

H.-H. Cloeren, R. Haubner*, S. Strobl

Metallography of tailings from the Mansfeld copper mining area

Metallographie an Haldenmaterialien aus dem Mansfelder Kupferrevier

Received: 29.05.2024

Accepted: 06.06.2024

Translation: E. Engert

Eingegangen: 29.05.2024

Angenommen: 06.06.2024

Abstract

The copper slate deposit of the Mansfeld copper mining area was mined in the 19th and 20th century. Mineral collectors can still find traces of copper smelting activities on the slag heaps of the various copper smelters.

A piece from the Krug smelter slag heap mainly consists of Cu and Fe sulfides. The piece in question might be the intermediate product copper matte.

The pieces from Hettstedt and the August Bebel smelter contain clearly visible metallic copper. The Hettstedt specimen might be a piece of furnace lining with adhering slag. Cr and Mg could be found, suggesting that chromium magnesia was used as refractory material.

Kurzfassung

Die Kupferschieferlagerstätte des Mansfelder Kupferreviers wurde im 19. und 20. Jh. abgebaut. Auf den Schlackenhalde der verschiedenen Kupferhütten finden Mineraliensammler noch immer Reste der Kupferverhüttung.

Ein Stück von der Schlackenhalde Krughütte besteht überwiegend aus Cu- und Fe-Sulfiden. Es könnte sich um das Zwischenprodukt Kupferstein oder Matte handeln.

Die Stücke aus Hettstedt und von der August Bebel Hütte enthalten deutlich sichtbares metallisches Kupfer. Bei der Hettstedt Probe könnte es sich um ein Stück der Ofenausmauerung mit anhaftender Schlacke handeln. Es wurden Cr und Mg gefunden, was auf Chrommagnesia als Feuerfestmaterial schließen lässt.

Authors:

*Corresponding author: **Roland Haubner** Technische Universität Wien, Wien, Austria;
E-Mail: roland.haubner@tuwien.ac.at

Heinz-Hubert Cloeren Cloeren Technology GmbH, Wegberg, Deutschland

Susanne Strobl Technische Universität Wien, Wien, Austria

Open Access. © 2024 the author(s), published by De Gruyter.  This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.

The piece from the August Bebel smelter contains up to 18 wt. % Cu. It does, however, not contain any sulfur. It is most likely Fe_2SiO_4 slag (fayalite) with a high proportion of FeO. The presence of Sn and Zn suggests that this slag was formed during the processing of bronze or brass.

Keywords: *Copper metallurgy, slags, mining archeology*

1 Introduction

The Mansfeld copper mining district is located in the southern Harz region in the area of a large copper slate deposit. Several copper smelters were built in the 19th century. They were in operation until the 1970s. Geology [1] and mining [2] in the Mansfeld copper mining district have already been described in detail. In the 18th [3] and the 19th century [4], publications also emerged on smelting.

On the numerous slag heaps, mineral collectors can still find pieces remaining from copper mining today. Owing to the malachite formed during weathering, slags that still contain copper are particularly noticeable and easy to find.

However, it is to be expected that such finds are remnants of various copper smelting stages. Hypothetically assigning the pieces to individual production steps, however, seems unrealistic.

Three finds from the slag heaps Krug smelter, August Bebel smelter, and Hettstedt were made available for these examinations.

2 Examination methods

Smaller pieces were first cut off from the samples using a diamond cutting disc. The

Das Stück von der August Bebel Hütte enthält bis zu 18 Gew.% Cu jedoch keinen Schwefel. Es dürfte sich um eine Fe_2SiO_4 -Schlacke (Fayalit) mit hohem Anteil an FeO handeln. Die Anwesenheit von Sn und Zn deutet auf die Entstehung dieser Schlacke bei der Bronze- oder Messingverarbeitung.

Schlagwörter: *Kupfermetallurgie, Schlacken, Montanarchäologie*

1 Einleitung

Das Mansfelder Kupferrevier liegt im Südharz im Bereich einer großen Kupferschieferlagerstätte. Im 19. Jh. wurden mehrere Kupferhütten errichtet, die bis in die 1970er Jahre in Betrieb waren. Geologie [1] und Bergbau [2] im Mansfelder Kupferrevier wurden bereits ausführlich beschrieben. Auch zur Verhüttung im 18. Jh. [3] sowie im 19. Jh. wurde publiziert [4].

Heute ist es so, dass Mineraliensammler auf den zahlreichen Schlackenhalde noch Stücke aus der Kupfergewinnung finden. Besonders auffällig sind diesbezüglich Schlacken, die noch Kupfer enthalten und durch den bei der Verwitterung entstehenden Malachit leicht zu finden sind.

Es ist aber zu erwarten, dass derartige Fundstücke aus den unterschiedlichen Verhüttungsstufen des Kupfers stammen. Eine mögliche Zuordnung der Stücke zu einzelnen Produktionsschritten erscheint hingegen unrealistisch.

Für diese Untersuchungen wurden drei Fundstücke von den Schlackenhalde Krughütte, August Bebel Hütte und Hettstedt zur Verfügung gestellt.

2 Untersuchungsmethoden

Von den zur Verfügung gestellten Proben wurden zuerst mittels einer Diamant-Trenn-

sections were vacuum mounted in epoxy resin to fill existing pores as much as possible. Subsequent to plane grinding (P220), the polishing steps 9 to 1 μm were performed using diamond suspensions. The polished samples were examined using a light optical microscope (LOM) and a scanning electron microscope (SEM), and energy dispersive X-ray analysis (EDS) was applied. The chemical composition was determined by X-ray fluorescence analysis (XRF). In addition, X-ray diffraction (XRD) was carried out to obtain information about the phases present.

3 Results and discussion

The XRF analyses carried out on the metallographically prepared samples already revealed distinct differences between the pieces (Table 1).

The Krug smelter sample predominantly consists of sulfides of Cu and Fe. It should therefore rather be considered as copper matte (intermediate product from copper extraction) than as slag [5].

Two distinct areas can be observed on the Hellstedt piece, one of which unusually contains Cr and Mg. Both elements could originate from refractory material used, possibly the furnace lining made of chromium magnetite [6].

The August Bebel smelter piece's composition most closely resembles silicate slag. However, increased concentrations of Sn and Zn have been measured here.

XRF measurements already reveal that the samples are quite different and originate from different manufacturing processes.

scheibe kleinere Teile abgeschnitten. Die Teilstücke wurden in Epoxidharz unter Vakuum eingebettet, um die vorhandenen Poren möglichst gut aufzufüllen. Nach dem Planschleifen (P220) folgten die Polierstufen 9 bis 1 μm mit Diamantsuspensionen. Die polierten Proben wurden mittels Lichtmikroskop (LOM), Rasterelektronenmikroskop (REM) und energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX) untersucht. Die chemische Zusammensetzung, wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) bestimmt. Um Informationen über die vorliegenden Phasen zu erhalten, wurde auch Röntgendiffraktion (XRD) durchgeführt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Die RFA Analysen an den metallographisch präparierten Proben zeigten bereits deutliche Unterschiede der vorliegenden Stücke (Tabelle 1).

Die Probe Krughütte besteht überwiegend aus Sulfiden von Cu und Fe und ist daher eher als Kupferstein bzw. Matte (Zwischenprodukt der Kupfergewinnung) und nicht als Schlacke anzusprechen [5].

Im Stück aus Hettstedt sind zwei unterschiedliche Bereiche zu sehen, von denen einer üblicherweise Cr und Mg enthält. Beide Elemente könnten aus einem verwendeten Feuerfestmaterial stammen, womit es sich hier um die Ofenausmauerung Chrommagnetit handeln könnte [6].

Das Stück August Bebel Hütte hat eine Zusammensetzung die am ehesten einer Silikatschlacke ähnelt, jedoch sind hier erhöhte Konzentrationen an Sn und Zn gemessen worden.

Bereits aus den RFA Messungen ist ersichtlich, dass es sich um sehr unterschiedliche Proben aus unterschiedlichen Produktionsprozessen handelt.

	Krughütte		Hettstedt					August Bebel Hütte	
Cu	35.0	35.2	11.5	8.6	3.3	5.7	6.0	15.4	17.6
Fe	26.0	25.9	65.9	55.0	19.5	8.3	7.1	47.9	53.6
S	34.3	33.8	1.0	0.2	0.1	0.1	0.2	n.n.	n.n.
Si	n.n.	n.n.	12.3	11.3	11.3	5.3	2.6	15.4	11.0
Cr	0.1	0.1	1.4	11.4	20.4	24.1	15.0	0.6	0.4
Mg	n.n.	n.n.	0.6	6.5	40.4	46.8	63.7	0.4	0.3
Al	n.n.	n.n.	0.6	1.0	1.4	1.8	1.0	6.0	4.7
Sn	n.n.	n.n.	0.4	0.5	0.6	0.3	0.1	3.9	3.6
Pb	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.1	1.5	1.4
Zn	2.3	2.3	0.4	0.5	0.5	0.1	n.n.	5.2	4.2
Ni	0.1	0.1	1.4	1.1	0.5	0.1	0.3	0.5	0.5
Co	n.n.	n.n.	0.5	0.5	0.2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Mn	0.7	0.8	0.8	0.6	0.3	n.n.	n.n.	1.2	1.1
Ca	1.1	1.4	1.5	1.4	1.0	6.8	3.6	1.1	0.9
K	0.1	0.1	1.0	0.8	0.3	0.1	0.1	0.3	0.3
Ti	n.n.	n.n.	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2
P	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0.1	n.n.	0.1	0.1
Na	n.n.	n.n.	0.2	0.1	n.n.	n.n.	n.n.	0.3	n.n.
V	0.1	0.1	0.1	0.1	n.n.	0.1	n.n.	n.n.	n.n.
Ag	n.n.	0.1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

Table 1: XRF analyses of the metallographically prepared samples from the Mansfeld copper mining area (wt. %).

Tabelle 1: RFA Analysen an den metallographisch präparierten Proben aus dem Mansfelder Kupfererz (Gew. %).

3.1 Sample from the Krug smelter

The Krug smelter sample is characterized by a uniform dark brown color and several large round pores (Figure 1a). The microstructure is composed of differently colored phases with varying ratios of copper to iron

3.1 Probe Krughütte

Das Probestück von der Fundstelle Krughütte hat eine gleichmäßig dunkelbraune Farbe und weist einige große, runde Poren auf (Bild 1a). Das Gefüge besteht aus unterschiedlich gefärbten Phasen, wobei die Verhältnisse von Kupfer

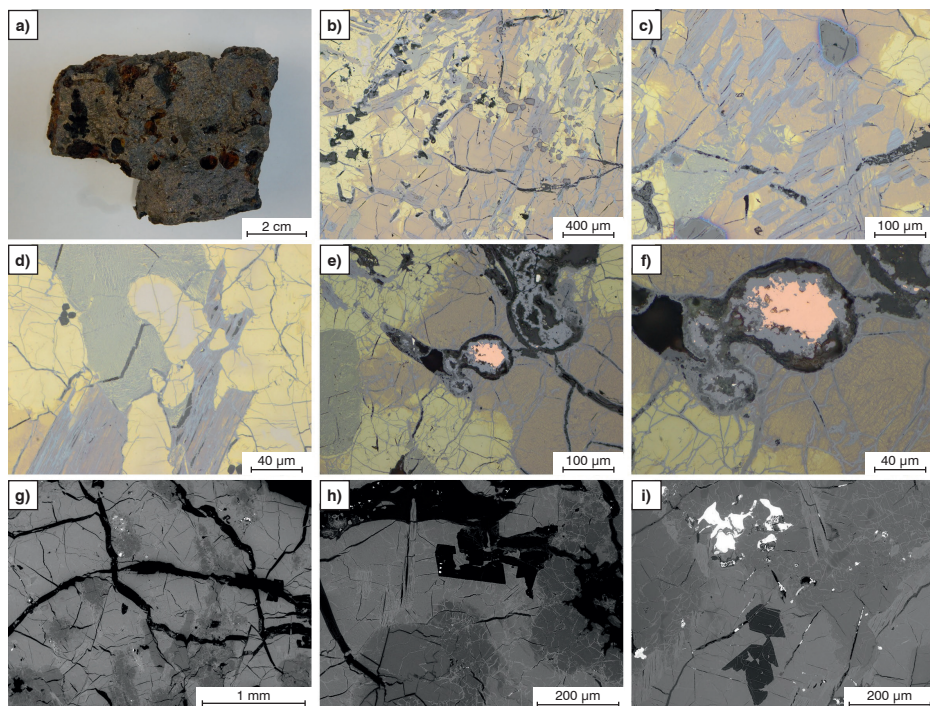


Figure 1a to i: Find from the Krug smelter's slag heap. a) Overall view; b–d) microstructure with different sulfides; e, f) inclusion of metallic Cu; b–f) LOM; g–i) SEM.

Bild 1a bis i: Fundstück von der Schlackenhalde Krughütte. a) Gesamtansicht; b – d) Gefüge mit unterschiedlichen Sulfiden; e, f) Einschluss aus metallischem Cu; b–f) LOM; g–i) REM.

to sulfur (Figure 1b–d). EDS element distribution illustrates the differences in the concentrations of the different elements (Figure 2). Since proportions of slag could neither be found in the sections nor in the XRF analyses, this sample is likely to be copper matte. The compounds contained in copper matte, Cu-Fe-S (e.g., bornite Cu_5FeS_4 , chalcocopyrite CuFeS_2 , covellite CuS , chalcocite Cu_2S , digenite Cu_9S_5 , or djurleite $\text{Cu}_{31}\text{S}_{16}$) are a function of the process used [5, 7–9]. Depending on how much copper, iron, and sulfur is still available, not only these compounds but also solid solutions form. According to the XRD measurements, the main phases present are bornite Cu_5FeS_4 and chalcocite Cu_2S . Isolated

zu Eisen zu Schwefel variieren (Bild 1b–d). Eine EDX-Elementverteilung veranschaulicht die Konzentrationsunterschiede der verschiedenen Elemente (Bild 2). Da keine Schlackenanteile in den Schläfen gefunden wurden, und auch aufgrund der RFA Ergebnisse, dürfte es sich bei dieser Probe um einen Kupferstein handeln. Kupferstein enthält je nach Produktionsprozess unterschiedliche Verbindungen aus Cu-Fe-S (z. B. Bornit Cu_5FeS_4 , Chalkopyrit CuFeS_2 , Covellin CuS , Chalkosin Cu_2S , Digenit Cu_9S_5 oder Djurleit $\text{Cu}_{31}\text{S}_{16}$) [5, 7–9]. Neben diesen Verbindungen bilden sich auch noch Mischkristalle, je nachdem wieviel Kupfer, Eisen und Schwefel noch zur Verfügung stehen. Laut XRD Messung liegen hauptsächlich

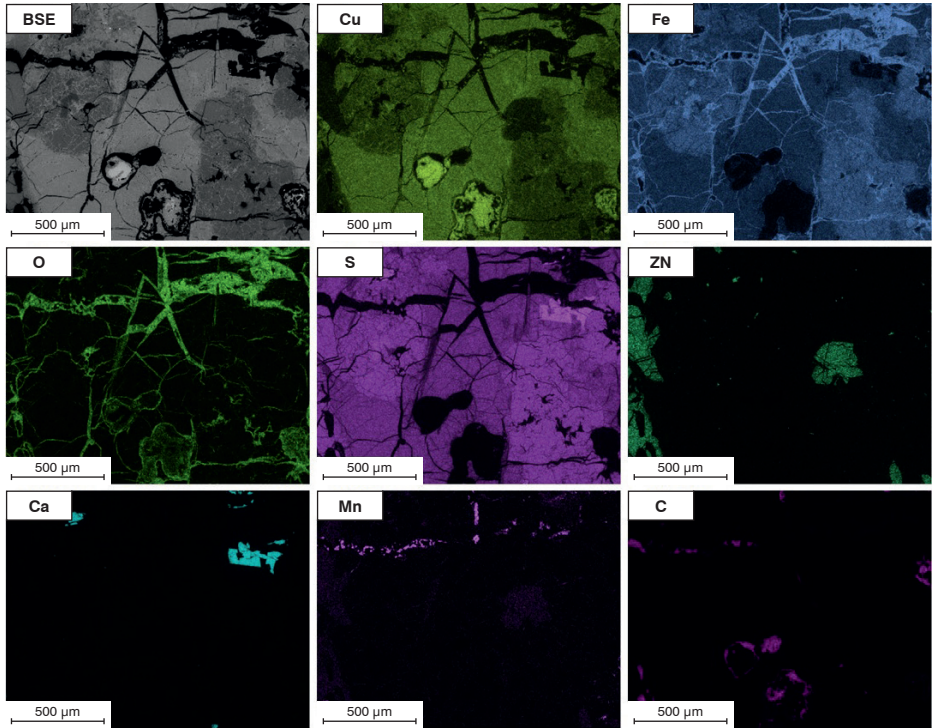


Figure 2: EDS element distribution of the Krug smelter sample. Area predominantly consisting of copper matte.

Bild 2: EDX-Elementverteilung der Probe Krughütte. Bereich mit überwiegend Kupferstein.

inclusions of metallic copper could also be found (Figure 1e, f). The EDS element distribution (Figure 2) shows a preferential localization of Fe and O at cracks. Some areas are also enriched in Zn, Mn, and C. What is particularly noticeable, however, is a Ca enrichment combined with a high S content. Another EDS element distribution (Figure 3) shows an angularly delimited area that appears to only consist of Ca and S. It is probably CaS, a known compound [10]. However, its occurrence in copper matte or slags has not been described before. Its mineral designation is oldhamite [11]. The SEM images (Figure 1g–i) also reveal white areas – corresponding to accumulations of Pb.

die Phasen Bornit Cu_5FeS_4 und Chalkosin Cu_2S vor. Es wurden auch vereinzelt Einschlüsse aus metallischen Kupfer gefunden (Bild 1e, f). Bei der EDX-Elementverteilung (Bild 2) fällt noch auf, dass Fe und O bevorzugt an Rissen lokalisiert sind. In verschiedenen Bereichen sind auch noch Zn, Mn und C angereichert. Besonders auffällig ist jedoch eine Anreicherung von Ca bei gleichzeitig hohem S-Gehalt. Eine weitere EDX-Elementverteilung (Bild 3) zeigt einen kantig begrenzten Bereich, der anscheinend nur aus Ca und S besteht. Es dürfte sich hier um die Verbindung CaS handeln, die zwar bekannt ist [10], deren Vorkommen in Kupferstein oder Schlacken noch nicht beschrieben wurde. Die Bezeichnung als Mineral ist Oldha-

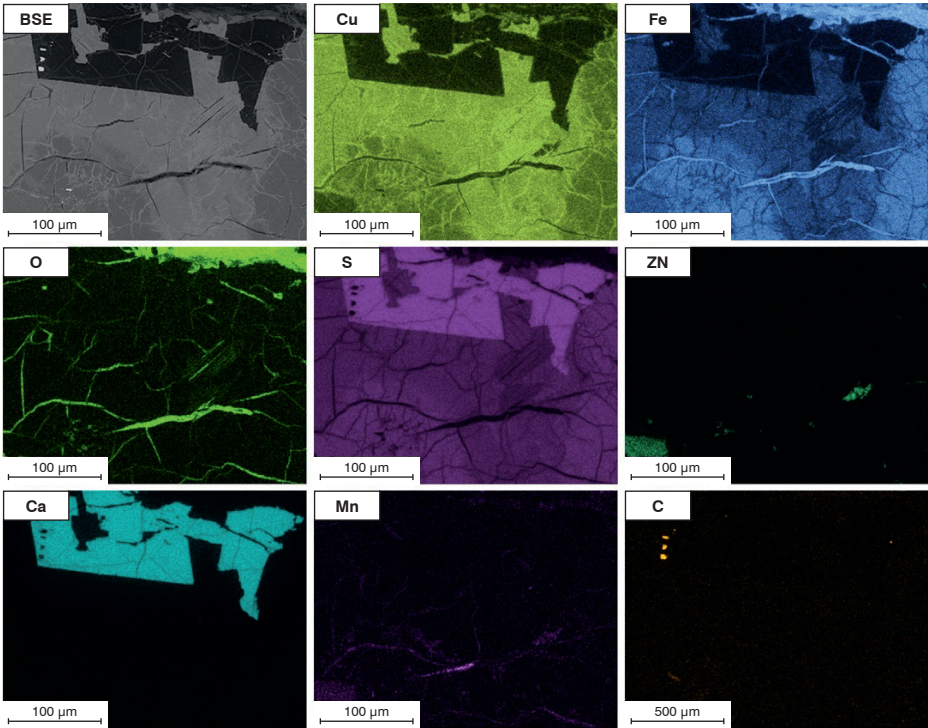


Figure 3: EDS element distribution of the Krug smelter sample showing a large precipitation of CaS.

Bild 3: EDX-Elementverteilung der Probe Krughütte, mit einer großen CaS Ausscheidung.

mit [11]. In den REM-Bildern 1g-i sind auch noch weiße Bereiche zu sehen, bei denen es sich um Ansammlungen von Pb handelt.

3.2 Hettstedt sample

On the surface and cutting surface of the sample from the Hettstedt site, copper inclusions are clearly visible (Figures 4a, b). The copper-rich area also contains high concentrations of Fe, probably present in the form of FeO, while silicate slag constituents can be found therebetween (Figure 4c). Metallic copper (Figure 4d), siliceous areas (Figure 4e), and inclusions of copper sulfides (Figure 4f) can also be found. The

3.2 Probe Hettstedt

An der Oberfläche und Schnittfläche der Probe vom Fundort Hettstedt sind deutlich Kupfereinschlüsse zu sehen. (Bild 4a, b). Der Bereich mit viel Kupfer enthält auch hohe Konzentrationen an Fe, das vermutlich als FeO vorliegt und dazwischen silikatische Schlackenbestandteile (Bild 4c). Es gibt auch metallisches Kupfer (Bild 4d), silikatische Bereiche (Bild 4e) und Einschlüsse aus Kupfersulfiden (Bild 4f). Aus der EDX-Elementverteilung sind

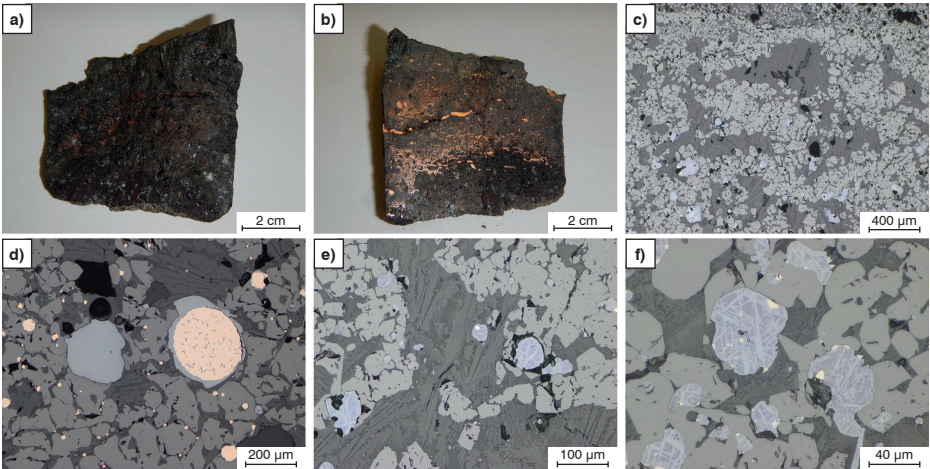


Figure 4a to f: Sample from Hettstedt. a) Overall view; b) cutting surface; c-f) slag area with various inclusions; c-f) LOM.

Bild 4a bis f: Probe aus Hettstedt. a) Gesamtansicht, b) Schnittfläche, c-f) Schlackenbereich mit verschiedenen Einschlüssen; c-f) LOM.

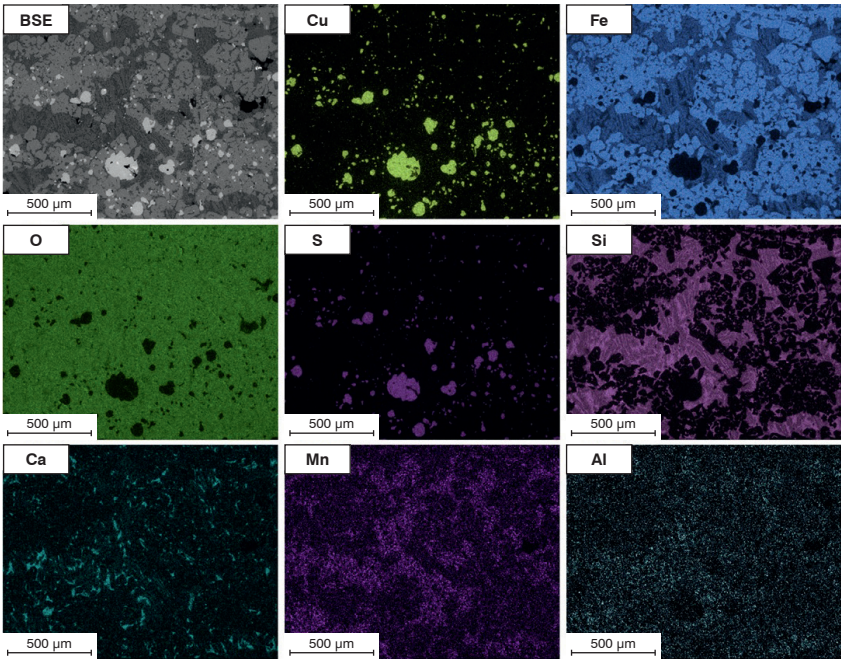


Figure 5: EDS element distribution from the slag area of the Hettstedt sample.

Bild 5: EDX-Elementverteilung der Probe Hettstedt aus dem Bereich der Schlacke.

EDS element distribution clearly indicates the mixing ratios (Figure 5). The results are essentially consistent with earlier copper slag analyses [12–15].

At the bottom of the cutting surface (Figure 4b), an area with a darker color and without Cu inclusions can also be observed. Figure 6a shows the transition area. Figures 6b–d show some details. As can be seen from the EDS element distribution (Figure 7), the areas appearing darker in the backscattered electrons (BSE) image predominantly consist of Cr, Mg, and O and also contain smaller amounts of Al and Mn, suggesting that it is a fragment from the refractory furnace wall made of chromium magnesite [6]. Copper is present in its metal-

die Mischungsverhältnisse gut zu erkennen (Bild 5). Im Wesentlichen stimmen die Ergebnisse mit früheren Analysen an Kupferschlacken überein [12–15].

An der Schnittfläche (Bild 4b) ist auch unten ein Bereich mit einer dunkleren Farbe und ohne Cu-Einschlüsse zu sehen. Der Übergangsbereich ist in Bild 6a zu sehen und Details werden in den Bildern 6b–d gezeigt. Wie man aus der EDX-Elementverteilung (Bild 7) erkennen kann, bestehen die im Rückstreuungselektronen-Bild (engl. backscattered electrons, BSE) dunkleren Bereiche überwiegend aus Cr, Mg und O. Geringere Mengen an Al und Mn sind ebenfalls in diesen Bereichen vorhanden. Dies deutet darauf hin, dass es sich um einen Teil der feuerfesten Ofenwand aus

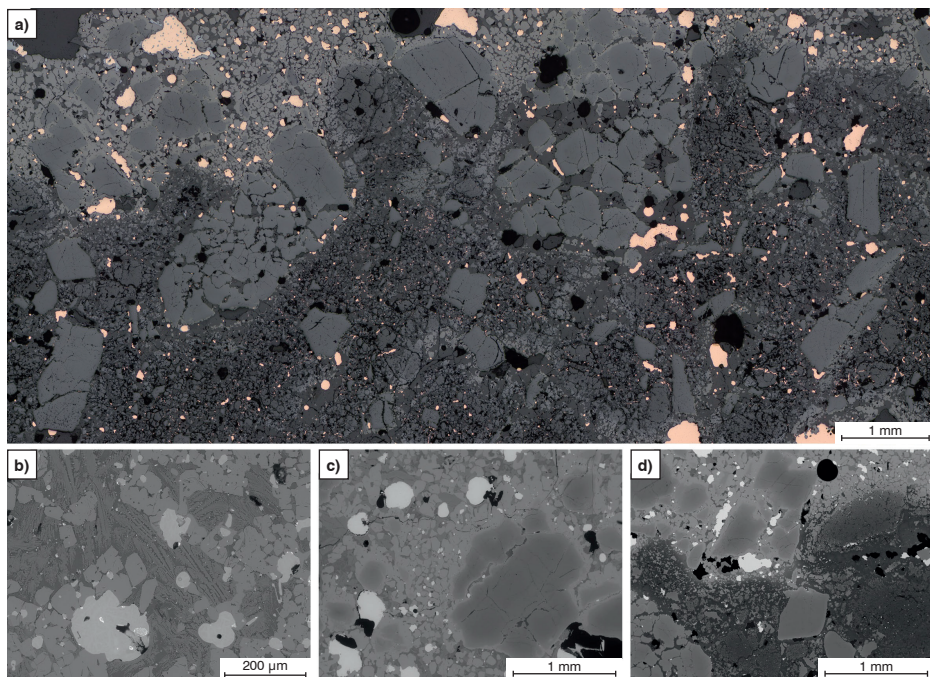


Figure 6a to d: Sample from Hettstedt. a) Overview of the transition area slag/furnace lining, LOM; b–d) detail images of the transition area, SEM.

Bild 6a bis d: Probe aus Hettstedt. a) Übersicht des Übergangsbereichs von Schlacke zur Ofenausmauerung, LOM; b–d) Detailaufnahmen des Übergangsbereichs, REM.

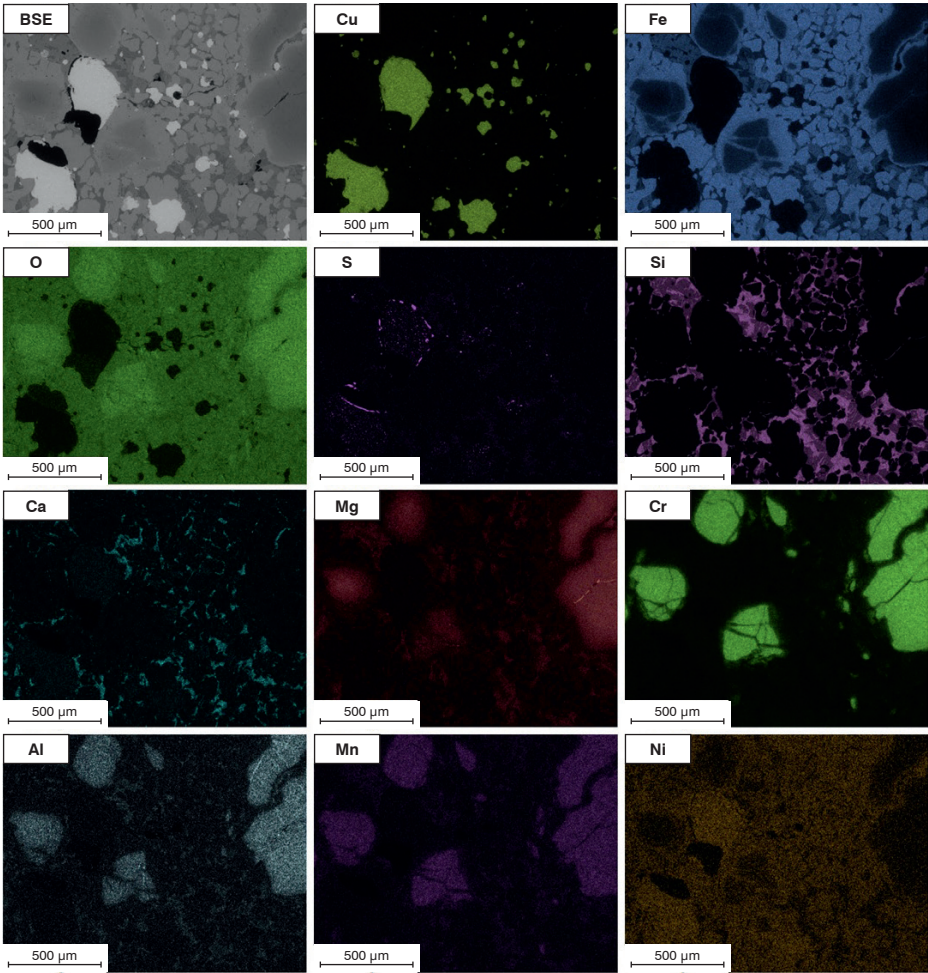


Figure 7: EDS element distribution from the furnace lining area of the Hettstedt sample.

Bild 7: EDX-Elementverteilung der Probe Hettstedt aus dem Bereich der Ofenausmauerung.

lic form, Fe in the form of FeO, and silicates occur in the interstices.

3.3 Sample from the August Bebel smelter

Malachite can be observed on the surface of the piece from the August Bebel smelter, (Figure 8a), while the cutting surface is character-

Chrommagnesia handelt [6]. Kupfer liegt metallisch vor, Fe als FeO und Silikate in den Zwischenräumen.

3.3 Probe August Bebel Hütte

Am Stück von der August Bebel Hütte ist an der Oberfläche Malachit zu sehen (Bild 8a) und an der Schnittfläche viele überwiegend

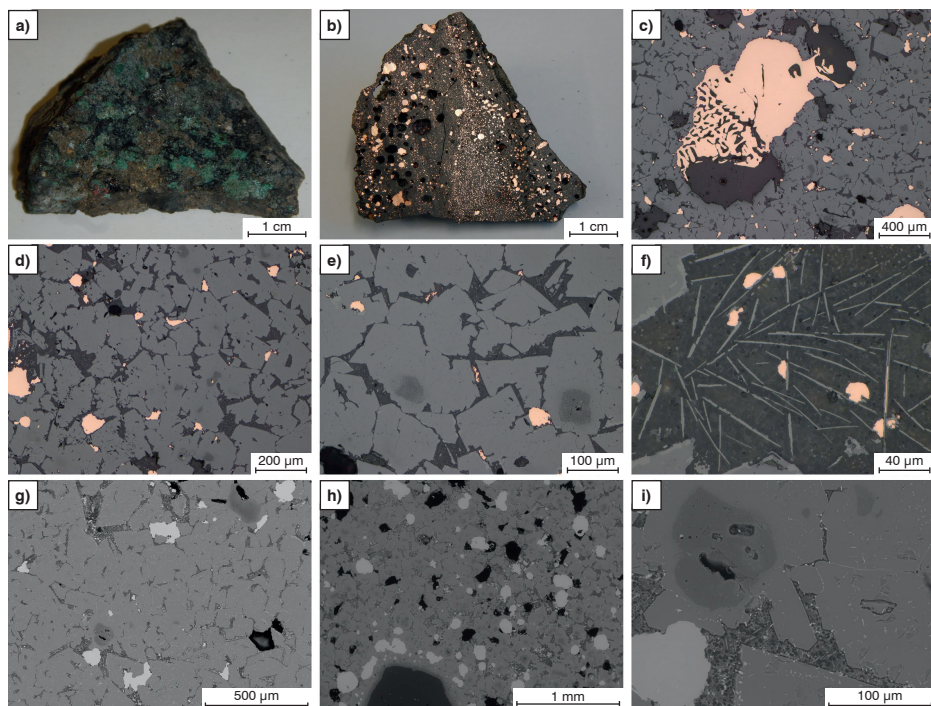


Figure 8a to i: Sample from the August Bebel smelter. a) Overall view; b) cutting surface; c–f) various slag microstructures, LOM; g–i) microstructural details in the SEM.

Bild 8a bis i: Probe von der August Bebel Hütte. a) Gesamtansicht, b) Schnittfläche, c–f) Verschiedene Schlackengefüge, LOM, g–i) Details der Gefüge im REM.

ized by numerous, mainly round Cu inclusions (Figure 8b). Areas with round pores have coarser Cu inclusions than the pore-free areas.

This sample is a slag mainly composed of FeO compounds and glass phase (Figures 8d–i) with large Cu inclusions (Figure 8c). The EDS element distribution (Figure 9), in turn, shows vast areas containing FeO and Cu occurring in its metallic form. The elements Ca, Si, and S occur together, indicating a mixture of CaS and silicate glass phase. The elements Sn and Zn measured in the XRF analysis could not be clearly localized. It can, however, be as-

runde Cu-Einschlüsse (Bild 8b). In Bereichen mit runden Poren sind die Cu Einschlüsse größer als in den porenfreien Bereichen.

Bei dieser Probe handelt es sich um eine Schlacke die neben großen Cu-Einschlüssen (Bild 8c) hauptsächlich aus Fe-O-Verbindungen und Glasphase besteht (Bild 8d–i). Die EDX-Elementverteilung (Bild 9) zeigt wiederum, dass Cu metallisch vorliegt und sehr große Bereiche mit Fe-O. Die Elemente Ca, Si und S treten gemeinsam auf, was auf eine Mischung aus CaS und silikatischer Glasphase hinweist. Die in der RFA gemessenen Elemente Sn und Zn konnten nicht eindeutig lokalisiert werden, jedoch ist zu vermuten, dass diese

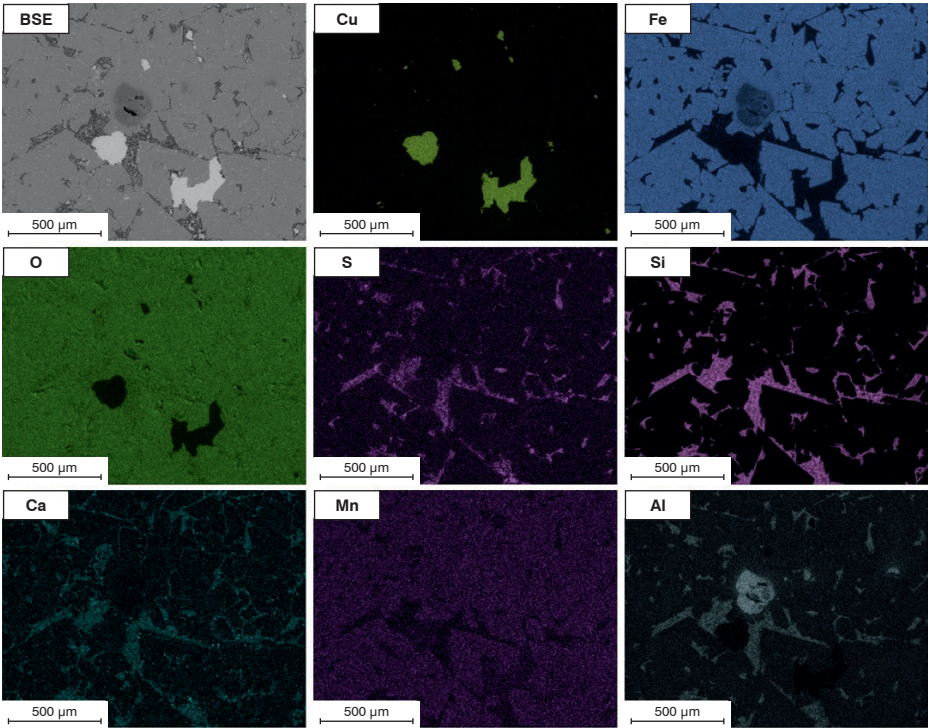


Figure 9: EDS element distribution of the slag from the sample from the August Bebel smelter.

Bild 9: EDX-Elementverteilung der Schlacke von Probe August Bebel Hütte.

sumed that the slag originates from the processing of bronze or brass [16].

4 Conclusions

The copper slate deposit in the Mansfeld copper mining area is vast. These valuable materials were extracted from the ore in various smelters. Literature shows that a wide variety of production processes were applied. An assignment of the examined samples to specific process steps is thus not possible.

The Krug smelter sample predominantly consists of Cu and Fe sulfides and can

Schlacke aus einer Bronze- oder Messingverarbeitung stammt [16].

4 Schlussfolgerungen

Die Kupferschieferlagerstätte des Mansfelder Kupferreviers ist sehr groß und in verschiedenen Hütten wurden die Wertstoffe aus dem Erz gewonnen. Die Literatur belegt, dass die unterschiedlichsten Produktionsverfahren eingesetzt wurden, was eine Zuordnung der untersuchten Proben zu bestimmten Verfahrensschritten nicht erlaubt.

Da die Probe Krughütte überwiegend aus Sulfiden von Cu und Fe besteht und daher als

therefore be referred to as copper matte. It thus probably originates from an earlier era of copper production.

The Hettstedt specimen is probably a fragment from a chromium magnesite furnace lining characterized by slag with metallic Cu inclusions still adhering to the piece.

The piece from the August Bebel smelter has the composition of an iron-rich silicate slag. Increased Sn and Zn concentrations suggest that it was formed during the processing of bronze or brass.

5 Acknowledgements

Our thanks go to Mr. Johannes Zbiral (TU Vienna) for the XRF measurements.

The authors would like to thank the TU Vienna Library for its financial support through its Open Access Funding Program.

References / Literatur

- [1] Knitzschke, G.: Geologischer Überblick zur Kupferschieferlagerstätte, In: MANSFELD Die Geschichte des Berg- und Hüttenwesens, Deutsches Bergbau-Museum, Band I (1999), pp. 11–40.
- [2] Langelüttich, H.-J.; Mirsch, R.; Knitzschke, G.; Roloff, P.; Spilker, M.; Wordelmann, H.: Bergbau auf Kupferschiefer. In: MANSFELD Die Geschichte des Berg- und Hüttenwesens, Deutsches Bergbau-Museum, Band II (1999), pp 41–204.
- [3] Eisenächer, W.: Das Mansfelder Kupferwesen am Ende des 18. Jahrhunderts. Schriftenreihe des Mansfeld-Museums (1996), pp. 15–35.
- [4] Eisenächer, W.; Klette, W.; Prohl, H.: Vom Kupferschiefer zum Metall – Die Verhüttung. In: MANSFELD Die Geschichte des Berg- und Hüttenwesens, Deutsches Bergbau-Museum, Band III (1999), pp. 205–359.
- [5] Hentze, E.: Sintern, Schmelzen und Verblasen sulfidischer Erze und Hüttenprodukte, Julius Springer in Berlin 1929.
DOI:10.1007/978-3-642-99398-5

Kupferstein anzusprechen ist, wird sie wohl aus einem früheren Stadium der Kupferproduktion stammen.

Bei dem Stück aus Hettstedt dürfte es sich um eine Ofenausmauerung aus Chrommagnesit handeln, an der noch Schlacke mit metallischen Cu-Einschlüssen anhaftet.

Das Stück von der August Bebel Hütte hat die Zusammensetzung einer eisenreichen Silikatschlacke, wobei die erhöhten Konzentrationen an Sn und Zn die Entstehung bei der Bronze- oder Messingverarbeitung nahelegen.

5 Danksagung

Unser Dank gilt Herrn Johannes Zbiral (TU Wien) für die durchgeführten RFA Messungen.

Die Autoren danken der TU Wien Bibliothek für die finanzielle Unterstützung durch ihr Open-Access-Förderprogramm.

- [6] Elstner, I.: Feuerfeste Werkstoffe. In: Salmang, H.; Scholze, H.: Keramik, 7. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [7] Bastian Asmus, B.: Medieval Copper Smelting in the Harz Mountains, Germany. Montanregion Harz, Bd 10, Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum, Nr 191 (2012).
- [8] Waldner, P.: The High-Temperature Cu-Fe-S System: Thermodynamic Analysis and Prediction of the Liquid–Solid Phase Range. J. Phase Equilib. Diffus. 43 (2022), pp. 495–510.
DOI:10.1007/s11669-022-00988-z.
- [9] Haubner, R.: Die prähistorische Kupfermetallurgie – allgemeine Betrachtungen, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 166 (2021), pp. 343–351.
DOI:10.1007/s00501-020-01056-0.
- [10] Holleman, A. F.; Wiberg, E.; Wiberg N.: Lehrbuch der Anorganischen Chemie. 102. Auflage. Walter de Gruyter, Berlin (2007), p. 1244.
DOI:10.1515/9783110206845

- [11] Warr, L. N.: IMA–CNMNC approved mineral symbols, *Mineralogical Magazine* 85 (2021), pp. 291–320.
DOI:10.1180/mgm.2021.43.
- [12] Haubner, R.; Strobl S.: Slag investigations from Bronze Age copper smelting sites. *Materials Science Forum*, 891 (2017), pp. 608–612.
DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.891.608
- [13] Haubner, R.; Strobl S.: Examination of Different Slags as By-Products of Late Bronze Age Copper Metallurgy. *Pract. Metallogr.* 55 (2018), pp. 86–96.
DOI:10.3139/147.110492
- [14] Haubner, R.; Strobl S.: Slags from Bronze Age copper production in Acqua Fredda. *Pract. Metallogr.* 59 (2022), pp. 720–731.
DOI:10.1515/pm-2022-1003.
- [15] Haubner, R.; Strobl, S.: Slag from Modern Copper Production Found in Bergwerk, Burgenland, Austria. *Solid State Phenomena* 341 (2023), pp. 11–16.
DOI:10.4028/p-4zdd71
- [16] Haubner, R.; Strobl, S.; Trebsche, P.: Materialographic investigations of plate slags from the Late Bronze Age copper production site of Prigglitz-Gasteil (Lower Austria). *Journal of Archaeological Science: Reports*. 48 (2023), p. 103838.
DOI:10.1016/j.jasrep.2023.103838

Bibliography

DOI 10.1515/pm-2024-0057

Pract. Metallogr. 61 (2024) 9-10; page 575-588

Open Access. © 2024 the author(s),

published by De Gruyter. 

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License.

ISSN 0032-678X · e-ISSN 2195-8599

Heinz- Hubert Cloeren



was born in 1961. He started his career as a material tester in a steel mill and then specialized in metallography. Since 2004 he is owner and managing director of Cloeren Technology GmbH with the focus on product development,

devices for materialographic sample preparation, consumables, contract materialography and damage analysis.

He is also Lecturer at the advanced training seminar of the DGM and author of various publications and of the reference book "Materialographic preparation methods". Last but not least, he is also interested in studying archaeological artifacts.

Suanne Strobl



is working as a scientific officer at the Institute of Chemical Technologies and Analytics (TU-Wien) and is teaching supervisor of metallography. She studied chemistry and her doctoral thesis was about sintered steels.