



Gemeinsame Verhüttung von Chalkopyrit und Antimonit in einer Schmelzgrube

Manuela Thurner¹, Susanne Strobl² und Roland Haubner²

¹Institut für Urgeschichte und Historische Archäologie, Universität Wien, Wien, Österreich

²Technische Universität Wien, Wien, Österreich

Eingegangen 1. August 2022; angenommen 4. September 2022; online publiziert 23. September 2022

Zusammenfassung: Es wurde ein Verhüttungsversuch mit Chalkopyrit und Antimonit durchgeführt, um Rückschlüsse auf prähistorische Verhüttungsmethoden ziehen zu können. Chalkopyrit und Antimonit wurden teilweise geröstet und anschließend im Holzkohlenfeuer aufgeschmolzen. Im Schmelztiegel bildeten sich dabei drei Zonen aus: eine metallische Phase, die überwiegend aus metallischem Sb besteht, ein Bereich, der aus Mischungen von Cu- und Fe-Sulfiden zusammengesetzt ist, sowie einer Schlacke, die neben Fayalit auch noch nicht umgesetztes SiO₂ enthält. Dieses Ergebnis entspricht thermodynamischen Überlegungen, aufgrund derer sich beim Aufschmelzen gerösteter Cu- und Sb-Erze unter Holzkohle metallisches Sb sowie Cu- und Fe-Sulfide bilden sollten. Auch die gebildete Fayalitschlacke entspricht den Erfahrungen aus der Kupferverhüttung.

Da bei diesem Verhüttungsversuch kein metallischer Gusskuchen aus Kupfer sondern ein Gemisch aus Cu- und Fe-Sulfiden entstanden ist, konnte keine Vereinfachung der Kupferverhüttung, im Vergleich zur klassischen Chalkopyritverhüttung, erzielt werden. Daher ist auch nicht anzunehmen, dass in prähistorischen Zeiten Chalkopyrit und Antimonit gemeinsam verhüttet wurden.

Schlüsselwörter: Chalkopyrit, Antimonit, Verhüttung, Experimentelle Archäologie

Co-smelting of Chalcopyrite and Antimonite in a Smelting Pit

Abstract: A smelting experiment with chalcopyrite and antimonite was carried out in order to be able to draw conclusions about prehistoric smelting methods. Chalcopyrite and antimonite were partially roasted and then melted in

a charcoal fire. Three zones were formed in the crucible: a metallic phase consisting predominantly of metallic Sb, an area composed of Cu- and Fe-sulphide mixtures as well as a slag which contains fayalite and unreacted SiO₂. This result is consistent with thermodynamic considerations, which suggest that smelting roasted Cu- and Sb-ores under charcoal should form metallic Sb as well as Cu- and Fe-sulfides. The formed fayalite slag also corresponds with experience from copper smelting.

Since this smelting attempt did not produce a metallic copper casting cake but a mixture of Cu- and Fe-sulfides, it was not possible to simplify copper smelting compared to classic chalcopyrite smelting. Therefore, it cannot be assumed that chalcopyrite and antimonite were smelted together in prehistoric times.

Keywords: Chalcopyrite, Antimonite, Smelting, Experimental archaeology

1. Antimon in bronzezeitlichem Kupfer

Arsen-Antimonbronzen sind bei der Verhüttung von Fahlerzen entstanden, welche neben Cu und S auch As und Sb enthalten. Ein positiver Effekt der Fahlerzverhüttung war, dass etwas As und Sb im Kupfer verblieben und dadurch Bronzen erhalten wurden, welche eine höhere Härte als unlegiertes Cu besitzen [1]. In solchen Arsenbronzen wurden bis zu 10 Gew.% As gefunden, aber die Sb Gehalte liegen üblicherweise unter 1 Gew.% [2, 3]. In der Arbeit von M. Junk [4], der zahlreiche Halsringe untersuchte, lagen die maximalen As Werte bei etwa 3 Gew.% und die Sb Werte bei maximal 2 Gew.%.

Eine besonderer Typ von Antimonbronzen ist aus der Umgebung von Velem in Westungarn bekannt, da in Gusskuchen und Bronzegegenständen über 10 Gew.% Sb gemessen wurden [5–7]. In einem bronzezeitlichen Depotfund aus Rannersdorf, Niederösterreich, wurden mehrere Gusskuchen aus Antimonbronze mit bis zu 20 Gew.% Sb analysiert [8]. Ein Depotfund aus Mahrersdorf, Niederösterreich,

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

enthielt einen Gusskuchen mit 0,2 Gew.% Sb sowie Bronze­teile mit bis zu 3,5 Gew.% Sb [9].

Die erhöhten Antimongehalte in den Bronzen von Velem wurden in der Fachwelt bereits eingehend diskutiert und auch R. F. Tylecote vermutete, dass Sb der Bronze zugesetzt wurde [10]. Dieser Antimonzusatz könnte in Form von Antimonit (Sb_2S_3) erfolgt sein, welcher in Vererzungen und Lagergänge in der Umgebung von Velem gefunden wurde [11]. Besonders zu erwähnen ist diesbezüglich der Antimonbergbau in Schlaining.

2. Das achäometallurgische Experiment

Das hier vorgestellte achäometallurgische Experiment wurde durchgeführt, um die chemischen Wechselwirkungen bei der gemeinsamen Verhüttung von Chalkopyrit und Antimonit zu untersuchen. Der Ablauf des Experiments ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Zuerst wurden die zerkleinerten Erze geröstet, wobei Antimonit aus Schlaining und Chalkopyrit vom Mitterberg (Salzburg) zum Einsatz kamen. Die gerösteten Erze wurden danach in einem Tiegel mit Holzkohle zur Reaktion gebracht. Nach dem Zerschneiden des Tiegels wurden die unterschiedlichen Zonen charakterisiert.

2.1 Rösten der Erze und Bereitung der Ausgangsmischung

Der Antimonit wurde etwa 3 min geröstet, wobei eine starke Rauchentwicklung auftrat. Neben SO_2 dürften auch Antimonverbindungen entstanden sein [12], welche sich an kalten Stellen als weißes Pulver abgeschieden haben. Beim Rösten von Chalkopyrit war die Rauchentwicklung schwächer als jene beim Antimonit. Nach dem Abkühlen wurden beide Materialien weiter zerkleinert und gemahlen.

Die gerösteten Erze (2,15 kg Chalkopyrit, 430 g Antimonit) wurden mit 1 kg Mehl als Klebstoff und Wasser händisch vermischt. Aus der teigigen Masse wurden Kügelchen mit einem Durchmesser von 2–5 cm geformt und diese getrocknet.

2.2 Der Verhüttungsversuch

Für das Verhüttungsexperiment wurde eine halbkugelförmige Ofengrube gebaut. Die ausgehobene Ofengrube wurde mit Lehm ausgekleidet und an einer Seite des Ofens wurde zur Düsenmontage eine Ofenwand aus Steinen, Holzstäben und Lehm aufgebaut (Abb. 1). Der mit Lehm verputzte Ofen wurde zur Trocknung aufgeheizt und im Anschluss daran wurden die durch das Trocknen entstandenen Risse mit verdünntem Lehmschlicker ausgebessert.

Der Ofen wurde etwa 3 h mit Holzkohle vorgeheizt und danach der Tiegel in die glühende Kohle eingebettet. Nun wurden im Abstand von etwa 10 min jeweils 2–3 Kügelchen der Kupferkies-Antimonitmasse in den Tiegel gegeben und mit glühender Kohle abgedeckt. Dies wurde fortgesetzt bis die vorgesehene Masse umgesetzt war. Nach der letzten

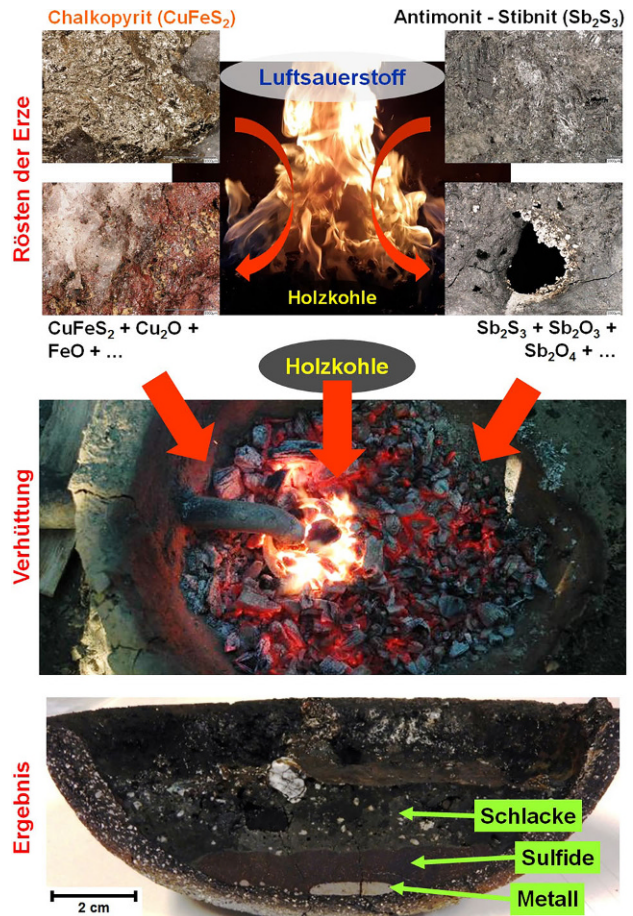


Abb. 1: Graphische Darstellung des durchgeführten Verhüttungsversuchs

Materialzugabe wurde der Tiegel in seiner Position belassen und gewartet bis der Ofen vollständig erkaltet war.

2.3 Probenahme für die metallographische Präparation

Der Tiegel wurde zuerst mittels einer Diamanttrennscheibe halbiert (Abb. 1) und danach wurden für die metallographische Präparation weitere Proben, aus den bereits mit freiem Auge erkennbaren, unterschiedlichen Bereichen entnommen. Die metallographisch präparierten Schlitze wurden mittels Lichtmikroskopie (LOM), Rasterelektronenmikroskopie mit Rückstreuelektronendetektor (REM-BSE) und Energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX) untersucht.

3. Untersuchungsergebnisse der im Tiegel gebildeten Produkte

Bereits nach dem Halbieren des Tiegels sind deutlich drei Bereiche zu erkennen (Abb. 1 und 2a). Am Boden des Tiegels befindet sich ein metallisch aussehender flacher Tropfen (Abb. 2f, g), darüber eine gleichförmige bräunliche Schicht, welche als sulfidisch interpretiert wurde

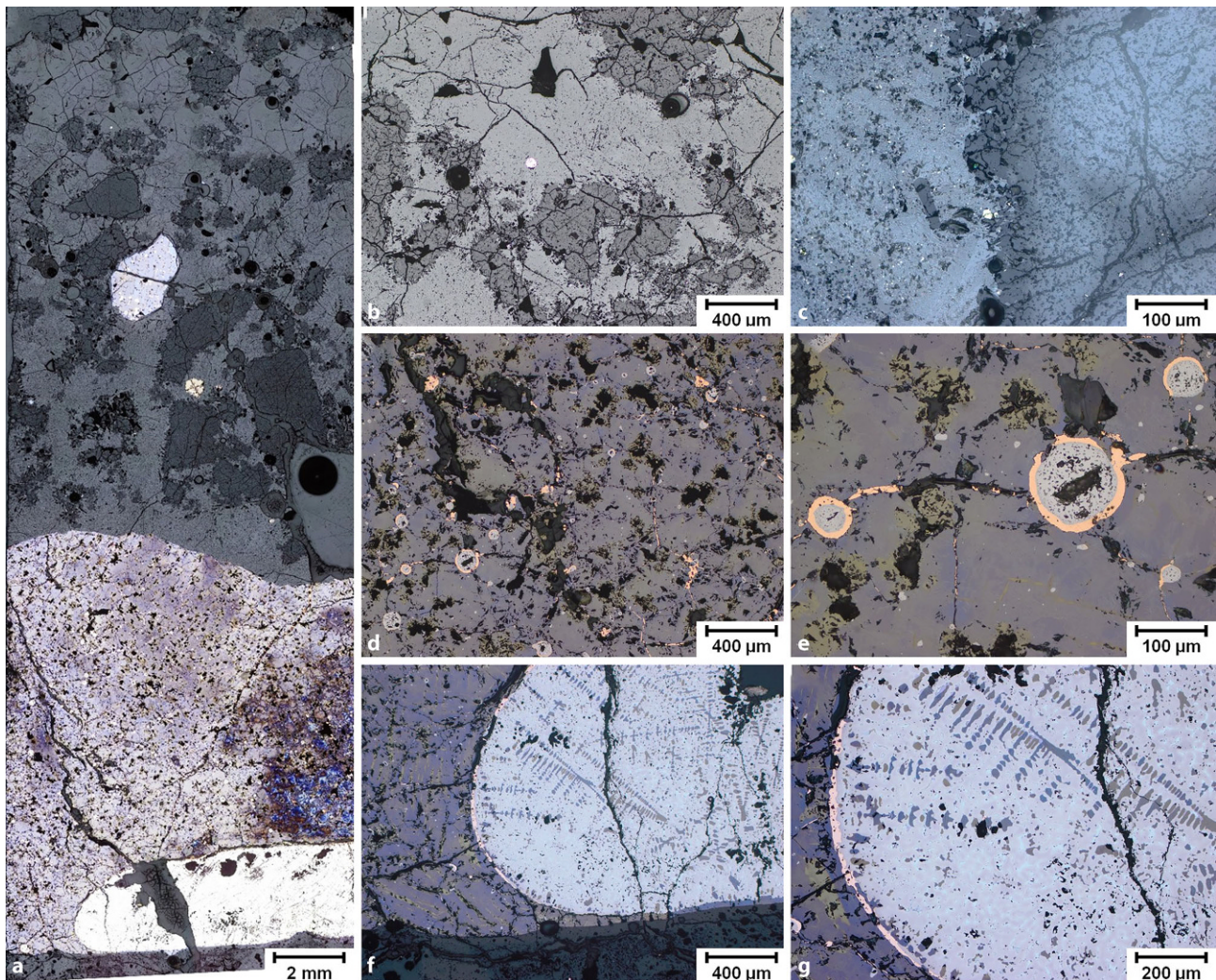


Abb. 2: Querschnitt durch den erhaltenen Tiegelinhalt mit den drei unterschiedlichen Zonen im LOM: a Überblick, b, c Schlacke, d, e Sulfide, f, g Metall

(Abb. 2d, e). Oben hat sich eine graue Schlackeschicht gebildet, welche noch weiße Einschlüsse unterschiedlicher Größen aufweist (Abb. 2a–c). Die einzelnen Bereiche sind durch relativ klare Grenzflächen getrennt.

3.1 Metallisches Gefüge

Am tiefsten Punkt des Tiegels hat sich ein Regulus aus metallischer Phase angesammelt (Abb. 2a).

Dieses Gefüge besteht aus langen, dunkleren Dendriten und einer hellen Matrix (Abb. 3). Der Umstand, dass die Dendriten Längen von über einem mm erreichen und auch mehrere parallele Dendriten mit der gleichen Orientierung vorliegen, kann auf die langsame Abkühlgeschwindigkeit und stark verzweigtes Dendritenwachstum zurückgeführt werden (Abb. 3a, b, d). SEM-EDX Analysen und auch eine REM-EDX Elementverteilung zeigen, dass es sich bei den Dendriten um Cu_2S handelt (Abb. 4), in dem auch Eisen enthalten ist.

Die metallische Matrix erscheint im LOM hellblau, wobei jedoch 2 Phasen mit unterschiedlichen Blautönen zu sehen sind (Abb. 3a–c). REM-EDX Analysen ergaben, dass es sich bei der weiß erscheinenden Phase um metallisches Sb mit nur geringen Verunreinigungen handelt. Die hellgraue Phase enthält Sb, Ni, Cu, Fe und S (Abb. 4). Es könnte sich um einen komplexen Mischkristall der Zusammensetzung $(\text{Cu, Ni, Fe})_2(\text{Sb,S})$ handeln, der jedoch nicht identifiziert wurde (Abb. 3d, e). Abb. 3f zeigt eine höhere Vergrößerung, bei der zu erkennen ist, dass das dunkle Material, aus dem die Dendriten bestehen, zweiphasig ist. Aufgrund der kleinen Dimensionen dieser Phasen konnten keine Konzentrationsunterschiede gemessen werden.

3.2 Das sulfidische Gefüge

Ein Bereich aus verschiedenen Sulfiden ist über und neben dem metallischen Tropfen angeordnet (Abb. 1). Die sulfidischen Bereiche sind überwiegend bräunlich-grau gefärbt (Abb. 2d, e), bei höheren Vergrößerungen im LOM erschei-

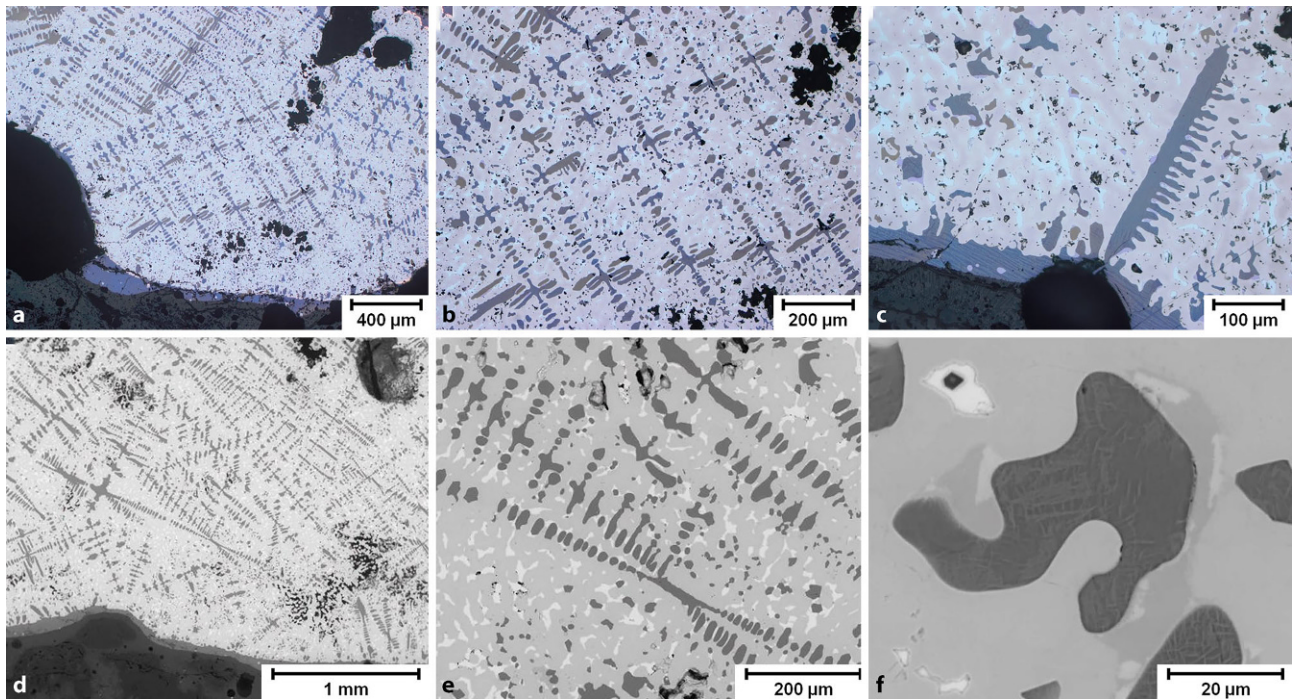


Abb. 3: Das metallische Gefüge am tiefsten Punkt des Tiegels: a-c LOM, d-f REM

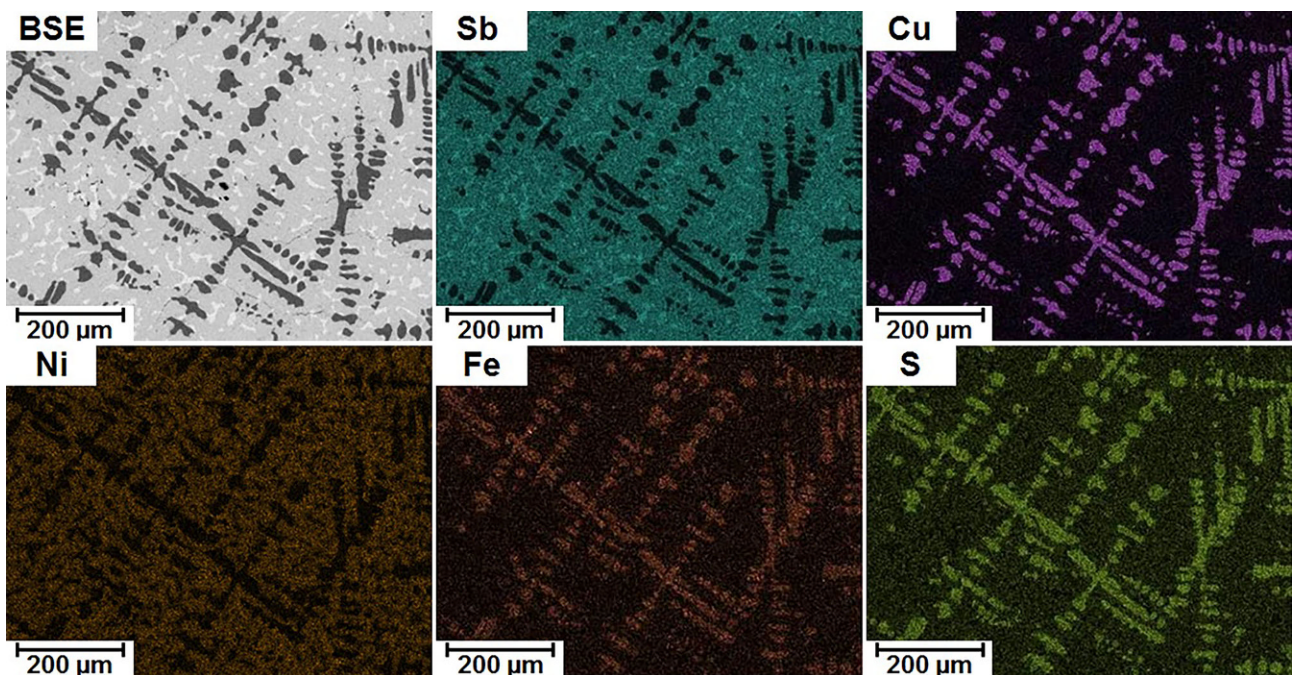


Abb. 4: REM-EDX Elementverteilung im metallischen Gefüge am Boden des Tiegels

nen sie hellblau (Abb. 5b, c). In der Sulfidschicht sind auch metallische Tröpfchen erkennbar, welche meist mit einem kupferfarbenen Saum umgeben sind (Abb. 2d, e und 5a) sowie Risse mit darin sichtbaren Ausscheidungen (Abb. 5e). Im REM lassen sich innerhalb des Sulfidgefüges Helligkeitsunterschiede erkennen, was das Vorliegen unterschiedlicher Phasen vermuten lässt.

Eine REM-EDX Elementverteilung (Abb. 6) zeigt, dass ein Sulfidgemisch vorliegt, das aus einer Fe-reichen Phase mit geringen Cu Gehalten sowie einer Cu-reichen Phase besteht. Die Tropfen im Gefüge enthalten überwiegend Sb. In den Säumen um die Tröpfchen und in den Rissen liegt metallisches Cu vor.

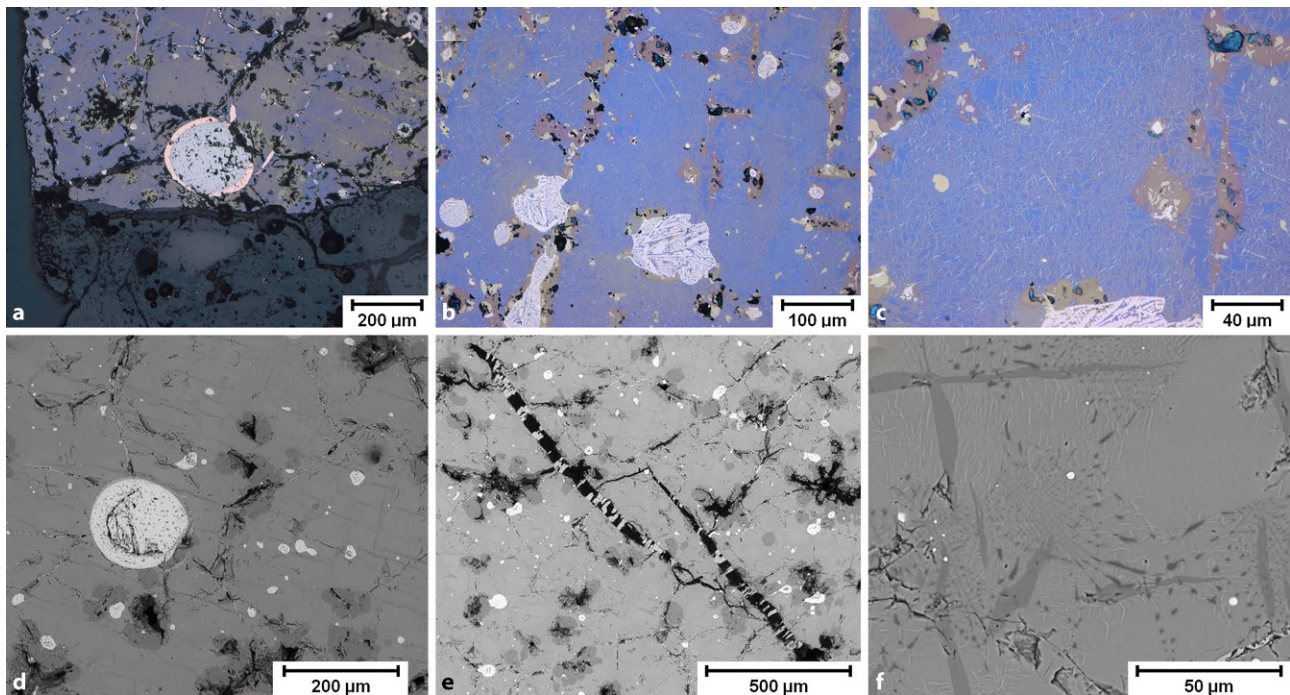


Abb. 5: Gefüge des sulfidischen Bereichs über der metallischen Phase: a–c LOM, d–f REM

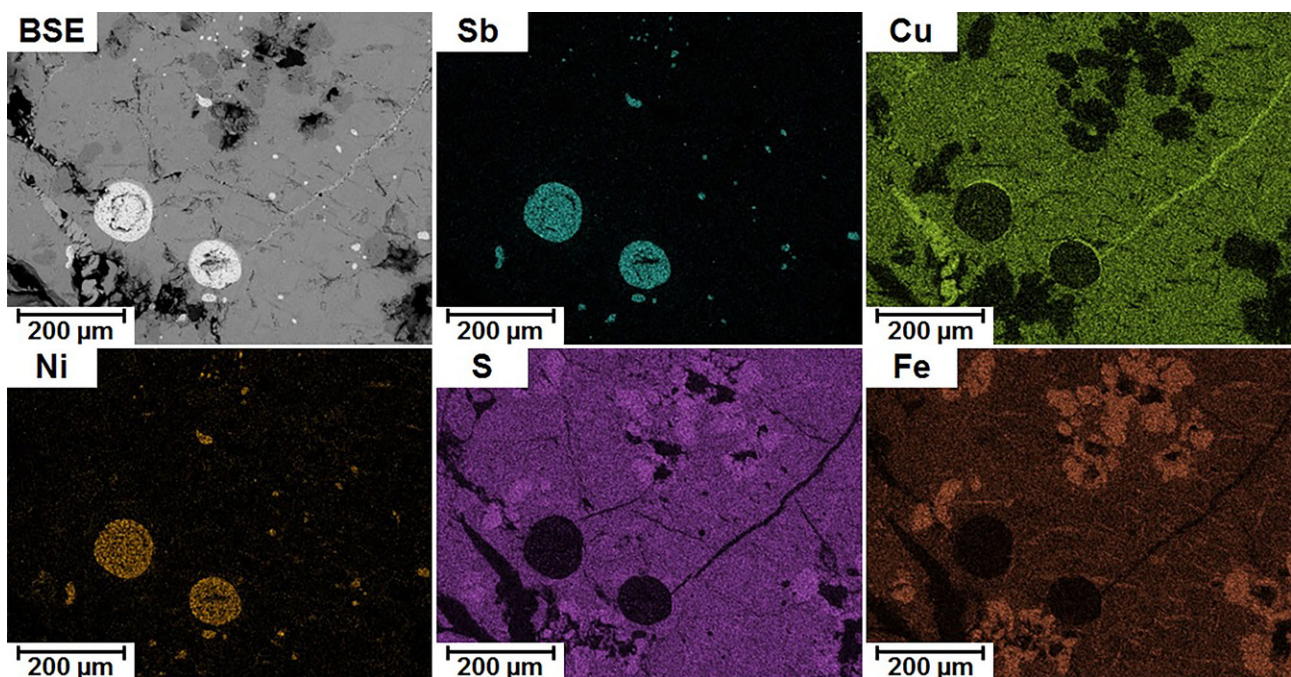


Abb. 6: REM-EDX Elementverteilung des sulfidischen Bereichs

Um die Tröpfchen genauer zu charakterisieren, wurde eine weitere REM-EDX Elementverteilung aufgenommen (Abb. 7). In dem Tropfen liegt überwiegend metallisches Sb vor, mit etwa 15 Gew.% Cu und Ni. Im umgebenden Saum liegt metallisches Cu vor, in dem auch geringe Anteile Sb und Ni gemessen wurden. Dieser Cu-Saum kann durch das Auftreten einer Entmischung während der Er-

starrung erklärt werden. Da das vorliegende System sehr komplex ist, gibt es jedoch keine Phasendiagramme oder thermodynamische Daten, die dies bestätigen würden. Die Messungen der Sulfide, welche um das Tröpfchen herum vorliegen, zeigen wiederum ein Fe-reiches Sulfid (dunkelgrau) sowie ein Cu-reiches Sulfid (hellgrau). Bei höheren Vergrößerungen (Abb. 5f) sind im REM auch Helligkeitsun-

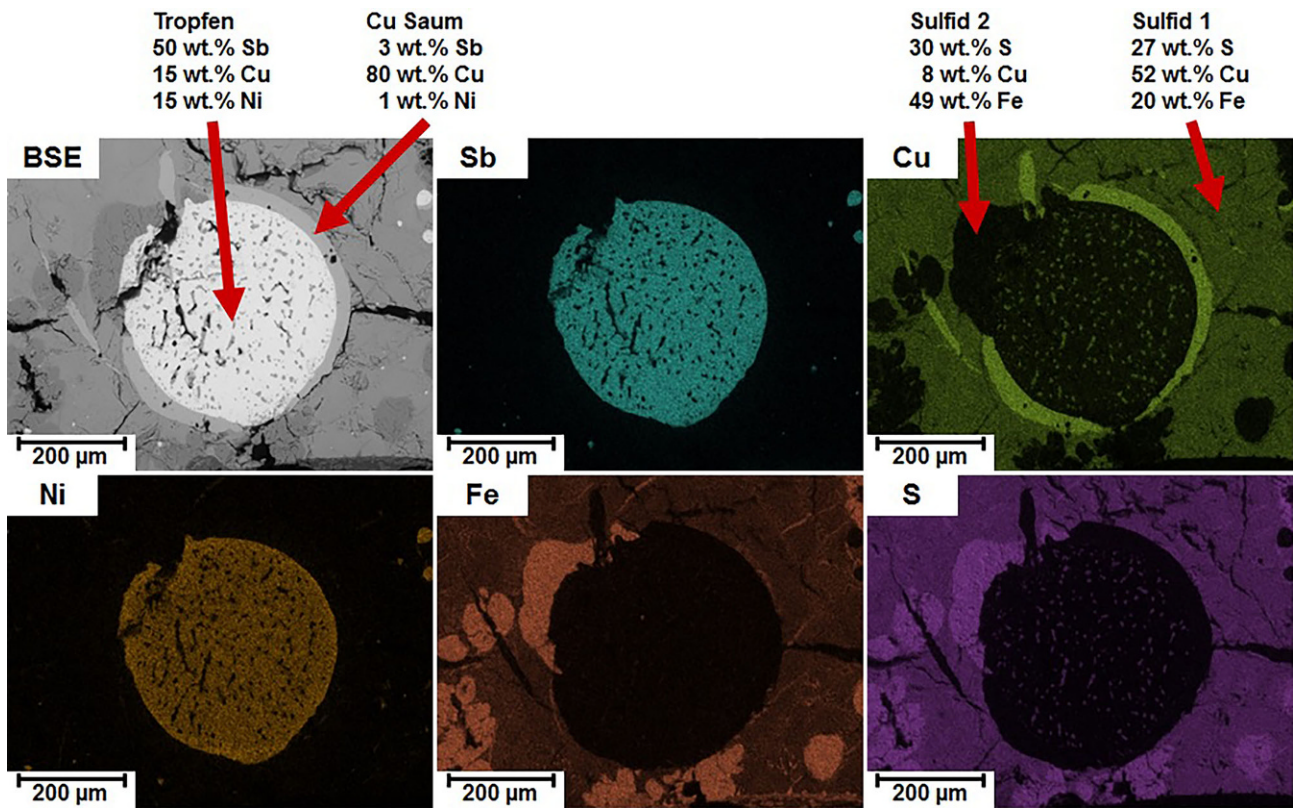


Abb. 7: REM-EDX Elementverteilung eines metallischen Einschlusses im sulfidischen Bereich

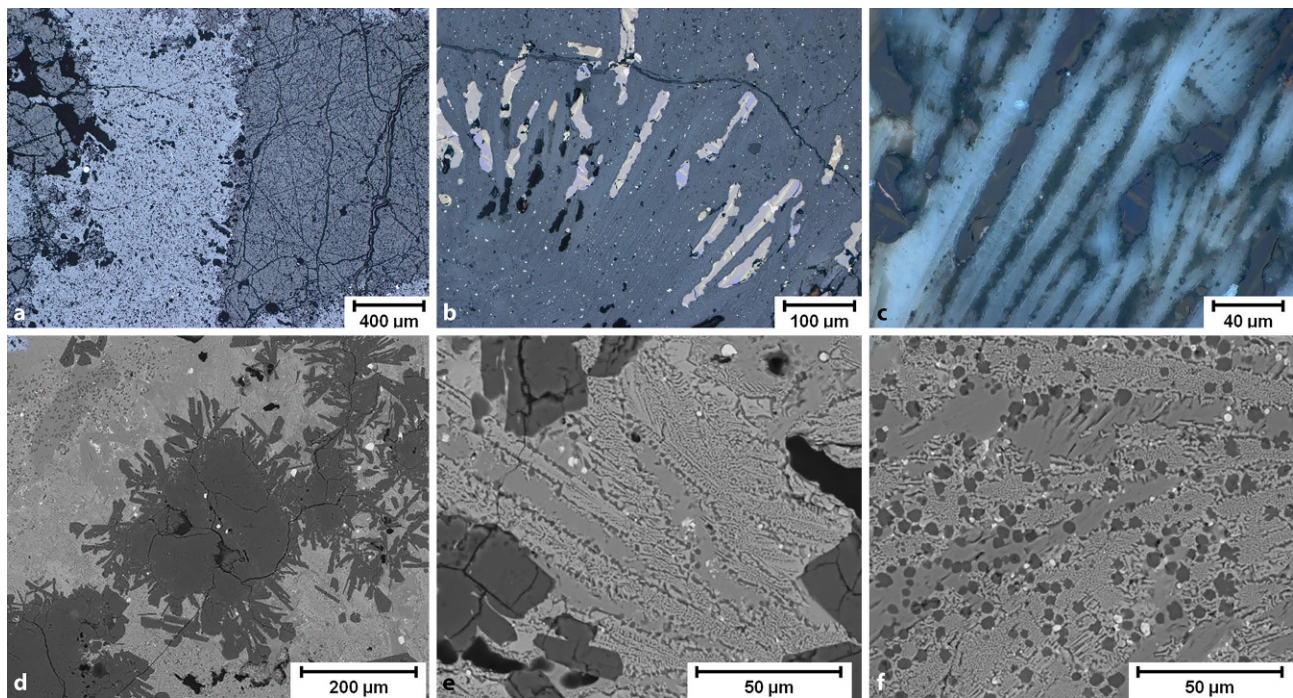


Abb. 8: Silikatische Schlacke im oberen Bereich des Tiegels: a–c LOM, d–f REM

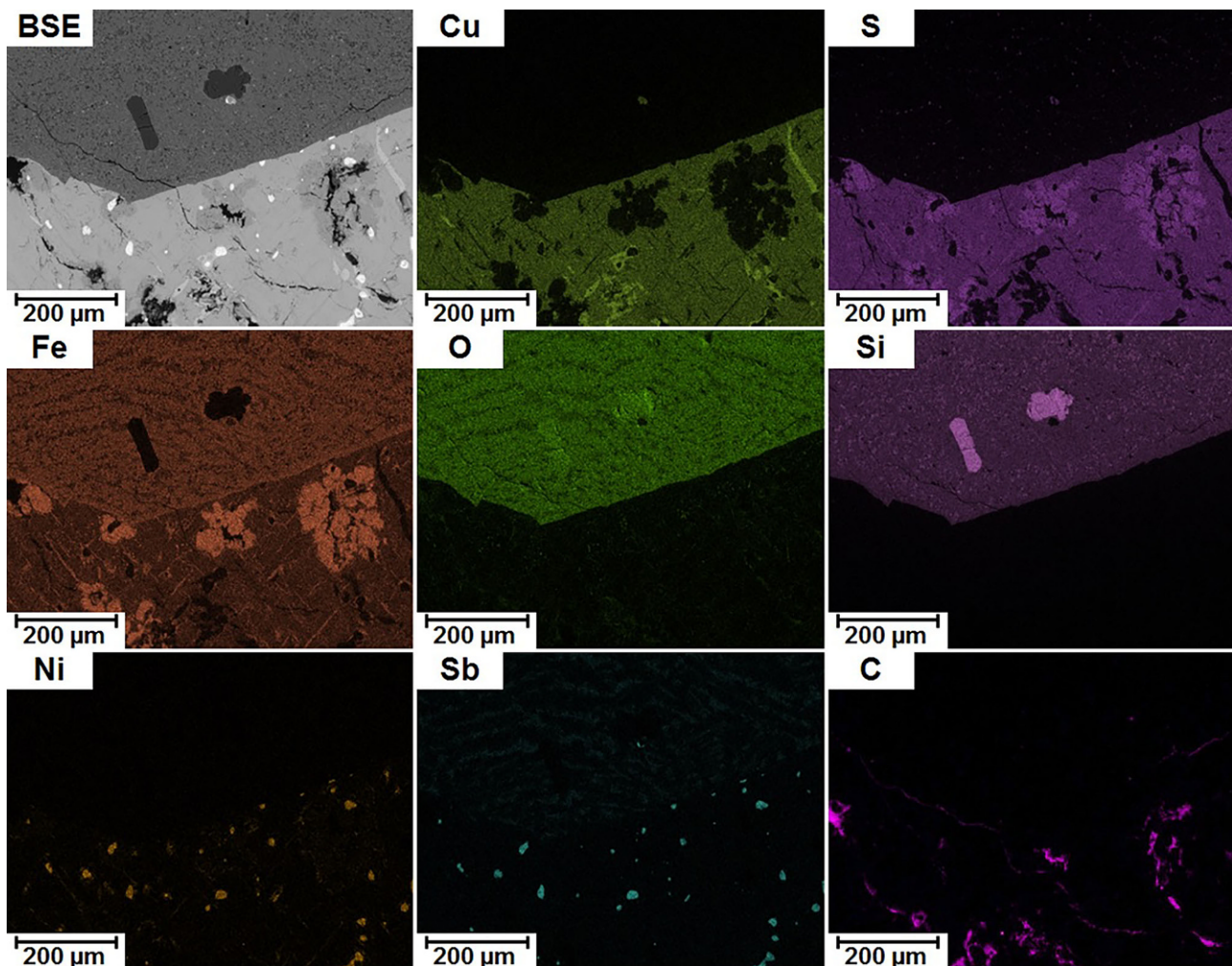


Abb. 9: REM-EDX Elementverteilung der Grenze zwischen Schlacke (oben) und dem sulfidischen Bereich (unten)

terschiede in dem Sulfidbereich zu erkennen, wobei eine Differenzierung der Phasenzusammensetzungen aufgrund der Feinheit der Strukturen nicht möglich ist.

3.3 Die Schlacke

Die Schlacke liegt über den Sulfiden (Abb. 2a) und besteht aus einer Mischung nicht aufgeschmolzenem SiO_2 , Schlacke und nicht oder nur teilweise umgesetztem Erz.

Das vorliegende SiO_2 stammt aus den Erzen, wo es ursprüngliche als Quarz vorlag, jedoch durch den Verhüttungsprozess in Cristobalit oder Tridymit umgewandelt wurde.

Im LOM bestehen die großen grauen Teile mit Rissen aus SiO_2 (Abb. 8a). Im REM erscheint SiO_2 dunkelgrau und an den Rändern der ursprünglichen Körner sind längliche Kristalle zu sehen (Abb. 5d). Dies ist auf eine hohe Temperatur beim Verhüttungsvorgang zurückzuführen, wobei SiO_2 in der Schmelze gelöst und bei der Erstarrung wieder abgeschieden wurde. Die kleinen SiO_2 -Körner in der Schlacke können ebenfalls durch dieses Phänomen erklärt werden (Abb. 8f).

Die erstarrte Schlacke besteht aus großen Fayalitbalken und in den Zwischenräumen liegt Glasphase vor (Abb. 8e; [13, 14]). Zwischen den Fayalitbalken sind teilweise noch Reste von Erz eingeschlossen (Abb. 8b). Unter polarisiertem Licht im LOM erscheint der Fayalit hellblau (Abb. 8c).

Es ist auch auffällig, dass die Grenzfläche zwischen Sulfid und Schlacke aus geraden Teilstücken besteht (Abb. 9), was die Ausbildung von Kristallflächen bei der Erstarrung vermuten lässt. Ob diese Kristallflächen von der Schlacke oder den Sulfiden bestimmt werden, ist nicht eindeutig, da es sich um keine einheitlichen Phasen handelt und die vorliegenden Schmelzpunkte nicht bekannt sind.

In Abb. 9 ist die REM-EDX Elementverteilung im Bereich der Sulfid-Schlacke Grenzfläche dargestellt. Diese zeigt, dass Cu und S gleichmäßig verteilt im Sulfid vorliegen und Sb, gemeinsam mit Ni, nur lokal angereichert sind. Fe ist im Sulfidbereich ebenfalls vorhanden, jedoch wie bereits oben beschrieben einmal als Fe-reiches Sulfid und einmal als Fe-armes (Cu-reiches) Sulfid.

In der Schlacke finden sich nur Si, O und Fe. Die Si-reichen Bereiche können SiO_2 zugeordnet werden. Ansonsten besteht die Schlacke aus Fayalit und Glasphase. Eine REM-EDX Elementanalyse eines Einschlusses, der sich in

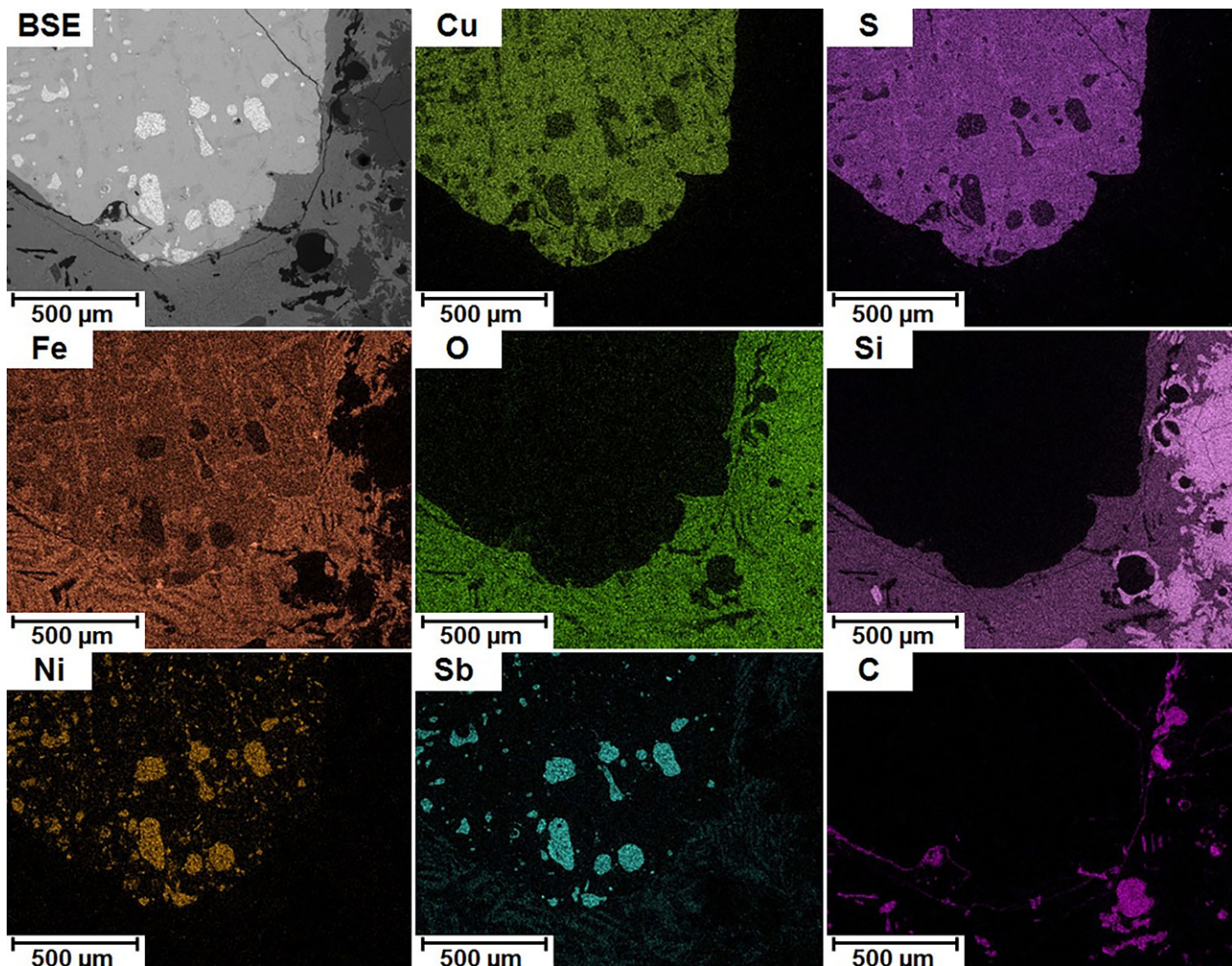


Abb. 10: REM-EDX Elementverteilung der Schlacke und eines teilweise umgesetzten Erzeinschlusses

der Schlacke befindet, ist in Abb. 10 zu sehen. Da das geröstete Erz stückweise aufgegeben wurde, handelt es sich bei diesem Einschluss um ein spät aufgegebenes Material, welches noch nicht durch die Schlacke nach unten gewandert ist. Es zeigt sich aber bereits hier, dass sich die Sulfide und das metallische Sb zu Beginn der Verhüttung bilden. Im Bereich der Schlacke ist auch Kohlenstoff zu sehen, welcher von der verwendeten Holzkohle stammt.

4. Diskussion des Verhüttungsexperiments

Die erhaltenen Ergebnisse bestätigen die theoretischen Überlegungen, welche für die Verhüttung von Fahlerzen angestellt wurden [12].

- Beim Rösten von Antimonit bildet sich flüssiges Sb_2O_3 und gasförmiges SO_2 . Im vorliegenden Versuch wurde jedoch nicht vollständig geröstet. Auch der Chalkopyrit wurde nicht vollständig geröstet, weshalb eine Mischung aus Cu- und Fe-Oxiden und -Sulfiden vorlag.
- Durch das Aufschmelzen der gerösteten Erze unter Holzkohle wird kein weiteres SO_2 freigesetzt, da bevorzugt

der Kohlenstoff (die Holzkohle) oxidiert wird, jedoch können die vorliegenden Sb- und Cu-Oxide zu den Metallen reduziert werden.

- Der am Boden des Tiegels vorliegende metallische Bereich besteht aus metallischem Sb, welches noch Cu, Ni und Fe enthält. In diesem Gefüge werden auch lange Dendriten aus Cu_2S mit Sb-Verunreinigungen gefunden. Es wurden auch geringe Mengen an metallischem Cu beobachtet.
- Die Sulfidschicht besteht aus einer Mischung unterschiedlicher Sulfide, wobei eine Cu-reiche Sulfidphase mit wenig Fe und nahezu keinen Sb- und Ni-Gehalten sowie eine Fe-reiche Sulfidphase mit wenig Cu, wenig Sb, aber keinem Ni, vorliegt. Betrachtet man die gängige Kupferverhüttung, so könnte dieses Sulfidgemisch mit der dort entstehenden Matte verglichen werden.
- Die entstehende Fayalitschlacke entspricht ebenfalls der konventionellen Kupferverhüttung, denn das beim Rösten entstandene FeO reagiert mit vorhandenem SiO_2 zu Fayalit (Fe_2SiO_4). Andere im Erz vorhandene Verunreinigungen bilden die sogenannte Glasphase zwischen den Fayalitkristallen.

Es kann zusammengefasst werden, dass das Endprodukt des Verhüttungsversuchs von der Röstung der Erze im Wesentlichen vom verbliebenen Schwefelgehalt abhängt. Beim vorliegenden Versuch war der Schwefelgehalt noch sehr hoch, sodass sich eine ausgeprägte Sulfidschicht bildete. Bei den metallischen Phasen wurde bevorzugt Sb und wenig Cu gebildet.

Für die Erhöhung der metallischen Anteile im Endprodukt sollte bei der Röstung der Schwefel möglichst vollständig entfernt werden.

Da die Herstellung von metallischem Kupfer oder einer Antimonbronze mit dieser Methode nicht sehr einfach erscheint, würden wir annehmen, dass diese Verhüttungsmethode der gleichzeitigen Umsetzung von geröstetem Chalkopyrit und Antimonit in prähistorischen Zeiten nicht durchgeführt wurde.

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

Interessenkonflikt. M. Thurner, S. Strobl und R. Haubner geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht

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

1. Pernicka, E., Lutz, J., Stöllner, T.: Bronze age copper produced at Mitterberg, Austria, and its distribution, Bd. 100. *Archaeologia Austriaca*, by Österreichische Akademie der Wissenschaften, Wien, S. 19–55 (2016)
2. Pernicka, E.: Provenance determination of metal artifacts—methodological considerations. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res.* **814**, 24–29 (1986)
3. Haubner, R., Ertl, F., Strobl, S.: Examinations of a Bronze Ingot Made of Fahlore – Untersuchungen an einem aus Fahlerz gewonnenem Bronze-gusskuchen. *Pract. Metallogr.* **54**, 107–117 (2017)
4. Junk, M.: Material properties of copper alloys containing arsenic, antimony, and bismuth. Dissertation. Technische Universität Bergakademie, Freiberg (2003)
5. Helm, O.: Chemische Analyse vorgeschichtlicher Bronzen aus Velem St. Veit in Ungarn. *Z Ethnol.* **25**, 359–365 (1900)
6. 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. (Hrsg.) *Archaeometry 98. Proceedings of the 31st Symposium, April 26–May 3 1998*. S. 405–408. Printing House of the Hungarian National Museum, Budapest (2002). I–II, BAR, 1
7. Haubner, R., Strobl, S., Thurner, M., Herdits, H.: Ein Kupfergusskuchen mit hohem Antimongehalt aus Velem/Westungarn. *Berg Huettenmaenn Monatsh* **165**, 453–460 (2020)
8. Reiter, V., Linke, R.: Ein Werkplatz mit Brucherzdepot der ausgehenden Bronzezeit aus Rannersdorf, Niederösterreich. *Fundberichte aus Österreich* **55**, S. 144–182 (2016)
9. Mödlinger, M., Trebsche, P.: Archaeometallurgical investigation of a late bronze age hoard from Mahrsdorf in lower Austria. *J. Archaeol. Sci. Reports* **33**, 102476 (2020)
10. Tylecote, R.F.: *The early history of metallurgy in Europe*. Longman, London, New York (1987)
11. Huber, P., Huber, S.: Die Mineralien der Antimonitlagerstätte Schlaining. In: *Die Mineralien des Burgenlandes, Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland* 126. Wograndl Druck GmbH, Eisenstadt (2009)
12. Haubner, R., Strobl, S.: Considerations on copper smelting from Fahlores and the metallurgy of Cu–As bronzes. *Berg Huettenmaenn Monatsh* (2023). <https://doi.org/10.1007/s00501-022-01230-6>
13. Haubner, R., Strobl, S.: Slag investigations from Bronze Age copper smelting sites. *MSF* **891**, 608–612 (2017)
14. Haubner, R., Strobl, S., Klemm, S.: Investigations of a slag from copper smelting discovered at the Bronze Age site Prein VII/Cu in Lower Austria. In: Montero-Ruiz, I., Perea, A. (Hrsg.) *Archaeometallurgy in Europe IV. Bibliotheca Praehistorica Hispana*, Bd. 33, S. 135–142. Editorial CSIC, Madrid (2017)

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