



Berg Huettenmaenn Monatsh (2020) Vol. 165 (9): 453–460
<https://doi.org/10.1007/s00501-020-01017-7>
 © Der/die Autor(en) 2020

BHM Berg- und
 Hüttenmännische
 Monatshefte

Ein Kupfergusskuchen mit hohem Antimongehalt aus Velem/Westungarn

Roland Haubner¹, Susanne Strobl¹, Manuela Thurner² und Hannes Herdits³

¹Technische Universität Wien, Wien, Österreich

²Institut für Urgeschichte und Historische Archäologie, Universität Wien, Wien, Österreich

³Burgenländisches Landesmuseum, Eisenstadt, Österreich

Eingegangen 29. Juli 2020; angenommen 4. August 2020; online publiziert 26. August 2020

Zusammenfassung: In der archäologischen Sammlung des Burgenländischen Landesmuseums befindet sich ein urnenfelderzeitlicher Gusskuchen aus der Burg von Velem, einer prähistorischen befestigten Höhensiedlung auf einer Rückfallkuppe des Bernstein-Rechnitzer Fensters (BLM Inv. Nr. A154201). Velem liegt heute in Ungarn und ist seit Beginn des vorigen Jahrhunderts für seine zahlreichen metallurgischen Funde bekannt. Aufgrund des Fundortes bestand bereits die Vermutung, dass er Antimon enthalten könnte. Mittels RFA Analyse wurde ein Sb-Gehalt von 10 Gew.% nachgewiesen. Zusätzlich sind 4,5 Gew.% As, je 1,2 Gew.% S und Ag im Gusskuchen enthalten.

Die Verteilung unterschiedlicher Gefüge im Gusskuchen ist sehr inhomogen. In großen Bereichen liegt dendritisch erstarrtes Cu vor. In den interdendritischen Bereichen findet man unterschiedliche Phasengemische der Elemente Cu-Sb-As-S. Ein auffälliger Streifen aus Cu₂S, der sich quer durch den Gusskuchen zieht, legt die Vermutung nahe, dass dieser Gusskuchen aus geschmolzener Arsenbronze durch Zumischen von Antimonit (Sb₂S₃) entstanden ist. In der geologischen Formation „Rechnitzer Fenster“ sind mehrere Fundstellen von Antimonit bekannt, die Quelle der verwendeten Arsenbronze ist jedoch unbekannt.

Schlüsselwörter: Kupfergusskuchen, Antimon, Arsen, Velem

A Copper Ingot with High Antimony Content from Velem/Western Hungary

Abstract: In the archaeological collection of the Burgenland State Museum, there is a copper ingot dating from the Urnfield period from the castle of Velem, a prehistoric fortified hilltop settlement on a crest of the Bernstein-Rechnitz window (BLM Inv. No. A154201). Velem is situated today in Hungary and has been known for its numerous metallurgical finds since the beginning of the last century. Based on the location, there was already a presumption that the find might contain antimony. An antimony content of 10% by weight could be detected by means of XRF analysis. In addition, the ingot contains 4.5 wt.% of As, 1.2 wt.% of S and Ag respectively.

The distribution of different structures in the ingot is very inhomogeneous. In large areas there is dendritic solidified Cu and, in the interdendritic areas, different phase mixtures of the elements Cu-Sb-As-S are observed. A striking band of Cu₂S that runs across the ingot suggests that it was made from molten arsenic bronze by adding antimonite (Sb₂S₃). Several sites of antimonite are known in the geological formation “Rechnitzer Fenster”, but the source of the arsenic bronze is unknown.

Keywords: Copper ingot, Antimony, Arsenic, Velem

1. Velem – St. Veit Berg – ein Metallzentrum der Bronzezeit

Velem in Ungarn ist bereits seit dem 19. Jh. als archäologischer Fundort bekannt, jedoch wurde die Bedeutung dieser urzeitlichen Siedlung erst von K. Miske erkannt, nachdem er zwei Depotfunde bergen konnte. Durch verschiedene Publikationen machte er Velem in der archäologischen Forschung als Zentrum der spätbronzezeitlichen Metallverarbeitung bekannt [1, 2]. Nach chemischen Analysen stellte sich bereits damals heraus, dass die Kupferlegierungen

Prof. Dr. R. Haubner (✉)
 Technische Universität Wien,
 Getreidemarkt 9/164-03,
 1060 Wien, Österreich
 roland.haubner@tuwien.ac.at

aus Velem erhöhte Konzentrationen an Antimon enthalten [3, 4]. Die erhöhten Antimongehalte in den Bronzen von Velem wurden in der Fachwelt eingehend diskutiert, wobei auch Legierungsbestandteile wie As und Sn berücksichtigt wurden. R. F. Tylecote vermutete, aufgrund der erhöhten Sb-Gehalte im Vergleich zu As, dass Sb der Bronze zugesetzt wurde [5].

Auch Z. Czajlik beschäftigte sich ausführlich mit dem Fundort Velem und betrachtete die Rohstoffquellen für Kupfer und Antimon [6–8]. Er erkannte, dass Sb wohl aus der nahegelegenen geologischen Formation „Rechnitzer Fenster“ mit Schlaining als Bergbauzentrum für den Antimonitabbau, stammte.

2. Der Gusskuchen aus Velem

Der untersuchte Gusskuchen hat einen unregelmäßigen Durchmesser von ca. 9 bis 12 cm (Abb. 1). Die Oberseite ist flach und weist oberflächlich zahlreiche Noppen als Ergebnis der beim Verhüttungsverfahren entweichenden Gase auf (Abb. 1a). Die Farbe der Patina variiert von hellbraun bis dunkelgrün. Die Unterseite des Gusskuchens ist konvex, da er offensichtlich in einer flachen Mulde aufgeschmolzen wurde.

Nach dem Trennen des Gusskuchens war auffällig, dass die Schnittfläche nicht kupferfarben sondern silbrig war. Da



Abb. 1: Kupfergusskuchen aus der Umgebung von Velem. (a) Oberseite des Gusskuchens, (b) Schnittfläche nach dem Halbieren des Gusskuchens. Auffällig ist, dass die Schnittfläche silbrig aussieht und nicht kupferfarben

andere Kupfergusskuchen aus Fahlerzen mit Arsengehalt eindeutig kupferfarben sind [9, 10], erzeugte dies anfängliche Zweifel, ob es sich tatsächlich um einen Kupfergusskuchen handelt. Diese Zweifel wurden jedoch durch erste Messungen der Zusammensetzung ausgeräumt und offensichtlich bestimmen die Legierungselemente Sb und As die silbrige Farbe dieser Legierung [11].

3. Metallographische Untersuchungen

Eine etwa 1 cm dicke Scheibe wurde aus der Mitte des Gusskuchens entfernt. Diese wurde in kleinere Stücke zerteilt, welche danach metallographisch präpariert und anschließend untersucht wurden. Die Methoden 3D-Digitalmikroskopie (3D-DM), Metallographie, Lichtmikroskopie (LOM), Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit Rückstreuielektronendetektor (BSE) und Energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX) sowie Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) wurden eingesetzt. Die metallographischen Schlitte wurden im polierten Zustand und nach einer Ätzung mit Klemm 2 untersucht. Es stellte sich heraus, dass sich an polierten Proben nach etwa 3 Wochen an Luft eine Oberfläche ähnlich einer Ätzung entwickelte.

Eine RFA Analyse an einer Schnittfläche ergab etwa 83 Gew.% Cu, 10 Gew.% Sb, 4,5 Gew.% As und je 1,2 Gew.% S und Ag. Die Konzentrationen weiterer Spurenelemente bewegten sich unter 0,2 Gew.% (Tab. 1). Dieses Ergebnis ist bemerkenswert, da in Arsenbronzen zwar bis zu 10 Gew.% As gefunden werden, aber die Sb Gehalte üblicherweise unter 1 Gew.% liegen [12].

Am metallographischen Schliff aus dem Randbereich des Gusskuchens sind bereits die unterschiedlichsten Gefüge zu erkennen (Abb. 2a). Die an der Oberseite des Gusskuchens vorliegenden Noppen erscheinen eher homogen. Zum darunterliegenden Hauptteil ist teilweise ein dünner dunkler Streifen zu erkennen. Weiter Richtung Unterseite des Gusskuchens sieht man dunklere Bereiche, die auch Löcher enthalten. An der rechten Seite des Übersichtsbildes ist bereits ein Teil des grauen Bandes zu sehen, das sich durch die gesamte Breite des Gusskuchens zieht.

TABELLE 1
Chemische Zusammensetzung des Gusskuchens, bestimmt mittels RFA

Gusskuchen	Gew. %
Cu	82,84
Sb	9,92
As	4,48
S	1,20
Ag	1,18
Fe	0,12
Bi	0,10
Zn	0,05
P	0,03
Si	0,03
Ni	0,02
Al	0,02

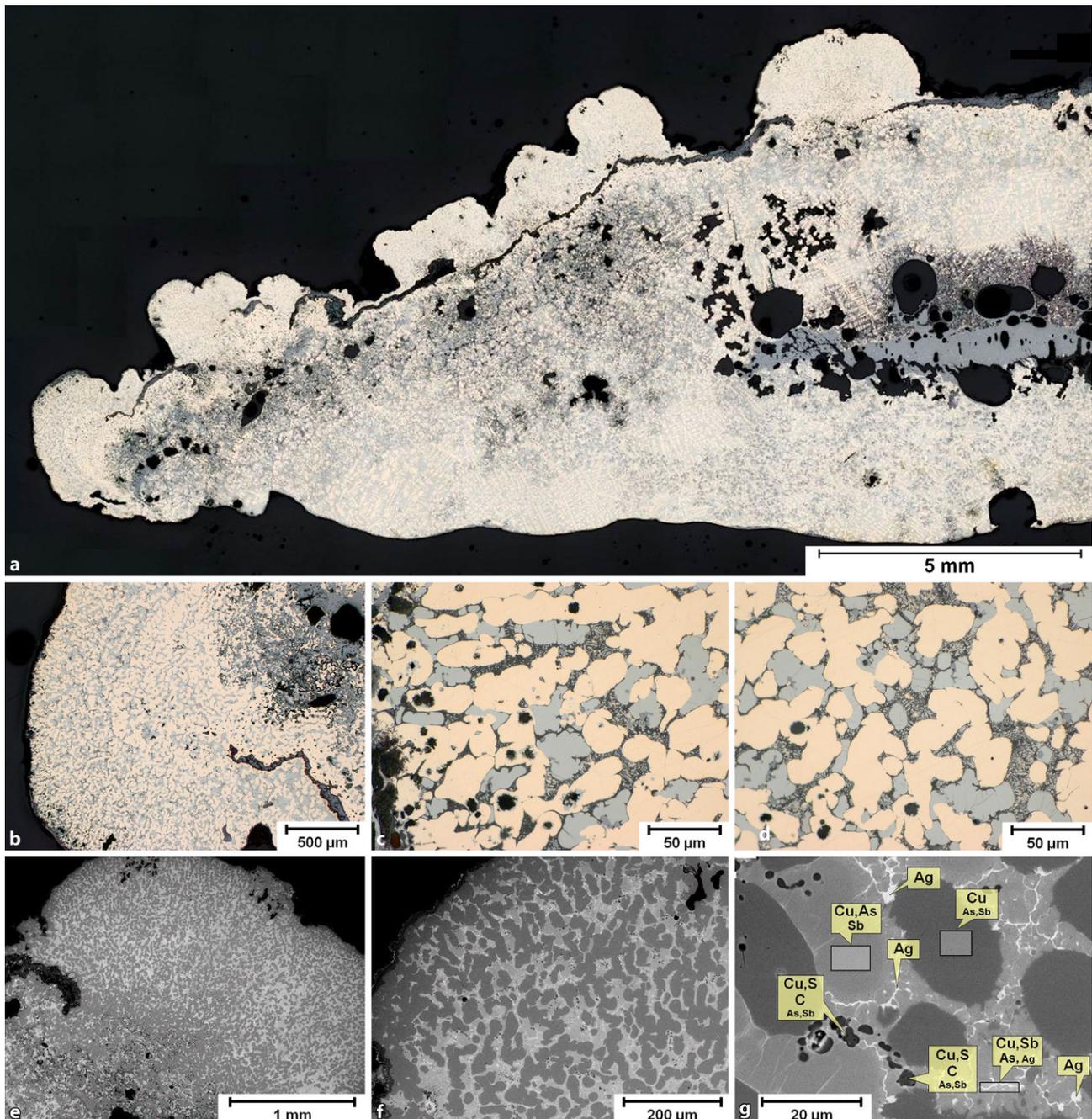


Abb. 2: Randbereich des Gusskuchens (keine Ätzung). (a) LOM Übersichtsaufnahme (b–d) Gefüge im Bereich der Oberfläche bei verschiedenen Vergrößerungen (LOM), (e–g) Gefüge im REM-BSE, (g) REM-BSE Bild mit Bezeichnung der Phase nach EDX Messungen

Abb. 2b zeigt die Übersichtsaufnahme einer an der Oberfläche liegenden Noppe im LOM und in Abb. 2e ist das entsprechende REM Bild zu sehen. In beiden Bildern ist eine homogene Verteilung von unterschiedlichen Phasen zu erkennen. Bei höheren Vergrößerungen im LOM sieht man kupferfarbene, abgerundete Bereiche, daneben eine graue, rundliche Phase sowie in den Zwischenräumen einen dunklen Bereich, der mehrphasig aufgebaut ist (Abb. 2c,d). Im REM erscheinen die größeren, abgerundeten Bereiche dunkelgrau und mittels EDX Analyse wurden sie als Cu mit geringen As und Sb Gehalten identifiziert

(Abb. 2f,g). Die hellgrauen Bereiche im LOM sind im REM ebenfalls grau und es wurden hohe Konzentrationen an Cu und As sowie wenig Sb gemessen. Es handelt sich vermutlich um die Phase Cu_3As . Im REM Bild sind auch noch schwarze Flecken zu sehen, in denen Cu, S aber auch C gemessen wurde. Dabei könnte es sich um Cu_2S handeln, wobei nicht erklärbar ist, in welcher Form der Kohlenstoff vorliegt. In den Bereichen zwischen den beschriebenen Phasen befinden sich noch helle länglich ausgebildete Bereiche. Diese enthalten einerseits Ag und andererseits Cu sowie Sb (Abb. 2a).

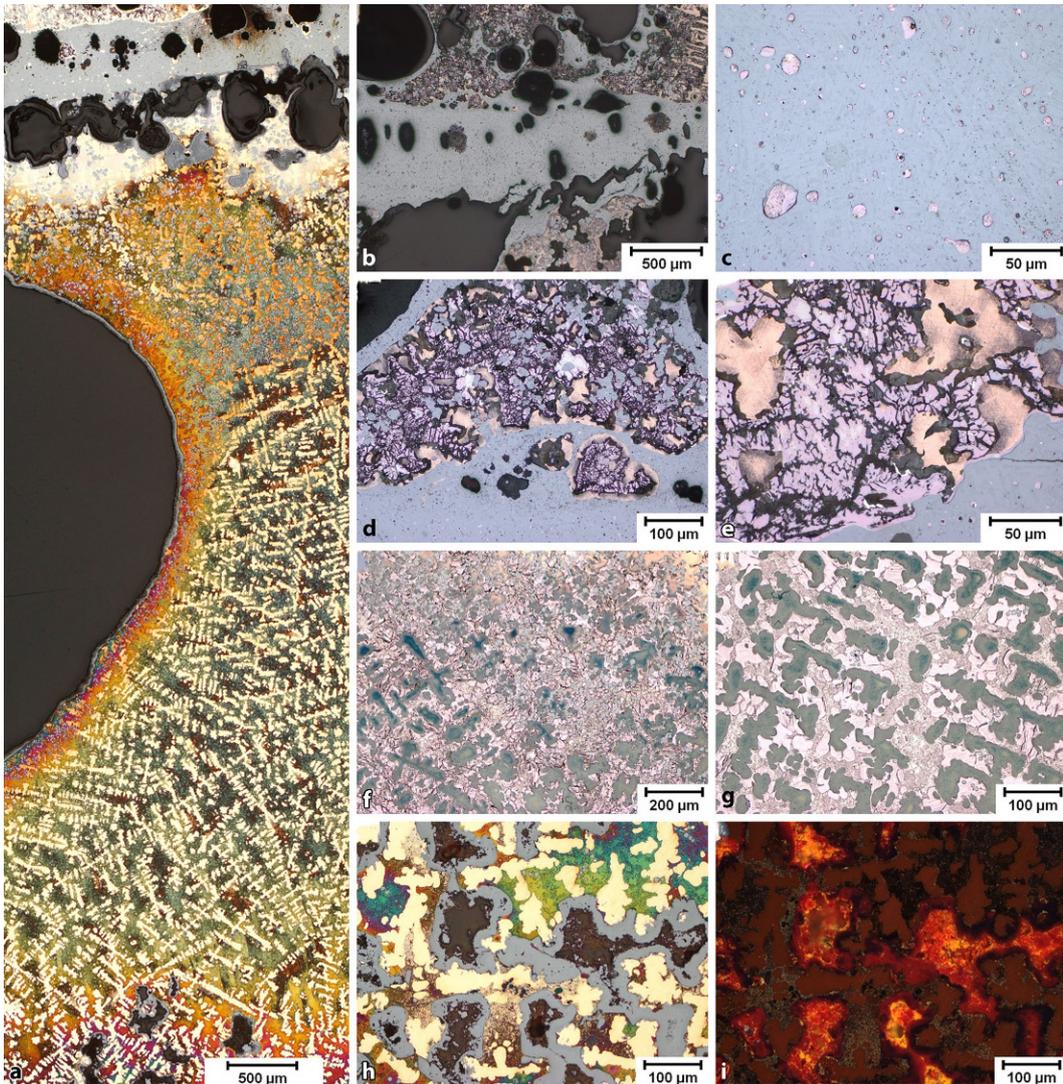


Abb. 3: Mittlerer Bereich des Gusskuchens. (a) Übersichtsaufnahme, (b) Streifen aus überwiegend Cu_2S , (c) Detailaufnahme des Cu_2S mit Einschlüssen, (d, e) Cu-Sb-As enthaltende Phasengemische, (f, g) dendritisch erstarrte Bereiche, (h, i) korrodierte Bereiche, (a, h, i) LOM poliert nach 3 Wochen ohne Ätzung, (b–g) Klemm 2 Ätzung, (i) polarisiertes Licht

Eine weitere Übersichtsaufnahme wird in Abb. 3a gezeigt, wobei im oberen Bereich ein Ausschnitt des grauen Bandes zu sehen ist und nach einer Übergangszone erkennt man ein dendritisch erstarrtes Gefüge.

Abb. 3b, c zeigt Details des grauen Bandes. In diesem Bereich ist eine graue Masse zu sehen, in der auch einige Löcher enthalten sind. Eine EDX Analyse zeigt, dass die graue Phase aus Cu_2S besteht, die sphärischen Einschlüsse enthalten höhere Konzentrationen an Sb und As (Abb. 3c). In unmittelbarer Nähe zur Cu_2S Phase liegt eine Mischung unterschiedlicher Phasen vor, wobei die helle Phase aus Cu besteht (Abb. 3d,e). Von einem derartigen Bereich wurde ein EDX Elementverteilung aufgenommen, welche in Abb. 4 zu sehen ist. So wie oben beschrieben, ist die graue Phase im REM-BSE Bild das Cu mit geringen Sb und As Gehalten. Die schwarze Phase ist Cu_2S und der hellgraue Bereich enthält bis zu 23 Gew.% Sb und 10 Gew.% As. Diese Zusammensetzung würde in etwa der Phase Cu_4Sb entsprechen. Zusätzlich könnte As als Mischkristall im Cu_4Sb gelöst sein.

Ag ist nur in Form kleiner Punkte zu sehen. Außerdem wurde noch O nachgewiesen, welcher in Bereichen mit hohen Sb Konzentrationen angereichert scheint. Ähnlich verteilt ist auch C. Fe liegt nur in kleinen Bereichen vor, wobei an denselben Stellen O gemessen wird, was darauf schließen lässt, dass FeO vorliegt.

Das dendritische Gefüge ist in Abb. 3f, g bei höheren Vergrößerungen zu sehen. Die gräulichen Dendriten sind überwiegend metallisches Cu und in den interdendritischen Bereichen befindet sich eine ähnliche Mischung aus Phasen wie in Abb. 4 beschrieben.

In Randzonen, wo während der Lagerung auch Korrosion aufgetreten ist, finden sich Korrosionsprodukte, welche im LOM und polarisierten Licht rot gefärbt sind (Abb. 3h,i).

Betrachtet man die Phasendiagramme Cu-Sb und Cu-As so lässt sich abschätzen, welche Phasen im Gusskuchen vorliegen könnten (Abb. 5; [13]). Die Konzentration von etwa 10 Gew.% Sb im Gusskuchen entspricht der Löslichkeit von Sb in Cu bei $>500^\circ\text{C}$ (dicke Linie in Abb. 5a). Bei der

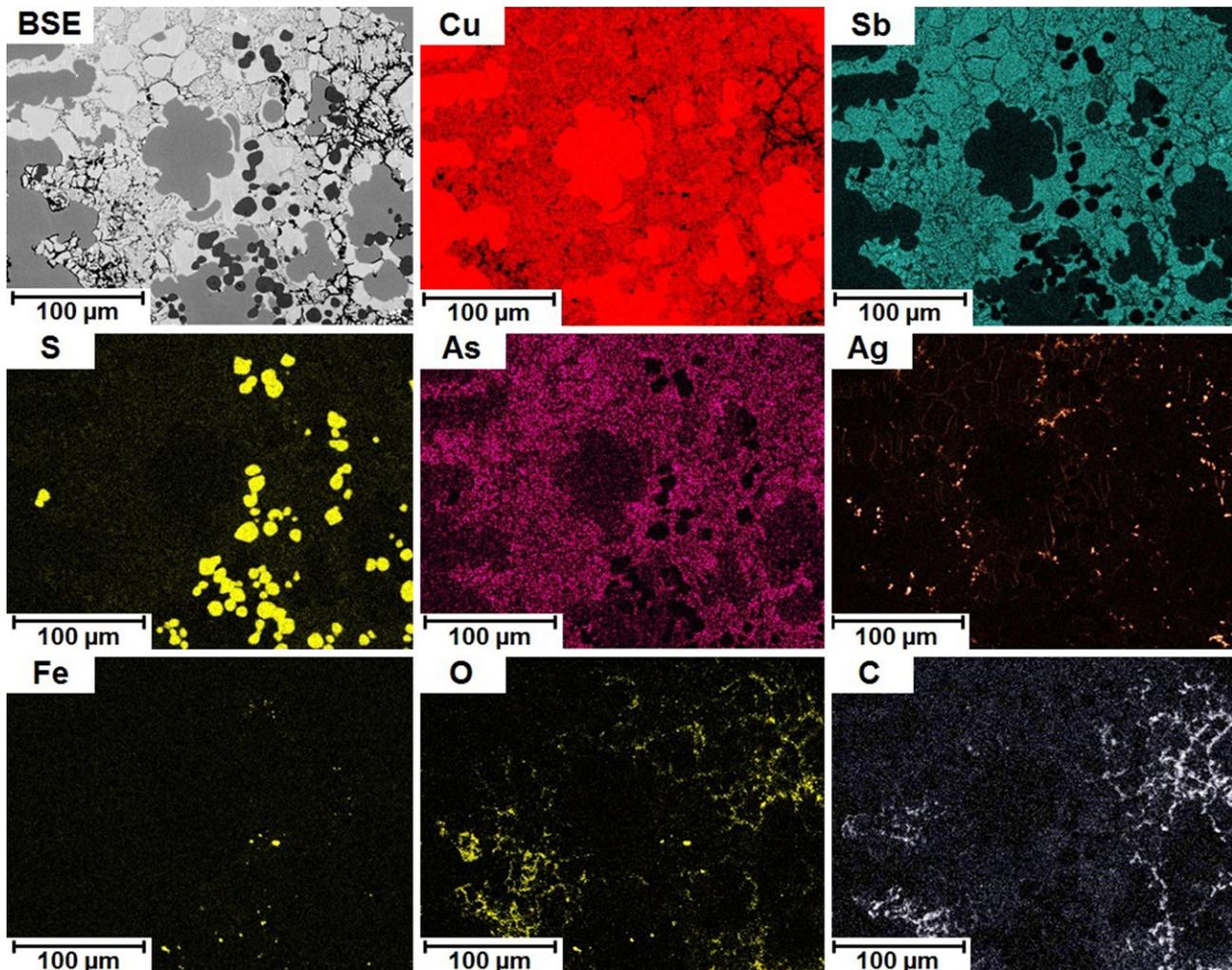


Abb. 4: REM-EDX Elementverteilung eines interdendritischen Bereichs des Gusskuchens

Erstarrung einer entsprechenden Schmelze würde zuerst ein Cu Mischkristall (Cu_{SS}) mit geringen Sb Konzentrationen gebildet. Dies erklärt die vorliegenden Cu-Dendriten. Beim Eutektikum (645°C) erstarrt die restliche Schmelze zu β -Phase und Cu_{SS} . Während der weiteren Abkühlung kann bei 455°C Cu_4Sb gebildet werden, welches wiederum bei 400°C zu $\text{Cu}_{78}\text{Sb}_{20}$ reagiert.

Das Cu-As Phasendiagramm ist etwas einfacher und mit etwa 5 Gew.% As befindet man sich im Bereich der Löslichkeit von As in Cu (dicke Linie in Abb. 5b). Bei der Erstarrung der Schmelze würde sich zuerst wiederum Cu_{SS} ausscheiden und beim Eutektikum Cu_3As [14]. In den vorliegenden Phasengemischen gibt es sicher Wechselwirkungen zwischen den Phasen mit Mischkristallbildung, aber im Wesentlichen können die Gefüge mit den Phasendiagrammen erklärt werden.

4. Die Kupfermetallurgie von Velem

Im direkten Nahbereich von Velem sind zwar keine Cu-Vorkommen bekannt, aber in der gesamten geologischen

Formation „Rechnitzer Fenster“ werden sowohl Antimonit (Sb_2S_3) als auch verschiedene Kupferminerale gefunden [15–17].

Um die Analyseergebnisse interpretieren zu können, soll kurz die Metallurgie in der Bronzezeit betrachtet werden. Erstes Kupfer wurde vermutlich aus oxydischen Erzen hergestellt, da dies durch eine einfache Reduktion mit Holzkohle möglich ist. Es wird Kupfer ohne S und As Verunreinigungen erhalten, und oft ist Sauerstoff in Form des Cu- Cu_2O Eutektikums vorhanden [18]. Die später eingesetzten Kupfererze sind die Fahlerze, welche neben S auch As und Sb enthalten. Ein positiver Effekt der Fahlerzverhüttung war, dass etwas As im Kupfer verblieb und dadurch Arsenbronzen – mit einer höheren Härte als unlegiertes Cu – erhalten wurden [19]. Thermodynamische Berechnungen zeigten, dass bei der Verhüttung von Fahlerzen zuerst der Schwefel zu SO_2 oxidiert wird. Danach reagiert Sb zu flüssigem Sb_3O_3 , gefolgt von As, welches gasförmiges As_4 oder As_2 bildet. Nur wenn gleichzeitig metallisches Cu und gasförmiges As vorliegen, erfolgt eine Reaktion zu Cu_3As . Einmal gebildetes Cu_3As ist weitgehend stabil und zersetzt sich erst, wenn Cu zu Cu_2O oxidiert wird [20]. As verdampft

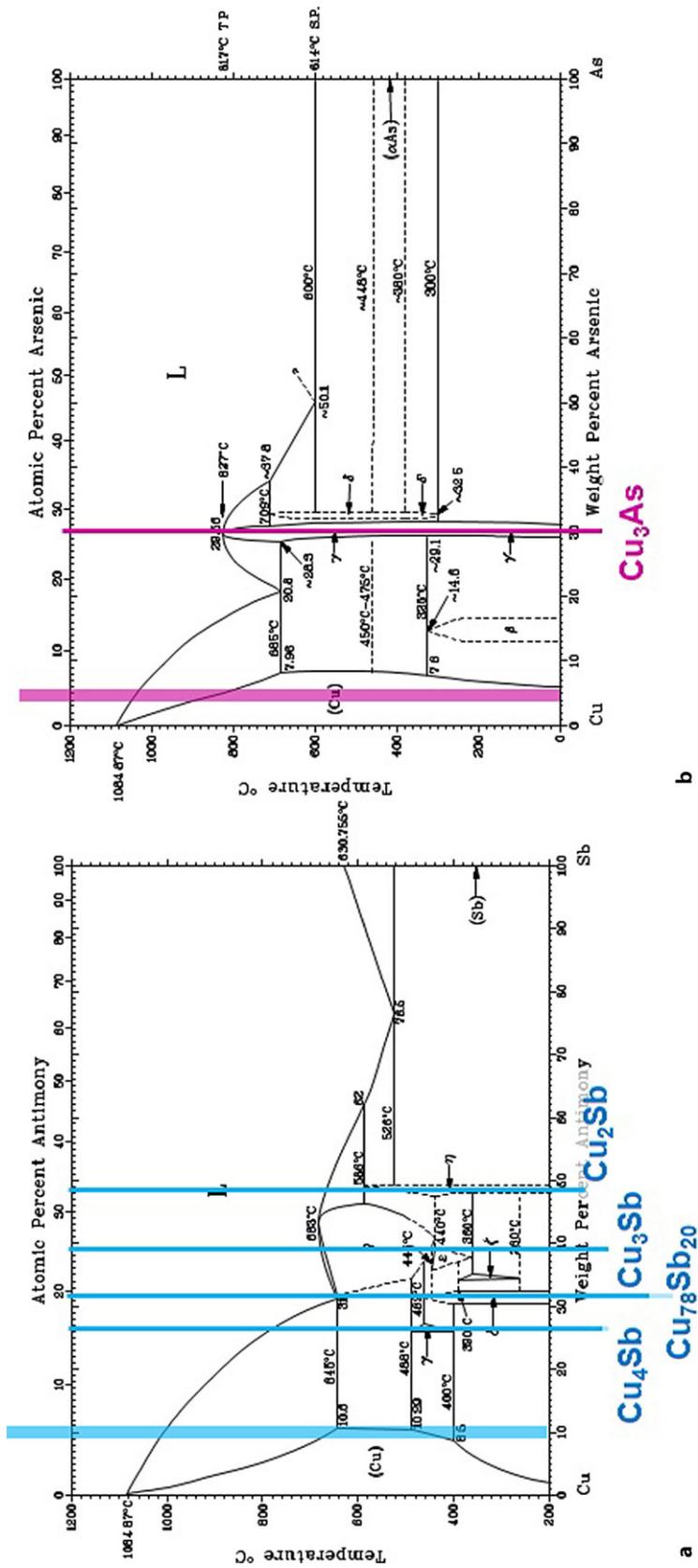


Abb. 5: Phasendiagramme von (a) Cu-Sb und (b) Cu-As [13]. Die *dicken Linien* entsprechen den mittels RFA ermittelten Konzentrationen im Gusskuchen. Die *dünnen Linien* entsprechen den angegebenen Phasen

auch nicht während der Weiterverarbeitung durch Schmelzen und Gießen [14].

In weiterer Folge wurde der Kupferkies (Chalkopyrit) verhüttet, wobei mehrere Röst- und Schmelzprozesse bis zum Kupfer durchgeführt werden mussten [21]. Da Kupferkies kein oder nur wenig As und Sb enthält, ist auch das so gewonnene Cu oft frei von diesen Elementen, es sei denn sie kommen aus der Gangart oder werden absichtlich dem Schmelzprozess beigegeben.

Die Messergebnisse des Gusskuchens deuten darauf hin, dass dieser Gusskuchen nicht aus Kupfererz und Antimonit durch gemeinsames Verhütten hergestellt wurde, sondern, dass bereits vorhandenes Kupfer aufgeschmolzen und mit Sb_2S_3 umgesetzt wurde, wie bereits R. F. Tylecote vermutete [5].

Als Indizien, welche dieses Vorgehen nahelegen, können genannt werden:

Bei der direkten Verhüttung von Fahlerzen und Antimonit würde Sb als Oxid in die Schlacke gehen und As weitgehend abdampfen. Es ist also anzunehmen, dass Arsenbronze als Cu-Ausgangsmaterial verwendet wurde.

Bei einer konventionellen Verhüttung sollte der Schwefel gleichmäßig im Gusskuchen verteilt sein. Im vorliegenden Gusskuchen zieht sich jedoch nur ein Cu_2S Streifen durch nahezu den gesamten Querschnitt. Wenn geschmolzenes Cu mit Sb_2S_3 reagiert, so müsste sich zuerst die stabile Verbindung Cu_2S bilden (Schmelzpunkt 1130°C), welche auch zuerst erstarrt. Das freigesetzte Sb löst sich in der Cu Schmelze und bildet während der Abkühlung die Cu-Sb Phasen.

Die relativ hohen Kohlenstoffgehalte könnten auf die Verwendung von Holzkohle oder das Umrühren der Schmelze mit Holzstäben zurückzuführen sein. Ebenso ist der Sauerstoffgehalt einfach erklärbar, da er leicht mit Sb zu Oxiden reagiert, aber auch mit vorhandenen Fe Verunreinigungen zu FeO.

Warum aufgeschmolzenes Cu oder As-Bronze mit Antimonit verhüttet wurde, darüber kann nur spekuliert werden. Sollten die Materialeigenschaften des Kupfers verbessert werden? Sollte das Kupfer gestreckt werden, um die Masse für den Handel zu erhöhen?

5. Zusammenfassung

Velem in Ungarn, nahe der burgenländischen Grenze, war in der Bronzezeit eine bedeutende Stätte der Metallherstellung und Metallverarbeitung. Eine Besonderheit der bronzezeitlichen Cu Objekte aus Velem ist ihr unüblich hoher Gehalt an Antimon.

Der untersuchte Cu-Gusskuchen sorgte vorerst für Verwunderung, da seine Schnittfläche nicht kupferfarben sondern silbrig war. Eine RFA Analyse ergab, dass in diesem Gusskuchen 10 Gew.% Sb sowie 4,5 Gew.% As enthalten sind. Außer je 1,2 Gew.% S und Ag wurden nur Spurenelemente unter 0,2 Gew.% gemessen.

Die metallographische Untersuchung des Gefüges zeigte einen sehr inhomogenen Aufbau des Gusskuchens. Große Bereiche bestehen aus dendritisch erstarrtem Cu und in den interdendritischen Bereichen findet man Mischungen

von unterschiedlichen Phasen der Elemente Cu-Sb-As-S. Auffällig ist auch ein Streifen aus Cu_2S , der sich durch nahezu die gesamte Breite des Gusskuchens zieht.

Aufgrund des vorliegenden Aufbaus des Gusskuchens kann geschlossen werden, dass dieser durch die Reaktion von geschmolzenem Cu mit Antimonit (Sb_2S_3) entstanden ist.

Funding. Open access funding provided by TU Wien (TUW).

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Miske, K.: Die Bedeutung Velem St. Veits als prähistorische Gussstätte mit Berücksichtigung der Antimon-Bronzefrage, *Archiv für Anthropologie*, 2 (1904), S. 124–138
- Miske, K.: Die prähistorische Ansiedlung Velem St. Vid I. Band, Beschreibung der Raubbaufunde, Wien: C. Konegen, 1908
- Helm, O.: Chemische Analyse vorgeschichtlicher Bronzen aus Velem St. Veit in Ungarn, *Z Zeitschrift für Ethnologie*, 25 (1900), S. 359–365
- Költő, L.; Varga, K. M.; McLaen, P.: Analysis of high antimony concentration finds with various methods XRF analysis of antimony bronzes, in Jerem, E.; Biró, T. K.; Rudner, E. (eds.): *Archaeometry*, 98. Proceedings of the 31st Symposium Budapest, April 26–May 3 1998, I-II, BAR, 1, Budapest, 2002, pp 405–408
- Tylecote, R. F.: *The early history of metallurgy in Europe*, London–New York: Longman, 1987
- Czajlik, Z.; Molnár, F.; Solymos, G. K.: Angaben zu den spätbronzezeitlichen Metallrohmaterialversorgung am Velem-St. Veit Berg (Westungarn), *Archäologie Österreichs*, 6 (1995), S. 30–35
- Czajlik, Z.: Ein spätbronzezeitliches Halbfertigprodukt: Der Gusskuchen. Eine Untersuchung anhand von Funden aus Westungarn, *Archaeologica Austriaca*, 80 (1996), S. 165–180
- Czajlik, Z.: Lokaler, regionaler oder Fernhandel? Probleme der spätbronzezeitlichen Metallversorgung am Velem–St. Veit Berg (Westungarn), in *Iron Age crafts and craftsmen in the Carpathian Basin: Proceedings of the International Colloquium from Târgu Mureş*, 2013, S. 167–180
- Ertl, F.; Strobl, S.; Haubner, R.: An ancient bronze ingot smelted from fahlore, *Materials Science Forum*, 891 (2017), pp 613–617
- Haubner, R.; Ertl, F.; Strobl, S.: Examinations of a Bronze Ingot Made of Fahlore, *Practical Metallography*, 54 (2017), pp 107–117
- Mödlinger, M.; Kuijpers, M.; Braekmans, D.; Berger, D.: Quantitative comparisons of the color of CuAs, CuSn, CuNi, and CuSb alloys, *Journal of Archaeological Science*, 88 (2017), pp 14–23
- Pernicka, E.: Provenance Determination of Metal Artifacts—Methodological Considerations, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 814 (1986), pp 24–29
- Massalski, T. B.: *Binary Alloy Phase Diagrams*, ASM International, Metals Park OH, 1990

14. Mödlinger, M.; Oro Calderon, R.; Haubner, R.: Arsenic loss during metallurgical processing of arsenical bronze, *Archaeol Anthropol Sci*, 11 (2019), pp 133–140
15. Götzinger, M. A., Huber, P. (Redaktion): Die Mineralien des Burgenlandes, Red.: Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland, Bd. 126, Landesmuseum Eisenstadt, 2009
16. Feuerbach, M.; Unger, H.: Die Schwefelkieslagerstätte Bernstein (Burgenland, Österreich), *Archiv für Lagerstättenforschung in den Ostalpen*, 9 (1969), S. 33
17. Thurner, M.: Archäologische Spurensuche betreffend Bergbauaktivitäten im Bereich des Bernstein-Rechnitzer-Fensters, Südburgenland, Masterarbeit in Arbeit, Universität Wien, (geplanter Abgabetermin: 2021)
18. Haubner, R.; Strobl, S.; Thurner, M.; Herdits, H.: Ein Metallflächbeil der Kupferzeit aus Bernstein, Burgenland, *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, online first (2020), <https://doi.org/10.1007/s00501-020-00983-2>
19. Pernicka, E.; Lutz, J.; Stöllner, T.: Bronze age copper produced at Mitterberg, Austria, and its distribution, *Archaeologia Austriaca*, by Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien, 100 (2016), pp 19–55
20. Haubner, R.; Strobl, S.: Consideration about the metallurgy of Cu-As Bronzes, in: *Monographies Instrumentum*, submitted 2020
21. Herdits, H.: Die ostalpine bronzezeitliche Kupfererzeugung im überregionalen Vergleich am Grundbeispiel eines Hüttenplatzes in Mühlbach/Sbg., Dissertation, Universität Wien, 2017

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.