Zeitschrift: Jahrbuch Archäologie Schweiz = Annuaire d'Archéologie Suisse = Annuario d'Archeologia Svizzera = Annual review of Swiss Archaeology

Herausgeber: Archäologie Schweiz

Band: 89 (2006)

Artikel: Ergebnisse einer metallographischen Untersuchung an Beilen des frühbronzezeitlichen Depots von Sennwald SG-Salez

Autor: Kienlin, Tobias L.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-117890

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Jahrbuch Archäologie Schweiz 89, 2006, 189-201.

Tobias L. Kienlin

Ergebnisse einer metallographischen Untersuchung an Beilen des frühbronzezeitlichen Depots von Sennwald SG-Salez

Zusammenfassung

Gefügekundliche Untersuchungen an frühbronzezeitlichen Randleistenbeilen des Depotfundes von Sennwald SG-Salez erlaubten - über die reine Materialzusammensetzung hinaus - Rückschlüsse auf die Guss- und Schmiedetechnik sowie auf den Kenntnisstand der damaligen Metallhandwerker.
Die Beile von Sennwald-Salez selbst und jene des nach ihnen benannten Typs Salez bestehen aus Fahlerzkupfer, das in unterschiedlicher Höhe Nebenelemente wie Antimon, Arsen, Nickel und Silber enthält. Sie sind also - anders als zum Beispiel die Beile des Typs Neyruz in der Westschweiz - nicht mit Zinn legiert. Es wird diskutiert, wie sich das gewählte Rohmaterial auf den Herstellungsprozess und die Eigenschaften der Beile auswirkte. Dabei wird klar, dass Fahlerzkupfer entgegen einer verbreiteten Meinung nicht etwa eine minderwertige Alternative aus der Frühphase der frühbronzezeitlichen Metallurgie vor dem Aufkommen der Zinnlegierung ist. Vielmehr erweist sich dieses Material als für die Herstellung von Geräten oder Waffen gut geeignet und zumindest für einen Übergangszeitraum als gleichwertige Alternative zur Zinnbronze.

Résumé

Les haches à rebords du Bronze ancien découvertes à Sennwald SG-Salez ont été soumises à une étude des microstuctures allant bien au-delà d'une simple analyse de la composition du matériel: elle a permis de mieux comprendre les technique de coulée et de martelage, et d'établir quel était le niveau technologique des bronziers.
*Les haches de Sennwald-Salez et celles de type Salez, auxquelles elles ont donné leur nom, se composent toutes de cuivres gris (*fahlerz*) recelant en quantités variables des éléments secondaires, tels que l'antimoine, l'arsenic, le nickel et l'argent. Contrairement à d'autres types de haches, par exemple celles de type Neyruz, que l'on rencontre en Suisse occidentale, le bronze des haches de Salez ne contient pas d'étain. L'article s'attache à établir quelle est l'influence du choix de la matière première sur les propriétés de l'outil fini. Allant à l'encontre d'une opinion répandue, on avance que le cuivre gris ne constitue pas qu'une alternative de moindre qualité, issue d'une phase ancienne de la métallurgie du bronze et précédant l'apparition du bronze à l'étain. Bien au contraire, ce matériau se prête fort bien à la confection d'armes ou d'outils et constitue, du moins pour une phase de transition, une option tout à fait valable.*

Riassunto

Le analisi della struttura delle asce ad alette presenti nel deposito della prima età del bronzo di Sennwald SG-Salez permettono - oltre a determinarne semplicemente la composizione del materiale - di trarre conclusioni riguardanti la tecnica di fusione e di fabbricazione oltre le nozioni degli artigiani dell'epoca.
Le asce di Sennwald-Salez stesso e quelle di tipo Salez - facenti riferimento all'omonimo sito - sono forgiate in rame di tipo Fahlerz, contenente elementi addizionali quali antimone, arsenio, nickel e argento che variano a seconda della quota. Esse non sono dunque - a differenza delle asce di tipo Neyruz nella Svizzera occidentale - composte da una lega con stagno. Si discutono quali siano le ripercussioni della materia prima scelta sul processo di produzione e sulle proprietà delle asce. Contrariamente all'opinione corrente il rame di tipo Fahlerz non era un'alternativa di qualità scadente, impiegata agli inizi della metallurgia nel bronzo antico, prima dell'avvento della lega con stagno. Questo materiale si è invece rivelato molto idoneo per la fabbricazione di utensili oppure armi e, almeno per quanto riguarda il periodo di transizione, è da considerarsi un'alternativa equivalente al bronzo a lega di stagno.

Summary

Structural analyses carried out on Early Bronze Age flanged axes from the hoard found at Sennwald SG-Salez allowed conclusions to be drawn - beyond the pure metal composition - regarding casting and hammering techniques and concerning the knowledge that the metalworkers had at that time.
The axes from Sennwald-Salez itself and those of the type Salez, called after them, consisted of fahlerz copper, which contained various levels of other elements such as antimony, arsenic, nickel, and silver. Therefore, and contrary to the axes of the Neyruz type found in western Switzerland, they were not tin-alloys. The article discusses the influence that the raw material chosen would have had on the production process and the characteristics of the axes. It becomes clear that fahlerz copper, contrary to popular belief, was not, in fact, an inferior alternative used in the early stages of Early Bronze Age metallurgy before the introduction of tin alloys. It emerges, rather, that this material was well suited for the production of tools and weapons and that, at least during a transitional period, it was an alternative of equal value to tin bronze.

Einleitung und Fragestellung[1]

Viel seltener als den verwendeten Kupfersorten und der möglichen Herkunft des Metalls im ausgehenden Neolithikum und der frühen Bronzezeit (zuletzt Krause 2003) widmete sich die Forschung bislang der eigentlichen Herstellung von Metallobjekten, den Gussverfahren und der Schmiedetechnik. Ähnliches gilt für die Eigenschaften unterschiedlicher Kupfersorten oder Legierungen, die oft in pauschalen Begriffen abgehandelt werden, und deren Auswirkungen auf die Herstellungsprozesse. Zur Anwendung kommen dabei Methoden der so genannten Metallographie: die lichtmikroskopische Untersuchung des Metallgefüges und begleitende Untersuchungen (Härtetests, Gehaltsanalysen etc.), die Auskunft geben über die Herstellungsschritte eines Objekts und dessen Eigenschaften (Scott 1991; Schumann 1991).

Das Verbreitungsgebiet der frühbronzezeitlichen Randleistenbeile des Typs Salez umfasst Südwestdeutschland und die Ostschweiz zwischen Oberlauf der Donau und Alpenrheintal.[2] Sie sind hier die ältesten Randleistenbeile, bestehen aus Fahlerzkupfer mit Nebenelementen wie Antimon, Arsen, Nickel und Silber und repräsentieren damit - vor oder neben der aufkommenden Zinnlegierung (s. u.) - einen wichtigen Abschnitt frühbronzezeitlicher Metallurgie, der nun erstmals in grösserem Umfang durch gefügekundliche Untersuchungen beleuchtet ist (Kienlin 2004; Kienlin et al. 2004; Kienlin im Druck). Aus dem grössten und namengebenden Fundkomplex mit Beilen dieser Art, dem Depotfund von Sennwald SG-Salez am Unterlauf des Alpenrheins mit ursprünglich 66 Beilen,[3] wurden sieben Stücke beprobt (Abb. 1).[4] Im folgenden werden die Untersuchungsergebnisse vorgestellt und ihre Implikationen für die frühbronzezeitliche Metallurgie erörtert.[5]

Zum äusseren Befund

Bill (1997, 251) vermerkt die sorgfältige Oberflächenbearbeitung der Beile von Sennwald-Salez, und tatsächlich weisen alle sieben beprobten Exemplare eine gründlich überarbeitete und offenkundig polierte Oberfläche auf. Die Patinierung ist grünlich und reicht stellenweise ins Bläuliche. Nur lokal zeigt sich bei einzelnen Stücken eine leichte Aufrauung der Oberfläche infolge stärkerer Korrosion. Nach Bill (1997, 248) weisen alle Beile des Depots im Klingenbereich eine etwas rauere Oberfläche auf - ein Merkmal, das er auf Veränderungen infolge des Ausschmiedens zurückführt. Tatsächlich bedingt eine Umformung an der Oberfläche wie im Inneren des Gefüges selbst Veränderungen, die zu einem abweichenden Korrosionsverhalten führen können. Bei guter Oberflächenerhaltung finden sich gelegentlich Beile, bei denen dieses Phänomen vorzuliegen scheint, doch gehören hierzu allenfalls zwei der sieben untersuchten Stücke aus Sennwald-Salez (Abb. 1b.g). Obgleich Bill hinsichtlich des postulierten Überschmiedens recht behält, wird man sich für solche Aussagen - zumindest bei ausgewählten Objekten - eher auf den Gefügebefund denn auf den Oberflächeneindruck stützen wollen.

Ähnliches gilt für Fragen der Gusstechnik. Hier weist Bill (1997, 248) auf Gasbläschen im Nackenbereich einiger Beile hin und folgert daraus, dass die Nackenpartie beim Guss nach oben gerichtet gewesen sein müsse.[6] In Richtung einer geschlossenen Gussform, sei es nun im Sinne des *cire perdue*-Verfahrens oder einer zweischaligen Form aus Stein, Ton oder Formsand, deuten auch die scharf abgesetzten Randleisten, die aller Wahrscheinlichkeit nach mitgegossen wurden (Bill 1997, 250). Nur eines der beprobten Beile zeigt aber im Nackenbereich Ansätze der von Bill geschilderten Bläschenbildung (Abb. 1g), und Gussnähte oder der Ansatz eines Gusszapfens fehlen völlig. Wiederum sind ergänzende Untersuchungen zu fordern, etwa Gefügeanalysen oder Röntgenaufnahmen.

Gefügebefund I: Phasenanalytische Betrachtung

Nach den Korrekturen durch Bill (1997) gehören die Beile von Sennwald-Salez sämtlich Abels' (1972) Varianten A und B des Typs Salez an.[7] Sie bilden damit eine recht einheitliche Gruppe innerhalb des formal vielfältigen Typs der Salezer Beile.[8] In ihrer Zusammensetzung weichen die Beile von Sennwald-Salez ebenfalls von den meisten anderen Vertretern des nach ihnen benannten Typs ab: Sie weisen ungewöhnlich hohe Anteile der fahlerztypischen Nebenelemente Antimon, Arsen, Nickel und Silber auf (Krause 1988, 222f. Tab. 21).

Solche Nebenelemente nehmen als Fremdatome Gitterplätze in der kristallinen Matrix des durch sie «verunreinigten» Metalls, hier des Kupfers, ein. Es entstehen so genannte (Kupfer-)Mischkristalle. Man spricht von Löslichkeit im festen Zustand, wobei für die beteiligten Elemente eine gegenseitige Löslichkeitsgrenze existieren kann (Bargel/Schulze 1988, 34-51; Schumann 1991, 272-306); sie ist bei den Beilen von Sennwald-Salez überschritten. Bei der Erstarrung entstanden daher neben der Matrix aus Kupfermischkristallen, die mit den genannten Nebenelementen abgesättigt ist, weitere Gefügebestandteile von abweichender Zusammensetzung. Man bezeichnet letztere als «Phasen», die aufgrund ihrer andersartigen kristallinen Struktur auch andere mechanische Eigenschaften aufweisen können als die Mischkristallmatrix (Härte etc.). Genau dies ist bei den Beilen von Sennwald-Salez der Fall. Die Phasen erlauben ferner Aussagen über den Gussprozess. Es lohnt sich daher, den vorliegenden Befund mit einer leider unpublizierten Arbeit von Lesniak (1991) zu vergleichen, der sich anhand experimentell hergestellter Legierungen und einiger Proben urgeschichtlicher Artefakte mit den Eigenschaften von Fahlerzmetallen befasste und dabei u. a. ein Beil aus dem Depot von Sennwald-Salez untersuchte.

Anders als reine Metalle erstarren Mischkristalle innerhalb

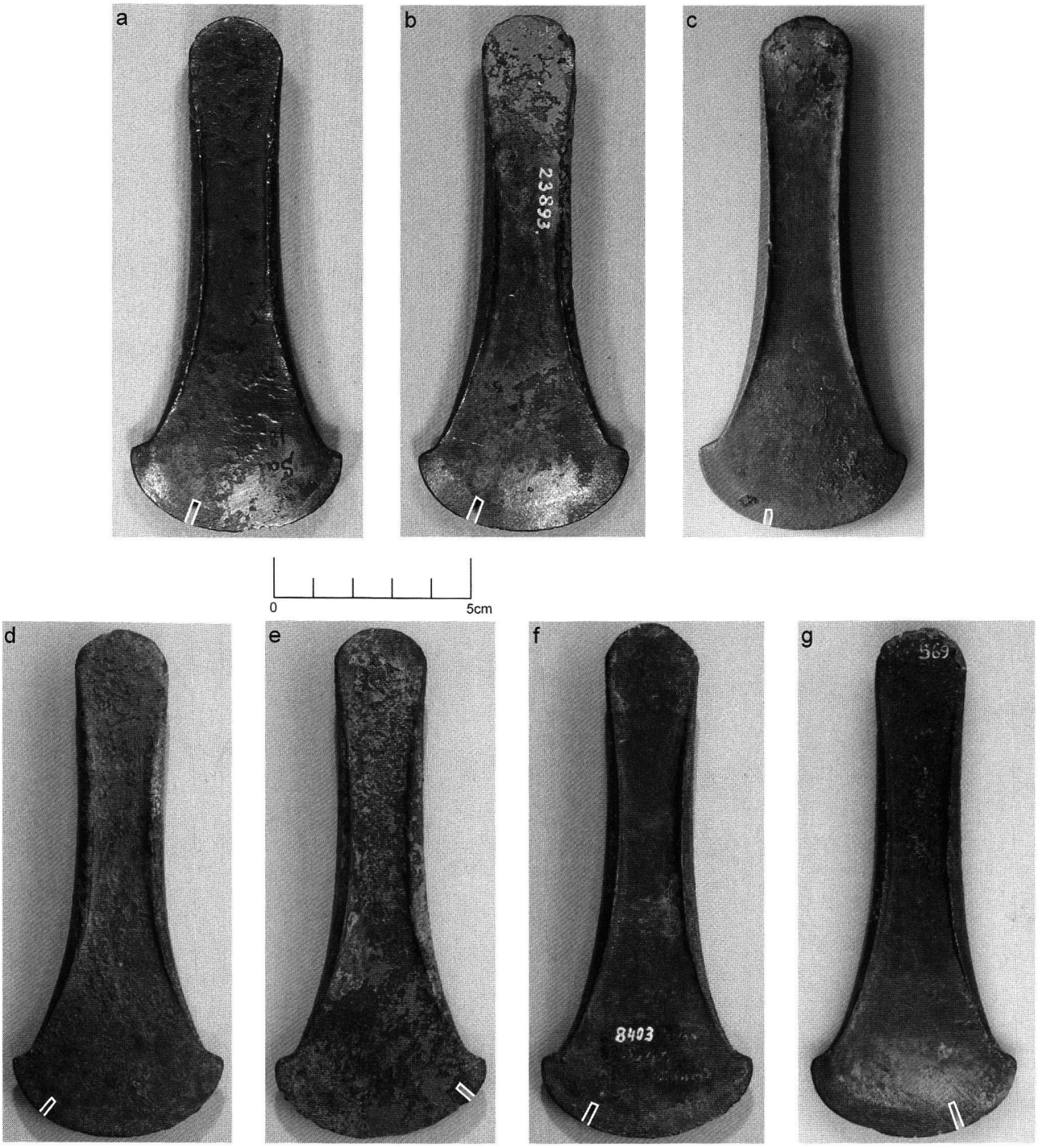
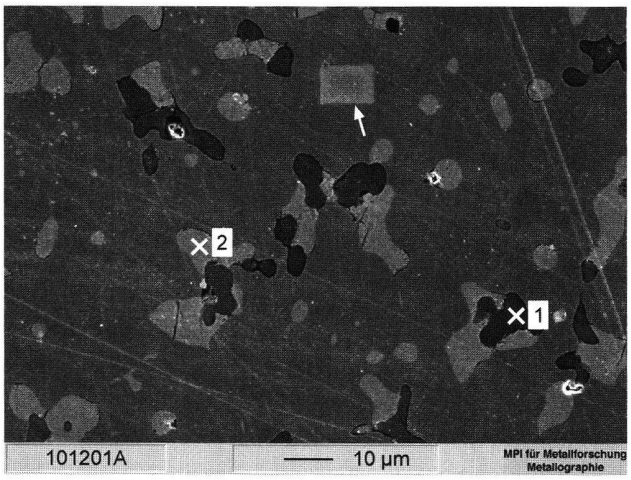


Abb. 1. Die untersuchten Beile des Depotfundes von Sennwald-Salez.

eines mehr oder weniger weiten Temperaturbereichs. Es lässt sich kein Schmelz- bzw. Erstarrungspunkt angeben, vielmehr existieren eine Solidustemperatur, bei der das Schmelzen beginnt, und eine Liquidustemperatur, bei der das gesamte Metall aufgeschmolzen ist. Dazwischen erstreckt sich das Schmelz- bzw. Erstarrungsintervall (Bargel/Schulze 1988, 39; Schumann 1991, 279). Nach Lesniak (1991, 128-143.164-166) erstarrt eine Schmelze von der Zusammensetzung des Beiles aus Sennwald-Salez im Temperaturbereich zwischen 850°C und 690°C.[9] Da zunächst kupferreiche Mischkristalle entstehen, reichert sich die Restschmelze zunehmend mit Nebenelementen an und erstarrt schliesslich zu einer Reihe unterschiedlicher Verbindungen mit variabler Zusammensetzung und Struktur, in de-



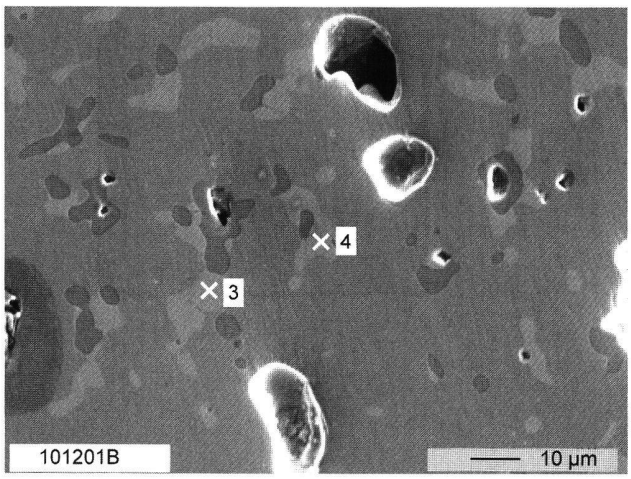


Abb. 2. Intermetallische Phasen (hell) und Kupfersulfid (dunkelgrau) in einem Beil des Depotfundes von Sennwald-Salez (die zugehörigen Punktanalysen 1-4 in Tabelle 1); mit Pfeil markiert die «Fläche» einer typischen Punktanalyse der Matrix.

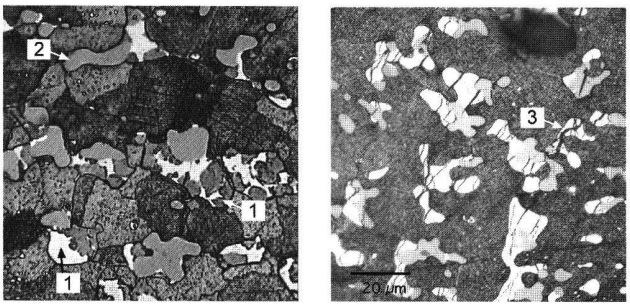


Abb. 3. Intermetallische Phasen (1) und Kupfersulfid (2) im lichtmikroskopischen Schliffbild; aufgrund ihrer Sprödigkeit sind die intermetallischen Phasen im leicht überschmiedeten Klingenbereich aufgebrochen (3).

nen sich Arsen und Antimon, Nickel und Kobalt in der Bindung an Kupfer gegenseitig ersetzen können.[10] Es handelt sich um so genannte intermetallische Verbindungen,[11] wie sie auch in den hier vorgelegten Proben von sieben weiteren Beilen des Depots von Sennwald-Salez sehr häufig sind (Abb. 2). Neben der Zusammensetzung (Tab. 1) zeigt auch das lichtmikroskopische Bild, dass verschiedene Unterphasen vorliegen (Abb. 3, links), deren Farbe von hellgrau-beige zu dunkelgrau variiert. Gemeinsam ist diesen Phasen, dass sie spröder sind und härter als die umgebende Matrix aus Kupfermischkristallen (Abb. 3, rechts), was bei den Beilen von Sennwald-Salez Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des Gesamtgefüges hat und insbesondere beim Ausschmieden nicht ohne Auswirkungen blieb (s. u.).

Eine andere Phase hingegen ist in allen Proben relativ einheitlich zusammengesetzt; sie weist 63,7-66,0 Atom-% Kupfer und 33,0-36,3 Atom-% Schwefel auf (Lesniak 1991, 133-135)[12] - Kupfersulfid (Cu_2S), das wie in dem von Lesniak (1991, 63f.) untersuchten Beil auch in allen der hier vorgelegten Proben häufig auftritt (Tab. 1). Im Lichtmikroskop erscheint das Kupfersulfid grau mit einem Stich ins Bläuliche (Abb. 3), im Rasterelektronenmikroskop dagegen dunkelgrau (Abb. 2). Im Gegensatz zu älteren Gesamtanalysen, bei denen dieses Element nicht bestimmt wurde, ermöglicht der analytische und lichtmikroskopische Nachweis von Schwefel bzw. Kupfersulfid Aussagen über den Herstellungsprozess, die über die allgemeine Ableitung des Metalls von sulfidischen Erzen hinausgehen. So belegen die rundlichen Umrissformen des Kupfersulfids (Abb. 2.3), dass es vor dem Guss aufgeschmolzen war, aus der Schmelze heraus erstarrte, und dass es sich nicht etwa um eingeschleppte Erzrelikte handelt. Bereits im flüssigen Zustand setzte die Trennung in eine metallische und eine sulfidische Schmelze ein; unterhalb von rund 1100 °C wurde dann festes Kupfersulfid ausgeschieden.[13] Durch Neben- oder Legierungselemente kann die zum Guss erforderliche Temperatur sinken, was gerne als Vorteil «verunreinigten» oder legierten Kupfers angeführt wird.[14] Dagegen zeigen der Gefügebefund des Kupfersulfids und dessen Erstarrungstemperatur, die deutlich über jener der anderen Gefügekomponenten liegt, dass man bei der Herstellung der Beile von Sennwald-Salez nicht versuchte, mit Nebenelementen den Schmelzpunkt zu senken.[15] Zu dem gleichen Ergebnis führen metallographische Untersuchungen an zahlreichen anderen frühbronzezeitlichen Beilen - was zur Vorsicht gegenüber modernistischen Erwartungen an die Vorzüge bestimmter Kupfersorten oder Legierungen gemahnen sollte.

Gefügebefund II: Matrixgefüge

Nach dem Guss weisen Kupfer und seine Legierungen ein Gefüge auf, das nach seinem bäumchenartigen Erscheinungsbild als dendritisch bezeichnet wird und mehr oder weniger grosse, unregelmässig geformte Gusskörner zeigt (Abb. 4).[16] Danach kann der Rohling bei hoher Temperatur oder in abgekühltem Zustand überarbeitet werden (Heiss-

	Cu	*S*	*Sn*	*Pb*	*As*	*Sb*	*Ag*	*Ni*	*Co*	*Fe*
Mischkristallmatrix (Proben-Nr. 101201)	88,67	0	0	0	2,44	4,58	1,38	2,55	0,38	0
Matrix inkl. Phasen (Proben-Nr. 101201)	78,99	1,34	0	0	3,61	9,42	1,23	4,7	0,73	0
SAM II,3 2768 (Proben-Nr. 101201)	-	-	Sp.	0,2	1,75	>>6	1,4	4,2	0	Sp.
Kupfersulfid [1] (Proben-Nr. 101201)	74,64	20,73	0	3,36	0	0,36	0,3	0,41	0,2	0
intermetallische Phase [2] (Proben-Nr. 101201)	31,85	0	0	0,26	6,46	41,11	0,58	15,63	4,13	0
intermetallische Phase [3] (Proben-Nr. 101201)	32,99	0,04	0,27	4,6	4,84	37,04	0,26	21,35	2,52	0
intermetallische Phase [4] (Proben-Nr. 101201)	41,38	4,39	0,2	0,52	3,89	31,01	0,85	18,19	2,61	0,02
intermetallische Phase (Proben-Nr. 101203)	52,07 58,81	0,16 0,36	0 0	0 0	5,08 4,87	24,05 14,18	1,8 1,2	14,96 18,29	1,88 2,29	0 0
Kupfersulfid (Proben-Nr. 101203)	75,45 63,97	20,34 34,18	0 0	2,66 0,69	0 0	0,54 0,24	0 0	0,61 0,56	0,39 0,36	0 0
intermetallische Phase (Proben-Nr. 101205)	24,44 30,28	0 0	0,68 0,45	0 0	3,71 6,0	41,72 26,98	0,82 0,6	23,69 31,77	2,93 3,91	0 0
Kupfersulfid (Proben-Nr. 101205)	72,06 60,03	21,93 36,21	0,46 0,21	2,37 0,61	0 0	0 0	0 0	0,54 0,48	0,86 0,77	1,77 1,68

Tab. 1. Intermetallische Phasen und Kupfersulfid in den Beilen von Sennwald-Salez; ausgewählte EDX-Analysen. Oben Gewichts-%; unten: Atom-%.

bzw. Kaltschmieden). Beim Heissschmieden bilden sich kontinuierlich neue Körner im Gefüge, das Metall bleibt weich und verformbar, während beim Kaltschmieden eine Verfestigung eintritt, die zunächst durch so genannte Gleitlinien, später durch verformte Körner sichtbar wird. Soll das Stück durch Kaltschmieden erheblich umgeformt werden, kann Entfestigungs- oder Weichglühen erforderlich sein, welches die ursprüngliche Verformbarkeit wiederherstellt. Das Gefüge allein verrät indessen nicht, welches Verfahren angewandt wurde, denn sowohl beim Heissschmieden als auch beim Weichglühen (nach dem Kaltschmieden) bilden sich neue, als «äquiaxial» bezeichnete Körner mit so genannten Rekristallisations- oder Glühzwillingen. Die frühbronzezeitlichen Metallurgen dürften jedoch eher die Technik des mehrfachen Kaltschmiedens und Weichglühens sowie abschliessenden Kalthämmerns angewandt haben.[17] Der letztgenannte Arbeitsschritt dient dazu, Waffen oder Werkzeuge fester und härter zu machen; er ist bei nahezu allen metallographisch untersuchten Beilen nachgewiesen (Kienlin et al. 2004).

Alle sieben Proben aus den Beilen von Sennwald-Salez weisen ein allenfalls geringfügig verformtes, nur partiell rekristallisiertes Gussgefüge auf. Die intermetallischen Phasen sind als zuletzt erstarrter Gefügebestandteil in den Restfeldern der kupferreichen Dendriten angeordnet. Im klingenabgewandten, rückwärtigen Kernbereich der Proben (Abb. 5, links) sind grosse, unregelmässig geformte Körner mit unterschiedlich starken Mischkristallseigerungen sichtbar. Deren Umriss, der gewellte Korngrenzenverlauf und das Fehlen von Glühzwillingen belegen, dass es sich um ein nicht rekristallisiertes Gussgefüge handelt. Zudem sind die Körner, Poren und Lunker nicht verformt, und die dendritische Struktur ist ungestört. Dieser Teil wurde also nie stark verformt. Nur im Klingenbereich sind kleinkörnigere Zonen mit Glühzwillingen festzustellen, wogegen die ansonsten für rekristallisierte Gefüge typischen, äquiaxialen Körner fehlen (Abb. 5, rechts). Weichglühen im Zuge des Herstellungsprozesses ist bei den metallographisch untersuchten Beilen der Frühbronzezeit als regelhaft belegt (Kienlin im Druck), und es ist offenkundig, dass auch die Stücke aus Sennwald-Salez so bearbeitet wurden: Die Rekristallisationszwillinge verraten ein versuchtes Weichglühen nach vorangegangener Kaltverformung. Dabei wird das Erwärmen kaum weniger intensiv ausgefallen sein als bei anderen Beilen des Typs Salez, vielmehr behinderte der hohe Volumenanteil intermetallischer Phasen die Ausbildung geradliniger Korngrenzen und verzögerte insgesamt die Kornneubildung, was zu der festgestellten, nur partiellen Rekristallisation führte (Schumann 1991, 401; Bargel/Schulze 1988, 27-34).[18] Was die Herstellung der Beile von Sennwald-Salez von den anderen Vertretern des gleichen Typs unterscheidet, ist also nicht das generelle Vorgehen, sondern die eingeschränkte Wirkung eines Weichglühens von durchschnittlicher Intensität - ein erster Hinweis auf die Besonderheit des hier verwendeten Werkstoffes.

Da Neben- oder Legierungselemente andere Atomgrössen besitzen als Kupfer, führt ihr Vorhandensein zu Verzerrungen des Kristallgitters. Verunreinigtes oder legiertes Kupfer ist daher bereits im unverformten Zustand in der Regel härter und fester als reines, man spricht von Mischkristallverfestigung. Noch ausgeprägter wird dieser Unterschied durch Kaltschmieden, denn Gitterstörungen behindern die Fähigkeit des Gefüges, eine Verformung aufzunehmen. Nebenelementhaltiges oder legiertes und zudem kaltgeschmiede-

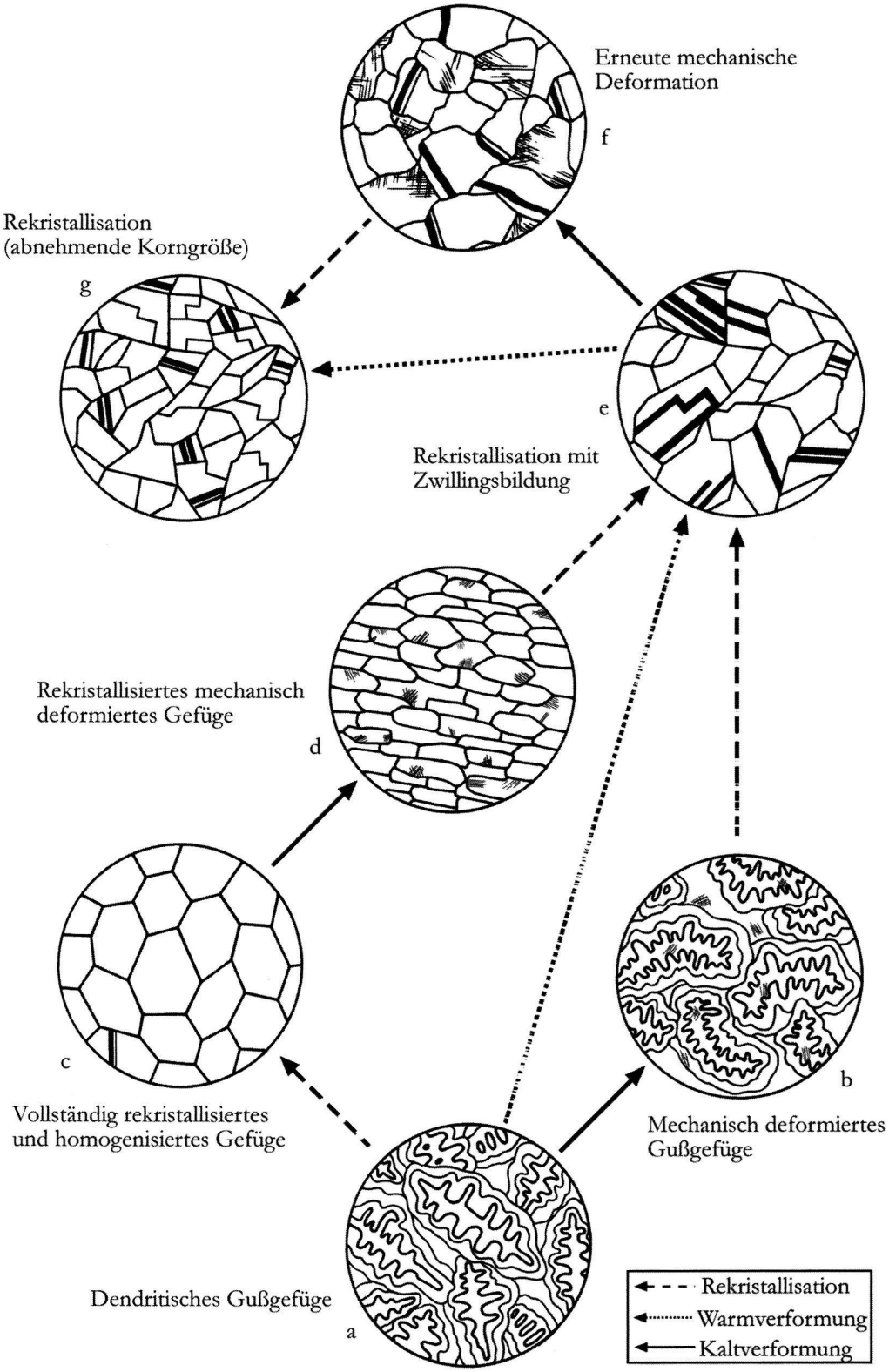


Abb. 4. Schematisierte Übersicht des Zusammenhanges zwischen Bearbeitung und Gefügeausprägung. Nach Scott 1991, 7f. Abb. 11.12, modifiziert.

tes Kupfer kann daher sehr viel härter sein als reines Kupfer (Kaltverfestigung).[19] Grundsätzlich gilt dabei, dass die Härte des Objekts vom Gehalt an Neben- oder Legierungselementen in der Mischkristallmatrix abhängt (Northover 1989, 111f.; Budd/Ottaway 1991, 135f.; Lechtman 1996, 492). Genau dies ist aber bei den Beilen von Sennwald-Salez nicht der Fall und unterstreicht ihre Sonderstellung unter den Beilen des Typs Salez. In allen sieben Proben belegen gelegentliche Gleitlinien und vereinzelte, etwas verformte Rekristallisationszwillinge in den Körnern des Klingenbereichs leichtes, abschliessendes Kaltschmieden (Abb. 5, rechts).[20] Nur in einem Fall erreichte die letzte Bearbeitung den von der Klinge abgewandten Kern, zudem in deutlich abgeschwächter Form. Zumeist handelt es sich um Gleitlinien in einem System, und es ist keine Verformung der rekristallisierten Körner der Klinge oder gar der dahinter liegenden Gusskörner festzustellen. Das Kaltschmieden führte daher selbst an der Klinge zu einer Verformung von kaum mehr als 10-20 %.[21]

Wie aufgrund des Gefügebefundes zu erwarten, liegt die Härte der Klinge über der des klingenabgewandten Bereichs, so etwa bei der Proben-Nummer 101203, bei der ein Rückgang von 187HV auf 141HV zu verzeichnen ist (Abb. 6). Mit einer Ausnahme werden an der Klinge Härtewerte von über 170HV erreicht, bei etwas stärkerer Kaltverformung sogar ein Wert von 224HV (Abb. 7). Zum Vergleich herangezogenes 10%-iges Arsenkupfer, das in seiner Matrixzusammensetzung jener der Beile von Sennwald-Salez nahe kommt,[22] weist eine Ausgangshärte von rund 85HV auf, die bei einer Kaltverformung von 20 % auf rund 160HV ansteigt (Lechtman 1996, 496 Abb. 20). Die Härte einer gussbelassenen Cu As4 % Sb4 % Bi0,1 % Legierung wird mit 88HV angegeben und steigt nach einer entsprechenden Kaltverformung auf etwa 180HV an (Junk 2003, 144-146 Abb. 7.16; 156 Abb. 7.26). Man kommt damit in die Nähe der vorliegenden Härtewerte, die jedoch noch systematisch über den zu erwartenden Werten liegen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es wegen der intermetallischen Phasen selbst mit Mikrohärtetests nicht möglich war, eine reine Matrixhärte zu bestimmen. Werte zwischen rund 100HV und 140HV im Kernbereich müssen als repräsentativ für die Gesamthärte des unverformten Gussgefüges gelten.[23] Infolge der Mischkristallverfestigung, vor allem aber wegen des hohen Volumenanteils harter, intermetallischer Phasen waren die Beile von Sennwald-Salez bereits im gussfrischen Zustand deutlich härter als andere Vertreter des Typs Salez ohne entsprechende Phasenbildung. Aufgrund der raschen Kaltverfestigung der Matrix und des hohen Phasenanteils, der die Wanderung von Versetzungen durch das Gefüge erschwert, führte bereits ein leichtes Überschmieden zu signifikant erhöhten Härtewerten, wie sie bei anderen Beilen des Typs nur mit sehr viel stärkerem Kaltschmieden zu erzielen waren (Abb. 7).

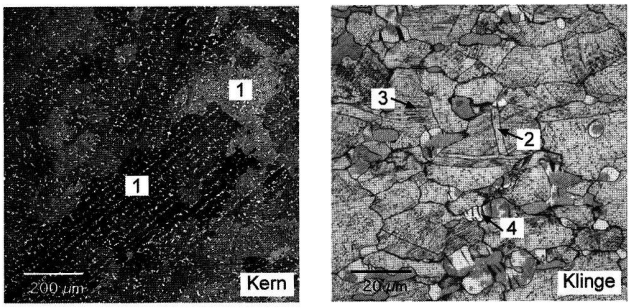


Abb. 5. Grosse Gusskörner im klingenabgewandten Probenbereich (1). Rekristallisierte Körner mit Glühzwillingen (2) im Klingenbereich derselben Probe; Gleitlinien (3) und die Verformung der Glühzwillinge belegen ein abschliessendes Kaltschmieden; infolge der Verformung sind die intermetallischen Phasen aufgebrochen (4). Proben-Nr. 101205.

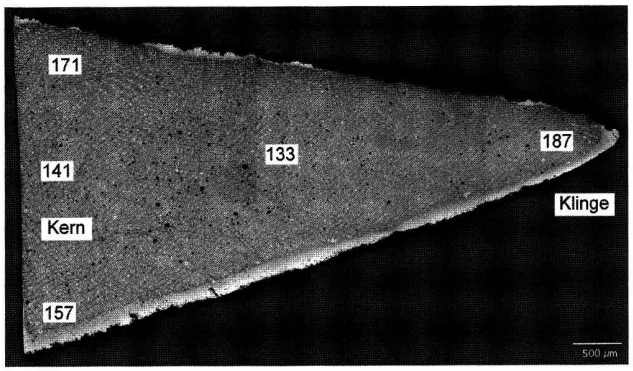


Abb. 6. Rückgang der Härtewerte von Klinge und Oberfläche zum gussbelassenen Kernbereich. Proben-Nr. 101203; HV0,1.

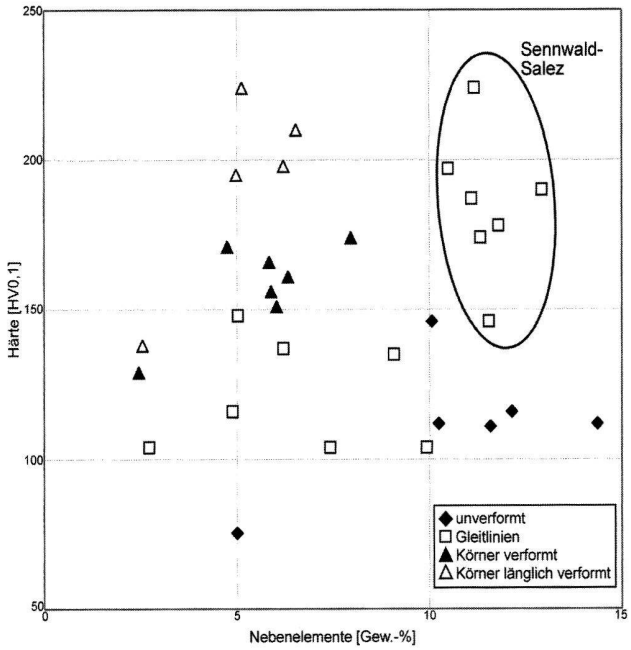


Abb. 7. Die Härte der Beile des Typs Salez in Abhängigkeit von Zusammensetzung und Kaltverformung; deutlich abgesetzt aufgrund ihrer hohen Härte bei nur leichter Kaltverformung die Beile von Sennwald-Salez.

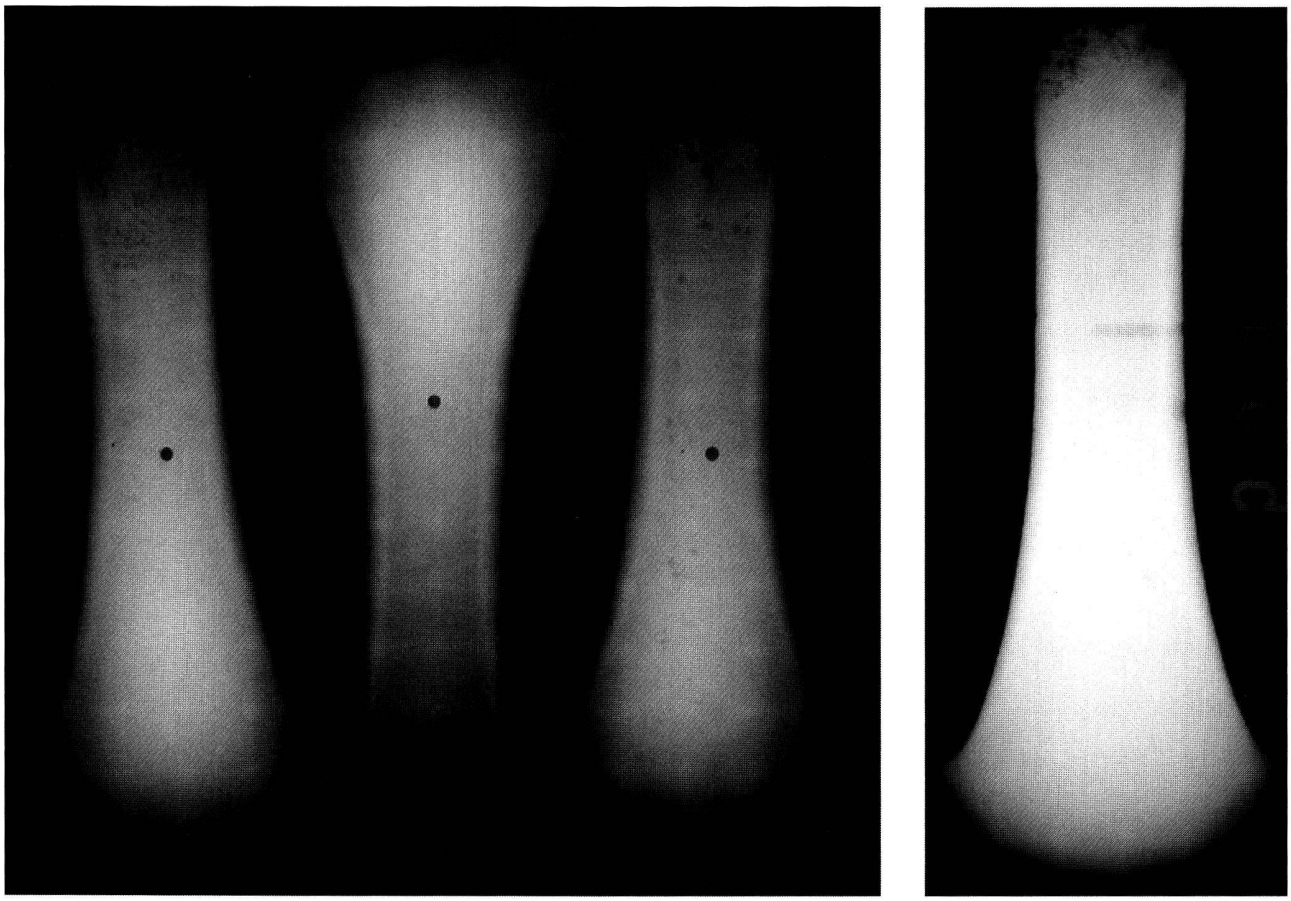


Abb. 8. Röntgenaufnahmen von Beilen des Depotfundes von Sennwald-Salez. Porosität im Nackenbereich belegt Guss in eine stehende, geschlossene Form. a Proben-Nr. 101205-101207; b Proben-Nr. 101201.

Zur Herstellung der Beile von Sennwald-Salez

Von vier der untersuchten Beile wurden Röntgenaufnahmen angefertigt. Sie lassen im Nackenbereich eine erhöhte Porosität erkennen (Abb. 8), die Folge von Gasen, die bei der Erstarrung aufstiegen (Poren), und von Schrumpfung (Lunker). Die Stücke wurden also über den Nacken in eine aufrecht stehende, geschlossene Form gegossen. Die Randleisten wurden wohl mitgegossen; sie sekundär aufzuschmieden wäre ein unnötiger Mehraufwand gewesen. Von den Randleisten der Beile von Sennwald-Salez konnten keine Proben entnommen werden, so dass bezüglich der Randleistenbildung keine direkte Aussage möglich ist. Allerdings zeigt das Gefüge des von Lesniak (1991, 240f.) untersuchten Beiles, dass die Randleisten zwar überschmiedet, nicht aber vollständig aufgeschmiedet wurden, und bestätigt damit Guss in eine geschlossene Form. Derselbe Befund zeigt sich bei den Beilen des Depots von Hindelwangen, die den Stücken von Sennwald-Salez bezüglich der Zusammensetzung am nächsten kommen (Krause 1988, 220; Bill 1997, 250); ihre Randleisten sind nur oberflächlich überschmiedet (Kienlin im Druck).

Bleibt zu klären, woraus die Gussform bestand. Die These, man hätte in der (Früh-)Bronzezeit Formsand verwendet, wurde ebenso oft postuliert wie verworfen.[24] Wie ethnoarchäologische oder experimentelle Arbeiten zeigen, ist das Verfahren leicht durchzuführen. Seine Anwendung in der Urgeschichte archäologisch nachzuweisen, ist indessen schwierig. Die Ausbildung des Gussgefüges ist unter anderem von der Abkühlungsrate abhängig und damit von der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit verschiedener Gussformmaterialien. Eine metallographische Untersuchung kann daher Hinweise liefern, freilich nur, wenn Gussgefüge noch vorliegen und sie nicht durch vollständiges Weichglühen oder stärkeres Ausschmieden überprägt wurden, was indessen bei den wenigsten frühbronzezeitlichen Beilen - unter ihnen bei denjenigen von Sennwald-Salez - der Fall ist. Erforderlich sind zudem experimentelle Arbeiten zu den Abkühlungsraten von Gussformen aus unterschiedlichen Materialien und zu den resultierenden Gefügen - ein Ansatz, der erst seit kurzem systematisch verfolgt wird (z. B. Ottaway/Seibel 1998; Wang/Ottaway 2005). So verglich

Junk (2003, 132-144.170) experimentelle Sandgüsse mit dem Gefüge nicht (vollständig) rekristallisierter Ösenringe der Frühbronzezeit; sie stellte dabei Übereinstimmung beim Armabstand der Sekundärdendriten fest, dem Mass für die Geschwindigkeit der Erstarrung. Wohl weist sie zurecht darauf hin, dass vorgeheizte Steingussformen zu einem ähnlichen Resultat führen könnten. Trotzdem liegt mit den geschilderten Fakten das bislang stärkste Indiz für die Verwendung von Sandgussformen in der Frühbronzezeit vor. Die von Junk (2003, 61-128) dokumentierten Gefüge weisen typischerweise Armabstände von 20 µm bis 50 µm auf. Entsprechende Weiten finden sich ebenfalls bei den Beilen von Sennwald-Salez; sie belegen eine ähnlich langsame Erstarrung wie bei den Ösenringen. Auch für die Beile kann daher die Verwendung von Gussformen aus Formsand als wahrscheinlich gelten.

Die Beile von Sennwald-Salez dürften wegen der hohen Ausgangshärte, der starken Kaltverfestigung der Mischkristallmatrix sowie der Härte und Sprödigkeit der intermetallischen Phasen schwer schmiedbar gewesen sein. Daher versuchte man, formnahe Rohlinge zu erzeugen, die ohne grössere Umformung fertig gestellt werden konnten. Es trifft freilich nicht zu, wie Lesniak (1991, 246f.) verallgemeinert, dass solches Fahlerzmetall aufgrund seiner Sprödigkeit grundsätzlich nicht zu schmieden und zur Werkzeugherstellung ungeeignet sei, so dass man sich die Sennwald-Salezer Beile als reine Prestigegüter vorzustellen hätte. Denn schliesslich wurden sowohl ihre Randleisten als auch ihre Klingen durchaus überarbeitet (s. o.), und es wurden dabei im Klingenbereich Härtewerte erreicht, die bei anderen Beilen des Typs Salez wenn überhaupt nur durch starkes Kaltschmieden zu erzielen waren. Es hat den Anschein, dass nicht etwa der verwendete Rohstoff kein Ausschmieden zuliess (vgl. auch Northover 1998a, 119 Abb. 15), sondern dass man bewusst und in voller Kenntnis der Materialeigenschaften durch besondere Sorgfalt beim Guss die Notwendigkeit einer Umformung vermied, dabei aber zugleich von der hohen Ausgangshärte und der starken Kaltverfestigung profitierte. Die Beile wurden also weitestgehend in der Endform gegossen. Die Halbfabrikate wurden lediglich geschliffen und poliert, zudem die Randleisten geringfügig überarbeitet, der Klingenbereich durch Kaltschmieden zusätzlich gehärtet. Man fasst ein den spezifischen Materialeigenschaften angepasstes Herstellungsverfahren, und da beim Überschmieden der Randleisten und Klingen keine Rissbildung auftrat, darf ferner bezweifelt werden, dass aufgrund der Sprödigkeit bei den denkbaren Einsatzmöglichkeiten, als Vielzweckgerät oder als Waffe, Probleme aufgetreten wären. Vielmehr könnten die beschriebenen Eigenschaften Beilen der Art von Sennwald-Salez als Waffe oder Werkzeug durchaus zu besonderer Attraktivität verholfen haben.

Zur Bedeutung der Beile von Sennwald-Salez

Die vorgestellten metallographischen Untersuchungen wurden nicht mit dem Ziel der Herkunftsbestimmung durchgeführt und so lässt sich wenig Neues über die mutmassliche Herkunft des Metalls der Salezer Beile aus Lagerstätten im weiteren Einzugsbereich des Alpenrheintals aussagen (s. Krause 1988, 214-218.238-241). Zudem ist die Zeitstellung des Typs Salez nicht abschliessend geklärt, was die archäologische Bewertung des metallurgischen Befunds erschwert.[25] Die Ergebnisse lassen aber einige Rückschlüsse auf die Bedeutung der Salezer Beile insgesamt zu, auf ihre Stellung in der frühbronzezeitlichen Metallurgie und ihr Verhältnis zu benachbarten Beilformen sowie auf die Umstände der Niederlegung des Depots von Sennwald-Salez.

Bei den Beilen des Typs Salez handelt es sich um klassische Vertreter eines frühbronzezeitlichen Fahlerzkupfers ohne Zinnzugabe, wie es auch in den Artefakten des Gräberfeldes von Singen belegt ist (Krause 1988). Betrachtet man die mechanischen Eigenschaften aller Salezer Beile, die metallographisch untersucht werden konnten, so zeigt sich eine recht grosse Streubreite der Härtewerte (Abb. 7). Zurückzuführen ist das auf unterschiedlich hohe Nebenelementgehalte und auf das verschieden starke Kaltschmieden; die metallurgischen Traditionen waren offenkundig noch weniger stabil als später bei den Beilen des Typs Langquaid der entwickelten Frühbronzezeit (Kienlin 2004, 188-191; Kienlin et al. 2004, 8f.). Andererseits wurden zumindest bei einem Teil der Salezer Beile entsprechend hohe Härtewerte erreicht wie bei gleichzeitigen oder späteren Zinnbronzen (z. B. Beile des Sächsischen Typs), und diese Werte liegen deutlich über der Härte, die zuvor zum Beispiel bei jungneolithischen Beilen des Typs Altheim aus Kupfer bzw. Arsenkupfer erzielt wurde.[26] Die Verwendung von Fahlerzmetall stellt somit einen wichtigen Schritt auf dem Weg in die Metallzeiten dar, und zwar nicht nur in Hinblick auf die bessere Verfügbarkeit sulfidischer Erze, sondern vor allem bezüglich der Materialeigenschaften. Wie bereits angedeutet, ist das chronologische Verhältnis der unlegierten Beile des Typs Salez zu jenen des Typs Neyruz sowie den Sächsischen Randleistenbeilen, die zum Teil aus Zinnbronze bestehen, noch nicht definitiv geklärt. Man sollte jedoch davon Abstand nehmen, den Salezer Beilen aufgrund der fehlenden Zinnlegierung gesamthaft ein höheres Alter zuzusprechen. Vielmehr wurde anscheinend die Legierung mit Zinn in Gegenden ohne leichten Zugang zu Fahlerzkupfer mit hohem Nebenelementgehalt schneller akzeptiert, während das Vorhandensein solcher «natürlicher Legierungen» im Verbreitungsgebiet der Salezer Beile zu einer verspäteten Übernahme dieser Innovation beitrug. Man kann davon ausgehen, dass bereits das Aufkommen von Fahlerzmetall die Bedeutung und Attraktivität von Waffen oder Werkzeugen aus Metall deutlich steigerte und diese Kupfersorte über einen gewissen Zeitraum eine adäquate Alternative zur Zinnbronze darstellte.[27]

Aufgrund ihres Nebenelementgehalts und der daraus resul-

tierenden Werkstoffeigenschaften nehmen die Beile von Sennwald-Salez unter den Vertretern des Typs Salez insgesamt eine Sonderstellung ein. Die Grösse des namengebenden Depotfundes mit ursprünglich 66 Beilen und das Vorliegen vergleichbarer Stücke von Hindelwangen nördlich des Bodensees zeigen freilich auch, dass es sich keineswegs um ein Einzelereignis handelte, also um die irrtümliche Verwendung eines gänzlich ungeeigneten Erz- oder Metalltyps (s. auch Bill 1997, 248f.). In der Bearbeitung folgte man dabei grundsätzlich denselben Routinen, die auch in der Herstellung nebenelementärmerer Beile Anwendung fanden, passte sie aber den Materialeigenschaften an, wobei insbesondere die erschwerte Formgebung durch Schmieden zum Problem geworden sein könnte. Es ist aber offenkundig, dass solche Einschränkungen eher die Produktion anderer Artefaktgruppen betroffen hätten, und innerhalb des «Blechkreises» (Vogt 1948) die formnah gegossenen Beile in dieser Hinsicht noch die geringsten Schwierigkeiten machten. In Hinblick auf die Herkunft des verwendeten Metalls wird man zunächst an die Ausbeutung spezifischer Lagerstätten denken, die solches Kupfer lieferten (Krause 1988, 238-241). Vorgeschlagen wurde jedoch auch ein gezieltes Auflegieren mit Antimon bzw. Nickel (Bill 1997, 250f.). Vor einem lokalen oder regionalen Hintergrund bleibt offen, ob andere Kupfersorten verfügbar gewesen wären. Es erhebt sich also die Frage, welche Gründe gegebenenfalls *für* eine gezielte Erzeugung oder eher Auswahl besonders nebenelementreichen Kupfers bzw. entsprechender Erze sprechen können.

In diesem Zusammenhang wurde oben auf die hohen Härtewerte der Beile von Sennwald-Salez hingewiesen, und es ist möglich, dass sie im Kontext des Gebrauchs eine besondere Attraktivität begründeten. Solchen Stücken zur Seite zu stellen sind nebenelementärmere Beile, die nach starker Kaltverformung vergleichbare Härtewerte erreichten (Abb. 7). Im Rahmen eines wie auch immer gearteten Gebrauchs wird zwischen den Vertretern beider Gruppen nicht unbedingt ein Unterschied festzustellen gewesen sein. Was beide Gruppen jedoch unterscheidet, ist die in stärkerem Masse von reinem Kupfer abweichende, ins Silbrige reichende Farbe der Beile von Sennwald-Salez (Bill 1997, 251).[28] Man muss hier - ganz pragmatisch - in Betracht ziehen, dass ein farblich auffälliges Kupfer über einen oder mehrere Schritte des Austauschs hinweg gute mechanische Eigenschaften verbürgte. Die Haltbarkeit von Beilen niedrigeren Nebenelementgehalts jedenfalls war aufgrund direkter Anschauung allein und ohne Kenntnis der Stärke des Kaltschmiedens weit weniger sicher zu beurteilen. Eindeutige Belege, dass die Farbe der Beile von Sennwald-Salez und ihre eventuell nicht nur funktional begriffene Härte darüber hinaus eine Wertschätzung für soziale oder kultische Zwecke begründete (Prestige oder Opfer), sind naturgemäss schwer beizubringen. Ganz sicher aber geht es nicht an, den Beilen von Sennwald-Salez aufgrund ihrer Materialeigenschaften eine Eignung als Werkzeug oder Waffe abzusprechen und sie ab Herstellung zur Opfergabe zu erklären (Lesniak 1991, 248-252).

Eher denn als kultische Deponierung kann man sich wegen seiner Grösse und der Niederlegungsbedingungen den Fundkomplex von Sennwald-Salez als «Händler»-Depot vorstellen (Bill 1997, 248f.). Die einheitlichen, im wesentlichen gussbelassenen Gefüge scheinen den Bezug zum Herstellungskontext noch zu unterstreichen. Vorderhand steht also einer Interpretation als erstes Glied der von Krause (1988, 240f.) postulierten «Metallurgiekette» wenig entgegen. Obwohl nicht besonders stark umgeformt, belegen die Gefüge aber auch, dass durchaus mit einem Überschmieden und einem Interesse an den mechanischen Eigenschaften zu rechnen ist. Vorbehalte gegenüber einer Deutung der Beile als Barren sind daher angebracht.[29] Nahe der Erzlagerstätte wurden hier gebrauchsfertige Beile hergestellt, deren spezifische Gefügeausprägung weniger auf die Stellung am Beginn einer Distributionskette zurückzuführen ist - also auf ein vorausgesetztes Wiedereinschmelzen -, als vielmehr auf die Eigenschaften des verfügbaren Werkstoffes, seine von Anfang an recht hohe Härte und erschwerte Verformbarkeit. Aufgrund der äusserlich sichtbaren, sorgfältigen Fertigstellung der Beile von Sennwald-Salez meldete Bill (1997, 251) Zweifel an, ob eine dermassen aufwendige Bearbeitung einer Deutung als Barren zum Zwecke des baldigen Umschmelzens zu anderen Objekten nicht wider spreche.[30] Man kann dem aus Sicht des Gefügebefundes der Beile von Sennwald-Salez nur zustimmen. Die Herstellung der Salezer Beile insgesamt orientierte sich - wenngleich noch mit unterschiedlicher Konsequenz (s. o.) - sehr deutlich an guten Gebrauchseigenschaften als Waffe oder Werkzeug. Diese wurden zum Teil mit hohem Aufwand durch Kaltschmieden erzielt. Die Annahme einer direktionalen Verbreitung des Metalls in Form von Barren dürfte also falsch sein, ebenso die gesamthafte Deutung der Depotfunde mit Beilen des Typs Salez als Rohmaterialkomplexe.[31] Ganz im Sinne Bills (1997) ist bereits in unmittelbarer Nähe zu den mutmasslichen Lagerstätten nicht nur mit Händlerdepots zu rechnen, sondern mit komplexen Prozessen der Zirkulation von Beilen, ihres Gebrauchs als Waffen oder eher als Vielzweckgerät und ihrer Niederlegung aufgrund einer Reihe unterschiedlicher Motivationen.[32]

Tobias L. Kienlin
Institut für Ur- und Frühgeschichte und Archäologie
des Mittelalters
Abt. Jüngere Urgeschichte und Frühgeschichte
Eberhard Karls Universität Tübingen
Schloss Hohentübingen
72070 Tübingen
tobias_kienlin@yahoo.de

Anmerkungen

1 Bei den hier vorgestellten Untersuchungen handelt es sich um einen Teil meiner im Jahr 2004 abgeschlossenen Dissertation (Kienlin i. Dr.). Ohne das freundliche Entgegenkommen zahlreicher Museen und Sammlungen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Besonderer Dank für die Proben der Beile von Sennwald-Salez gebührt W. Fasnacht, zu jenem Zeitpunkt Schweizerisches Landesmuseum, Zürich, A. Kern, Naturhistorisches Museum, Wien, H. Swozilek, Vorarlberger Landesmuseum, Bregenz, und G. Trnka, Institut für Ur- und Frühgeschichte, Wien. Für ihre Unterstützung und zahlreiche Hinweise zum Thema bin ich B. S. Ottaway, Department of Archaeology, University of Exeter, W. Kubach, Institut für Archäologische Wissenschaften, Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt, E. Bischoff und H. Opielka, Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart, zu Dank verpflichtet.

2 Abels (1972, 4-10) und Krause (1988, 220f. Abb. 93); zu östlicher gelegenen Fundpunkten und dem Übergang zu den verwandten Beilen des Sächsischen Typs Mayer (1977, 76-84), Kibbert (1980, 157-164) und Pászthory/Mayer (1998, 29-32).

3 Zu den Fundumständen, der Fundgeschichte und den heute noch zuweisbaren Beilen die ausführliche Aufarbeitung durch Bill (1997), zuvor Abels (1972, 6), Bill (1977; 1985) und Stein (1979, 96 Nr. 210). Im Gegensatz zu Bill (1997, «Die Bronzebeile von Salez») sollte man hier, um Verwirrungen vorzubeugen, nicht von Bronzen sprechen, da nicht nachgewiesen ist, dass es sich um eine absichtliche Legierung handelt (s. u.).

4 Es handelt sich um die folgenden Beile: Vorarlberger Landesmuseum, Bregenz, Inv.-Nr. Pr. 569 (Proben-Nr. 101201; Abb. 1g); Institut für Ur- und Frühgeschichte, Universität Wien, Inv.-Nr. 9042 (Proben-Nr. 101202; Abb. 1c); Schweizerisches Landesmuseum, Zürich, Inv.-Nr. 15514 u. 23893 (Proben-Nr. 101203 u. 101204; Abb. 1a u. 1b); Naturhistorisches Museum, Wien, Inv.-Nr. 8403 (3 Beile) (Proben-Nr. 101205-101207; Abb. 1d-f). Hinzu kommt als Vergleichsstück ein weiteres, zuvor von Lesniak (1991, 15f.) metallographisch und phasenanalytisch untersuchtes Beil desselben Depots aus dem Museum von Neuchâtel.

5 An einer gut erhaltenen Stelle der Klinge wurde eine etwa 0,5 cm tiefe und 0,1 cm dicke Probe entnommen. Es fand ein Kalteinbettmittel Verwendung, wobei sich eine Vakuumimprägnierung als vorteilhaft erwies (Porosität). Das Anschleifen erfolgte auf Siliziumkarbid-Papieren, das Polieren mit Diamantpasten und abschliessender Oxidpolitur. Das Ätzen mit salzsaurer $FeCl_3$-Lösung brachte gute Ergebnisse. Wegen der geringen Probendicke wurde die Härte mit einem Mikrohärte-Testgerät bestimmt (Prüfkraft: 100N; Kraftheltedauer: 30s). Die Zusammensetzung wurde im Rasterelektronenmikroskop mittels energiedispersiver Röntgenspektrometrie (EDX) ermittelt, wobei mit Punkt- und Bereichsanalysen einzelne Gefügebestandteile und die Gesamtzusammensetzung bestimmt wurden.

6 Gussformen für Beile des Typs Salez liegen bislang nicht vor, am nächsten kommt eine auch von Bill (1997, 250) angeführte Gussform aus Arbon-Bleiche (Hochuli 1994, 99.303 Taf. 87).

7 Gegenüber Abels (1972, 8) entfallen bei Bill (1997, 248f.) einige irrtümlich zugewiesene Beile der Variante D.

8 Bei Abels (1972) immerhin acht Varianten des Typs Salez; Bill (1997, 249) denkt deshalb bezüglich der Beile von Sennwald-Salez an «die Arbeit eines einzelnen Erzeugers oder Handwerksbetriebes».

9 Dazu auch Lechtman (1998, 84) zu der Erstarrung ternärer Kupfer-Arsen-Nickel-Legierungen und der dabei auftretenden intermetallischen Phasen.

10 Lesniaks (1991, 130-133) Phasen 2a bis 2e mit Summenformeln wie $Cu_{3+x}(Co/Ni)_{2-x}(As/Sb)_2$ (Phase P2a) oder $Cu_3(Co/Ni)_2(As/Sb)_2$ (Phase 2b); s. auch Northover (1998a, 118f.; 1998b, 290). Von den Phasen, die im experimentellen Guss auftraten, wies Lesniak (1991, 63f. 164f.) in dem Salezer Beil die Phase 2b mit 6,1 Atom-% Arsen, 24,8% Antimon, 25,4% Nickel und 2,4% Kobalt, sowie die Phase 2c mit 6,3 Atom-% Arsen, 25,0% Antimon, 34,1% Nickel und 1,5% Kobalt nach. Ihren gemeinsamen Anteil am Gefüge gibt er mit zwischen 1% und 10% an (Lesniak 1991, 40.65).

11 Verbindungen zweier Metalle, in denen (auch) nicht-metallische Bindungskräfte auftreten und die chemischen Wertigkeiten keine Gültigkeit besitzen (z.B. $Cu_{31}Sn_8$, die δ-Phase in Zinnbronzen). Intermetallische Verbindungen bilden komplexe Gitter und Elementarzellen, entsprechend variieren zum Beispiel ihre mechanischen Eigenschaften (Bargel/Schulze 1988, 46f.; Schumann 1991, 306-310).

12 Die Zusammensetzung solcher Phasen wird im Rasterelektronenmikroskop mittels Punktanalysen bestimmt. Abweichungen ergeben sich, da aufgrund des geringen Phasenvolumens Teile der umgebenden Matrix in der Analyse sichtbar werden.

13 Hierzu ausführlich Lesniak (1991, 119-143.185-194), ebenso Schumann (1991, 627); zum Vergleich Moesta (1988) und Moesta et al. (1989), die frühbronzezeitliche Spangenbarren untersuchten. Ein schönes Beispiel auf diesem Wege erstarrten Kupfersulfids publizierten Buchwald/Leisner (1990, 70 Abb. 12).

14 so z.B. Spindler (1971, 199), Hauptmann/Weisgerber (1985, 30), Bertemes (1989, 141.161f.), Krause (1997, 35; 2003, 207), Pernicka (1998, 135), Northover (1998a, 117) und Schwenzer (2004, 203).

15 Lesniak (1991, 247), ferner Lechtman/Klein (1999, 502 Abb. 3; 510 Abb. 6; 513 Abb. 12).

16 Zur Ausbildung der «Stämme» und «Äste» eines solchen Gussgefüges kommt es aufgrund von zwei Faktoren: durch die gerichtete Wärmeableitung zur Gussform und durch die Existenz bestimmter Vorzugsrichtungen, in die das Kristallwachstum erfolgt. Abgesehen von den bereits angesprochenen Phasen liegen weitere Materialinhomogenitäten in Form so genannter Mischkristallseigerungen vor, das heisst es existieren Gefügebereiche, in denen sich bei der Erstarrung unterschiedlich hohe Konzentrationen an Neben- oder Legierungselementen anreicherten.

17 Anhand einer Reihe von Einschlüssen (Tylecote 1987, 247; Scott 1991, 7f.) ist nicht zu unterscheiden, ob kaltgeschmiedet wurde, unterbrochen von Weichglühen, oder ob Heissschmieden vorliegt. Eine Reihe von Indizien spricht jedoch dafür, dass Heissschmieden in der Frühbronzezeit keine Rolle spielte: allgemein die schwierige Handhabung des heissen Werkstücks, die Tatsache, dass Bronzen über 8% Zinn bei einer Verformung oberhalb der Rekristallisationstemperatur versprödeten, und die starke Kaltverformung vieler Beile (s. u.). Denkbar ist allenfalls, dass das Schmieden auf dem noch heissen Objekt begann; die grösste Umformung jedoch wurde regelhaft durch Kaltschmieden erzielt (Northover 1989, 112; Buchwald/Leisner 1990, 66; Budd/Ottaway 1991, 138; Budd 1991a, 101; Lechtman 1996, 486; Junk 2003, 129-144.158-168). Im folgenden wird daher nicht mehr in jedem Fall auf die unwahrscheinlichere Alternative eines Heissschmiedens hingewiesen.

18 Zu einer Kornneubildung muss dem Gefüge Energie zugeführt werden. Dies geschieht durch das Glühen, man spricht von einem thermisch aktivierten Prozess (Bargel/Schulze 1988, 27-34; Schumann 1991, 395-403; Budd 1991b). Neben der Temperatur ist die Bereitschaft zur Rekristallisation von der Stärke der Verformung abhängig; die Rekristallisation eines kaltgeschmiedeten Gefüges setzt bei niedrigerer Temperatur ein oder läuft bei einer gegebenen Temperatur schneller ab als ohne vorangegangenes Schmieden. Bei den Beilen von Sennwald-Salez rekristallisierten daher nur die klingennahen Bereiche, die leicht überschmiedet wurden.

19 Genau genommen wandern bei einer Kaltverformung Versetzungen durch das Gefüge; sie stauen sich an Gitterstörungen, Korngrenzen oder Einschlüssen auf, was zur Verfestigung führt (Schumann 1991, 386-390); s. zu den dabei erreichten Härtewerten von Arsenkupfer, Fahlerzkupfer und Zinnbronze die Diagramme bei Northover (1989), Lechtman (1996) und Junk (2003).

20 Unverständlich bleibt der Verweis Bills (1997, 251f.) auf die Arbeit Lesniaks (1991), dort seien auch Resultate einer Untersuchung des Klingenbereichs vorgelegt. Bei Lesniak (1991, 15f.) sind jedoch nur je eine Probe der Randleiste und des Nackenbereichs verzeichnet. Offenbar unterliegt Bill einem Missverständnis, vielleicht verursacht durch eine unklare Zeichnung (Lesniak 1991, 240 Abb. 8.1.1). Als falsch ist daher auch Bills (1997, 252) Aussage anzusehen, gerade die Probe aus dem Schneidenbereich weise keine Nachbearbeitung auf, die dem Gefügebefund der hier untersuchten Beile widerspricht. Bill bezieht sich wohl irrtümlich auf die unverformte Probe aus dem Nacken des Beils, Lesniaks (1991, 240) «Beilschwanz».

21 vgl. die Gefüge bei Northover (1996, 324 NMK 104, 325 NMK 322, 326 NMK 325 u. NMK 326, 327 NMK 328, 333 NMK 353). Dass selbst unmittelbar an der Klinge die Poren und Sulfide unverformt sind und nur die intermetallischen Phasen Risse zeigen (Abb. 3), belegt dass die Objekte auch vor dem Weichglühen (s. o.) nur wenig umgeformt worden waren.

22 In der Matrix der Beile von Sennwald-Salez summieren sich Nebenelemente wie Arsen, Antimon etc. zu 10% bis 12% auf, womit die Löslichkeitsgrenze erreicht ist. Die Kombination einer Reihe unterschiedlicher Nebenelemente kann gegenüber Lechtmans (1996) Arsenkupfer zu Abweichungen führen, ihre Angaben bilden Richtwerte.

23 D.h. in den Härtewerten zeichnet sich immer auch das Vorhandensein der härteren, intermetallischen Phasen ab. Einen vergleichbaren Befund schildert Lechtman (1998) in einer Untersuchung präkolumbianischer Kupfer-Arsen-Nickel-Bronzen: die dort auftretende AsCuNi-Phase hat eine Härte von 227HV und beeinflusst bei einem Gefügeanteil von rund 20% die mechanischen Eigenschaften des Gesamtgefüges massgeblich.

24 Zusammenfassend Tylecote (1987, 209-226) und Ottaway (1994, 117-123; 2003, 343f.). Tylecote (1987, 270) zieht die Verwendung von Sand-Ton-Gemischen zumindest in Betracht; Drescher (1958, 6) lehnt den Guss in Formsand generell ab. Goldmann (1981; 1985) hingegen favorisiert diese Methode. Ihre Praktikabilität belegen experimentelle bzw. im weiteren Sinne ethnoarchäologische Arbeiten (Müller-Karpe 1990; Werner/Barth 1991; Fasnacht 1995b; Ottaway/Seibel 1998).

25 Die Datierung des Typs Salez muss mit den räumlich benachbarten Neyruz Beilen diskutiert werden: Sangmeister (1966, 65-71) stellte den Typ Salez an den Beginn der Frühbronzezeit (s. auch Abels 1972,

9f.), die Dolche des Rhônetyps und die Neyruz Beile setzte er in Phase 3 nach Christlein (1964). Dabei spielte die Zusammensetzung eine wichtige Rolle – wie später auch für Krause (1988, 218-224), der die Salezer Beile über das «Singener Kupfer» mit dieser Nekropole verknüpft. Für die Neyruz Beile sei aufgrund der Zinnlegierung eine «etwas jüngere» Zeitstellung anzunehmen. Gegenüber einer typologischen Frühdatierung (Uenze 1938, 21; Vogt 1948, 58f.) betont auch Hafner (1995, 96-98.130f. 141-146) die komplizierte Gusstechnik der Vollgriffdolche und die Zinnlegierung der Neyruz Beile, aufgrund derer er beide Formen schwerpunktmässig in die entwickelte Frühbronzezeit datiert. Bartelheim (1998, 47f., 49f.) diskutiert die Beile des Typs Neyruz im (süd-)östlichen Mitteleuropa und tendiert dort zu einer späten Datierung. Ebenso datiert er die Masse der Sächsischen Randleistenbeile und der Beile des Typs Salez und bezweifelt ein früheres Auftreten in der Stufe A1.

26 Metallographisch untersuchte Flachbeile des deutlich älteren Typs Altheim weisen – je nach Arsengehalt und Stärke des Kaltschmiedens – typischerweise Härtewerte im Bereich zwischen rund 100HV und 125HV auf (Kienlin et al. 2004, 5 Abb. 3).

27 Eine Alternative zur Zinnlegierung kann Fahlerzkupfer auch aus Sicht der Gusseigenschaften darstellen: Lechtman (1998) macht auf das weite Erstarrungsintervall präkolumbianischer Kupfer-Arsen-Nickel-Legierungen aufmerksam, das die Vergiessbarkeit bzw. das Formfüllungsvermögen positiv beeinflusst habe. Dasselbe gilt für das Fahlerzmetall der Beile des Typs Salez, insbesondere für diejenigen von Sennwald-Salez selbst (Lesniak 1991, 165f.). Allerdings zeigt die metallographische Untersuchung frühbronzezeitlicher Beile, dass weder höhere Nebenelement- noch Zinngehalte automatisch zu einer besseren Gussqualität führten (Kienlin i. Dr.). Gegenüber der allgemeinen Erfahrung und Kompetenz, die für den Guss erforderlich war, sollte sich der Blick in dieser Frage nicht auf die Zusammensetzung verengen.

28 s. Lesniak (1991, 147-155) mit einer systematischen Bestimmung der Farbwerte entsprechender Fahlerzmetalle bzw. der entfärbenden Wirkung von Antimon, Arsen, Silber und Nickel auf Kupfer.

29 Northover (1998a, 118f.; 1998b, 290f.293f.) untersuchte plano-konvexe Barren aus dem Depotfund von Arbedo, deren Zusammensetzung dem frühbronzezeitlichen Singener Kupfer gleicht. Er erwägt, dass dieses Metall - als Ersatz für Zinn - mit reinerem Kupfer gemischt werden konnte. Dies kommt auch für die Beile von Sennwald-Salez in Betracht, doch zeigen in diesem Fall Form und Bearbeitung, dass eine solche Verwendung nicht von Anfang an intendiert war.

30 Hinzuweisen ist auch auf starke Abnutzungserscheinungen an zahlreichen Beilen des Typs Salez, die für längerfristigen Gebrauch, nicht für rasches Wiedereinschmelzen sprechen (Kienlin/Ottaway 1998).

31 Dies vor allem auch in Hinblick auf die Implikation der Darstellungen Krauses (1988, 242), dass der Kupferbedarf Singens zeitnah direkt von der Lagerstätte gedeckt wurde, und nicht etwa über kompliziertere Austauschsysteme.

32 In Hinblick auf die inneralpinen Depotfunde - neben Sennwald-Salez noch Feldkirch, Gams-Gasenzen und Mels - weist Bill (1997, 254) darauf hin, dass keineswegs nur Niederlegungen des Umfangs und der Art von Sennwald-Salez vorkommen. Er mahnt daher zu Recht eine differenzierte Bewertung der Deponierungssitte an (s. auch Fischer 1990, 607).

Bibliographie

Abels, B.-U. (1972) Die Randleistenbeile in Baden-Württemberg, dem Elsass, der Franche Comté und der Schweiz. Prähistorische Bronzefunde IX,4. München.

Bargel, H.-J./Schulze, G. (1988) Werkstoffkunde. 5. Auflage. Düsseldorf.

Bartelheim, M. (1998) Studien zur böhmischen Aunjetitzer Kultur - Chronologische und chorologische Untersuchungen. Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie 46. Bonn.

Bertemes, F. (1989) Das frühbronzezeitliche Gräberfeld von Gemeinlebarn. Kulturhistorische und paläometallurgische Studien. Saarbrücker Beiträge zur Altertumskunde 45. Bonn.

Bill, J. (1977) Zum Depot von Salez. Jahresbericht des Instituts für Vorgeschichte der Universität Frankfurt a.M. 1977, 200-206.

- *(1985)* Zur Fundsituation der frühbronzezeitlichen Horte Mels-Rossheld, Gams-Gasenzen und Salez im Kanton St. Gallen. AKB 15, 25-29.
- *(1997)* Die Bronzebeile von Salez. Das 1883 gefundene Depot aus der Frühbronzezeit. Werdenberger Jahrbuch 10, 247-261.

Buchwald, V. F./Leisner, P. (1990) A Metallurgical Study of 12 Prehistoric Bronze Objects from Denmark. Journal of Danish Archaeology 9, 64-102.

Budd, P. (1991a) A Metallographic Investigation of Eneolithic Arsenical Copper Artefacts from Mondsee, Austria. Journal of the Historical Metallurgy Society 25, 99-108.

- *(1991b)* Eneolithic Arsenical Copper: Heat Treatment and the Metallographic Interpretation of Manufacturing Processes. In: E. Pernicka/G.A. Wagner (eds.) Archaeometry '90. International Symposium on Archaeometry, Heidelberg 1990. Basel, 35-44.

Budd, P./Ottaway, B. S. (1991) The Properties of Arsenical Copper Alloys: Implications for the Development of Eneolithic Metallurgy. In: P. Budd/B. Chapman/C. Jackson et al. (eds.) Archaeological Sciences 1989. Oxbow Monograph 9, 132-142. Oxford.

Christlein, R. (1964) Beiträge zur Stufengliederung der frühbronzezeitlichen Flachgräberfelder in Süddeutschland. Bayerische Vorgeschichtsblätter 29, 25-63.

Drescher, H. (1958) Der Überfangguss. Ein Beitrag zur vorgeschichtlichen Metalltechnik. Mainz.

Fasnacht, W. (1995a) 4000 Jahre Kupfer- und Bronzeguss im Experiment. In: M. Fansa (Hrsg.) Experimentelle Archäologie: Bilanz 1994. Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, Beiheft 8, 237-246. Oldenburg.

- *(1995b)* Die Schaftlochaxt von Parpan im Gussexperiment. In: B. Schmid-Sikimić/Ph. Della Casa (Hrsg.) Trans Europam: Beiträge zur Bronze- und Eisenzeit zwischen Atlantik und Altai. Festschrift für Margarita Primas. Antiquitas Reihe 3, Band 34, 23-28. Bonn.

Fischer, U. (1990) Rezension zu: R. Krause, Die endneolithischen und frühbronzezeitlichen Grabfunde auf der Nordstadtterrasse von Singen am Hohentwiel. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 32. Stuttgart 1988. Bonner Jahrbücher 190, 604-608.

Goldmann, K. (1981) Guss in verlorener Sandform - Das Hauptverfahren alteuropäischer Bronzegiesser? AKB 11, 109-116.

- *(1985)* Bronzegusstechniken im prähistorischen Mitteleuropa. In: H. Born (Hrsg.) Archäologische Bronzen, antike Kunst, moderne Technik, 52-58. Berlin.

Hafner, A. (1995) Die frühe Bronzezeit in der Westschweiz. Funde und Befunde aus Siedlungen, Gräbern und Horten der entwickelten Frühbronzezeit. Ufersiedlungen am Bielersee 5. Bern.

Hauptmann, A./Weisgerber, G. (1985) Vom Kupfer zur Bronze: Beiträge zum frühesten Berg- und Hüttenwesen. In: H. Born (Hrsg.) Archäologische Bronzen, antike Kunst, moderne Technik, 16-36. Berlin.

Hochuli, S. (1994) Arbon-Bleiche. Die neolithischen und bronzezeitlichen Seeufersiedlungen. Ausgrabungen 1885-1991. Archäologie im Thurgau 2. Frauenfeld.

Junk, M. (2003) Material Properties of Copper Alloys containing Arsenic, Antimony, and Bismuth. The Material of Early Bronze Age Ingot Torques. Unpublizierte Dissertation Bergakademie Freiberg.

Kibbert, K. (1980) Die Äxte und Beile im mittleren Westdeutschland I. Prähistorische Bronzefunde IX,10. München.

Kienlin, T.L. (2004) Frühes Metall im nordalpinen Raum: Eine Untersuchung zu technologischen und kognitiven Aspekten früher Metallurgie anhand der Gefüge frühbronzezeitlicher Beile. Archäologische Informationen 27, 187-194.

- *(im Druck)* Frühes Metall im nordalpinen Raum. Eine Untersuchung zu technologischen und kognitiven Aspekten früher Metallurgie anhand der Gefüge frühbronzezeitlicher Beile. Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie. Bonn.

Kienlin, T.L./Bischoff, E./Opielka, H. (2004) Zur Metallographie urgeschichtlicher Artefakte: Ergebnisse einer Untersuchung an Kupfer- und Bronzebeilen des nordalpinen Raumes. In: P. Portella (Hrsg.) Fortschritte in der Metallographie. Vortragstexte der 37. Metallographie-Tagung, 17.-19. September 2003 in Berlin. Sonderbände der Praktischen Metallographie 35, 3-10. Frankfurt.

Kienlin, T.L./Ottaway, B. S. (1998) Flanged Axes of the North-Alpine Region: An Assessment of the Possibilities of Use Wear Analysis on Metal Artifacts. In: C. Mordant/M. Pernot/V. Rychner (éds.) L'Atelier du bronzier en Europe du XXe au VIIIe siècle avant notre ère. Du minerai au métal, du métal à l'objet. Actes du colloque international Bronze '96, Neuchâtel et Dijon, tome 2, 271-286. Paris.

Krause, R. (1988) Die endneolithischen und frühbronzezeitlichen Grabfunde auf der Nordstadtterrasse von Singen am Hohentwiel. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 32. Stuttgart.

- *(1997)* Vom Erz zur Bronze: Bergbau, Verhüttung und Bronzeguss. In: Goldene Jahrhunderte. Die Bronzezeit in Südwestdeutschland. ALManach 2, 26-40. Stuttgart.

Krause, R. (2003) Studien zur kupfer- und frühbronzezeitlichen Metallurgie zwischen Karpatenbecken und Ostsee. Vorgeschichtliche Forschungen 24. Rahden/Westf.

Lechtman, H. (1996) Arsenic Bronze: Dirty Copper or Chosen Alloy? A View from the Americas. Journal of Field Archaeology 23, 477-514.

- *(1998)* Architectural Cramps at Tiwanaku: Copper-arsenic-nickel Bronze. In: T. Rehren/A. Hauptmann/J.D. Muhly (eds.) Metallurgica Antiqua. In Honour of Hans-Gert Bachmann and Robert Maddin. Der Anschnitt, Beiheft 8, 77-92.

Lechtman, H./Klein, S. (1999) The Production of Copper-Arsenic Alloys (Arsenic Bronze) by Cosmelting: Modern Experiment, Ancient Practice. Journal of Archaeological Science 26, 497-526.

Lesniak, Ch. P. (1991) Thermodynamik und Metallographie von Arsen- und Antimonmangellegierungen am Beispiel archäologischer Artefakte. Unpublizierte Dissertation Universität Saarbrücken.

Mayer, E. F. (1977) Die Äxte und Beile in Österreich. Prähistorische Bronzefunde IX,9. München.

Moesta, H. (1988) Untersuchungen an den Depotfunden von Obereching, Land Salzburg, Österreich. Germania 66, 57-67.

Moesta, H./Rüffler, R./Schnau-Roth, G. (1989) Zur Verfahrenstechnik der bronzezeitlichen Kupferhütten am Mitterberg. In: A. Hauptmann/E. Pernicka/G. A. Wagner (Hrsg.) Archäometallurgie der Alten Welt. Beiträge zum Internationalen Symposium «Old World Archaeometallurgy», Heidelberg 1987, 141-153. Bochum.

Müller-Karpe, M. (1990) Der Guss in der verlorenen Sandform in Mesopotamien. Mitteilungen der deutschen Orient-Gesellschaft zu Berlin 122, 173-192.

Northover, P. (1989) Properties and Use of Arsenic-Copper Alloys. In: A. Hauptmann/E. Pernicka/G.A. Wagner (Hrsg.) Archäometallurgie der Alten Welt. Beiträge zum Internationalen Symposium «Old World Archaeometallurgy», Heidelberg 1987, 111-118. Bochum.

- *(1996)* Metal Analysis and Metallography of Early Metal Objects from Denmark. In: H. Vandkilde, From Stone to Bronze: The Metalwork of the Late Neolithic and Earliest Bronze Age in Denmark, 321-358. Aarhus.
- *(1998a)* Exotic Alloys in Antiquity. In: T. Rehren/A. Hauptmann/J. D. Muhly (Hrsg.) Metallurgica Antiqua. In Honour of Hans-Gert Bachmann and Robert Maddin. Der Anschnitt, Beiheft 8, 113-121.
- *(1998b)* Annex 1: Analysis of Copper Alloy Metalwork from Arbedo TI. In: M. P. Schindler, Der Depotfund von Arbedo TI und die Bronzedepotfunde des Alpenraums vom 6. bis zum Beginn des 4. Jh. v.Chr. Antiqua 30, 289-315. Basel.

Ottaway, B S. (1994) Prähistorische Archäometallurgie. Espelkamp.

- *(2003)* Experimental Archaeometallurgy. In: Th. Stöllner et al. (Hrsg.) Man and Mining - Mensch und Bergbau. Studies in Honour of Gerd Weisgerber on Occasion of his 65th Birthday. Der Anschnitt, Beiheft 16, 341-348.

Ottaway, B.S./Seibel, S. (1998) Dust in the Wind: Experimental Casting of Bronze in Sand Moulds. In: M.-C. Frère-Sautot (éd.) Paléometallurgie des cuivres. Actes du colloque de Bourg-en-Bresse et Beaune 17-18 oct. 1997. Monographies Instrumentum 5, 59-63. Montagnac.

Pászthory, K./Mayer, E. F. (1998) Die Äxte und Beile in Bayern. Prähistorische Bronzefunde IX,20. Stuttgart.

Pernicka, E. (1998) Die Ausbreitung der Zinnbronze im 3. Jahrtausend. In: B. Hänsel (Hrsg.) Mensch und Umwelt in der Bronzezeit Europas. Abschlusstagung der Kampagne des Europarates: Die Bronzezeit: das erste goldene Zeitalter Europas an der Freien Universität Berlin, 17.-19. März 1997, 135-147. Kiel.

Sangmeister, E. (1966) Die Sonderstellung der schweizerischen Frühbronzezeit-Kultur. In: R. Degen/W. Drack/R. Wyss (Hrsg.) Helvetia Antiqua. Festschrift Emil Vogt. Beiträge zur Prähistorie und Archäologie der Schweiz, 65-74. Zürich.

Scott, D. A. (1991) Metallography and Microstructure of Ancient and Historic Metals. Marina del Rey.

Schumann, H. (1991) Metallographie. 13. Auflage. Stuttgart.

Schwenzer, S. (2004) Frühbronzezeitliche Vollgriffdolche. Typologische, chronologische und technische Studien auf der Grundlage einer Materialaufnahme von Hans-Jürgen Hundt. Kataloge vor- und frühgeschichtlicher Altertümer 36. Mainz.

Spindler, K. (1971) Zur Herstellung der Zinnbronze in der frühen Metallurgie Europas. Acta Praehistorica et Archaeologica 2, 199-253.

Stein, F. (1976) Bronzezeitliche Hortfunde in Süddeutschland. Beiträge zur Interpretation einer Quellengattung. Saarbrücker Beiträge zur Altertumskunde 23. Bonn.

- *(1979)* Katalog der vorgeschichtlichen Hortfunde in Süddeutschland. Saarbrücker Beiträge zur Altertumskunde 24. Bonn.

Tylecote, R. F. (1987) The Early History of Metallurgy in Europe. London.

Uenze, O. (1938) Die frühbronzezeitlichen triangulären Vollgriffdolche. Vorgeschichtliche Forschungen 11. Berlin.

Vogt, E. (1948) Die Gliederung der schweizerischen Frühbronzezeit. In: Festschrift für Otto Tschumi. Zum 22. November 1948, 53-69. Frauenfeld.

Wang, Q./Ottaway, B. S. (2005) Casting Experiments and Microstructure of Archaeologically Relevant Bronzes. BAR International Series 1331. Oxford.

Werner, A./Barth, R. (1991) Versuche zu prähistorischen Bronzegusstechniken. In: M. Fansa (Hrsg.) Experimentelle Archäologie: Bilanz 1991. Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, Beiheft 6, 299-304. Oldenburg.