen
Oktober 2000 - Januar 2001	Lehrtätigkeit
	bei Kolping-Bildungswerk e.V. Bamberg
April 2001 – April 2002	Projektingenieurin
	bei HOESCH-Metallurgie GmbH Düren
Promotion	

am Gießerei-Institut der RWTH Aachen Prüfung zur Dr.-Ing.