

**Archäometallurgische Studien zur bronzezeitlichen
Kupferverhüttungstechnologie am
Kupferschmelzplatz S1 in der Eisenerzer Ramsau
(Steiermark, Österreich)**

Dissertation

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Eberhard Karls Universität Tübingen
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat.)

vorgelegt von
Dipl.-Arch. Steffen Kraus
aus Dresden

Tübingen
2012

Tag der mündlichen Qualifikation:

29.04.2013

Dekan:

Prof. Dr. Wolfgang Rosenstiel

1. Berichterstatter:

Prof. Dr. Ernst Pernicka

2. Berichterstatter:

Prof. Dr. Martin Bartelheim

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mich bei der Anfertigung der vorliegenden Arbeit unterstützten. Zuerst möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Ernst Pernicka für die Anregung und Betreuung dieses Dissertationsvorhabens danken. Prof. Dr. Martin Bartelheim danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens. Für die Bereitstellung des Probenmaterials danke ich Dr. Susanne Klemm, der Leiterin des interdisziplinären Projekts „Die Konstruktion der ostalpinen Kupferhütte“ (FWF P21242-G19), welches vom Österreichischen Wissenschaftsfonds (FWF) gefördert wurde und an der Österreichischen Akademie der Wissenschaften in Wien, Institut OREA, Abteilung Europa (vormals Prähistorische Kommission) beheimatet ist.

Für die Durchführung der Röntgenfluoreszenzanalysen und der Unterstützung bei der Auswertung der Ergebnisse möchte ich mich bei Dr. Heinrich Taubald (Universität Tübingen) und Dr. Hans-Peter Meyer (Universität Heidelberg) bedanken. Außerdem danke ich Dr. Christoph Berthold (Universität Tübingen) für die röntgendiffraktometrischen Untersuchungen. Für die Durchführung der mößbauerspektroskopischen Analysen und die Hilfe bei der Auswertung der Spektren bin ich Dr. Christian Schröder (Universität Tübingen) dankbar. Andreas Wagner (Wien) danke ich für die Herstellung der Dünnschliffe. Ebenfalls danken möchte ich Dr. Thorsten Schifer (Mannheim) für die Neutronenaktivierungsanalysen und Dipl.-Chem. Bernd Höppner (Mannheim) für die Bleisotopenanalysen.

In besonderem Maße dankbar bin ich Sandra Pagacs und Dipl.-Arch. Nicole Lockhoff, mit denen ich verschiedene Abschnitte der vorliegenden Arbeit in unzähligen Gesprächen diskutieren konnte und die sich die mühselige Aufgabe des Korrekturlesens auf sich genommen haben.

Mein größter Dank gilt schließlich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mich stets unterstützten und ermutigten. Ihnen sei die Arbeit gewidmet.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xi
1. Einleitung	1
2. Geologischer Überblick	3
2.1. Einleitung	3
2.2. Die Geologie der nördlichen Grauwackenzone	3
2.2.1. Die westliche Grauwackenzone	4
2.2.2. Die östliche Grauwackenzone	5
2.2.2.1. Veitscher Decke	6
2.2.2.2. Silbersberg Decke	7
2.2.2.3. Kaintaleck Decke	7
2.2.2.4. Norische Decke	7
2.3. Die Kupfervererzungen der nördlichen Grauwackenzone	9
2.3.1. Die Kupferlagerstätten der westlichen Grauwackenzone	12
2.3.1.1. Fahlerzbezirk Schwaz/Brixlegg	12
2.3.1.2. Kupfererzbezirk Röhrerbühel/Kitzbühel	12
2.3.1.3. Kupfererz-(Magnesit-)Bezirk Hohe-Salve-Einheit	12
2.3.1.4. Kupfer-Eisenerzbezirk Jochberg-Einheit	12
2.3.1.5. Polymetallischer Cu-Ni-Co-Hg-Ag-Bezirk Leogang	13
2.3.1.6. Kupfererzbezirk Mitterberg – Mühlbach – Larzenbach	13
2.3.1.7. Kieserzbezirk Zell/See – Radstadt – Mandling	13
2.3.2. Die Kupferlagerstätten der östlichen Grauwackenzone	14
2.3.2.1. Eisen-(Kupfer-)Erzbezirk Norische Decke	14
2.3.2.2. Kupferkies- und Fahlerzvererzungen in den Eisenerzer Alpen	14

3. Forschungsgeschichte	17
3.1. Montanarchäologie in den Eisenerzer Alpen	17
3.2. Stand der archäometallurgischen Forschung zur prähistorischen Kupferge- winnung in den Ostalpen	19
3.2.1. Einleitung	19
3.2.2. Die prähistorische Verhüttung sulfidischer Kupfererze in den Ostalpen	20
3.2.2.1. Die metallurgischen Grundlagen des Verhüttungsprozesses	20
3.2.2.2. Theorien zur prähistorischen Verhüttung sulfidischer Kup- fererze in den Ostalpen	23
3.2.3. Archäometallurgische Forschung in den Eisenerzer Alpen	26
4. Zur Archäologie des Kupferschmelzplatzes S1	35
5. Ziele der archäometallurgischen Untersuchungen	39
6. Methodik	41
6.1. Probenahme	41
6.2. Probenaufbereitung	43
6.3. Analytische Verfahren	44
6.3.1. Polarisationsoptische Untersuchungen	44
6.3.2. Rasterelektronenmikroskop (REM) und energiedispersive Röntgen- mikroanalyse (EDX)	44
6.3.3. Röntgendiffraktometrie	45
6.3.4. Mößbauer-Spektroskopie	45
6.3.5. Röntgenfluoreszenzanalyse	45
6.3.6. Neutronenaktivierungsanalyse (NAA)	46
6.3.7. Bleisotopenverhältnisse	46
7. Die archäometallurgischen Funde	49
7.1. Die Kupferverhüttungsschlacken	49
7.1.1. Schlackentypologie	49
7.1.2. Gefüge und Phasenbestand	54
7.1.3. Chemische Zusammensetzung der Schlacken	59
7.1.4. Mineralchemische Zusammensetzung der Schlackenphasen	62
7.1.5. Mößbauerspektroskopische Untersuchungen	71
7.1.6. Abschätzung der Reduktions-/Oxidationsverhältnisse	72
7.2. Die Verschlackung der Ofenwände	75
7.2.1. Makroskopische Beurteilung	75

7.2.2. Lichtmikroskopische und mikroanalytische Untersuchungen	77
7.2.3. Die chemische Zusammensetzung der Ofenwandverschlackung	79
7.3. Die Metallfunde	81
7.4. Die Erzfunde	83
7.5. Die Lehmproben	84
8. Diskussion der Ergebnisse	87
8.1. Die Schlacken aus den Röstbetten	87
8.2. Die Ofenwandverschlackungen aus den Schmelzöfen	89
8.3. Die Schlacken von den Ofenvorplätzen und den Halden	92
8.3.1. Die Schlacken der Ofenvorplätze	93
8.3.2. Halde 1	95
8.3.3. Halde 2	97
8.3.4. Halde 3	98
8.3.5. Vergleich der Schlacken von den Ofenvorplätzen und den Halden	99
8.4. Die Schlacken der verschiedenen Nutzungsphasen im Westteil des Kupfer- schmelzplatzes S1	102
9. Die bronzezeitliche Kupfererzverhüttung am Kupferschmelzplatz S1	105
9.1. Die Rohstoffbasis	105
9.2. Der Verhüttungsprozess am Kupferschmelzplatz S1	108
9.3. Überlegungen zur bronzezeitlichen Kupferverhüttung in den Ostalpen	111
9.3.1. Der spätbronzezeitliche Schmelzplatz „Versunkene Kirche“ bei Trie- ben, Steiermark	112
9.3.2. Der mittelbronzezeitliche Schmelzplatz Hechenberg bei Jochberg, Tirol	113
9.3.3. Der mittel- bis spätbronzezeitliche Schmelzplatz Mühlbach/Bren- nerwald, Salzburg	113
9.3.4. Der spätbronzezeitliche Verhüttungsplatz von Acqua Fredda, Tren- tino, Italien	114
10. Zusammenfassung	117
11. Summary	123
Literaturverzeichnis	127
Anhang	149

A. Tabellen	151
B. Spektren	221

Abbildungsverzeichnis

2.1. Geologische Übersichtskarte der Ostalpen.	4
2.2. Großtektonische Gliederung der westlichen Grauwackenzone.	5
2.3. Großtektonische Gliederung der östlichen Grauwackenzone.	5
2.4. Stratigraphische Gliederung der östlichen Grauwackenzone.	6
2.5. Stratigraphische Gliederung der Norischen Decke.	8
3.1. Grabungssituation am bronzezeitlichen Kupferschmelzplatz „Griesmaier“. .	17
3.2. Doppelofenanlage des Fundplatzes „Versunkene Kirche“.	18
3.3. Der Kupferschmelzplatz S1 in der Eisenerzer Ramsau.	19
3.4. Schematische Darstellung des Systems Cu-Fe-S.	22
3.5. Schematische Darstellung der verschiedenen Theorien zur bronzezeitlichen Kupfergewinnung.	24
4.1. Der Kupferschmelzplatz S1 in der Eisenerzer Ramsau.	35
4.2. Übersichtsplan des Kupferschmelzplatzes S1.	36
4.3. Die Röstbetten 4, 7 und 8.	37
4.4. Die Schmelzöfen 1 und 2	37
4.5. Die Schlackenhalde 1.	38
7.1. Typische Laufsclacken vom Kupferschmelzplatz S1.	50
7.2. Typische Blasenschlacken vom Kupferschmelzplatz S1.	51
7.3. Typische Plattenschlacken vom Kupferschmelzplatz S1.	52
7.4. Typische Schlacken vom Typ A+B vom Kupferschmelzplatz S1.	53
7.5. Mikrogefüge einer Laufsclacke.	55
7.6. Magnetitagglomerat in einer fayalitischen Laufsclacke.	55
7.7. Mikrogefüge einer Blasenschlacke.	56
7.8. Cu/Fe-Sulfide in einem unaufgeschmolzenen Quarzbruchstück.	56
7.9. Mikrogefüge einer Plattenschlacke.	57
7.10. Mikrogefüge des oberen Bereichs einer Plattenschlacke.	57
7.11. Mikrogefüge des Laufsclackenanteils einer Schlacke vom Typ A+B.	58
7.12. Mikrogefüge des Blasenschlackenanteils einer Schlacke vom Typ A+B.	58
7.13. Sekundär gebildeter Malachit in einem Hohlraum.	58

7.14. Cu/Fe-Sulfideinschluss in einer Schlacke vom Typ A+B.	58
7.15. Darstellung der Pauschalanalysen.	60
7.16. Darstellung der EDX-Analysen von vollständig aufgeschmolzenen Berei- chen verschiedener Schlackentypen.	61
7.17. Mischkristallreihen der häufigsten Olivine.	62
7.18. Darstellung der Zusammensetzung von Olivinen verschiedener Schlacken- typen.	63
7.19. Phasendiagramm des Systems Fayalit-Larnit.	64
7.20. EDX-Linienprofil durch einen zonierten Olivin.	64
7.21. Darstellung der Zusammensetzung von Klinopyroxenen verschiedener Schlack- entypen.	65
7.22. Darstellung der Mittelwerte der Glasanalysen verschiedener Schlackentypen.	66
7.23. Auflichtaufnahme von feinkörnigem Magnetit in einer Schlacke vom Typ A+B.	67
7.24. Magnetitagglomerat in einer Blasenschlacke.	67
7.25. Delafossitnadeln neben kupferhaltigem Magnetit.	68
7.26. Malachiteinschluss umgeben von Cuprit.	68
7.27. Detailaufnahme eines Kupfersteins.	69
7.28. Kupferreiche Kupfersteine in einer Plattenschlacke.	69
7.29. Darstellung der Kupfersteinanalysen im System Cu-Fe-S.	70
7.30. Mößbauerspektrum vom Typ 1.	72
7.31. Mößbauerspektrum vom Typ 2.	72
7.32. Das System FeO-Fe ₂ O ₃ -SiO ₂	73
7.33. Abschätzung der Sauerstoffpartialdruck- und Temperaturbereiche der ei- senreichen Kupferschlacken.	74
7.34. Verschlackte Ofensteine vom Kupferschmelzplatz S1.	75
7.35. Verschlackter Ofenlehm.	76
7.36. Schlackenhautprobe.	76
7.37. Mikrogefüge der Verschlackung eines Ofensteins.	77
7.38. Mikrogefüge der Verschlackung eines Ofenlehms im Aufficht.	77
7.39. Delafossitkristalle einer Ofenwandverschlackung.	78
7.40. Metallische Kupfertropfen einer Ofenwandverschlackung.	78
7.41. Vereinfachte Darstellung von Stabilitätsdiagrammen im System Cu-Fe-O bei 1000 °C und 1200 °C.	78
7.42. Darstellung der Pauschalanalysen der Ofenwandverschlackungen.	80
7.43. Darstellung der EDX-Analysen der vollständig aufgeschmolzenen Teilbe- reiche der Ofenwandverschlackungen.	81

7.44. Metallfunde vom Kupferschmelzplatz S1.	82
7.45. Darstellung der Spurenelementgehalte der untersuchten Metallartefakte. . .	82
7.46. Mikrogefüge des Metallfragments aus Röstbett 9.	83
7.47. Mikrogefüge des Metallfragments von Halde 3.	83
7.48. Quarzit mit Chalkopyritvererzung.	84
7.49. Pyrit umschlossen von Chalkopyrit.	84
7.50. Lehmproben vom Kupferschmelzplatz S1.	85
7.51. Darstellung der Spurenelementgehalte der untersuchten Lehmproben aus den Röstbetten und Schmelzöfen.	85
8.1. Vergleich der Pauschalanalysen der Schlacken aus den Röstbetten.	87
8.2. Vergleich ausgewählter Spurenelemente der Schlacken aus den Röstbetten.	88
8.3. Darstellung der Zusammensetzung der Sulfideinschlüsse in den Schlacken aus den Röstbetten.	89
8.4. Vergleich der Pauschalanalysen der Ofenwandverschlackungen.	90
8.5. Vergleich ausgewählter Spurenelemente der Ofenwandverschlackungen der Schmelzöfen.	91
8.6. Darstellung der Zusammensetzung der Sulfideinschlüsse in den Ofenwand- verschlackungen der Schmelzöfen.	92
8.7. Vergleich der Pauschalanalysen der Schlacken von den Ofenvorplätzen der Doppelofenanlagen.	93
8.8. Vergleich ausgewählter Spurenelemente der Schlacken von den Ofenvorplät- zen der Doppelofenanlagen.	93
8.9. Darstellung der Zusammensetzung der Sulfideinschlüsse in den Schlacken von den Vorplätzen der Doppelofenanlagen.	94
8.10. Vergleich der Pauschalanalysen der Schlacken von Halde 1.	95
8.11. Vergleich ausgewählter Spurenelemente der Schlacken von Halde 1.	96
8.12. Vergleich der Pauschalanalysen der Schlacken von Halde 2.	97
8.13. Vergleich ausgewählter Spurenelemente der Schlacken von Halde 2.	98
8.14. Vergleich der Pauschalanalysen der Schlacken von Halde 3.	98
8.15. Vergleich ausgewählter Spurenelemente der Schlacken von Halde 3.	99
8.16. Vergleich der Pauschalanalysen der Schlacken der Schlackenhalden.	100
8.17. Vergleich ausgewählter Spurenelemente der Schlacken der Schlackenhalden.	100
8.18. Darstellung der Zusammensetzung der Sulfideinschlüsse in den Schlacken der Schlackenhalden.	101
8.19. Darstellung der Hauptkomponenten der Schlacken der verschiedenen Nut- zungsphasen des Westteils des Kupferschmelzplatzes S1.	103

8.20. Darstellung der Zusammensetzung der Sulfideinschlüsse in den Schlacken verschiedener Nutzungsphasen des Kupferschmelzplatz S1.	104
9.1. Vergleich der Zusammensetzung der verschiedenen Schlackentypen mit den Erzen vom Paradeisstollen und dem Erzberg.	106
9.2. Bleiisotopenverhältnisse von Schlacken, Erzen und Metallfunden vom Kupferschmelzplatz S1 im Vergleich mit Erzen vom Mitterberg und der Region Schwaz-Brixlegg.	107

Tabellenverzeichnis

2.1. Auflistung der wichtigsten Kupfererze sowie der im Text verwendeten Minerale.	9
3.1. Übersicht über bisherige für die Archäometallurgie in den Eisenerzer Alpen relevanten Untersuchungen	27

1. Einleitung

Bereits seit dem Paläolithikum wurden die Alpen immer wieder zum Zwecke der Rohstoffgewinnung für die Herstellung von Waffen und Geräten aufgesucht. Im ausgehenden Paläolithikum erfolgte der Abbau von Feuerstein bereits bergmännisch. Spätestens seit der Bronzezeit, wahrscheinlich aber schon seit der Kupferzeit, wurden zahlreiche Kupfererzlagertstätten der nördlichen Grauwackenzone abgebaut. Dies wurde bereits im 19. Jahrhundert erkannt, als durch den modernen Bergbau vermehrt Hinweise auf vorgeschichtliche Bergbautätigkeiten entdeckt wurden. Als Pioniere der Untersuchung des prähistorischen Bergbaus sind M. Much (1902), E. Preuschen und R. Pittioni zu nennen (Preuschen & Pittioni 1955). Früh entwickelte sich auch eine Diskussion um die Rekonstruktion der prähistorischen Verhüttungsmethoden (Much 1902; Klose 1918; Kyrle 1920; Zschocke & Preuschen 1932).

Denn es stellte sich heraus, dass die bronzezeitlichen Kupferverhüttungsplätze der Ostalpen einen auffallend einheitlichen Aufbau zeigen und dass auf diesen Plätzen sulfidische Erze, bevorzugt Kupferkies und Fahlerz, verhüttet wurden. Der einheitliche Aufbau sowie die Nutzung ähnlicher Rohstoffe lassen einen einheitlichen Prozessablauf vermuten, der die Frage nach einer zentralen Organisation im Gebiet der Ostalpen aufwirft.

Zu einem der besonders intensiv untersuchten Fundorte der prähistorischen Kupferverhüttung in den Ostalpen zählt der mittelbronzezeitliche Kupferschmelzplatz S1 in der Eisenerzer Ramsau (Steiermark), wo bei archäologischen Grabungen zehn Röstbetten, sechs Doppelofenanlagen sowie mehrere Schlackenhalde mit etwa 1,5 t Schlacken freigelegt wurden. Gefördert vom österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) wurden im Rahmen des interdisziplinären Projekts „Die Konstruktion der ostalpinen Kupferhütte“ alle Materialien, die beim Hüttenprozess eine Rolle spielen, untersucht, um das prähistorische Verfahren der Kupfererzverhüttung an diesem Fundplatz zu rekonstruieren. Dazu zählen Ausgangsstoffe wie Erz, Brennmaterial und Zuschlagstoffe sowie Schmelzprodukte, Schlacken und thermisch belastete Baumaterialien des Schmelzplatzes. Neben der Darstellung der Ergebnisse naturwissenschaftlicher Untersuchungen wurden auch Vergleiche mit anderen bronzezeitlichen Fundplätzen der Ostalpen angestellt.

Die nach ihrer äußeren Typologie unterscheidbaren Schlackentypen wurden in den bisher vorgeschlagenen Modellen für den ostalpinen Verhüttungsprozess, basierend auf der

Übertragung moderner oder historischer Verfahren, verschiedenen Prozessstufen zugeordnet. Daher galt es, die bestehenden Theorien zur bronzezeitlichen Kupfererzverhüttung mit naturwissenschaftlichen Methoden zu überprüfen. Dabei war es wichtig festzustellen, in welchem Maße sich die modernen bzw. historischen Verfahren zur Verhüttung sulfidischer Kupfererze auf die prähistorischen Funde übertragen lassen und ob eine Zuordnung der Schlacken zu unterschiedlichen Prozessstufen zweifelsfrei möglich ist. Durch chemische und mineralogische Analysen der aufgefundenen Erze, Schlacken und des verschlackten Ofenbaumaterials sollten in Verbindung mit mößbauerspektroskopischen Untersuchungen an einigen Schlacken differenzierte Informationen über die verwendete Rohstoffbasis, eventuelle Zuschläge und mögliche Zwischen- und Endprodukte sowie über wichtige Prozessparameter wie Ofentemperatur und Gasatmosphäre gewonnen werden.

2. Geologischer Überblick

2.1. Einleitung

Der Kupferschmelzplatz S1 befindet sich am westlichen Talschluß der Eisenerzer Ramsau, einem Hochtal im Nordosten der Eisenerzer Alpen. Die Eisenerzer Alpen bilden den südlichen Teil der Ennstaler Alpen, einer Gebirgsgruppe der nördlichen Kalkalpen in der Steiermark. Im Gegensatz zu den Ennstaler Alpen gehören die Eisenerzer Alpen jedoch zur nördlichen Grauwackenzone. Im Norden werden sie durch den Radmer- und Johnsbachgraben und die Kaiserau von den Gesäusebergen getrennt. Im Osten werden sie durch das Erzbach- und das Vorderbergertal begrenzt und reichen im Süden bis an die Mur. Die Westgrenze verläuft entlang des Palten- und des Liesingtales.

Das Hochtal der Eisenerzer Ramsau wird überwiegend von paläozoischen Gesteinsformationen der nördlichen Grauwackenzone umschlossen. Nur der nordwestliche Talabschluss wird durch mesozoische Gesteine der nördlichen Kalkalpen gebildet (Proske 2003, 163). Vor allem die polymetallischen Sulfidmineralisationen der nördlichen Grauwackenzone (hauptsächlich Kupferkies und Fahlerz) spielten für den prähistorischen Bergbau eine bedeutende Rolle. Sie sind meist mit Schwarzschiefern verknüpft, die entlang des Ramsaubaches in unterschiedlicher Mächtigkeit auftreten.

2.2. Die Geologie der nördlichen Grauwackenzone

Die Bezeichnung Grauwackenzone geht auf den Begriff „Grauwackenformation“ zurück. Bereits zu Beginn des 19. Jahrhunderts wurde er verwendet und auf die Bedeutung dieser Zone für den Bergbau hingewiesen (Schönlaub 1980, 265). Die Stratigraphie setzt mit dem Oberordovizium ein und reicht bis in das Oberkarbon. Demnach wird die Nördliche Grauwackenzone dem oberostalpinen Paläozoikum zugerechnet. Nach Ebner (1997, 173) bildet sie, bei jedoch meist tektonisch überprägtem Verband, die primäre Basis der Kalkalpen. Bei einer durchschnittlichen Breite von 10 km, maximal ca. 25 km, erstreckt sie sich entlang des Südrandes der nördlichen Kalkalpen von Schwaz/Tirol im Westen bis nahe Ternitz im Osten (etwa 450 km). Bei Ternitz taucht sie unter die Bedeckung des Wiener Beckens. Im Süden liegt sie mit tektonischem Kontakt dem Kristallin der Zentralalpen auf (Abb. 2.1).

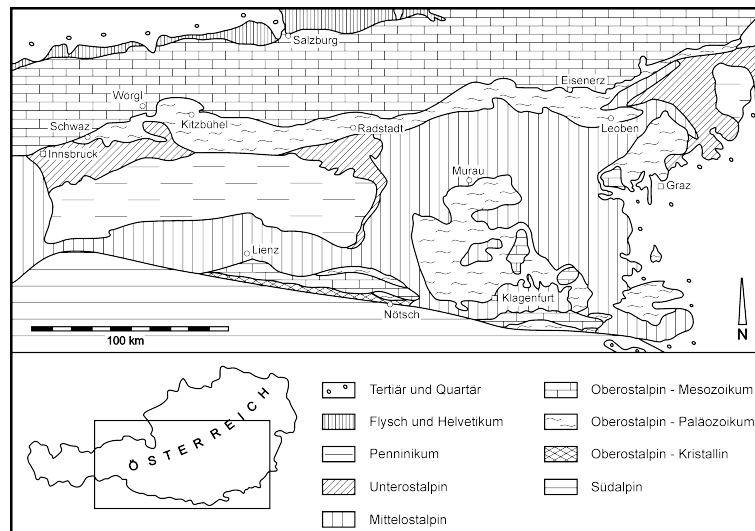


Abb. 2.1.: Geologische Übersichtskarte der Ostalpen (modifiziert nach Heinisch et al. 1988, 269).

Im Unterschied zu den nördlichen Kalkalpen bildet die nördliche Grauwackenzone morphologisch ein sanft gewelltes, größtenteils dicht bewaldetes Hügel­land. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die altpaläozoischen Schiefer und Grauwacken der Abtragung einen geringeren Widerstand als die Kalke entgegensetzen (Metz 1953, 8; Bögel & Schmidt 1976, 27; Schlaegel-Blaut 1990, 8).

Aufgrund der geographischen Gegebenheiten wird die nördliche Grauwackenzone in zwei Regionen geteilt: in die westliche und die östliche (steirische) Grauwackenzone (Gwinner 1978, 233; Möbus 1997, 161; Hubmann et al. 2006, 51–53). Diese Gebiete werden regional weiter untergliedert: Die westliche Grauwackenzone gliedert sich in die Flaurlinger Quarzphyllite, die Kitzbühler Alpen und den Raum von der Zeller Furche bis Radstadt. Die östliche Grauwackenzone gliedert sich in das Ennstal, die Eisenerzer Alpen mit dem Palten-Liesingtal sowie den Raum zwischen Leoben und Ternitz (Schönlaub 1980, 265–267).

2.2.1. Die westliche Grauwackenzone

Der westliche Abschnitt der Grauwackenzone (Abb. 2.2) ist im Gegensatz zur breiten Ausdehnung im Osten ein schmaler, mehrfach unterbrochener Streifen post-variszischer Sedimente, vermutlich altpaläozoischer Phyllit (Landecker Quarzphyllite, Flaurlinger Quarzphyllite) und der Phyllitgneiszone (Feldspatknottengneise, Schiefergneise bis Glimmerschiefer), der dem Südrand der Kalkalpen vorgelagert ist (Schönlaub 1979, 78; Ebner 1997, 174).

Durch die intensive alpidische Tektonik (Bruchtektonik und Faltung) kam es hauptsächlich zur tektonischen Überprägung der geologischen Grenzen. So wird die Südgrenze

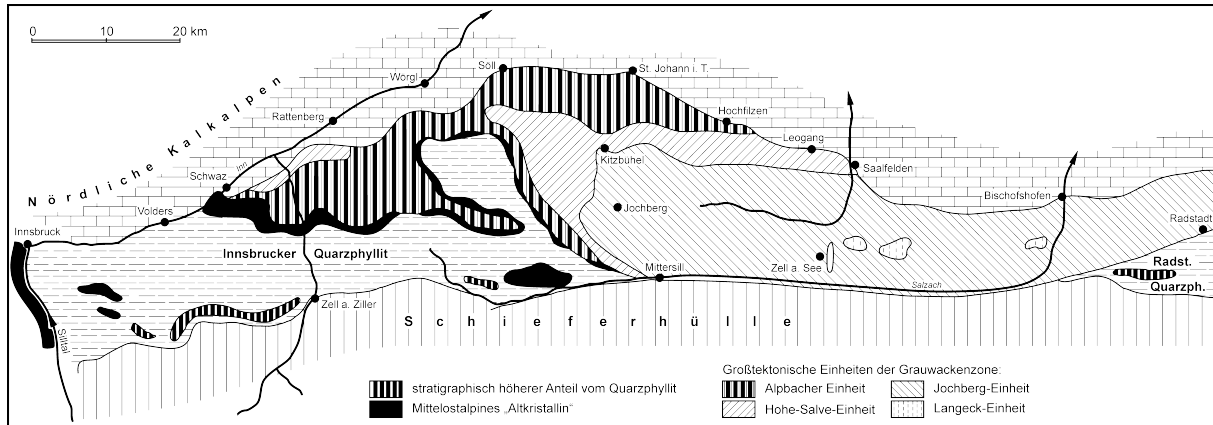


Abb. 2.2.: Großtektonische Gliederung der westlichen Grauwackenzone (modifiziert nach Schönlaub & Heinisch 1993, 415).

westlich von Zell am See durch Zunahme des alpidischen Metamorphosegrades, duktile Deformation und Schertektonik charakterisiert (Heinisch 1988, 409–410; Colins et al. 1980, 372) während sie östlich von Zell am See entlang der Tauern-Nordrandstörung von einer 1–3 km breiten Schuppenzone dominiert wird, die im Norden einen steilen Faltenbau aufweist (Ebner 1997, 176). Die Lagerstätten sind sowohl an bestimmte Faziesräume als auch an bestimmte tektonische Einheiten gebunden.

2.2.2. Die östliche Grauwackenzone

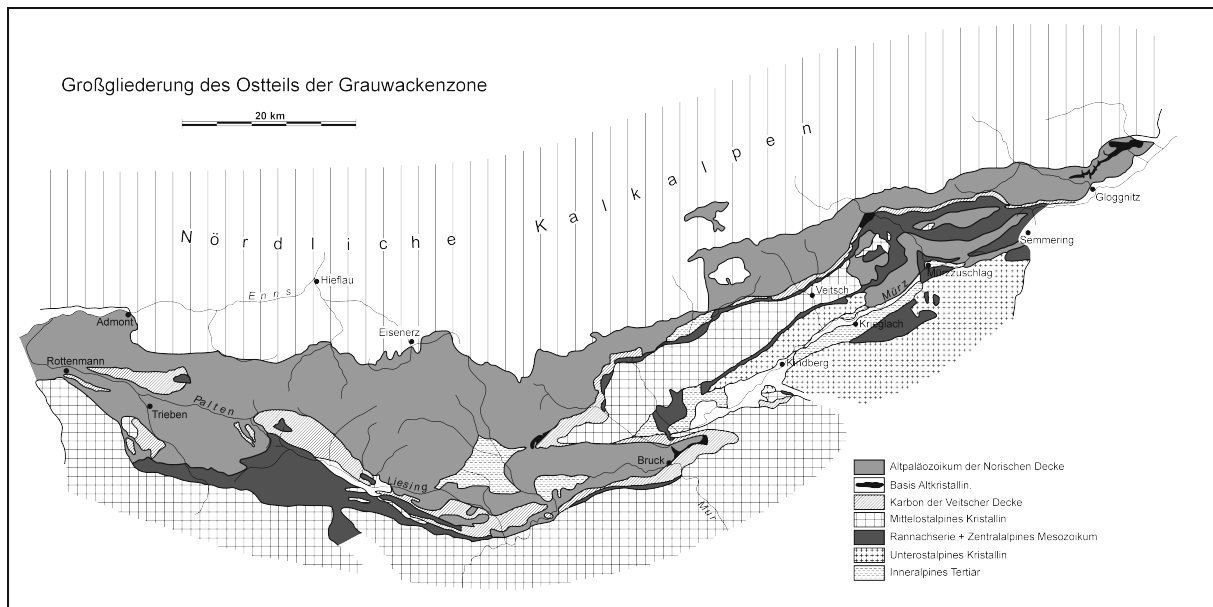


Abb. 2.3.: Großtektonische Gliederung der östlichen Grauwackenzone (modifiziert nach Schönlaub 1982, 404).

Im Unterschied zur westlichen Grauwackenzone tritt im östlichen Abschnitt eine intensive alpidische Schuppen-/Deckentektonik auf. In Abb. 2.3 ist die großtektonische Gliederung der östlichen Grauwackenzone dargestellt. Neubauer et al. (1994, 62) unterscheiden

dabei vier übereinanderliegende Einheiten (Abb. 2.4). Vom Liegenden zum Hangenden sind dies die Veitscher Decke, die Silbersberg Decke, die Kaintaleck Decke und die Norische Decke.

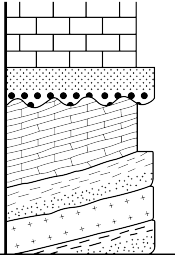
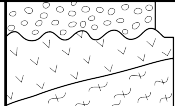
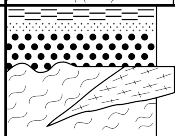
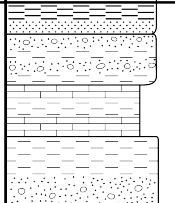
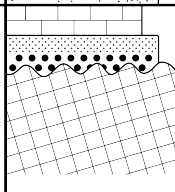
Tektonische Einheiten		Stratigraphische Einheiten	
Oberostalpin	Norische Decke	 <ul style="list-style-type: none"> Kalksteine und Dolomite (Anisium-Turonium) Sandsteine und Verrucano-Konglomerate (Permoskyth) Kalksteine und Dolomite (Devon - Oberkarbon) Schiefer und Sandsteine (Oberes Ordovizium - Unterdevon) Saure Metatuffe (Caradoc) Phyllite und Sandsteine (Ordovizium) 	<ul style="list-style-type: none"> Nördliche Kalkalpen Präbichl- und Werfener Schichten Radphyllit Blasseneck-Porphyrroid Gerichtsgabenformation
	Kaintaleck Decke	 <ul style="list-style-type: none"> Konglomerate mit Dominanz an Gneisbrocken Amphibolite und Glimmerschiefer (prävariszische Metamorphose) 	<ul style="list-style-type: none"> Kalwanger Konglomerate Kaintaleck Komplex
	Silbersberg Decke	 <ul style="list-style-type: none"> Phyllite, Ssandsteine und Verrucano Konglomerate (Permoskyth) Riebeckitgneis Quartzphyllite and Kalkphyllite (Altpaläozoikum) 	<ul style="list-style-type: none"> Silbersberg Konglomerate Gloggnitz - Riebeckitgneis Quarzphyllit
	Veitscher Decke	 <ul style="list-style-type: none"> Phyllite und Sandsteine (Permoskyth) Schiefer, Sandsteine und Konglomerate (Westfal A-C) Schiefer und Kalksteine (Frühes Visé - Namur) Schiefer, Sandsteine und Konglomerate (Frühes Visé) 	<ul style="list-style-type: none"> Graschnitz Formation Sunk Formation Triebenstein Formation Steilbachgraben Formation
Mittelostalpin	 <ul style="list-style-type: none"> Kalksteine, Sandsteine und Verrucano-Konglomerate (Perm - Mitteltrias) Amphibolite und Glimmerschiefer (variszischer Metamorphismus) 	<ul style="list-style-type: none"> Rannach Formation Rennfeld-Mugel-Komplex 	

Abb. 2.4.: Stratigraphische Gliederung der östlichen Grauwackenzone (modifiziert nach Neubauer et al. 1994, 70).

2.2.2.1. Veitscher Decke

Die Veitscher Decke wird in drei aufeinanderfolgende Schichten gegliedert, die den Altersbereich zwischen Visé bis Westfal A-C umfassen (Ratschbacher 1984, 423; Ratschbacher & Nievoll 1984, 456). Die Steilbachgraben-Formation wird durch graphitführende pelitische bis psammitische Metaklastika charakterisiert. Verteilt treten Einschaltungen von Karbonaten mit teils hypersalinarem Charakter (Dolomite, Magnesite) auf. Die darüberliegende Triebenstein-Formation ist eine Karbonatentwicklung aus lateral beständigen, gebankten, teilweise fossilführenden Kalkmarmoren mit Metapelitzwischenlagerungen. Örtlich gibt es massige, reine Kalkmarmorlinsen von größerer Mächtigkeit (Ratschbacher 1984, 428; Prochaska & Ebner 1988/89, 192; Ebner 1997, 178). Die abschließende, pflanzenführende

Sunk-Formation tritt als „coarsening upward“ Sequenz von überwiegend reichlich graphit-führenden Metapeliten bis -psephiten auf mit geringmächtigen Karbonateinschaltungen (Ratschbacher 1984, 426). Nur am Frauenberg östlich Bruck/Mur liegen über der Sunk-Formation Phyllite und rötliche Sandsteine (Permoskyth, Graschnitz-Formation) (Ebner 1997, 178).

2.2.2.2. Silbersberg Decke

Neubauer et al. (1994, 64-65) fassen in der Silbersberg Decke verschiedene Lithologien zusammen, die sich tektonisch von allen anderen liegenden und hangenden Formationen unterscheiden lassen. Dazu gehören alle Schichten unterhalb der metamorphen Kaintaleck Decke, die bereits von Cornelius (1952, 51–52), Lesko (1960, 6–39) und Nievoll (1984, 64–70) ausführlich behandelt wurden.

Im Liegenden treten altpaläozoische Phyllite und Kalkphyllite auf, denen bei Gloggnitz Riebeckitgneise eingeschaltet sind, deren Rb/Sr-Alter von 132 ± 12 Ma ein frühalpines metamorphoseereignis repräsentieren. Die Hauptgesteine der Silbersberg Decke bilden silbrig glänzende, grünlichgraue Quarzitphyllite mit dünnen Lagen saurer Metatuffe, Quarzbreccien und Konglomerate. Sie werden auch als metamorpher Alpiner Verrucano angesehen (Handler 1993, 595; Nowotny 2005, 330).

2.2.2.3. Kaintaleck Decke

Die Kaintaleck Decke tritt innerhalb der östlichen Grauwackenzone vom Kaintaleck (nord-nordöstlich von Leoben) bis Vöstenhof bei Gloggnitz unterhalb der Norischen Decke auf (Neubauer & Frisch 1993, 529; Ebner 1997, 180). Sie wird in drei unterschiedliche litho-tektonische Einheiten gegliedert, die in der Mächtigkeit 200 m nicht übersteigen.

Der Ritting Komplex besteht aus Granat-Zoisit-Amphiboliten (mit disseminierten Kupfermineralisationen) und Glimmerschiefer mit Einschlüssen von Serpentin (mit Chromit) und Marmor. Der Frauenberg Komplex umfasst verschiedene schuppenartige Einheiten aus Plagioklas-Amphiboliten, Paragneisen und Marmoren. Der Prieselbauer Komplex wird durch migmatische Para-Augen-Gneise und Glimmerschiefer mit Amphiboliteinschaltungen sowie konkordante und diskordante Aplitgänge charakterisiert (Neubauer et al. 1994, 67, 2002, 778).

2.2.2.4. Norische Decke

Die Norische Decke ist tektonisch die hangenste Einheit der östlichen Grauwackenzone. Abb. 2.5 zeigt die stratigraphische Gliederung, wobei das an der Basis eingezeichnete Kalwanger Gneiskonglomerat heute jedoch als Sedimentauflagerung auf die Kaintaleck

Decke angesehen und von der Norischen Decke abgetrennt wird (Loeschke et al. 1990, 351; Neubauer et al. 1994, 68–69; Ebner 1997, 181).

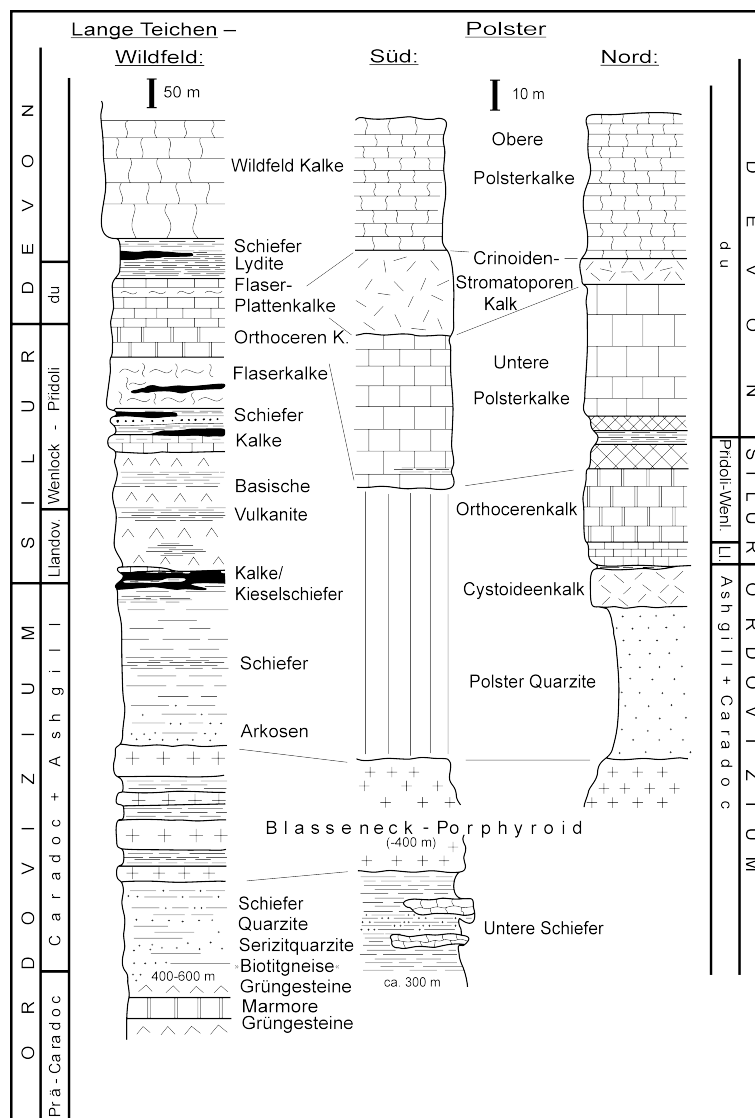


Abb. 2.5.: Stratigraphische Gliederung der Norischen Decke im Raum Eisenerz-Polster (nach Schönlaub 1979, 86).

Im Raum Eisenerz bildet die ordovizische Gerichstgrabenformation mit einer Mächtigkeit von 400–500 m den ältesten Teil der Norischen Decke. Sie besteht vorwiegend aus grauen bis hellgrauen phyllitischen Schiefen (feinschichtige Grauwackenschiefer), Serizitquarziten, Arkoseschiefern mit Chloritquarziteinlagerungen, streuglimmerführenden Sandsteinen mit Übergängen in Schiefer. Untergeordnet finden sich Grauwacken und schwarze kohlenstoffreiche Schiefer (Schönlaub 1982, 375). In den höheren Schichten sind bis zu 30 m mächtige, Conodonten führende Kalklinsen eingelagert (Flajs 1966, 192; Schönlaub 1980, 279; Neubauer et al. 1994, 69).

Der ignimbrische Blasseneck-Porphyrroid bildet einen ausgezeichneten, biostratigraphisch datierten Leithorizont des Caradoc/Ashgill und weist eine stark schwankende

Mächtigkeit von wenigen Metern bis zu 1500 m auf. Er besitzt eine rhyolithische/dazitische bis trachyandesitische Zusammensetzung (Schönlaub 1982, 379; Schönlaub & Heinisch 1993, 410). Die verschiedenen Ausbildungsformen des Blasseneck-Porphyroids wurden bereits von Heinisch (1981, 27–37) ausführlich beschrieben. Lokal überlagern Polsterquarzite den Blasseneck-Porphyroid. Dabei handelt es sich um maximal 80 m mächtige, meist sehr kompakte, grob gebankte Sandsteine mit einem hohen Anteil (85–95 %) an monokristallinen undulösen Quarzkörnern (Schönlaub 1982, 380–381). Darüber folgt ein etwa 15 m mächtiger Cystoideenkalk des Ashgill (Flajs & Schönlaub 1976, 272).

Im unteren Silur treten dunkle Tonschiefer (Radphyllite) mit Grauwacken und Lyditen auf, worauf Orthocerenkalke und Schwarzschiefer folgen und das Silur abgrenzen (Flajs & Schönlaub 1976, 276; Ofner 2002, 30).

Das Devon wird durch Ablagerung organodetritischer und pelagischer Karbonate bis in das tiefere Karbon gekennzeichnet. Am Ende des Unterkarbons ereignete sich eine Verkarstungsphase, in der die Karbonate bis in Niveaus des oberen Devons abgetragen wurden. Im oberen Visé wurde dieses Emersionsrelief von den marinen, klastischen Eisenerzer Schichten (mit Einschaltungen von Vulkaniten) bedeckt (Ebner 1997, 183). Die devonen Karbonate werden oft als „erzführender Kalk“ bezeichnet, da diese häufig örtliche Siderit-/Ankerit-Vererzungen enthalten. Ebenfalls an diese Lithologie gebunden, sind zahlreiche im Eisenerzer Raum auftretende Kupfervererzungen und Mineralisationen (Schönlaub 1979, 96).

2.3. Die Kupfervererzungen der nördlichen Grauwackenzone

Hinsichtlich der Rohstoffführung bildet die nördliche Grauwackenzone eine sehr bedeutende tektonische Einheit der Ostalpen. Sie enthält die größten Kupferkies- und Fahlerzvererzungen der Ostalpen, die seit der Bronzezeit bis in die jüngste Vergangenheit von wirtschaftlicher Bedeutung waren, wobei sich die größten Kupfererzlagerstätten in der westlichen Grauwackenzone konzentrieren (Weber et al. 1997, 325; Ofner 2002, 34).

Die wichtigsten Kupferminerale sind mit der Angabe ihrer chemischen Formel in der nachstehenden Tabelle (Tab. 2.1) aufgelistet. Darüber hinaus enthält die Tabelle alle im Text verwendeten Minerale und deren chemische Formel.

Tab. 2.1.: Auflistung der wichtigsten Kupfererze sowie der im Text verwendeten Minerale (Abkürzungen nach Chace 1956; Kretz 1983; Whitney & Evans 2010).

Mineralname	Mineralname (engl.)	Abkürzung	Formel
gediegen Kupfer	native Copper	Cu	Cu
Chalcopyrit (Kupferkies)	Chalcopyrite	Ccp	CuFeS ₂

Mineralname	Mineralname (engl.)	Abkürzung	Formel
Bornit (Buntkupferkies)	Bornite	Bn	Cu_5FeS_4
Cubanit	Cubanite	Cbn	CuFe_2S_3
Covellin	Covellite	Cv	CuS
Chalkosin (Kupferglanz)	Chalcocite	Cc	Cu_2S
Digenit	Digenite	Dg	Cu_9S_5
Tennantit (Arsenfahlerz)	Tennantite	Tnt	$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$
Tetraedrit (Antimonfahlerz)	Tetrahedrite	Ttr	$\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$
Cuprit (Rotkupfererz)	Cuprite	Cpr	Cu_2O
Malachit	Malachite	Mlc	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$
Azurit	Azurite	Az	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$
Pyrit	Pyrite	Py	FeS_2
Markasit	Marcasite	Mrc	FeS_2
Pyrrhotin (Magnetkies)	Pyrrhotite	Po	Fe_{1-x}S
Arsenopyrit	Arsenopyrite	Apy	FeAsS
Sphalerit (Zinkblende)	Sphalerite	Sp	ZnS
Millerit	Millerite	Mlr	NiS
Pentlandit	Pentlandite	Pn	$(\text{Ni,Fe})_9\text{S}_2$
Gersdorffit	Gersdorffite	Gsf	NiAsS
Galenit	Galenite	Gn	PbS
Wüstit	Wüstite	Wus	FeO
Hämatit	Hematite	Hem	Fe_2O_3
Magnetit	Magnetite	Mag	Fe_3O_4
Magnesioferrit	Magnesioferrite	Mfr	MgFe_2O_4
Tenorit	Tenorite	Tnr	CuO
Delafossit	Delafossite	Del	CuFeO_2
Olivin(gruppe)	Olivine	Ol	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
Fayalit	Fayalite	Fa	Fe_2SiO_4
Forsterit	Forsterite	Fo	Mg_2SiO_4
Larnit	Larnite	Lrn	Ca_2SiO_4

Mineralname	Mineralname (engl.)	Abkürzung	Formel
Tephroit	Tephroite	Tep	Mn_2SiO_4
Glaucochroit	Glaucochroite	Glc	$CaMnSiO_4$
Kirschsteinit	Kirschsteinite	Kir	$CaFeSiO_4$
Monticellit	Monticellite	Mtc	$CaMgSiO_4$
Klinopyroxen(gruppe)	Clinopyroxene	Cpx	$(Mg,Fe)CaSi_2O_6$
Enstatit	Enstatite	En	$Mg_2Si_2O_6$
Ferrosilit	Ferrosilite	Fs	$Fe_2Si_2O_6$
Wollastonit	Wollastonite	Wo	$Ca_2Si_2O_6$
Augit	Augite	Aug	$(Ca,Mg,Fe)_2(Si,Al)_2O_6$
Hedenbergit	Hedenbergite	Hd	$CaFeSi_2O_6$
Diopsid	Diopside	Di	$CaMgSi_2O_6$
Pigeonit	Pigeonite	Pgt	$(Mg,Fe,Ca)(Mg,Fe)Si_2O_6$
Tschemak-Komponente		CaTs	$CaAl_2SiO_6$
Quarz	Quartz	Qtz	SiO_2
Cristobalit	Cristobalite	Crs	SiO_2
Tridymit	Tridymite	Trd	SiO_2
Hercynit	Hercynite	Hc	$FeAl_2O_4$
Baryt	Barite (Baryte)	Brt	$BaSO_4$
Calcit	Calcite	Cal	$CaCO_3$
Siderit	Siderite	Sd	$FeCO_3$
Ankerit	Ankerite	Ank	$Ca(Fe,Mg,Mn)(CO_3)_2$
Dolomit	Dolomite	Dol	$CaMg(CO_3)_2$
Chlorit(gruppe)	Chlorite	Chl	$(Fe,Mg,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
Feldspat(gruppe)	Feldspar	Fsp	$(K,Na,Ca,Ba,NH_4)(Si,Al)_4O_8$
Anorthit	Anorthite	An	$CaAl_2Si_2O_8$
Muskovit	Muscovite	Ms	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2$

2.3.1. Die Kupferlagerstätten der westlichen Grauwackenzone

2.3.1.1. Fahlerzbezirk Schwaz/Brixlegg

Der devonische Schwazer Dolomit enthält eine 300–400 m mächtige Schichtfolge, die aufgrund ihrer Fahlerzmineralisationen schon in der Vorgeschichte bedeutend für den Bergbau gewesen ist und zu den bekanntesten Bergrevieren der Ostalpen zählt (Martinek 1994, 74; Rieser & Schrattenthaler 1998/99, 138). Die Verbreitung der schichtkonkordanten und diskordanten Fahlerzkörper reicht von Falkenstein (Schwaz)/Reiterkopf bis zum Zillertal und setzt sich als Fahlerz-Baryt-Lagerstätte weiter nach Osten zum Revier Kogl/St. Gertraudi bei Brixlegg fort (Schulz 1974, 99). Das Erz im Schwazer Raum besteht aus überwiegend silber- und teilweise auch quecksilberhaltigem Tetraedrit, sowie Dolomit und Quarz. Im Brixlegger Raum enthalten die Vererzungen zusätzlich noch Baryt, was auf eine voralpische hydrothermale Zufuhr von Barium zurückzuführen ist, wobei das Sulfat aus dem im Dolomit eingelagerten Sulfat stammt (Gstrein 1979, 189–193; Frimmel 1989, 144).

2.3.1.2. Kupfererzbezirk Röhrebühel/Kitzbühel

Zahlreiche Kupferkies und Fahlerz führende Vererzungen treten in den paläozoischen Abfolgen der Wildschönauer Schiefer auf, wobei die Vererzung des Röhrebühels (Rerobichl) am bedeutendsten ist. Dabei handelt es sich um konkordant im Nebengestein eingelagerte Sulfidvererzungen, aber auch gang- bis kluftförmige Mineralisationen. Schmutziggraue bis gelbe Tonschiefer („Falbenschiefer“) bilden das Nebengestein und sind ein hervorragender Leithorizont innerhalb der Wildschönauer Schiefer. Als Gangart treten vor allem Quarz und Eisenkarbonate auf (Schulz 1986, 263; Weber et al. 1997, 327).

2.3.1.3. Kupfererz-(Magnesit-)Bezirk Hohe-Salve-Einheit

Im Bereich des Kupfererz-(Magnesit-)Bezirks Hohe-Salve-Einheit treten sowohl dunkle, graphithaltige Phyllite und Chloritphyllite der Wildschönauer Schiefer als auch Dolomite als Trägergesteine in Erscheinung. Die Vererzungen bestehen hauptsächlich aus Chalkopyrit, Fahlerz und Pyrit sowie untergeordnet nickel- und kobalthältige Erze, Galenit, Sphalerit, Markasit und örtlich auch Quecksilber. Dabei sind die Vererzungen sowohl in Form stratiformer Imprägnationen als auch schichtkonkordanter Erzlinsen im Nebengestein eingelagert (Weber et al. 1997, 329).

2.3.1.4. Kupfer-Eisenerzbezirk Jochberg-Einheit

Die Jochberg-Einheit umfasst mächtige siliziklastische Abfolgen, die als „Wildschönauer Schiefer“ bezeichnet werden. Neben geringmächtigen Porphyroidlagen treten vor allem

basische Vulkanite in Erscheinung, die mit den meisten Vererzungen in einer Kausalbeziehung stehen. Die Chalkopyrit-Pyrit-Lagerstätten werden von Quarz und Karbonaten sowie Roteisensteinvererzungen (vergleichbar dem Lahn-Dill-Typ) begleitet (Vohryzka 1968, 11–13; Goldenberg 2004, 167).

2.3.1.5. Polymetallischer Cu-Ni-Co-Hg-Ag-Bezirk Leogang

Der polymetallische Erzbezirk Leogang befindet sich am Nordrand der westlichen Grauwackenzone westlich von Hütten im Schwarzleotal. Die Vererzungen sind an obersilurische bis oberdevonische Karbonatgesteine („Südfazies-Dolomite“) gebunden. Die Mineralogie der Lagerstätten ist sehr komplex, jedoch können nach ihrem vermutlichen Alter paläozoische und alpidische Mineralvergesellschaftungen unterschieden werden. Die paläozoischen Vererzungen beinhalten quecksilberreiches Fahlerz (Schwazit) und Galenit mit Kobalt-Nickel-Erzen (Gersdorffit, Poldymit). Zu den alpidischen Vererzungen gehören aus variszischem Paläokarst gebildete Breccien, eine kupferreiche Bornitparagenese, monomineralische Fahlerzklüfte (Tennantit) und niedrig temperierte Sulfosalze der Bornitparagenese (Paar & Chen 1986, 145; Schulz 1986, 263; Weber et al. 1997, 331).

2.3.1.6. Kupfererzbezirk Mitterberg – Mühlbach – Larzenbach

Die Lagerstätte Mitterberg ist das größte Kupfererzvorkommen der Ostalpen. Schon seit der Bronzezeit wurde hier Kupfererz bergmännisch gewonnen und in nahegelegenen Verhüttungsanlagen zu Kupfer verarbeitet (Zschocke & Preuschen 1932, 7). Bei den Kupfervererzungen handelt es sich sowohl um stoffkonkordante als auch stoffdiskordante Erzmineralisationen in vorwiegend altpaläozoischen Metasedimenten. Die konkordanten Erzlager im Südrevier im Mitterberger Raum beinhalten hauptsächlich Chalkopyrit, Pyrit, seltener goldhaltigen Tetraedrit sowie kobalthaltigen Gersdorffit. Weiter östlich bzw. südlich in den Lagerstätten von Larzenbach und St. Veit ist der goldführende Tetraedrit das dominierende Kupfererz. Die Kupfermineralisationen des diskordant ausgebildeten Mitterberger Hauptgangs bestehen im Wesentlichen aus Chalkopyrit, begleitet von Nickelerzen (Gersdorffit, Millerit). Als Gangarten erscheinen Karbonate der Dolomit-Ankerit- und Siderit-Magnesit-Mischkristallreihe (Bernhard 1966, 39–40; Weber et al. 1997, 332).

2.3.1.7. Kieserzbezirk Zell/See – Radstadt – Mandling

Bei den Vererzungen des Kieserzbezirkes handelt es sich überwiegend um pyritführende Kupfer-(Blei-Zink-Gold-)Sulfidvererzungen, die schichtgebunden in den vulkanosedimentären Abfolgen der silurisch bis devonischen Einheiten der westlichen Grauwackenzone vorkommen. Dabei treten sie in Form von Disseminationen und Stockwerkvererzungen

in intrusiven und extrusiven Metavulkaniten sowie als konkordante und diskordante Erzkörper in Schwarzschiefern auf. Die Vererzungen werden als syngenetisch mit deren Nebengesteinen gedeutet, wobei die Metallzufuhr durch submarine hydrothermale Aktivität erfolgte (Brandmaier et al. 1985, 211–213; Feitzinger & Paar 1988, 16).

2.3.2. Die Kupferlagerstätten der östlichen Grauwackenzone

2.3.2.1. Eisen-(Kupfer-)Erzbezirk Norische Decke

Die karbonatisch entwickelten, devonischen Schichten der Norischen Decke der östlichen Grauwackenzone enthalten zahlreiche Siderit-Ankerit-Vererzungen, die gelegentlich Kupferkies führen. Im Bereich des Steirischen Erzbergs reicht die erzführende Schichtung sogar bis in das Oberkarbon. Die Erzparagenese umfasst hauptsächlich die Eisenkarbonate Siderit und Ankerit. Untergeordnet kommt auch Hämatit und Magnetit vor. An Sulfiden treten vor allem Pyrit, seltener Arsenopyrit, Tetraedrit, Chalkopyrit und Cinnabarit auf (Weber et al. 1997, 336).

Erzvorkommen mit Buntmetalldominanz ohne eine Bindung an Eisenvererzungen sowie Kieslagerstätten sind dagegen ausgesprochen selten. Auffällig ist jedoch die stärkere Kupferkiesführung mit Fahlerz im Bereich Radmer und Johnsbach sowie der Eisenerzer Ramsau, die im folgenden Kapitel behandelt werden.

2.3.2.2. Kupferkies- und Fahlerzvererzungen in den Eisenerzer Alpen

Die Kupferkies- und Fahlerzvorkommen in der Radmer werden als bis zu faustgroße Nester in den Eisenkarbonaten Ankerit und Siderit beschrieben (Redlich & Sellner 1923, 291). Gegen die Hinterradmer nehmen die Gehalte und Häufigkeiten an Kupferkies zu, der Siderit im Verhältnis zum Ankerit jedoch ab. Im Paradeisstollen treten überwiegend Karbonate der Ankerit-Dolomit-Mischkristallreihe und Quarz als Gangart auf. Die primären Erzminerale sind Chalkopyrit, antimonhaltige Fahlerze (Tetraedrit) mit geringem Silberanteil, eisenreicher Gersdorffit, Zinkblende und Pyrit. Untergeordnet erscheinen Pentlandit, Magnetkies und Millerit (Ofner 2002, 150).

Im Raum Johnsbach bestehen die Vererzungen am Sensenschmidtgang aus 10–12 cm starken Lagergängen mit einer Grundmasse aus Kupferkies, Fahlerz und Ankerit in einem Netzwerk von Siderit und Tonschiefern (Redlich 1923, 309). Am Hotzengraben wird die Gangart von rötlichen, spätigen Eisenkarbonaten und Quarz gebildet. Die Vererzung beinhaltet hier überwiegend Chalkopyrit und Pyrit, Fahlerz (Tetraedrit, Tennantit), Arsenkies, Zinkblende, Markasit und Gersdorffit (Ofner 2002, 155).

Die Mineralisationen in der Eisenerzer Ramsau sind Vertreter verschiedener Vererzungstypen. Sie erscheinen zum einen als schieferungsparallele Eisenkarbonatgänge in

erzführenden Kalken und zum anderen als hydrothermale Quarz-Sulfidgänge in der Nähe von Rohwandgängen in paläozoischen Grauwackenphylliten. Die Gangartminerale werden durch Quarz, Eisenkarbonate und Baryt (Neinavaie 1993, 4) gebildet. Die Erzparagenese setzt sich aus Chalkopyrit mit Covellinsäumen, Pyrit, Zinkblende, Millerit und vereinzelt Gersdorffit zusammen. Die wenigen untersuchten Vererzungen in der Eisenerzer Ramsau enthalten jedoch kein Fahlerz (Ofner 2002, 154).

3. Forschungsgeschichte

3.1. Montanarchäologie in den Eisenerzer Alpen

Ein umfassender Überblick über die montanarchäologische Forschung in den Eisenerzer Alpen wurde bereits von S. Klemm (2003, 2006, 2012b, in Vorbereitung) vorgelegt. Demnach begann die Erforschung der montanarchäologischen Fundstellen in der Obersteiermark 1929/30 mit der Entdeckung des Eisenschmelzplatzes „Feisterwiese“ am Steirischen Erzberg in Eisenerz. Erste archäologische Untersuchungen an diesem Fundplatz wurden von W. Schmid und W. Schuster durchgeführt (Klemm 2003, 13; Klemm et al. 2012, 69).



Abb. 3.1.: Grabungssituation am bronzezeitlichen Kupferschmelzplatz „Griesmaier“ in Johnsbach (nach Preuschen 1968, 186).

Die Untersuchungen zur prähistorischen Kupfergewinnung in der Obersteiermark begannen im Jahr 1955 mit der Entdeckung der ersten Kupferschmelzplätze in Gaishorn (Gem. Gaishorn am See), auf der Neuburg (Gem. Radmer und Johnsbach) sowie beim Gschaidegger (Gem. Johnsbach) durch E. Preuschen (Preuschen 1951–55a, 51, 1951–55b, 52; Preuschen & Pittioni 1955, 78–79). Die erste Ausgrabung eines Kupferschmelzplatzes erfolgte jedoch erst im Oktober 1966 unter der Leitung von E. Preuschen am Fundplatz „Griesmaier“ in Johnsbach (Abb. 3.1) (Modrijan 1968, 59; Kramer 1988, 164). Eine in-

tensivere Erforschung der urgeschichtlichen Kupfergewinnung in den Eisenerzer Alpen erfolgte seit Mitte der 1970er Jahre mit der Gründung des Arbeitskreises Johnsbach des Montanhistorischen Vereins für Österreich, Leoben, durch G. Sperl und des Arbeitskreises „Paltental“ durch H. Preßlinger (Preßlinger 1983, 278, 1987, 6; Preßlinger & Eibner 1983, 18; Sperl 1988, 495). Seit dieser Zeit wurden neben weiteren montanarchäologischen Ausgrabungen im Johnsbach- und Paltental auch erste Analysen von Kupferschlacken durchgeführt (Preßlinger et al. 1980, 134, 1986, 225–226; Walach 1983, 135). Durch die Ausgrabung des Kupferschmelzplatzes „Versunkene Kirche“ in St. Lorenzen 1979/80 konnten die ersten aussagekräftigen Befunde zur prähistorischen Kupfergewinnung gewonnen werden (Abb. 3.2) und ermöglichten C. Eibner erstmals die Rekonstruktion einer prähistorischen Kupferhütte (Eibner 1982a, 405).



Abb. 3.2.: Doppelofenanlage des Fundplatzes „Versunkene Kirche“ (nach Preßlinger & Eibner 1993, 31).

In den letzten Jahren konzentrierten sich die Forschungsaktivitäten der Arbeitsgruppe um H. Preßlinger und C. Eibner auf das Gebiet des oberen Flitzenbaches an der Gemeindegrenze von Gaishorn am See zu Johnsbach und den Raum der Stadtgemeinde um Trieben (siehe zuletzt Eibner 2004; Preßlinger et al. 2004a, 2009, 2011, 2012; Walach 2004a,b; Weinek 2009). Zudem wurde mittels der Thermolumineszenzmethode versucht, Schlacken von verschiedenen Verhüttungsplätzen in den Eisenerzer Alpen zu datieren. Der Vergleich mit ^{14}C -Daten von diesen Fundstellen zeigte bei Einbeziehung der Fehlerbereiche Übereinstimmungen, auch wenn die mittels Thermolumineszenz gewonnenen Alter tendenziell etwas jünger einzuordnen sind (Haustein 2004, 32; Urban 2006, 53). Dieser Unterschied könnte auf den bekannten Altholzeffekt zurückzuführen sein (siehe dazu Zerbst 1999).

Die Eisenerzer Ramsau gelangte 1991 in das archäologische Gesichtsfeld (Weinek 1992,

64). In den folgenden Jahren wurden zahlreiche weitere prähistorische Kupferschmelzplätze und potentielle Bergbaue in der Eisenerzer Ramsau bekannt (Weinek & Resch 1998, 38, 2004, 124). Alle bekannten montanarchäologischen Fundstellen der Eisenerzer Alpen wurden erstmals von S. Klemm in einem Katalog zusammengestellt (Klemm 2003). Diese Zusammenstellung konnte in den letzten Jahren durch weitere Fundmeldungen ergänzt werden (Preßlinger et al. 2009; Weinek 2009; Klemm 2006, 2010, 2012a, in Vorbereitung)).



Abb. 3.3.: Der Kupferschmelzplatz S1 in der Eisenerzer Ramsau (Foto: S. Klemm).

Zwischen 1992 und 2006 wurden montanarchäologische Ausgrabungen auf dem Kupferschmelzplatz S1 in der Eisenerzer Ramsau (Abb. 3.3) unter der Leitung von S. Klemm durchgeführt. Erste Analysen der Schlacken wurden von Doonan (1996) vorgelegt (vgl. auch Doonan et al. 1996), denen bald weitere folgten (Thalhammer & Thalhammer 2006).

3.2. Stand der archäometallurgischen Forschung zur prähistorischen Kupfergewinnung in den Ostalpen

3.2.1. Einleitung

Bereits seit den Anfängen der montanarchäologischen Erforschung der prähistorischen Kupfergewinnung in den Ostalpen werden auch naturwissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt. Das primäre Ziel dieser Untersuchungen ist seit jeher die Frage nach der Art und Herkunft der für die aufgefundenen kupfer- und bronzezeitlichen Metallartefakte verwendeten Erze. Zu diesem Zweck wurden anfangs Haupt- und Spurenelementgehalte der Artefakte, Zwischen- aber auch der Abfallprodukte analysiert (Otto & Witter 1952). Neben der Frage nach der Herkunft der Ausgangserze liegt seit dem Beginn der archäometallurgischen Forschung ein weiterer Schwerpunkt in der Rekonstruktion der angewandten

Verhüttungsverfahren. Früh wurde erkannt, dass hauptsächlich Kupferkies und Fahlerze für die bronzezeitliche Kupferproduktion von Bedeutung waren (Sperber 1999, 48).

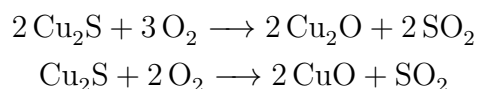
3.2.2. Die prähistorische Verhüttung sulfidischer Kupfererze in den Ostalpen

3.2.2.1. Die metallurgischen Grundlagen des Verhüttungsprozesses

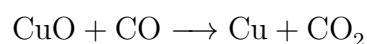
Das in den sulfidischen Erzen enthaltene Kupfer lässt sich lediglich durch chemische Prozesse herauslösen. Dabei laufen zahlreiche, meist komplexe Reaktionen ab. Oft bestehen die zu verhüttenden Erze aus Verbindungen mehrerer Metalle (polymetallische Erze) und werden von Gangmineralen begleitet, die auch trotz sorgfältigem Aufbereiten in den Verhüttungsprozess gelangen. Grundsätzlich wird bei der Kupfergewinnung aus den verschiedenen bergmännisch gewonnenen und aufbereiteten Erzen zwischen nassen und trockenen Verfahren unterschieden. Die nassen oder hydrometallurgischen Gewinnungsverfahren basieren auf der Überführung des Kupfers aus seinen Verbindungen in eine Lösung durch Laugung und der anschließenden Ausfällung als Metall oder einer Verbindung, die Kupfer in einer konzentrierten und leicht gewinnbaren Form enthält (Tafel & Wagenmann 1951, 464). Diese Verfahren werden vor allem bei der Gewinnung von Kupfer aus armen Erzen sowie Zwischen- und Abfallprodukten aus anderen Verhüttungsvorgängen angewendet.

Für die prähistorische Kupfergewinnung aus sulfidischen Erzen ist jedoch fast ausschließlich von einem trockenen oder pyrometallurgischen Verfahren auszugehen, dessen Ziel es ist, den gesamten Kupfergehalt aus dem Erz unter Verschlackung der Gangart und der unerwünschten Nebenbestandteile zu gewinnen. Um dieses Ziel zu erreichen, können verschiedene Methoden angewendet werden.

Beim Röstreduktionsverfahren wird das sulfidische Erz totgeröstet, um den gesamten Schwefel aus dem Erz zu entfernen und das Kupfer vollständig zu oxidieren, entsprechend (Tafel & Wagenmann 1951, 237)

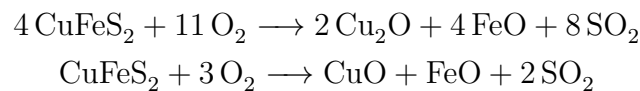


Der Röstprozess findet bei 400–700 °C, also deutlich unterhalb der Schmelztemperatur, statt und erhält sich selbst, so lange ein Schwefelüberschuss vorhanden ist. Da Kupfer eine höhere Affinität zum Schwefel als Eisen hat, ist für eine vollständige Entfernung des Schwefels erhebliche Energiezufuhr nötig. Anschließend erfolgt die Reduktion des Kupferoxids zu metallischem Kupfer im Ofen nach (Tafel & Wagenmann 1951, 243)

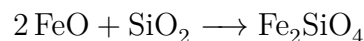


Aufgrund der ungünstigen Energiebilanz dieses Verfahrens war es für prähistorische Hüttenleute wohl kaum möglich, den Schwefel vollständig zu entfernen. Beim sogenannten Röstreaktionsverfahren wird während des Röstens nur ein Teil des Schwefels entfernt und die gebildeten Kupferoxide im anschließenden Schmelzprozess zu metallischem Kupfer reduziert. Beide Verfahren ermöglichen die Gewinnung metallischen Kupfers direkt aus dem Erz.

Denkbar ist aber auch ein Verschmelzen von totgeröstetem Erz mit unbehandeltem Erz, wodurch ebenfalls direkt Kupfer gewonnen werden kann. Dabei geht jedoch ein großer Teil des Kupfers in die Schlacke und kann nur unter hohem Aufwand wiedergewonnen werden. Für die prähistorische Kupfergewinnung wird daher von einem mehrstufigen Konzentrations- bzw. Anreicherungsverfahren ausgegangen. Zunächst werden die sulfidischen Erze entweder im Haufen oder auf eigens dafür angelegten Röststadeln oder Röstbetten geröstet. Dabei werden die sulfidischen Metallverbindungen in Metalloxide überführt gemäß (Tafel & Wagenmann 1951, 239)

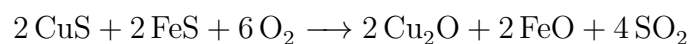


Ein Teil des im Erz enthaltenen Kupfers bleibt aufgrund seiner höheren Affinität zum Schwefel zunächst daran gebunden, während die Eisensulfide oxidiert werden. Im darauf folgenden ersten Schmelzgang wird das Röstgut zusammen mit der quarzreichen Gangart oder Zuschlägen im Schachtofen geschmolzen. Dabei entsteht Kupferstein, ein Gemisch aus Kupfer- und Eisensulfiden, während ein Teil des Eisens zusammen mit dem Quarz eine Eisensilikatschlacke bildet, nach (Bachmann 1982, 22)

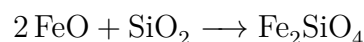


Um das Kupfer aus dem erschmolzenen Kupferstein zu gewinnen, wird dieser erneut auf dem Röstbett geröstet und anschließend im Schachtofen unter Verschlackung des noch vorhandenen Eisens zu metallischem Kupfer reduziert.

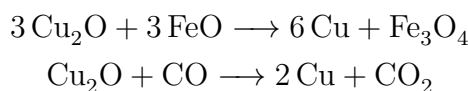
Röstung:



Verschlackung:



Reduktion:



Das gewonnene Schwarzkupfer wird dann in einem folgenden Raffinationsverfahren zu Kupfer des gewünschten Reinheitsgrades geschmolzen. Es ist aber auch denkbar, dass das Konzentrationsmelzen mehrfach ausgeführt wird. Dabei wird der Kupferstein immer weiter an Kupfer angereichert bis die Mischungslücke des Systems Cu-Fe-S (Abb. 3.4) erreicht wird und sich metallisches Kupfer, das sogenannte Bodenkupfer, spontan abscheidet.

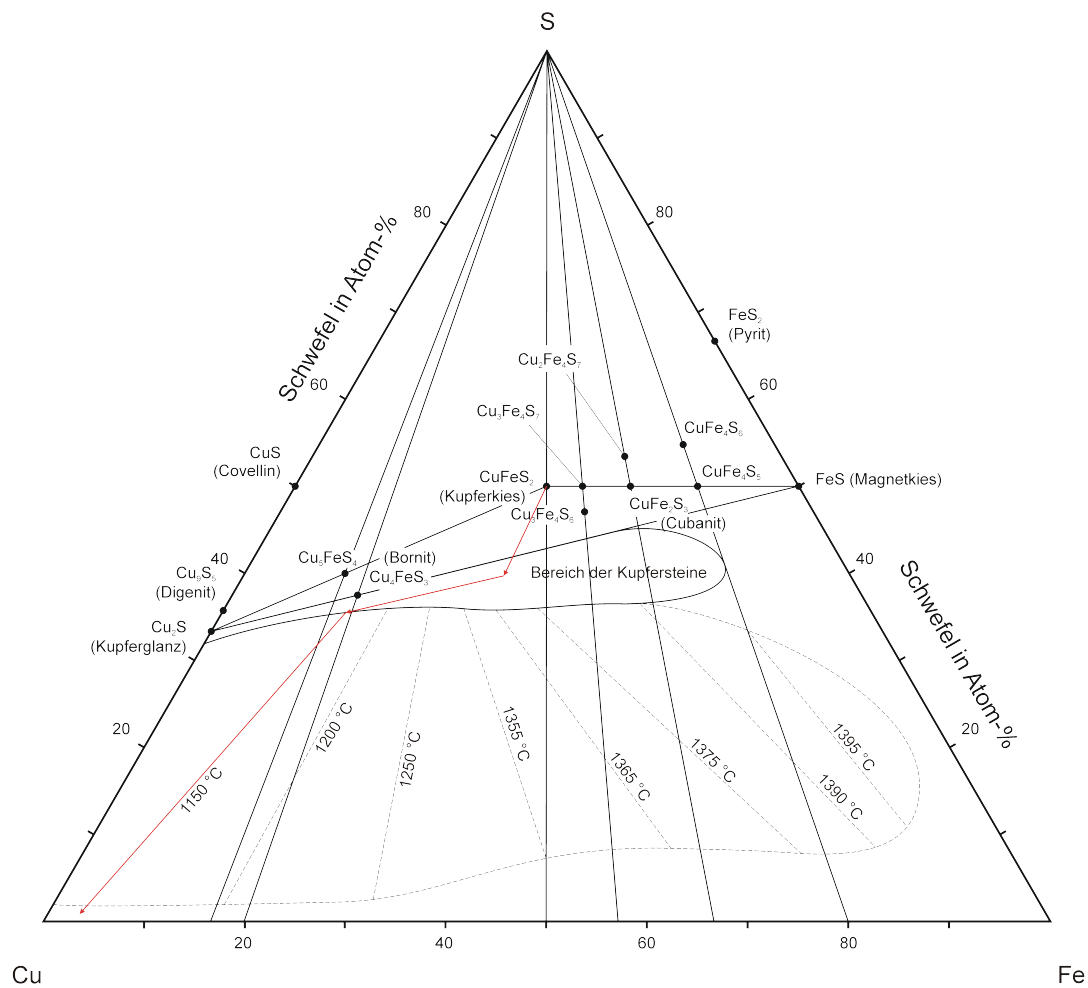


Abb. 3.4.: Schematische Darstellung des Systems Cu-Fe-S (modifiziert nach Schlegel & Schüller 1952). Die Bildung von metallischem Kupfer aus Kupferkies ist dabei entlang der rot markierten Linie anzunehmen.

Bei diesem Verfahren erfolgt der Schwefelabbau der höheren Cu/Fe-Sulfide bei Ofentemperaturen über 1100 °C durch Dissoziation und ein Aufschwefeln des nicht an den Schwefel gebundenen Kupfers durch Eisensulfide. In Abb. 3.4 ist der Bereich der technischen Kupfersteine zwischen der Linie $\text{Cu}_2\text{S}-\text{FeS}$ und der Mischungslücke eingetragen. Daraus ist ersichtlich, dass kupferarme Steine im flüssigen Zustand deutlich höhere Mengen Metall lösen können, ohne dass eine Metallschicht abgeschieden wird. Diese Löslichkeit nimmt mit steigendem Cu_2S -Gehalt ab, so dass bei kupferreichen Steinen leicht eine Abscheidung

von metallischem Kupfer stattfinden kann. Diese Strategie wurde im mittelalterlichen und neuzeitlichen Japan verfolgt, wo man dieses Verfahren als Mabuki-Prozess bezeichnet (vgl. Okada 1911).

Möglich ist aber auch eine direkte Umwandlung des geschmolzenen Kupfersteins durch Oxidation mit Luft in kleinen Schmelzriegeln (das „Verblasen“ des Steins). Großtechnisch entspricht dieser Prozess dem Konverterverfahren, das heute durch Einblasen von Sauerstoff unter Druck durchgeführt wird (Tafel & Wagenmann 1951, 384–385). Dabei entsteht Schwarzkupfer mit einigen Prozent Eisen und Konverterschlacke mit relativ hohem Kupfergehalt. In der modernen Hüttenindustrie wird diese in den Prozess zurück geführt. Das Schwarzkupfer wird in der Regel weiter gereinigt, indem man es unter Luft schmilzt oder Luft auf das geschmolzene Schwarzkupfer aufbläst. Dabei werden die chemisch unedleren Verunreinigungen oxidiert und bilden eine kupferreiche Tiegelschlacke. Eine Alternative ist das Eintauchen von frischem Holz in das geschmolzene Kupfer. Der dabei entstehende Wasserdampf und die Holzkohle führen ebenfalls zu einer Raffination. Diesen Vorgang nennt man das „Polen“ des Kupfers (Tafel & Wagenmann 1951, 444–446). Heute wird Kupfer elektrolytisch raffiniert, was für die prähistorische Produktion natürlich entfällt.

3.2.2.2. Theorien zur prähistorischen Verhüttung sulfidischer Kupfererze in den Ostalpen

Abb. 3.5 zeigt die in der Literatur diskutierten, verschiedenen Ansätze zur bronzezeitlichen Kupfergewinnung aus sulfidischen Erzen. In allen bislang vorgeschlagenen Modellen werden moderne oder historisch belegte Verfahrenstechniken auf den prähistorischen Prozess übertragen. Danach wird für die prähistorische Verhüttung sulfidischer Kupfererze in den Ostalpen im Allgemeinen von einem mehrstufigen Prozess ausgegangen. Die erste Stufe entspricht dem Rösten des zu verhüttenden Erzes. In der zweiten Stufe erfolgt der erste Schmelzvorgang im Schmelzofen mit dem Ziel, Kupferstein zu gewinnen. In einer weiteren Stufe wird der erzeugte Kupferstein (eventuell zusammen mit weiteren Erzbrocken) ebenfalls geröstet und während des darauf folgenden Schmelzgangs mit Kupfer angereichert.

Bereits Much (1902, 12) ging von einem zweistufigen Verfahren aus, bei dem das zu verhüttende Erz vor dem Schmelzen im Ofen einem Röstprozess unterzogen wird. Er vermutete, dass das Rösten der Erze auf frei liegenden oder mit Steinen umstellten Haufen erfolgte. Nach dem vorgeschlagenen Verfahren wurde der dann im Ofen erschmolzene Stein anschließend im Tiegel angereichert und verblasen. Die auf den Schmelzplätzen gefundenen Schlacken teilte Much nach ihren äußeren Eigenschaften ein und ordnete sie den verschiedenen Prozessstufen zu. Demnach entstanden die heterogenen Schlackenklötze während des Kupfersteinschmelzens und die dünnflüssigen Plattenschlacken beim späteren Raffinationsprozess.

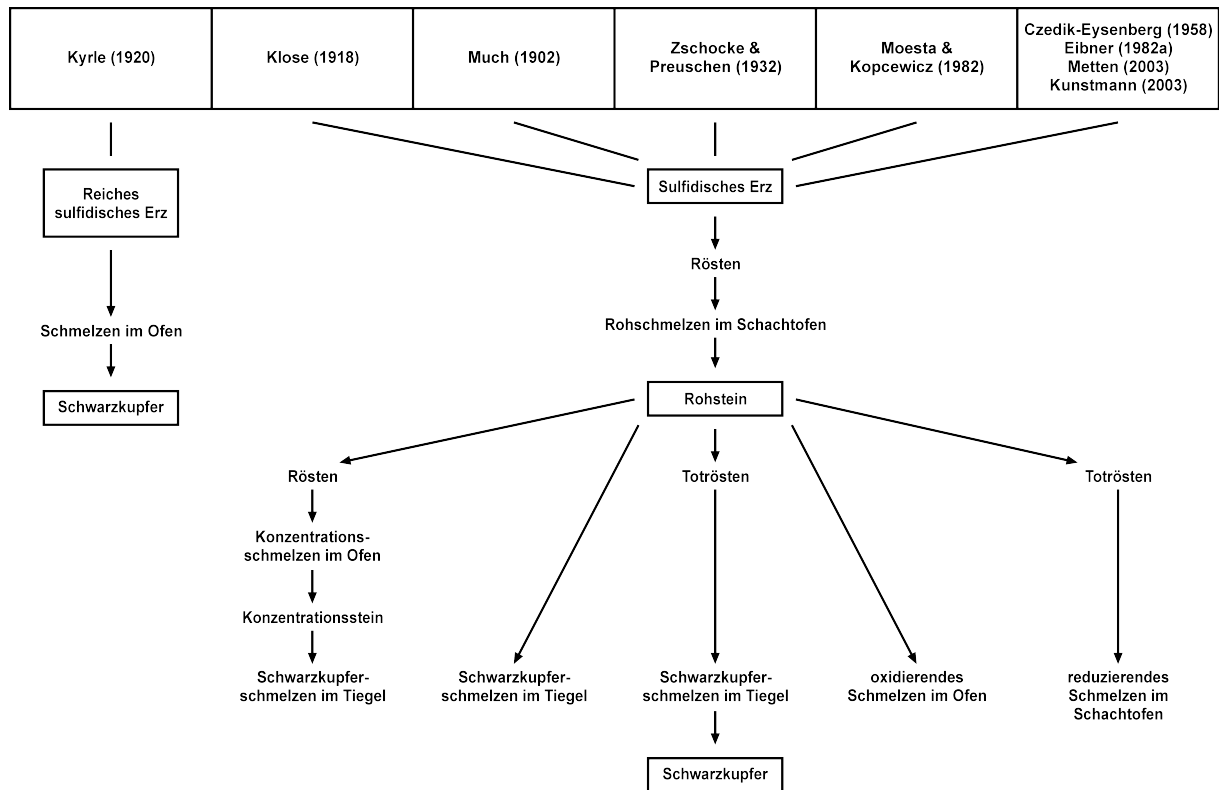


Abb. 3.5.: Schematische Darstellung der verschiedenen Theorien zur bronzezeitlichen Kupfergewinnung (erweitert nach Metten 2003, 13).

Auch nach dem von Klose (1918, 27–33) vorgeschlagenen Verfahren wurden die sulfidischen Kupfererze vor dem eigentlichen Schmelzprozess im Ofen auf eigens dafür angelegten Plätzen geröstet. Danach erfolgte der erste Schmelzgang im Ofen. Der dabei gewonnene Kupferstein wurde dann im zweiten Ofen geschmolzen, um den Kupfergehalt im Stein weiter zu erhöhen, bevor er anschließend im Tiegel zu Schwarzkupfer verarbeitet wurde. Die auf den Schmelzplätzen entdeckten Schlacken unterschied Klose (1918, 30) ebenfalls nach ihrer äußeren Typologie und führte sie auf die verschiedenen Prozessstufen zurück. Die heterogenen Schlackenklötze ordnete er dem Rohschmelzen zu und die Plattenschlacken dem Konzentrationsschmelzen.

Kyrle (1920, 258) schlug dagegen ein einstufiges Verfahren vor, bei dem für die Verhüttung sulfidische Reicherze verwendet wurden, deren Kupfergehalt so hoch war, dass bereits der erste Schmelzgang im Ofen ohne vorherigen Röstprozess zu verwertbarem Kupfer führte und eine Verfeinerung des Metalls nur in seltenen Fällen nötig war. Die Schlacken unterteilte Kyrle (1918, 43) nach ihrem äußerlichen Erscheinungsbild und schloss daraus ebenfalls auf unterschiedliche Prozesse. Die geringe Fundzahl an dünnflüssiger Plattenschlacke führte er schließlich auf die nur in geringem Maße durchgeführte Raffination des Kupfers zurück (Kyrle 1918, 45).

Zschocke & Preuschen (1932, 106) postulierten ein Verhüttungsverfahren, das aus min-

destens zwei Stufen besteht, wobei sowohl die Erze als auch die Zwischenprodukte geröstet wurden. Das Rösten erfolgte dabei in offenen Haufen oder auf Röstbetten. Anschließend erfolgte die reduzierende Schmelzarbeit im Schachtofen. Dabei wurde zunächst das geröstete Erz unter Zugabe von Zuschlägen zur Schlackebildung zu Kupferstein geschmolzen. Das Schwarzkupferschmelzen aus dem (tot)gerösteten Kupferstein erfolgte nach diesem Modell im Tiegel. Eine weitere Raffination des Kupfers war nur in wenigen Fällen nötig.

Czedik-Eysenberg (1958, 3–6) ging von einem dem von Agricola (1556) beschriebenen „Deutschen Prozess“ ähnlichen Verfahren aus, bei dem das geröstete Erz zunächst in einem niedrigen Schachtofen bei geringer Windpressung geschmolzen wurde. Neben der heterogenen Rohschlacke, die als Abfall auf die Halde gelangte, entstand dabei ein Kupferstein mit 40–60 % Kupfer, welcher im Anschluss im Haufen geröstet wurde. Der geröstete Kupferstein wurde danach in einem weiteren niedrigen Schachtofen bei schwacher Windpressung zu Schwarzkupfer mit einem Kupfergehalt von 94–96 % verarbeitet.

Basierend auf den Ergebnissen der archäologischen Untersuchungen des Schmelzplatzes „Versunkene Kirche“ entwickelte Eibner (1982a, 404–406) ein Modell für die bronzezeitliche Verhüttung, bei dem das Ausgangserz zunächst auf mit Steinen umstellten Röstbetten (Röststadeln) abgeröstet wurde. Der Röstprozess wurde dabei mit frischem Holz in Gang gesetzt und verlief im Folgenden unter Verbrennung des Schwefels. Das geröstete Erz wurde dann unter Zugabe von Quarz im Schachtofen geschmolzen. Dabei entstand eine Eisensilikatschlacke sowie der Kupferstein (mit bis zu 60 % Kupfer), die sich aufgrund ihrer Unmischbarkeit und ihres unterschiedlichen spezifischen Gewichtes voneinander trennen. Der anschließend totgeröstete Kupferstein wurde dann in einem niedrigen Schachtofen unter leicht reduzierenden Bedingungen zu Schwarzkupfer mit einem Kupfergehalt von bis zu 96 % geschmolzen. Durch den zusätzlichen Quarzzuschlag wurde das restliche Eisen verschlackt und es entstand eine dünne, homogene Plattenschlacke.

Eine andere Möglichkeit zur prähistorischen Kupferverhüttung schlagen Moesta & Kopcewicz (1982) vor, basierend auf der Analyse der durch mineralogische und mößbauer-spektroskopische Untersuchungen der Schlacken ermittelten Redox-Bedingungen. Demnach wurde das sulfidische Erz zuerst partiell geröstet und das Röstgut im Anschluss im Schachtofen unter Zugabe von Quarz reduzierend geschmolzen. Dabei entstand Kupferstein sowie eine blasige Laufschlacke. Bis zu diesem Punkt entspricht das Modell den Vorstellungen von F. Czedik-Eysenberg und C. Eibner. Die weitere Kupferanreicherung fand nach Moesta & Kopcewicz (1982, 494) jedoch ohne vorheriges Rösten des Kupfersteins im offenen Ofen unter oxidierenden Bedingungen statt, ähnlich dem japanischen Mabuki-Prozess (Okada 1911). Durch Zugabe von Quarz wurde das im Stein enthaltene Eisen zu dünnflüssiger Plattenschlacke als auch dickerer Laufschlacke verschlackt.

Aufgrund der archäologischen Befunde am Schmelzplatz „Flitzen II“ und den archäome-

tallurgischen Untersuchungen hinsichtlich der Zusammensetzung von Schlacken, Röstbetteproben und Erzen schlug Kunstmann (2003, 146) einen vierstufigen Verhüttungsprozess vor. Das verhüttete Ausgangserz bestand überwiegend aus Fahlerz und Kupferkies. Es wurde zunächst auf Röstbetten partiell geröstet und anschließend im Ofen zu Kupferstein geschmolzen. Der erhaltene Kupferstein wurde danach erneut geröstet und im Ofen zu Schwarzkupfer verarbeitet. Dieser Verhüttungsablauf entspricht weitestgehend dem von F. Czedik-Eysenberg und C. Eibner postulierten Modell.

Die archäologischen und archäometallurgischen Untersuchungen am spätbronzezeitlichen Schmelzplatz von Acqua Fredda im Trentino lassen auch für die Südalpen ein mehrstufiges Verfahren vermuten. Obwohl hier keine Röstbetten im archäologischen Befund nachgewiesen wurden, geht Metten (2003, 69) davon aus, dass die verhütteten Erze vor dem eigentlichen Schmelzen im Schachtofen einem Röstprozess unterworfen wurden, ähnlich dem von F. Czedik-Eysenberg und C. Eibner angenommenen Verfahren. Anhand der chemischen und mineralogischen Untersuchungen der makroskopisch verschiedenen Schlacken geht sie jedoch entgegen diesem Modell davon aus, dass alle Schlackentypen aus einem Prozess stammen (Metten 2003, 73–74), bei dem die Plattenschlacken als ideal zusammengesetzte Teilschmelze einer Gesamtcharge interpretiert werden und die Schlackenkuchen einen partiell aufgeschmolzenen „Restit“ darstellen. Sowohl die von Herdits (1997) durchgeführten Analysen an verschiedenen Schlackentypen vom Schmelzplatz Mühlbach/Brennerwald (Salzburg) als auch die Untersuchungen von Doonan (1996) am Kupferschmelzplatz S1 unterstützen diese Theorie.

3.2.3. Archäometallurgische Forschung in den Eisenerzer Alpen

Die nachstehende Tabelle (Tab. 3.1) gibt eine zusammenfassende Übersicht über die bisher durchgeführten naturwissenschaftlichen Untersuchungen an verschiedenen Materialgruppen von prähistorischen Schmelzplätzen der Eisenerzer Alpen. Schwerpunktmäßig sollen hier die verwendeten Methoden aufgezeigt werden, daher wurde auf eine Darstellung von Einzelergebnissen verzichtet. Weiterführende Informationen zu den einzelnen Fundorten der Tallandschaften sind der angegebenen Literatur sowie dem Fundstellenkatalog in Klemm (2003, 45–148) zu entnehmen.

Die archäometallurgischen Untersuchungen setzten bereits mit dem Beginn der montanarchäologischen Forschungen im Bereich der Eisenerzer Alpen ein. Im Mittelpunkt der frühen Untersuchungen stand dabei vor allem die chemische und mineralogische Untersuchung von Schlacken und Rohprodukten, wobei in der älteren Literatur nur selten die angewandten Methoden zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung genannt werden.

Tab. 3.1.: Übersicht über bisherige für die Archäometallurgie in den Eisenerzer Alpen relevanten Untersuchungen (FP-Nr. nach Klemm 2003). 1 = Makroskopie, 2 = Mikroskopie, 3 = Rasterelektronenmikroskopie, 4 = Elektronenstrahlmikrosonde, 5 = Röntgenfluoreszenzanalyse, 6 = Röntgendiffraktometrie, 7 = Mößbauer-Spektroskopie, 8 = Atomabsorptionsspektrometrie, 9 = Neutronenaktivierungsanalyse, 10 = Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma, 11 = Bleiisotopenanalyse, 12 = naßchemische Analyse, 13 = Brenntemperaturbestimmung, 14 = Fluiduntersuchung (Crush and Leach), 15 = Mikrothermometrie, 16 = vegetationskundliche Untersuchungen, 17 = chemische Analyse ohne Angabe der verwendeten Methode.

Gemeinde	Fundort	Literatur	Material	Methodik
Eisenerz	Kupferschmelzplatz S1 (FP 60104.001)	Neinavaie 1993; Adetunji et al. 1996; Doonan 1996; Doonan et al. 1996; Thalhammer & Thalhammer 2006	Schlacken	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
		Thalhammer & Thalhammer 2006	Ofensteine	1, 2, 3, 4, 5
		Neinavaie 1993; Thalhammer & Thalhammer 2006	Bodenproben	1, 2, 3, 4, 5
		Drescher 2004	Pflanzenreste	16
	Kupferschmelzplatz S3 (FP 60104.003)	Preßlinger et al. 2004b, 2012	Schlacken	9, 10
	Kupferschmelzplatz S5 (FP 60104.005)	Preßlinger et al. 2004b, 2012	Schlacken	9, 10
	Kupferschmelzplatz S7 (FP 60104.007)	Preßlinger et al. 2004b, 2012	Schlacken	9, 10
		Emmerer et al. 2003	Bodenproben	10
		Emmerer 2000; Jäger 2003	Pflanzenreste	16
		Emmerer et al. 2003	Regenwürmer	10
	Kupferschmelzplatz S8 (FP 60104.008)	Preßlinger et al. 2004b, 2012	Schlacken	9, 10
		Emmerer 2000	Pflanzenreste	16
Kupferschmelzplatz S10 (FP 60104.010)	Preßlinger et al. 2004b, 2012	Schlacken	9, 10	
	Emmerer 2000	Pflanzenreste	16	
Kupferschmelzplatz S12 (FP 60104.012)	Preßlinger et al. 2001, 2012	Schlacken	12	
	Emmerer 2000	Pflanzenreste	16	
Erzberg	Neinavaie 1993	Erze	1, 2, 3, 4	

Gemeinde	Fundort	Literatur	Material	Methodik
	Kreuzung Antriebstraße/ Zwiegrabenstraße	Ofner 2002	Erze	1, 2, 4, 14, 15
	Kreuzung Stichstraße/ Kaltenbachgraben	Ofner 2002	Erze	1, 2, 4, 14, 15
	Nordrampe 242 Richtung Gerichtsgraben	Ofner 2002	Erze	1, 2, 4, 14, 15
Gaishorn	Flitzenalm I (FP 67501.001)	Prochaska & Preßlinger 1989; Preßlinger et al. 1992, 2004b, 2009, 2012; Preßlinger & Pro- chaska 2002; Prochaska & Ran- titsch 2004	Schlacken	1, 9, 10
		Prochaska & Rantitsch 2004	Bodenproben	8
	Flitzenalm II (FP 67501.006)	Prochaska & Preßlinger 1989; Preßlinger et al. 1992, 2004b, 2009, 2012; Preßlinger & Pro- chaska 2002; Kunstmann 2003, 2004; Prochaska & Rantitsch 2004	Schlacken	1, 2, 5, 9, 10, 11
		Kunstmann 2003, 2004; Preßlin- ger 2004; Preßlinger et al. 2004b, 2012	Gußkuchen, Rohprodukte	1, 5, 11
		Kunstmann 2003, 2004	Bodenproben	1, 6, 9, 13
	Oberschwärzen (FP 67501.008)	Preßlinger et al. 1982, 1992, 2001, 2009, 2012; Prochaska & Preßlinger 1989; Preßlinger 1998; Preßlinger & Eibner 2004	Schlacken	1, 2, 3, 5, 12
	Kupferschmelzplatz BDA (FP 67501.013)	Preßlinger & Eibner 1993; Preß- linger et al. 1992, 2001; Wedenig et al. 1992	Schlacken	12
	Flitzenalm III	Preßlinger et al. 2004b, 2009, 2012	Schlacken	9, 10
	Meilerplatz I	Preßlinger & Prochaska 2002; Prochaska & Rantitsch 2004; Preßlinger et al. 2004b, 2009, 2012	Schlacken	1, 9, 10

Gemeinde	Fundort	Literatur	Material	Methodik
	Meilerplatz II	Preßlinger & Prochaska 2002; Prochaska & Rantitsch 2004; Preßlinger et al. 2012	Schlacken	1, 9
Johnsbach	Schröckalm (FP 67404.008)	Prochaska & Preßlinger 1989; Preßlinger et al. 1992, 2004b, 2009, 2012; Preßlinger & Pro- chaska 2002	Schlacken	1, 9, 10
	Kühgatschboden (FP 67404.012)	Preßlinger et al. 2004b, 2009, 2012	Schlacken	9, 10
	Kölblalm (FP 67404.015)	Preßlinger & Prochaska 2002; Preßlinger et al. 2004b, 2009, 2012	Schlacken	1, 9, 10
	Griesmeier/Hinterfell (FP 67404.020)	Prochaska & Preßlinger 1989; Preßlinger et al. 1992	Schlacken	17
	Kohlanger/Griesmeier (FP 67404.021)	Prochaska & Preßlinger 1989; Preßlinger et al. 1992	Schlacken	17
	Kohlanger II (FP 67404.034)	Moesta et al. 1984	Schlacken	7
	Pfarralm I (FP 67404.037)	Preßlinger et al. 1992; Prochaska & Preßlinger 1989	Schlacken	17
	Pfarralm II (FP 67404.038)	Prochaska & Preßlinger 1989; Preßlinger et al. 1992	Schlacken	17
	Kohlanger I (FP 67404.041)	Preßlinger & Prochaska 2002; Preßlinger et al. 2004b, 2009, 2012	Schlacken	1, 9, 10
	Foitlbauer Alm	Preßlinger et al. 2004b, 2009, 2012	Schlacken	9, 10
	Goaßsteig	Preßlinger et al. 2004b, 2009, 2012	Schlacken	9, 10
	Hotzengraben	Ofner 2002	Erze	1, 2, 4, 14, 15
	Pfisterbergalm/ Finsterbergalm	Preßlinger & Prochaska 2002; Preßlinger et al. 2004b, 2009, 2012	Schlacken	1, 9, 10

Gemeinde	Fundort	Literatur	Material	Methodik
	Ploden Odelstein/ Ploden Ödensteinhöhle	Preßlinger & Prochaska 2002; Preßlinger et al. 2004b, 2009, 2012	Schlacken	1, 9, 10
	Wolfbauer	Sperl 1979	Schlacken	2, 4
Kalwang	Langteichen I	Preßlinger et al. 2004b, 2009, 2012	Schlacken	9, 10
Mautern	Kupferschmelzplatz Ehrnau (FP 60330.001)	Prochaska & Preßlinger 1989; Hebert & Preßlinger 1990; Wede- nig et al. 1992; Preßlinger et al. 1992, 2001; Preßlinger & Eibner 1993	Schlacken	1, 2, 3, 4, 12
Radmer	Aufschließungsstraße zur Neuburg (R1) (FP 60106.003)	Preßlinger et al. 2004b, 2012	Schlacken	9, 10
	Blümeeggergraben (R15) (FP 60106.006)	Preßlinger et al. 2004b, 2012	Schlacken	9, 10
	R6 (FP 60107.007)	Preßlinger et al. 2004b, 2012	Schlacken	9, 10
	Paradeisstollen	Ofner 2002	Erze	1, 2, 4, 5, 8, 14, 15
Rotten- mann	Kaiserkörperl (FP 67502.001)	Hebert & Preßlinger 1990; Preß- linger & Eibner 1993, 2004; Preß- linger 1998; Preßlinger et al. 2009	Schlacken	1, 2, 3, 5, 12
		Kunstmann 2003, 2004	Rohprodukte	2, 5, 11
		Preßlinger & Gruber 1984; An- gerbauer 1985; Preßlinger et al. 1986, 2009, 2012; Prochaska & Preßlinger 1989; Preßlinger & Eibner 1993, 2004; Prochaska et al. 2002; Preßlinger 2004	Bronzeobjekte	1, 2, 5
		Kunstmann 2003, 2004	Erze	2, 5, 11
	Prenterwinkelgraben (FP 67502.004)	Prochaska & Preßlinger 1989	Erze	17
	Büschendorf I (FP 67503.001)	Prochaska & Preßlinger 1989	Erze	17
	Bärndorf/Rottenmann	Wasserthal 1982	Erze	2, 4, 5

Gemeinde	Fundort	Literatur	Material	Methodik
Trieben	Versunkene Kirche (FP 67512.001)	Preßlinger et al. 1980, 1982, 1985, 1986, 1992, 2001, 2004b, 2009, 2012; Preßlinger & Gruber 1985; Prochaska & Preßlinger 1989; Wedenig et al. 1992; Preßlinger & Eibner 1993, 2004; Preßlinger 1998; Preßlinger & Prochaska 2002	Schlacken	1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 12
		Preßlinger et al. 1982, 1985, 1986, 2004b, 2009, 2012; Gruber & Preßlinger 1983; Preßlinger & Gruber 1984; Angerbauer 1985; Prochaska & Preßlinger 1989; Preßlinger & Eibner 1989a, 1993, 2004; Zwicker 1991; Prochaska et al. 2002; Kunstmann 2003, 2004; Preßlinger 2004	Gußkuchen, Rohprodukte	1, 2, 3, 5, 11
		Preßlinger et al. 1980, 1998; Preßlinger 2002	Ofensteine	1, 2, 4, 5, 6, 12
		Preßlinger et al. 2000; Preßlinger 2002	Hüttenlehm	1, 2, 3, 4, 5, 6
	Preßlinger et al. 2000	technische Keramik	1, 2, 3, 4, 5, 6	
	Prochaska et al. 2002	Bodenproben	8	
	Schaupenhube (FP 67512.002)	Preßlinger & Eibner 2004	Erze	3, 4
Schlosser/Trieben		Preßlinger & Prochaska 2002; Preßlinger et al. 2004b, 2009, 2012	Schlacken	1, 9, 10
		Preßlinger et al. 2011	technische Keramik	1, 2, 3, 5
Wald am Schober-Pass	Braunruck I (FP 60366.001)	Preßlinger et al. 2004b, 2009, 2012	Schlacken	9, 10
	Braunruck III (FP 60366.003)	Preßlinger et al. 2004b, 2009, 2012	Schlacken	9, 10

Gemeinde Fundort	Literatur	Material	Methodik
Haberlalm (FP 60366.004)	Prochaska & Preßlinger 1989; Preßlinger et al. 1992, 2001, 2004b, 2009, 2012; Preßlinger 1998; Preßlinger & Eibner 2004	Schlacken	1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 12
Siedlungsgrube (FP 60366.005)	Preßlinger et al. 1992, 2001; We- denig et al. 1992; Preßlinger & Eibner 1993	Schlacken	2, 3, 4, 12

Während sich die Forschungen anfangs nur auf die Fundstellen im Paltental und in Johnsbach konzentrierten, erfolgten seit der archäologischen Erschließung der Eisenerzer Ramsau in den frühen 1990er Jahren auch in diesem Raum zahlreiche naturwissenschaftliche Untersuchungen. Dabei lassen die Ergebnisse von Preßlinger et al. (2004b, 37) eine Unterscheidung von Schlacken aus verschiedenen Tallandschaften der Eisenerzer Alpen anhand ihrer Spurenelementgehalte vermuten.

Wie aus den archäologischen und archäometallurgischen Untersuchungen hervorgeht, treten an allen prähistorischen Kupferschmelzplätzen in den Eisenerzer Alpen variierende Mengen an Laufschlacken, Plattenschlacken und Schlackensand auf (Preßlinger et al. 1980, 138; Eibner 1982a, 406; Doonan et al. 1996, 20). Das Auftreten dieser drei Schlacken-kategorien ist jedoch nicht nur für die Eisenerzer Alpen charakteristisch, sondern auch für zahlreiche Verhüttungsplätze im gesamten Alpenraum (Kyrle 1920, 257; Zschocke & Preuschen 1932, 99–100; Brun 1983, 13; Piel et al. 1992, 463–464; Herdits 1997, 37–49; Metten 2003, 31–34; Goldenberg 2004, 174; Goldenberg & Rieser 2004, 49). Dabei ist zu beachten, dass die Einteilung in verschiedene Schlackentypen nicht immer in der gleichen Weise erfolgte und es bisher keine einheitliche Terminologie gibt.

So werden Laufschlacken in der Literatur einerseits oft als heterogene, stark blasige „Schlackenklötze“ oder „Schlackenkuchen“ beschrieben, die häufig von Quarzbruchstücken, Erzresten, Sulfidtropfen und Holzkohle durchsetzt sind. Auf der anderen Seite bezeichnen sie aber auch kompakte und weniger poröse Schlackenstücke. Charakteristische Plattenschlacken bestehen dagegen aus bis 5 mm dicken Platten, die homogen kristallin erscheinen und auf ihren Oberflächen oft Abkühlungsrünzeln aufweisen. Einschlüsse von Sulfiden und Quarzen treten nur untergeordnet auf. Als Schlackensand werden mechanisch aufbereitete Schlackenstücke in Sand- bis Gruskorngröße bezeichnet. Auf einigen ostalpinen Schmelzplätzen wird er auch als Magerungsbestandteil von Keramik nachgewiesen (Klose 1918, 36; Preßlinger et al. 2001, 225). Am Kupferschmelzplatz S1 wurde dieser Typ, welcher Ablagerungsmächtigkeiten von mehreren Metern erreichen kann (vgl. Cierny 2008, 63), jedoch nicht gefunden.

Nach den bereits beschriebenen Hypothesen zur bronzezeitlichen Verhüttung sulfidischer Kupfererze werden die nach ihren makroskopischen Eigenschaften unterscheidbaren Schlackentypen verschiedenen Prozessstufen zugeordnet. Neuere Untersuchungen zu Mineralogie und Zusammensetzung von Lauf- und Plattenschlacken zeigen jedoch keine signifikanten Unterschiede, die eine solche Zuordnung mit absoluter Sicherheit zulassen. Vielmehr wird vermutet, dass sowohl Laufschlacken als auch Plattenschlacken in einer einzigen Prozessstufe entstanden, wobei die Plattenschlacken als ideal zusammengesetzte Teilschmelze der Gesamtcharge beim Abstechen aus dem Ofen herausliefen und unter Kontakt mit Sauerstoff rasch abkühlten, während die Laufschlacken im Ofen zurückblieben und nur langsam abkühlten (Piel et al. 1992, 470; Doonan et al. 1996, 21; Herdits 1997, 37; Metten 2003, 73–74).

Bisher wurden an den prähistorischen Schlackenfundplätzen keine Erze gefunden, die einen Rückschluss auf die verhütteten Rohstoffe zulassen. Seit dem Beginn der archäometallurgischen Forschung wird allgemein davon ausgegangen, dass Chalkopyrit die wichtigste Rohstoffquelle für die bronzezeitliche Gewinnung von Kupfer im gesamten Alpenraum ist. Diese Theorie stützt sich unter anderem auf den Nachweis von bronzezeitlichem Bergbau auf chalkopyritische Erze am Mitterberg sowie auf mineralogische Untersuchungen an Schlackenfundorten aus dem gesamten Alpenraum (Zschocke & Preuschen 1932; Preßlinger et al. 1980; Moesta & Kopcewicz 1982; Brun 1984; Moesta et al. 1984; Piel et al. 1992; Preßlinger 1998; Schaer 2003; Goldenberg 2004). Da Fahlerze aufgrund ihrer komplexen Zusammensetzung nur schwer zu verhütten sind, wurde lange Zeit davon ausgegangen, dass sie in der Bronzezeit nicht als Rohstoffe für die Kupfergewinnung herangezogen wurden (Bachmann 1982, 17). Neue Untersuchungen im Raum Schwaz/Brixlegg konnten dies widerlegen (vgl. Goldenberg & Rieser 2004; Huijsmans et al. 2004; Schneider et al. 2009; Klaunzer et al. 2010; Krismer et al. 2011).

Parallel zu den Analysen der Schlacken wurden auch Untersuchungen an den archäologischen Überresten der Schmelzplätze durchgeführt. Nach den Untersuchungen zum Aufbau der Röstbetten der Schmelzplätze „Versunkene Kirche“ und dem Kupferschmelzplatz S1 bestanden die Röstbetten aus langrechteckigen Flächen oberhalb der Ofenanlagen, die von einer Steineinfassung umgeben waren (Eibner 1982b, 305; Preßlinger 1987, 8; Preßlinger et al. 1988, 342; Preßlinger & Eibner 1989a, 236; Doonan et al. 1996, 19; Klemm 2004, 192). Am Schmelzplatz „Flitzen II“ konnte zudem eine stratigraphische Abfolge nachgewiesen werden. So besteht die Basis aus einer Schlackenlage, auf der eine Schicht grobgemagerten Lehms aufliegt, welcher eine etwas feiner gemagerte folgt (Preßlinger 2002, 7; Kunstmann 2004, 33–34; Preßlinger et al. 2009, 40). Ein ähnlicher Lagenbau der Röstbetten ist in Mühlbach, Brennerwald in Tirol dokumentiert. Hier besteht die letzte Schicht aus aufgelegten zerbrochenen Schlackenstücken, die so einen ausreichenden Luftzutritt von unten

ermöglichten (Herdits & Löcker 2004, 183).

Die mineralogischen Untersuchungen des Ofenbaumaterials am Schmelzplatz „Versunkene Kirche“ zeigen, dass vorwiegend phyllitisches Gesteinsmaterial (vorzugsweise Grünschiefer) als Baumaterial für die Rück- und Seitenwände verwendet wurde (Preßlinger et al. 1998, 27; Preßlinger 2002, 8). In der Regel werden sie bis zu einer Höhe von einem Meter rekonstruiert (Eibner 1982b, 305; Herdits & Löcker 2004, 182), wobei es unklar bleibt, ob dies tatsächlich die ursprüngliche Höhe war. Sie besitzen einen eckigen Querschnitt bei einem Innendurchmesser zwischen 40 und 60 cm (Preßlinger et al. 1982, 123, 1988, 342; Preßlinger & Eibner 1989a, 236, 1989b, 7; Preßlinger 2002, 7; Goldenberg 2004, 171). Ob die Schmelzöfen nach vorn hin eine Ofenbrust besaßen, ist bisher nicht eindeutig geklärt. Nach Moesta et al. (1989, 151) existierte eine solche Ofenbrust nie, sondern die Schmelzöfen wurden nach Art eines von drei Seiten mit Steinen umstellten, nach vorne offenen Feuers, von oben oder von vorne mit Luft versorgt. Eibner (1982a, 406) und Doonan et al. (1996, 19) gehen dagegen von geschlossenen Schmelzöfen aus. Sie vermuten, dass die zahlreichen einseitig verschlackten Steine und Bruchstücke gebrannten Tons von der Frontseite der Schmelzöfen stammen, die nach jedem Schmelzvorgang entfernt wurde, um an das geschmolzene Metall zu gelangen (Eibner 1982b, 305; Preßlinger et al. 1986, 227). Bei den Ausgrabungen am Kupferschmelzplatzes S1 wurde am Schmelzofen 2 eine Ofenbrust bis zu einer Höhe von 20 cm über der Ofensohle freigelegt (Klemm 2004, 193), was die Vermutung von Eibner und Doonan et al. unterstützt. Nach Preßlinger et al. (2000, 374–376) war die Ofenbrust mit einer Öffnung für tönernerne Winddüsen versehen, um die notwendige Luft einzublasen. Durch diese Öffnung konnte auch die Schlacke abgezogen werden. Ihren Untersuchungen an Feuerfestmaterialien und Keramiken vom Schmelzplatz „Versunkene Kirche“ zufolge wurden sowohl für die Herstellung der Winddüsen als auch für die Innenauskleidung der Schmelzöfen die gleichen lokalen Tone verwendet, aus denen auch die Gebrauchskeramik gefertigt wurde.

4. Zur Archäologie des Kupferschmelzplatzes S1

Der Kupferschmelzplatz S1 ist einer von 21 prähistorischen Kupferschlackenfundplätzen in der Eisenerzer Ramsau und befindet sich am westlichen Ende dieses Hochtals auf einer Höhe von 1045 m ü. N. N. (Abb. 4.1). Dort liegt er am linken Ufer des Ramsaubaches auf einem leicht abfallenden Hang. Der alte Weg, ein Hohlweg, über den Radmerhals in das dahinter liegende Tal der Radmer zerstörte den Nordrand des Fundplatzes. Auch ein in jüngerer Zeit angelegter Holzbringungsweg über den Ramsaubach zu dem alten Hohlweg schnitt den westlichsten Teil der Anlage. Insgesamt erstreckt sich der Verhüttungsplatz auf einer Fläche von 30×18 m, also über 500 m² (Klemm 2002, 117–118, 2003, 96, 2004, 191).

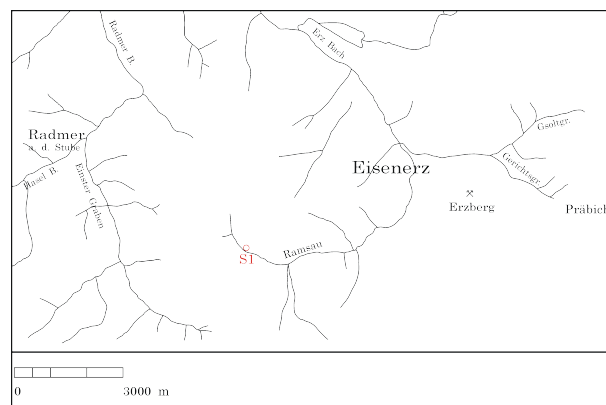


Abb. 4.1.: Der Kupferschmelzplatz S1 in der Eisenerzer Ramsau (nach Klemm 2004, 190).

Während der Ausgrabungen in den Jahren 1992 bis 2006 wurden etwa 80 % des Kupferschmelzplatzes S1 freigelegt (Abb. 4.2). Dabei wurden insgesamt zehn Röstbetten, sechs gesicherte Doppelofenanlagen sowie mehre Schlackenhalde und zahlreiche Gruben unterschiedlicher Größe und Funktion archäologisch dokumentiert. Eine ausführliche Darstellung der archäologischen Befunde und des gesamten Fundmaterials erfolgt in Klemm (in Vorbereitung). Neben der vollständigen archäologischen Dokumentation dieses prähistorischen Verhüttungsplatzes lag die Hauptaufgabe der montanarchäologischen Untersuchungen in der möglichst umfassenden interdisziplinären Erforschung der Anlage. So wurden seit Beginn der Grabungen verschiedene Fachbereiche wie Geophysik, Geochemie, Botanik als auch Archäometallurgie einschließlich erster Schlackenanalysen in das Projekt einbezogen (Neinavaie 1993; Adetunji et al. 1996; Doonan et al. 1996; Drescher-Schneider 2003, 2004; Drescher 2004). Seit 2003 erfolgten darüber hinaus Untersuchungen zur archäoma-

gnetischen Datierung (Schnepp et al. 2005; Aidona et al. 2006) sowie anthrakologische Untersuchungen (Nelle & Klemm 2010) und weitere Schlackenanalysen (Thalhammer & Thalhammer 2006).

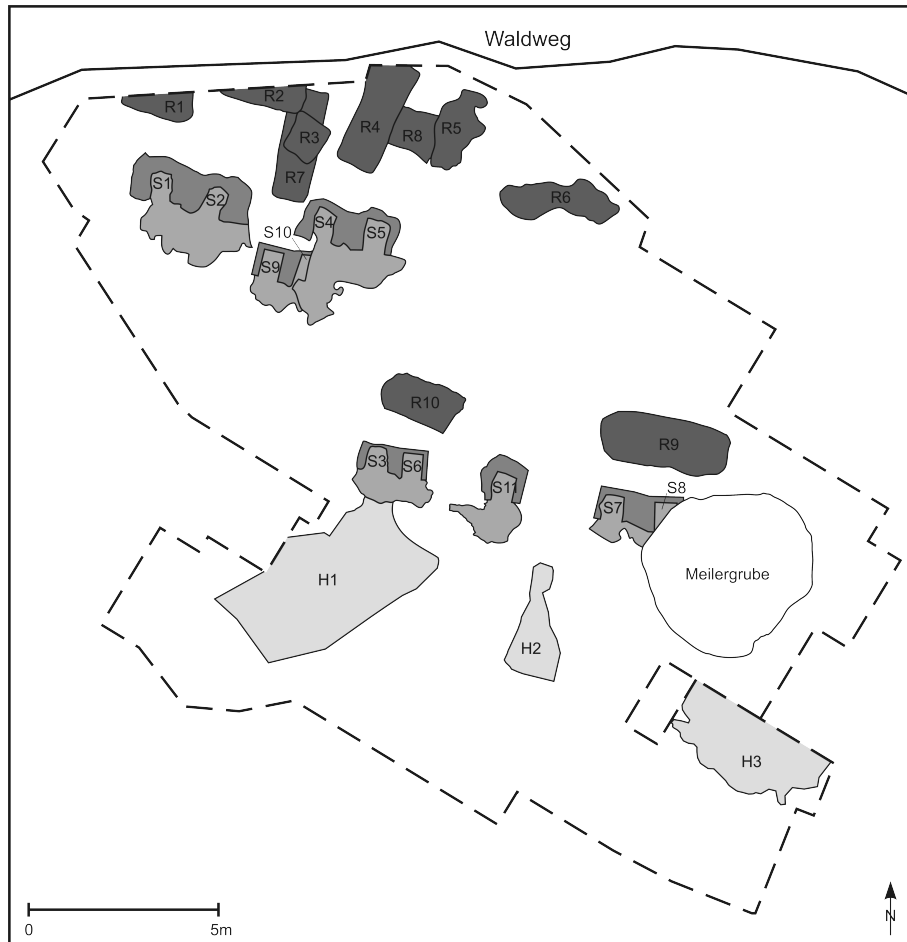


Abb. 4.2.: Übersichtsplan des Kupferschmelzplatzes S1 mit der Lage der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Röstbetten (R1–R10), Schmelzöfen (S1–S11) mit den vorgelagerten Arbeitsbereichen und Schlackenhaldden (H1–H3). Die gestrichelte Linie entspricht der Grabungsgrenze (vereinfacht nach Klemm in Vorbereitung).

Die Datierung des Fundplatzes erfolgte anhand von Keramikfragmenten, einer Bronzenadel sowie über ^{14}C -Daten von Holzkohleresten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen erlauben eine Datierung der Verhüttungsanlagen des Fundplatzes in die Mittlere Bronzezeit (1600–1350 v. Chr.) (Kraus et al. in Vorbereitung). Im westlichen Teil des Schmelzplatzes konnten zudem wenigstens drei Nutzungsphasen aufgrund der stratigraphischen Abfolge identifiziert werden.

So datiert die Doppelofenanlage 9/10 mit dem Röstbett 7 in die früheste Phase des Schmelzplatzes. In einer darauffolgenden Nutzungsperiode wurden die Öfen 9 und 10 abgetragen und die Fläche für den Bau der Doppelofenanlage 4/5 planiert. Das dazugehörige Röstbett 4 wurde nördlich der Öfen 4 und 5 angelegt. Der jüngsten Nutzungsphase werden die Doppelofenanlage 1/2 sowie die Röstbetten 1–3 zugeordnet. Die Röstbetten 5, 6

und 8 können derzeit keinem der genannten Objekte zugeordnet werden (schriftl. Mitt. Klemm 2012).

Die Röstbetten 1–8 wurden auf dem bergwärts und höher liegenden Arbeitsplateau im nordwestlichen Teil des Schmelzplatzes angelegt (Abb. 4.3). Die Röstbetten 1, 2, 6 und 7 wurden längs zum Hang, die Röstbetten 3 und 4 quer dazu errichtet. Die Ausmaße der Röstbetten betragen knapp über 1–3 m Länge und 0,90 m innere Weite und entsprechen den bisher bekannten Befunden aus anderen Fundplätzen (vgl. Eibner 1982a), wobei verschiedene Bauweisen festgestellt wurden (siehe dazu Klemm 2004, 192).



Abb. 4.3.: Die Röstbetten 4, 7 und 8 im Westteil des Kupferschmelzplatzes S1 (Foto: S. Klemm 2003, 119).



Abb. 4.4.: Die Schmelzöfen 1 und 2 im Westteil des Kupferschmelzplatzes S1 (Foto: S. Klemm 2003, 118)

Die Doppelofenanlagen wurden auf einer weiteren Arbeitsebene unterhalb der Röstbetten angelegt. Für die Errichtung der Doppelofenanlage 1 und 2 wurde ein Bereich von 3,20×1,20 m aus dem anstehenden Lehm Boden ausgehoben und die Öfen auf drei Seiten aufgemauert. Der Bereich zwischen den Öfen wurde mit Lehm und Steinen ausgefüllt. Der Innendurchmesser der Öfen betrug 45–55 cm. Die Ofenwände waren noch bis zu einer Höhe von mindestens einem halben Meter erhalten, wobei eine Verschlackung bis zur erhaltenen Maximalhöhe festgestellt wurde. Von Ofen 2 ist zudem die Ofenbrüst bis zu einer Höhe von 20 cm freigelegt worden (Klemm 2004, 193). Bei einigen Öfen wurden außerdem mehrere Lagen von Ofenlehm und Verschlackung festgestellt, was auf eine mehrmalige Verwendung der Öfen schließen lässt. Die Ofensohle war in jedem Fall mit einer Holzkohlenschicht bedeckt. Dem Materialfluss folgend wurden unterhalb der Öfen die Schlackenhalden aufgeschüttet. Die Schlackenhalden zu den Doppelofenanlagen 1/2, 4/5 sowie 9/10 sind jedoch nicht mehr erhalten.

Lediglich im Ostteil der Anlage wurden Schlackenhalden nachgewiesen. Die zeitliche Einordnung dieses Teils des Schmelzplatzes wird jedoch durch die mittelalterliche Kohlemeilergrube erschwert.

Die Schlackenhalde 1 wird den Öfen 3 und 6 zugeordnet, zu denen auch das nördlich der Öfen angelegte Röstbett 10 zu zählen ist, von dem jedoch nur eine rote Verfärbung im anstehenden Boden erhalten ist. Die Schlackenhalde weist abwechselnd schlackenführende



Abb. 4.5.: Die Schlackenhalde 1 im Ostteil des Kupferschmelzplatzes S1 (Foto: S. Klemm 2003, 120).

Schichten und Schichten, die besonders reich an Ofenmaterial waren, auf, was ebenfalls auf den wiederholten Einsatz der Schmelzöfen hinweist. Die Schlackenhalde 2 kann dem Ofen 11 zugewiesen werden, ein zugehöriges Röstbett wurde nicht nachgewiesen. Oberhalb der Öfen 7 und 8 wurde das dazugehörige Röstbett quer zum Hang angelegt. Die Zugehörigkeit der Schlackenhalde 3 zu dieser Doppelofenanlage ist aufgrund der Störung durch die Meilergrube eher fraglich.

Die archäologischen Befunde des Schmelzplatzes zeigen, dass die einheitliche Bauform der bronzezeitlichen Verhüttungsanlagen von C. Eibner auch für diesen Schmelzplatz zutrifft (vgl. Eibner 1982a, 406; Preßlinger & Eibner 1989b, 7, 1993, 28–30, 2004, 68).

5. Ziele der archäometallurgischen Untersuchungen

Wie aus den vorangestellten Beschreibungen hervorgeht, ließ sich die charakteristische Bauweise prähistorischer Kupferverhüttungsanlagen am Kupferschmelzplatz S1 mehrfach nachweisen. Der erste und zugleich am höchsten gelegene Arbeitsbereich umfasste die quer oder parallel zum Hang angelegten Röstbetten. Unterhalb der Röstbetten wurden die Schmelzöfen in den Hang gebaut. Dem Materialfluss folgend befanden sich auf der Böschung zum Bach die Schlackenhalde, wobei diese nur im Ostteil des Schmelzplatzes belegt sind. Auf der gesamten Fläche des Schmelzplatzes wurden bei den archäologischen Ausgrabungen Schlacken dokumentiert und zunächst ihrer Größe und ihrem Gewicht nach aufgenommen. Doonan (1996, 46–47) gliederte sie bei seinen ersten Untersuchungen anhand ihrer äußeren Merkmale in drei Typen. Da diese Gliederung nur an einem Teil der am Schmelzplatz gefundenen Schlacken durchgeführt wurde, war eine erneute bzw. erweiterte typologische Einteilung der Schlacken nach ihrem äußeren Erscheinungsbild zweckmäßig.

Während nach den bisher vorgeschlagenen Modellen für die prähistorische Verhüttung sulfidischer Kupfererze in den Ostalpen die makroskopisch unterschiedlichen Schlackentypen verschiedenen Prozessstufen zugeordnet wurden, zeigten neuere Untersuchungen hinsichtlich der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung der verschiedenen Schlackentypen, dass eine solche Zuordnung nicht zweifelsfrei möglich ist (Piel et al. 1992, 470; Herdits 1997, 37; Metten 2003, 73–74). Auch die ersten archäometallurgischen Untersuchungen der unterschiedlichen Schlackentypen vom Kupferschmelzplatz S1 lassen vermuten, dass alle Schlacken aus der gleichen Prozessstufe stammen (Doonan et al. 1996, 21).

Mit der vorliegenden Arbeit sollte daher der Versuch unternommen werden, die bestehenden Theorien zur prähistorischen Verhüttung sulfidischer Kupfererze anhand naturwissenschaftlicher Untersuchungen an den auf dem Kupferschmelzplatz S1 gefundenen Verhüttungsrelikten zu bestätigen oder zu widerlegen. Im Mittelpunkt standen dabei chemische und mineralogische Analysen der Schlacken und Verschlackungen der Ofenwände sowie einiger aufgefundenen Erze und Metallstücke, um differenzierte Informationen über die verwendeten Ausgangserze, mögliche Zuschläge sowie bei der Verhüttung erhaltene Zwischen- und Endprodukte zu gewinnen. Mößbauerspektroskopische Untersuchungen an einigen Schlacken sollten zudem beitragen, Hinweise auf wichtige Prozessparameter wie Temperatur und Gasatmosphäre im Ofen während der Verhüttung zu erhalten. Ferner be-

stand mittels der Analyse von Bleiisotopenverhältnissen in Schlacken, Erzen und Metallen die Möglichkeit, Aussagen über die Herkunft der verwendeten Erze zu treffen. Allerdings fehlen derzeit in den Eisenerzer Alpen eindeutige Belege für prähistorischen Kupferbergbau.

Aufgrund der stratigraphischen Verhältnisse auf dem Kupferschmelzplatz S1 wurde der westliche Teil der Anlage in drei aufeinanderfolgende Nutzungsphasen untergliedert. Mit Hilfe der durchgeführten Analysen der Schlacken und Verschlackungen der Ofenwände aus den verschiedenen Betriebsperioden sollten Hinweise auf mögliche diachrone Veränderungen in der Rohstoffbasis oder im Prozessablauf gewonnen werden.

Eine Gemeinsamkeit der verhüttungstechnologischen Anlagen wie Schmelzöfen und Röstbetten lag in der Verwendung von Ton als Baumaterial. Die Analyse der Spurenelementgehalte in den Lehmproben ermöglichte dabei einen Vergleich der verschiedenen Baumaterialien, um mögliche Unterschiede aufzuzeigen. Im Vordergrund stand dabei die Frage, ob für den Bau der Röstbetten eine andere Rohstoffquelle genutzt wurde als für den Bau der Schmelzöfen. Aussagen zur Herkunft des Materials waren jedoch nicht möglich, da eine Beprobung potentieller Lagerstätten in der näheren Umgebung des Schmelzplatzes im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgesehen war.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit war letztendlich die Rekonstruktion der bronzezeitlichen Verhüttung sulfidischer Kupfererze am Kupferschmelzplatz S1 und die Stellung des angewandten Prozesses im Vergleich mit anderen bronzezeitlichen Kupferschmelzplätzen in den Ostalpen.

6. Methodik

6.1. Probenahme

Schlacken

Die auf dem Kupferschmelzplatz S1 ausgegrabenen Schlacken sind den einzelnen Anlagen wie Röstbetten, Öfen und den dazugehörigen Vorplätzen sowie den Schlackenhalden zugeordnet. Die archäologische Aufnahme der Schlackenfunde erfolgte dabei zunächst nach Größe und Gewicht der einzelnen Schlackenstücke.

Der Westteil des Schmelzplatzes wird in mindestens drei Nutzungsphasen unterteilt (vgl. Kap. 4). Für eine Untersuchung hinsichtlich möglicher diachroner Veränderungen in der Prozessführung oder der Wahl der verhütteten Ausgangserze erfolgte die Probenahme der Schlacken für jede Nutzungsphase. Dabei wurden sowohl Schlacken aus den Röstbetten Röstbetten 1–3, 4 und 7 sowie von den Vorplätzen der Doppelofenanlagen 1/2, 4/5 und 9/10 beprobt. Für vergleichende Untersuchungen wurden zudem Schlacken aus den Röstbetten 5 und 8 herangezogen.

Einzig im Ostteil der Anlage wurden größere Schlackenhalden archäologisch dokumentiert. Alle Schlackenhalden weisen mehrere schlackenführende Schichten auf. Um der Frage nachzugehen, ob die Schlacken der einzelnen Schichten aus verschiedenen Prozessen stammen, erfolgte die Beprobung der Schlackenhalden unter Berücksichtigung der stratigraphischen Abfolge in den einzelnen Halden. Halde 1 wird der Doppelofenanlage 3/6 und dem Röstbett 10 zugeordnet. Daher erfolgte die Beprobung des Ofens 3 im Hinblick darauf, inwiefern sich die Schlacken der Halde von der Ofenwandverschlackung unterscheiden lassen. Zudem erfolgte die Beprobung des Vorplatzes von Ofen 11, welcher mit Vorbehalt der Halde 2 zugeordnet wird. Für vergleichende Untersuchungen wurden das Röstbett 9 sowie der Vorplatz der Doppelofenanlage 7/8 beprobt.

Generell wurde die Probenahme der Schlacken stets unter Beachtung der von Bachmann (1982, 5) beschriebenen Kriterien durchgeführt. Es wurde daher besonderer Wert darauf gelegt, dass die für die Untersuchungen ausgewählten Schlacken typisch für den jeweiligen Schlackentyp aus den einzelnen Befunden waren. Eine wichtige Rolle bei der Auswahl spielten auch Farbe und Form der Schlacken, weil diese auf unterschiedliche Prozesse bei der Schlackenbildung hinweisen können. Es wurden jedoch keine besonders auffälligen Schlackenstücke beprobt, da diese meist atypisch sind und dann zu Fehlinterpretationen führen

(Bachmann 1978, 69). Andererseits wurden die wenigen atypischen Funde gesondert untersucht, um beispielsweise kleine Reste von bestimmten Prozessstufen zu identifizieren. Besonders wurde darauf geachtet, ob sich vielleicht makroskopische Stücke von Kupferstein finden lassen, die belegen würden, dass Kupferstein als Zwischenprodukt gewonnen wurde. Dies war aber nicht der Fall. Insgesamt wurden zunächst 992 Materialproben makroskopisch begutachtet, von denen 143 Proben für die weiteren Untersuchungen ausgewählt wurden.

Erze

Während der Grabungen wurden neben Schlacken nur sehr wenige Erzstücke auf dem Schmelzplatz gefunden. Da es sich bei dem überwiegenden Teil der gefundenen Erze um Eisenerze handelt, wurden nur insgesamt vier Erzstücke näher untersucht. Diese Untersuchungen dieser Erzstücke ermöglichten erste Aussagen hinsichtlich der für die Verhüttung verwendeten Rohstoffe. Zum Zeitpunkt der analytischen Bearbeitung der Funde vom Kupferschmelzplatz S1 waren aus der unmittelbaren Umgebung des Schmelzplatzes jedoch keine Lagerstätten bekannt, so dass eine weitergehende Untersuchung bezüglich der Rohstoffquellen nicht möglich war.

Baumaterial der Röstbetten und Schmelzöfen

An den bei der Ausgrabung der Schmelzöfen freigelegten Ofensteinen war an der zum Ofeninneren gerichteten Seite die Schlackenschicht vielfach noch erhalten. Bei der Auswahl der zu untersuchenden Stücke wurde besonders darauf geachtet, dass sie aus den verschiedenen Höhen einer Ofenwand stammen. So waren Aussagen über die Prozessbedingungen innerhalb eines Schmelzofens möglich. Insgesamt wurden 24 verschlackte Ofensteine, fünf verschlackte Ofenlehmstücke sowie 13 Schlackenhautproben für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.

Zusätzlich erfolgte eine Beprobung des Lehms von der Auskleidung der Röstbetten und der Ofeninnenwände, um der Frage nachzugehen, ob für den Bau der Röstbetten das gleiche oder ein anderes Material als für den Bau der Schmelzöfen verwendet wurde. Dafür wurden insgesamt 18 Lehmproben, verteilt auf dem gesamten Schmelzplatz, genommen, wovon 16 Proben hinsichtlich ihrer Spurenelementgehalte untersucht wurden.

Metallfunde

Auf dem Schmelzplatz wurden außerdem drei Metallobjekte freigelegt, deren Untersuchung Aussagen über die verwendeten Ausgangserze, deren Verhüttung und das erschmolzene Produkt ermöglichten. Es handelte sich hierbei um eine Bronzenadel sowie um zwei

ungeformte Metallfragmente unbekannter Funktion, vermutlich Reste von Schwarzkupfer.

6.2. Probenaufbereitung

Schlacken

Die Schlackenproben wurden zunächst unter fließendem Wasser mit einer Bürste von anhaftenden Sedimentresten befreit und anschließend mit einer Gesteinssäge geteilt. Daraufhin wurden die Proben zwölf Stunden bei ca. 100 °C getrocknet. Für die pauschalchemischen Analysen wurden von den ausgewählten Probenstücken die verwitterten Randschichten entfernt. Im Anschluss daran wurden die Stücke mittels Quetschmörser auf eine Korngröße von ca. 5 mm zerkleinert, in einer Scheibenschwingmühle aus Wolframcarbid analysenfein gemahlen und abschließend zwölf Stunden bei ca. 100 °C getrocknet. Für die licht- und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden oberflächenpolierte An- und Dünnschliffe hergestellt. Für die Bestimmung der Bleiisotopenverhältnisse wurden ca. 50 mg Probenpulver mit 3 ml konzentriertem Königswasser aufgeschlossen, um das Blei herauszulösen. Um bei der Messung mögliche Störungen durch spektrale sowie nicht spektrale Interferenzen zu vermeiden, wurden die Probenlösungen mittels Ionenchromatographie gereinigt, um eine saubere Bleilösung zu erhalten.

Erze

Die Erzproben wurden zunächst grob gereinigt und von anhaftenden Sedimentresten befreit, zersägt und getrocknet. Anschließend wurde das Probenmaterial auf eine Größe von ca. 2 cm zerkleinert und durch Handklaubung angereichert. Das angereicherte Material wurde dann in einer Scheibenschwingmühle aus Wolframcarbid analysenfein gemahlen und zwölf Stunden bei ca. 100 °C getrocknet. Für die licht- und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden oberflächenpolierte An- und Dünnschliffe hergestellt. Die Probenpräparation für die Bleiisotopenanalyse erfolgte analog zur Aufbereitung der Schlacken.

Baumaterial der Röstbetten und Schmelzöfen

Die Ofensteine, Ofenlehmstücke und Schlackenhautproben wurden unter fließendem Wasser grob gereinigt, zersägt und getrocknet. Da nur die chemische Zusammensetzung der Verschlackung untersucht werden sollte, wurden ausgewählte Stücke zerschlagen und die Schlacke vom Stein bzw. Lehm durch Handklaubung getrennt. Die ausgelesenen Schlackenproben wurden danach in einer Scheibenschwingmühle aus Wolframcarbid analysenfein

gemahlen und zwölf Stunden bei ca. 100 °C getrocknet. Für die licht- und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen an den Ofensteinen wurden oberflächenpolierte An- und Dünnschliffe hergestellt.

Die 16 Lehmproben für die Neutronenaktivierungsanalyse wurden zunächst auf 2 cm Größe zerkleinert, anschließend in einer Achatkugelmühle analysenfein gemahlen. Die Probenpulver wurden dann zwölf Stunden bei ca. 100 °C getrocknet.

Metallfunde

Für die Untersuchung der Metallfunde wurde aus dem größeren Objekt ein Keil herausgesägt. Das kleinere Metallfragment wurde komplett zersägt. Der Keil, eine Hälfte des zweiten Metallfragments sowie eine Probe des Nadelschaftes wurden in Epoxidharz eingebettet und ein polierter Anschliff hergestellt.

6.3. Analytische Verfahren

6.3.1. Polarisationsoptische Untersuchungen

Alle polierten An- und Dünnschliffe wurden polarisationsmikroskopisch untersucht (Zeiss Axioskop 40 A Pol). Aufgrund des hohen Anteils an opaken Phasen in den Proben wurden hauptsächlich Auflichtverfahren angewendet. So ist in den meisten Fällen bereits eine sichere Unterscheidung der einzelnen Phasen möglich.

6.3.2. Rasterelektronenmikroskop (REM) und energiedispersive Röntgenmikroanalyse (EDX)

An 53 polierten An- und Dünnschliffen wurden neben der optischen Mikroskopie Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskop Typ EVO MA 25 der Firma Zeiss durchgeführt. Dafür wurden die angefertigten Schliffe mit Kohlenstoff bedampft, um eine elektrisch leitfähige Oberfläche zu erhalten und so eine Aufladung zu vermeiden. Die Untersuchungen erfolgten im Hochvakuum bei 15 kV Hochspannung. Eine umfassende Darstellung der Grundlagen der Rasterelektronenmikroskopie findet sich in Flegler et al. (1995).

Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der vollständig aufgeschmolzenen Schlackenphasen erfolgte durch Flächenanalysen mittels energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDX). Dabei wurde stets darauf geachtet, dass nur die aus der Schmelze erstarrten Phasen analysiert wurden, da mitgemessene Chargenrelikte oder Kupfersteineinschlüsse die Ergebnisse verfälschen. Ebenfalls mittels EDX erfolgte die Analyse der Zusammensetzung der Kupfersteineinschlüsse, wobei in allen Fällen die Summe der analysierten Elemente auf 100 Gew.-% normiert wurde.

6.3.3. Röntgendiffraktometrie

Die qualitative Bestimmung des Phasenbestandes von vier Schlackenproben erfolgte an einem Pulverdiffraktometer mit einer Cu-Röhre und einem Sekundärmonochromator (Typ D5005 Bragg-Brentano der Firma Siemens). Eine ausführliche Darstellung zu den Grundlagen und Anwendungen der Röntgendiffraktometrie findet sich in Spieß et al. (2009). Die Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit Dr. Christoph Berthold am Institut für Geowissenschaften der Universität Tübingen durchgeführt. Die ermittelten Diffraktogramme wurden mit der EVA-Software von Bruker-AXS ausgewertet. Aufgrund des hohen röntgenamorphen Anteils in den Schlacken sind die Diffraktogramme jedoch nicht sehr aufschlussreich (vgl. Anhang B.6), so dass die Phasenbestimmung ausschließlich mittels Licht- und Rasterelektronenmikroskop erfolgte.

6.3.4. Mößbauer-Spektroskopie

Bei der Mößbauer-Spektroskopie wird die von R. L. Mößbauer 1958 entdeckte Methode zur Beobachtung der resonanten Absorption von Gammaquanten bei Kernübergängen genutzt, um kleinste Verschiebungen und Aufspaltungen von Kernniveaus aufgrund der Hyperfeinwechselwirkung mit der elektronischen Umgebung der Kerne in Festkörpern zu vermessen. Auf diese Weise werden wichtige Informationen über die elektronische und kristallographische Struktur der Festkörper gewonnen, sowie über deren magnetische Eigenschaften und über den chemischen (Valenz-) Zustand der Mößbaueratome (Wagner & Kyek 2004; Gütlich & Schröder 2012). An neun Pulverproben ausgewählter Schlacken erfolgte so die Bestimmung des $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ -Verhältnisses sowie eine qualitative Analyse der Eisenverbindungen. Die Messungen wurden von Dr. Christian Schröder am Institut für Geowissenschaften der Universität Tübingen durchgeführt. Die Mößbauerspektren wurden bei Raumtemperatur mit einer ^{57}Co -Quelle mit einem Transmissionsaufbau der Firma Wissel aufgenommen. Die Spektren wurden über eine Messung einer α -Fe(0) kalibriert und mit Hilfe der „Voigt-based-Fitting (VBF)“ des Recoil Softwarepaketes ausgewertet (schriftl. Mitt. Schröder 2012). Aufgrund der Ergebnisse der Untersuchungen sind Aussagen zu den im Schmelzofen herrschenden Prozessbedingungen wie Schmelztemperatur und Gasatmosphäre möglich.

6.3.5. Röntgenfluoreszenzanalyse

Die pauschalchemische Zusammensetzung von 125 Schlacken und Ofenwandverschlackungen wurde mittels wellenlängendispersiver Röntgenfluoreszenz (WD-RFA) bestimmt (zur Methodik siehe Hahn-Weinheimer et al. 1995). Die Untersuchungen erfolgten am Institut für Geowissenschaften der Universität Tübingen (Dr. Heinrich Taubald, Typ AXS S4

Pioneer der Firma Bruker) sowie am Institut für Geowissenschaften der Universität Heidelberg (Dr. Hans-Peter Meyer, Typ SRS 303 der Firma Siemens)¹. In Tübingen erfolgten die Messungen an Pulverpresstabletten (6 g Probe, 1,2 g Wachs) mit dem firmeneigenen, sogenannten standardlosen Programm „Multi-Res-Vac34“. Dabei werden in 35 Minuten Messzeit pro Probe alle Elemente abgescannt und quantitativ umgerechnet (schriftl. Mitt. Taubald 2011). In Heidelberg wurden die Messungen ebenfalls an Presstabletten durchgeführt und das firmeneigene, standardlose Programm „Eval“ für die Auswertung verwendet (schriftl. Mitt. Meyer 2011).

Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Metallproben erfolgte mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenz und wurde am Curt-Engelhorn-Zentrum für Archäometrie in Mannheim (Typ ARL Quant'X der Firma Thermo Electron Cooperation) durchgeführt. Die Nachweisgrenzen liegen dabei elementspezifisch bei 0,002 Gew.-% für Silber, 0,005 Gew.-% für Selen und Tellur und 0,01 Gew.-% für Cobalt, Blei und Bismut. Durch Störungen des Hauptelementes Kupfer liegt die Nachweisgrenze für Zink nur bei 0,2 Gew.-%. Die Anregung der Proben erfolgte bei 35 und 50 keV mit einer Messzeit von jeweils 1000 s.

6.3.6. Neutronenaktivierungsanalyse (NAA)

Die Bestimmung der Spurenelementgehalte der 16 Lehmproben erfolgte mittels der Neutronenaktivierungsanalyse. Dabei werden durch Bestrahlung der Probe mit Neutronen in einem Reaktor durch Kernreaktionen mit stabilen Nukliden radioaktive Nuklide erzeugt. Die von den radioaktiven Nukliden ausgesandte γ -Strahlung ist für das entsprechende Nuklid charakteristisch und ermöglicht dadurch eine qualitative und quantitative Analyse (Pernicka 2000). Die Untersuchungen wurden mittels eines Gammadetektors vom Typ Coaxial HPGe der Firma Ortec am Curt-Engelhorn-Zentrum für Archäometrie in Mannheim durchgeführt. Die Bestrahlung der Proben erfolgte am TRIGA-Forschungsreaktor des Instituts für Kernchemie an der Universität in Mainz.

6.3.7. Bleiisotopenverhältnisse

Die Bestimmung und Interpretation der Bleiisotopenverhältnisse ist in der archäologischen und vor allem in der archäometallurgischen Forschung eine unverzichtbare Methode für Herkunftsanalysen. Sie beruht auf der Tatsache, dass die Verhältnisse der vier stabilen Bleiisotope durch Abtrennung von Uran und Thorium bei der Bildung des Erzes festge-

¹ Aus logistischen Gründen wurden die Analysen an zwei Instituten durchgeführt, da während des Untersuchungszeitraums Umbauten am Geowissenschaftlichen Institut der Universität Tübingen erfolgten. Einige Schlacken wurden sowohl in Tübingen als auch in Heidelberg gemessen, um eine Vergleichbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu gewährleisten (vgl. Tabelle A.3).

legt werden und sich während der Verhüttung und Verarbeitung zu Metallobjekten nicht mehr ändern. Die Untersuchungen wurden an einem Multikollektor-Massenspektrometer mit induktiv gekoppeltem Plasma (MC-ICP-MS) am Curt-Engelhorn-Zentrum für Archäometrie in Mannheim durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Methodik und Messprozedur findet sich in Niederschlag et al. (2003, 64–67) und in Höppner et al. (2005, 303).

7. Die archäometallurgischen Funde

7.1. Die Kupferverhüttungsschlacken

Nach der Definition von Bachmann (1982, 9–10) bilden Schlacken das hauptsächliche Abfallprodukt bei der Verhüttung von (Kupfer-)Erzen. Ihre Aufgabe ist es, unerwünschte Nebenbestandteile der Charge aufzunehmen. Daher wird ihre Zusammensetzung direkt beeinflusst durch die Zusammensetzung der Erze und ihrer Gangart sowie durch Zuschläge und das verwendete Brennmaterial (Holzkohle, Holz etc.). Aber auch das Baumaterial des Schmelzofens sowie der Lehm der Innenauskleidung bestimmen die chemische Zusammensetzung der Schlacken. In der Regel werden Schlacken als wertloser Abfall an den Schmelzplätzen zurückgelassen, so dass sie zum einen als archäologischer Indikator bei der Suche nach frühen Verhüttungsplätzen dienen. Auf der anderen Seite sind Schlacken meist die einzigen Quellen, die zur Untersuchung der frühen metallurgischen Verfahren herangezogen werden können. So können durch ihre geochemische und mineralogische Analyse Aussagen über die Verwendung der Ausgangserze und mögliche Zuschläge getroffen werden. Darüber hinaus ist es möglich, die im Ofen vorherrschenden chemisch-physikalischen Parameter wie Temperatur und Sauerstoffpartialdruck abzuleiten und die Effizienz des Verfahrens zu bestimmen sowie die Zusammensetzung des erschmolzenen Metalls. In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der mineralogischen, chemischen und mößbauerspektroskopischen Untersuchungen, die an den Schlacken vom Kupferschmelzplatz S1 durchgeführt wurden, vorgestellt. Die Diskussion der Ergebnisse der Bleiisotopenanalyse erfolgt in Kapitel 9.

7.1.1. Schlackentypologie

Die typologische Einteilung der Schlacken des Kupferschmelzplatzes S1 erfolgt anhand ihrer makroskopischen Eigenschaften². Demnach werden die Schlacken in vier Schlackentypen unterteilt³. Dabei handelt sich um Laufschlacken (Typ A), Blasenschlacken (Typ B), Plattenschlacken (Typ C) sowie um Kombinationen aus diesen Typen (Typ A+B). Am Kupferschmelzplatz S1 wurden hauptsächlich Lauf- und Blasenschlacken sowie Schlacken

² In Tabelle A.2 sind die einzelnen makroskopischen Beschreibungen der untersuchten Schlacken dargestellt, die als Grundlage für die Einordnung in die verschiedenen Schlackentypen dienen.

³ Die Bezeichnung der Schlackentypen basiert auf den von Doonan (1996) durchgeführten Untersuchungen und wurde entsprechend ergänzt.

vom Typ A+B ausgegraben. Nur sehr selten treten die charakteristisch dünnen Plattenschlacken auf. Bei der Probenahme wurde die unterschiedliche Häufigkeit der einzelnen Schlackentypen zwar berücksichtigt, jedoch spiegeln die unten aufgeführten Zahlen keineswegs das tatsächliche Mengenverhältnis wider. Von den insgesamt 143 untersuchten Schlacken handelt es sich um 18 Laufschlacken, 60 Blasenschlacken, 55 Schlacken vom Typ A+B sowie 10 Plattenschlacken.

Laufschlacken (Typ A)

Bei den als Laufschlacken (Abb. 7.1) bezeichneten Stücken handelt es sich um kompakte Schlacken, die auf ihrer Oberseite häufig Fließstrukturen aufweisen. Die meisten Stücke sind auf ihrer Unterseite abgeflacht. Die durchschnittliche Dicke der untersuchten Schlacken variiert zwischen 1,2 und 3,2 cm. Auf dem Fundplatz wurden jedoch auch Stücke mit einer Dicke > 5 cm gefunden. Einige wenige Stücke besitzen eine Dicke $< 1,2$ cm. Das Gewicht der untersuchten Schlackenstücke liegt je nach Größe zwischen 30 und 350 g.

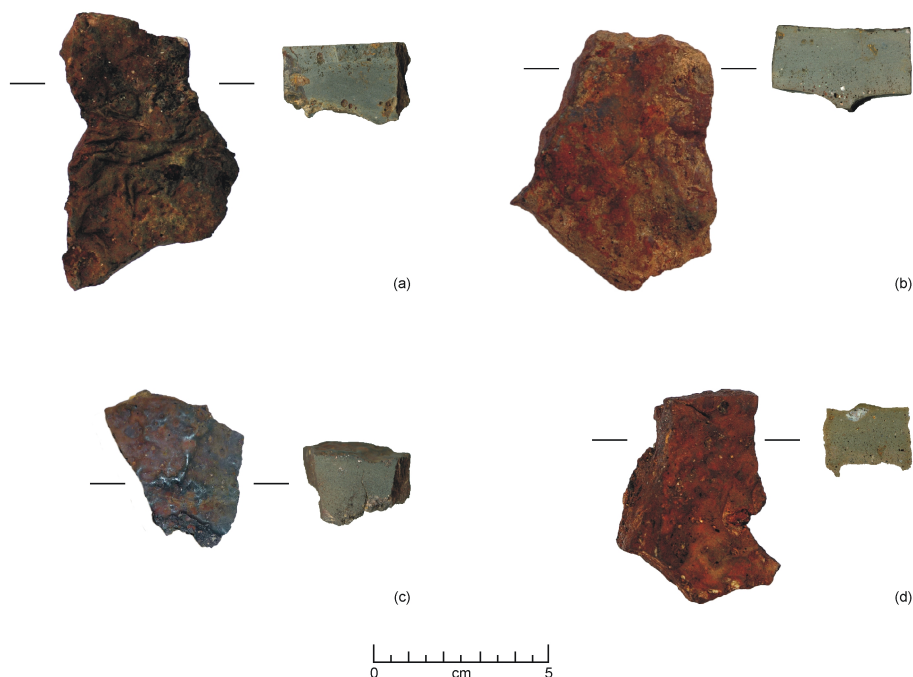


Abb. 7.1.: Typische Laufschlacken vom Kupferschmelzplatz S1. (a) Probe MA-091456 (FNr. 696, Halde 1), (b) Probe MA-092862 (FNr. 2863, Vorplatz Doppelofenanlage 9/10), (c) Probe MA-113472 (FNr. 4160, Vorplatz Ofen 11), (d) Probe MA-092831 (FNr. 1219, Röstbett 2).

Die Schlacken zeigen oberflächlich meist eine olivbraune bis graubraune Färbung. Einige Stücke weisen stellenweise rostbraune Verwitterungsspuren auf. Auffallend ist zudem, dass die Schlacken, die aus den Bereichen der Röstbetten stammen, eine deutlich rötlichere Färbung haben. Im Querschnitt besitzen die Schlacken überwiegend eine dunkelgraue bis braunschwarze Färbung. Bei einigen Schlacken, insbesondere bei denen von den Röst-

betten, ist eine bis zu 1 cm dicke, rostbraune Verwitterungsschicht an den Randbereichen zu erkennen.

Das Gefüge der Laufschlacken erscheint makroskopisch als eine relativ homogene Schlackenschmelze, die nur wenige kleinere Poren ($\varnothing < 1$ mm) aufweist. In wenigen Fällen treten größere Hohlräume ($\varnothing < 3$ mm) im unteren Teil der Schlacken auf. In einigen Schlacken sind zudem partiell aufgeschmolzene Quarzbruchstücke (selten größer als 1–2 mm) sichtbar.

Blasenschlacken (Typ B)

Als Blasenschlacken (Abb. 7.2) oder blasige Laufschlacken werden heterogene, stark blasige Schlackenstücke bezeichnet. Die Blasen sind offensichtlich durch Reaktionsgase entstanden. Einige Schlacken weisen auf der Oberseite wulstartige Verdickungen auf aber keine Fließstrukturen, was darauf hindeutet, dass diese Schlacken innerhalb des Schmelzofens abgekühlt sind. Nur bei wenigen Schlacken sind auch Fließstrukturen zu erkennen. In einigen Fällen lassen sich Holzkohleabdrücke beobachten, teilweise sind auch noch einzelne Holzkohlestücke erhalten. Die Größe der untersuchten Schlackenstücke ist sehr variabel und reicht von $2,4 \times 2,4 \times 2,0$ cm bis $17,8 \times 9,5 \times 4,7$ cm, es wurden jedoch auch weit größere Stücke gefunden. Das Gewicht der untersuchten Schlacken variiert in Abhängigkeit ihrer Größe und der Porosität von 8–660 g.

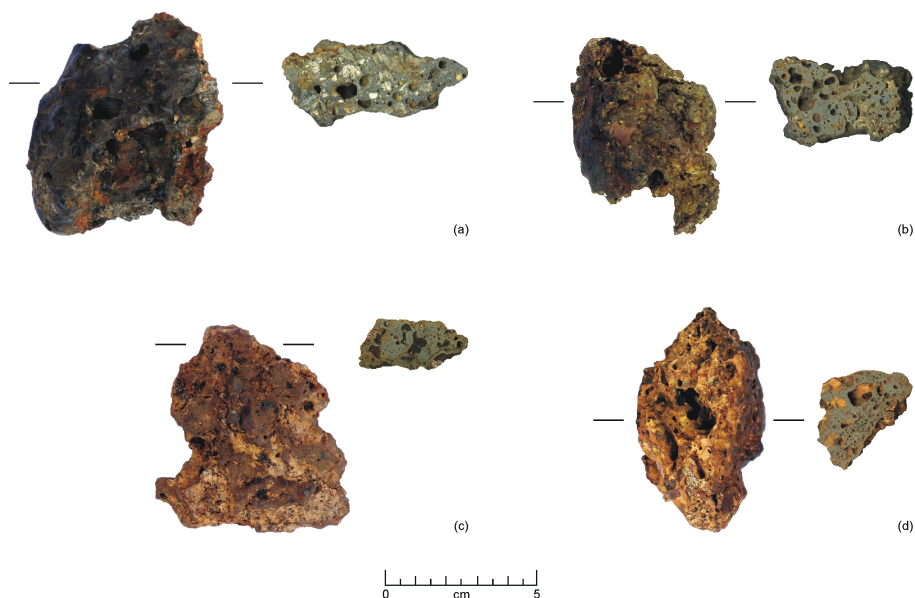


Abb. 7.2.: Typische Blasenschlacken vom Kupferschmelzplatz S1. (a) Probe MA-091448 (FNr. 694, Halde 1), (b) Probe MA-091503 (FNr. 2095, Halde 2), (c) Probe MA-092835 (FNr. 1144, Röstbett 3), (d) Probe MA-092851 (FNr. 3348, Röstbett 9).

Im Handstück besitzen die Schlacken eine olivbraune bis rotschwarze Färbung. Bei mehreren Schlacken sind zudem hellgrüne, sekundär gebildete Kupferminerale erkennbar. Ein

Teil der Schlacken zeigt stellenweise rostbraune Verwitterungsspuren, andere sind nahezu vollständig mit einer Verwitterungsschicht überzogen. Wie bei den Laufschlacken weisen vor allem die Blasenschlacken aus den Röstbetten eine deutlich rötliche Färbung auf. Im Querschnitt sind sie dagegen grau bis dunkelgrau. Bei der Mehrheit der Schlacken, vor allem aus den Röstbetten, sind die Randbereiche von einer bis zu 1 mm dicken Verwitterungsschicht überzogen.

Das stark heterogene Gefüge der Blasenschlacken wird durch die hohe Porosität charakterisiert. Der Durchmesser der Hohlräume liegt durchschnittlich zwischen 0,1 und 0,5 cm, selten größer als 1,5 cm. Zudem sind oft nur partiell aufgeschmolzene Quarzbruchstücke von einer Größe bis 1 cm (in der Regel 0,1–0,4 cm) sichtbar. In wenigen Schlacken wurden auch runde oder ovale ($\varnothing < 3$ mm), metallisch glänzende Sulfideinschlüsse beobachtet.

Plattenschlacken (Typ C)

Die in vergleichsweise geringer Anzahl gefundenen Plattenschlacken (Abb. 7.3) zeichnen sich durch ihre charakteristische Dicke von 0,4–1,1 cm aus und lassen sich dadurch makroskopisch sehr gut von den Laufschlacken unterscheiden. Einige Schlackenstücke weisen einen leicht nach unten gebogenen Rand auf. Sonst handelt es sich um nahezu planparallele Platten. Alle untersuchten Stücke haben auf ihrer Oberfläche mehr oder weniger deutlich sichtbare Fließstrukturen und eine überwiegend flache Unterseite. Die Größe der

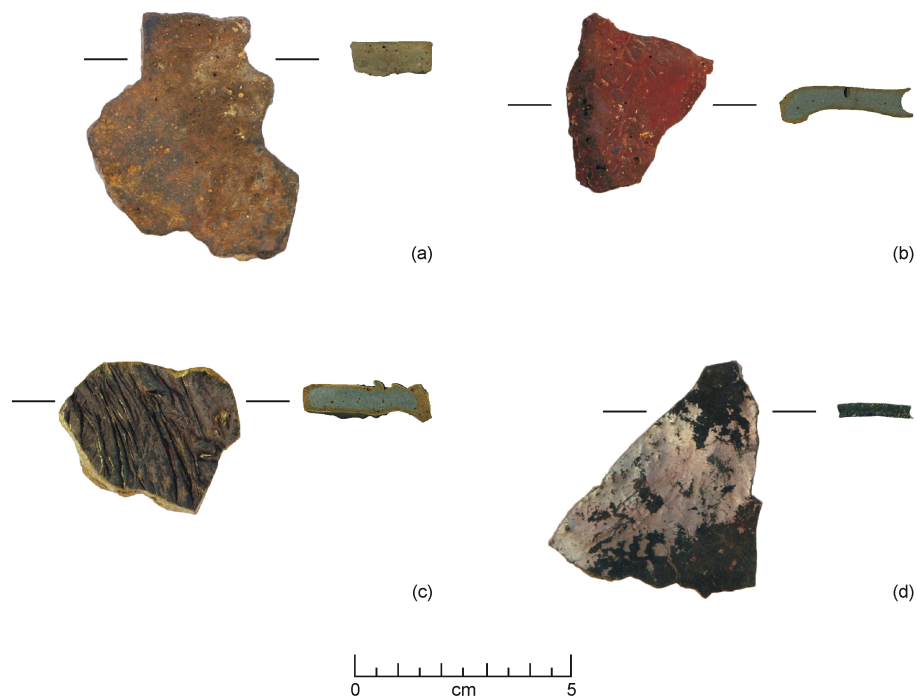


Abb. 7.3.: Typische Plattenschlacken vom Kupferschmelzplatz S1. (a) Probe MA-092838 (FNr. 641, Röstbett 5), (b) Probe MA-092854 (FNr. 1772, Vorplatz Doppelofenanlage 1/2), (c) Probe MA-091513 (FNr. 1936, Halde 2), (d) Probe MA-091471 (FNr. 3042, Halde 3).

Schlacken variiert zwischen 3,3×3,0 cm und 5,5×5,1 cm. Abhängig von der Größe liegt das Gewicht zwischen 15 und 35 g.

Im Handstück besitzen die Plattenschlacken eine rotschwarze Färbung. Die Probe MA-092838 aus dem Röstbett 5 weist als einzige eine dunkelbraune Färbung auf. Im Querschnitt zeigen die Schlacken eine dunkelgraue bis braunschwarze/schwarze Färbung. Einige Proben weisen dabei einen 1–3 mm dicken, rostbraun verwitterten Randbereich auf, der jedoch im Handstück oberflächlich nicht zu erkennen war.

Das Gefüge der Plattenschlacken erscheint makroskopisch als sehr dicht und nahezu porenfrei. Es konnten keine sichtbaren Einschlüsse beobachtet werden.

Schlacken vom Typ A+B

Bei den Schlacken vom Typ A+B (Abb. 7.4) handelt es sich um Kombinationen der vorangegangenen Schlackentypen. Dabei treten hauptsächlich Kombinationen aus Lauf- und Blasenschlacken auf, seltener aus Platten- und Blasenschlacken. Die Oberseite der Schlacken weist häufig Fließstrukturen ähnlich wie bei den Laufschlacken auf, während die Unterseite teils glatt ist, teilweise aber auch wulstige Verdickungen besitzt, die jedoch nicht als Fließstrukturen zu bezeichnen sind. Bei zwei Proben wurden zudem Abdrücke von Holzkohlestücken festgestellt. Die Dicke der untersuchten Schlacken variiert zwischen



Abb. 7.4.: Typische Schlacken vom Typ A+B vom Kupferschmelzplatz S1. (a) Probe MA-092846 (FNr. 3046, Röstbett 9), (b) Probe MA-092849 (FNr. 3994, Röstbett 9), (c) Probe MA-092816 (FNr. 2614, Halde 2), (d) Probe MA-091474 (FNr. 4104, Halde 3).

2,4 und 6,1 cm, wobei der Laufschlackenanteil zwischen 1 und ca. 3 cm misst. Der Übergang zwischen Lauf- zu Blasenschlacke ist meist durch größere, ovale Hohlräume (\emptyset zwischen 1,5 und 2,0 cm) gekennzeichnet. Die Größe der untersuchten Stücke ist ebenfalls sehr unterschiedlich und liegt zwischen 3,1×2,3 cm und 10,8×8,1 cm. Das Gewicht variiert abhängig von Größe und Porosität der Schlacken zwischen 47 und 741 g.

Im Handstück besitzen die Schlacken eine dunkelolivbraune bis schwärzlichbraune Färbung. Ein Teil der Schlacken weist oberflächlich stellenweise rostbraune Verwitterungsspuren auf, andere, vorwiegend Schlacken aus den Röstbetten, sind nahezu vollständig von einer rostbraunen Verwitterungsschicht umgeben. Im Querschnitt zeigen die untersuchten Schlackenstücke eine graue bis dunkelgraue Färbung, während die Randbereiche meist von einer bis 1 mm dicken, rostbraunen Verwitterungsschicht gekennzeichnet sind.

Der als Laufschlacke angesprochene Teil der Schlacken besitzt ein überwiegend dichtes und kompaktes Gefüge mit nur wenigen Poren und wird oft durch größere, ovale Hohlräume (\emptyset zwischen 1,5 und 2,0 cm) vom Blasenschlackenanteil getrennt. Das Gefüge dieses Schlackenteils ist stark heterogen und häufig sind bis 1 cm große, partiell aufgeschmolzene Quarzstücke zu erkennen. Sowohl im Lauf- als auch im Blasenschlackenanteil treten metallisch glänzende Sulfideinschlüsse (\emptyset bis 4 mm) auf.

7.1.2. Gefüge und Phasenbestand

Der Phasenbestand der mittels Lichtmikroskopie untersuchten Schlacken ist in Tabelle A.2 zusammengefasst dargestellt.

Laufschlacken (Typ A)

Die Laufschlacken bestehen mikroskopisch aus einem eng verzahnten Gefüge aus idiomorphem Olivin und untergeordnet Klinopyroxen (Abb. 7.5). Die Olivine repräsentieren dabei die Erstkristallite in den Schlacken und sind häufig prismatisch bis leistenförmig ausgebildet und weisen oft einen Zonarbau auf. In der Grundmasse sind sie meist feinkörnig, in den Randbereichen können sie in größere Kristallskelette übergehen, sie treten hier aber auch in Form von langen, richtungslos gewachsenen Nadeln auf. Die Klinopyroxene sind überwiegend kurzprismatisch bis leistenförmig kristallisiert. Die Zwischenräume sind mit einer glasigen Matrix ausgefüllt, die an einigen Stellen eine beginnende Rekristallisation erkennen lässt. Teilweise treten in den Zwischenräumen auch feinkörnige Spinelle (Magnetit) in Form von Dendriten oder als idiomorphe Phasen auf. Einige Schlacken besitzen einen mehrschichtigen Aufbau, was auf ein mehrmaliges Abstechen der Schlackenschmelze während der Verhüttung zurückgeführt werden kann.

Charakteristisch ist für einige Schlacken das Auftreten von verschiedenen Eisenoxidag-

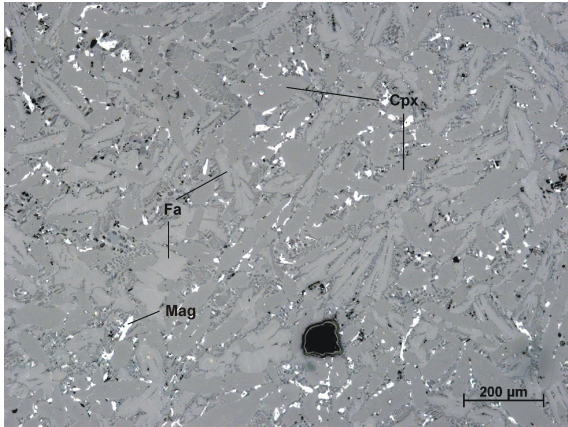


Abb. 7.5.: Mikrogefüge einer Laufschlacke (Probe MA-092862 (FNr. 2863, Vorplatz Doppelofenanlage 9/10)). Fayalite (Fa) sind idiomorph und teilweise in Skelettwachstum, Klinopyroxene (Cpx) leistenförmig ausgebildet. In den Zwischenräumen kristallisieren feinkörnige Magnetite (Mag) (Auflichtaufnahme).

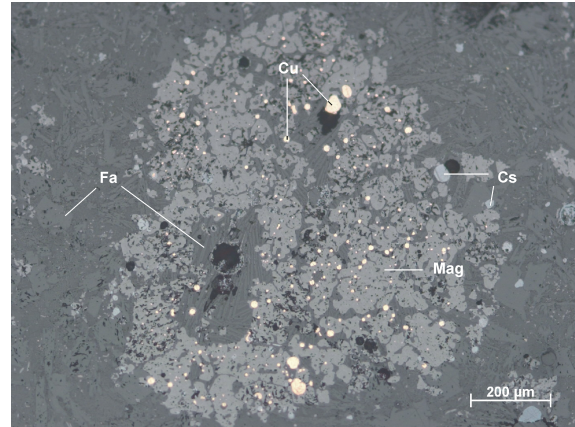


Abb. 7.6.: Magnetitagglomerat in einer fayalitischen Laufschlacke (Probe MA-091479 (FNr. 4433, Halde 3)). Die Magnetitkristalle (Mag) sind teilweise dicht zusammengesintert, in den Zwickeln treten metallisches Kupfer (Cu) und Cu/Fe-Sulfide (Cs) unterschiedlicher Zusammensetzung auf (Fa = Fayalite) (Auflichtaufnahme).

glomeraten. Die Magnetite sind überwiegend xenomorph bis hypidiomorph ausgebildet (Abb. 7.6), wobei in einigen Agglomeraten einzelne Kristalle noch unterschieden werden können. In den Zwickeln der Magnetite treten vereinzelt Sulfide, Cuprit oder metallisches Kupfer auf. Bei den Sulfiden handelt es sich meist um Chalkopyrit, der oft ein dichtes Netzwerk an kupferreichen Entmischungslamellen aufweist sowie um Cu/Fe-Sulfide mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung. In einigen Schlacken sind die Magnetite zu derben Massen zusammengesintert, oft in Verbindung mit Magnesioferritaggregaten. Vermutlich handelt es sich dabei um unaufgeschmolzene Chargenrelikte. Die wenigen Quarzbruchstücke zeigen keine Reaktionssäume, die auf eine Reaktion mit der umgebenden Schmelze hinweisen, was einerseits eine Verwendung von Quarz als Zuschlag vermuten lässt, um eine besser flüssige Schmelze zu erhalten. Andererseits könnte es sich hierbei aber auch um Reste der quarzreichen Nebengesteine der verhütteten Erze handeln.

Blasenschlacken (Typ B)

Das Gefüge der Blasenschlacken besteht mikroskopisch aus prismatisch bis leistenförmig kristallisiertem Olivin und untergeordnet Klinopyroxen (Abb. 7.7) und zeigt somit große Ähnlichkeiten zu den Laufschlacken. Die Olivine lassen häufig einen Zonarbau erkennen. In den Randbereichen treten sie auch in Form von skelettartig ausgebildeten Olivinleisten auf. Die Klinopyroxene sind überwiegend xenomorph ausgebildet. Nur in einzelnen Schlacken sind sie als kurzprismatische oder leistenförmige Körner kristallisiert, oft zeigen sie dann einen skelettartigen Aufbau. Die Zwischenräume werden von einer glasigen, teilweise rekristallisierten Matrix ausgefüllt. Mehrere Schlacken weisen einen mehrschichtigen Auf-

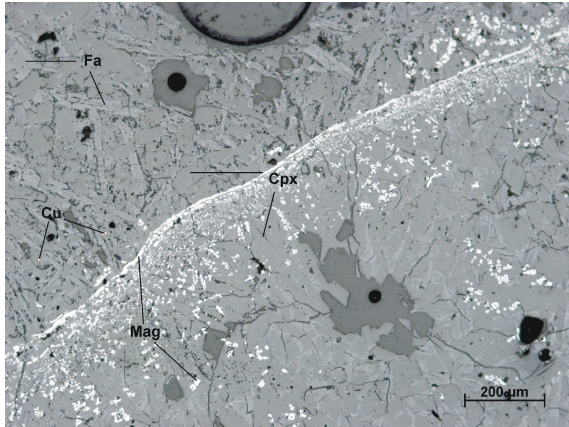


Abb. 7.7.: Mikrogefüge einer Blasenschlacke (Probe MA-092847 (FNr. 2249, Röstbett 9)). Fayalite (Fa) sind überwiegend leistenförmig, teilweise skelettartig ausgebildet, Klinopyroxene (Cpx) oft kurzprismatisch, zum Teil auch fleckig xenomorph. Magnetit (Mag) tritt überwiegend feinkörnig auf, aber auch in Form von Bändern (Cu = metallisches Kupfer) (Auflichtaufnahme).

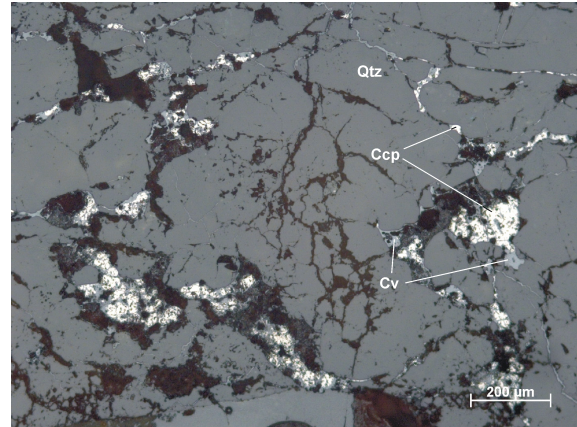


Abb. 7.8.: Cu/Fe-Sulfide in einem unaufgeschmolzenen Quarzbruchstück (Qtz) (Probe MA-091469 (FNr. 3029, Allgemein)). Die Sulfideinschlüsse bestehen aus Chalkopyrit (Ccp) und Covellin (Cv) (Auflichtaufnahme).

bau auf. Dies zeigt sich vor allem anhand durchlaufender Magnetitbänder (Abb. 7.7), die ursprünglich den äußersten Rand der Schlackenoberfläche bildeten und nun die verschiedenen Schlackenschichten voneinander trennen. Dies lässt ein mehrfaches Abstechen der Schlackenschmelze während des Schmelzprozesses vermuten.

In nahezu jeder untersuchten Blasenschlacke wurden unaufgeschmolzene Quarz- bzw. Quarzitkomponenten festgestellt. Dies zeigt sich daran, dass sie an den Rändern keine Reaktionssäume aufweisen, die auf eine Reaktion mit der Schmelze hinweisen. Einige Quarzbruchstücke enthalten Einschlüsse von Cu/Fe-Sulfiden (Abb. 7.8), die auf die quarzreiche Gangart der hydrothermalen Lagerstätten hinweisen. Bei den Sulfiden handelt es sich überwiegend um Chalkopyrit mit Resten von Bornit und Covellin, Pyrit und Pyrrhotin. Die Verteilung von Spinell ist sehr unterschiedlich in den einzelnen Schlacken. Am häufigsten sind feinkörnige, hypidiomorphe Magnetite, die als Spätkristallite in den Zwischenräumen der Silikate ausgebildet sind. Daneben kommen auch größere, dicht zusammengesinterte Agglomerate, oft in Verbindung mit Magnesioferriten, vor, die als unaufgeschmolzene Chargenrelikte interpretiert werden. In deren Zwickel treten zuweilen verschiedene Cu/Fe-Sulfide, in wenigen Fällen auch metallisches Kupfer auf.

Plattenschlacken (Typ C)

Die Plattenschlacken bestehen mikroskopisch hauptsächlich aus einer nahezu homogenen fayalitischen Schlacke. Unaufgeschmolzene Quarzbruchstücke treten nur in einzelnen Schlacken an deren unteren Seite auf. Die Fayalite sind überwiegend als lange, parallele,

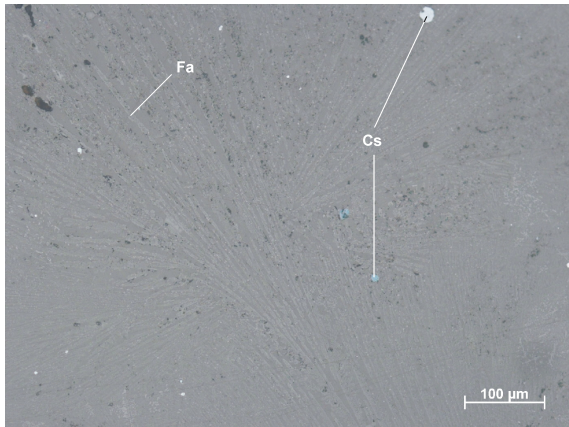


Abb. 7.9.: Mikrogefüge einer Plattenschlacke (Probe MA-091471 (FNr. 3042, Halde 3)). Die Fayalite (Fa) sind im Spinifexgefüge kristallisiert. In den Zwischenräumen können runde bis tropfenförmige Cu/Fe-Sulfide (Cs) unterschiedlicher Zusammensetzung eingelagert sein (Auflichtaufnahme).

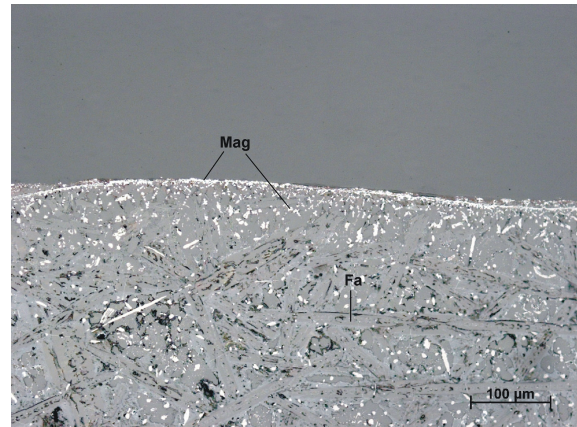


Abb. 7.10.: Mikrogefüge des oberen Bereichs einer Plattenschlacke (Probe MA-091471). Die Fayalite (Fa) sind in Form von langen Leisten kristallisiert. Der überwiegend feinkörnig auftretende Magnetit (Mag) bildet am oberen Rand einen Abkühlssaum (Auflichtaufnahme).

skelettartig ausgebildete Leisten im Spinifexgefüge kristallisiert (Abb. 7.9), was auf eine schnelle Abkühlung hindeutet. Die glasige Matrix füllt die Zwischenräume aus und zeigt bei einigen Schlacken eine beginnende Rekristallisation. In diesen Bereichen besteht das Gefüge aus idiomorphen Olivinkristallen, die häufig einen Zonarbau aufweisen.

In den Zwischenräumen treten gelegentlich runde bis tropfenförmige Cu/Fe-Sulfide auf. Dabei handelt es sich überwiegend um Kupfersteine mit unterschiedlichen Gehalten an Kupfer und Eisen. Untergeordnet finden sich auch metallische Kupfertropfen. In der teilweise rekristallisierten Matrix lässt sich zudem feinkörniger Magnetit beobachten. An den äußeren Randbereichen sind Abkühlungssäume aus feindendritischen Magnetiten ausgebildet, die an den Schlackenoberseiten stärker ausgeprägt sind als an den Unterseiten (Abb. 7.10).

Schlacken vom Typ A+B

Das Gefüge der Laufschlackenanteile der Schlacken vom Typ A+B besteht überwiegend aus prismatischem bis leistenförmigem Olivin. Die Olivinkristalle besitzen oft einen zonaren Aufbau. Untergeordnet tritt generell feinkörniger, xenomorpher, teilweise leistenförmiger Klinopyroxen auf (Abb. 7.11). Die Zwischenräume sind mit einer glasigen bis kryptokristallinen Matrix ausgefüllt. In den oberen Randbereichen treten Olivine häufig als dünne, lange, richtungslos gewachsene Nadeln auf, zum Teil auch in Form von langen Leisten mit Skelettwachstum.

Die Blasenschlackenanteile der Schlacken vom Typ A+B (Abb. 7.12) zeigen ein eng verfilztes Gefüge aus idiomorphem, leistenförmigem Olivin und xenomorph bis hypidiomorph

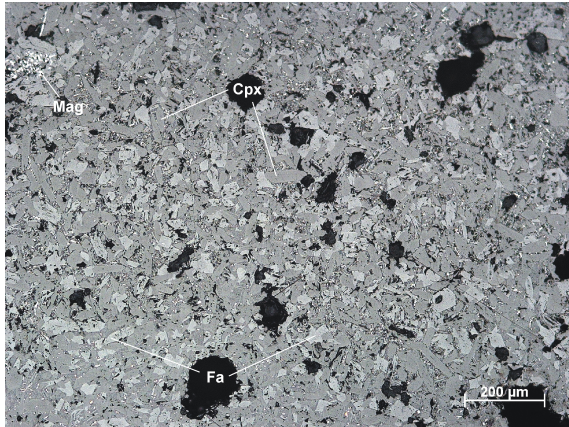


Abb. 7.11.: Mikrogefüge des Laufschlackenanteils einer Schlacke vom Typ A+B (Probe MA-091499 (FNr. 2078, Halde 2)). Das Gefüge besteht hauptsächlich aus Fayalit (Fa) und Klinopyroxen (Cpx). In den Zwischenräumen können feinkörnige Magnetite (Mag) auftreten (Auflichtaufnahme).

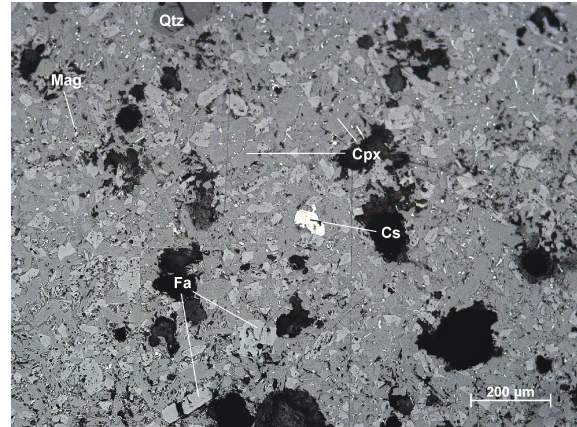


Abb. 7.12.: Mikrogefüge des Blasenschlackenanteils einer Schlacke vom Typ A+B (Probe MA-091499). Das Gefüge besteht hauptsächlich aus Fayalit (Fa) und Klinopyroxen (Cpx). In den Zwischenräumen können feinkörniger Magnetit (Mag) sowie verschiedene Cu/Fe-Sulfide (Cs) auftreten (Auflichtaufnahme).

ausgebildetem Klinopyroxen in einer glasigen bis kryptokristallinen Matrix. Bis auf eine höhere Porosität und das vermehrte Auftreten eingelagerter Quarzkomponenten sind keine signifikanten Unterschiede zu den Laufschlackenanteilen festzustellen. In einigen Poren ist Malachit als Sekundärmineral ausgebildet (Abb. 7.13). Die meisten Quarzkomponenten zeigen keine Reaktionssäume an den Rändern, die auf eine Reaktion mit der Schmelze hinweisen, was vermuten lässt, dass es sich dabei um unaufgeschmolzene Chargenrelikte handelt. Einzelne Quarzstücke enthalten in einzelnen Rissen Aggregate von Pyrit sowie von Chalkopyrit mit Resten von Pyrrhotin und Bornit.

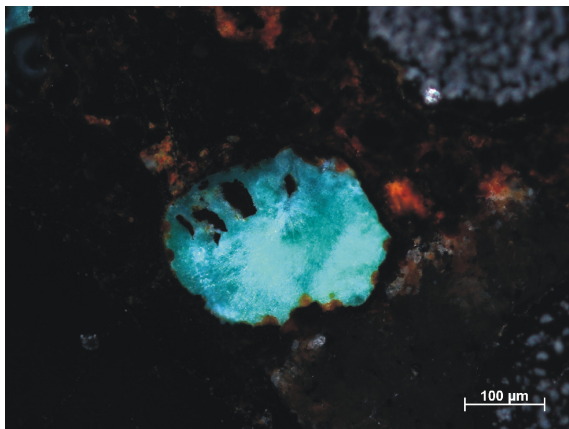


Abb. 7.13.: Sekundär gebildeter Malachit in einem Hohlraum (Probe MA-091487 (FNr. 3666, Halde 3)) (Auflichtaufnahme, gekreuzte Polarisatoren).

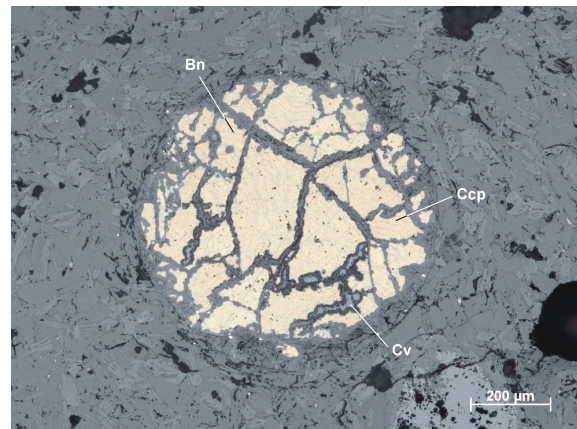


Abb. 7.14.: Cu/Fe-Sulfideinschluss in einer Schlacke vom Typ A+B (Probe MA-091511 (FNr. 2267, Halde 2)). Der Einschluss besteht hauptsächlich aus Chalkopyrit (Ccp) mit lamellaren Entmischungen von Bornit (Bn). In den Rissen ist Covellin (Cv) ausgebildet (Auflichtaufnahme).

In nahezu allen Schlacken sind verschiedene Eisenoxide zu beobachten. Sehr feinkörnige,

hypidiomorphe Magnetite treten innerhalb der teilweise rekristallisierten Matrix zwischen den silikatischen Hauptmineralphasen auf. In einigen Schlacken bilden sie, häufig in Verbindung mit Magnesioferrit, größere Agglomerate, in deren Zwickeln oft Cu/Fe-Sulfide sowie metallische Kupfertropfen auftreten. Bei den Sulfiden handelt sich überwiegend um Kupfersteineinschlüsse, die oft von einem Covellinsaum umgeben sind. Häufig weisen die Sulfide Schrumpfungsrissse auf, die auf eine Volumenverminderung durch Entschwefelung hinweisen. In mehreren Schlacken wurden Aggregate von Chalkopyrit festgestellt (Abb. 7.14), die meist eng mit Bornit verwachsen sind, wobei lamellare Entmischungstexturen dominieren.

7.1.3. Chemische Zusammensetzung der Schlacken

Die chemische Zusammensetzung der Schlacken wird in erster Linie durch die Erzcharge sowie eventuelle Zuschlagsstoffe bestimmt. Beeinflusst wird sie jedoch auch durch die Verwitterungsprozesse, denen die Schlacken während ihrer Bodenlagerung ausgesetzt waren. Die Verwitterung ist abhängig von verschiedenen Faktoren, wie der Zusammensetzung und der Mineralogie der Ausgangsmaterialien, den klimatischen Bedingungen während der Ablagerung sowie den biogenen Prozessen im Boden. Nach Henderson (1982, 262) zeigt bei jeder Verwitterung Aluminium die geringste Mobilität. Im Vergleich zu Aluminium erfolgt in der Regel eine nahezu vollständige Abreicherung von CaO und Na₂O, eine bedeutende Abreicherung von FeO und MgO sowie eine geringe Abreicherung von K₂O und SiO₂. Dagegen ist eine starke Anreicherung von Fe₂O₃ und H₂O festzustellen. Unter vergleichbaren Verwitterungsbedingungen nimmt die Stabilität der in den Schlacken auftretenden Phasen Olivin, Magnetit und Quarz in der angeführten Reihenfolge zu. Daher wurden die verwitterten Randbereiche bei der Aufbereitung der Schlacken so weit wie möglich entfernt, um sekundäre Veränderungen in der Zusammensetzung der Schlacken auszuschließen.

Die Ergebnisse der pauschalchemischen Untersuchungen sind in der Tabelle A.3 dargestellt. Der Gesamteisengehalt wurde als FeO berechnet. Die Untersuchungen zeigen, dass alle makroskopisch unterschiedlichen Schlackentypen weitgehend die gleiche Schwankungsbreite in ihrer Zusammensetzung aufweisen. Es handelt sich überwiegend um typische Silikatschlacken mit durchschnittlichen SiO₂-Gehalten zwischen 25–45 Gew.-%, FeO-Gehalten zwischen 30–50 Gew.-%, CaO-Gehalten zwischen 5–15 Gew.-% und Al₂O₃-Gehalten zwischen 2–12 Gew.-%. Die Gehalte von MgO und K₂O schwanken zwischen 0,2–5 Gew.-%. Die Gehalte der weiteren Nebenelemente wie TiO₂, MnO, Na₂O und P₂O₅ liegen unter 2 Gew.-%.

Eine gemeinsame Darstellung der Haupt- und Nebenkomponenten und somit ihre gegenseitige Abhängigkeit ist also nur durch Vereinfachung möglich. Um alle Komponenten zu

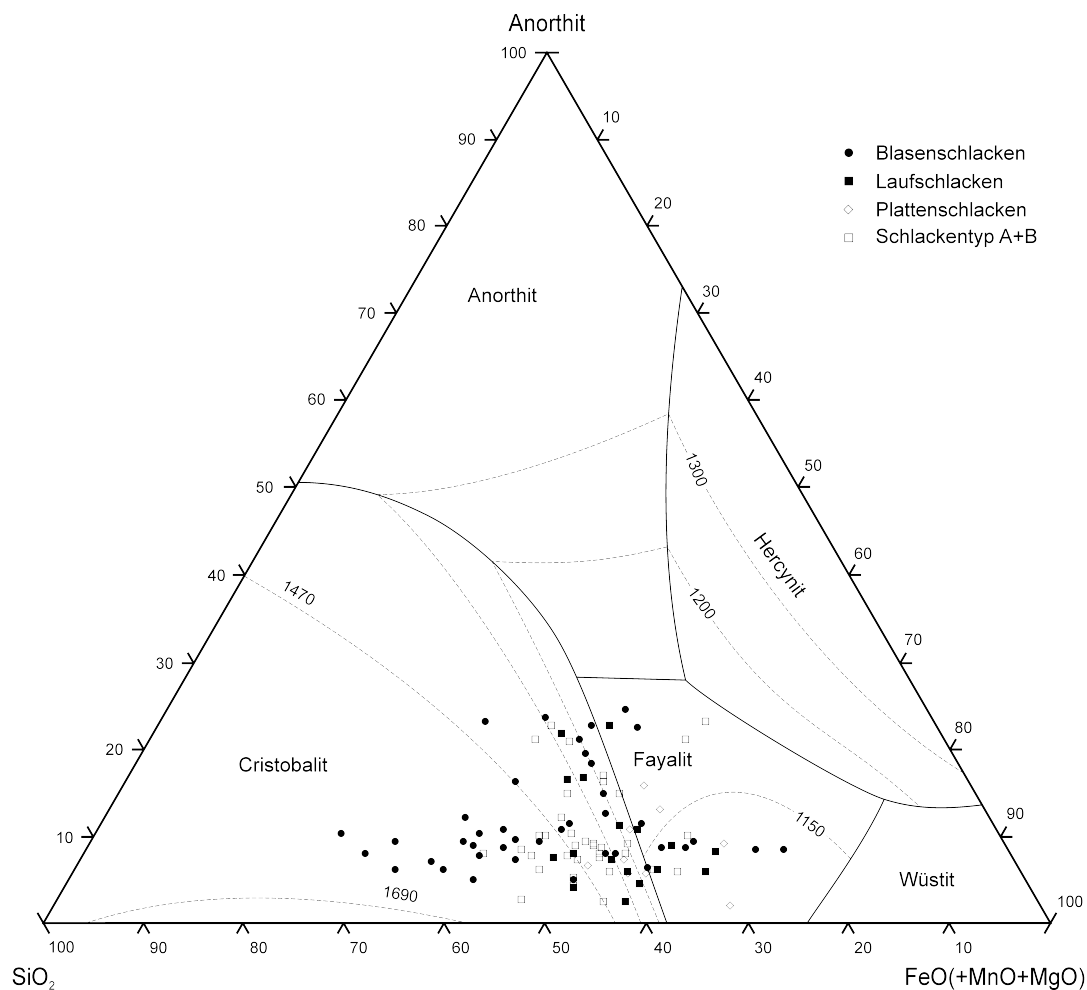


Abb. 7.15.: Darstellung der Pauschalanalysen der unterschiedlichen Schlackentypen im System SiO_2 -Anorthit- $\text{FeO}(\text{+MnO+MgO})$ (erweitert nach Schairer 1942, 252).

berücksichtigen, wurden die Daten daher in das erweiterte ternäre System SiO_2 -Anorthit- $\text{FeO}(\text{+MnO+MgO})$ nach Schairer (1942, 252) aufgetragen (Abb. 7.15). Dabei zeigen vor allem Blasenschlacken und die Schlacken vom Typ A+B die größte Variabilität mit der Tendenz zu einer SiO_2 -reichen Zusammensetzung. Die meisten Lauf- und Plattenschlacken liegen dagegen aufgrund ihrer hohen FeO-Gehalte im Bereich des Fayalitfeldes des Systems, wobei die Laufschlacken eine Verbindung zwischen den Blasenschlacken und den Plattenschlacken bilden. Wie die ebenfalls im Diagramm eingezeichneten Isothermen zeigen, liegt der überwiegende Teil der Analysen in einem Temperaturbereich zwischen 1400 und 1600 °C. Hierbei handelt sich um Temperaturen, die in den (einfachen) Schmelzöfen der mittleren Bronzezeit nicht erreicht wurden. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass die Temperaturen in den bronzezeitlichen Schmelzöfen in einem Bereich unterhalb von 1300 °C lagen (Bachmann 1982, 10). Als Ursache für die Lage der Analysen in dem für bronzezeitlichen Verhältnisse zu hohen Temperaturbereich sind die zahlreichen Ein-

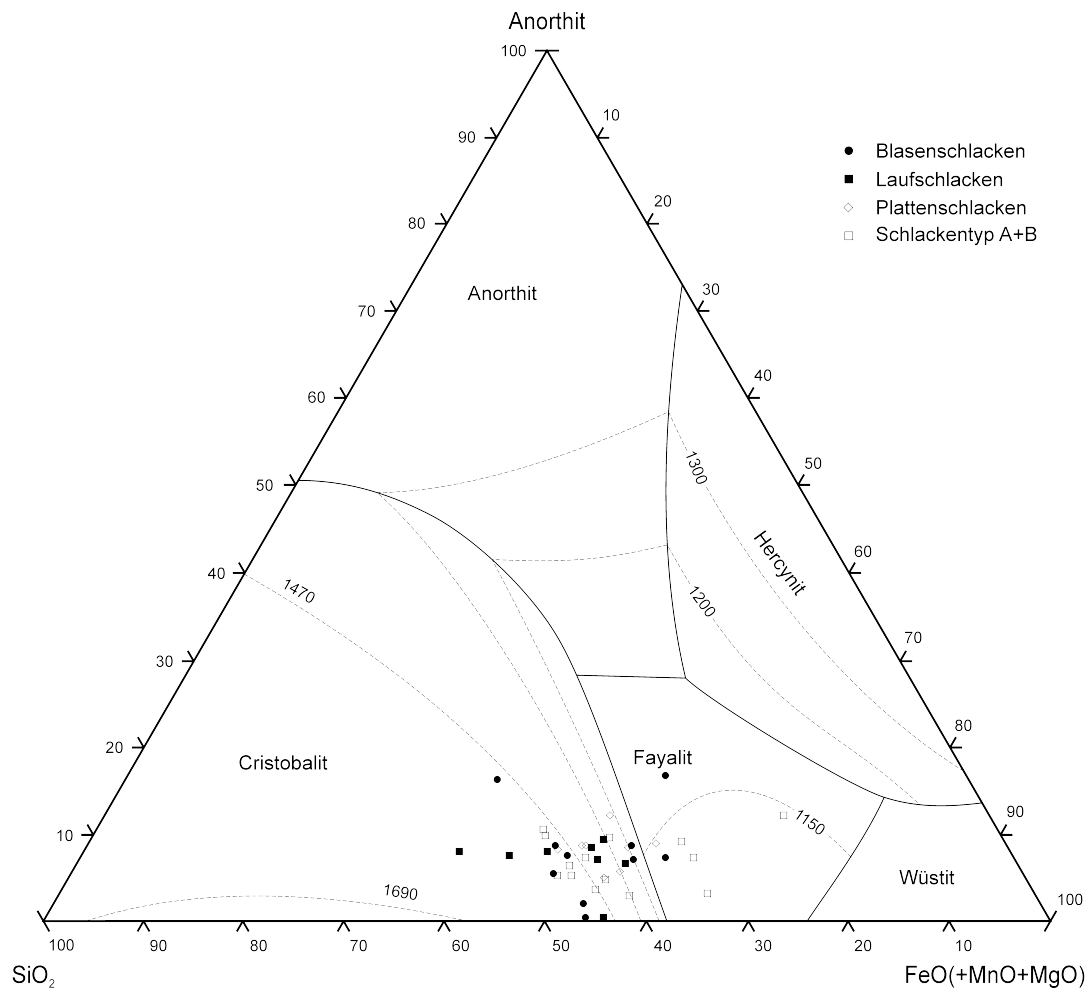


Abb. 7.16.: Darstellung der EDX-Analysen von vollständig aufgeschmolzenen Bereichen verschiedener Schlackentypen im System SiO_2 -Anorthit- $\text{FeO}(\text{+MnO+MgO})$ (erweitert nach Schairer 1942, 252).

schlüsse unaufgeschmolzener Quarzbruchstücke und anderer Chargenrelikte zu nennen, die während der Aufbereitung nicht vollständig von der eigentlichen Schlacke getrennt werden konnten. Eine Abschätzung der Schmelztemperaturen der Schlacken ist daher anhand dieser Daten nicht möglich.

Um eine realistische Abschätzung der Schmelztemperaturen zu gewährleisten, wurden von den vollständig aufgeschmolzenen Bereichen der Schlacken halbquantitative EDX-Flächenanalysen am Rasterelektronenmikroskop durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle A.4 aufgeführt. Bei der Betrachtung der mittels EDX gewonnenen Analysendaten im oben genannten System (Abb. 7.16) zeigt sich für Blasenschlacken und Schlacken vom Typ A+B eine deutliche Verschiebung der Zusammensetzung in Richtung des Fayalitfeldes. Für Lauf- und Plattenschlacken, die nur wenige unaufgeschmolzene Quarzeinschlüsse enthalten, ist kaum eine Änderung zu beobachten. Es zeigt sich außerdem, dass eine Differenzierung der makroskopisch unterschiedlichen Schlacken-

typen anhand ihrer chemischen Zusammensetzung nicht möglich ist. Jedoch ermöglicht die Zusammensetzung der vollständig aufgeschmolzenen Bereiche in den Schlacken eine Abschätzung der Schmelztemperaturen. Demnach wurden die Schlacken in einem Temperaturbereich von ca. 1150–1300 °C gebildet.

7.1.4. Mineralchemische Zusammensetzung der Schlackenphasen

Die mit dem Lichtmikroskop bestimmten Schlackenphasen wurden hinsichtlich ihrer chemischen und mineralogischen Zusammensetzung mittels Rasterelektronenmikroskop und Röntgenmikroanalyse (EDX) genauer untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Folgenden für die einzelnen Phasen vorgestellt.

Olivine

Die chemische Zusammensetzung der Olivine in den Schlacken wurde im Rasterelektronenmikroskop mittels Punktanalysen bestimmt. Dabei wurden pro Probe mindestens fünf Messungen an verschiedenen Stellen durchgeführt, um eine repräsentative Aussage über die Variationsbreite der Olivinzusammensetzung in der Schlacke zu erhalten (Tabelle A.5). In Abhängigkeit von der Gesamtzusammensetzung der jeweiligen Schlacken variiert die

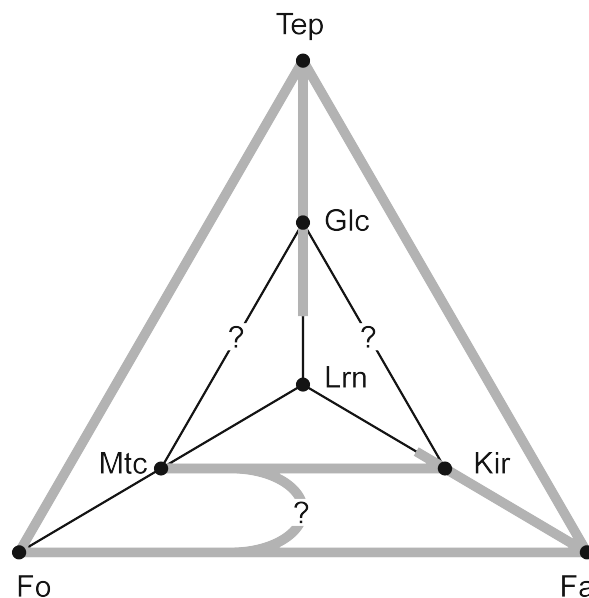


Abb. 7.17.: Mischkristallreihen (grau) der häufigsten Olivine im System Forsterit (Fo)-Fayalit (Fa)-Larnit (Lrn)-Tephroit (Tep) (Glc = Glauchroit, Mtc = Monticellit, Kir = Kirschsteinit) (nach Hauptmann 1985, 49).

Zusammensetzung der Olivine entsprechend der Mischkristallreihen (Abb. 7.17) innerhalb ihrer wichtigsten Endglieder: Fayalit (Fe_2SiO_4), Forsterit (Mg_2SiO_4), Larnit (Ca_2SiO_4) und Tephroit (Mn_2SiO_4).

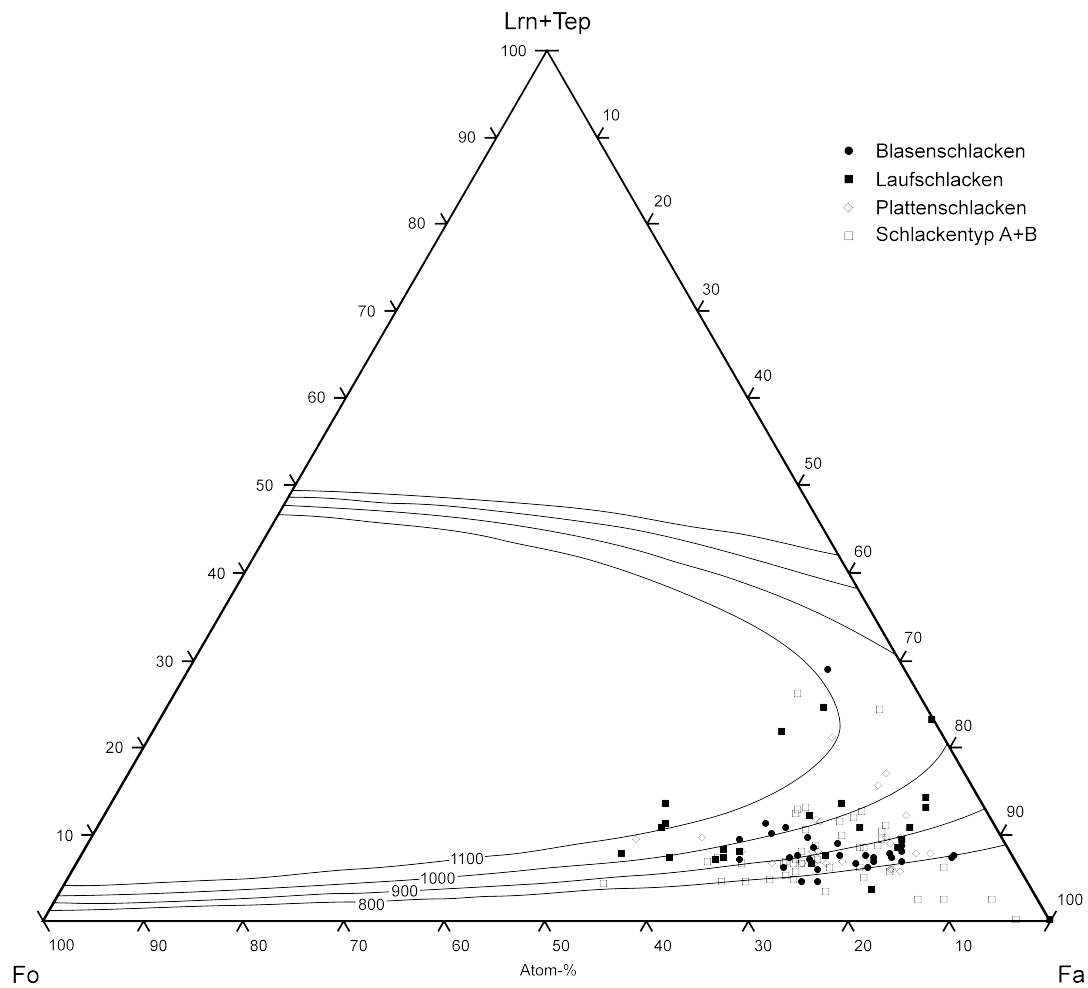


Abb. 7.18.: Darstellung der Zusammensetzung von Olivinen verschiedener Schlackentypen im System Forsterit (Fo)-Fayalit (Fa)-Larnit (Lrn) + Tephroit (Tep) mit eingetragenen Isothermen nach Davidson & Mukhopadhyay (1984, 261).

Da die Gehalte von MnO in der Regel unter 2 Gew.-% liegen, wurden für die Darstellung der Ergebnisse der EDX-Analysen die Endglieder Larnit und Tephroit zusammengefasst (Abb. 7.18). Für die meisten Schlackenolivine zeigt sich ein Kristallisationstrend, der mit dem natürlicher Olivine vergleichbar ist. Er verläuft entsprechend der Mischkristallreihe nach Bowen & Schairer (1935, 163) von einer forsterit- zu einer fayalitreichen Zusammensetzung. Dabei fällt auf, dass unabhängig vom Mg/Fe-Verhältnis der Calciumgehalt der Schlackenolivine deutlich höher liegt als in natürlichen Olivinen, die in Abhängigkeit der Kristallisationsbedingungen nur ca. 0,1 Gew.-% Calcium enthalten (Simkin & Smith 1970, 318-320).

Die Kristallisation von calciumreichen Olivinen ist dabei auf relativ calciumreiche Schlacken begrenzt. Sie weisen eine Zusammensetzung nahe dem Schmelzminimum des Systems Fayalit-Larnit auf und sind auf eine Entmischung im Subsolidusbereich zurückzu-

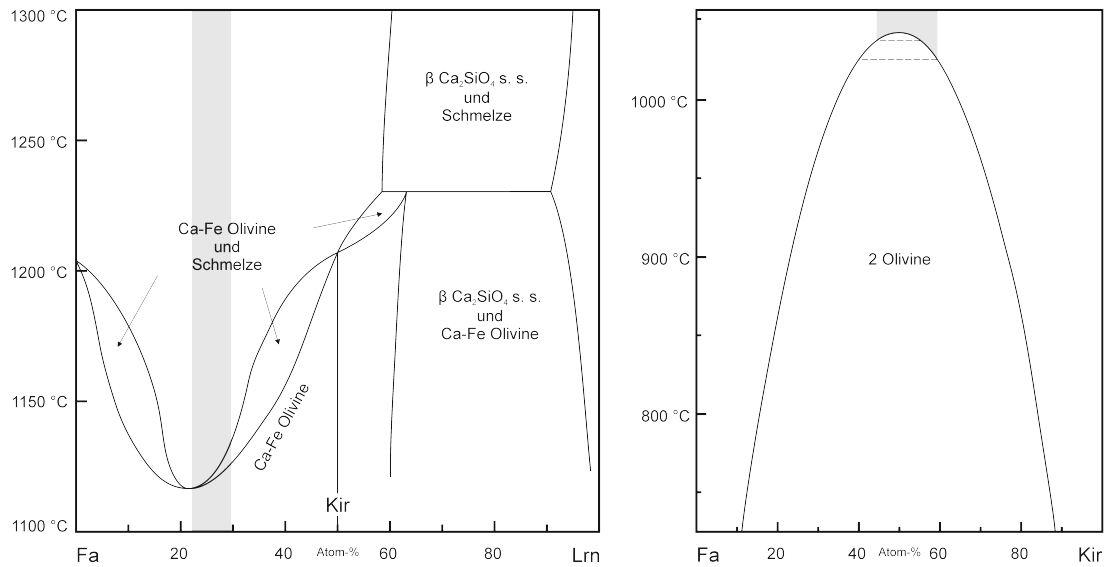


Abb. 7.19.: Phasendiagramm des Systems Fayalit (Fa)-Larnit (Lrn) (modifiziert nach Mukhopadhyay & Lindsley 1983, 1091–1092). Die Zusammensetzung der untersuchten calciumreichen Schlackenolivine (grau) liegt nahe dem Schmelzminimum zwischen Fayalit und Kirschsteinit (Kir). Die Entstehung dieser Olivine ist auf die Mischungslücke des Systems (rechts) zurückzuführen.

führen (Abb. 7.19). Mukhopadhyay & Lindsley (1983, 1091–1092) beschreiben eine ausgedehnte Mischungslücke unterhalb des Schmelzminimums, die sich nach Untersuchungen von Hauptmann et al. (1984, 86) bis zu einem MgO-Gehalt von 20 Atom-% im System Forsterit-Fayalit-Larnit fortsetzt. Aufgrund dieser Mischungslücke entmischen sich

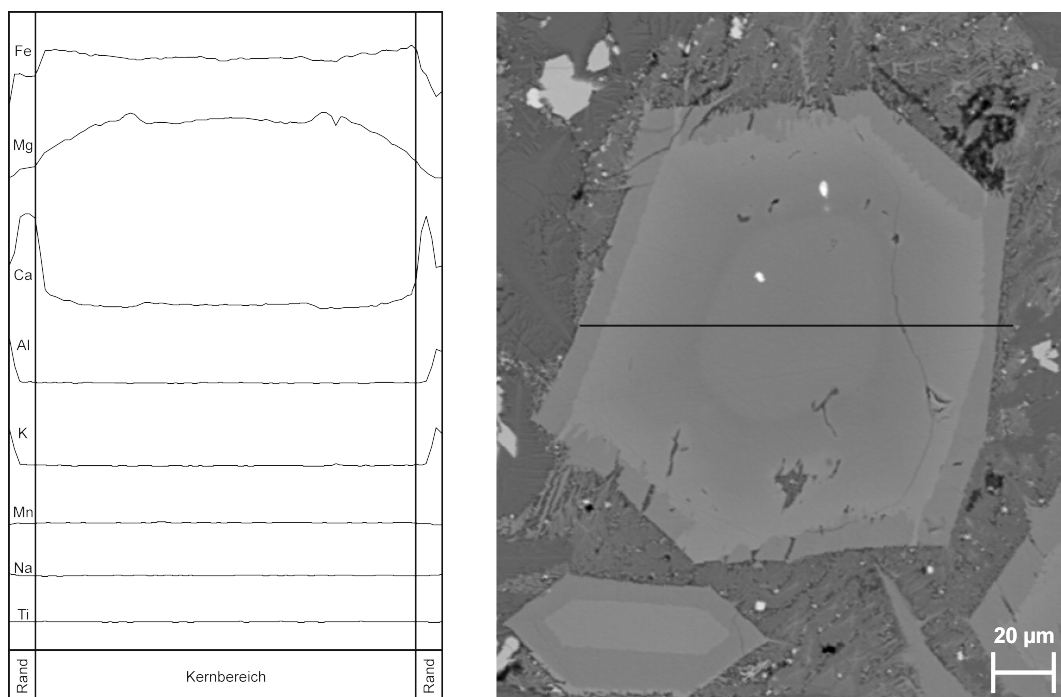


Abb. 7.20.: EDX-Linienprofil durch einen zonierten Olivin (Probe MA-092853 (FNr. 1570, Vorplatz Doppelfenanlage 1/2)). Im Kernbereich zeigt sich eine hohe Konzentration an FeO und MgO, während im Randbereich eine Anreicherung von Al_2O_3 , CaO und K_2O zu beobachten ist.

in Abhängigkeit der Abkühlungsgeschwindigkeit calcium- und eisenreiche Olivine. Die untersuchten calciumreichen Olivine würden dabei einer Entmischung bei ca. 1050 °C entsprechen.

In den meisten Schlacken aus allen Bereichen des Schmelzplatzes war unter dem Mikroskop zu erkennen, dass die Olivinkristalle häufig zoniert aufgebaut sind. In Abb. 7.20 ist ein mittels EDX aufgenommenes Linienprofil eines zonierten Olivinkristalls dargestellt. Dabei zeigt sich neben den Unterschieden in den Hauptkomponenten FeO und MgO eine Anreicherung von CaO, Al₂O₃ und K₂O in den Randbereichen.

Klinopyroxene

Klinopyroxene treten als Nebenbestandteile vorwiegend in Blasen- und Laufschlacken auf sowie in Schlacken vom Typ A+B. In der Regel kristallisieren sie nach der Ausbildung der Olivine. Die Analyse der chemischen Zusammensetzung der Klinopyroxene (Tabelle A.6)

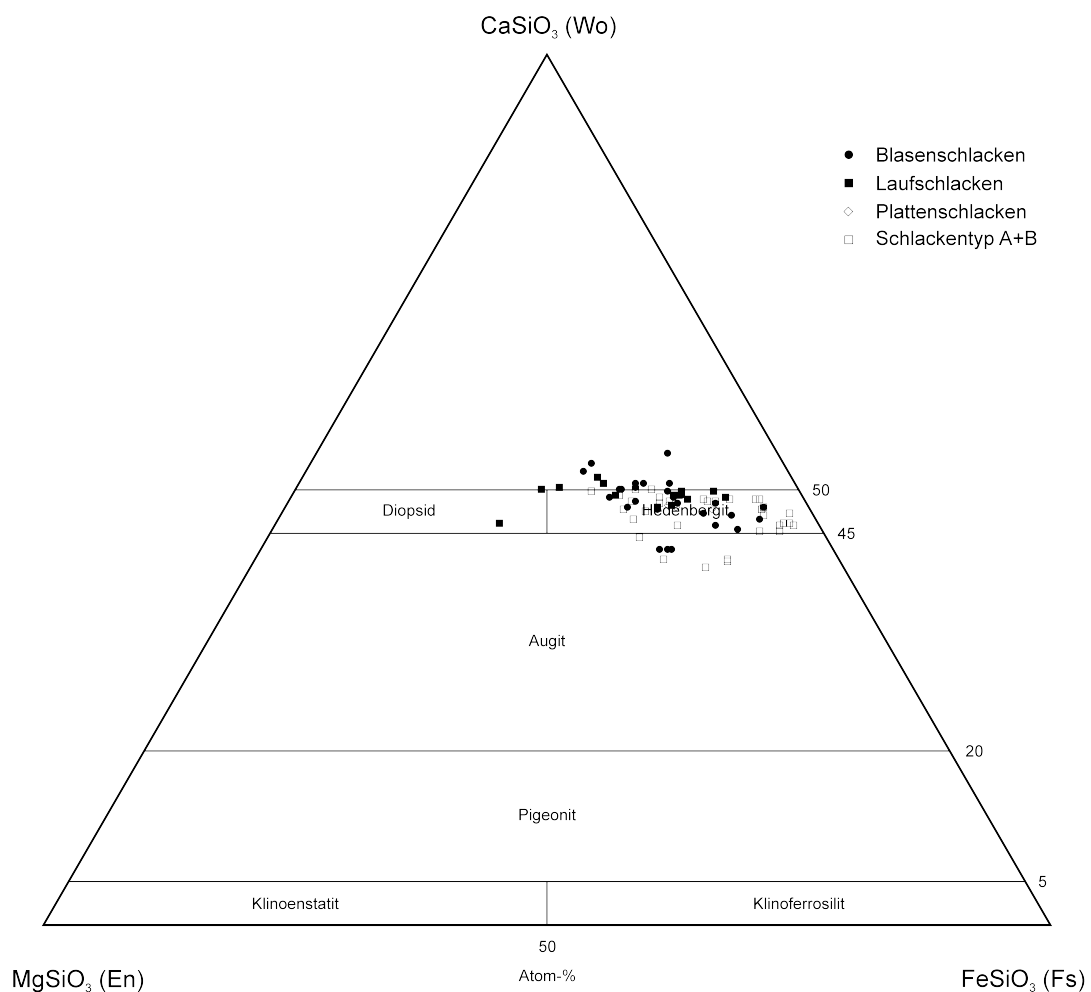


Abb. 7.21.: Darstellung der Zusammensetzung von Klinopyroxenen verschiedener Schlackentypen im System MgSiO_3 (En)- CaSiO_3 (Wo)- FeSiO_3 (Fs) nach Morimoto (1989, 150).

ergab, dass es sich hierbei ausschließlich um calcium- und eisenreiche Pyroxene handelt. Aufgrund der Tschermak-Substitution können bis zu 7 Gew.-% Al_2O_3 eingebaut sein.

Die chemische Zusammensetzung der Pyroxene liegt entsprechend dem Mg- bzw. Fe-Gehalt zwischen Augit und Hedenbergit mit Schwerpunkt bei Hedenbergit (Abb. 7.21). Auffallend ist, dass einige Projektionspunkte zu weit in der Wollastonitecke liegen, was darauf zurückzuführen ist, dass ein Teil des Calciums an die Tschermak-Komponente ($\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$) gebunden ist. Die Tschermak-Komponente führt dabei zu einer Verschiebung der thermischen Stabilität des Klinopyroxens. Nach Bowen et al. (1933, 217) ist reiner Hedenbergit nur bei Temperaturen unter $965\text{ }^\circ\text{C}$ stabil, während aluminiumhaltiger Hedenbergit schon bei deutlich höheren Temperaturen kristallisiert (Kushiro 1960, 553). Die Kristallisationstemperatur in den untersuchten Schlacken konnte jedoch nicht festgestellt werden.

Glasphasen

In den meisten untersuchten Schlacken ist die glasige Matrix nicht mehr erhalten. Sie zeigt verbreitet Rekristallisationserscheinungen und liegt als feinkörniges Gemisch aus verschiedenen Mineralphasen vor, welche sich jedoch aufgrund ihrer geringen Korngröße nicht näher bestimmen lassen. Für die Untersuchungen wird daher dieses Gemisch aus Glas und kryptokristalliner Matrix als „Glasphase“ angesprochen. Hauptbestandteil dieser

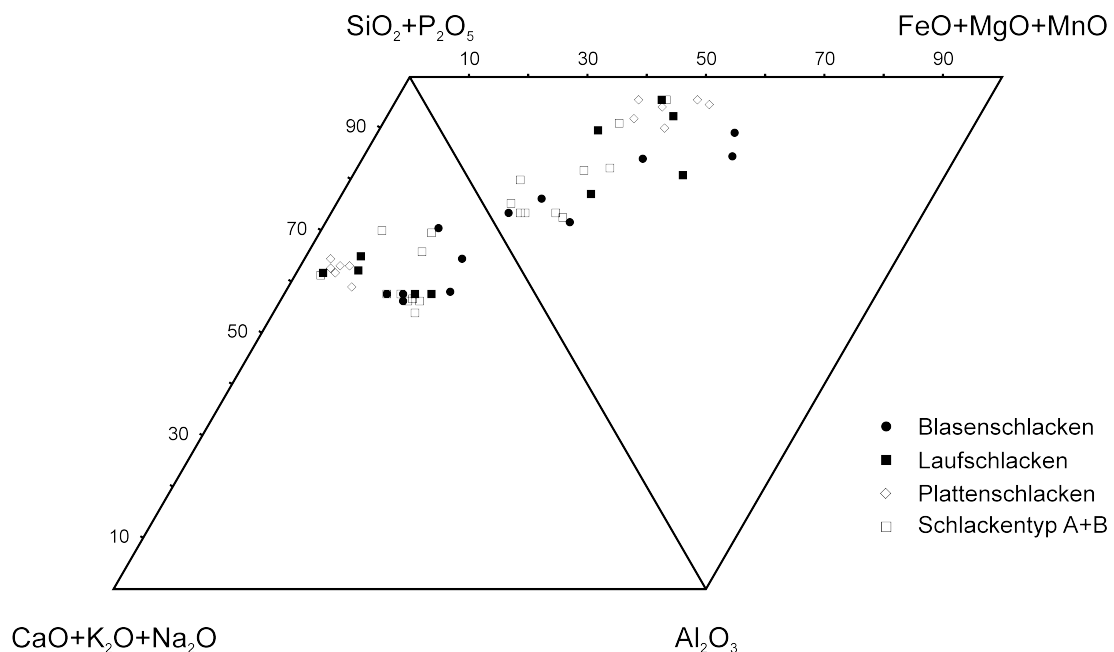


Abb. 7.22.: Darstellung der Mittelwerte der Glasanalysen verschiedener Schlackentypen in den Systemen $\text{CaO}+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2+\text{P}_2\text{O}_5-\text{Al}_2\text{O}_3$ und $\text{SiO}_2+\text{P}_2\text{O}_5-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{FeO}+\text{MnO}+\text{MgO}$.

Gläser ist SiO_2 mit Gehalten zwischen 30 und 65 Gew.-% (Tabelle A.7). Die wichtigsten

Nebenbestandteile sind FeO (3–45 Gew.-%), Al₂O₃ (3–25 Gew.-%), CaO (ca. 15 Gew.-%) und K₂O (ca. 10 Gew.-%). Die Untersuchungen zeigen, dass die Glasphasen in den Lauf- und Blasenschlacken sowie in den Schlacken vom Typ A+B eine starke Variabilität mit einer Tendenz zu einer eisen- und aluminiumreichen Zusammensetzung aufweisen (Abb. 7.22). Plattenschlacken besitzen dagegen eine calciumreiche und aluminiumarme Zusammensetzung.

Spinelle

Die untersuchten Schlacken enthalten neben silikatischen Phasen verschiedene komplex zusammengesetzte Spinelle. Aufgrund ihres Auftretens werden die Spinelle wie folgt unterschieden. Zum einen handelt es sich um feinkörnige, hypidiomorph bis xenomorph ausgebildete Spinelle, die innerhalb der glasigen, teilweise rekristallisierten Matrix zwischen den silikatischen Hauptmineralphasen auftreten (Abb. 7.23). Zu dieser Gruppe werden auch grobkörnige, meist idiomorphe, skelettartige Spinelle gezählt. Es handelt sich ausschließlich um Magnetite mit bis zu 4 Gew.-% MgO und Al₂O₃ (vgl. Tabelle A.8). Die Anteile an MnO, TiO₂ und CaO liegen im Mittel unter 2 Gew.-%. In einigen Proben wurden sehr Cu-reiche Spinelle mit bis zu 5,5 Gew.-% Cu analysiert. Die Gehalte an SiO₂ betragen durchschnittlich 1,2 Gew.%, was auf Verunreinigungen durch Silikate oder auf den Einbau von SiO₂ in die Spinellstruktur zurückzuführen ist. Diese Spinelle sind vermutlich im Verlauf der Schlackenbildung aus der Restschmelze kristallisiert.

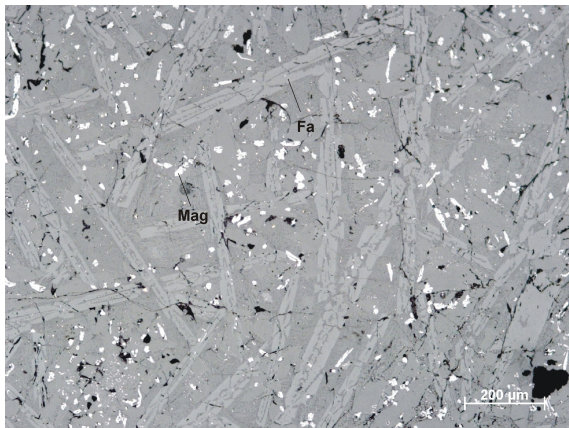


Abb. 7.23.: Auflichtaufnahme von feinkörnigem Magnetit (Mag) in einer Schlacke vom Typ A+B (Probe MA-092816 (FNr. 2614, Halde 2)) (Fa = Fayalit).

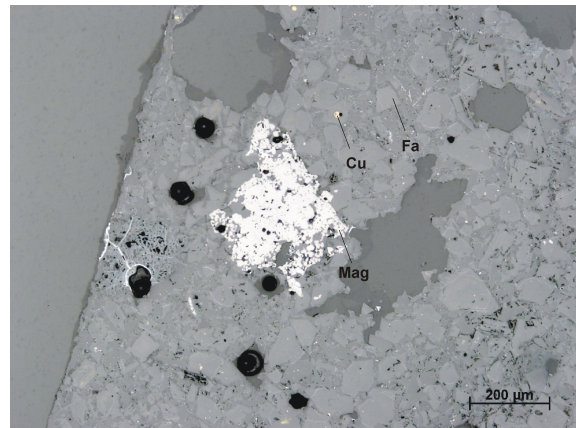


Abb. 7.24.: Magnetitagglomerat in einer Blasenschlacke (Probe MA-092828 (FNr. 258, Röstbett 1)). Die Magnetitkristalle (Mag) sind dicht zusammengewachsen, teilweise können noch einzelne Kristalle identifiziert werden (Cu = metallisches Kupfer, Fa = Fayalit) (Auflichtaufnahme).

Die zweite Gruppe besteht aus Spinellaggregaten, die nicht homogen verteilt, sondern meist lokal konzentriert sind (Abb. 7.24). Es handelt sich hierbei überwiegend um Magne-

sioferrite oder Magnetit-Magnesioferrit-Agglomerate. Der MgO-Gehalt reicht bis 30 Gew.-%. Die Anteile von Al_2O_3 , MnO und SiO_2 liegen im Mittel unter 2 Gew.-% und die von TiO_2 und CaO unter 0,5 Gew.-%. Bei diesen Agglomeraten handelt es sich vermutlich um aufgeschmolzene Chargenrelikte.

Delafossit

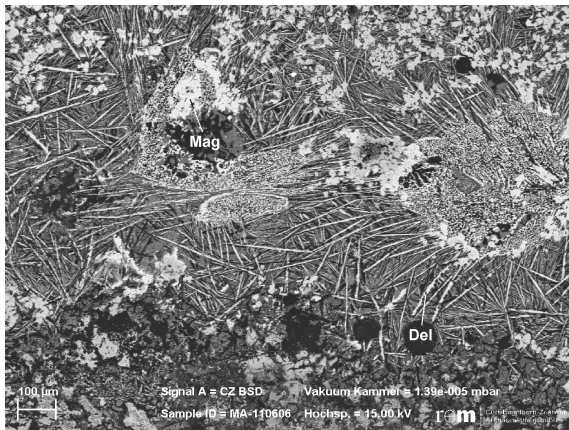


Abb. 7.25.: Rückstreuelektronenbild von Delafossitnadeln (Del) neben kupferhaltigem Magnetit (Mag) in der Probe MA-110606 (FNr. 1609, Röstbett 3).

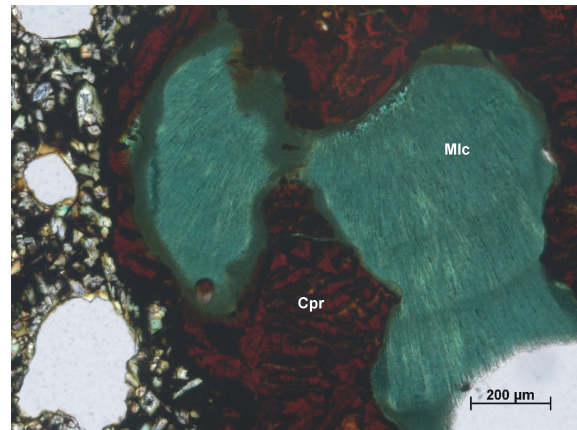


Abb. 7.26.: Malachiteinschluss (Mlc) umgeben von Cuprit (Cpr) in einer Blasenschlacke (Probe MA-092860 (FNr. 3242, Vorplatz Doppellofenanlage 9/10)) (Durchlichtaufnahme).

Delafossit ist eine typische Phase in kupferreichen Schlacken, die unter stark oxidierenden Bedingungen entstanden sind (Hauptmann 1985, 59). In den untersuchten Schlacken wurde er nur in der Probe einer Blasenschlacke (Probe MA-110606) nachgewiesen (Abb. 7.25). In Fragmenten von verschlackter Ofenwandung ist das Mineral dagegen häufiger zu finden. Die Delafossite sind idiomorph nadelig zwischen den Spinellen ausgebildet. Sie lassen daher auf einen Anstieg des Sauerstoffpartialdruckes während der Spätphase der Kristallisation schließen.

Cuprit

Cuprit tritt vor allem in Blasenschlacken und Schlacken vom Typ A+B auf. Er ist ein Zeretzungsprodukt von im Erz vorhandenen sekundären Kupfermineralen und umgibt deren Einschlüsse in den Schlacken (Abb. 7.26). Demnach entsteht Cuprit als Übergangsphase bei der Reduktion der Erze zu metallischem Kupfer.

Sulfidische Cu/Fe-Einschlüsse

Bei der Verhüttung sulfidischer Kupfererze werden neben metallischem Kupfer auch Kupfersteine oder Matte produziert. Diese Neben- oder Zwischenprodukte bestehen aus ge-

gemischten Cu/Fe-Sulfiden, welche Rückschlüsse sowohl auf Art und Zusammensetzung der verwendeten Erze als auch die angewandten Verhüttungstechniken ermöglichen. Je nach Kupfergehalt werden dabei Roh-, Konzentrations- (Cu/Fe-Sulfide) und Spursteine (reine Cu-Sulfide) unterschieden. Die in den Schlacken gefundenen Kupfersteinphasen liegen meist als runde bis tropfenförmige Einschlüsse vor (vgl. Abb. 7.14) und können teilweise selbst Schlackeneinschlüsse enthalten. Diese Phasen sind überwiegend bronze- bis messinggelb, was auf einen höheren Eisengehalt hindeutet. Stellenweise sind die Kupfersteine durch Verwitterung in Oxide, Karbonate und Sulfate umgewandelt. Eine Abtrennung dieser Komponenten für die chemische Analyse war nicht möglich. Daher zeigen einige untersuchten Kupfersteine zu hohe Eisen- bzw. zu niedrige Schwefelgehalte (Tabelle A.9). Die auftretenden Phasen sind Chalkopyrit, Bornit, und Chalkosin mit variierenden Gehalten an Digenit und Covellin sowie metallisches Kupfer.

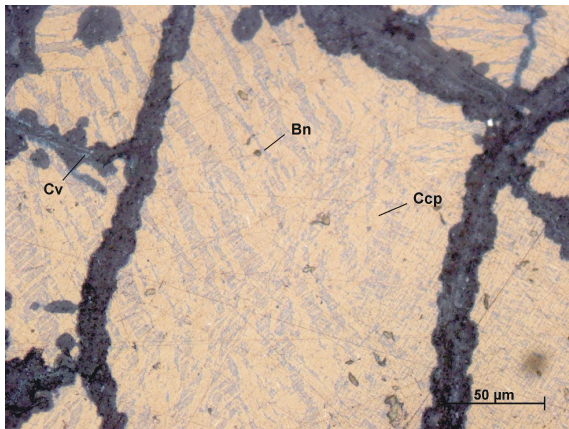


Abb. 7.27.: Detailaufnahme eines Kupfersteins (Probe MA-091511 (FNr. 2267, Halde 2)). Er besteht aus Chalkopyrit (Ccp) mit dunkleren Bornitentmischungslamellen (Bn). In Rissen ist Covellin (Cv) als Verwitterungsprodukt ausgebildet (Auflichtaufnahme).

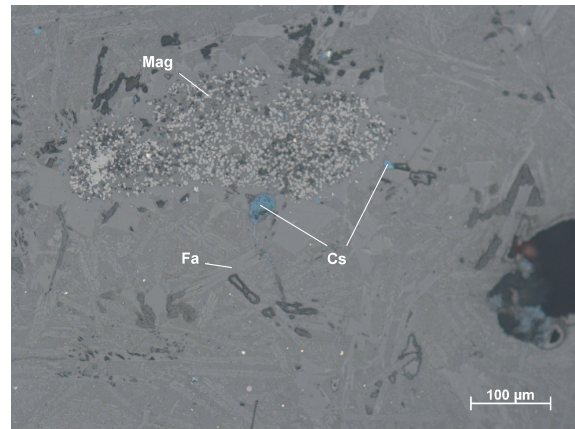


Abb. 7.28.: Kupferreiche Kupfersteine (Cs) in einer Plattenschlacke (Probe MA-113463 (FNr. 207, Vorplatz Doppelofenanlage 1/2)). Sie bestehen hauptsächlich aus Chalkosin (Fa = Fayalit, Mag = Magnetit) (Auflichtaufnahme).

In den Schlacken vom Kupferschmelzplatz lassen sich drei verschiedene Arten von Kupfersteineinschlüssen unterscheiden. Die erste Gruppe, die den größten Teil ausmacht, besteht aus einem charakteristischen, komplexen Lamellensystem von Chalkopyrit und Bornit (Abb. 7.27). Abhängig von ihrer Zusammensetzung besteht ihre Matrix aus Bornit bzw. Chalkopyrit mit lamellenartigen Chalkopyrit- bzw. Bornitentmischungen. In Rissen sind häufig Covellin, Digenit oder Chalkosin als Verwitterungsprodukte entwickelt. Die zweite Gruppe von Kupfersteinen ist kupferreicher und besitzt oft eine dunkelblaue Farbe (Abb. 7.28). Sie bestehen überwiegend aus Chalkosin, Digenit und Covellin, vereinzelt mit Bornitentmischungslamellen. In einzelnen Schlacken wurden außerdem eisenreiche Kupfersteineinschlüsse nachgewiesen. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Chalkopyrit und kupferhaltigen Pyrrhotin, in dem an Rissen Chalkopyrit ausgebildet ist.

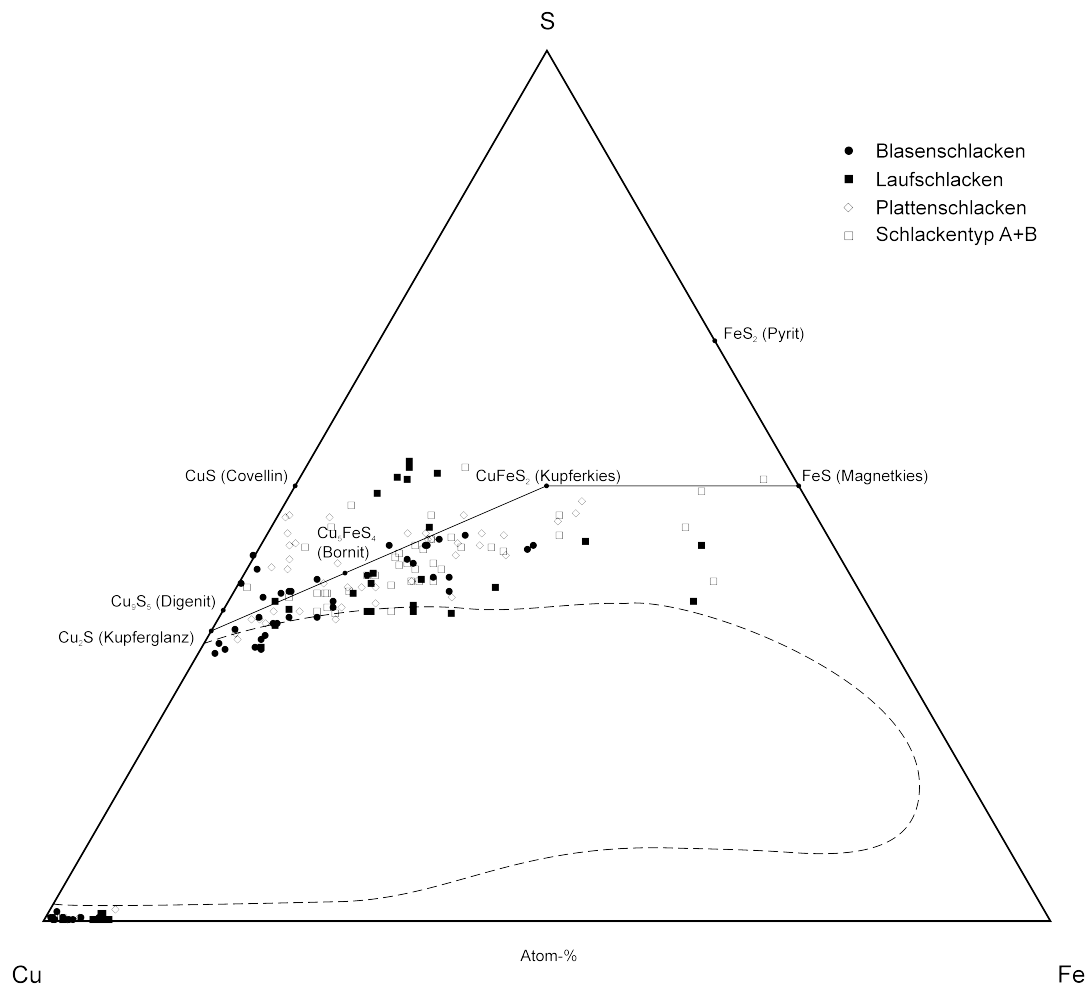


Abb. 7.29.: Darstellung der Kupfersteinanalysen verschiedener Schlackentypen im System Cu-Fe-S nach Schlegel & Schüler (1952).

Die chemische Zusammensetzung der Kupfersteineinschlüsse wurde durch Flächenanalysen mittels EDX ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle A.9 aufgelistet. Neben den Hauptelementen Kupfer, Eisen und Schwefel konnten nur geringe Anteile von Antimon nachgewiesen werden, alle anderen Elemente lagen unterhalb der Nachweisgrenze von ca. 0,1 Gew.-%. Im ternären System Cu-Fe-S liegen die Kupfersteinschlüsse oberhalb der Mischungslücke (Abb. 7.29). Einige Projektionspunkte liegen innerhalb der Mischungslücke. Dies ist allerdings nur auf die Unsicherheit (Messpräzision) der quantitativen Analyse zurückzuführen. Anhand der Zusammensetzung der Kupfersteine ist es möglich, Schlacken unterschiedlichen Prozessstufen zuzuordnen. So würden Schlacken, die in einem ersten Schmelzprozess entstanden, bei dem Erz unterschiedlicher Zusammensetzung geschmolzen wurde, eine starke Variationsbreite mit einer Tendenz zu eisenreichen Steinen (Rohsteine) aufweisen. Schlacken, die während eines späteren Schmelzgangs gebildet wurden, bei dem Kupferstein als Produkt entstand, zeigen dagegen einen Trend zu kupferreichen

Steinen (Spursteine). Schlacken aus dem letzten Verhüttungsschritt, dem Schwarzkupferschmelzen, besitzen ausschließlich kupferreiche Steine und metallisches Kupfer. Die Zusammensetzung der untersuchten Einschlüsse zeigt für alle Schlackentypen eine starke Variationsbreite mit der Tendenz zu kupferreichen Steinen. Außerdem wurden in allen Schlackentypen neben Kupfersteineinschlüssen auch Einschlüsse von metallischem Kupfer nachgewiesen (vgl. Tabelle A.9). Daher ist zu vermuten, dass die Schlacken aus einem späteren Prozess stammen. Es ist jedoch nicht möglich, die verschiedenen Schlackentypen anhand ihrer Cu/Fe-Sulfide zu unterscheiden bzw. verschiedenen Prozessstufen zuzuordnen.

Aufgrund der Zusammensetzung der Kupfersteineinschlüsse ist darüber hinaus davon auszugehen, dass es sich bei den Ausgangserzen nicht um reinen Chalkopyrit, sondern um verschiedene Cu/Fe-Sulfide mit einer Zusammensetzung entlang der Linie $\text{CuFeS}_2\text{-FeS}_2$ handelt.

7.1.5. Mößbauerspektroskopische Untersuchungen

Erste mößbauerspektroskopische Untersuchungen an Schlacken vom Kupferschmelzplatz S1 wurden bereits von Adetunji et al. (1996) durchgeführt. Danach besitzen Blasen-schlacken ein reines Fayalit-Spektrum während Plattenschlacken ein Fayalit-Magnetit-Spektrum aufweisen. Den erhöhten Magnetitgehalt in den Plattenschlacken führen sie auf ein Abstecken der Schlacke und die oxidischen Bedingungen während des raschen Abkühlens außerhalb des Ofens zurück. Die Blasen-schlacken kühlten dagegen langsamer innerhalb des Ofens ab und lassen daher eher Rückschlüsse auf die Bedingungen während der Schlackenbildung ziehen (Adetunji et al. 1996, 771).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden lediglich Blasen- und Laufschlacken mößbauerspektroskopisch untersucht. Tabelle A.15 enthält die Anteile der eisenhaltigen Schlacken bezogen auf den Gesamteisengehalt. Zudem sind der Tabelle die Fe^{2+} - und Fe^{3+} -Gehalte zu entnehmen. Das daraus ermittelte Verhältnis von Fe^{2+} zu Fe_{total} ist in Tabelle A.16 aufgeführt. Alle Schlacken enthalten neben Fayalit und Pyroxen auch unterschiedliche Gehalte an Magnetit sowie eine unbestimmte Fe^{3+} -haltige Komponente, wobei es sich vermutlich um die im Glas gebundenen Eisenanteile handelt. Einige Schlacken aus den Röstbetten besitzen zudem geringe Mengen an Hämatit. Die ermittelten Mößbauerspektren der untersuchten Schlacken lassen sich demnach in zwei Typen einteilen.

Bei dem ersten Typ handelt es sich um ein Fayalit/Pyroxen-Spektrum (Abb. 7.30) mit sehr geringen Anteilen an Magnetit von unter 4 Gew.-%. Wie bereits die Analysen von Adetunji et al. (1996) vermuten ließen, wurden Spektren des ersten Typs ausschließlich in Blasen-schlacken festgestellt. In diesen Schlacken tritt Magnetit nur feinstverteilt in den Zwischenräumen der silikatischen Phasen auf, wie die mikroskopischen Untersuchungen

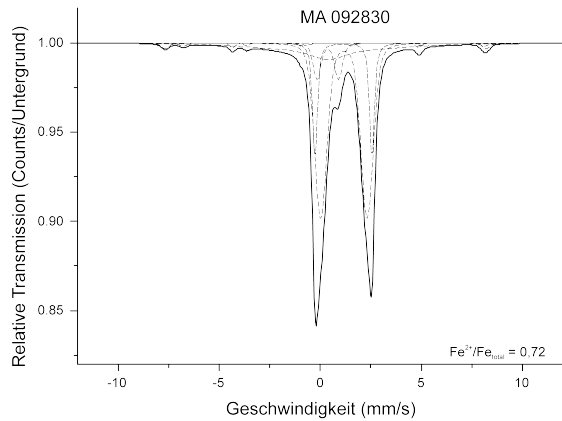


Abb. 7.30.: Mössbauerspektrum vom Typ 1 einer Blasenschlacke (Probe MA-092830 (FNr. 981, Röstbett 2)). Es handelt sich hier um ein reines Fayalit/Pyroxen-Spektrum mit geringen Gehalten an Magnetit.

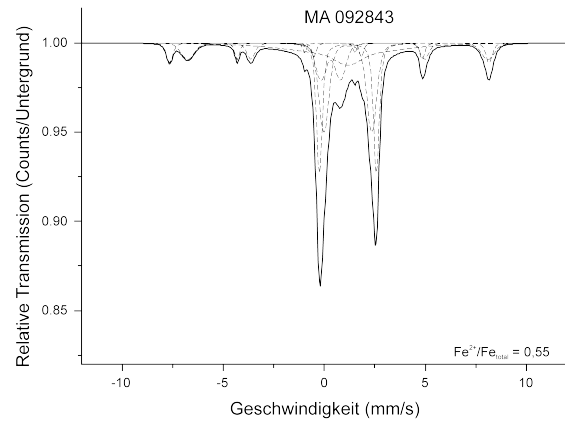


Abb. 7.31.: Mössbauerspektrum vom Typ 2 einer Schlacke vom Typ A+B (Probe MA-092843 (FNr. 1200, Röstbett 7)). Es zeigt ein Fayalit/Pyroxen-Magnetit-Spektrum.

zeigen.

Bei dem zweiten Spektrentyp handelt es sich um Fayalit/Pyroxen-Magnetit-Spektren (Abb. 7.31). Entgegen der Annahme von Adetunji et al. (1996) zeigen die Untersuchungen, dass dieser Spektrentyp auch in Schlacken vom Typ A+B und demzufolge auch in Lauf- und Blasenschlacken Fayalit/Pyroxen-Magnetit-Spektren auftreten. Einige untersuchte Schlacken, vorwiegend die aus den Röstbetten, enthalten neben Magnetit auch geringe Anteile an Hämatit. Die Bildung von Hämatit ist auf die wiederholte Erhitzung und den damit einhergehenden stark oxidierenden Bedingungen beim Rösten der Erze zurückzuführen. Diese Schlacken wurden für die Bestimmung des Sauerstoffpartialdrucks nicht berücksichtigt, da daraus keine Rückschlüsse auf die Bedingungen im Ofen während der Schlackenbildung gezogen werden können.

7.1.6. Abschätzung der Reduktions-/Oxidationsverhältnisse

Die Reduktions-/Oxidationsverhältnisse eines Schmelzofens hängen in erster Linie von seiner Form und Größe, der Füllhöhe, der Brennstoffmengen und der Menge der eingebrachten Luft ab. In den bronzezeitlichen Schmelzofen wurde ausschließlich mit Holz oder Holzkohle als Brennmateriale verhüttet. Der Sauerstoffpartialdruck ist daher primär abhängig vom CO/CO_2 -Verhältnis, welches wiederum durch das Boudouard-Gleichgewicht reguliert wird. Demnach lassen sich anhand der Bestimmung des Sauerstoffpartialdrucks Rückschlüsse auf das CO/CO_2 -Verhältnis ziehen, wodurch Aussagen über die Prozesstechnik ermöglicht werden. Eine Möglichkeit den Sauerstoffpartialdruck abzuschätzen, erfolgt über die Bestimmung des Fe^{2+}/Fe^{3+} -Verhältnisses mittels mössbauerspektroskopischer Untersuchung der Schlacken.

Nach dem von Moesta et al. (1984, 103) vorgeschlagenen Verfahren werden die ermit-

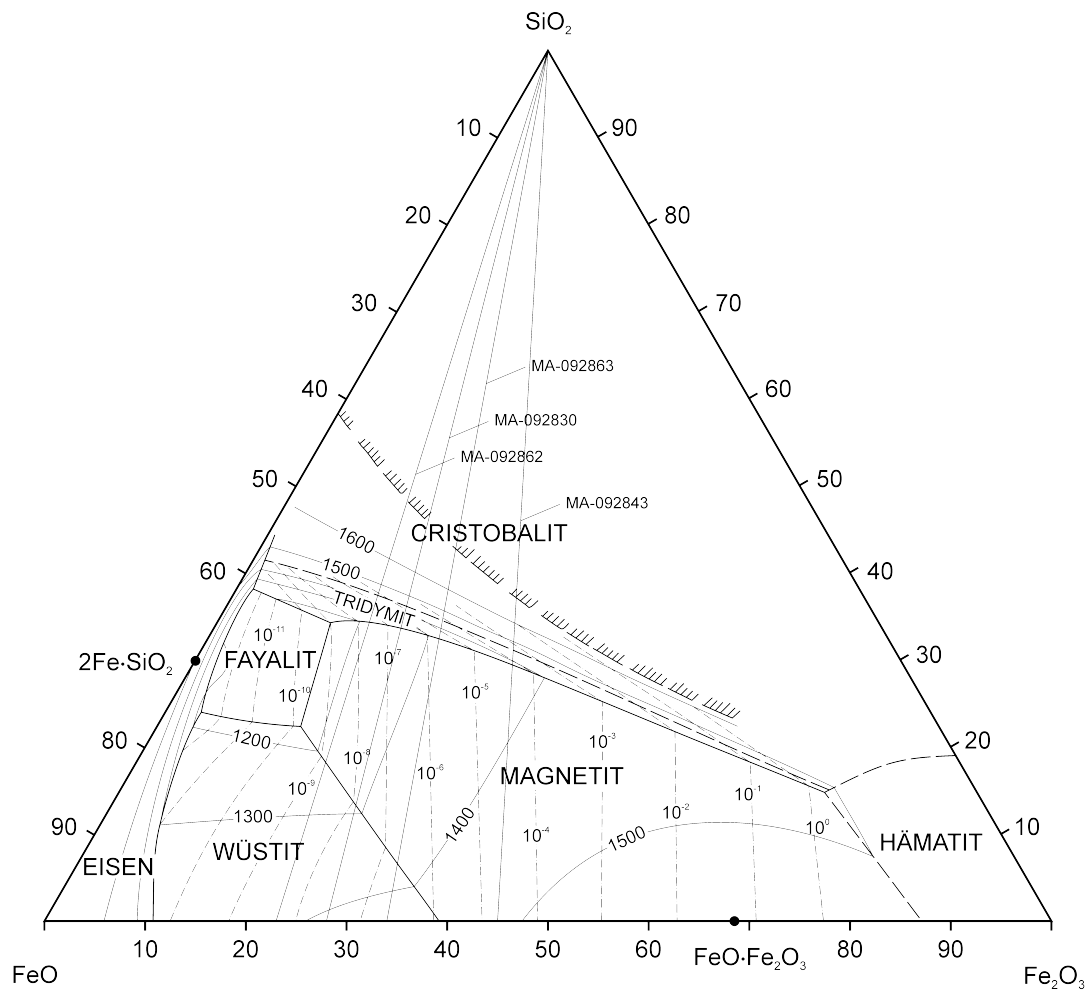


Abb. 7.32.: Das System FeO-Fe₂O₃-SiO₂ (modifiziert nach Muan 1955, 970) mit eingezeichneten Geraden für die untersuchten Schlacken.

telten Fe²⁺/Fe³⁺-Verhältnisse in das von Muan (1955, 970) entwickelte ternäre Schmelzdiagramm des Systems FeO-Fe₂O₃-SiO₂ eingetragen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich der durch die pauschalchemischen Analysen bestimmte SiO₂-Gehalt aus der SiO₂-Konzentration der Schmelze und den unaufgeschmolzenen Quarzeinschlüssen zusammensetzt und deshalb nicht direkt zur Darstellung im System FeO-Fe₂O₃-SiO₂ verwendet werden kann. Daher werden die ermittelten Verhältnisse als Gerade von der SiO₂-Spitze zu den entsprechenden Punkten auf der FeO-Fe₂O₃-Achse eingezeichnet (Abb. 7.32). Die so bestimmten Sauerstoffpartialdrücke liegen zwischen 10⁻⁴ und 10⁻⁹ bar. Jedoch ist die Abschätzung der Sauerstoffpartialdrücke anhand des ternären Systems FeO-Fe₂O₃-SiO₂ als fraglich zu betrachten, da sich die Isobaren auf die Zusammensetzung der Schmelze und nicht auf die pauschalchemische Zusammensetzung der Schlacke beziehen.

Eine weitere Möglichkeit für die Bestimmung des Sauerstoffpartialdrucks ergibt sich aus dem Phasenbestand und dem Gefüge der Schlacken. Für die eisenreichen Schlacken

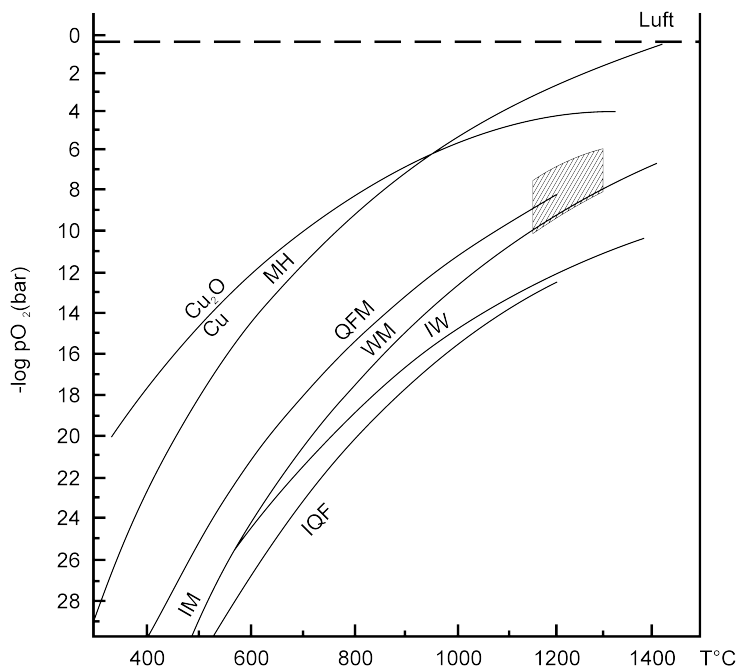


Abb. 7.33.: Abschätzung der Sauerstoffpartialdruck- und Temperaturbereiche der eisenreichen Kupferschlacken vom Kupferschmelzplatz S1 im pO_2/T -Diagramm der Systeme Fe-Si-O und Cu-O (modifiziert nach Hauptmann 1985, 68). IQF = Eisen + Quarz - Fayalit, IM = Eisen - Magnetit, IW = Eisen - Wüstit, WM = Wüstit - Magnetit, QFM = Fayalit - Quarz + Magnetit, MH = Magnetit - Hämatit.

können die während der Verhüttung bestehenden Sauerstoffpartialdrücke durch eine Projektion in das System Fe-Si-O (Abb. 7.33) abhängig von der Temperatur grob abgeschätzt werden. Bei den untersuchten Schlacken handelt es sich überwiegend um Fayalit- und Fayalit-Pyroxen-Schlacken mit geringen Gehalten an Magnetit. Die Magnetite der Abkühlungs­ränder deuten auf eine rasche Abkühlung der Schlacke von ihrer Oberfläche her und spiegeln daher nicht die Redoxbedingungen während des Schmelzprozesses wider, ebenso wie die Magnetit-(Magnesioferrit-)Agglomerate, die als Chargenrelikte in den Schlacken auftreten. Die feinkörnigen Magnetite in den Zwickeln der Silikatphasen der Schlacken sind eindeutig als Spätkristallite einer Restschmelze zu bezeichnen, was vermuten lässt, dass die Reaktionsgrenze Fayalit - Magnetit + Quarz erst am Ende des Schmelzens während der Abkühlung der Schlacken überschritten wurde. Demnach lagen die Sauerstoffpartialdrücke während der Schlackenbildung in der Frühphase der Kristallisation unterhalb und in der Spätphase knapp oberhalb dieser Reaktionsgrenze. Für die aus der Zusammensetzung der Schlacken ermittelten Schmelztemperaturen von 1150 °C–1300 °C ergibt sich ein Bereich des Sauerstoffpartialdrucks von etwa 10^{-6} – 10^{-10} bar. Nach Yazawa (1980, 378) entspricht dies einem Verfahren zur Anreicherung von Kupfer als Kupferstein, bei dem bereits auch metallisches Kupfer auftreten kann.

7.2. Die Verschlackung der Ofenwände

Für alle ausgegrabenen Schmelzöfen des Kupferschmelzplatzes S1 ist eine Verschlackung der Ofenwände nachgewiesen. Bei den untersuchten Proben handelt es sich einerseits um Steine der Ofenmauern, an denen sich auf der zum Ofeninneren gerichteten Seite eine Schlackenschicht gebildet hat (Ofensteine) und um Reste der verschlackten Lehmauskleidung an den Innenwänden der Öfen (Ofenlehm). Daneben tritt eine Fundkategorie auf, die als „Schlackenhaut“ bezeichnet wird. Dabei handelt es sich um die eigentliche Verschlackungsschicht der Ofenwände. An diesen Stücken finden sich nur teilweise noch Reste von Ofenlehm oder kleinere Brocken von Ofensteinen.

7.2.1. Makroskopische Beurteilung

Der Großteil der hier untersuchten Ofensteine besteht hauptsächlich aus feinkörnigem Sandstein, welcher durch Hitzeeinwirkung oft blaugrau bis dunkelvioletttgrau verfärbt ist (Abb. 7.34). Daneben treten auch Quarzporphyr oder Quarzit auf (vgl. Tabelle A.2). Die Verschlackung besitzt oberflächlich eine schwarze bis olivschwarze Färbung. Im Querschnitt zeigt sich eine olivgraue Färbung. Häufig sind sekundär gebildete Kupferminerale auf der Oberfläche zu beobachten. Die Dicke der Schlackenschicht beträgt durchschnittlich 3 mm.

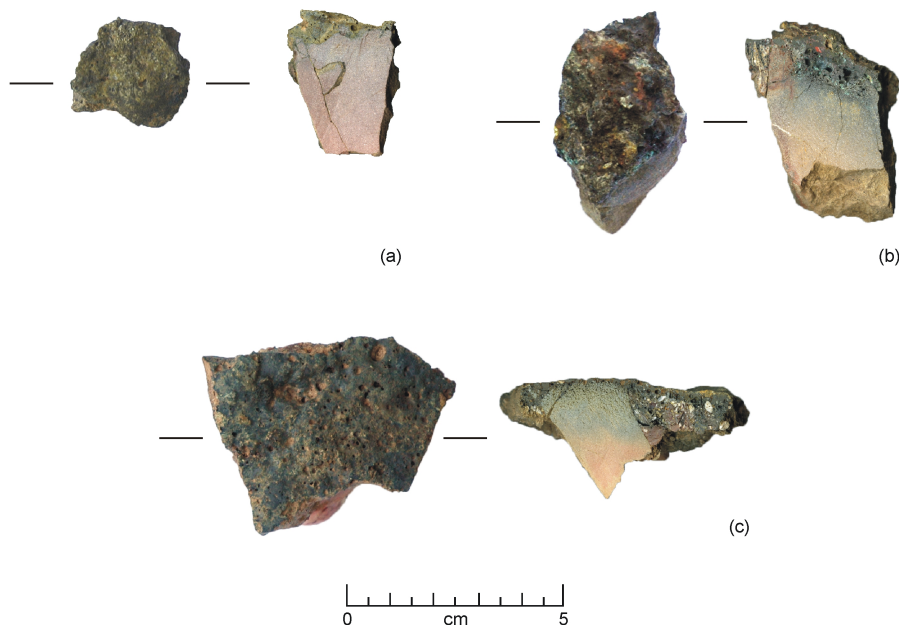


Abb. 7.34.: Verschlackte Ofensteine vom Kupferschmelzplatz S1. (a) Probe MA-101390 (FNr. 4941, Ostwand Ofen 1), (b) Probe MA-101399 (FNr. 5476, Ostwand Ofen 2, ältere Phase), (c) Probe MA-101415 (FNr. 4489, Ostwand Ofen 5).

Bei den untersuchten Ofenlehmproben handelt es sich überwiegend um rötlichbraun gebrannten Lehm, der mit einer bis 15 mm dicken Schlackenschicht bedeckt sein kann.

Zwei Proben aus Ofen 3 weisen dabei mehrere abwechselnde Schichten aus Schlacke und Ofenlehm auf (Abb. 7.35). Daher ist davon auszugehen, dass die Öfen mehrfach verwendet und stellenweise repariert wurden. Die Schlackenschicht besitzt eine dunkelgraue bis olivschwarze Färbung, im Querschnitt erscheint sie olivgrau. In Porenhohlräumen sind zudem sekundäre Kupferminerale ausgebildet.

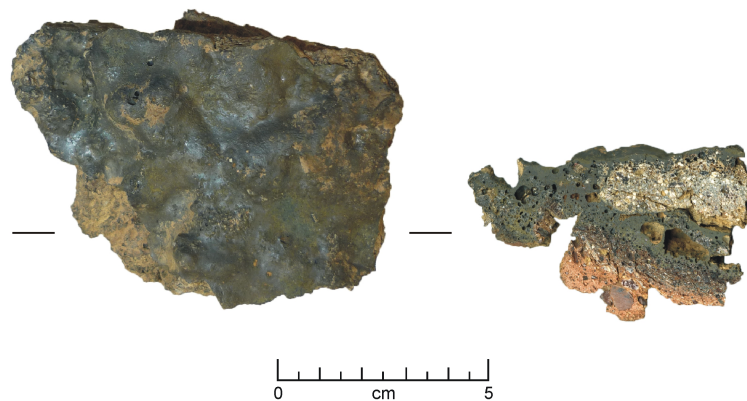


Abb. 7.35.: Verschlackter Ofenlehm (Probe MA-113468 (FNr. 706, Ofen 3)). Auf einer ersten Schlackenschicht folgt eine zweite Lehmschicht, die auf ihrer Oberfläche ebenfalls eine Verschlackung aufweist.

Die ausgewählten Schlackenhautproben sind meist flache, kompakte Stücke mit einer schwarzen bis rotschwarzen Färbung im Handstück (Abb. 7.36). Die meisten Stücke sind mit sekundär gebildeten Kupfermineralen auf ihrer sonst glatten Oberfläche besetzt. Auf der Unterseite können noch Reste von Ofensteinen oder Ofenlehm haften. Im Querschnitt zeigen sie eine dunkelgraue bis schwarze Färbung und ein poriges Gefüge mit kleineren Quarzbruchstücken. Die Dicke variiert zwischen 5 und 30 mm (vgl. Tabelle A.2).

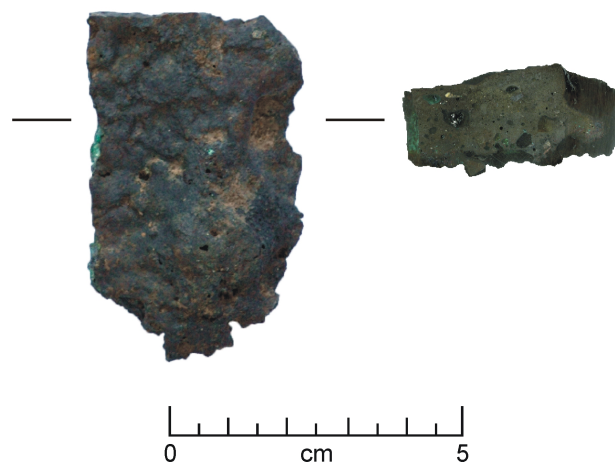


Abb. 7.36.: Schlackenhautprobe (Probe MA-101406 (FNr. 5155, Westwand Ofen 5)).

7.2.2. Lichtmikroskopische und mikroanalytische Untersuchungen

Die mikroskopischen Untersuchungen an den Schlackenhautproben sowie an den Verschlackungsschichten auf den Ofensteinen und den Ofenlehmproben ergaben keine signifikanten Unterschiede der Gefüge, wobei in den meisten untersuchten Proben eine beginnende Versinterung im Kontaktbereich von Verschlackung und Ofenwandmaterial zu beobachten ist (Abb. 7.37), was auf Temperaturen von über 1000 °C hinweist. Das Gefüge der Ofenwandverschlackung besteht mikroskopisch hauptsächlich aus einer glasigen Matrix, die in Form von gelblichbraunen Flecken auftritt. Stellenweise ist eine beginnende Rekristallisation der Glasmatrix zu erkennen. Die Hauptkomponenten sind hypidiomorph bis idiomorph ausgebildete Spinelle (Abb. 7.38), die überwiegend eine magnetitische Zusammensetzung aufweisen (vgl. Tabelle A.8). Außerdem sind sie sehr kupferhaltig und enthalten variierende Gehalte an SiO_2 , Al_2O_3 , MgO und MnO .

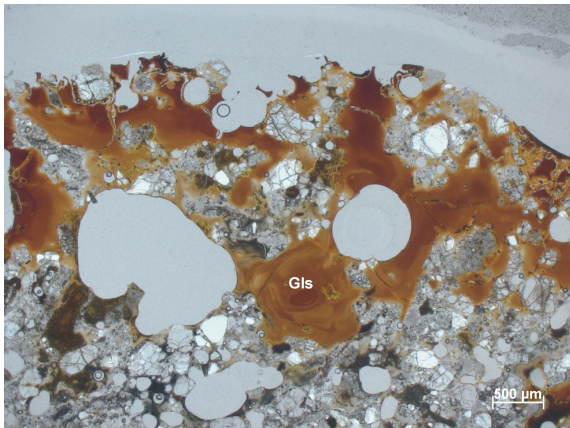


Abb. 7.37.: Mikrogefüge der Verschlackung eines Ofensteins (Probe MA-101402 (FNr. 5064, Westwand Ofen 4)). Im Kontaktbereich von Verschlackung und Ofenfutter zeigt sich eine beginnende Versinterung (Gls = Glas) (Durchlichtaufnahme).

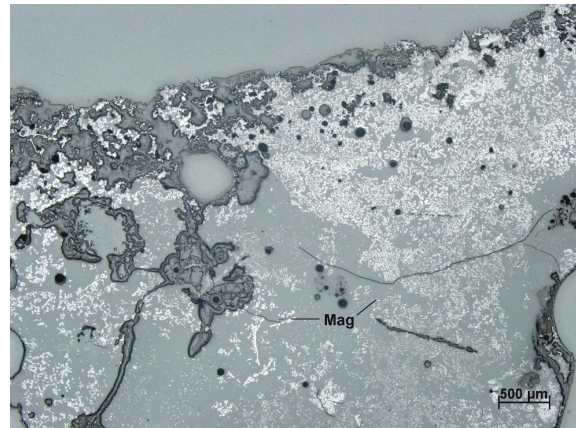


Abb. 7.38.: Mikrogefüge der Verschlackung eines Ofensteins (Probe MA-101415 (FNr. 4489, Ostwand Ofen 5)) im Auflicht. Die im Durchlicht opaken Stellen lassen sich im Auflicht als Magnetit (Mag) identifizieren.

Eine weitere wichtige Phase in den Ofenwandverschlackungen ist Delafossit. Die Delafossitkristalle sind stengelig bis nadelig ausgebildet und teilweise mit Spinell verwachsen (Abb. 7.39). Untergeordnet treten Cuprit sowie metallisches Kupfer in Form von runden Tropfen auf (Abb. 7.40). Cuprit ist meist als feiner Saum um die Kupfertropfen ausgebildet, findet sich aber auch feinstverteilt in der Matrix. Sehr selten sind sulfidische Phasen in den Verschlackungen zu beobachten. Ihre Zusammensetzung liegt zwischen der von Chalkosin und Bornit (vgl. Tabelle A.9).

Der Vergleich der Phasenverteilung der Ofenwandverschlackungen aus unterschiedlichen Höhen über der Ofensohle ermöglicht eine Unterscheidung von zwei Zonen innerhalb der Schmelzöfen. So zeigen die Ofenwandverschlackungen der Schmelzöfen 1, 2, 4 und 5 im unteren Bereich (bis zu einer Höhe von ca. 30 cm über der Ofensohle) eine Phasenverge-

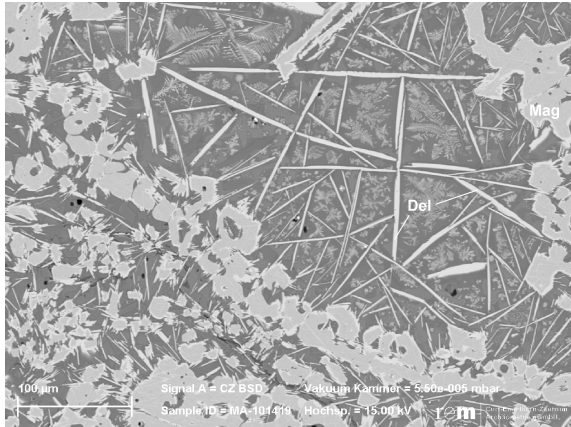


Abb. 7.39.: Delafossitkristalle (Del) einer Ofenwandverschlackung (Probe MA-101419 (FNr. 5267, Nordwand Ofen 5, ältere Phase)). Teilweise sind sie mit kupferhaltigen Magnetit (Mag) verwachsen (Rückstreuerelektronenbild).

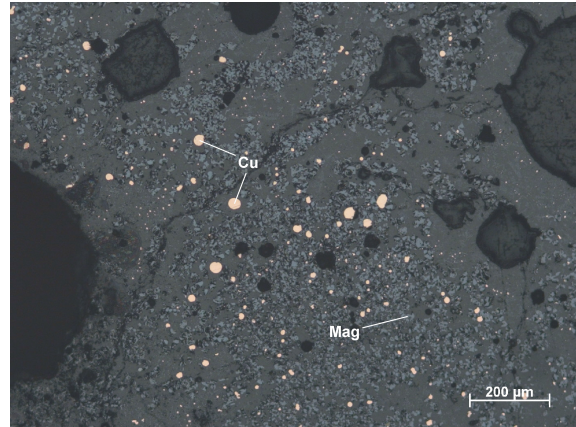


Abb. 7.40.: Metallische Kupfertropfen einer Ofenwandverschlackung (Probe MA-101407 (FNr. 5169, Westwand Ofen 5)) (Mag = Magnetit) (Auflichtaufnahme).

sellschaftung von Magnetit und metallischem Kupfer sowie gelegentlich Kupferstein. Im oberen Bereich besitzen die Ofenwandverschlackungen eine Phasenvergesellschaftung aus Magnetit, metallischem Kupfer, Delafossit und Cuprit. Nach der von Moesta & Schlick (1989, 11–13) entwickelten Methode lassen sich die auftretenden Phasenbeziehungen mittels isothermer Cu-Fe-O-Zustandsdiagramme (Abb. 7.41) bestimmten Bereichen zuordnen. Diese Phasengebiete sind charakteristisch für definierte Sauerstoffpartialdrücke in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung.

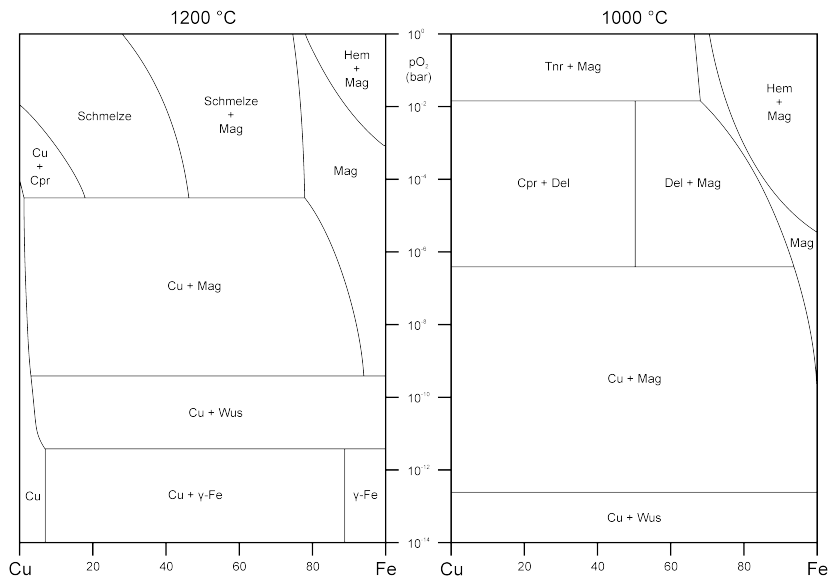
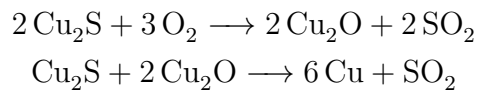


Abb. 7.41.: Vereinfachte Darstellung von Stabilitätsdiagrammen im System Cu-Fe-O bei 1000 °C und 1200 °C (modifiziert nach Hauptmann 2000, 146) (Cu = metallisches Kupfer, Tnr = Tenorit, Cpr = Cuprit, Del = Delafossit, Fe = Eisen, Wus = Wüstit, Mag = Magnetit, Hem = Hämatit).

Für die untersuchten Ofenwandverschlackungen im unteren Bereich der Schmelzöfen er-

gibt sich aus der mikroskopisch bestimmten Phasenvergesellschaftung bei der abgeschätzten Temperatur von etwa 1200 °C ein Sauerstoffpartialdruckbereich von 10^{-5} – 10^{-9} bar. Für den oberen Bereich der Schmelzöfen liegt er zwischen 10^{-4} und 10^{-6} bar. Die höheren Partialdrücke im oberen Ofenbereich sind auf die Verhältnisse im Ofen gegen Ende eines Schmelzvorganges zurückzuführen, als sich die Schlacken sowie das Schmelzprodukt im unteren Bereich der Schmelzöfen sammelten und die Verschlackung an den Ofenwänden im oberen Bereich aufgrund der fehlenden Bedeckung durch Holzkohle unter Luftzufuhr oxidiert werden konnten. Dies ermöglichte zudem eine Röstung noch enthaltener Restsulfide in der Verschlackung und die Bildung von metallischem Kupfer nach



Der für den unteren Ofenbereich ermittelte Sauerstoffpartialdruck liegt etwas höher als der Sauerstoffpartialdruck, der anhand des Phasenbestandes der Schlacken, die ja in diesem Bereich gebildet wurden, abgeschätzt wurde. Es ist zu vermuten, dass die untersuchten Schlacken in keinem engen Kontakt mit den Ofenwandungen standen und somit die Bildung unterschiedlicher Phasenvergesellschaftungen ermöglicht wurde. Darüber hinaus wird sowohl in den Schlacken als auch in den Ofenwandverschlackungen nur die letzte Gasatmosphäre im Ofen gespeichert, die nicht unbedingt die während der Verhüttung herrschenden Sauerstoffpartialdrücke widerspiegelt.

7.2.3. Die chemische Zusammensetzung der Ofenwandverschlackung

Für die Analyse der chemischen Zusammensetzung der Ofenwandverschlackungen wurde die Schlackenschicht von dem Ofenwandmaterial abgetrennt und mittels WD-RFA untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle A.3 dargestellt. Der Gesamteisengehalt wurde analog zu den Schlacken als FeO berechnet.

Die Hauptbestandteile der Verschlackungen sind SiO_2 , Al_2O_3 und FeO. MgO, CaO und K_2O bilden die wichtigsten Nebenbestandteile. Auffällig ist außerdem der hohe Kupfergehalt (bis 20 Gew.-%), welcher auf die zahlreichen Kupfereinschlüsse zurückzuführen ist. Bei der Betrachtung der Ergebnisse im ternären System SiO_2 -Anorthit-FeO(+MnO+MgO) (Abb. 7.42) fällt auf, dass die Schlackenhautproben eine hohe Variabilität mit einem Trend zu einer FeO-reichen Zusammensetzung aufweisen, während die Verschlackungsschichten auf den Ofensteinen bzw. Ofenlehm eine SiO_2 -reiche Zusammensetzung besitzen. Da bei den mikroskopischen Untersuchungen kaum Quarzeinschlüsse in den Schlackenschichten beobachtet wurden, lassen sich zwei Ursachen für die erhöhten SiO_2 -Gehalte annehmen. Einerseits kommt eine unzureichende Trennung des Ofenwandmaterials von der Schlackenschicht bei der Aufbereitung für die chemische Analyse in Betracht. Andererseits ist

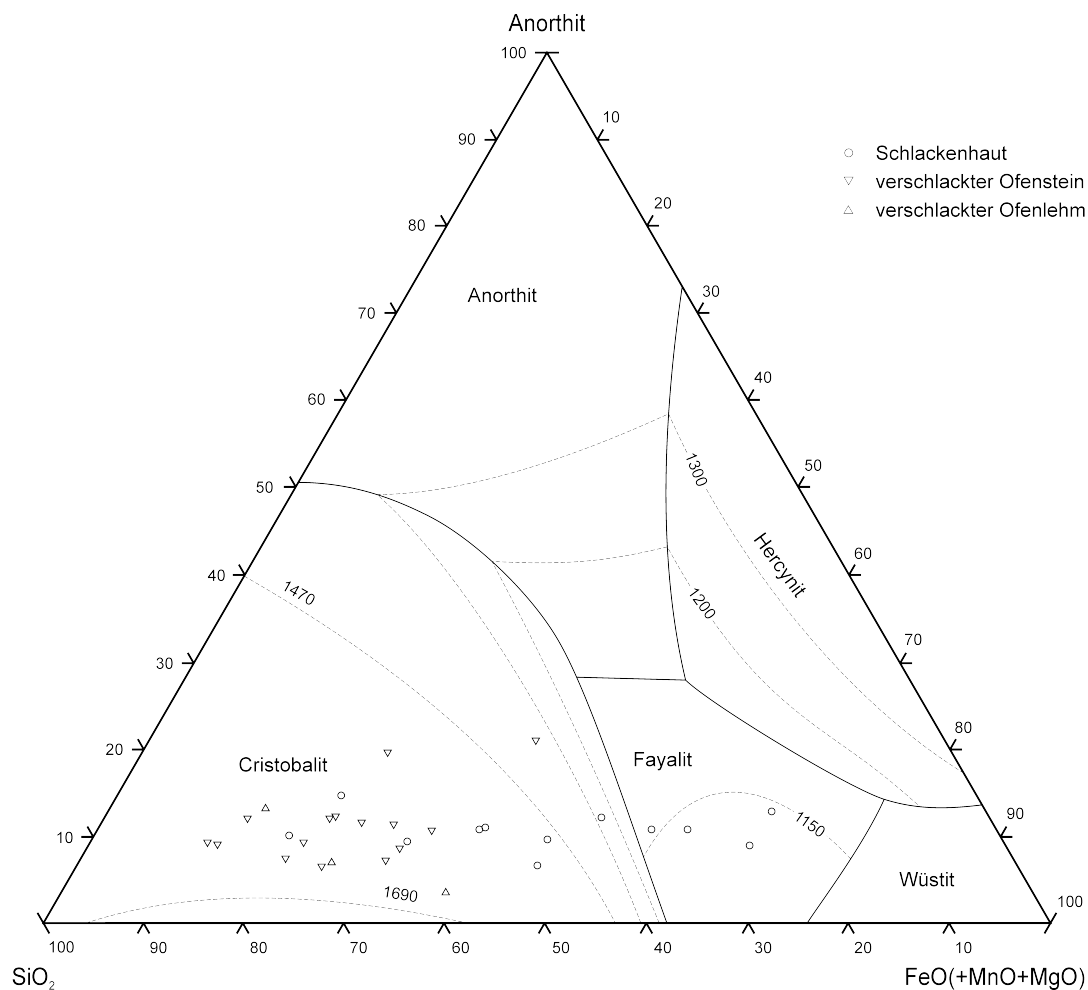


Abb. 7.42.: Darstellung der Pauschalanalysen der Ofenwandverschlackungen im System SiO_2 -Anorthit- $\text{FeO}(+\text{MnO}+\text{MgO})$ (erweitert nach Schairer 1942, 252).

im Zusammenhang mit den erhöhten Al_2O_3 -Gehalten auch eine Reaktion der Schmelze mit der silikatischen Ofenwand denkbar.

Um detailliertere Informationen über die Zusammensetzung der Schmelze der Ofenwandverschlackungen zu erhalten, wurden die vollständig aufgeschmolzenen Bereiche der Verschlackungen mittels EDX-Flächenanalysen untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle A.4 aufgeführt. Die Darstellung der Ergebnisse im System SiO_2 -Anorthit- $\text{FeO}(+\text{MgO}+\text{MnO})$ (Abb. 7.43) zeigt lediglich eine leichte Verschiebung der Zusammensetzung in Richtung des Fayalitfeldes. Grundsätzlich besitzen die Ofenwandverschlackungen eine sehr SiO_2 -reiche Zusammensetzung. In Verbindung mit den mikroskopischen Untersuchungen, bei denen in den Verschlackungen kaum Quarzeinschlüsse beobachtet wurden, sind die hohen SiO_2 - und Al_2O_3 -Gehalte auf eine Reaktion der Schmelze mit dem Ofenwandmaterial zurückzuführen. Hierfür sprechen auch die in einigen Proben nachgewiesenen Versinterungen an den Kontaktstellen zwischen Verschla-

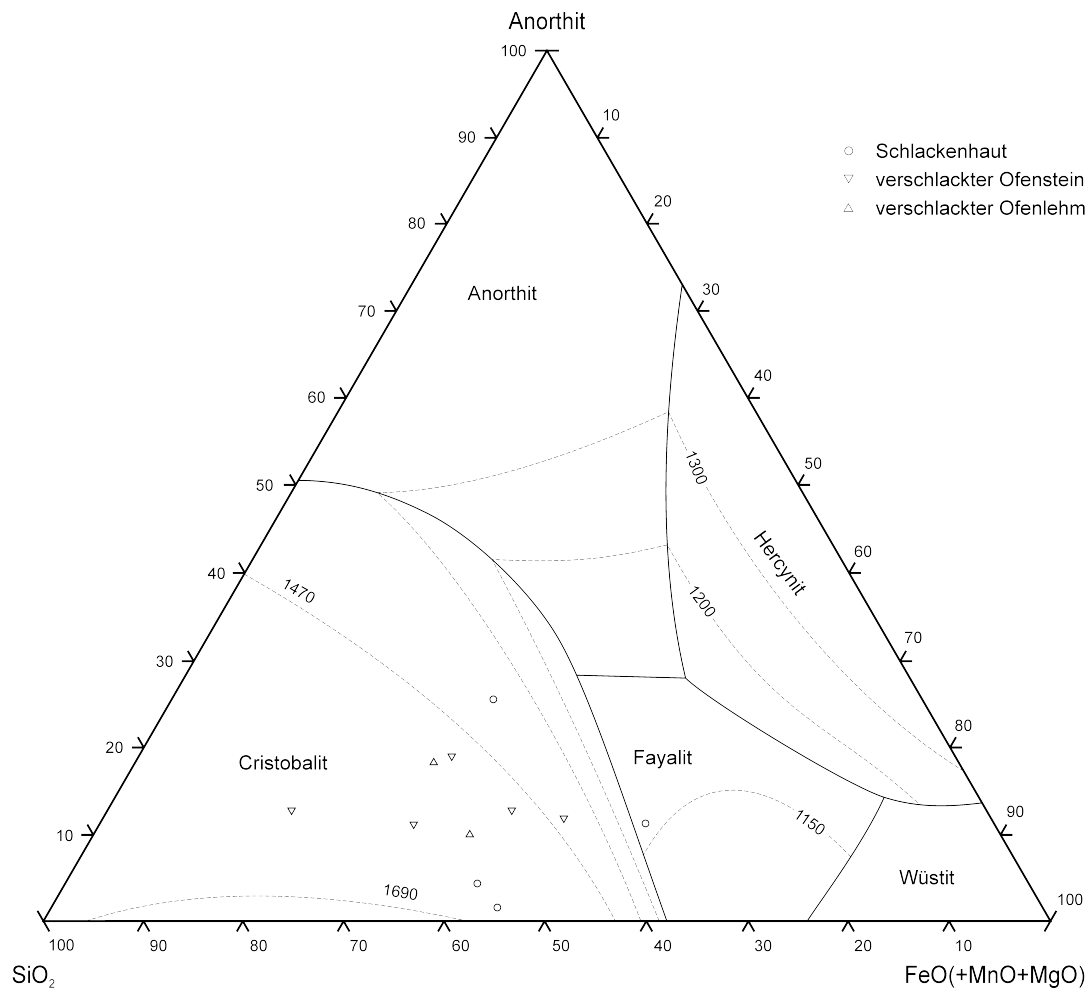


Abb. 7.43.: Darstellung der EDX-Analysen der vollständig aufgeschmolzenen Teilbereiche der Ofenwandverschlackungen im System SiO_2 -Anorthit- $\text{FeO}(\text{+MnO+MgO})$ (erweitert nach Schairer 1942, 252).

ckung und Ofenwandmaterial.

7.3. Die Metallfunde

Neben einer Nadel mit doppelkonischem Kopf, der an der Unterseite mit einem Winkelmuster verziert ist (Klemm 2000, 773), wurden auf dem Kupferschmelzplatz S1 noch zwei weitere Metallfragmente gefunden (Abb. 7.44), deren Funktion jedoch nicht bekannt ist. Die Oberfläche beider Metallfragmente ist von einer dünnen Verwitterungsschicht bedeckt.

Da die vom Nadelschaft entnommene Probe vollständig korrodiert war, war eine quantitative Analyse der ursprünglichen chemischen Zusammensetzung des Metalls nicht möglich. Immerhin wurden Kupfer und Zinn als Hauptbestandteile identifiziert, so dass das ursprüngliche Metall als Bronze anzusprechen ist. Die chemische Analyse der beiden anderen Metallproben (Tabelle A.11) ergab eine Zusammensetzung hauptsächlich aus Kupfer



Abb. 7.44.: Metallfunde vom Kupferschmelzplatz S1. (a) Probe MA-113458 (FNr. 3075, Röstbett 9), (b) Probe MA-113461 (FNr. 3423, Halde 3).

mit einem Eisengehalt von bis zu 10 Gew.-%, was vermuten lässt, dass es sich bei den Metallstücken um Rohkupferstücke handelt. Die Darstellung der Spurenelementgehalte in den doppellogarithmischen Diagrammen Ni/Ag und Sb/As (Abb. 7.45) zeigt, dass es sich bei den Metallartefakten um Arsenkupfer mit geringen Konzentrationen an Nickel und Antimon sowie sehr niedrigen Silbergehalten handelt. Die Fragmente entsprechen demnach der Kupfersorte des sogenannten „ostalpinen Kupfers“ (Krause 2003, 90).

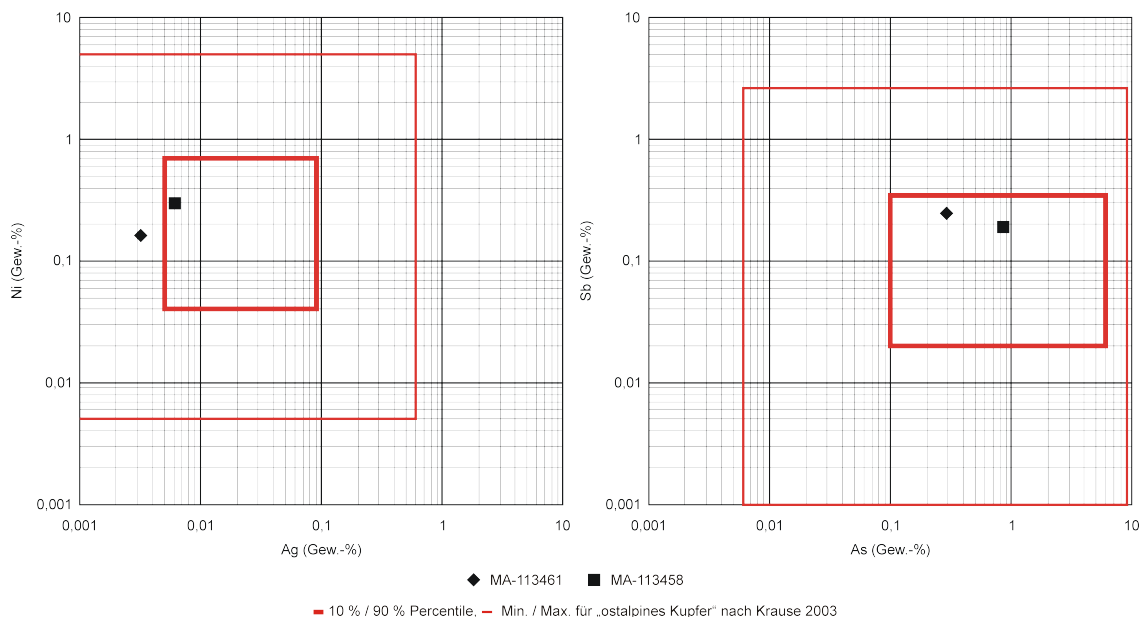


Abb. 7.45.: Darstellung der Spurenelementgehalte der untersuchten Metallartefakte in den doppellogarithmischen Diagrammen Ni/Ag und Sb/As. Die Spurenelementverhältnisse deuten darauf hin, dass es sich bei den Metallstücken um „ostalpinen Kupfer“ handelt.

Der Begriff des „ostalpinen Kupfers“, der von der Arbeitsgruppe um R. Pittioni erstmals erwähnt wurde, ist dabei lediglich eine Bezeichnung der Kupfersorte, lässt jedoch nicht zwingend auf die Herkunft der für die Herstellung verwendeten Rohstoffe aus den verschiedenen Regionen der Ostalpen schließen (Krause 2003, 166). Um Aussagen zu potentiellen Lagerstätten zu treffen, wurden neben Spurenelementverhältnissen zusätzlich Untersuchungen hinsichtlich der Bleisotopensignaturen herangezogen, deren Ergebnisse

in Kapitel 9 diskutiert werden.

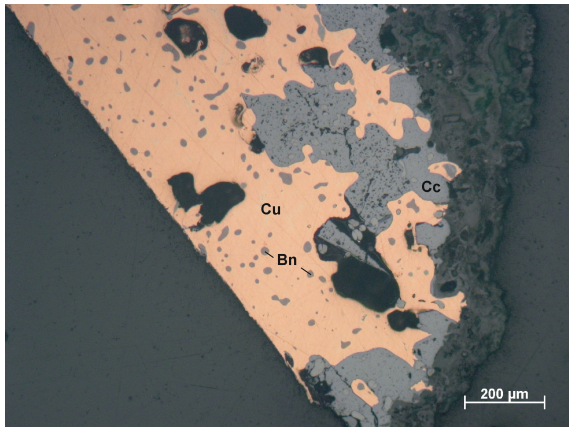


Abb. 7.46.: Mikrogefüge des Metallfragments aus Röstbett 9 (Probe MA-113458 (FNr. 3075)). Das Gefüge besteht hauptsächlich aus metallischem Kupfer (Cu), Chalkosin (Cc) und Bornit (Bn) (Auflichtaufnahme).

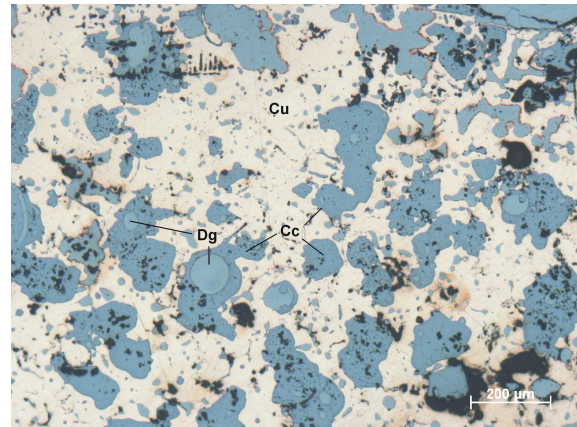


Abb. 7.47.: Mikrogefüge des Metallfragments von Halde 3 (Probe MA-113461 (FNr. 3423)). Das Gefüge besteht hauptsächlich aus metallischem Kupfer (Cu) und Chalkosin (Cc) mit Digenitentmischungen (Dg) (Auflichtaufnahme).

Beide Proben haben ein charakteristisches Gußgefüge aus metallischem Kupfer mit zahlreichen sulfidischen Einschlüssen (Abb. 7.46 und Abb. 7.47). Die mikroanalytischen Untersuchungen (Tabelle A.12) ergaben, dass es sich dabei hauptsächlich um Chalkosin mit stellenweisen Digenitentmischungen und Bornit mit lamellaren Entmischungen von Chalkosin handelt. Bei der Betrachtung der mikroskopischen Untersuchung in Zusammenhang mit der chemischen Analyse der Metallartefakte ist davon auszugehen, dass es sich hierbei um Rohkupferstücke des „ostalpinen Typs“ handelt und das Kupfer wohl aus sulfidischen Erzen gewonnen wurde.

7.4. Die Erzfunde

Bei fast allen untersuchten Erzproben handelt es sich um Eisenerze. Sie bestehen hauptsächlich aus oxidischen Eisenverbindungen (vermutlich Magnetit und Hämatit), die mit Baryt vergesellschaftet sind. Da diese Erze keine Informationen über die Kupfererzverhüttung am Kupferschmelzplatz S1 erwarten lassen, wird an dieser Stelle auf eine Darstellung und weitere Diskussion der Untersuchungsergebnisse⁴ verzichtet.

Lediglich die Probe MA-091472 (FNr. 2994) aus Schicht 2 der Halde 3 zeigt auf der Oberfläche Spuren von sekundären Kupfermineralen (Abb. 7.48). Es handelt sich hierbei um einen dunkelockerfarbenen Quarzit mit Spuren von Chalkopyrit. Aufgrund der sehr geringen Menge an Chalkopyrit wurde auf eine pauschalchemische Untersuchung verzichtet. Im Querschnitt zeigt sich außerdem, dass der Quarzit von feinen Rissen durchzogen

⁴ Die Ergebnisse der Mikroskopuntersuchungen sind in Tabelle A.2, die der EDX-Analysen in Tabelle A.10 aufgeführt.

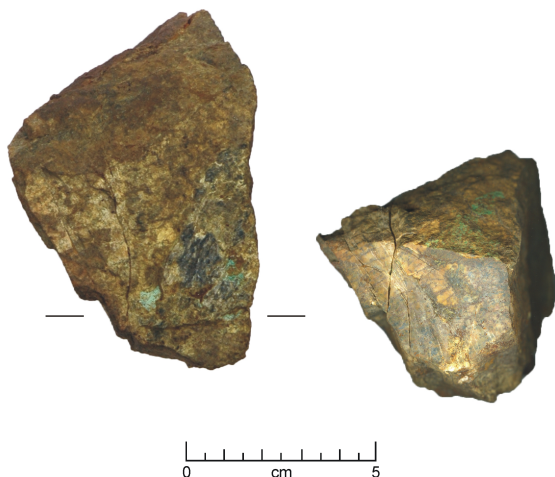


Abb. 7.48.: Quarzit mit Chalkopyritvererzung (Probe MA-091472 (FNr. 2994, Halde 3)).

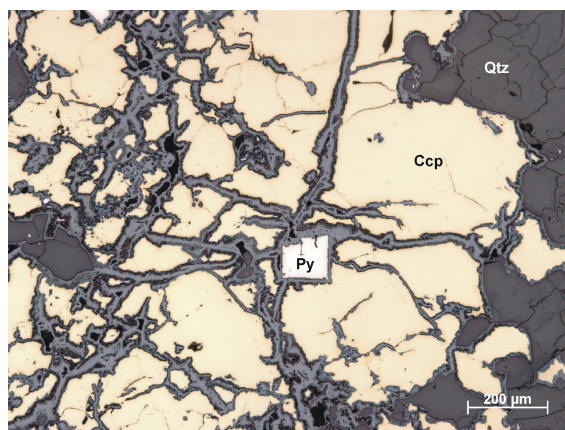


Abb. 7.49.: Pyrit (Py) umschlossen von Chalkopyrit (Ccp) in idiomorphen Quarz (Qtz) (Probe MA-091472) (Auflichtaufnahme).

ist, die mit nicht näher zu bestimmenden Eisenoxiden bzw. -hydroxiden gefüllt sind. Unter dem Mikroskop lassen sich einzelne idiomorphe Pyritkristalle im Chalkopyrit beobachten (Abb. 7.49). Die mikroanalytische Untersuchung der Chalkopyritvererzung zeigt nur geringe Abweichungen von der Idealzusammensetzung (Tabelle A.10). Auf die Ergebnisse der Bleiisotopenuntersuchung wird in Kapitel 9 näher eingegangen.

7.5. Die Lehmproben

Bei den untersuchten Lehmproben aus den Röstbetten handelt es sich um einen sehr tonhaltigen Lehm, der aufgrund der unterschiedlichen thermischen Belastung der Proben eine orangeweiße bis schwärzlichrotorange Färbung aufweist (Abb. 7.50 (a) und (b)). Die Proben aus den Schmelzöfen besitzen eine hellbraungraue bis rotgraue Färbung (Abb. 7.50 (c)). In einer Probe aus Ofen 1 wurden bis 2 mm große Knochenfragmente sowie Reste von Holzkohle nachgewiesen (Abb. 7.50 (d)). Auch die rötliche Färbung der Lehmproben aus den Schmelzöfen lässt auf eine unterschiedlich starke Hitzeeinwirkung schließen.

Um die Frage zu klären, ob für den Bau der Röstbetten und der Schmelzöfen das gleiche Material verwendet wurde, erfolgte eine Analyse der Lehmproben hinsichtlich ihrer Spurenelementgehalte mittels Neutronenaktivierung. Eine Mikroskopuntersuchung der Proben wurde nicht durchgeführt, da durch die Einwirkung unterschiedlicher Temperaturen während des Röstens bzw. des Schmelzens verschiedene Mineralumwandlungen bzw. -neubildungen erfolgen und daher ein Vergleich anhand der Mineralzusammensetzung nicht sinnvoll erscheint.

In Abb. 7.51 sind die Ergebnisse der Spurenelementanalysen dargestellt, getrennt für die Proben aus den Röstbetten einerseits und den Proben aus den Schmelzöfen ande-

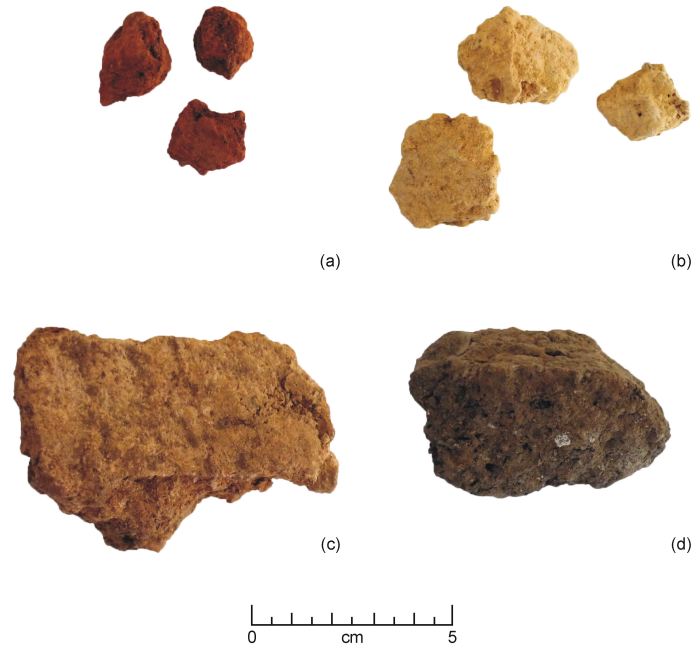


Abb. 7.50.: Lehmproben vom Kupferschmelzplatz S1. (a) Probe MA-110593 (FNr. 3675, Röstbett 9), (b) Probe MA-110595 (FNr. 3847, Röstbett 9), (c) Probe MA-110605 (FNr. 5587, Ostwand Ofen 2), (d) Probe MA-110601 (FNr. 4960, Ofen 1) mit deutlich sichtbaren Holzkohlelinsen (schwarz) und Knochenfragmenten (weiß).

rerseits (vgl. Tabelle A.13). Diese Darstellung zeigt, dass die einzelnen Proben nur sehr geringe Streuungen untereinander aufweisen. Die Standardabweichung für die Seltenen Erdelemente liegt zwischen 10 % und 25 % vom Mittelwert. Dies deutet darauf hin, dass sie aus dem gleichen Material bestehen. Die aus dem Erz stammenden und somit für die Verhüttung relevanten Elemente Cobalt, Zink, Arsen und Antimon streuen stärker. Die Standardabweichung liegt hier deutlich über 50 % vom Mittelwert. Aus der Abbildung

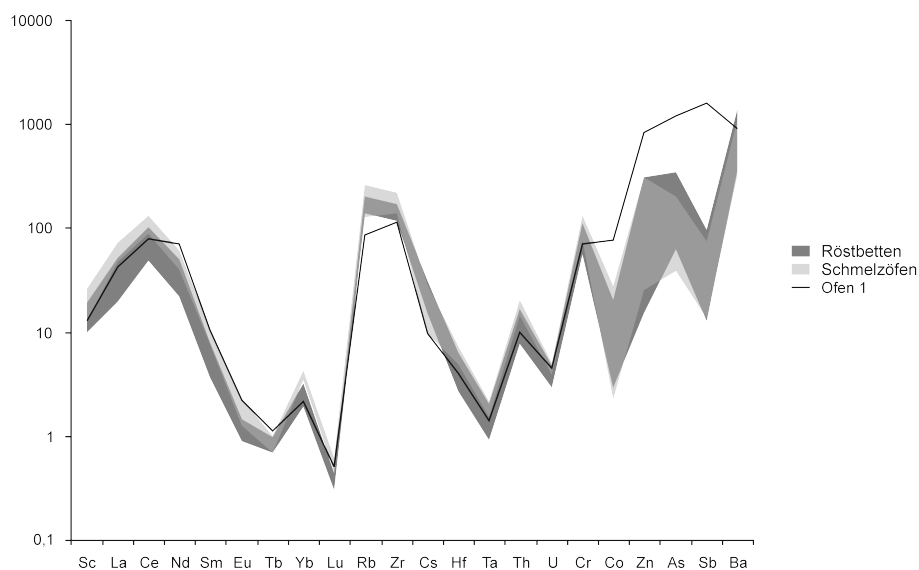


Abb. 7.51.: Darstellung der Spurenelementgehalte der untersuchten Lehmproben aus den Röstbetten und Schmelzöfen.

geht außerdem hervor, dass auch eine Unterscheidung der Lehmproben aus den Röstbetten und denen aus den Schmelzöfen nicht möglich ist. Lediglich die Probe (MA-110601 (FNr. 4960)) aus Ofen 1 unterscheidet sich durch signifikant höhere Gehalte an Cobalt, Zink, Arsen und Antimon, d.h. sie ist stärker mit Erzresten kontaminiert. Aber die für den Vergleich relevanten Elemente zeigen kaum Unterschiede zu den übrigen Proben. Es ist daher davon auszugehen, dass alle Proben aus dem gleichen Rohmaterial hervorgegangen sind und durch Röst- und Schmelzprozesse an Schwermetallen angereichert sind. Da die potentiellen Lehmvorkommen nicht bekannt sind und daher nicht beprobt werden konnten, sind Aussagen zur Herkunft des verwendeten Materials nicht möglich.

8. Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen der Schlacken aus den unterschiedlichen Bereichen des Kupferschmelzplatzes S1 diskutiert. Da zwischen den makroskopisch unterschiedlichen Schlackentypen keine signifikanten Unterschiede festgestellt wurden (vgl. Kapitel 7.1), erfolgt die Diskussion der Ergebnisse unabhängig von der Schlackentypologie.

8.1. Die Schlacken aus den Röstbetten

Während des Röstens sulfidischer Erze wird der als Sulfid gebundene Schwefel zu Schwefeldioxid oxidiert. Bei diesem Prozess entstehen in der Regel keine Schlacken. Die auf den Röstbetten gefundenen Schlacken am Kupferschmelzplatz S1 wurden daher wohl als Unterbau der Röstbetten verwendet, auf denen dann das zu röstende Erz aufgeschichtet wurde. Dies gewährleistete eine ausreichende Luftzufuhr von unten für den Röstprozess. Makroskopisch lassen sie sich anhand ihrer deutlich rötlicheren Färbung von den Schlacken aus den Halden und den Schmelzöfen unterscheiden. Die Verfärbung ist auf die Bildung von Hämatit durch die Hitzeeinwirkung unter stark oxidierenden Bedingungen während des Röstprozesses zurückzuführen.

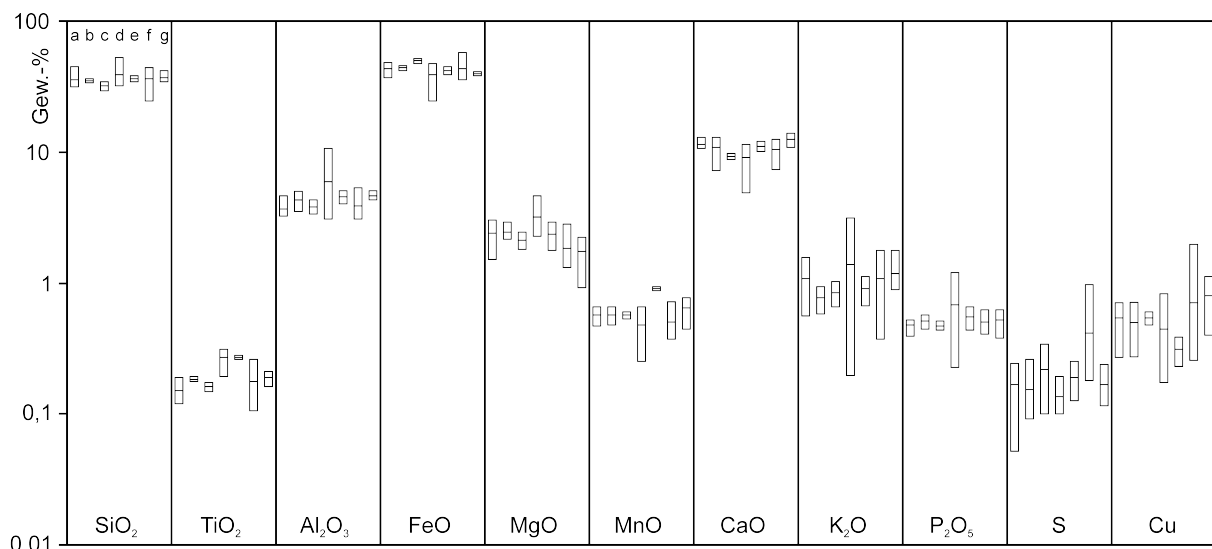


Abb. 8.1.: Vergleich der Pauschalanalysen der Schlacken aus den Röstbetten 1 (a, n=5), 2 (b, n=3), 3 (c, n=2), 4 (d, n=4), 5 (e, n=2), 7 (f, n=12) und 9 (g, n=4) vom Kupferschmelzplatz S1 (Nummerierung in allen Spalten entsprechend Spalte 1).

Aus den Ergebnissen der pauschalchemischen Analyse der Schlacken der verschiedenen Röstbetten (Abb. 8.1) wird deutlich, dass alle Schlacken weitestgehend eine ähnliche Zusammensetzung bezüglich der Hauptbestandteile aufweisen (vgl. Tabelle A.3). Die Schlacken aus Röstbett 4 zeigen tendenziell höhere Gehalte an TiO_2 , Al_2O_3 , MgO und K_2O , doch lassen sie sich aufgrund ihres Streubereichs nicht eindeutig von den Schlacken aus den anderen Röstbetten unterscheiden. Die Schlacken aus Röstbett 5 besitzen etwas höhere Gehalte an TiO_2 und MnO . Leicht höhere MnO -Gehalte in den Schlacken weisen auf eine leicht flüssigere Schmelze hin. Zudem enthalten alle Schlacken noch eine Menge Schwefel, wobei die Schlacken aus Röstbett 7 die größten Gehalte aufweisen.

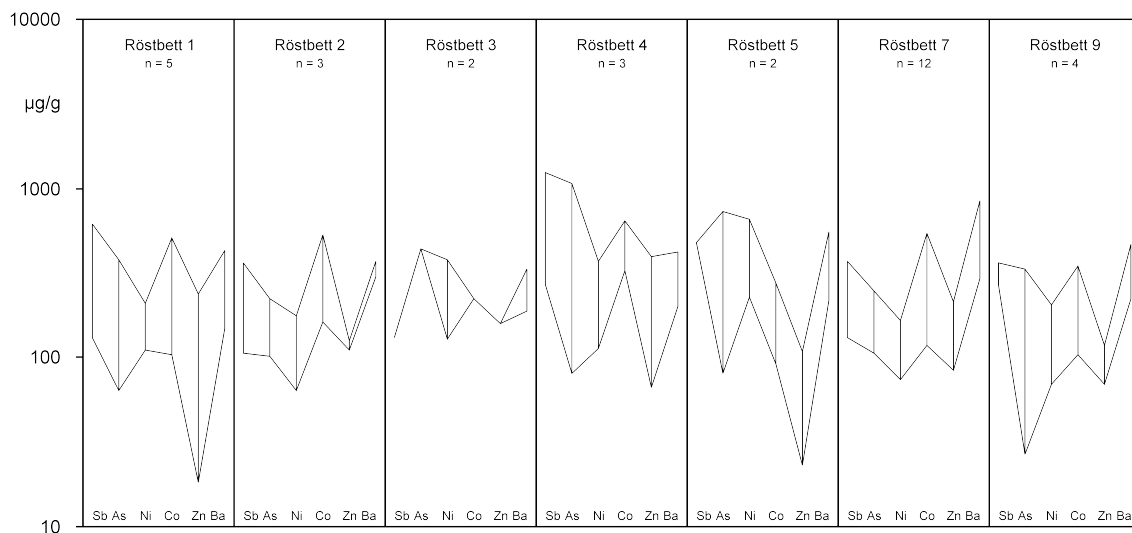


Abb. 8.2.: Vergleich ausgewählter Spurenelemente der Schlacken aus den Röstbetten vom Kupferschmelzplatz S1.

Auch die Gehalte der Spurenelemente in den Schlacken sind relativ einheitlich (Abb. 8.2). Das Auftreten von Barium in den Schlacken lässt auf eine barythaltige Gangart der verhütteten Erze schließen, wie sie für die ostalpinen Kupfervererzungen typisch sind. Zudem enthalten alle untersuchten Schlacken signifikante Gehalte an Arsen und Antimon, die darauf hindeuten, dass in den Erzchargen auch Fahlerzminerale enthalten waren.

Bei Antimon und Arsen handelt es sich entsprechend der Goldschmidt-Klassifikation um chalkophile Elemente, die sich während des Schmelzprozesses überwiegend in den Sulfideinschlüssen anreichern. So können Kupfersteineinschlüsse in Schlacken, die bei der Verhüttung von Antimon- bzw. Arsenfahlerzen entstanden, bis 3 Gew.-% Antimon bzw. Arsen enthalten. Bei den mikroanalytischen Untersuchungen hinsichtlich der Zusammensetzung der Kupfersteineinschlüsse in den Schlacken aus den Röstbetten mittels EDX-Flächenanalysen wurde weder Antimon noch Arsen nachgewiesen⁵. Eine Verhüttung von

⁵ Die Nachweisgrenze der REM/EDX für Arsen und Antimon liegt bei 0,1 Gew.-%. Hier könnten Untersuchungen mittels Mikrosonde, deren Nachweisgrenze für die genannten Elemente deutlich niedriger ist, genauere Informationen liefern.

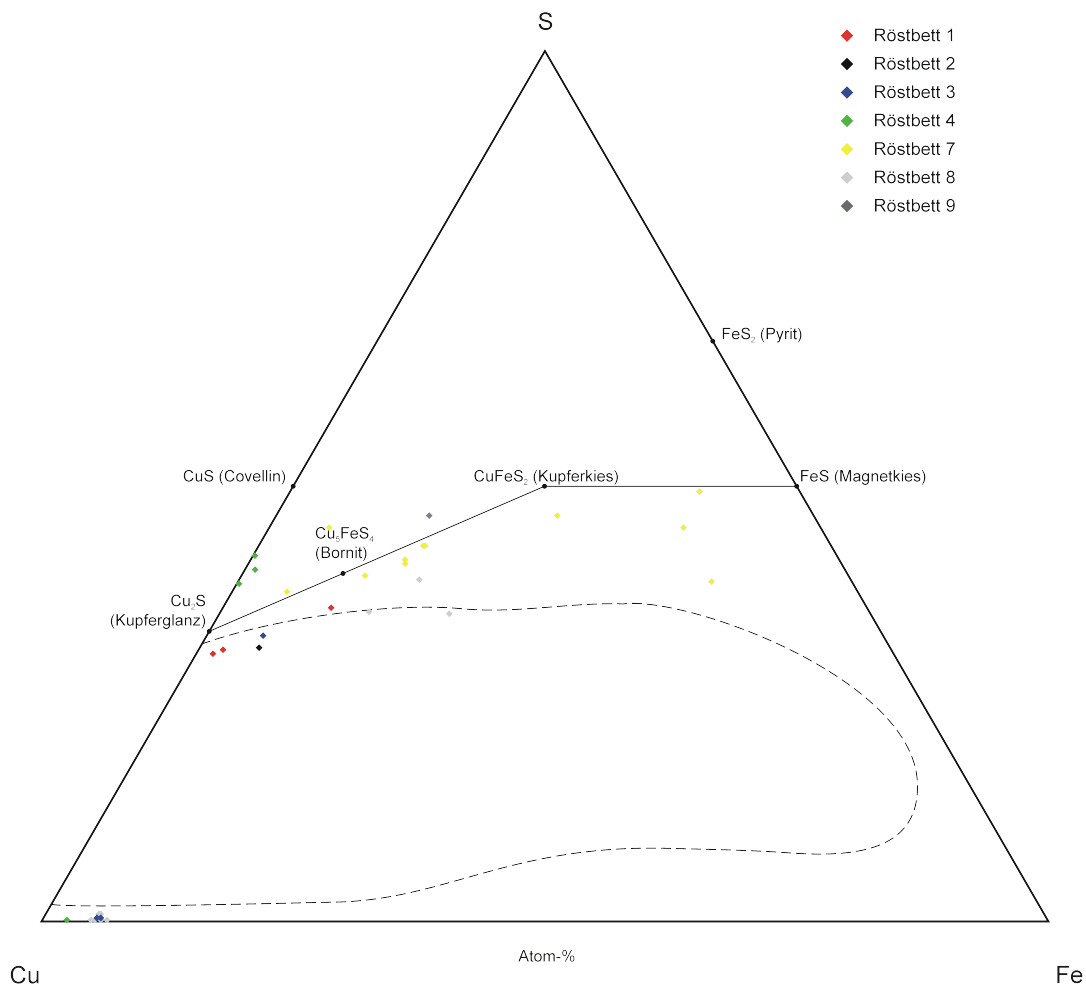


Abb. 8.3.: Darstellung der Zusammensetzung der Sulfideinschlüsse in den Schlacken aus den Röstbetten vom Kupfer-schmelzplatz S1 im System Cu-Fe-S nach Schlegel & Schüller (1952).

Erzchargen mit wesentlichen Anteilen an Fahlerz oder gar Fahlerzvormacht ist daher unwahrscheinlich. Die Darstellung der Ergebnisse der Untersuchungen im System Cu-Fe-S nach Schlegel & Schüller (1952) (Abb. 8.3) zeigt, dass es sich bei den Einschlüssen überwiegend um kupferreiche Steine handelt. Lediglich die Schlacken aus Röstbett 7 weisen auch eisenreiche Sulfideinschlüsse auf. Anhand der Zusammensetzung der Sulfideinschlüsse ist demnach der überwiegende Teil der Schlacken aus den Röstbetten einem Schmelzgang zuzuordnen, bei dem bereits gewonnener Kupferstein weiter an Kupfer angereichert wurde.

8.2. Die Ofenwandverschlackungen aus den Schmelzöfen

Anhand ihrer chemischen Zusammensetzung lassen sich die verschlackten Bereiche der Ofenwandmaterialien (Ofensteine, Ofenlehm sowie Schlackenhautproben) eindeutig von den übrigen Schlacken unterscheiden (vgl. Tabelle A.3). So besitzen sie grundsätzlich hö-

here Gehalte an SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 und K_2O , was zunächst auf eine Reaktion der Schlackenschmelze mit der silikatischen Innenauskleidung der Schmelzöfen zurückzuführen ist. Darüber hinaus enthalten sie deutlich höhere Kupferwerte (bis 20 Gew.-%), die aus den zahlreichen Einschlüssen metallischen Kupfers resultieren (vgl. Kapitel 7.2).

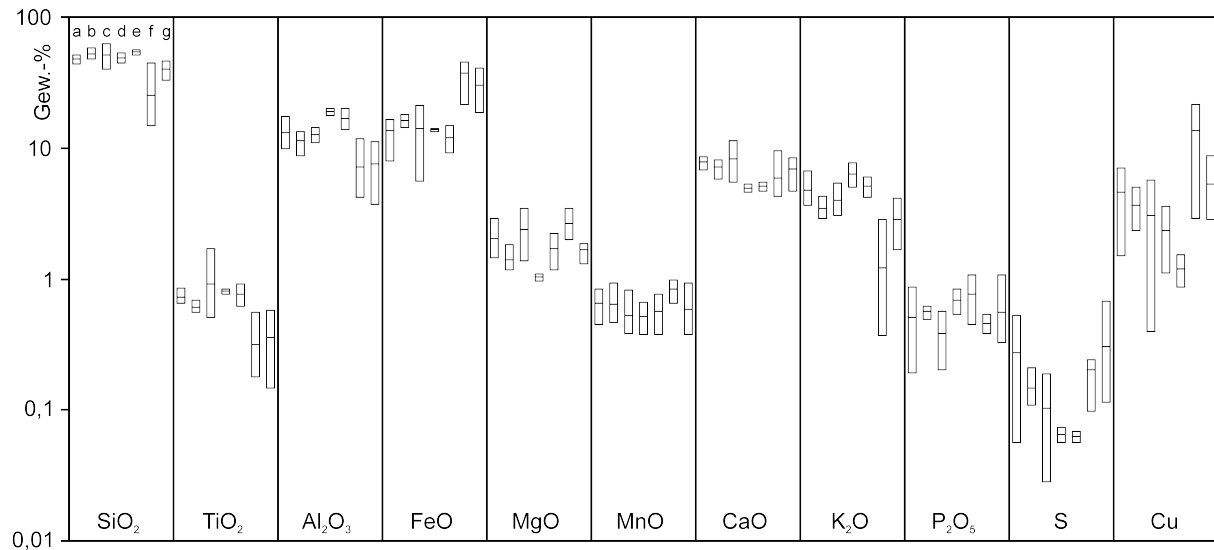


Abb. 8.4.: Vergleich der Pauschalanalysen der Ofenwandverschlackungen von Ofen 1 (a, n=4), der älteren Phase von Ofen 2 (b, n=3), der jüngeren Phase von Ofen 2 (c, n=6), Ofen 3 (d, n=2), Ofen 4 (e, n=2), der älteren Phase von Ofen 5 (f, n=4) und der jüngeren Phase von Ofen 5 (g, n=8) vom Kupferschmelzplatz S1 (Nummerierung in allen Spalten entsprechend Spalte 1).

Bei der vergleichenden Betrachtung der Ergebnisse der pauschalchemischen Untersuchungen für die Ofenwandverschlackungen der einzelnen Schmelzöfen (Abb. 8.4) fällt zunächst auf, dass die Verschlackungsschichten der beiden Bauphasen von Ofen 5 eine etwas andere Zusammensetzung aufweisen als die Verschlackungsschichten der übrigen Öfen. Bei den Proben aus den Öfen 1–4 handelt es sich überwiegend um die verschlackten Teile von Ofensteinen und Ofenlehm. Deren hohe SiO_2 - und Al_2O_3 -Gehalte sind daher einerseits auf eine Reaktion der Schlackenschmelze mit dem silikatischen Baumaterial der Ofenwände und andererseits auf eine unzureichende Abtrennung des silikatischen Materials von der eigentlichen Verschlackungsschicht für die chemische Analyse zurückzuführen. Bei den Proben aus Ofen 5 handelt es sich dagegen überwiegend um Schlackenhautproben, denen, wie bereits beschrieben, nur wenige silikatische Reste anhaften. Auffällig ist dabei, dass die Verschlackungen der älteren Phase von Ofen 5 deutlich höhere Gehalte an MgO und MnO sowie niedrigere Gehalte an K_2O im Vergleich zur jüngeren Phase von Ofen 5 aufweisen. Die K_2O -Gehalte sind überwiegend auf die Reaktion der Schlackenschmelze mit der Asche, die beim Verbrennen der für die Verhüttung verwendeten Holzkohle entsteht, zurückzuführen und variieren dabei in Abhängigkeit der verwendeten Holzart (Goldenberg 1996, 39). Grundsätzlich wäre denkbar, dass verschiedene Holzarten in den einzelnen Phasen des Schmelzofens 5 zur Verhüttung genutzt wurden. Auch kann

nicht ausgeschlossen werden, dass in Ofen 4 eine andere Holzart verwendet wurde, als in Ofen 5. Ob in den Öfen verschiedene Prozesse durchgeführt wurden, die unterschiedliche Holzarten voraussetzten, lässt sich anhand der hier vorgelegten Daten jedoch nicht eindeutig klären.

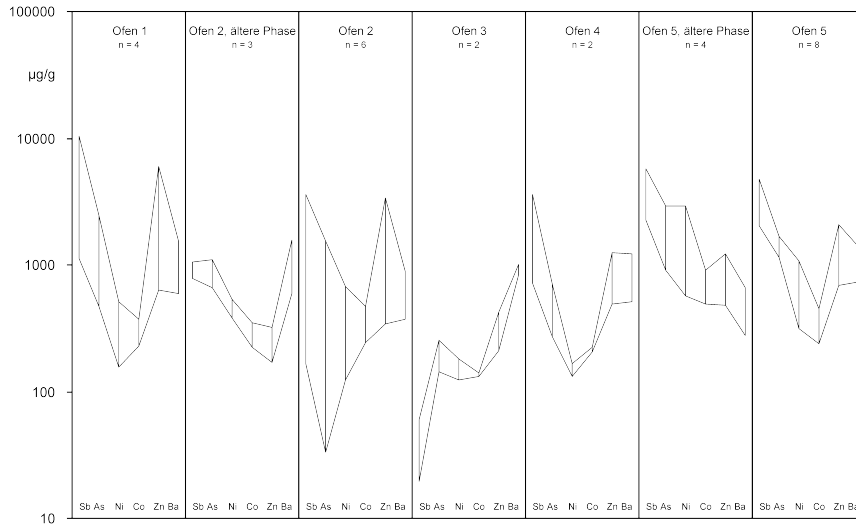


Abb. 8.5.: Vergleich ausgewählter Spurenelemente der Ofenwandverschlackungen der Schmelzöfen.

In Abb. 8.5 sind die Spurenelementsignaturen der Ofenwandverschlackungen der einzelnen Schmelzöfen dargestellt. Es lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen. Lediglich die Verschlackung von Ofen 3 zeichnet sich durch sehr niedrige Antimongehalte aus. Die Verschlackungsschichten der Öfen 1 und 2 weisen dagegen etwas höhere Zinkgehalte auf, was auf eine Vergesellschaftung von Zinkblende mit dem verhütteten Erz deutet. Eine unterschiedliche Prozessführung in den einzelnen Doppelofenalagen konnte jedoch nicht festgestellt werden.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der mikroanalytischen Untersuchungen der metallischen und sulfidischen Einschlüsse (Abb. 8.6) fällt auf, dass die Probe aus Ofen 4 ausschließlich Cu/Fe-Sulfide enthält, während in den untersuchten Proben von Ofen 5 nur metallisches Kupfer nachgewiesen wurde. Dies lässt zunächst vermuten, dass in Ofen 4 die Verhüttung auf Kupferstein erfolgte und in Ofen 5 eine Reduktion des Kupfersteins zu metallischem Kupfer. Jedoch lässt sich dieser Umstand auch auf die Lage der untersuchten Stücke zurückführen. Während die Probe aus Ofen 4 (MA-101402 (FNr. 5064)) von der Ofensohle stammt, kommen die Proben aus Ofen 5 (MA-101406 (FNr. 5155) und MA-101407 (FNr. 5169)) aus einem Bereich von 20–40 cm oberhalb der Ofensohle. Aufgrund der Untersuchungen hinsichtlich des Phasenbestandes der Verschlackungen ist für diesen Ofenbereich ein Sauerstoffpartialdruck zwischen 10^{-4} und 10^{-6} bar anzunehmen, während im unteren Bereich der Schmelzöfen ein Sauerstoffpartialdruck zwischen 10^{-5} und 10^{-9} bar herrschten. Die höheren Partialdrücke spiegeln die Bedingungen gegen Ende des

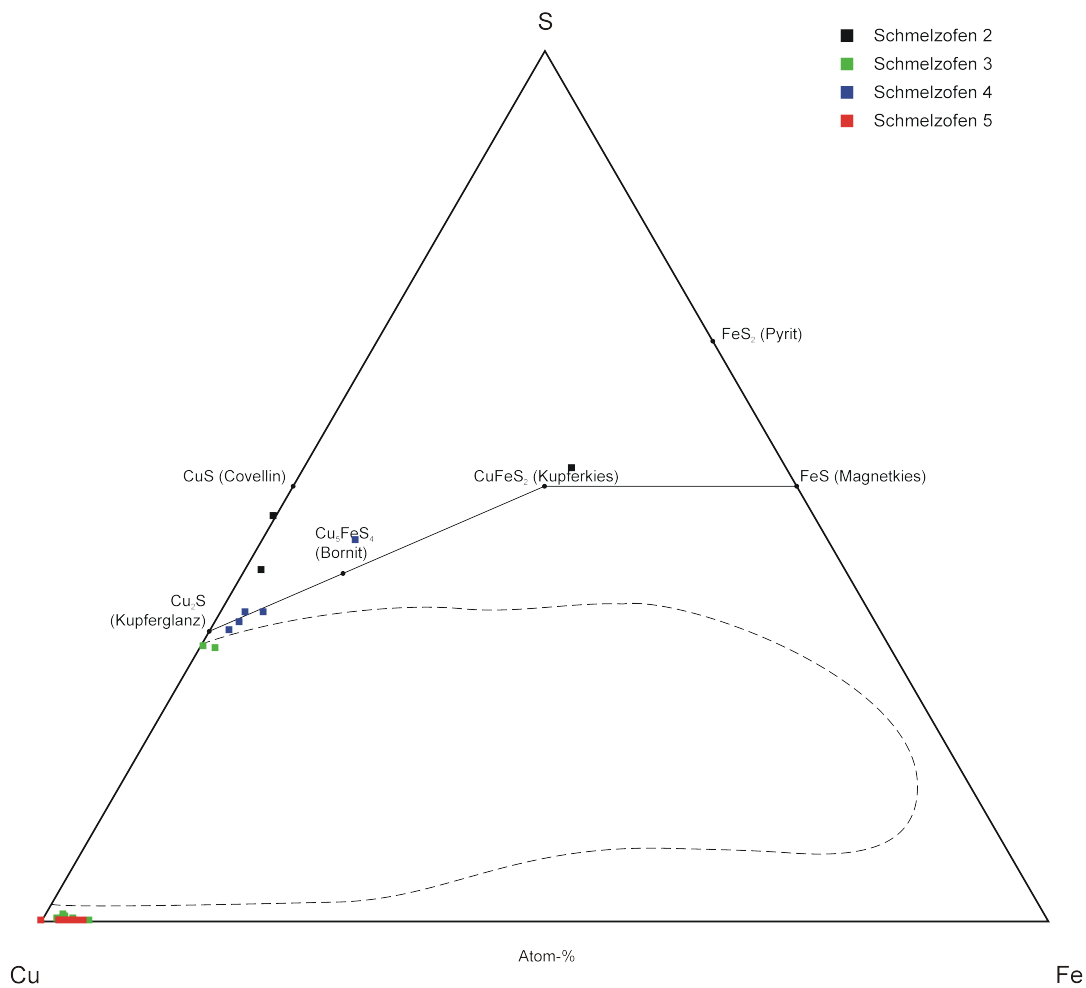


Abb. 8.6.: Darstellung der Zusammensetzung der Sulfideinschlüsse in den Ofenwandverschlackungen der Schmelzöfen vom Kupferschmelzplatz S1 im System Cu-Fe-S nach Schlegel & Schüller (1952).

Schmelzvorganges wider, bei denen durchaus eine Röstung der enthaltenen Restsulfide und eine gleichzeitige Bildung von metallischem Kupfer möglich sind (vgl. Kapitel 7). Eine Aufteilung verschiedener Stufen des Verhüttungsprozesses auf die beiden Öfen einer Doppelofenanlage kann daher zwar vermutet jedoch nicht eindeutig nachgewiesen werden.

8.3. Die Schlacken von den Ofenvorplätzen und den Halden

Die bei den einzelnen Schmelzvorgängen entstandenen Schlacken kamen zunächst auf den den Doppelofenanlagen vorgelagerten Arbeitsbereichen (Ofenvorplätze) zu liegen, bevor sie auf den Halden zusammen mit anderen Hüttenabfällen wie Reste des Ofenbaumaterials deponiert wurden. Daher werden die Schlacken von den Ofenvorplätzen zunächst getrennt von den Halden betrachtet und nach der Diskussion der Schlacken aus den Halden mit diesen verglichen.

8.3.1. Die Schlacken der Ofenvorplätze

Die Ergebnisse der pauschalchemischen Analysen (Abb. 8.7) zeigen, dass die Schlacken vom Vorplatz der Doppelofenanlage 9/10 sowie vom Vorplatz des Ofens 11 eine heterogenere Zusammensetzung als die übrigen Schlacken aufweisen (vgl. Tabelle A.3). Im

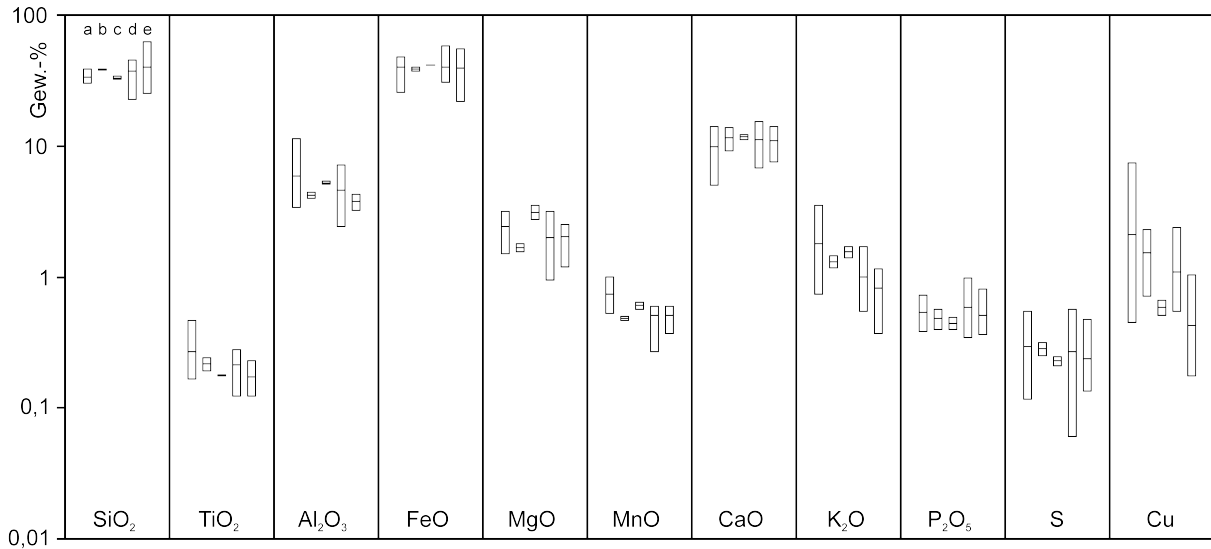


Abb. 8.7.: Vergleich der Pauschalanalysen der Schlacken von den Ofenvorplätzen der Doppelofenanlagen 1/2 (a, n=5), 4/5 (b, n=2), 7/8 (c, n=2), 9/10 (d, n=9) sowie vom Ofenvorplatz des Ofens 11 (e, n=6) vom Kupferschmelzplatz S1 (Nummerierung in allen Spalten entsprechend Spalte 1).

Zusammenhang mit den Ergebnissen der mikroskopischen Untersuchungen lassen sich die Schwankungen in den SiO_2 -Gehalten auf unterschiedliche Mengen an unaufgeschmolzenen Quarzeinschlüssen in den Schlacken zurückführen. So wurden in den Schlacken der Doppelofenanlagen 1/2, 4/5 und 7/8 tendenziell weniger Quarzeinschlüsse festgestellt. Die

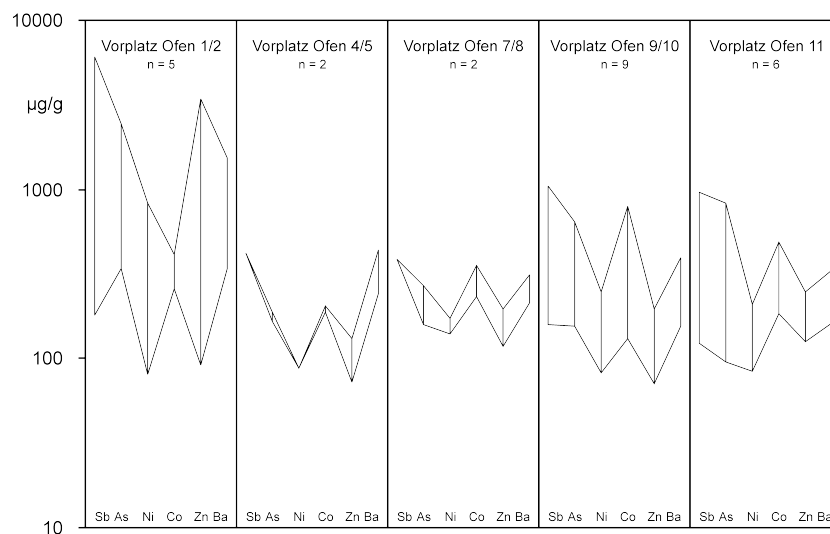


Abb. 8.8.: Vergleich ausgewählter Spurenelemente der Schlacken von den Ofenvorplätzen der Doppelofenanlagen vom Kupferschmelzplatz S1.

Schlacken der Doppelofenanlage 1/2 besitzen zudem etwas höhere MnO-Gehalte. Im Mittel zeigen jedoch alle Schlacken eine ähnliche Zusammensetzung, was darauf hinweist, dass in den Schmelzöfen gleiche Bedingungen während der Schlackenbildung vorherrschten.

Bei dem Vergleich der Spurenelementmuster für die einzelnen Ofenvorplätze (Abb. 8.8) besitzen die Schlacken vom Vorplatz der Doppelofenanlage 1/2 die größte Variationsbreite. Die hohen Antimon- und Arsengehalte dieser Schlacken lassen eine Verhüttung von fahlerzhaltigen Chargen vermuten. Die hohen Zinkgehalte weisen, wie es bereits bei den Ofenwandverschlackungen dieser Doppelofenanlage beobachtet wurde, auf eine Vergesellschaftung von Zinkblende mit dem verhütteten Erz hin, während die höheren Bariumgehalte ein barythaltiges Nebengestein andeuten. Die Schlacken der Vorplätze der Doppelofenanlagen 4/5, 7/8 und 9/10 sowie vom Vorplatz des Ofens 11 weisen generell geringere Spurenelementgehalte auf. Dennoch ist eine Unterscheidung zwischen einzelnen Ofenanlagen nur schwer möglich, da sich die Schwankungsbereiche größtenteils überlagern.

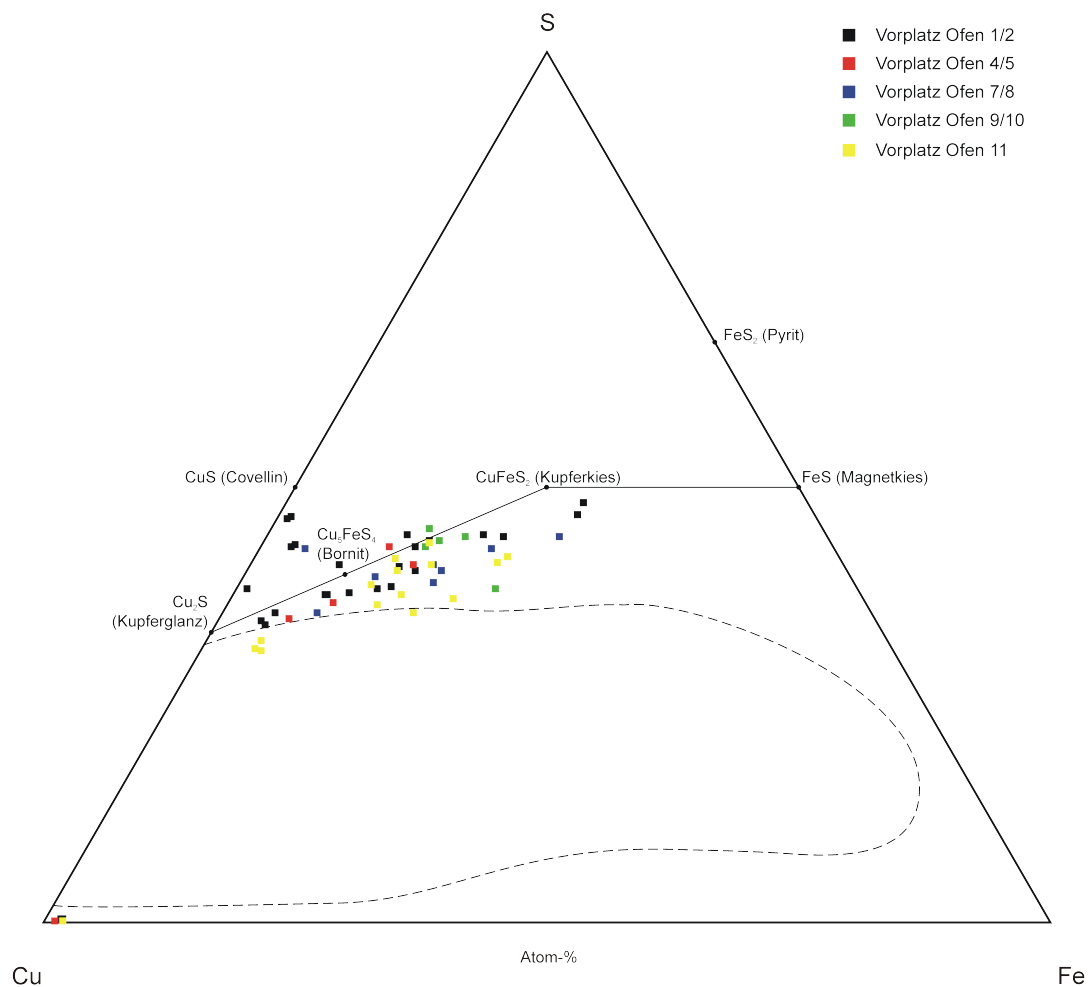


Abb. 8.9.: Darstellung der Zusammensetzung der Sulfideinschlüsse in den Schlacken von den Vorplätzen der Doppelofenanlagen vom Kupferschmelzplatz S1 im System Cu-Fe-S nach Schlegel & Schüller (1952).

Anhand der chemischen Zusammensetzung der in den Schlacken enthaltenen Sulfideinschlüsse ist es möglich, Rückschlüsse auf den schlackenbildenden Prozess zu ziehen (vgl. Kapitel 7.1). In Abb. 8.9 sind die Ergebnisse der mikroanalytischen Untersuchungen an den Kupfersteineinschlüssen der Schlacken von den Ofenvorplätzen der Doppelofenanlagen im System Cu-Fe-S nach Schlegel & Schüller (1952) dargestellt. Sie sind überwiegend kupferreich, wobei eine Unterscheidung zwischen Kupfersteinen aus den Schlacken der verschiedenen Ofenvorplätze nicht möglich ist. Es ist daher davon auszugehen, dass in den Schmelzöfen der gleiche Prozess durchgeführt wurde, der eine Anreicherung des Kupfers im Stein zum Ziel hatte. In keinem der Einschlüsse konnten Spurenelemente wie Arsen oder Antimon, die auf die Verwendung von Fahlerzen hinweisen würden, nachgewiesen werden. Die verhütteten Ausgangsstoffe sind demnach auf der Linie Chalkopyrit-Bornit zu suchen.

8.3.2. Halde 1

In Schlackenhalde 1 wurden drei bronzzeitliche, aufeinanderfolgende, schlackenführende Phasen identifiziert. Dabei entspricht Schicht 7 der älteren, Schicht 6 der mittleren und Schicht 5 der jüngeren Phase. Erste Analysen von bronzzeitlichen Schlacken dieser Halde wurden bereits von Thalhammer & Thalhammer (2006) durchgeführt. Dabei konnten sie keine signifikanten Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der Schlacken aus den einzelnen Schichten feststellen. Die Ergebnisse der erneuten Untersuchungen hinsicht-

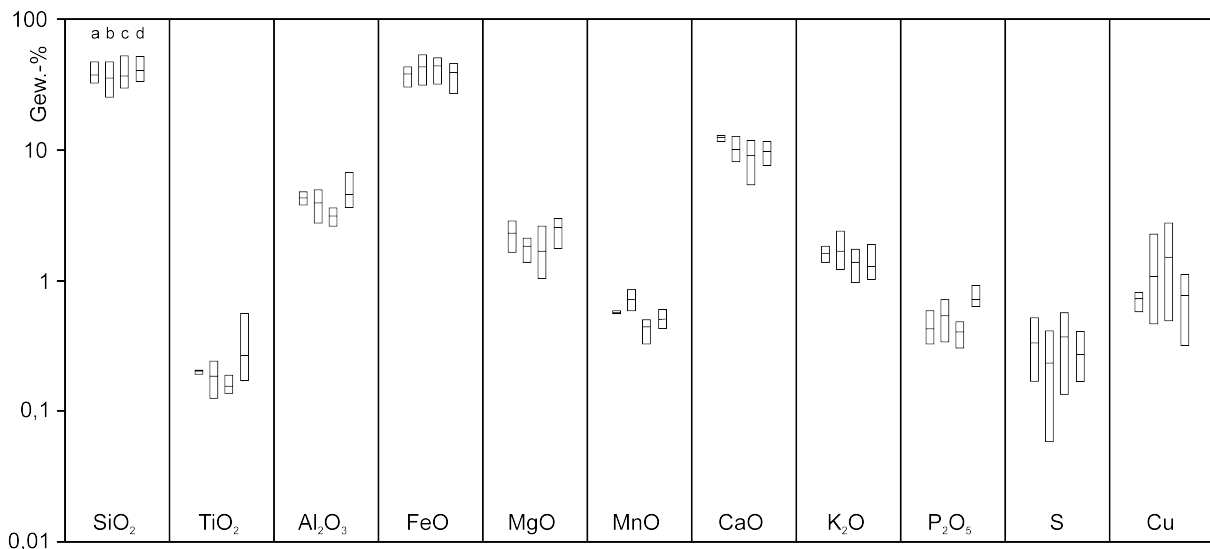


Abb. 8.10.: Vergleich der Pauschalanalysen der Schlacken aus der älteren (a, n=3), der mittleren (b, n=5) und der jüngeren Phase (c, n=4) von Halde 1 sowie den Analysen von Thalhammer & Thalhammer (2006) (d, n=12) (Nummerierung in allen Spalten entsprechend Spalte 1).

lich der chemischen Zusammensetzung sind in Abb. 8.10 dargestellt (vgl. Tabelle A.3). Zum Vergleich wurden die Ergebnisse der Untersuchungen von Thalhammer & Thal-

hammer (2006) in das Diagramm eingetragen. Es ist ersichtlich, dass die Schlacken der einzelnen Phasen weitestgehend die gleiche Zusammensetzung aufweisen und den Ergebnissen von Thalhammer & Thalhammer (2006) entsprechen. Aufgrund der einheitlichen Zusammensetzung der Schlacken aus der älteren, der mittleren und der jüngeren Phase der Schlackenhalde 1 ist davon auszugehen, dass sie während der gleichen Stufe des Verhüttungsverfahrens entstanden sind.

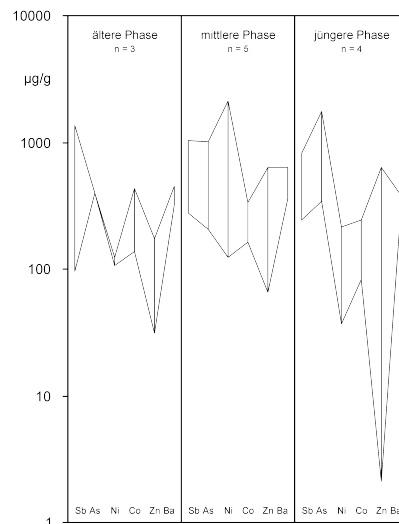


Abb. 8.11.: Vergleich ausgewählter Spurenelemente der Schlacken der älteren, der mittleren und der jüngeren Phase von Halde 1.

Bei der Betrachtung der Spurenelementgehalte (Abb. 8.11) der Schlacken fällt zunächst der große Schwankungsbereich von Zink in den Schlacken aus der jüngeren Phase auf. Im Mittel liegt er jedoch im Schwankungsbereich der übrigen Schlacken. Die Schlacken der jüngeren Phase zeichnen sich außerdem durch leicht höhere Arsengehalte aus, während die Schlacken aus der mittleren Schicht etwas höhere Nickelgehalte aufweisen. Nur in einer Probe konnte ein Kupfersteineinschluss nachgewiesen werden, der neben den Hauptelementen Kupfer, Eisen und Schwefel Spuren von Arsen, Antimon und Nickel enthält (vgl. Tabelle A.9). Dies lässt darauf schließen, dass die verhütteten Erze diese Elemente enthielten, eine Verhüttung von Fahlerzen ist jedoch als unwahrscheinlich anzusehen. Die Anwesenheit von Barium lässt auf eine barythaltige Gangart der verhütteten Erze schließen.

Insgesamt zeigen die Schlacken der einzelnen Haldenschichten von Halde 1 eine ähnliche chemische Zusammensetzung. Eine Unterscheidung der Schlacken aus den einzelnen Schichten sowie deren Zuordnung zu unterschiedlichen Prozessstufen ist daher nicht möglich.

8.3.3. Halde 2

Stratigraphisch lässt sich die Halde 2 in vier aufeinanderfolgende schlackenführende Schichtpakete (Phasen) einteilen. Das ältere Schichtpaket setzt sich aus den Schichten 17, 19, 22, 21a (Pl. 569) und 21b (Pl. 648) zusammen. Die darüber liegende Schicht 7 entspricht dem mittleren und Schicht 6 dem jüngeren Schichtpaket. Das jüngste Schichtpaket der Halde 2 wird durch die Schichten 2 und 3 gebildet. Die Ergebnisse der pauschalchemischen Analyse der Schlacken sind in Abb. 8.12 in einem Balkendiagramm wiedergegeben (vgl. Tabelle A.3).

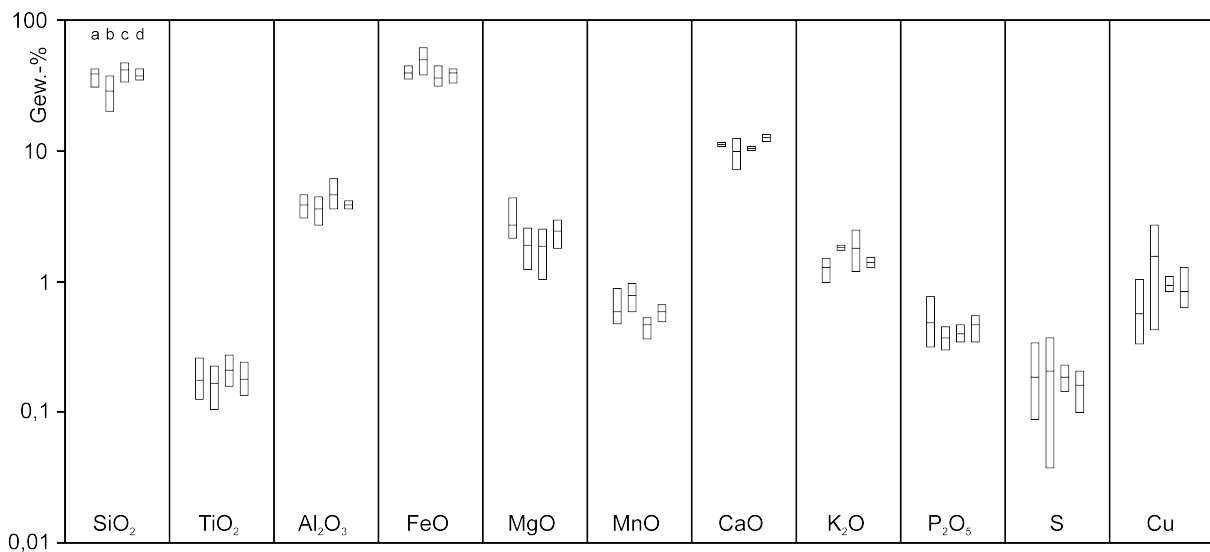


Abb. 8.12.: Vergleich der Pauschalanalysen der Schlacken aus der älteren (a, n=5), der mittleren (b, n=2), der jüngeren (c, n=3) sowie der jüngsten Phase (d, n=4) von Halde 2 (Nummerierung in allen Spalten entsprechend Spalte 1).

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Schlacken der einzelnen Schichtpakete keine signifikanten Unterschiede in ihrer Zusammensetzung aufweisen. Während die Schlacken der mittleren Phase etwas geringere SiO_2 -Gehalte und entsprechend höhere Gehalte an FeO besitzen, zeigen die Schlacken aus den jüngeren Phasen etwas niedrigere Gehalte an MnO. Die Schlacken der älteren Phase enthalten leicht höhere Gehalte an Al_2O_3 , was auf eine stärkere Reaktion mit der silikatischen Innenauskleidung hinweist. Tendenziell besitzen jedoch alle Schlacken eine ähnliche Zusammensetzung, weshalb davon auszugehen ist, dass die Schlacken der Halde 2 unter gleichen Bedingungen entstanden und demzufolge aus einer Prozessstufe stammen.

Anhand des Vergleichs ausgewählter Spurenelemente der untersuchten Schlacken von Halde 2 (Abb. 8.13) zeigt sich, dass die Schlacken der jüngeren Schichtpakete im Mittel deutlich niedrigere Spurenelementgehalte besitzen. Die Schlacken des mittleren Schichtpakets weisen dagegen etwas höhere Gehalte an Antimon, Arsen und Nickel gegenüber den jüngeren Schichtpaketen auf. Bei den mikroanalytischen Untersuchungen der Kupfer-

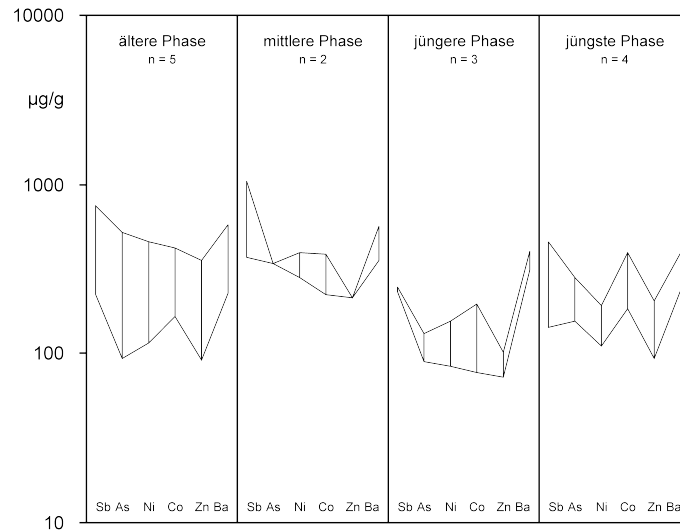


Abb. 8.13.: Vergleich ausgewählter Spurenelemente der Schlacken der älteren, der mittleren, der jüngeren sowie der jüngsten Phase von Halde 2.

steineinschlüsse konnten diese Elemente jedoch nicht nachgewiesen werden. Auffällig ist zudem die starke Streuung der Spurenelementgehalte der Schlacken des älteren Schichtpakets, wodurch eine Unterscheidung der Schlacken aus den einzelnen Phasen der Halde 2 nur schwer möglich ist.

8.3.4. Halde 3

Die Schlackenthalde 3 wird aufgrund ihrer Stratigraphie in insgesamt drei Schichtpakete (Phasen) gegliedert. Die ältere Phase besteht aus den Schichten 4, 5, 10 und 22. Der

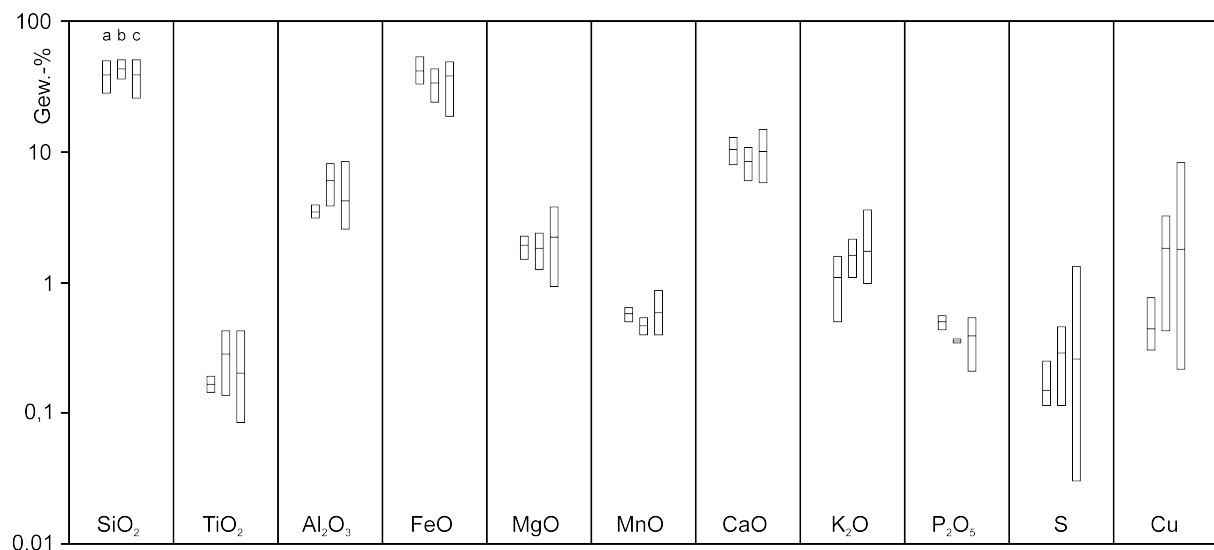


Abb. 8.14.: Vergleich der Pauschalanalysen der Schlacken aus der älteren (a, n=4), der mittleren (b, n=2) sowie der jüngeren Phase von Halde 3 (c, n=10) (Nummerierung in allen Spalten entsprechend Spalte 1).

mittleren Phase werden die Schichten 23, 24 und 25 sowie die Schicht 25a (Pl. 884)

zugeordnet. Die Schichten 2, 9, 11a, 13, 17 und 18 entsprechen der jüngeren Phase. Die Ergebnisse der pauschalanalytischen Untersuchungen der Schlacken aus den drei Phasen der Halde 3 sind in Abb. 8.14 dargestellt (vgl. Tabelle A.3).

Alle Schlacken besitzen eine ähnliche Zusammensetzung, wobei die Schlacken der älteren Phase deutlich niedrigere Al_2O_3 -Gehalte aufweisen. Da Al_2O_3 hauptsächlich aus den Tonmineralen des Ofenlehms, mit dem das Innere des Schmelzofens ausgekleidet wurde, in die Schlackenschmelze eingebracht wird, sind die höheren Al_2O_3 -Gehalte in den Schlacken der mittleren und jüngeren Phase auf eine intensivere Reaktion der Schlackenschmelze mit der Ofenwand zurückzuführen. Abgesehen davon lässt die sonst einheitliche Zusammensetzung der Schlacken insgesamt auf einen gleichartig geführten Schmelzprozess schließen.

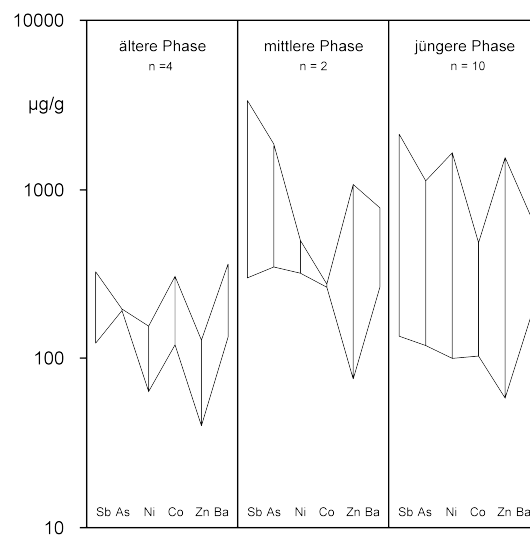


Abb. 8.15.: Vergleich ausgewählter Spurenelemente der Schlacken der älteren, mittleren und jüngeren Phase von Halde 3.

Grundsätzlich weisen alle Schlacken ähnliche Spurenelementsignaturen auf (vgl. Abb. 8.15), weshalb eine Unterscheidung der Schlacken anhand ihrer Spurenelementgehalte nur schwer möglich ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass sie unter ähnlichen Bedingungen gebildet wurden. Lediglich die Schlacken der älteren Phase zeigen durchschnittlich geringere Spurenelementgehalte. Die leicht höheren Gehalte an Antimon, Arsen und Nickel in den Schlacken der mittleren und jüngeren Phase lassen eine Verhüttung einer etwas fehlerreicheren Charge vermuten.

8.3.5. Vergleich der Schlacken von den Ofenvorplätzen und den Halden

Aus den vorangegangenen Betrachtungen wird ersichtlich, dass sich die Schlacken der Ofenvorplätze sowie die Schlacken aus den einzelnen Schichten der untersuchten Halden nicht voneinander unterscheiden lassen. Bevor die Schlacken der Ofenvorplätze mit denen aus den Halden verglichen werden, erfolgt zunächst eine Gegenüberstellung der Halden unter-

einander, um herauszufinden, ob sich die Schlacken der einzelnen Halden verschiedenen Prozessstufen zuordnen lassen. Dafür wurden zunächst die Ergebnisse der pauschalchemischen Untersuchungen in einem Balkendiagramm gegenübergestellt (Abb. 8.16).

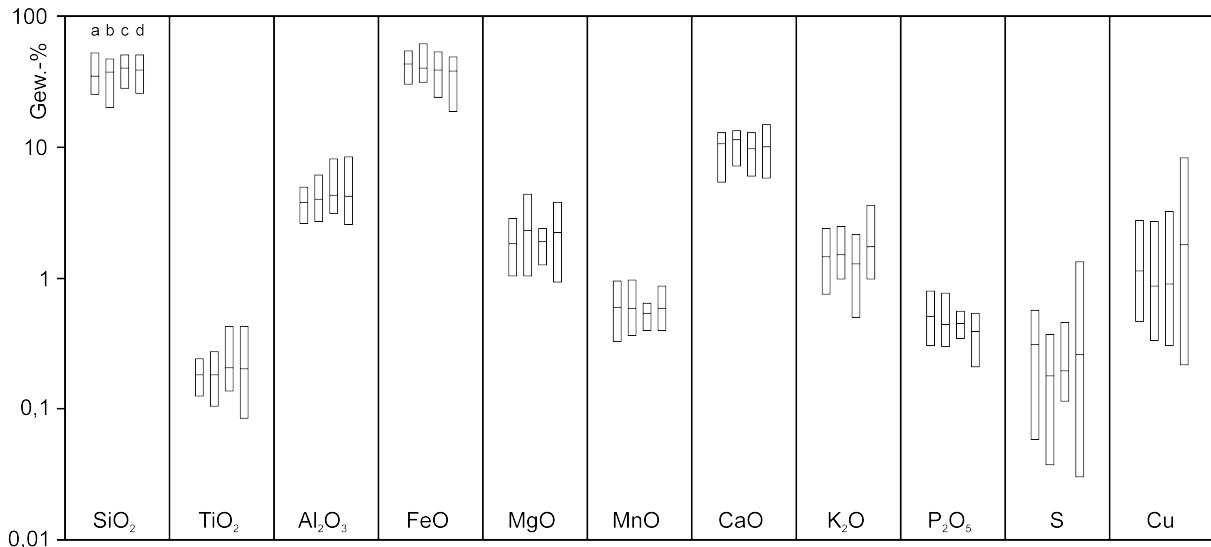


Abb. 8.16.: Vergleich der Pauschalanalysen der Schlacken von Halde 1 (a, n=16), Halde 2 (b, n=14) und Halde 3 vom Kupferschmelzplatz S1 (c, n=16) (Nummerierung in allen Spalten entsprechend Spalte 1).

Der Vergleich zeigt, dass die Schlacken aus den Schlackenhalden keine signifikanten Unterschiede aufweisen, die auf unterschiedliche Bildungsbedingungen hindeuten könnten. Die einheitliche Zusammensetzung der Schlacken lässt vielmehr auf eine entwickelte Verhüttung sulfidischer Erze mit einer einheitlichen Prozessführung schließen.

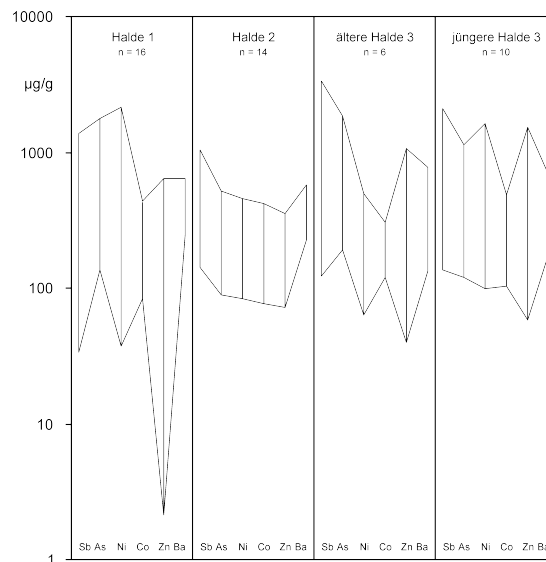


Abb. 8.17.: Vergleich ausgewählter Spurenelemente der Schlacken der Schlackenhalden vom Kupferschmelzplatz S1.

Auch bei dem Vergleich der Spurenelementgehalte besitzen die Schlacken der einzelnen Schlackenhalden ähnliche Signaturen (Abb. 8.17). Die signifikanten Gehalte an den

Elementen Antimon, Arsen und Nickel zeigen, dass die zur Verhüttung verwendeten Erzchargen auch geringe Anteile an Fahlerz und nickelhaltigen Mineralen enthielten. Bei der mikroanalytischen Untersuchung der Kupfersteineinschlüsse wurden diese Elemente jedoch nicht nachgewiesen. Es ist daher eindeutig, dass eine Verhüttung von Fahlerzen nicht bewusst durchgeführt wurde. Auffällig ist außerdem, dass ein Großteil der Schlacken erhebliche Mengen an Zink enthalten, die eine Vergesellschaftung von Zinkblende mit dem verhütteten Erz vermuten lassen. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die Schlacken der untersuchten Schlackenhalden aus einem ähnlichen Verfahrensschritt stammen, wobei vermutlich die gleichen Ausgangserze für die Verhüttung herangezogen wurden.

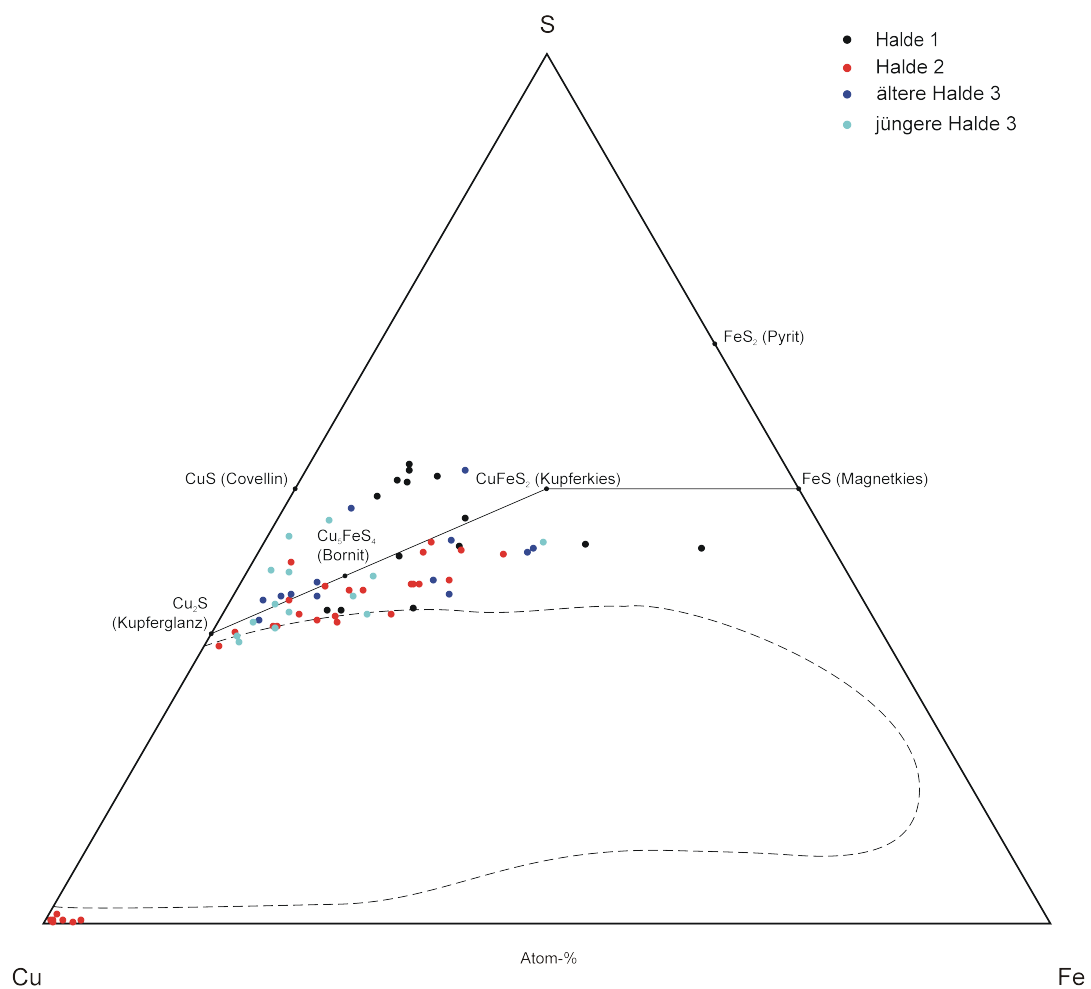


Abb. 8.18.: Darstellung der Zusammensetzung der Sulfideinschlüsse in den Schlacken der Schlackenhalden vom Kupfer-schmelzplatz S1 im System Cu-Fe-S nach Schlegel & Schüller (1952).

Bei den untersuchten Kupfersteineinschlüssen in den Schlacken aus den Schlackenhalden handelt es sich überwiegend um kupferreiche Steine (Abb. 8.18). Lediglich in einer Schlacke der Halde 1 (Probe MA-091447 (FNr. 595)) wurden auch eisenreiche Steine nach-

gewiesen. Schlacken aus der Halde 2 enthalten zudem metallisches Kupfer. Aufgrund der überwiegend kupferreichen Steineinschlüsse wird davon ausgegangen, dass alle untersuchten Schlacken aus den Halden einem gleichartig geführten Schmelzgang zuzuordnen sind, der die Gewinnung von Kupferstein zum Ziel hatte.

Neben den Schlacken aus den einzelnen Haldenschichten wurden auch die Schlacken untersucht, die aus den die Halden überlagernden Schichten stammen. Die Untersuchung der pauschalchemischen Zusammensetzung dieser Schlacken ergab tendenziell etwas niedrigere Gehalte an SiO_2 und leicht höhere Gehalte an FeO (vgl. Tabelle A.3). Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass sie unter vergleichbaren Bedingungen entstanden wie die Schlacken der Halden. Aus welchen Objekten diese Schlacken ursprünglich stammen, lässt sich allerdings nicht mehr feststellen.

Durch den Vergleich der Ergebnisse der Untersuchungen an den Schlacken der Ofenvorplätze und den Schlacken der Halden (vgl. Abb. 8.7–8.9 und Abb. 8.16–8.18) wird deutlich, dass eine Unterscheidung der Schlacken von einzelnen Objekten kaum möglich ist. Dies zeigt, dass an den verschiedenen Stellen des Kupferschmelzplatzes S1 vergleichbare Bedingungen herrschten, die zur Bildung der einzelnen Schlacken führten.

8.4. Die Schlacken der verschiedenen Nutzungsphasen im Westteil des Kupferschmelzplatzes S1

Ein Vergleich der Schlacken aus den unterschiedlichen Nutzungsphasen (vgl. Kapitel 4) ermöglicht Aussagen über eventuelle diachrone Veränderungen im Prozessablauf.

Die anhand ihrer makroskopischen Eigenschaften unterteilten Schlackentypen sind in allen Nutzungsphasen des Kupferschmelzplatzes S1 nachgewiesen, wobei nicht festgestellt werden konnte, dass ein bestimmter Schlackentyp für eine bestimmte Nutzungsperiode charakteristisch ist. Auffällig ist allerdings, dass an der Doppelofenanlage 1/2 deutlich mehr Plattenschlacken gefunden wurden. Für die Unterlage der Röstbetten der einzelnen Betriebsphasen wurden dagegen nur Lauf- und Blasenschlacken sowie Schlacken des Typs A+B verwendet. Für alle Nutzungsphasen zeigt sich dabei, dass die Schlacken aus den Röstbetten eine deutlich rötlichere Färbung der Oberfläche aufweisen, was auf die wiederholte Hitzeeinwirkung während des Röstens zurückzuführen ist.

Für den Vergleich der Zusammensetzung der Schlacken aus den Nutzungsphasen wurden die Hauptkomponenten in das Schmelzdiagramm des ternären Systems $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ nach Kowalski et al. (1995, 26) eingetragen (Abb. 8.19). Die Schlacken der jüngeren Phase besitzen tendenziell niedrigere SiO_2 -Gehalte als die Schlacken der älteren und der mittleren Nutzungsphase. Die niedrigeren SiO_2 -Gehalte lassen sich darauf zurückführen, dass diese Schlacken tendenziell weniger unaufgeschmolzene Quarzbruchstücke enthalten, wie

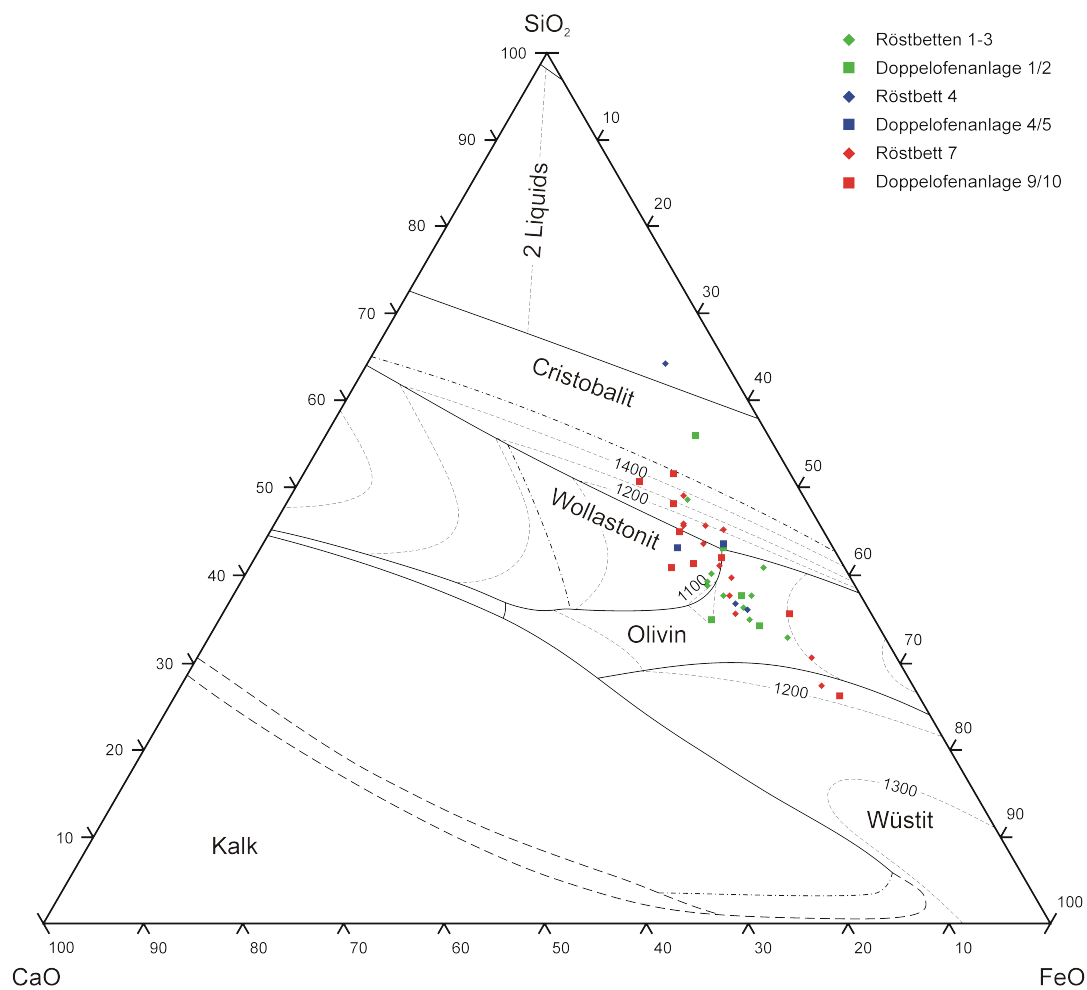


Abb. 8.19.: Darstellung der Hauptkomponenten der Schlacken der verschiedenen Nutzungsphasen des Westteils des Kupferschmelzplatzes S1 im System CaO-SiO₂-FeO nach Kowalski et al. (1995, 126) (rot = ältere Phase, blau = mittlere Phase, grün = jüngere Phase).

durch die lichtmikroskopischen Untersuchungen festgestellt wurde. Generell weisen alle Schlacken eine ähnliche Zusammensetzung auf. Es handelt sich überwiegend um Fayalit-Schlacken bzw. um Fayalit/Pyroxen-Schlacken, wobei der Pyroxenanteil hauptsächlich aus Hedenbergit besteht (vgl. Kapitel 7.1). Auch sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Schlacken aus den Röstbetten und den Schmelzöfen der einzelnen Nutzungsphasen festzustellen. Die ähnliche Zusammensetzung der Schlacken lässt darauf schließen, dass während der Schlackenbildung über die gesamte Betriebsdauer des Westteils des Schmelzplatzes hinweg weitestgehend die gleichen Bedingungen herrschten. Anhand der im Diagramm eingetragenen Isothermen lässt sich für alle untersuchten Schlacken ein Temperaturbereich von 1150 °C–1300 °C ablesen.

Um Hinweise zu erhalten, in welcher Stufe der Verhüttung die untersuchten Schlacken entstanden, wurden die Ergebnisse der Untersuchungen an den eingeschlossen Kupferstei-

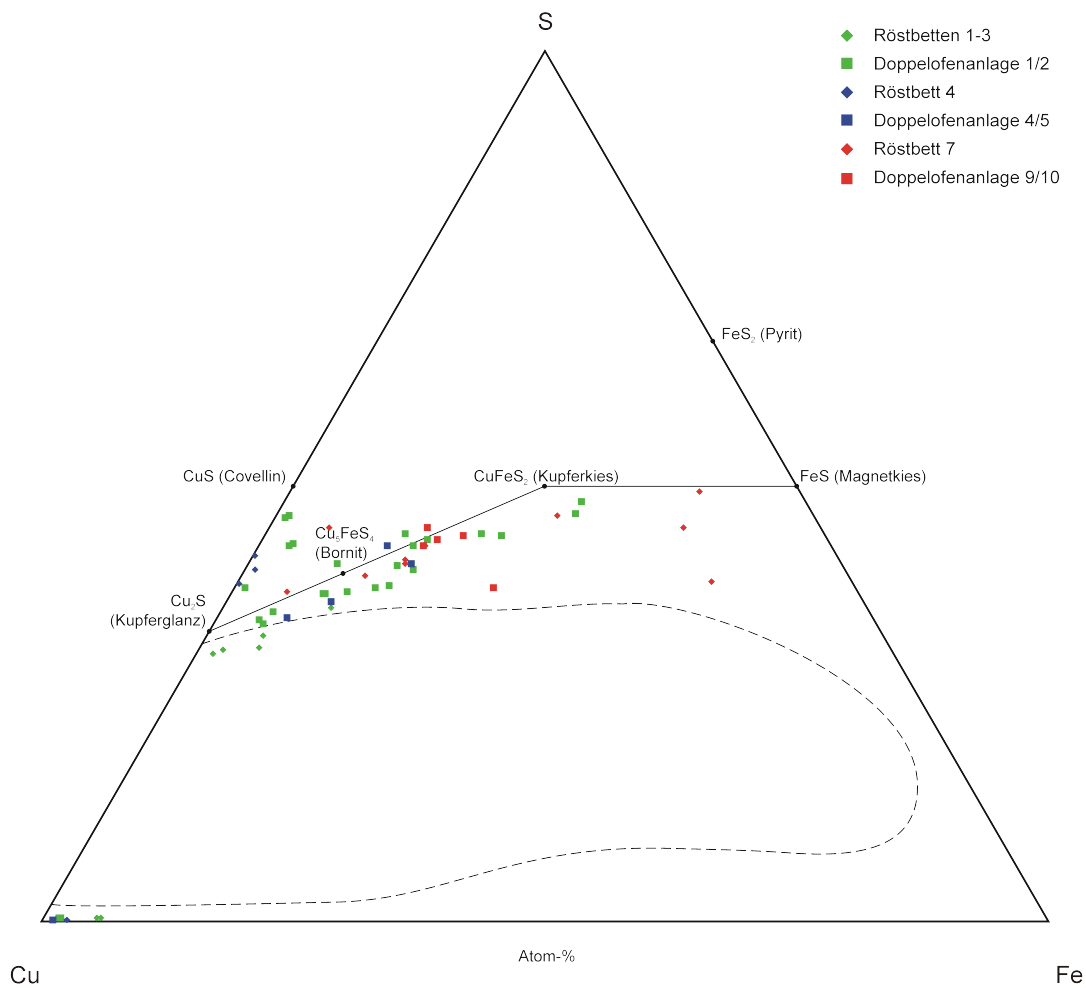


Abb. 8.20.: Darstellung der Zusammensetzung der Sulfideinschlüsse in den Schlacken verschiedener Nutzungsphasen im Westteil des Kupferschmelzplatzes S1 im System Cu-Fe-S nach Schlegel & Schüller (1952) (rot = ältere Phase, blau = mittlere Phase, grün = jüngere Phase).

nen der Schlacken in das Zustandsdiagramm des ternären Systems Cu-Fe-S nach Schlegel & Schüller (1952) eingetragen (Abb. 8.20). Daraus ergibt sich, dass es sich überwiegend um kupferreiche Steine handelt, sowie um metallisches Kupfer. Nur eine Schlacke der älteren Nutzungsphase (MA-092843 (FNr. 1200, Röstbett 7)) enthält zudem eisenreichere Steine. Dennoch kann für alle Nutzungsperioden angenommen werden, dass die Schlacken während des Schmelzens auf Kupferstein gebildet wurden. Demnach lassen sich für den gesamten Betriebszeitraum des Westteils des Kupferschmelzplatzes S1 keine Änderungen bezüglich der Prozessführung bei der Verhüttung der sulfidischen Kupfererze nachweisen.

9. Die bronzezeitliche Kupfererzverhüttung am Kupferschmelzplatz S1

9.1. Die Rohstoffbasis

Bei den auf dem Kupferschmelzplatz S1 gefundenen Erzstücken handelt es sich in erster Linie um Eisenerze, die für die bronzezeitliche Kupferverhüttung jedoch keine Relevanz hatten. Möglicherweise wurden die Erzchargen am Hüttenplatz noch einmal ausgelesen und an Kupfererzen angereichert. Die Eisenerze wären demnach als Abgang dieses Anreicherungs-schrittes zu interpretieren. Auf keinen Fall dürfte es sich um Zuschlagsmaterial handeln, was gelegentlich diskutiert wird (Hauptmann 2000, 159). Denn Kupferkies enthält auch in gerösteter Form genug Eisen, um eine fayalitische Schlacke zu bilden. Lediglich die Probe MA-091472 (FNr. 2994) von Halde 3 enthält Spuren von sulfidischem Kupfererz, wobei die mikroskopischen und mikroanalytischen Untersuchungen zeigten, dass es sich dabei um Chalkopyrit handelt, welcher mit Pyrit vergesellschaftet ist. Die Menge des enthaltenen Erzes war vermutlich auch für bronzezeitliche Verhältnisse nicht ausreichend, weshalb es als „Abfall“ auf die Halde gelangte. Das Nebengestein besteht hauptsächlich aus Quarz bzw. Quarzit und weist auf die quarzreiche Gangart der hydrothermalen Sulfidlagerstätten der nördlichen Grauwackenzone hin. Auch für den Großteil der untersuchten Schlacken konnten bereits bei der makroskopischen Beschreibung unaufgeschmolzene Quarzeinschlüsse nachgewiesen werden, wobei einige dieser Quarzstücke entlang von feinen Rissen noch Reste von Sulfiden enthalten. Daneben treten in den Schlacken aber auch zahlreiche reine Quarzeinschlüsse auf, die ebenfalls auf die quarzreiche Gangart der hydrothermalen Sulfidlagerstätten hinweisen, da diese häufig auch im Bereich von mehreren Zentimetern nicht mit Erzen durchsetzt sind. Die Interpretation der Quarzeinschlüsse in den Schlacken als unaufgeschmolzene Chargenrelikte ist demnach sehr wahrscheinlich. Insofern kann eine intentionelle Zugabe von Quarz (z. B. in Form von Sand oder zerkleinerten Quarziten) als Flussmittel weitgehend ausgeschlossen werden.

Die Frage nach der Herkunft der verhütteten Erze ist anhand der einzigen Erzprobe wohl kaum zu beantworten. Anhand eines Vergleichs der chemischen Zusammensetzung der untersuchten Schlacken mit den Ergebnissen von Analysen an Erzen aus Lagerstätten der näheren Umgebung des Schmelzplatzes aus der Literatur können jedoch Hinweise auf potentielle Lagerstätten gewonnen werden. Dafür wurden die schlackenbildenden Oxide

SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO, CaO, K₂O und P₂O₅ der hydrothermalen Ganglagerstätte des Paradeisstollens (Radmer) und den Sulfidlagern des Steirischen Erzberges (auf 100 % normiert) mit den unterschiedlichen Schlackentypen verglichen (Abb. 9.1). FeO und Na₂O wurden dabei nicht berücksichtigt, da Eisen bei der Verhüttung nicht vollständig in die Schlacke übergeht sondern zu einem nicht bestimmbar Teil an das Schmelzprodukt (Kupferstein) gebunden bleibt und Natrium nur mit geringer Präzision bestimmt wurde und geochemisch sehr mobil ist. Zum Zeitpunkt der Arbeit lagen für potentielle Lagerstätten in der Eisenerzer Ramsau keine Analysedaten bezüglich ihrer chemischen Zusammensetzung vor, weshalb sie in diesen Vergleich nicht aufgenommen werden konnten.

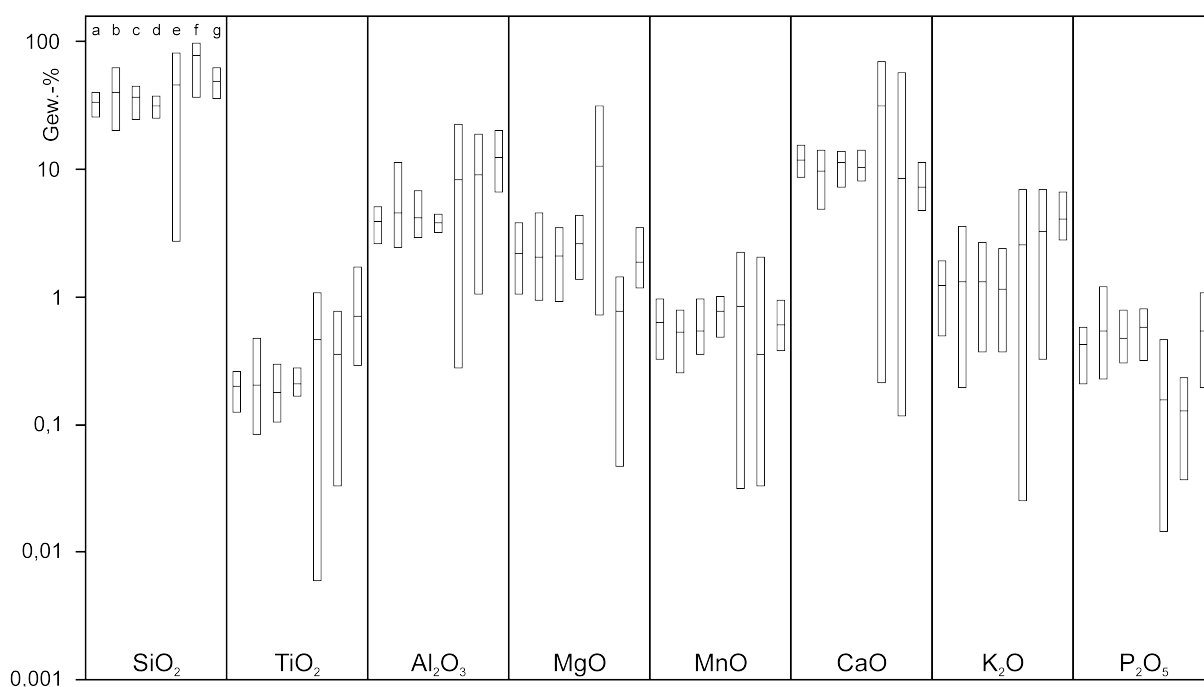


Abb. 9.1.: Vergleich der Zusammensetzung der Laufsclacken (a), Blasensclacken (b), Schlacken vom Typ A+B (c), Plattensclacken (d) und Ofenwandverschlackungen (e) mit den auf 100 % normierten Anaylsen der Erze vom Paradeisstollen (f) und vom Steirischen Erzberg (g) (Erzanalysedaten aus Ofner 2002) (Nummerierung in allen Spalten entsprechend Spalte 1).

Wie dem Verteilungsmuster der Oxide zu entnehmen ist, sind die Streubereiche der einzelnen Oxide in den beiden Erzvorkommen so groß, dass die chemische Zusammensetzung der Schlacken sowohl mit den Erzen des Paradeisstollens als auch den Erzen vom Steirischen Erzberg prinzipiell kompatibel ist. Allerdings ist diese Aussage für die Diskussion einer Herkunftsbeziehung von geringer Bedeutung. Denn die chemische Zusammensetzung der Schlacken wird nicht nur durch die Erze und deren Gangart und durch allfällige Zuschlagsstoffe bestimmt sondern auch durch die Zusammensetzung der keramischen Bestandteile der Ofeninnenauskleidung (Bachmann 1982, 9). Wie ebenfalls aus Abb. 9.1 hervorgeht, lässt die Zusammensetzung der Ofenwandverschlackung vermuten, dass de-

ren Gehalte an TiO_2 , Al_2O_3 und K_2O zu einer Konzentrationserhöhung dieser Oxide in den Schlacken führte. Darüber hinaus bedingt auch die Verwendung von Holzkohle als Brennmaterial einen Anstieg der Gehalte an CaO , K_2O und P_2O_5 .

Zusätzlich zum Vergleich der chemischen Zusammensetzung von Erzen und Schlacken müssen auch die unterschiedlichen Erzminerale der Lagerstätten berücksichtigt werden. Wie die mineralogischen Untersuchungen zeigen, enthalten alle Schlackentypen unterschiedlich zusammengesetzte Cu/Fe-Sulfideinschlüsse mit der Tendenz zu kupferreichen Steinen. Daher ist davon auszugehen, dass in erster Linie Chalkopyrit bzw. ein Gemisch aus Chalkopyrit und Pyrit verhüttet wurde. Die Vererzungen in der Eisenerzer Ramsau bestehen hauptsächlich aus Chalkopyrit mit Verwachsungen von Covellin und Pyrit mit Quarz als Ganggestein. Im Chalkopyrit sind gelegentlich Zinkblende- und Millerittropfen eingebettet (Ofner 2002, 154). Die Haupterzminerale des Paradeisstollens sind Chalkopyrit, antimonreiches Fahlerz, Zinkblende und Pyrit. Untergeordnet findet sich Pentlandit, Millerit und Magnetkies. Als Nebengestein treten hier vorwiegend Quarz und Karbonate der Ankerit-Dolomit-Mischkristallreihe auf (Ofner 2002, 150). Am Steirischen Erzberg bilden Pyrit und Chalkopyrit die Primärvererzung neben Fahlerz, Covellin, Markasit, Gersdorffit und Zinkblende in Sulfid-Quarz-Eisenkarbonatgängen (Ofner 2002, 152). Demnach sind auch die Mineralassoziationen der untersuchten Lagerstätten sehr ähnlich, wodurch eine eindeutige Zuordnung nicht möglich ist.

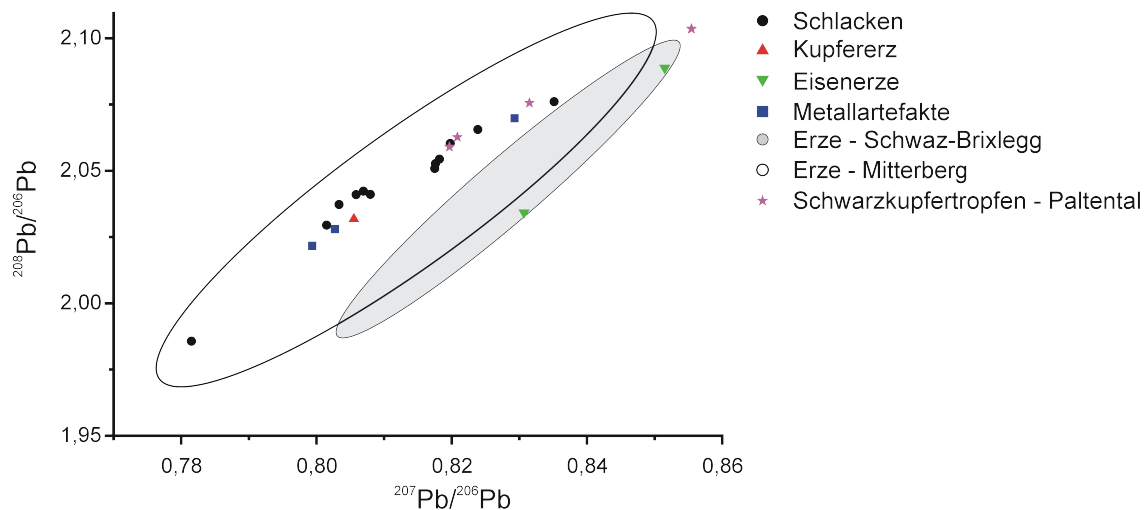


Abb. 9.2.: Bleisotopenverhältnisse von Schlacken, Erzen und Metallfunden vom Kupferschmelzplatz S1 im Vergleich mit Erzen vom Mitterberg und der Region Schwaz-Brixlegg sowie von Schwarzkupfertropfen in Schlacken verschiedener Fundstellen der Eisenerzer Alpen (Daten aus Kunstmann 2003; Höppner et al. 2005; Lutz et al. 2009, 2010).

Eine weitere Möglichkeit, Hinweise zur Herkunft der verwendeten Rohstoffe zu erhalten, ergibt sich aus dem Vergleich der Bleisotopensignaturen von Erzen und Schmelzprodukten. In Abb. 9.2 sind die Ergebnisse der Bleisotopenanalyse von Schlacken, Me-

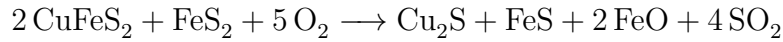
tallartefakten und Erzstücken vom Kupferschmelzplatz S1 dargestellt (vgl. Tabelle A.14). Zum Vergleich sind die Bereiche der Bleiisotopenverhältnisse der Erze vom Mitterberg, Salzburg, sowie die Signaturen der Fahlerzvererzungen aus dem Raum Schwaz-Brixlegg, Tirol, eingetragen. Ergänzend sind die Bleiisotopenverhältnisse von Schwarzkupfertropfen aus Schlacken von anderen Fundstellen der Eisenerzer Alpen (Kaiserköpferl, Versunkene Kirche und Flitzenalm II) dargestellt. Sowohl die Schlacken als auch die Metallartefakte vom Kupferschmelzplatz S1 weisen eine große Streuung der Bleiisotopenverhältnisse auf. Auffällig ist dabei die Übereinstimmung der Signaturen mit denen der Erze vom Mitterberger Revier. Dies ist allerdings kein Herkunftsnachweis sondern zeigt lediglich, dass die verhütteten Erze aus ähnlichen genetischen Verhältnissen stammen. Sowohl im Mitterberger Revier als auch im Gebiet der Eisenerzer Alpen sind die Vererzungen an die paläozoischen Schichten der nördlichen Grauwackenzone gebunden (vornehmlich an Phyllite). Es handelt sich dabei um epigenetische Erzgänge, die später gebildet wurden und die Schichten diskordant durchlaufen. Typisch ist die Imprägnierung mit Uran, was zu einer sehr starken Streuung der Bleiisotopenverhältnisse auch innerhalb einer Vererzung führt. Es ist kennzeichnend für den ostalpinen Typus der Kupfervererzung, dass die Erze chemisch weitgehend einheitlich zusammengesetzt sind und bleiisotopisch stark variieren. Dies trifft auch auf die hier untersuchten Proben zu. Die übrigen Bleiisotopendaten aus den Eisenerzer Alpen zeigen ebenfalls Übereinstimmungen mit den Signaturen vom Kupferschmelzplatz S1. Signifikante Aussagen über die Herkunft der verhütteten Erze sind daher durch Bleiisotopenanalysen allein nicht zu erwarten.

9.2. Der Verhüttungsprozess am Kupferschmelzplatz S1

Aufgrund der Bestimmung der Schmelztemperaturen der Schlacken und die Abschätzung der Sauerstoffpartialdrücke sind für die makroskopisch unterscheidbaren Schlackentypen vergleichbare Bildungsbedingungen anzunehmen. In allen untersuchten Schlacken konnten zudem Cu/Fe-Sulfide unterschiedlicher Zusammensetzung mit der Tendenz zu kupferreichen Steinen nachgewiesen werden, was auf einen Schmelzprozess hindeutet, bei dem Kupferstein produziert wurde. In einzelnen Schlacken treten darüber hinaus auch eisenreiche Cu/Fe-Sulfide auf, die auf die Verhüttung gemischter sulfidischer Cu/Fe-Erze hindeuten.

Obwohl auf den im archäologischen Befund als „Röstbetten“ angesprochenen Strukturen keine Röstprodukte nachgewiesen wurden (diese sind als metastabile bzw. wasserlösliche Verbindungen sicher durch Korrosion verloren gegangen), kann davon ausgegangen werden, dass die verhütteten Erze vor dem ersten Schmelzgang im Schachtofen einem Röstprozess unterzogen wurden. Die zahlreichen kupferreichen Sulfide in den Schlacken deuten dabei auf eine partielle Röstung hin. Beim partiellen Rösten von sulfidischen Erzen, die

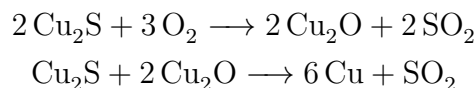
hauptsächlich aus Chalkopyrit und untergeordnet Pyrit bestehen, entstehen überwiegend kupferreiche Sulfide und Eisenoxide gemäß



Da dabei nicht das gesamte Eisen in Oxide umgewandelt wird, bleiben auch eisenreichere Sulfide zurück. Die Röstung von kupferreichen Steinen würde ein ähnliches Bild erwarten lassen. Die Magnetitagglomerate, die in einigen Schlacken auftreten, können hierbei auch als Relikte von gerösteten Erzen angesehen werden. Bei dem anschließenden Schmelzprozess reagieren die Eisenoxide dann mit dem Quarz aus der Gangart und bilden eine fayalitische Schlacke.

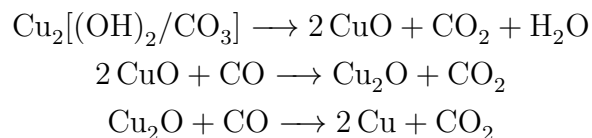
Für den Metallgewinnungsprozess wird im Allgemeinen von einer Trennung zwischen Schlacke und Wertträger (Kupferstein oder Metall) durch eine flüssige Entmischung bei hohen Temperaturen ausgegangen. Voraussetzung dafür ist, dass die Schlacke und der Wertträger vollkommen aufgeschmolzen sind und sich aufgrund ihres unterschiedlichen spezifischen Gewichts trennen lassen. Wie jedoch aus den Untersuchungen der bronzezeitlichen Schlacken hervorgeht, bestand der Großteil der Schlacken aus einer zähflüssigen Schmelze mit teilweise hohen Anteilen an nichtaufgeschmolzenen Chargenrelikten. Es ist daher auch denkbar, dass für eine Trennung von Schlacke und Wertträger nicht nur das unterschiedliche spezifische Gewicht eine Rolle gespielt hat sondern vielmehr auch die unterschiedlichen Schmelztemperaturen von Kupferstein und Schlacke. Nach Muan (1955, 971) bildet sich ab ca. 1180 °C eine fayalitische Schmelze im reinen System $\text{FeO}_n\text{-SiO}_2$. Der Schmelzpunkt von Chalkopyrit liegt dagegen bei 880 °C, der von Bornit bei 925 °C (Metten 2003, 70). Dies ermöglicht ein Ausschmelzen der niedrigschmelzenden Cu/Fe-Sulfide aus dem gerösteten Erz bereits vor der Schlackenbildung.

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass die sulfidischen Einschlüsse in den Schlacken nicht das einzige Produkt der Prozessstufe darstellen, in dem sie entstanden sind. Es bildete sich während des Schmelzens auch metallisches Kupfer. Für die Bildung von metallischem Kupfer gibt es dabei mehrere Möglichkeiten. Eine Möglichkeit besteht darin, dass bei der Verhüttung von Chalkopyrit oder kupferreichen Steinen im Bereich vor den Düsen Cu-Sulfide oxidiert werden, welche dann mit den übrigen Sulfiden reagieren und metallisches Kupfer bilden gemäß



Eine weitere Möglichkeit ergibt sich durch eine ausreichende Schwefelabreicherung aus den Cu/Fe-Sulfiden während des Schmelzvorganges. Dabei bildet sich metallisches Kupfer durch Entmischung entsprechend der ausgedehnten Mischungslücke des ternären Systems

Cu-Fe-S (Schlegel & Schüller 1952). Darüber hinaus kann für den Kupferschmelzplatz S1 auch eine Verhüttung von sulfidischen Erzen zusammen mit oxidischen Erzen nicht vollkommen ausgeschlossen werden. Bei den Magnetitagglomeraten, die in ihren Zwickeln verstärkt metallisches Kupfer aufweisen, kann es sich auch um Erzrelikte aus der Verwitterungszone von Sulfidlagerstätten handeln, wodurch das enthaltene Kupfer dann durch eine direkte Reduktion der oxidischen Kupfererze entstanden ist, gemäß



Grundsätzlich ist jedoch davon auszugehen, dass das primäre Schmelzprodukt der Prozessstufe, in der die untersuchten Schlacken gebildet wurden, der Kupferstein ist und nur nebenbei auch metallisches Kupfer gebildet wurde. Das Ausschmelzen des Kupfersteins ist bereits bei Temperaturen unterhalb von 1000 °C möglich, während die Bildung der Schlacken vom Kupferschmelzplatz S1 erst in einem Temperaturbereich von 1150 °C–1300 °C beginnt und solange andauert, wie das Eisenoxid/Quarz-Verhältnis in der Charge im Liquidusfeld des Systems liegt und die Temperaturen gehalten werden können. Bei einem Überschuss an Quarz oder Eisenoxid in der Charge bleiben diese als unaufgeschmolzene Reste in der Schmelze, wodurch die typischen Blasenschlacken (Typ B) entstehen, auf denen die etwas flüssigeren Lauschlacken (Typ A) aufliegen. Wie die Untersuchungen zeigen, sind die Plattenschlacken (Typ C) nicht einer eigenen Prozessstufe zuzuschreiben, sondern sie bilden vielmehr eine ideal zusammengesetzte, niedrig viskose Teilschmelze der Gesamtcharge, wie es bereits von Doonan (1996, 65–66) postuliert wurde. Aus den Untersuchungen der Erzlagerstätten der näheren Umgebung des Schmelzplatzes von Ofner (2002) geht hervor, dass die Vererzungen immer mit Quarz verwachsen sind. Da wohl Erze aus der Umgebung verhüttet wurden, ist eine bewusste zusätzliche Zugabe von Quarz als Flussmittel in die Schmelze eher unwahrscheinlich.

Eine Abschätzung der Menge des verhütteten Erzes und des daraus gewonnenen Kupfers ist anhand der produzierten Schlackenmenge nur spekulativ möglich. Die auf dem Kupferschmelzplatz S1 ausgegrabene Schlackenmenge umfasst ca. 1,5 t. Es ist anzunehmen, dass dafür etwas weniger Erz verhüttet wurde. Die Menge des produzierten Kupfers ist in erster Linie abhängig vom Kupfergehalt des verwendeten Erzes und unterliegt somit starken Schwankungen. Geht man davon aus, dass in der mittleren Bronzezeit idealerweise ca. 80–90 % des im Erz (überwiegend Chalkopyrit mit bis 30 Gew.-% Kupfer) enthaltenen Kupfers ausgebracht wurden, ergibt das eine Produktionsmenge von etwa 200–300 kg Kupfer für den Kupferschmelzplatz S1. Aufgrund des Fehlens der Schlackenhalde im westlichen Teil der Anlage ist eine Aussage über eine Gesamtproduktionsmenge

auf diesem Schmelzplatz allerdings nicht möglich. Dennoch könnte diese Menge an Kupfer bei kontinuierlichem Betrieb in wenigen Jahren produziert werden. Die beobachtete Stratigraphie der Schlackenhalde würde demnach nur verschiedene Produktionsperioden widerspiegeln, die gut innerhalb einer Generation liegen könnten.

Ob bei der Verhüttung dieser Erze eine Aufteilung verschiedener Prozessstufen auf die einzelnen Schmelzöfen einer Doppelofenlage erfolgte, kann letztlich nicht vollständig geklärt werden. Grundsätzlich kann für den Kupferschmelzplatz von einem mehrstufigen Verhüttungsverfahren ausgegangen werden. Zunächst wurden die sulfidischen Erze auf den Röstbetten partiell geröstet und anschließend im Schachtofen reduzierend geschmolzen. Der dabei produzierte Kupferstein wurde vermutlich erneut geschmolzen, um in einem weiteren Schmelzgang an Kupfer angereichert zu werden. Wie die Kupfereinschlüsse in den Schlacken zeigen, erfolgte dabei bereits eine erste Abscheidung metallischen Kupfers. Dass an diesem Schmelzplatz auch metallisches Kupfer erzeugt wurde, ist durch den Fund der beiden ungeformten Metallstücke denkbar. Nach ihrer chemischen Zusammensetzung lassen sie sich ebenfalls dem „ostalpinen Kupfer“ zuordnen. Die Spurenelementgehalte der Metallstücke und der Schlacken lassen vermuten, dass die verhütteten Erze neben Chalkopyrit auch geringe Mengen an Fahlerz enthielten. Die zahlreichen Sulfideinschlüsse in den Metallobjekten weisen aber auch darauf hin, dass die im ersten Schmelzgang gewonnenen Kupfersteine nicht totgeröstet wurden. Vielmehr wurde wiederholt eine partielle Röstung (eventuell mit neuen Erzstücken) durchgeführt. Daher ist anzunehmen, dass der Kupferstein das primäre Schmelzprodukt des am Kupferschmelzplatz S1 durchgeführten Verhüttungsprozesses darstellt.

9.3. Überlegungen zur bronzezeitlichen Kupferverhüttung in den Ostalpen

Während der Bronzezeit wurden in weiten Teilen der Ostalpen Kupfererze gewonnen und verhüttet. Bei den archäologischen Untersuchungen verschiedener Schmelzplätze in den Ost- und Südalpen stellte sich heraus, dass sie einen auffallend einheitlichen Aufbau zeigen. So sind die Schmelzplätze in Arbeitspodien unterteilt, welche die notwendigen Anlagen für den jeweiligen Arbeitsschritt enthalten. Des Weiteren treten an den untersuchten Schmelzplätzen meist alle makroskopisch unterschiedlichen Schlackentypen auf, wie dies auch am Kupferschmelzplatz S1 der Fall ist. Die Schlacken der einzelnen Schmelzplätze unterscheiden sich dabei nur geringfügig in ihrer äußeren Typologie und ihrer Zusammensetzung, was sich auf lokale Variationen der Ausgangserze oder eine leicht veränderte Prozessführung zurückführen lässt. Anhand der folgenden Beispiele wird ersichtlich, dass der am Kupferschmelzplatz S1 durchgeführte Verhüttungsprozess keine Einzelercheinung

ist, der sich durch eine besondere Prozessführung auszeichnet. Vielmehr ist davon auszugehen, dass während der Bronzezeit im gesamten Ostalpenraum eine relativ einheitliche Verfahrenstechnik etabliert war, die einen intensiven Abbau der chalkopyritführenden Erze und deren Verhüttung ermöglichte.

9.3.1. Der spätbronzezeitliche Schmelzplatz „Versunkene Kirche“ bei Trieben, Steiermark

Die Verhüttungsanlage der „Versunkenen Kirche“ befindet sich im Hochwald auf 840 m Höhe ü. N. N. im Gebiet der Gemeinde Trieben, VB Leoben. Die gefundene Keramik sowie ein ^{14}C -Datum datieren den Fundplatz in die späte Bronzezeit (Preßlinger et al. 1980, 137; Preßlinger et al. 1982, 125). Der Schmelzplatz ist in einzelne Arbeitspodien unterteilt, wobei das oberste Arbeitspodium die Röstbetten beinhaltet. Die Röstbetten haben eine lichte Weite von 0,9–1 m, eine Länge von 2 m und werden von einer Steinsetzung umrandet. Auf dem darunter gelegenen Arbeitspodium wurden die Doppelofenanlagen angelegt. Für eine bessere Wärmeisolierung wurden die Schmelzöfen in den Hang gebaut. Sie besitzen eine Innengrundfläche von $0,45 \times 0,55$ m und sind in einer Höhe von 0,9 m erhalten. Dem Materialfluss folgend befindet sich unterhalb der Öfen die Schlackenhalde (Kunstmann 2003, 60–61). Bei den Grabungen wurden überwiegend blasige Lauschlacken, einige Plattenschlacken sowie ein Fragment eines Gusskuchens entdeckt. Die chemischen Untersuchungen der Schlacken ergaben eine den Schlacken vom Kupferschmelzplatz S1 ähnliche Grundzusammensetzung von 30–40 Gew.-% SiO_2 , 20–40 Gew.-% FeO und 10–20 Gew.-% CaO. Die restlichen 10 Gew.-% setzen sich aus den übrigen Schlackenbestandteilen zusammen (Preßlinger & Eibner 2004, 69).

Das Gusskuchenfragment besteht aus drei Schichten: metallisches Kupfer, eine eisenreiche Zwischenschicht und Kupferstein. Das metallische Kupfer ist mit 4,5 Gew.-% Eisen als Schwarzkupfer anzusehen (Preßlinger et al. 1986, 229). Darüber hinaus enthalten alle Schichten beträchtliche Gehalte an Antimon und Arsen, was auf die Verhüttung von Fahlerzen hinweist. Die eisenreiche Zwischenschicht besteht sowohl aus Eisenarseniden und -antimoniden und ist als Speise (im hüttenmännischen Sinn) anzusprechen. Der dabei durchgeführte Verhüttungsprozess erfolgte in einem vierstufigen Verfahren (Kunstmann 2003, 146), wobei das zu verhüttende sulfidische Kupfererz zunächst geröstet wurde und im Anschluss ein erster Schmelzgang im Schachtofen zur Verschlackung des Eisenoxids mit Quarz und zur Anreicherung des Kupfers im Stein folgte. Danach wurde der erschmolzene Kupferstein in einem weiteren Röstvorgang oxidiert, um im zweiten Schmelzgang durch Entmischung entsprechend der Mischungslücke im ternären System Cu-Fe-S Schwarzkupfer herzustellen (Preßlinger & Eibner 1989a, 238). Die Produktionsmenge ist unbekannt, dürfte aber geringer als auf dem Kupferschmelzplatz S1 sein.

9.3.2. Der mittelbronzezeitliche Schmelzplatz Hechenberg bei Jochberg, Tirol

Der Verhüttungsplatz „Hechenberg“ befindet sich westlich der Jochberger Ache auf einer Höhe von 1320 m ü. N. N. auf einer Almweide. Bei den archäologischen Grabungen wurden zwei übereinanderliegende Röstbetten freigelegt, die jeweils von einer Steinsetzung umgeben sind. Die Breite der Röstbetten beträgt etwa 1 m, die Länge ca. 2 m. Etwas unterhalb befinden sich die Doppelofenanlagen aus sorgfältig gesetzten Schieferblöcken. Die Innenwände sind mit Lehm ausgekleidet und weisen eine einseitige Verschlackung auf. Die Öfen besitzen einen rechteckigen Grundriss von 0,45–0,5 × 0,8–0,9 m. Die Datierung des Schmelzplatzes in die Mittlere Bronzezeit erfolgte anhand von ¹⁴C-Daten (Goldenberg 2004, 169–173).

Die auf dem Schmelzplatz gefundenen Schlacken lassen sich in drei Typen einteilen. Dabei handelt es sich um heterogene Laufschnacken, Plattenschnacken und Schlackensand. Die heterogenen Laufschnacken bestehen aus einer blasigen Silikatschnacke mit zahlreichen Quarzeinschlüssen und ähneln damit den Blasenschnacken (Typ B) vom Kupferschmelzplatz S1. Wie die Schlacken vom Kupferschmelzplatz S1 enthalten sie ausschließlich kupferreiche Cu/Fe-Sulfide, jedoch kaum metallisches Kupfer. Daher wird eine Verhüttung auf Kupferstein angenommen. Der Schlackensand ist dabei als Produkt der Zerkleinerung der Schlacken anzusehen, um noch enthaltenen Kupferstein zu gewinnen, wobei unsicher ist, ob dies direkt nach dem Schmelzprozess erfolgte oder durch ein späteres Aufsuchen des Schmelzplatzes, um die Schlackenhalde noch einmal aufzuarbeiten. Der letzte Schritt, die Verarbeitung von Kupferstein zu Schwarzkupfer konnte allerdings nicht nachgewiesen werden (Goldenberg 2004, 174).

9.3.3. Der mittel- bis spätbronzezeitliche Schmelzplatz Mühlbach/Brennerwald, Salzburg

Der Kupferverhüttungsplatz Mühlbach/Brennerwald liegt am Nordabhang des Schlöglberges auf ca. 1100 m Höhe ü. N. N. im Bezirk St. Johann/Pongau. Die Grabungen ergaben acht Schachtöfen, zwei aufeinander liegende Röstbetten sowie eine vierphasige Schlackenhalde. Anhand der Keramiktypologie und durch ¹⁴C-Daten wurde der Schmelzplatz in die Mittlere bis Späte Bronzezeit datiert. Die Röstbetten waren teilweise mit hochkant gestellten Steinplatten umgeben. Die Schmelzöfen lassen sich bis auf eine Höhe von etwa 1 m rekonstruieren bei einer rechteckigen Grundfläche von etwa 0,5 × 0,6 m (Herdlits & Löcker 2004, 182).

Bei den auf dem Schmelzplatz gefundenen Schlacken handelt es sich um Schlackenkuchen, Plattenschnacken und Schlackensand, der hier als Magerungsbestandteil der Keramik auftritt. Die Schlackenkuchen zeigen in ihrer äußeren Typologie deutlich Ähnlichkeiten zu

den Blasenschlacken (Typ B) vom Kupferschmelzplatz S1. Einige Schlackenkuchen besitzen eine schräge Durchbohrung in ihrer Mitte, die vermutlich auf das Abstechen im noch zähflüssigen Zustand zurückzuführen ist (Herdits 1997, 40). Nach den chemischen Untersuchungen (vgl. Bericht von B. Hohlmann in Herdits 1997) handelt es sich dabei überwiegend um Eisensilikatschlacken mit Gehalten von 30–45 Gew.-% SiO_2 , 40–55 Gew.-% FeO , 3–7 Gew.-% MgO und 2–5 Gew.-% CaO , wobei keine signifikanten Unterschiede zwischen den makroskopisch unterscheidbaren Schlackentypen festgestellt wurden. Von den Schlacken des Kupferschmelzplatzes S1 lassen sie sich durch ihre niedrigeren Gehalte an CaO sehr gut unterscheiden, zeigen aber sonst eine ähnliche Zusammensetzung. Die mikroskopischen Untersuchungen zeigen weitestgehend vergleichbare Gefüge. Anhand der Cu/Fe -Sulfideinschlüsse in den Schlacken von Mühlbach wird von einer Verhüttung eines Gemischs aus Chalkopyrit und Pyrit ausgegangen. Die Verhüttung fand bei Temperaturen von 1150–1300 °C statt. Aufgrund der angenommenen Schmelztemperaturen und der Mineralvergesellschaftung in den Schlacken wird ein Sauerstoffpartialdruck von 10^{-8} – 10^{-13} bar abgeschätzt (Bericht B. Hohlmann in Herdits 1997). Damit kann für den Verhüttungsprozess in Mühlbach ein vergleichbares Verfahren wie am Kupferschmelzplatz S1 angenommen werden, wobei in Mühlbach eine stärker reduzierendere Ofenatmosphäre ermittelt wurde.

Auch hier gibt es keine Angaben zur möglichen Gesamtproduktion. Wenn man jedoch bedenkt, dass allein im Mitterberger Revier eine Gesamtproduktion von 7000–20000 t Kupfer in der gesamten prähistorischen Produktionsperiode geschätzt wird (Stöllner et al. 2012, 113–114), müsste es sehr viel größere Hüttenstandorte gegeben haben oder sehr viele kleine. Hüttenwerke von der Größe des Kupferschmelzplatzes S1 reichen bei weitem nicht, um diese Produktionsmengen zu erklären.

9.3.4. Der spätbronzezeitliche Verhüttungsplatz von Acqua Fredda, Trentino, Italien

Die Verhüttungsanlage von Acqua Fredda liegt auf einer Höhe von 1450 m ü. N. N. am Redebus Pass, der die Hochebene von Pinè mit dem Val dei Mocheni (Fersental) verbindet. Bei den Ausgrabungen wurden neun Schmelzöfen sowie eine Schlackenhalde unterhalb der Schmelzanlagen freigelegt. Im Gegensatz zu den anderen Schmelzplätzen in den Ostalpen wurden in Acqua Fredda keine Röstbetten gefunden. Da der Bereich oberhalb der Schmelzöfen bereits vor den Grabungen durch die Anlage einer Kiesgrube für den Straßenbau zerstört wurde, kann lediglich vermutet werden, dass es auch in Acqua Fredda Röstanlagen gegeben hat (Metten 2003, 31). Die Datierung des Fundplatzes in die Späte Bronzezeit erfolgte anhand der gefundenen Keramik sowie durch ^{14}C -Daten von Holz- und Holzkohleproben (Cierny et al. 1995, 85; Cierny 2008, 68).

Die in Acqua Fredda gefundenen Schlacken lassen sich nach Metten (2003, 31) in drei

Typen unterscheiden. Dabei handelt es sich um Schlackenkuchen, Plattenschlacken und Schlackensand. Die Plattenschlacken werden nochmals in heterogene und in homogene Plattenschlacken unterteilt. Nach ihren äußeren Eigenschaften sind die Schlackenkuchen mit den Blasenschlacken (Typ B) vom Kupferschmelzplatz S1 vergleichbar. Die heterogenen Plattenschlacken ähneln den Laufschlacken (Typ A), während die homogenen Plattenschlacken den Plattenschlacken (Typ C) vom Kupferschmelzplatz S1 entsprechen. Auch die mikroskopischen Untersuchungen spiegeln deutlich die Gemeinsamkeiten wider. So bestehen die Schlackenkuchen aus einem Gerüst aus unaufgeschmolzenen Quarzstücken und Cu/Fe-Sulfideinschlüssen unterschiedlicher Zusammensetzung in einer fayalitschen Schmelze. Die heterogenen Plattenschlacken besitzen ebenfalls ein fayalitisches Gefüge, in dem gelegentlich Klinopyroxen und unaufgeschmolzene Quarzbruchstücke auftreten. Dagegen zeigen die homogenen Plattenschlacken überwiegend ein Gefüge aus langen, dünnen Fayalitnadeln, die im Spinifexgefüge ausgebildet sind.

Nach den pauschalchemischen Untersuchungen besitzen die Schlacken aus dem Trentino eine Zusammensetzung aus 20–60 Gew.% SiO₂, 20–70 Gew.% FeO, 3–11 Gew.% Al₂O₃ und 1–8 Gew.-% CaO (Metten 2003, 99–103). Dabei konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den makroskopisch verschiedenen Schlackentypen festgestellt werden, weshalb alle Schlackentypen der gleichen Prozessstufe zugeordnet werden (Metten 2003, 73–74). Die Analyse der Cu/Fe-Sulfideinschlüsse ergab eine starke Variationsbreite der Zusammensetzung von eisenreichen bis kupferreichen Steinen. Die starke Streuung zeigt sich sowohl in den Plattenschlacken als auch in den Schlackenkuchen, so dass eine Unterscheidung der Schlackentypen anhand ihrer Cu/Fe-Sulfide nicht möglich ist. Es wird vermutet, dass alle Schlacken einem frühen Schmelzgang entstammen, bei dem ein Gemisch aus Chalkopyrit und Pyrit verhüttet wurden, um Kupferstein herzustellen. Die Bildung der Schlacken erfolgte dabei in einem Temperaturbereich von 1150–1250 °C in einer Ofenatmosphäre von 10⁻⁸–10⁻¹¹ bar (Metten 2003, 5). Damit kann für den Schmelzplatz von Acqua Fredda ein mit dem vom Kupferschmelzplatz S1 vergleichbares Verfahren zur Verhüttung sulfidischer Erze angenommen werden, wobei die Schlacken im Trentino eher einer früheren Prozessstufe zuzuordnen sind, während die Schlacken vom Kupferschmelzplatz S1 aus einer späteren Stufe des Schmelzprozesses stammen. In beiden Fällen war aber vermutlich Kupferstein das erzielte Schmelzprodukt. Ein vorheriges Rösten der Erze kann für Aqua Fredda aufgrund der Zerstörung des oberen Bereichs des Schmelzplatzes jedoch nur vermutet werden.

10. Zusammenfassung

Der Kupferschmelzplatz S1 in der Eisenerzer Ramsau stellt den bisher am intensivsten archäologisch untersuchten Schmelzplatz der Mittleren Bronzezeit in den Ostalpen dar. Er befindet sich am westlichen Ende dieses Hochtals auf einer Höhe von 1045 m ü. N. N. am linken Ufer des Ramsaubaches auf einem leicht abfallenden Hang. Zwischen 1992 und 2006 erfolgten montanarchäologische Grabungen, bei denen ca. 80 % des Schmelzplatzes untersucht wurden. Dabei wurden insgesamt zehn Röstbetten, sechs Doppelofenanlagen, mehrere Schlackenhalden und zahlreiche Gruben verschiedener Form und Größe freigelegt. Aufgrund der Stratigraphie wird der Westteil der Anlage in drei aufeinanderfolgende Nutzungsphasen unterteilt. Aus der ältesten Nutzungsphase stammen die Doppelofenanlage 9/10 und das Röstbett 7. In der darauf folgenden Periode wurden die Schmelzöfen abgebaut und die Arbeitsfläche für den Bau der Doppelofenanlage 4/5 geplant. Das zugehörige Röstbett 4 wurde oberhalb der Öfen angelegt. Die jüngere Nutzungsphase ist belegt durch die Doppelofenanlage 1/2 mit den Röstbetten 1, 2 und 3. Die archäologischen Untersuchungen ergaben, dass einige Öfen mehrfach verwendet wurden. Dies zeigt sich daran, dass an einigen Stellen die verschlackten Ofenwände wiederholt von einer Lehmschicht bedeckt waren, auf der wiederum eine Verschlackung festgestellt werden konnte. Auffällig ist, dass zu keinem der Schmelzöfen im Westteil eine Schlackenhalde dokumentiert wurde. Die Schlackenhalden im Ostteil dagegen weisen einen mehrschichtigen Aufbau auf. Die stratigraphische Einordnung wird jedoch durch den mittelalterlichen Kohlemeiler im Nordosten des Schmelzplatzes erschwert.

Die zeitliche Einordnung der Anlage basiert auf der Typologie der gefundenen Keramik und einer Bronzenadel, die den Platz in die Mittlere Bronzezeit (1600–1350 v. Chr.) datieren. Unterstützt wird diese Datierung durch ¹⁴C-Daten von Holzkohleproben aus den Schmelzöfen und den Schlackenhalden.

Für die archäometallurgischen Untersuchungen wurden Schlacken aus den wichtigsten Befunden beprobt. Im Fokus standen dabei chemische und mineralogische Analysen der Schlacken und Verschlackungen der Ofenwände sowie einiger aufgefundenen Erze und Metallstücke, um differenzierte Informationen über verwendete Ausgangserze, mögliche Zuschläge sowie bei der Verhüttung erhaltene Zwischen- und Endprodukte zu gewinnen.

Die untersuchten Schlacken sind anhand ihrer äußeren Eigenschaften in vier Typen zu unterteilen. Dabei handelt es sich um kompakte Laufschlacken (Typ A), blasige Lauf-

schlacken oder Blasenschlacken (Typ B), Plattenschlacken (Typ C) sowie um Kombinationen aus diesen Typen (Typ A+B). Auf dem Kupferschmelzplatz S1 treten überwiegend Lauf- und Blasenschlacken sowie Schlacken vom Typ A+B auf, während Plattenschlacken (Typ C) nur selten gefunden wurden. Die Schlacken sind auf dem gesamten Schmelzplatz anzutreffen, naturgemäß in größter Konzentration auf den Schlackenhalde. Lediglich im Bereich der Doppelofenanlage 1/2 wurde eine im Verhältnis höhere Anzahl an Plattenschlacken (Typ C) festgestellt.

Die Untersuchungen mittels Lichtmikroskop zeigten, dass Lauf- und Blasenschlacken sowie die Schlacken vom Typ A+B ein ähnliches Gefüge aufweisen. Sie bestehen überwiegend aus einem Gerüst aus leistenförmigem bis prismatischen Olivin und kurzprismatischem Klinopyroxen. Die Olivine zeigen oft einen Zonarbau. Anhand der mikroanalytischen Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskop und EDX wurde dabei neben den Unterschieden in den Hauptkomponenten FeO und MgO eine Anreicherung von CaO, Al₂O₃ und K₂O in den Randbereichen festgestellt. Die Blasenschlacken (Typ B) bzw. der Blasenschlackenanteil in den Schlacken vom Typ A+B unterscheiden sich von den Laufschlacken (Typ A) lediglich durch eine höhere Porosität sowie ein vermehrtes Auftreten unaufgeschmolzener Quarzbruchstücke, die teilweise noch Reste von Cu/Fe-Sulfiden enthalten und als Chargenrelikte interpretiert werden. Die Plattenschlacken (Typ C) bestehen dagegen überwiegend aus langen, dünnen Olivinnadeln, die im Spinifexgefüge ausgebildet sind. Der äußere Randbereich wird von einer dünnen Magnetitschicht gebildet, was auf ein rasches Abkühlen außerhalb des Schmelzofens zurückzuführen ist, während die Lauf- und Blasenschlacken sowie die Schlacken des Typs A+B langsamer im Inneren des Ofens erstarrten.

Hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den makroskopisch unterscheidbaren Schlackentypen festgestellt werden. Es handelt sich um Eisensilikatschlacken mit 25–45 Gew.-% SiO₂, 30–50 Gew.-% FeO und 5–15 Gew.-% CaO. Die Al₂O₃-Gehalte schwanken zwischen 2–12 Gew.-%, die Gehalte von MgO und K₂O zwischen 0,2–5 Gew.-%. Die Gehalte der weiteren Nebenelemente wie TiO₂, MnO, Na₂O und P₂O₅ liegen unter 2 Gew.-%. Die hohen SiO₂-Werte in einigen Schlacken, vorwiegend Blasenschlacken (Typ B) sind auf eine hohe Zahl an unaufgeschmolzenen Quarzeinschlüssen zurückzuführen. Die aus der Zusammensetzung abgeleiteten Schmelztemperaturen liegen bei den untersuchten Schlacken bei ca. 1150–1300 °C. In Verbindung mit der mineralogischen Zusammensetzung wurde ein Sauerstoffpartialdruck von etwa 10⁻⁶–10⁻¹⁰ bar ermittelt.

Die in allen Schlacken nachgewiesenen Cu/Fe-Sulfideinschlüsse lassen auf eine Verhüttung sulfidischer Erze schließen, die vermutlich aus einem Gemisch aus Chalkopyrit und Pyrit bestanden. Allerdings zeigen sowohl die Spurenelementsignaturen der Schlacken als

auch der untersuchten Metallfragmente eine gewisse Menge an Nickel, Arsen und Antimon, was darauf hindeutet, dass die verhüttete Charge neben Chalkopyrit auch geringe Anteile an Fahlerz und nickelhaltigen Mineralen enthielt, eine für die ostalpinen Kupferlagerstätten typische Mineralassoziation. In diesem Zusammenhang ist das einzige Erzstück, das auf dem Kupferschmelzplatz S1 gefunden wurde und mit dem Verhüttungsprozess in Verbindung gebracht werden kann, zu erwähnen. Es handelt sich um einen Quarzit, der Spuren von Chalkopyrit enthält und ebenfalls auf die möglichen Ausgangserze hinweist. Eine genauere Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung der Erzbasis war aufgrund des Fehlens weiterer Erzfunde am Kupferschmelzplatz S1 nicht möglich. Auch sind die wenigen Analysen von Erzproben aus der nächsten Umgebung des Schmelzplatzes (Eisenerz und Radmer) für eine Herkunftsbestimmung nicht ausreichend. Aufgrund der Bleiisotopenverhältnisse der Schlacken und der Metallfunde sind sie jedoch generell den Sulfiderzlagern der nördlichen Grauwackenzone zuzuordnen.

Die chemische Zusammensetzung der Sulfideinschlüsse zeigt für alle Schlackentypen eine große Variationsbreite mit der Tendenz zu kupferreichen Steinen. Demnach lassen sich die Schlackentypen anhand ihrer Sulfideinschlüsse nicht unterscheiden. Es ist zu vermuten, dass alle Schlacken aus der gleichen Prozessstufe stammen, bei der Kupferstein geschmolzen bzw. bereits gewonnener Kupferstein weiter an Kupfer angereichert wurde. In einigen Schlacken entstand dabei auch metallisches Kupfer. Dass am Kupferschmelzplatz S1 metallisches Kupfer erzeugt wurde, ist auch durch die untersuchten Metallfragmente als wahrscheinlich anzusehen. Aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung und wegen der hohen Zahl an Cu/Fe-Sulfideinschlüssen sind sie als Rohkupferstücke zu bezeichnen und anhand ihrer Spurenelementsignaturen der Kupfersorte des „ostalpinen Kupfers“ zuzuordnen.

Des Weiteren wurden die Verschlackungen der Ofenwände untersucht. Anhand der mineralogischen Analyse der Ofenwandverschlackungen sind in den Schmelzöfen zwei Bereiche zu unterscheiden. Im unteren Bereich der Schmelzöfen (bis zu einer Höhe von ca. 30 cm über der Ofensohle) zeigen die Ofenwandverschlackungen eine Phasenvergesellschaftung von Magnetit und metallischem Kupfer sowie gelegentlich Kupferstein. Im oberen Bereich weisen die Ofenwandverschlackungen eine Phasenvergesellschaftung aus Magnetit, metallischem Kupfer, Delafossit und Cuprit auf. Bei den ermittelten Schmelztemperaturen von etwa 1200 °C ergibt sich daraus ein Sauerstoffpartialdruckbereich von 10^{-5} – 10^{-9} bar im unteren Ofenbereich. Für den oberen Bereich der Schmelzöfen liegt er zwischen 10^{-4} – 10^{-6} bar. Die höheren Partialdrücke im oberen Ofenbereich sind auf die Bedingungen gegen Ende eines Schmelzganges zurückzuführen, als sich die Schlacken sowie das Schmelzprodukt im unteren Ofenbereich konzentrierten, während im oberen Ofenbereich eine Oxidation der Ofenwandverschlackungen durch die fehlende Bedeckung

durch Holzkohle ermöglicht wurde. Dabei ist zu beachten, dass sowohl die Schlacken als auch die Ofenwandverschlackungen die letzte Gasatmosphäre im Ofen widerspiegeln, die nicht unbedingt mit den während der Verhüttung herrschenden Sauerstoffpartialdrücken übereinstimmen müssen. Auch eine Aufteilung verschiedener Stufen des Verhüttungsprozesses auf die beiden Öfen einer Doppelofenanlage konnte bei den Untersuchungen nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Zudem wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Schlacken aus den Röstbetten, den Schmelzöfen und den Schlackenhalde festgestellt. Die Schlacken aus den Röstbetten weisen lediglich oberflächlich eine rötlichere Färbung auf, die auf eine wiederholte Hitzeeinwirkung während des Röstprozesses zurückzuführen ist. Die Anwesenheit von Cu/Fe-Sulfiden in diesen Schlacken zeigt, dass die Schlacken dabei nicht zum Rösten auf das Röstbett gelangten, sondern als Baumaterial dienten, um eine geeignete Luftzufuhr von unten zu gewährleisten.

Die einheitliche Zusammensetzung der Schlacken aus allen Bereichen des Schmelzplatzes zeigt, dass sie unter vergleichbaren Bedingungen entstanden und vermutlich einer einzigen Prozessstufe zuzuordnen sind. Anhand der Zusammensetzung der enthaltenen Cu/Fe-Sulfide lässt sich ein Prozess rekonstruieren, bei dem der Kupfergehalt im Kupferstein angereichert wurde. Die Plattenschlacken stellen dabei die ideale niedrig viskose Teilschmelze der Gesamtcharge dar, die beim Abstechen der Schlacke außerhalb des Ofens erstarrte, während die Lauf- und Blasenschlacken bzw. der Schlackentyp A+B im Schmelzofen verblieben und langsam abkühlten.

Darüber hinaus gibt es keine Hinweise, die auf eine Veränderung im Prozessablauf während der verschiedenen Nutzungsphasen im Westteil des Schmelzplatzes schließen lassen. Die Schlacken der jüngeren Phasen weisen dabei tendenziell einen geringeren SiO_2 -Gehalt bzw. eine geringere Anzahl eingeschlossener Quarzbruchstücke auf. Die Untersuchungen der Erzlagerstätten der näheren Umgebung des Schmelzplatzes sowie das untersuchte Erzstück vom Schmelzplatz selbst zeigen, dass die Erze immer mit Quarz verwachsen sind und daher eine bewusste Zugabe von Quarz als Flussmittel oder zur Andickung der Schlacken grundsätzlich nicht nötig gewesen ist.

Damit ist für den Kupferschmelzplatz S1 von einem mehrstufigen Verhüttungsverfahren auszugehen, bei dem zunächst Chalkopyritführende Erze auf Röstbetten geröstet wurden. Nach dem Rösten erfolgte ein erster Schmelzgang im Schachtofen zur Produktion von Kupferstein. Der erschmolzene Kupferstein wurde im Anschluss vermutlich wiederholt zusammen mit neuem Erz geröstet und im Schachtofen weiter an Kupfer angereichert, um Rohkupfer herzustellen. Ein Totrösten des Kupfersteins kann aufgrund der in den Rohkupferstücken enthaltenen Sulfide ausgeschlossen werden. Eine anschließende Raffination des Rohkupfers wurde nicht nachgewiesen. Als Produktionsmenge wurden ca. 200

bis 300 kg Kupfer abgeschätzt. Bei kontinuierlicher Produktion würde diese Menge einer Betriebsdauer von wenigen Jahren oder einigen Jahrzehnten entsprechen.

Ferner ist anhand der Untersuchung der Lehmproben vom Kupferschmelzplatz S1 festzustellen, dass für den Bau der Röstbetten sowie für die Innenauskleidung der Schmelzöfen der gleiche Rohstoff verwendet wurde. Obwohl keine Probe der lokalen Tonlager untersucht wurde, ist zu vermuten, dass die Rohstoffquelle für den genutzten Lehm in der Nähe des Schmelzplatzes zu suchen ist.

Im Vergleich mit anderen bronzezeitlichen Schmelzplätzen in den Ostalpen zeigt sich, dass die Verhüttung sulfidischer Kupfererze am Kupferschmelzplatz S1 keine Einzelercheinung ist. Vielmehr ist davon auszugehen, dass im gesamten Ostalpenraum, wenn nicht sogar im gesamten Alpenraum, die bronzezeitlichen Hüttenleute eine relativ einheitliche Verfahrenstechnik zur Ausbeutung und Verhüttung sulfidischer Erze beherrschten.

11. Summary

The Copper Smelting Site S1 in the Ramsau valley near Eisenerz is one of the most intensively archaeologically investigated Middle Bronze Age smelting sites in the Eastern Alps. It is located on a smooth hillside at the western end of the valley at an altitude of 1045 m above sea level on the left bank of the Ramsau river. During the archaeological excavations between 1992 and 2006 about 80 % of the smelting site was investigated. Ten roasting hearths, six double furnaces, numerous slag dumps and pits of various shapes and sizes were revealed. Based on the stratigraphy of the western part of the site, three phases of use can be distinguished. The double furnace 9/10 and roasting hearth 7 belong to the oldest phase. In the following period these were destroyed and the area was leveled for the construction of the double furnace 4/5. The associated roasting hearth 4 was built above the furnaces. The youngest phase is evidenced by the double furnace 1/2 with the roasting hearths 1, 2 and 3. The archaeological investigations show that some furnaces were used several times. In some parts of the furnace walls the slag lining was covered by a layer of clay which was again covered by slag lining. It is noteworthy that in the western part of the site no slag dump has been recorded. The slag dumps that have been revealed in the eastern part show a multilayered structure. The stratigraphic classification is complicated because of the medieval charcoal kiln in the north-east of the smelting site.

Based on the typology of the ceramics and one bronze pin the site dates to the Middle Bronze Age (1600–1350 BC). This dating is supported by ¹⁴C dates of charcoal samples from the furnaces and slag dumps.

For the archaeometallurgical studies slag samples were taken from the most important features. The main focus was on chemical and mineralogical analyses of the slags, the slagged furnace walls and some ore and metal finds to obtain information on the raw materials used as well as on intermediate and final smelting products.

According to their macroscopic properties, the slags are divided into four types. These are type A slags („Laufschlacken“), type B slags („Blasenschlacken“), type C slags („Plattenschlacken“) and combinations of these slag types (type A+B). Mostly type A, type B and type A+B slags and only rarely type C slags were found at the Copper Smelting Site S1. The slags were distributed over the whole smelting site without a concentration of a particular slag type in a specific area. Only in the area of the double furnace 1/2 a larger amount of type C slags was found.

Under the microscope the slag types A and B as well as the slag type A+B show similar structures of short prismatic to lath-shaped olivine and prismatic clinopyroxene. The olivines often show a zonal structure. Microanalytical studies using the scanning electron microscope with EDX revealed an enrichment of CaO, Al₂O₃ and K₂O in the edges in addition to the differences in the main components FeO and MgO. The only differences between the slag types are the higher porosity of type B slags and the increased occurrence of unmelted quartz inclusions in it. Some of these quartz inclusions contain remains of Cu/Fe sulphides. These are mainly iron-rich sulphides which consist of agglomerates of copper bearing pyrrhotite and chalcopyrite. In contrast, the structure of type C slags consists of thin, long fayalite needles in a glassy matrix. The outer edge of these slags is often covered by a thin magnetite layer, which forms as a result of rapid cooling outside the furnace, while the slags of type A, B and A+B cooled down slowly inside the furnace. Nearly all slag samples contain matte inclusions of varying copper concentrations.

The analysis of the chemical composition of the macroscopic different slag types shows that all slags have more or less similar compositions. These are mainly fayalitic and silicate slags with 25–45 wt-% SiO₂, 30–50 wt-% FeO and 5–15 wt-% CaO. The Al₂O₃ content varies between 2–12 wt-%, the contents of MgO and K₂O between 0.2–5 wt-%. The contents of the minor elements such as TiO₂, MnO, Na₂O and P₂O₅ are below 2 wt-%. Some type B slags show a higher concentration of SiO₂ which is due to numerous inclusions of quartz. The smelting temperatures of the slags which can be derived from their chemical and mineralogical composition were estimated between 1150 °C and 1300 °C. In combination with the mineralogical composition a partial pressure of oxygen of about 10⁻⁶–10⁻¹⁰ bar was deduced.

The Cu/Fe sulphide inclusions imply the smelting of sulfide ores, which probably consisted of a mixture of chalcopyrite and pyrite. However, the trace element signatures of the analysed slags and metal fragments indicate a certain amount of nickel, arsenic and antimony. This suggests that the smelted charge consisted mainly of chalcopyrite with a small amount of fahlore and nickeliferous minerals, a mineral association that is typical for copper deposits in the Eastern Alpine region. Only one ore sample found at the Copper Smelting Site S1 can be associated with copper smelting. It is a quartzite, which contains traces of chalcopyrite and some pyrite. The origin of the smelted ore could not be determined unambiguously. The few analyses of ore samples from the nearest surroundings of the smelting site (Eisenerz and Radmer) are not sufficient for provenance studies. The lead isotope ratios of the slags and the metal objects indicate ores that are generally assigned to the sulphidic ore deposits of the northern greywacke zone.

The chemical composition of the sulphide inclusions shows a wide variation with a tendency to copper-rich matte for all slag types. For this reason it is not possible to

distinguish between the slag types based on their sulphide inclusions. It seems that all slags come from the same process, in which matte was the main smelting product or it was enriched in copper. Thereby metallic copper was formed in some slags. This and the two metal objects that have been found on the site suggest the production of metallic copper at the Copper Smelting Site S1. Due to their chemical composition and the numerous sulphidic inclusions the both metal objects are characterised as raw copper. Based on their trace element signatures they belong to the type of the „East Alpine Copper“.

The slagged furnace stones, slagged furnace clay and slag lining were also analysed. Based on the mineralogical analysis of the slagged furnace walls the furnaces are divided into two sections. The slagging of the lower part of the furnaces (up to a height of about 30 cm above the furnace floor) shows a phase association of magnetite and metallic copper and occasionally matte. In the upper section the slagging shows a phase association of magnetite, metallic copper, cuprite and delafossite. At the estimated smelting temperatures of about 1200 °C this indicates a partial pressure of oxygen of 10^{-5} – 10^{-9} bar for the lower section. For the upper part of the furnaces it is between 10^{-4} – 10^{-6} bar. The higher partial pressures in the upper furnace section are due to the conditions at the end of the smelting process, when the slag and the smelting product are concentrated in the lower furnace section, while the slagged furnace wall in the upper furnace section oxidised due to the lack of coverage with charcoal. It should be noted that both the slag and the slagging of the furnace wall reflect the last gas atmosphere in the furnace, which does not necessarily represent the prevailing partial pressures of oxygen during the smelting. A division of several stages of the smelting process to the two furnaces of a single double furnace could not be clearly demonstrated.

The analyses of the slags show that there is no significant difference between slags from the roasting hearths, the furnaces and the slag dumps. Only the slags from the roasting hearths show a more reddish colour on their surface, which is caused by repeated exposure to heat during the roasting process. The presence of Cu/Fe sulphides in these slags shows that they were not roasted but used as construction material to ensure a sustainable air supply from below.

The homogeneous composition of the slags from the Copper Smelting Site S1 indicates that they were formed under similar conditions. They can probably be assigned to a single stage. Due to the composition of the Cu/Fe sulphides a process can be reconstructed, wherein the copper content was enriched in the matte. The plate slags (type C) here represent the ideal low-viscosity partial melt of the total charge, which solidified outside the furnace rapidly after tapping the slag, while the type A, B and A+B slags remained in the furnace and cooled down slowly.

Furthermore, no evidence has been found to indicate a change in the technique of

smelting during the various phases of use at the site. However, it seems that the slags of the later phases have a lower SiO₂ content and a smaller number of quartz fragments respectively. The study of ore deposits in the surroundings of the smelting site as well as the investigated ore from the site itself show that the ores are always intergrown with quartz and, therefore, a deliberate addition of silica as a flux was not generally necessary.

Finally this suggests a multistep process at Copper Smelting Site S1. In the first step the chalcopyritic ores were roasted on roasting hearths. After roasting, a first smelting process took place in the shaft furnace to produce matte. Afterwards the matte was probably roasted again together with fresh copper ore and further enriched in copper in the furnace in order to produce metallic copper. Because of the sulphidic phases in the metal objects the matte was not dead roasted. A final refining process of the raw copper was not detected. It was estimated that about 200 to 300 kg copper were produced. Assuming continuous production this would imply metallurgical activities for a few years or a couple of decades.

The analyses of the clay samples from the roasting hearths and the furnaces of the Copper Smelting Site S1 show that the same material was used for the construction of the furnaces and the roasting hearths. Although no sample of the local clay deposits was analysed, it can be assumed that the source of the raw material was located near the smelting site.

In summary it is obvious that the process for smelting sulphidic ores at the Copper Smelting Site S1 is comparable with other contemporary smelting sites in the eastern Eastern Alps. Therefore, it can be assumed that the Bronze Age metallurgists used a relatively standardised technology for exploiting and smelting sulphidic ores in the entire Eastern Alps, if not in the whole Alpine region.

Literaturverzeichnis

- Adetunji, J.; Williams, J. M. & Doonan, R. C. P., 1996, Mössbauer spectroscopic Studies of ancient Bronze Slags, in: Ortalli, I. (Hrsg.) *International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect. ICAME-95, Conference Proceedings*, **50**, Italian Physical Society, Bologna, 769–772.
- Agricola, G., 1556, *Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen in denen die Ämter, Instrumente, Maschinen und alle Dinge, die zum Berg- und Hüttenwesen gehören, nicht nur aus deutlichste beschrieben, sondern auch durch Abbildungen, die am grhörigen Orte eingefügt sind, unter Angabe der lateinischen und deutschen Bezeichnung aufs klarste vor Augen gestellt werden. Sowie sein Buch von den Lebewesen unter Tage. In neuer deutscher Übersetzung bearbeitet von Carl Schiffner 1928*, VDI-Verlag, Berlin, 564 S.
- Aidona, E.; Scholger, R.; Mauritsch, H. J.; Schnepf, E. & Klemm, S., 2006, Spatial distribution of archaeomagnetic vectors within archaeological samples from Eisenerz (Austria), *Geophysical Journal International*, **166**, 46–58.
- Angerbauer, A., 1985, *Werkstoffkundliche Untersuchungen an Kupferfunden aus der Bronzezeit*, Diplomarbeit, Institut für Technologie und Hüttenkunde der Nichteisenmetalle, Montanuniversität Leoben.
- Bachmann, H.-G., 1978, Schlacken: Indikatoren Archäometallurgischer Prozesse, in: Henricke, H. W. (Hrsg.) *Mineralische Rohstoffe als kulturhistorische Informationsquelle. Diskussionstagung des Arbeitskreises Archäometrie in der Fachgruppe Analyte Chemie der Gesellschaft Deutscher Chemiker vom 24.–26. Februar 1977 in Heidelberg*, Verlag des Vereins Deutscher Emailfachleute, Hagen, 66–103.
- Bachmann, H.-G., 1982, *The Identification of Slags from Archaeological Sites, Occasional Publication*, **6**, Institute of Archaeology, London, 37 S.
- Bernhard, J., 1966, Die Mitterberger Kupferkieslagerstätte. Erzführung und Tektonik, *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, **109**, 3–90.
- Bögel, H. & Schmidt, K., 1976, *Kleine Geologie der Ostalpen. Allgemein verständliche Einführung in den Bau der Ostalpen unter Berücksichtigung der angrenzenden Südalpen*, Ott Verlag, Thun, 1. Aufl., 231 S.

- Bowen, N. L. & Schairer, J. F., 1935, The system, MgO-FeO-SiO₂, *American Journal of Science*, **5/29**, 151–217.
- Bowen, N. L.; Schairer, J. F. & Posnjak, E., 1933, The system, CaO-FeO-SiO₂, *American Journal of Science*, **26/153**, 193–284.
- Brandmaier, P.; Paar, W. H.; Schramm, J.-M. & Chen, T. T., 1985, Geologie und edelmetallführende Kiesvererzungen der Grauwackenzone nordöstlich von Mandling (Steiermark/Österreich), *GPM: Geologisch-Paläontologische Mitteilungen Innsbruck*, **13/9**, 201–222.
- Brun, E., 1983, 3500 Jahre Bergbau und Verhüttung im Oberhalbstein, *Bergknappe: Zeitschrift über Bergbau in Graubünden und der übrigen Schweiz*, **7/4**, 8–13.
- Brun, E., 1984, Die Schlackenhalde des Oberhalbsteins, *Bergknappe: Zeitschrift über Bergbau in Graubünden und der übrigen Schweiz*, **8/1**, 7–11.
- Chace, F. M., 1956, Abbreviations in field and mine geological mapping, *Economic Geology*, **51/7**, 712–723.
- Cierny, J., 2008, *Prähistorische Kupferproduktion in den südlichen Alpen, Region Trentino Orientale, Der Anschnitt, Beiheft*, **22**, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, 248 S.
- Cierny, J.; Marzatico, F.; Weisgerber, G.; Hohlmann, B.; Hauptmann, A. & Schröder, B., 1995, Endbronzezeitliche Kupferproduktion im Trentino. Ein Vorbericht, *Der Anschnitt: Mitteilungsblatt der Vereinigung der Freunde von Kunst und Kultur im Bergbau*, **47/3**, 82–91.
- Colins, E.; Hoschek, G. & Mostler, H., 1980, Geologische Entwicklung und Metamorphose im Westabschnitt der Nördlichen Grauwackenzone unter besonderer Berücksichtigung der Metabasite, *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien*, **71/72 (1978/1979)**, 343–378.
- Cornelius, H. P., 1952, *Die Geologie des Mürztalgebietes, Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, Sonderband*, **4**, Geologische Bundesanstalt, Wien, 94 S.
- Czedik-Eysenberg, F., 1958, Beiträge zur Metallurgie des Kupfers in der Urzeit, in: Preuschen, E. (Hrsg.) *Studia Palaeometallurgica in honorem Ernésti Preuschen, Archaeologia Austriaca, Beiheft*, **3**, Deuticke, Wien, 1–18, archiv für ur- und frühgeschichtliche Bergbauforschung 12.
- Davidson, P. M. & Mukhopadhyay, D. K., 1984, Ca-Fe-Mg olivines: phase relations and a solution model, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **86**, 256–263.

- Doonan, R. C. P., 1996, *Old Flames, Slags, and Society. Copper smelting technology in the Ramsau valley, Austria during the Bronze age*, Dissertation, Department of Archaeology and Prehistory, University of Sheffield.
- Doonan, R. C. P.; Klemm, S.; Ottaway, B. S.; Sperl, G. & Weinek, H., 1996, The east alpine Bronze Age copper smelting process: Evidence from the Ramsau valley, Eisenerz, Austria, in: Demirci, Ş.; Özer, A. M. & Summers, G. D. (Hrsg.) *Archaeometry '94. The proceedings of the 29th International Symposium of Archaeometry*, Tübitak, Ankara, 18–22.
- Drescher, A., 2004, Vegetationskundliche Untersuchungen an prähistorischen Kupferschmelzplätzen in der Eisenerzer Ramsau (Steiermark), in: Weisgerber, G. & Goldenberg, G. (Hrsg.) *Alpenkupfer - Rame delle Alpi, Der Anschnitt, Beiheft, 17*, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, 347–354.
- Drescher-Schneider, R., 2003, Die Vegetations- und Besiedlungsgeschichte der Region Eisenerz auf der Basis pollenanalytischer Untersuchungen im Leopoldsteiner See und in der Eisenerzer Ramsau, in: Klemm, S. (Hrsg.) *Montanarchäologie in den Eisenerzer Alpen, Steiermark - Archäologische und naturwissenschaftliche Untersuchungen zum prähistorischen Kupferbergbau in der Eisenerzer Ramsau, Mitteilungen der Prähistorischen Kommission der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 50*, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, 174–197.
- Drescher-Schneider, R., 2004, Pollenanalytische Untersuchungen an prähistorischen Kupferschmelzplätzen in der Eisenerzer Ramsau (Steiermark). Erste Ergebnisse, in: Weisgerber, G. & Goldenberg, G. (Hrsg.) *Alpenkupfer - Rame delle Alpi, Der Anschnitt, Beiheft, 17*, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, 355–360.
- Ebner, F., 1997, Die geologischen Einheiten Österreichs und ihre Rohstoffe, in: Weber, L. (Hrsg.) *Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs. Erläuterungen zur metallogenetischen Karte von Österreich 1:500.000 unter Einbeziehung der Industriemineralien und Energierohstoffe, Archiv für Lagerstättenforschung, 19*, Geologische Bundesanstalt, Wien, 49–229.
- Eibner, C., 1982a, Kupfererzbergbau in Österreichs Alpen, in: Geisslinger, H. (Hrsg.) *Südosteuropa zwischen 1600 und 1000 v. Chr., Prähistorische Archäologie in Südosteuropa, 1*, Moreland, Berlin, Bad Bramstedt, 399–408, südosteuropa-Jahrbuch 13; Internationale Hochschulwoche der Südosteuropa-Gesellschaft 21.
- Eibner, C., 1982b, Kupferverhüttung - Das Vorstadium für Gießereihütten der Urzeit, *Archeologia Polski, 27/2*, 303–313.

- Eibner, C., 2004, Die mittelbronzezeitliche Fundstelle „Schlosser“ in Schwarzenbach, Stadtgemeinde Trieben, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **33**, 27–30.
- Emmerer, B., 2000, *Vegetationsentwicklung auf alten Bergbauhalden in den Niederen Tauern und den Eisenerzer Alpen.*, Diplomarbeit, Institut für Botanik, Karl-Franzens-Universität Graz.
- Emmerer, B.; Steinlechner, E.; Trinkaus, P. & Gössler, W., 2003, Ökologische Untersuchungen von prähistorischen Kupferschlackenhalde in der Eisenerzer Ramsau, in: Klemm, S. (Hrsg.) *Montanarchäologie in den Eisenerzer Alpen, Steiermark - Archäologische und naturwissenschaftliche Untersuchungen zum prähistorischen Kupferbergbau in der Eisenerzer Ramsau, Mitteilungen der Prähistorischen Kommission der Österreichischen Akademie der Wissenschaften*, **50**, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, 165–173.
- Feitzinger, G. & Paar, W. H., 1988, Montangeologie stratiformer Buntmetallvererzungen am Schwemmburg bei Radstadt (Grauwackenzone, Salzburg), *Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt*, **9**, 5–18.
- Flajs, G., 1966, Condontenstratigraphische Untersuchungen im Raum von Eisenerz, Nördliche Grauwackenzone, *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien*, **59** (1966)/2, 157–212.
- Flajs, G. & Schönlaub, H. P., 1976, Die biostratigraphische Gliederung des Altpaläozoikums am Polster bei Eisenerz (Nördliche Grauwackenzone, Österreich), *Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, **1976/2**, 257–303.
- Flegler, S. L.; Heckman, Jr., J. W. & Klomparens, K. L., 1995, *Elektronenmikroskopie. Grundlagen, Methoden, Anwendungen.*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford, 279 S.
- Frimmel, H. E., 1989, Einsatzmöglichkeiten der Strontium-Methode in der Lagerstättengeologie am Beispiel der Barytlagerstätte Kogel/Brixlegg (Tirol), *Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt*, **11**, 127–146.
- Goldenberg, G., 1996, Archäometallurgische Untersuchungen zur Entwicklung des Metallhüttenwesens im Schwarzwald. Blei-, Silber- und Kupfergewinnung von der Frühgeschichte bis zum 19. Jahrhundert, in: Goldenberg, G.; Otto, J. & Steuer, H. (Hrsg.) *Archäometallurgische Untersuchungen zum Metallhüttenwesen im Schwarzwald, Archäolo-*

- gie und Geschichte: Freiburger Forschungen zum ersten Jahrtausend in Südwestdeutschland*, **8**, Jan Thorbecke Verlag, Sigmaringen, 9–275.
- Goldenberg, G., 2004, Ein Verhüttungsplatz der mittleren Bronzezeit bei Jochberg (Nordtirol), in: Weisgerber, G. & Goldenberg, G. (Hrsg.) *Alpenkupfer - Rame delle Alpi, Der Anschnitt, Beiheft*, **17**, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, 165–176.
- Goldenberg, G. & Rieser, B., 2004, Die Fahlerzlagerstätten von Schwaz/Brixlegg (Nordtirol). Ein weiteres Zentrum urgeschichtlicher Kupferproduktion in den österreichischen Alpen, in: Weisgerber, G. & Goldenberg, G. (Hrsg.) *Alpenkupfer - Rame delle Alpi, Der Anschnitt, Beiheft*, **17**, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, 37–52.
- Gruber, A. & Preßlinger, H., 1983, Werkstoffkundliche Untersuchungen an prähistorischen Kupfergußkuchen aus den Ostalpen, *METALL: Zeitschrift für Technik, Industrie und Handel*, **37/12**, 1254–1256.
- Gstrein, P., 1979, Neuerkenntnisse über die Genese der Fahlerzlagerstätte Schwaz (Tirol), *Mineralium Deposita: International journal for geology, mineralogy and geochemistry of mineral deposits*, **14**, 185–194.
- Gütlich, P. & Schröder, C., 2012, Mössbauer Spectroscopy, in: Schäfer, R. & Schmidt, P. C. (Hrsg.) *Methods in Physical Chemistry*, **1**, Wiley-VCH, Weinheim, 351–289.
- Gwinner, M. P., 1978, *Geologie der Alpen. Stratigraphie Paläogeographie Tektonik*, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, 2. Aufl., 480 S.
- Hahn-Weinheimer, P.; Hirner, A. & Weber-Diefenbach, K., 1995, *Röntgenfluoreszenzanalytische Methoden. Grundlagen und praktische Anwendung in den Geo-, Material- und Umweltwissenschaften*, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig, Wiesbaden, 283 S.
- Handler, R., 1993, Bericht 1992 über geologische Aufnahmen in der Grauwackenzone auf Blatt 103 Kindberg, *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, **136/3**, 594–595.
- Hauptmann, A., 1985, *5000 Jahre Kupfer in Oman. Band 1: Die Entwicklung der Kupfermetallurgie vom 3. Jahrtausend bis zur Neuzeit*, *Der Anschnitt, Beiheft*, **4**, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, 137 S.
- Hauptmann, A., 2000, *Zur frühen Metallurgie des Kupfers in Fenan/Jordanien*, *Der Anschnitt, Beiheft*, **11**, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, 236 S.

- Hauptmann, A.; Keesmann, I. & Schulz-Dobrick, B., 1984, Die Kristallisation von Fe-reichem Olivin in archäometallurgischen Schlacken, *Fortschritte der Mineralogie*, **62/Beiheft 1**, 84–86.
- Haustein, M., 2004, Die Thermolumineszenzdatierung einer alten Metallhüttenschlacke aus dem Paltental, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **33**, 31–33.
- Hebert, B. & Preßlinger, H., 1990, Untersuchung prähistorischer Schlacken vom Burgstallkogel, *Archäologie Österreichs: Mitteilungen der Österreichischen Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte*, **1/1-2**, 48–50.
- Heinisch, H., 1981, Zum ordovizischen Porphyroidvulkanismus der Ost- und Südalpen, Stratigraphie, Petrographie, Geochemie, *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, **124/1**, 1–109.
- Heinisch, H., 1988, Hinweise auf die Existenz eines passiven Kontinentalrandes im Altpaläozoikum der Nördlichen Grauwackenzone - Ostalpen, *Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen*, **68**, 407–418.
- Heinisch, H.; Hertogen, J. & Schlaegel, P., 1988, Ausgewählte Spurenelementdaten von metamorphen basischen Magmatiten aus der Nördlichen Grauwackenzone (Österreich), *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, **131/2**, 267–278.
- Henderson, P., 1982, *Inorganic Geochemistry*, Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, Frankfurt, 353 S.
- Herdits, H., 1997, *Ein bronzezeitlicher Kupferverhüttungsplatz in Mühlbach/Hochkönig (Salzburg)*, Diplomarbeit, Geisteswissenschaftliche Fakultät, Universität Wien.
- Herdits, H. & Löcker, K., 2004, Eine bronzezeitliche Kupferhütte im Mitterberger Kupferkies-Revier (Salzburg). Ausgrabung und Rekonstruktion, in: Weisgerber, G. & Goldenberg, G. (Hrsg.) *Alpenkupfer - Rame delle Alpi, Der Anschnitt, Beiheft*, **17**, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, 177–188.
- Höppner, B.; Bartelheim, M.; Huijsmans, M.; Krauß, R.; Martinek, K.-P.; Pernicka, E. & Schwab, R., 2005, Prehistoric Copper Production in the Inn Valley (Austria), and the earliest Copper in Central Europe, *Archaeometry*, **47/2**, 293–315.
- Hubmann, B.; Suttner, T. J. & Messner, F., 2006, Geologic Frame of Palaeozoic Reefs in Austria with Special Emphasis on Devonian Reef-architecture of the Graz Palaeozoic, *Joannea Geologie und Paläontologie*, **8**, 47–72.

- Huijsmans, M.; Krauß, R. & Stibisch, R., 2004, Prähistorischer Fahlerzbergbau in der Grauwackenzone. Neolithische und bronzezeitliche Besiedlungsgeschichte und Kupfermetallurgie im Raum Brixlegg (Nordtirol), in: Weisgerber, G. & Goldenberg, G. (Hrsg.) *Alpenkupfer - Rame delle Alpi, Der Anschnitt, Beiheft*, **17**, Deutsches Bergbaumuseum, Bochum, 53–62.
- Jäger, T., 2003, *Untersuchungen von Stressreaktionen bei Pflanzen auf einer bronzezeitlichen Schlackenhalde*, Diplomarbeit, Naturwissenschaftliche Fakultät, Karl-Franzens-Universität Graz.
- Klaunzer, M.; Goldenberg, G.; Hye, S.; Staudt, M.; Töchterle, U. & Tomedi, G., 2010, Prehistoric Fahlore Mining and Metallurgy in the Mauken Valley, Radfeld/Brixlegg, Noth-Tyrol, in: Anreiter, P.; Goldenberg, G.; Hanke, K.; Krause, R.; Leitner, W.; Mathis, F.; Nicolussi, K.; Oeggl, K.; Pernicka, E.; Prast, M.; Schibler, J.; Schneider, I.; Stadler, H.; Stöllner, T.; Tomedi, G. & Tropper, P. (Hrsg.) *Mining in European History and its Impact on Environment and Human Societies. Proceedings of the 1st Mining in European History-Conference of the SFB-HIMAT, 12.-15. November 2009, Innsbruck*, Conference Series, university press, Innsbruck, 345–350.
- Klemm, S., 2000, KG Krumpenthal, SG Eisenerz, VB Leoben, *FÖ: Fundberichte aus Österreich*, **38**, **1999**, 772–773.
- Klemm, S., 2002, Prähistorische Kupfergewinnung in den Eisenerzer Alpen. Ein Kurzbericht, in: Hausmann, R. F. (Hrsg.) *Festgabe für em. Univ.-Prof. Dr. Othmar Pickl zum 75. Geburtstag, Mitteilungsblatt der Korrespondenten der Historischen Landeskommission für Steiermark*, **8**, Selbstverlag der Historischen Landeskommission für Steiermark, Graz, 114–119.
- Klemm, S., 2003, *Montanarchäologie in den Eisenerzer Alpen, Steiermark - Archäologische und naturwissenschaftliche Untersuchungen zum prähistorischen Kupferbergbau in der Eisenerzer Ramsau, Mitteilungen der Prähistorischen Kommission der Österreichischen Akademie der Wissenschaften*, **50**, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, 205 S.
- Klemm, S., 2004, Der prähistorische Kupferschmelzplatz S1 in der Eisenerzer Ramsau (Steiermark) - Ein Vorbericht, in: Weisgerber, G. & Goldenberg, G. (Hrsg.) *Alpenkupfer - Rame delle Alpi, Der Anschnitt, Beiheft*, **17**, Deutsches Bergbaumuseum, Bochum, 189–198.

- Klemm, S., 2006, Die Erforschung der prähistorischen Kupfergewinnung in den Eisenerzer Alpen 1955-2005, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **38**, 26–36.
- Klemm, S., 2010, Bronze Age Copper Mining - Landscape Conditions and Land-Use in the Eisenerzer Alps, Styria (Austria), in: Anreiter, P.; Goldenberg, G.; Hanke, K.; Krause, R.; Leitner, W.; Mathis, F.; Nicolussi, K.; Oeggl, K.; Pernicka, E.; Prast, M.; Schibler, J.; Schneider, I.; Stadler, H.; Stöllner, T.; Tomedi, G. & Tropper, P. (Hrsg.) *Mining in European History and its Impact on Environment and Human Societies. Proceedings for the 1st Mining in European History-Conference of the SFB-HIMAT, 12.–15. November 2009, Innsbruck*, university press, Innsbruck, 271–276.
- Klemm, S., 2012a, Die Bergbaufolgelandschaft in der Eisenerzer Ramsau, Steiermark (Österreich): Methoden und Ergebnisse montanarchäologischer Forschung, in: Anreiter, P.; Bánffy, E.; Bartosiewicz, L.; Meid, W. & Metzner-Nebelsick, C. (Hrsg.) *Archaeological, Cultural and Linguistic Heritage. Festschrift for Erzsébet Jerem in Honour of her 70th Birthday*, Archaeolingua, Archaeolingua Alapítvány, Budapest, 337–348.
- Klemm, S., 2012b, Montanarchäologische Forschung in den Eisenerzer Alpen, Steiermark: Bronzezeit bis Neuzeit, in: Reinholdt, C. & Wohlmayr, W. (Hrsg.) *Akten des 13. Österreichischen Archäologentages. Klassische und Frühägäische Archäologie, Paris-Lodron-Universität Salzburg vom 25. bis 27. Februar 2010*, Phoibos Verlag, Wien, 429–436.
- Klemm, S., in Vorbereitung, *Der bronzezeitliche Kupferschmelzplatz S1 in der Eisenerzer Ramsau, Steiermark (Österreich). Archäologische Erforschung und interdisziplinäre Untersuchung einer ostalpinen Kupferhütte*, Mitteilungen der Prähistorischen Kommission der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.
- Klemm, S.; Strobl, S. & Haubner, R., 2012, Archäologische Funde mittelalterlicher Eisenerzverhüttung und Holzkohlenproduktion im Nahbereich des Steirischen Erzberges, in: Montanhistorischer Verein Österreich (Hrsg.) *1300 Jahre Erzabbau am Steirischen Erzberg 712 - 2012. Der Steirische Erzberg - seine wirtschaftliche, soziale und kulturelle Bedeutung, res montanarum, Sonderband, 2012*, Phoibos Verlag, Leoben, 69–82.
- Klose, O., 1918, Die prähistorischen Funde vom Mitterberge bei Bischofshofen im städtischen Museum Carolino-Augusteum zu Salzburg und zwei prähistorische Schmelzöfen auf dem Mitterberge, in: Kyrle, G. (Hrsg.) *Urgeschichte des Kronlandes Salzburg, Österreichische Kunsttopographie*, **17**, Schroll, Wien, 1–40.

- Kowalski, M.; Spencer, P. J. & Neuschütz, D., 1995, Phase diagrams, in: Verein Deutscher Eisenhüttenleute (Hrsg.) *Slag Atlas*, Verlag Stahleisen, 2nd edition Aufl., 21–214.
- Kramer, D., 1988, Kupfer - Bergbau, Verhüttung, Verarbeitung. Ein Überblick, *Mitteilungen der Archäologischen Gesellschaft Graz*, **2**, 161–180.
- Kraus, S.; Schröder, C.; Klemm, S. & Pernicka, E., in Vorbereitung, Archaeometallurgical studies on the slags of the Middle Bronze Age Copper Smelting Site S1, Styria, Austria, in: Modaresi-Tehrani, D.; Hauptmann, A. & Prange, M. (Hrsg.) *Archaeometallurgy in Europe III*, Der Anschnitt, Beiheft, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum.
- Krause, R., 2003, *Studien zur kupfer- und frühbronzezeitlichen Metallurgie zwischen Karpatenbecken und Ostsee, Vorgeschichtliche Forschungen*, **24**, Verlag Marie Leidorf, Rahden/Westf., 338 S.
- Kretz, R., 1983, Symbols for rock-forming minerals, *American Mineralogist: An international journal of earth and planetary materials*, **68/1,2**, 277–279.
- Krismer, M.; Goldenberg, G. & Tropper, P., 2011, Die chemische Zusammensetzung von spätbronzezeitlichen Schlacken vom Schmelzplatz Mauken/Brixlegg, in: Oeggl, K.; Goldenberg, G.; Stöllner, T. & Prast, M. (Hrsg.) *Die Geschichte des Bergbaus in Tirol und seinen angrenzenden Gebieten. Proceedings zum 5. Milestone-Meeting des SFB HiMAT vom 7.-10.10.2010 in Mühlbach*, Conference Series, university press, Innsbruck, 185–192.
- Kunstmann, L., 2003, *Archäologische und archäometallurgische Untersuchungen zum Röstprozess in der spätbronzezeitlichen Kupfermetallurgie in den Ostalpen*, Diplomarbeit, Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- Kunstmann, L., 2004, Ergebnisse der archäometallurgischen Untersuchungen zum Röstprozess in der spätbronzezeitlichen Kupfermetallurgie in den Ostalpen, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **33**, 33–36.
- Kushiro, I., 1960, Si-Al relation in clinopyroxenes from igneous rocks, *American Journal of Science*, **258**, 548–554.
- Kyrle, G., 1918, Der prähistorische Bergbaubetrieb in den Salzburger Alpen, in: Kyrle, G. (Hrsg.) *Urgeschichte des Kronlandes Salzburg, Österreichische Kunsttopographie*, **17 (1916)**, Schroll, Wien, 1–70.

- Kyrle, G., 1920, Urgeschichtliche Bergbaue in den Ostalpen, *Österreichische Monatsschrift für den öffentlichen Baudienst und das Berg- und Hüttenwesen*, **1**, 170–173; 256–260; 282–285; Tafeln 17–20.
- Lesko, I., 1960, Geologische und lagerstättenkundliche Untersuchungen im Raume Oberdorf a. d. Laming, Steiermark, *Mitteilungen der Gesellschaft der Geologie- und Bergbaustudenten in Wien*, **11**, 3–65; Tafeln 1–8.
- Loeschke, J.; Kretzschmar, T.; Langer, V. & Streck, M., 1990, Zur Geologie der Norischen Decke nordwestlich von Kalwang (Eisenerzer Alpen, Steirische Grauwackenzone/Österreich), *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, **133/2**, 345–363.
- Lutz, J.; Pernicka, E.; Pils, R.; Steiner, M. & Vavtar, F., 2009, Geochemische Charakterisierung der Erzvorkommen am Mitterberg und in Kitzbühel, in: Oegg, K. & Prast, M. (Hrsg.) *Die Geschichte des Bergbaus in Tirol und seinen angrenzenden Gebieten. Proceedings zum 3. Milestone-Meeting des SFB HiMAT vom 23.-26.10.2008 in Silbertal*, Conference Series, university press, Innsbruck, 175–181.
- Lutz, J.; Pernicka, E.; Pils, R.; Tomedi, G. & Vavtar, F., 2010, Geochemical Characteristics of Copper Ores from the greywacke Zone in the Austrian Alps and their Relevance as a Source of Copper in Prehistoric Times, in: Anreiter, P.; Goldenberg, G.; Hanke, K.; Krause, R.; Leitner, W.; Mathis, F.; Nicolussi, K.; Oegg, K.; Pernicka, E.; Prast, M.; Schibler, J.; Schneider, I.; Stadler, H.; Stöllner, T.; Tomedi, G. & Tropper, P. (Hrsg.) *Mining in European History and its Impact on Environment and Human Societies. Proceedings of the 1st Mining in European History-Conference of the SFB-HIMAT, 12.-15. November 2009, Innsbruck*, Conference Series, university press, Innsbruck, 145–150.
- Martinek, K.-P., 1994, Das Kupferbeil der Heiden. Zeugnisse des prähistorischen Bergbaus im Gebiet Schwaz-Brixlegg, in: Geofa-Fachmesse (Hrsg.) *Opal: offizieller Katalog der 31. Mineralientage München, 14.-16. Oktober '94*, Münchner Mineralientage Fachmesse, Oberhaching, 74–75.
- Metten, B., 2003, *Beitrag zur spätbronzezeitlichen Kupfermetallurgie im Trentino (Südalpen) im Vergleich mit anderen prähistorischen Kupferschlacken aus dem Alpenraum*, *Metalla: Forschungsberichte des Deutschen Bergbau-Museums*, **10/1/2**, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, 122 S.
- Metz, K., 1953, Die stratigraphische und tektonische Baugeschichte der steirischen Grauwackenzone, *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien*, **44 (1951)**, 1–84.

- Möbus, G., 1997, *Geologie der Alpen. Eine Einführung in die regional-geologischen Einheiten zwischen Genf und Wien*, Verlag Sven von Loga, Köln, 340 S.
- Modrijan, W., 1968, Die Erforschung des vor- und frühgeschichtlichen Berg- und Hüttenwesens und die Steiermark, in: Waidacher, F. (Hrsg.) *Der Bergmann, der Hüttenmann - Gestalter der Steiermark. Katalog der 4. Landesausstellung 1968*, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Graz, 41–87.
- Moesta, H. & Kopcewicz, B., 1982, Bronzezeitliche Hüttenprozesse in den Ostalpen, *Die Naturwissenschaften*, **69/10**, 493–494.
- Moesta, H. & Schlick, G., 1989, The Furnace of Mitterberg - An Oxidizing Bronze Age Copper Process, *Bulletin of the Metals Museum*, **14**, 5–16.
- Moesta, H.; Schnau-Roth, G. & Wagner, H.-G., 1984, Mößbauer-Studien zu bronzezeitlichen Kupferhütten-Prozessen - I. Schlacken, besonders der ostalpinen Kupfertechnik, *Berliner Beiträge zur Archäometrie*, **9**, 95–112.
- Moesta, H.; Rüdler, R. & Schnau-Roth, G., 1989, Zur Verfahrenstechnik der bronzezeitlichen Kupferhütten am Mitterberg. Mößbauer- und mikroskopische Studien, in: Hauptmann, A.; Pernicka, E. & Wagner, G. A. (Hrsg.) *Archäometallurgie der Alten Welt - Beiträge zum Internationalen Symposium „Old World Archaeometallurgy“*, Heidelberg 1987, *Der Anschnitt, Beiheft*, **7**, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, 141–153.
- Morimoto, N., 1989, Nomenclature of pyroxenes, *Canadian Mineralogist*, **27**, 143–156.
- Muan, A., 1955, Phase Equilibria in the System FeO-Fe₂O₃-SiO₂, *JOM: Journal of Metals*, **7/9**, 965–976.
- Much, M., 1902, Prähistorischer Bergbau in den Alpen, *Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins*, **33**, 1–31.
- Mukhopadhyay, D. K. & Lindsley, D. H., 1983, Phase relations in the join kirschsteinit (CaFeSiO₄)-fayalite (Fe₂SiO₄), *American Mineralogist: An international journal of earth and planetary materials*, **68/11+12**, 1089–1094.
- Neinavaie, H., 1993, Bericht über bodengeochemisch-mineralogische Untersuchungen im Bereich eines Kupferschmelzplatzes in der Eisenerzer Ramsau, Wien, Eisenerz, unpublizierter Bericht (Archiv S. Klemm).
- Nelle, O. & Klemm, S., 2010, Wood and Charcoal Supplies for Prehistoric and Mediaeval Mining Activities in the Eisenerzer Ramsau, Styria, Austria, in: Anreiter, P.; Goldenberg, G.; Hanke, K.; Krause, R.; Leitner, W.; Mathis, F.; Nicolussi, K.; Oeggel, K.;

- Pernicka, E.; Prast, M.; Schibler, J.; Schneider, I.; Stadler, H.; Stöllner, T.; Tomedi, G. & Tropper, P. (Hrsg.) *Mining in European History and its Impact on Environment and Human Societies. Proceedings for the 1st Mining in European History-Conference of the SFB-HIMAT, 12.-15. November 2009, Innsbruck*, university press, Innsbruck, 177–182.
- Neubauer, F. & Frisch, W., 1993, The Austro-alpine Metamorphic Basement East of the Tauern Window, in: von Raumer, J. F. & Neubauer, F. (Hrsg.) *Pre Mesozoic Geology in the Alps*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 515–536.
- Neubauer, F.; Handler, R.; Hermann, S. & Paulus, G., 1994, Revised Lithostratigraphy and Structure of the Eastern Graywacke Zone (Eastern Alps), *Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft*, **86 (1993)**, 61–74.
- Neubauer, F.; Frisch, W. & Hansen, B. T., 2002, Early Palaeozoic tectonothermal events in basement complexes of the eastern Greywacke Zone (Eastern Alps): evidence from U-Pb zircon data, *International Journal of Earth Sciences*, **91**, 775–786.
- Niederschlag, E.; Pernicka, E.; Seifert, T. & Bartelheim, M., 2003, The determination of lead isotope ratios by Multiple Collector ICP-MS: A case study of Early Bronze Age artefacts and their possible relation with ore deposits of the Erzgebirge, *Archaeometry*, **45/1**, 61–100.
- Nievoll, J., 1984, Der Südrand der Grauwackenzone zwischen Stübing und Neuberg (Obersteiermark, OK 103 Kindberg), *Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft*, **77 (1984)**, 63–71.
- Nowotny, A., 2005, Bericht 2004 über geologische Aufnahmen auf Blatt 103 Kindberg, *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, **145/3+4**, 330.
- Ofner, L. M., 2002, *Charakteristik der Kupfermineralisationen im Raum Eisenerz - Radmer - Johnsbach (Grauwackenzone/Steiermark)*, Diplomarbeit, Institut für Geowissenschaften, Montanuniversität Leoben.
- Okada, Y., 1911, *Der „Mabuki“-Prozeß. Die japan. Gewinnungsmethode d. metall. Kupfers aus Kupferstein*, Craz & Gerlach, Freiberg, 20 S.
- Otto, H. & Witter, W., 1952, *Handbuch der ältesten vorgeschichtlichen Metallurgie in Mitteleuropa*, Johann Ambrosius Barth Verlag, Leipzig, 222 S.
- Paar, W. H. & Chen, T. T., 1986, Zur Mineralogie von Cu-Ni(Co)-Pb-Ag-Hg-Erzen im Revier Schwarzleo bei Leogang, Salzburg, Österreich, *Mitteilungen der Österreichischen Geologischen Gesellschaft*, **78 (1985)**, 125–148.

- Pernicka, E., 2000, Neutronenaktivierungsanalyse (NAA), in: Pavićević, M. K. & Amt-hauer, G. (Hrsg.) *Physikalisch-chemische Untersuchungsmethoden in den Geowissen-schaften. Band 1, Mikroskopische, analytische und massenspektrometrische Methoden*, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, 151–158.
- Piel, M.; Hauptmann, A. & Schröder, B., 1992, Naturwissenschaftliche Untersuchungen an bronzezeitlichen Kupferverhüttungsschlacken von Acqua Fredda/Trentino, in: Lippert, A. & Spindler, K. (Hrsg.) *Festschrift zum 50jährigen Bestehen des Institutes für Ur- und Frühgeschichte der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Universitätsforschun-gen zur prähistorischen Archäologie*, **8**, Dr. Rudolf Habelt, Bonn, 463–472.
- Preßlinger, H., 1983, Weitere urzeitliche Schmelz- und Schlackenplätze im Paltental, *BHM: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Zeitschrift für Rohstoffe, Geotechnik, Metall-urgie, Werkstoffe und Maschinenbau*, **128/7**, 278–280.
- Preßlinger, H., 1987, Montanarchäologie im Paltental. Untersuchungsergebnisse von bron-zezeitlichem Bergbau und bronzezeitlicher Verhüttung, *Da schau her: Die Kulturzeit-schrift aus Österreichs Mitte*, **8/1**, 6–10.
- Preßlinger, H., 1998, Schlackenkundliche Untersuchungsergebnisse von bronzezeitlichen Schlacken aus dem Paltental, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Ver-eins für Österreich*, **19**, 17–24.
- Preßlinger, H., 2002, Der Bau metallurgischer Anlagen in der Spätbronzezeit, *res mon-tanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **28**, 5–10.
- Preßlinger, H., 2004, Chemische Analysen von spätbronzezeitlichen Metallprodukten - ein Hinweis auf die Erzeugungsstätten?, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhisto-rischen Vereins für Österreich*, **33**, 40–42.
- Preßlinger, H. & Eibner, C., 1983, Die urzeitliche Wehranlage der Berg- und Hütten-leute von Bärndorf, Gemeinde Rottenmann, *Da schau her: Die Kulturzeitschrift aus Österreichs Mitte*, **4/3**, 18–20.
- Preßlinger, H. & Eibner, C., 1989a, Bronzezeitliche Kupferverhüttung im Paltental. Montanarchäologische und archäometallurgische Untersuchungen im Ostalpenraum, in: Hauptmann, A.; Pernicka, E. & Wagner, G. A. (Hrsg.) *Archäometallurgie der Alten Welt - Beiträge zum Internationalen Symposium „Old World Achaeometallurgy“, Heidelberg 1987, Der Anschnitt, Beiheft*, **7**, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, 235–240.

- Preßlinger, H. & Eibner, C., 1989b, Die bautechnische Ausführung bronzezeitlicher Kupferhütten. Montanarchäologische Grabungen an drei Verhüttungsplätzen, *Da schau her: Die Kulturzeitschrift aus Österreichs Mitte*, **10/1**, 7–9.
- Preßlinger, H. & Eibner, C., 1993, Prähistorischer Kupfererzbergbau und die Verhüttung der Erze, in: Preßlinger, H. & Köstler, H. J. (Hrsg.) *Bergbau und Hüttenwesen im Bezirk Liezen (Steiermark)*, *Kleine Schriften der Abteilung Schloß Trautenfels am Steiermärkischen Landesmuseum Joanneum*, **24**, Verein Schloß Trautenfels, Trautenfels, 25–36.
- Preßlinger, H. & Eibner, C., 2004, Montanarchäologie im Paltental (Steiermark). Bergbau, Verhüttung, Verarbeitung und Siedlungstätigkeit in der Bronzezeit, in: Weisgerber, G. & Goldenberg, G. (Hrsg.) *Alpenkupfer - Rame delle Alpi, Der Anschnitt, Beiheft*, **17**, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, 63–74.
- Preßlinger, H. & Gruber, A., 1984, Blühende Kupferindustrie in der Urnenfelderzeit. Werkstoffkundliche Untersuchung an prähistorischen Metallfunden, *Da schau her: Die Kulturzeitschrift aus Österreichs Mitte*, **5/2**, 14–16.
- Preßlinger, H. & Gruber, A., 1985, Urnenfelderzeitliche Bronzegießerei in Wörschach, *Da schau her: Die Kulturzeitschrift aus Österreichs Mitte*, **6/1**, 7–9.
- Preßlinger, H. & Prochaska, W., 2002, Chemische Untersuchungen von bronzezeitlichen Laufsclacken, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **28**, 10–14.
- Preßlinger, H.; Eibner, C.; Walach, G. & Sperl, G., 1980, Ergebnis der Erforschung urnenfelderzeitlicher Kupfermetallurgie im Paltental, *BHM: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Zeitschrift für Rohstoffe, Geotechnik, Metallurgie, Werkstoffe und Maschinenbau*, **125/3**, 131–142.
- Preßlinger, H.; Sperl, G.; Eibner, C. & Walach, G., 1982, Kupfererzverhüttung in Österreich vor 3000 Jahren, *Österreichischer Kalender für Berg, Hütte und Energie*, **28**, 121–127.
- Preßlinger, H.; Gruber, A. & Paschen, P., 1985, Die Verhüttung sulfidischer Erze im Schachtofen in der Bronzezeit, *METALL: Zeitschrift für Technik, Industrie und Handel*, **39/5**, 423–425.
- Preßlinger, H.; Walach, G.; Eibner, C. & Gruber, A., 1986, Geophysikalische, montanarchäologische und metallurgische Untersuchungsergebnisse von bronzezeitlichen ostalpinen Kupferhütten, *BHM: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Zeitschrift für Rohstoffe, Geotechnik, Metallurgie, Werkstoffe und Maschinenbau*, **131/7**, 225–230.

- Preßlinger, H.; Walach, G. & Eibner, C., 1988, Bronzezeitliche Verhüttungsanlagen zur Kupfererzeugung in den Ostalpen, *BHM: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Zeitschrift für Rohstoffe, Geotechnik, Metallurgie, Werkstoffe und Maschinenbau*, **133/7**, 338–344.
- Preßlinger, H.; Walach, G.; Eibner, C. & Prochaska, W., 1992, Montanarchäologische Untersuchungsergebnisse eines urnenfelderzeitlichen Kupfererz-Verhüttungsplatzes bei Mautern/Steiermark, *BHM: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Zeitschrift für Rohstoffe, Geotechnik, Metallurgie, Werkstoffe und Maschinenbau*, **137/1**, 31–37.
- Preßlinger, H.; Mayer, A. & Nilica, R., 1998, Beurteilung bronzezeitlicher Ofensteine aus einem Schachtofen zur Rohkupfererzeugung, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **19**, 25–27.
- Preßlinger, H.; Eibner, C.; Harmuth, H. & Leth, I., 2000, Baustoffe, Feuerfestmaterialien und Keramiken im bronzezeitlichen Hüttenbetrieb, *BHM: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Zeitschrift für Rohstoffe, Geotechnik, Metallurgie, Werkstoffe und Maschinenbau*, **145/9**, 368–376.
- Preßlinger, H.; Harmuth, H.; Prochaska, W. & Eibner, C., 2001, Metallurgische Schlacken - ein Sekundärrohstoff in der Bronzezeit, *BHM: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Zeitschrift für Rohstoffe, Geotechnik, Metallurgie, Werkstoffe und Maschinenbau*, **146/5**, 222–226.
- Preßlinger, H.; Eibner, C.; Walach, G. & Preßlinger, B., 2004a, Fünf Jahre Arbeit im Projekt „Erforschung der Ur- und Frühgeschichte der Steiermark am Beispiel Paltental“ - eine Danksagung, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **33**, 7–10.
- Preßlinger, H.; Prochaska, W. & Walach, G., 2004b, Beurteilung der chemischen Analysenergebnisse von bronzezeitlichen Laufsclacken und metallischen Rohprodukten - eine Einteilung nach Talschaften, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **33**, 37–39.
- Preßlinger, H.; Eibner, C. & Preßlinger, B., 2009, Archäologische Belege der bronzezeitlichen Kupfererzverhüttung im Paltental, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **46**, 35–45.
- Preßlinger, H.; Eibner, C. & Harmuth, H., 2011, Naturwissenschaftliche Untersuchungsergebnisse an Gebrauchskeramikproben vom mittelbronzezeitlichen Arbeits- und Siedlungsplatz Schlosser/KG Schwarzenbach/OG Trieben, *BHM: Berg- und Hüttenmänni-*

- sche Monatshefte, Zeitschrift für Rohstoffe, Geotechnik, Metallurgie, Werkstoffe und Maschinenbau*, **156/1**, 28–33.
- Preßlinger, H.; Eibner, C.; Prochaska, W. & Preßlinger, B., 2012, Archäometallurgie Paltental - eine großartige Erfolgsgeschichte, *res montanarum: Fachzeitschrift des Montanhistorischen Vereins Österreich*, **50**, 58–73.
- Preuschen, E., 1951–55a, Gaishorn, BH Liezen, *FÖ: Fundberichte aus Österreich*, **6**, **1951-55**, 51–52.
- Preuschen, E., 1951–55b, Radmer, BH Leoben, *FÖ: Fundberichte aus Österreich*, **6**, **1951-55**, 52.
- Preuschen, E., 1968, Kupfererzlagerstätten in der Steiermark, in: Waidacher, F. (Hrsg.) *Der Bergmann, der Hüttenmann - Gestalter der Steiermark. Katalog der 4. Landesausstellung 1968*, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Graz, 185–188.
- Preuschen, E. & Pittioni, R., 1955, Neue Beiträge zur Topographie des urzeitlichen Bergbaues auf Kupfererz in den österreichischen Alpen., *Archaeologia Austriaca: Beiträge zur Paläanthropologie, Ur- und Frühgeschichte Österreichs*, **18**, 45–79.
- Prochaska, W. & Ebner, F., 1988/89, Geochemische Untersuchungen an Metavulkaniten der Veitscher Decke/Grauwackenzone, *Sitzungsberichte der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Abteilung I*, **197**, 191–205.
- Prochaska, W. & Preßlinger, H., 1989, Kupfererze und prähistorische Laufschlacken - Aufschlußreiche geochemische Untersuchungen, *Da schau her: Die Kulturzeitschrift aus Österreichs Mitte*, **10/4**, 9–14.
- Prochaska, W. & Rantitsch, G., 2004, Die Verteilungsmuster von Schwermetallen im Bereich eines urzeitlichen Kupferschmelzplatzes im Paltental, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **33**, 23–27.
- Prochaska, W.; Maurer, E.-M. & Preßlinger, H., 2002, Die Schwermetallbelastung in der Umgebung eines urzeitlichen Kupferschmelzplatzes im Paltental, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **28**, 14–17.
- Proske, H., 2003, Geologie der Eisenerzer Ramsau, in: Klemm, S. (Hrsg.) *Montanarchäologie in den Eisenerzer Alpen, Steiermark - Archäologische und naturwissenschaftliche*

- Untersuchungen zum prähistorischen Kupferbergbau in der Eisenerzer Ramsau, Mitteilungen der Prähistorischen Kommission der Österreichischen Akademie der Wissenschaften*, **50**, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, 163–164.
- Ratschbacher, L., 1984, Beitrag zur Neugliederung der Veitscher Decke (Grauwackenzone) in ihrem Westabschnitt (Obersteiermark, Österreich), *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, **127/3**, 423–453.
- Ratschbacher, L. & Nievoll, J., 1984, Die Aussagekraft von Schwermineraldaten aus der Veitscher Decke (Steiermark, Österreich), *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, **127/3**, 455–469.
- Redlich, K. A., 1923, Der Erzzug Vordernberg - Johnsachtal: III. Das Johnsachtal, *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien*, **15 (1922)**, 305–312.
- Redlich, K. A. & Sellner, F., 1923, Der Erzzug Vordernberg - Johnsachtal: II. Die Radmer, *Mitteilungen der Geologischen Gesellschaft in Wien*, **15 (1922)**, 267–304.
- Rieser, B. & Schrattenthaler, H., 1998/99, Urgeschichtlicher Kupferbergbau im Raum Schwaz-Brixlegg, Tirol, *Archaeologia Austriaca: Beiträge zur Paläanthropologie, Ur- und Frühgeschichte Österreichs*, **82-83**, 135–179.
- Schaer, A., 2003, Untersuchungen zum prähistorischen Bergbau im Oberhalbstein (Kanton Graubünden), *Jahrbuch der Schweizerischen Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte*, **86**, 7–54.
- Schairer, J. F., 1942, The system $\text{CaO}-\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$: I, Results of quenching experiments on five joins, *Journal of the American Ceramic Society*, **25/10**, 241–274.
- Schlaegel-Blaut, P., 1990, *Der basische Magmatismus der Nördlichen Grauwackenzone, Oberostalpinen Paläozoikum, Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, **43**, Geologische Bundesanstalt, Wien, 149 S.
- Schlegel, H. & Schüller, A., 1952, *Die Schmelz und Kristallisationsgleichgewichte im System Kupfer-Eisen-Schwefel und ihre Bedeutung für die Kupfergewinnung, Freiburger Forschungshefte, Reihe B, Metallgewinnung, Metallurgie, Werkstoffwissenschaft*, **2**, Akademie-Verlag, Berlin, 32 S.
- Schneider, P.; Krismer, M.; Sartory, B.; Goldenberg, G.; Tropper, P. & Vavtar, F., 2009, Experimentelle Untersuchungen zur Stabilität von Fahlerzen bei hohen Temperaturen: Erste Rückschlüsse auf die Röstbedingungen bei der prähistorischen Kupfererzeugung,

- in: Oeggl, K. & Prast, M. (Hrsg.) *Die Geschichte des Bergbaus in Tirol und seinen angrenzenden Gebieten. Proceedings zum 3. Milestone-Meeting des SFB HiMAT vom 23.-26.10.2008 in Silbertal*, Conference Series, university press, Innsbruck, 197–200.
- Schnepf, E.; Scholger, R.; Mauritsch, H. J.; Lanos, P.; Cech, B. & Klemm, S., 2005, Archäomagnetische Datierung in Österreich, in: Cernajsek, T.; Hauser, C. & Vetter, W. (Hrsg.) *Das kulturelle Erbe in den Montan- und Geowissenschaften: Bibliotheken - Archive - Sammlungen, Berichte der Geologischen Bundesanstalt*, **65**, Geologische Bundesanstalt, Wien, Schwaz, 155–156.
- Schönlaub, H. P., 1979, *Das Paläozoikum in Österreich. Verbreitung, Stratigraphie, Korrelation, Entwicklung und Paläogeographie nicht-metamorpher und metamorpher Abfolgen*, *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, **33**, Geologische Bundesanstalt, Wien, 124 S.
- Schönlaub, H. P., 1980, Die Grauwackenzone, in: Oberhauser, R. (Hrsg.) *Der geologische Aufbau Österreichs*, Springer-Verlag, Wien, New York, 265–289.
- Schönlaub, H. P., 1982, Die Grauwackenzone in den Eisenerzer Alpen (Österreich), *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, **124/2**, 361–423.
- Schönlaub, H. P. & Heinisch, H., 1993, The Classic Fossiliferous Palaeozoic Units of the Eastern and Southern Alps, in: von Raumer, J. F. & Neubauer, F. (Hrsg.) *Pre Mesozoic Geology in the Alps*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 395–422.
- Schulz, O., 1974, Metallogene im Paläozoikum der Ostalpen, *GR: Geologische Rundschau*, **63/1**, 93–104.
- Schulz, O., 1986, Die ostalpinen Lagerstätten mineralischer Rohstoffe in der Sicht neuer Forschungsergebnisse, *Archiv für Lagerstättenforschung der Geologischen Bundesanstalt*, **7**, 257–287.
- Simkin, T. & Smith, J. V., 1970, Minor-Element distribution in olivine, *Journal of Geology*, **78/3**, 304–325.
- Sperber, L., 1999, Krisen der spätbronzezeitlichen Metallversorgung im westlichen Mitteleuropa: Von der Bronze zum Eisen, in: Dēmakopulos, K. & Kruse, P. (Hrsg.) *Götter und Helden der Bronzezeit. Europa im Zeitalter des Odysseus, Europarat-Ausstellung*, **25**, Hatje Cantz Verlag, Ostfildern, 48–51.

- Sperl, G., 1979, Zur ehemaligen Kupfergewinnung in der Radmer und im Johnsbachtal, in: Jontes, G. (Hrsg.) *Montangeschichte des Erzberggebietes. Vorträge der Arbeitstagung 17.–19. November 1978 in Vordernberg*, Montanhistorischer Verein für Österreich, Leoben, 135–145.
- Sperl, G., 1988, Metallurgie des urgeschichtlichen Kupferwesens im Alpenraum, *BHM: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Zeitschrift für Rohstoffe, Geotechnik, Metallurgie, Werkstoffe und Maschinenbau*, **133/11**, 495–498.
- Spieß, L.; Teichert, G.; Schwarzer, R.; Behnken, H. & Genzel, C., 2009, *Moderne Röntgenbeugung. Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker*, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2. Aufl., 564 S.
- Stöllner, T.; Breitenlechner, E.; Eibner, C.; Herd, R.; Kienlin, T.; Lutz, J.; Maass, A.; Nicolussi, K.; Pichler, T.; Pils, R.; Röttger, K.; Song, B.; Taube, N.; Thomas, P. & Thurner, A., 2012, Der Mitterberg - Der Großproduzent für Kupfer im östlichen Alpenraum während der Bronzezeit, in: Goldenberg, G.; Töchterle, U.; Oegg, K. & Krenn-Leeb, A. (Hrsg.) *Forschungsprogramm HiMAT - Neues zur Bergbaugeschichte der Ostalpen, Archäologie Österreichs Spezial*, **4**, Österreichische Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte, Wien, 113–144.
- Tafel, V. & Wagenmann, K., 1951, *Gold, Silber, Platinmetalle, Kupfer, Quecksilber, Wismut, Lehrbuch der Metallhüttenkunde*, **1**, S. Hirzel Verlagsbuchhandlung, Leipzig, 2. Aufl., 693 S.
- Thalhammer, O. A. R. & Thalhammer, T. V., 2006, Mineralogische, petrographische und geochemische Bearbeitung von Schlacken, Ofensteinen und Röstbettmaterial vom Kupferschmelzplatz S1, Eisenerzer Ramsau, Leoben, unveröffentlichter Bericht (Archiv S. Klemm).
- Urban, K., 2006, *Datierung prähistorischer Schmelzplätze im Paltental mittels Thermolumineszenz an Schlacken*, Diplomarbeit, Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, Technische Universität Bergakademie Freiberg.
- Vohryzka, K., 1968, Die Erzlagerstätten von Nordtirol und ihr Verhältnis zur alpinen Tektonik, *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, **111/1**, 3–88.
- Wagner, F. E. & Kyek, A., 2004, Mössbauer Spectroscopy in Archaeology: Introduction and Experimental Considerations, *Hyperfine interactions: journal devoted to research in the border regions of solid state, atomic and nuclear physics*, **154**, 5–33.

- Walach, G., 1983, Aufgaben und Ziele der Geophysik im Rahmen der montanarchäologischen Forschung in der Nördlichen Grauwackenzone (Raum Paltental/Gesäuse), *BHM: Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Zeitschrift für Rohstoffe, Geotechnik, Metallurgie, Werkstoffe und Maschinenbau*, **128/4**, 135–137.
- Walach, G., 2004a, Die bronzezeitliche Kupfergewinnung im Palten- und im Liesingtal, Prospektionsbefunde und vergleichende Bewertung, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **33**, 15–22.
- Walach, G., 2004b, Prähistorischer Kupferbergbau in den Eisenerzer Alpen (Steiermark), *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **34**, 60–64.
- Wasserthal, R., 1982, *Mikroskopische und geochemische Untersuchungen an der schichtgebundenen Sulfidmineralisation bei Bärndorf (Steiermark, Österreich)*, Diplomarbeit, Mineralogisch-Petrographisches Institut, Universität Hamburg.
- Weber, L.; Götzinger, M. A.; Göd, R.; Schulz, O.; Ebner, F.; Sachsenhofer, R. F.; Vavtar, F.; Paar, W. H.; Briegleb, D.; Höll, R.; Eichhorn, R.; Seemann, R.; Kirchner, E.; Cerny, I.; Schroll, E.; Raith, J. G.; Prochaska, W.; Tufar, W.; Mali, H.; Günther, W.; Spieler, A.; Melcher, F. & Gräf, W., 1997, Die metallogenetischen Einheiten Österreichs, in: Weber, L. (Hrsg.) *Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs. Erläuterungen zur metallogenetischen Karte von Österreich 1:500.000 unter Einbeziehung der Industriemineralien und Energierohstoffe*, *Archiv für Lagerstättenforschung*, **19**, Geologische Bundesanstalt, Wien, 230–394.
- Wedenig, R.; Eibner, C.; Preßlinger, H. & Hebert, B., 1992, Archäologische Begehungen und Untersuchungen beim Bau der Pyhrn-Autobahn über den Schober-Paß in der Steiermark, *FÖ: Fundberichte aus Österreich*, **30**, **1991**, 201–228.
- Weinek, H., 1992, Funde von Kupferschmelzplätzen und Kupferbergbauen im Raume Eisenerz, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **4**, 63–64.
- Weinek, H., 2009, Prähistorischer Kupferbergbau zwischen Eisenerz und Johnsbach - welche Indizien gibt es dafür?, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **46**, 30–34.
- Weinek, H. & Resch, J., 1998, Funde von montanarchäologischen Bodendenkmälern in und um Eisenerz, *res montanarum: Zeitschrift des Montanhistorischen Vereins für Österreich*, **17**, 37–41.

- Weinek, H. & Resch, J., 2004, Wasser als Führer zu montanarchäologischen Denkmälern, in: Weisgerber, G. & Goldenberg, G. (Hrsg.) *Alpenkupfer - Rame delle Alpi, Der Anschnitt, Beiheft*, **17**, Deutsches Bergbau-Museum, Bochum, 121–124.
- Whitney, D. L. & Evans, B. W., 2010, Abbreviations for names of rock-forming minerals, *American Mineralogist: An international journal of earth and planetary materials*, **95/1**, 185–187.
- Yazawa, A., 1980, Distribution of various elements between copper, matte and slag, *Erzmetall: Rohstoffgewinnung, Verarbeitung, Recycling, Umwelttechnik*, **33/7/8**, 377–382.
- Zerbst, U., 1999, Die Datierung archäologischer Proben mittels Radiokarbon (^{14}C). Teil III. Probleme bei der ^{14}C -Datierung für den Alten Orient, *Studium Integrale Journal*, **6/2**, 51–68.
- Zschocke, K. & Preuschen, E., 1932, *Das urzeitliche Bergbauggebiet von Mühlbach-Bischofshofen, Materialien zur Urgeschichte Österreichs*, **6**, Selbstverlag der Anthropologischen Gesellschaft, Wien, 287 S.
- Zwicker, U., 1991, Natural Copper-Arsenic Alloys and smelted Arsenic Bronzes in early Metal Production, in: Mohen, J.-P. & Éluère, C. (Hrsg.) *Découverte du Métal, Millénaires*, **2**, Picard Éditeur, Paris, 331–340.

Anhang

A. Tabellen

Tab. A.1.: Zusammenstellung der Proben und daran durchgeführte Untersuchungen.

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Probenart	Makroskopie	Mikroskopie	WD-RFA	REM+EDX	XRD	Bleiisotopie	Mößbauer	NAA
MA-092828	FNr. 258	Röstoffbett 1	RB1-1	Blasenschlacke	✓	✓	✓					
MA-092829	FNr. 32	Röstoffbett 1	RB1-1	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-092830	FNr. 981	Röstoffbett 1	RB1-3	Blasenschlacke	✓	✓	✓	✓			✓	
MA-101433	FNr. 957	Röstoffbett 1	RB1-4	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-101434	FNr. 973	Röstoffbett 2	2 Pl. 157	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-092831	FNr. 1219	Röstoffbett 2	21 Pl. 210	Laufschlacke	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
MA-092832	FNr. 1221	Röstoffbett 2	29 Pl. 211	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-092833	FNr. 1335	Röstoffbett 3	42	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-092834	FNr. 1335	Röstoffbett 3	42	Erz	✓	✓		✓		✓		
MA-110606	FNr. 1609	Röstoffbett 3	42	Blasenschlacke	✓	✓		✓				
MA-092835	FNr. 1144	Röstoffbett 3	48	Blasenschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-101431	FNr. 1593	Röstoffbett 4	11 Pl. 136	Blasenschlacke	✓	✓	✓			✓		
MA-092836	FNr. 4162	Röstoffbett 4	16 (=9?) Pl. 291	Blasenschlacke	✓	✓	✓	✓			✓	
MA-101432	FNr. 4162	Röstoffbett 4	16 (=9?) Pl. 291	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-092837	FNr. 506	Röstoffbett 5	1 Pl. 89	Blasenschlacke	✓							
MA-092838	FNr. 641	Röstoffbett 5	2 Pl. 89	Plattenschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-092839	FNr. 683	Röstoffbett 5	8 Pl. 115	Laufschlacke	✓		✓					
MA-092840	FNr. 1645	Röstoffbett 7	44	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-092841	FNr. 4409	Röstoffbett 7	44	Blasenschlacke	✓	✓	✓	✓	✓			
MA-101426	FNr. 1340	Röstoffbett 7	44	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-101427	FNr. 1340	Röstoffbett 7	44	Blasenschlacke	✓		✓			✓		
MA-101428	FNr. 4409	Röstoffbett 7	44	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-101435	FNr. 1429	Röstoffbett 7	44	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-092842	FNr. 1252	Röstoffbett 7	58	Laufschlacke	✓		✓					
MA-092843	FNr. 1200	Röstoffbett 7	58	Schlackentyp A+B	✓	✓	✓	✓			✓	
MA-092844	FNr. 1200	Röstoffbett 7	58	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-101429	FNr. 1252	Röstoffbett 7	58	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-101430	FNr. 1200	Röstoffbett 7	58	Blasenschlacke	✓		✓		✓			
MA-110598	FNr. 4830	Röstoffbett 7	2 Pl. 984	Lehmprobe	✓							✓
MA-092845	FNr. 1795	Röstoffbett 8	15 Pl. 136	Laufschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-113458	FNr. 3075	Röstoffbett 9	1 Pl. 465	Metallfragment	✓	✓	ED-RFA	✓		✓		
MA-092846	FNr. 3046	Röstoffbett 9	1 Pl. 475	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-110597	FNr. 4474	Röstoffbett 9	1 Pl. 749	Lehmprobe	✓							✓
MA-092849	FNr. 3994	Röstoffbett 9	26 Pl. 691	Schlackentyp A+B	✓	✓						
MA-092850	FNr. 3589	Röstoffbett 9	26 Pl. 691	Schlackentyp A+B	✓	✓	✓	✓				
MA-110592	FNr. 3656	Röstoffbett 9	27 Pl. 691	Lehmprobe	✓							✓
MA-110596	FNr. 3946	Röstoffbett 9	27 Pl. 749	Lehmprobe	✓							✓

Tab. A.1.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Probenart	Makroskopie	Mikroskopie	WD-RFA	REM+EDX	XRD	Bleiisotopie	Mößbauer	NAA
MA-110594	FNr. 3819	Röstoffbett 9	27 Pl. 771	Lehmprobe	✓							✓
MA-110595	FNr. 3847	Röstoffbett 9	27 Pl. 771	Lehmprobe	✓							✓
MA-110593	FNr. 3675	Röstoffbett 9	28 Pl. 749	Lehmprobe	✓							✓
MA-110590	FNr. 3235	Röstoffbett 9	34 Pl. 691	Lehmprobe	✓							✓
MA-092851	FNr. 3348	Röstoffbett 9	45 Pl. 691	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-092847	FNr. 2249	Röstoffbett 9	6 Pl. 465	Blasenschlacke	✓	✓						
MA-092848	FNr. 3113	Röstoffbett 9	9 Pl. 465	Laufschlacke	✓							
MA-113465	FNr. 468	Ofen 1	Füllmaterial	Lehmprobe	✓							
MA-101385	FNr. 1102	Ofen 1	Nordwand	verschlackter Ofenstein	✓		✓					
MA-110601	FNr. 4960	Ofen 1	Ofenbrust	Lehmprobe	✓							✓
MA-110602	FNr. 1583	Ofen 1	Ofenversturz	Lehmprobe	✓							✓
MA-101386	FNr. 5283	Ofen 1	Ostwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓						
MA-101387	FNr. 5302	Ofen 1	Ostwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓	✓					
MA-101388	FNr. 5394	Ofen 1	Ostwand	verschlackter Ofenstein	✓		✓					
MA-101389	FNr. 5394	Ofen 1	Ostwand	verschlackter Ofenstein	✓		✓					
MA-101390	FNr. 4941	Ofen 1	Ostwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓						
MA-101382	FNr. 5316	Ofen 1	Westwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓						
MA-101383	FNr. 3921	Ofen 1	Westwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓						
MA-101384	FNr. 4958	Ofen 1	Westwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓		✓				
MA-101397	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	verschlackter Ofenstein	✓		✓					
MA-101398	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓	✓	✓				
MA-101399	FNr. 5476	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓	✓					
MA-101393	FNr. 5509	Ofen 2	Nordwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓	✓				✓	
MA-101394	FNr. 5511	Ofen 2	Nordwand	verschlackter Ofenlehm	✓	✓	✓	✓				
MA-101395	FNr. 5555	Ofen 2	Nordwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓	✓				✓	
MA-113466	FNr. 5484	Ofen 2	Nordwand	Lehmprobe	✓							
MA-101396	FNr. 5451	Ofen 2	Ostwand	Schlackenhaut	✓		✓			✓		
MA-110603	FNr. 5426	Ofen 2	Ostwand	Lehmprobe	✓							✓
MA-110604	FNr. 5429	Ofen 2	Ostwand	Lehmprobe	✓							✓
MA-110605	FNr. 5587	Ofen 2	Ostwand	Lehmprobe	✓							✓
MA-101391	FNr. 5551	Ofen 2	Westwand	verschlackter Ofenstein	✓		✓					
MA-101392	FNr. 5551	Ofen 2	Westwand	verschlackter Ofenstein	✓		✓					
MA-092854	FNr. 1772	Vorplatz Ofen 1/2	12 Pl. 68	Plattenschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-092852	FNr. 1709	Vorplatz Ofen 1/2	4 Pl.68	Blasenschlacke	✓	✓	✓					
MA-092853	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	Schlackentyp A+B	✓	✓	✓	✓		✓		
MA-113464	FNr. 313	Vorplatz Ofen 1/2	SE Ofen 2	Plattenschlacke	✓		✓					
MA-113463	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	Plattenschlacke	✓	✓	✓	✓				

Tab. A.1.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Probenart	Makroskopie	Mikroskopie	WD-RFA	REM+EDX	XRD	Bleiisotopie	Mößbauer	NAA
MA-113468	FNr. 706	Ofen 3	Nordwand, abgebr.	verschlackter Ofenlehm	✓	✓		✓				
MA-113476	FNr. 707/2	Ofen 3	Nordwand	Schlackenhaut	✓		✓					
MA-113469	FNr. 1895	Ofen 3	Ostwand	Schlackenhaut	✓	✓	✓	✓				
MA-113471	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓		✓				
MA-101400	FNr. 4876	Ofen 4	Westwand	verschlackter Ofenlehm	✓	✓	✓					
MA-101401	FNr. 4902	Ofen 4	Westwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓						
MA-101402	FNr. 5064	Ofen 4	Westwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓	✓	✓				
MA-110600	FNr. 4858	Ofen 4	Westwand	Lehmprobe	✓							✓
MA-101418	FNr. 5246	Ofen 5	ältere Phase, Nordwand	Schlackenhaut	✓		✓					
MA-101419	FNr. 5267	Ofen 5	ältere Phase, Nordwand	Schlackenhaut	✓	✓	✓	✓				
MA-101420	FNr. 5262	Ofen 5	ältere Phase, Ostwand	Schlackenhaut	✓		✓					
MA-101417	FNr. 5264	Ofen 5	ältere Phase, Westwand	Schlackenhaut	✓		✓					
MA-101409	FNr. 5182	Ofen 5	Nordwand	verschlackter Ofenlehm	✓	✓	✓					
MA-101410	FNr. 5198	Ofen 5	Nordwand	Schlackenhaut	✓		✓					
MA-101411	FNr. 5191	Ofen 5	Nordwand	Schlackenhaut	✓		✓					
MA-101412	FNr. 5241	Ofen 5	Nordwand, 2. Schicht	verschlackter Ofenstein	✓	✓	✓					
MA-101413	FNr. 5120	Ofen 5	Ostwand	Schlackenhaut	✓	✓	✓					
MA-101414	FNr. 4483	Ofen 5	Ostwand	verschlackter Ofenlehm	✓	✓						
MA-101415	FNr. 4489	Ofen 5	Ostwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓						
MA-101416	FNr. 5150	Ofen 5	Ostwand, 2. Schicht	Schlackenhaut	✓	✓						
MA-101403	FNr. 5127	Ofen 5	Westwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓	✓					
MA-101404	FNr. 5144	Ofen 5	Westwand	verschlackter Ofenstein	✓	✓						
MA-101405	FNr. 5149	Ofen 5	Westwand	verschlackter Ofenstein	✓		✓					
MA-101406	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	Schlackenhaut	✓	✓	✓	✓		✓		
MA-101407	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	Schlackenhaut	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
MA-101408	FNr. 5242	Ofen 5	Westwand, 2. Schicht	verschlackter Ofenstein	✓	✓						
MA-092855	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	Laufschlacke	✓							
MA-092856	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	Blasenschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-092857	FNr. 1901	Vorplatz Ofen 4/5	4 Pl. 358	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-110599	FNr. 4845	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 370	Lehmprobe	✓							✓
MA-092858	FNr. 3647	Vorplatz Ofen 7/8	25 Pl. 760	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-092859	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	Schlackentyp A+B	✓	✓	✓	✓				
MA-110591	FNr. 3633	Ofen 10	49 Pl. 758	Lehmprobe	✓							✓
MA-092861	FNr. 3397	Vorplatz Ofen 9/10	15 Pl. 652	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-101422	FNr. 3397	Vorplatz Ofen 9/10	15 Pl. 652	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-101423	FNr. 3397	Vorplatz Ofen 9/10	15 Pl. 652	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-092860	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	Blasenschlacke	✓	✓	✓	✓				

Tab. A.1.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Probenart	Makroskopie	Mikroskopie	WD-RFA	REM+EDX	XRD	Bleiisotopie	Mößbauer	NAA
MA-101421	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-092862	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	Laufschlacke	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
MA-092863	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	Blasenschlacke	✓		✓			✓	✓	
MA-101424	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-101425	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-113467	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	Plattenschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-113472	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	Laufschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-113473	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	Schlackentyp A+B	✓	✓	✓	✓				
MA-113474	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-113475	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-113470	FNr. 4106	Vorplatz Ofen 11	53	Blasenschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-091446	FNr. 595	Halde 1	5	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-091447	FNr. 595	Halde 1	5	Laufschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-091448	FNr. 694	Halde 1	5	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-091449	FNr. 1228	Halde 1	5	Blasenschlacke	✓	✓						
MA-091450	FNr. 1332	Halde 1	5	Schlackentyp A+B	✓	✓	✓	✓		✓		
MA-091451	FNr. 1332	Halde 1	5	Blasenschlacke	✓							
MA-091452	FNr. 558	Halde 1	6	Plattenschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-091453	FNr. 899	Halde 1	6	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-091454	FNr. 634	Halde 1	6	Blasenschlacke	✓							
MA-091455	FNr. 650	Halde 1	6	Schlackentyp A+B	✓	✓	✓	✓				
MA-091456	FNr. 696	Halde 1	6	Laufschlacke	✓		✓					
MA-091457	FNr. 1152	Halde 1	6	Blasenschlacke	✓	✓						
MA-091458	FNr. 1152	Halde 1	6	Plattenschlacke	✓		✓					
MA-091459	FNr. 695	Halde 1	7	Schlackentyp A+B	✓							
MA-091460	FNr. 1054	Halde 1	7	Blasenschlacke	✓							
MA-091461	FNr. 1029	Halde 1	7	Blasenschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-091462	FNr. 1179	Halde 1	7	Laufschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-091463	FNr. 1179	Halde 1	7	Blasenschlacke	✓							
MA-091464	FNr. 538	Halde 1	7	Schlackentyp A+B	✓							
MA-091465	FNr. 825	Halde 1	7	Schlackentyp A+B	✓							
MA-091466	FNr. 974	Halde 1	7	Schlackentyp A+B	✓							
MA-091499	FNr. 2078	Halde 2	2	Schlackentyp A+B	✓	✓						
MA-091500	FNr. 2078	Halde 2	2	Schlackentyp A+B	✓							
MA-091501	FNr. 2078	Halde 2	2	Blasenschlacke	✓	✓	✓			✓		
MA-092823	FNr. 2615	Halde 2	2	Schlackentyp A+B	✓	✓						
MA-091502	FNr. 2095	Halde 2	3	Schlackentyp A+B	✓		✓					

Tab. A.1.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Probenart	Makroskopie	Mikroskopie	WD-RFA	REM+EDX	XRD	Bleiisotopie	Mößbauer	NAA
MA-091503	FNr. 2095	Halde 2	3	Blasenschlacke	✓	✓						
MA-092816	FNr. 2614	Halde 2	3	Schlackentyp A+B	✓	✓						
MA-092817	FNr. 2614	Halde 2	3	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-092818	FNr. 2856	Halde 2	3	Schlackentyp A+B	✓	✓						
MA-092824	FNr. 2721	Halde 2	4	Blasenschlacke	✓							
MA-091506	FNr. 2295	Halde 2	6	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-091507	FNr. 2320	Halde 2	6	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-092822	FNr. 2867	Halde 2	6	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-091508	FNr. 2265	Halde 2	7	Blasenschlacke	✓	✓						
MA-091509	FNr. 2342	Halde 2	7	Laufschlacke	✓		✓					
MA-092821	FNr. 2976	Halde 2	7	Blasenschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-091510	FNr. 2287	Halde 2	11	Blasenschlacke	✓							
MA-091511	FNr. 2267	Halde 2	17	Schlackentyp A+B	✓	✓	✓	✓				
MA-091512	FNr. 2350	Halde 2	19	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-091513	FNr. 1936	Halde 2	22	Plattenschlacke	✓	✓	✓	✓	✓			
MA-113459	FNr. 2090	Halde 2	5 Pl. 410	Bronzenadelfragmente	✓	✓		✓		✓		
MA-092819	FNr. 2722	Halde 2	21 Pl. 569	Schlackentyp A+B	✓	✓						
MA-092826	FNr. 3178	Halde 2	21 Pl. 569	Blasenschlacke	✓							
MA-092820	FNr. 3310	Halde 2	21a Pl. 569	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-092825	FNr. 3293	Halde 2	21b Pl. 648	Schlackentyp A+B	✓	✓	✓	✓				
MA-091487	FNr. 3666	Halde 3	4	Schlackentyp A+B	✓	✓						
MA-091488	FNr. 3666	Halde 3	4	Blasenschlacke	✓							
MA-091489	FNr. 3225	Halde 3	5	Blasenschlacke	✓	✓	✓					
MA-091490	FNr. 4917	Halde 3	5	Schlackentyp A+B	✓	✓						
MA-091491	FNr. 3659	Halde 3	10	Blasenschlacke	✓							
MA-091492	FNr. 4178	Halde 3	22	Blasenschlacke	✓							
MA-091493	FNr. 5053	Halde 3	22	Schlackentyp A+B	✓	✓	✓	✓				
MA-091494	FNr. 4500	Halde 3	23	Schlackentyp A+B	✓	✓	✓	✓				
MA-091495	FNr. 4529	Halde 3	23	Laufschlacke	✓		✓					
MA-091496	FNr. 4543	Halde 3	24	Blasenschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-091497	FNr. 4252	Halde 3	25	Schlackentyp A+B	✓	✓	✓					
MA-113462	FNr. 4469	Halde 3	25a Pl. 884	Blasenschlacke	✓							
MA-091470	FNr. 3042	Halde 3	2	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-091471	FNr. 3042	Halde 3	2	Plattenschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-091472	FNr. 2994	Halde 3	2	Erz	✓	✓		✓			✓	
MA-091473	FNr. 4558	Halde 3	2	Laufschlacke	✓	✓	✓	✓			✓	
MA-091474	FNr. 4104	Halde 3	2	Schlackentyp A+B	✓		✓					

Tab. A.1.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Probenart	Makroskopie	Mikroskopie	WD-RFA	REM+EDX	XRD	Bleiisotopie	Mößbauer	NAA
MA-091475	FNr. 3066	Halde 3	2a	Blasenschlacke	✓	✓						
MA-091476	FNr. 3078	Halde 3	2b	Schlackentyp A+B	✓							
MA-091477	FNr. 4708	Halde 3	2c	Schlackentyp A+B	✓	✓						
MA-091478	FNr. 3037	Halde 3	9	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-091479	FNr. 4433	Halde 3	9	Laufschlacke	✓	✓	✓	✓				
MA-091486	FNr. 3190	Halde 3	13	Schlackentyp A+B	✓							
MA-091481	FNr. 4145	Halde 3	17	Schlackentyp A+B	✓	✓						
MA-091482	FNr. 4780	Halde 3	17	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-091483	FNr. 3625	Halde 3	18	Schlackentyp A+B	✓							
MA-091484	FNr. 4153	Halde 3	18	Blasenschlacke	✓		✓					
MA-091485	FNr. 4153	Halde 3	18	Laufschlacke	✓	✓	✓					
MA-091480	FNr. 3646	Halde 3	11a	Laufschlacke	✓							
MA-113461	FNr. 3423	Halde 3	2 Pl. 678	Metallfragment	✓	✓	ED-RFA	✓		✓		
MA-092827	FNr. 3873	Spitzgraben	14 Pl. 692	Schlackentyp A+B	✓	✓						
MA-091440	FNr. 518	Allgemein	1, Halde 1	Schlackentyp A+B	✓		✓					
MA-091441	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	Plattenschlacke	✓	✓		✓				
MA-091442	FNr. 1069	Allgemein	1, Halde 1	Blasenschlacke	✓	✓						
MA-091498	FNr. 2272	Allgemein	1, Halde 2	Schlackentyp A+B	✓							
MA-091467	FNr. 2968	Allgemein	1, Halde 3	Erz	✓	✓		✓		✓		
MA-091468	FNr. 2968	Allgemein	1, Halde 3	Blasenschlacke	✓							
MA-091469	FNr. 3029	Allgemein	1, Halde 3	Blasenschlacke	✓	✓						
MA-091443	FNr. 699	Allgemein	2, Halde 1	verschlackter Ofenlehm	✓	✓						
MA-091444	FNr. 699	Allgemein	2, Halde 1	Schlackentyp A+B	✓	✓	✓					
MA-091445	FNr. 1153	Allgemein	2, Halde 1	Laufschlacke	✓		✓					
MA-091504	FNr. 2118	Allgemein	4, Halde 2	Schlackentyp A+B	✓	✓						
MA-091505	FNr. 2118	Allgemein	4, Halde 2	Schlackentyp A+B	✓							
MA-113460		Kupfergraben		Erz	✓							

Tab. A.2.: Ergebnisse der makroskopischen Ansprache und der Untersuchungen im Lichtmikroskop.

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-092828	FNr. 258	Röstbett 1	RB1-1	91	71	56	219,1	✓	heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, messingfarbener Sulfideinschluss (\varnothing 3 mm), schwärzlichrötlichbraun verwittert	Cpx, Fa, Mag, Cu, Cs
MA-092829	FNr. 32	Röstbett 1	RB1-1	62	45	44	219,8	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 1 mm), messingfarbener Sulfideinschluss (\varnothing 1 mm), rostbraun verwittert	
MA-092830	FNr. 981	Röstbett 1	RB1-3	46	38	35	89,0	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 1 mm), dunkelgraubraun verwittert	Fa, Gls, Cs
MA-101433	FNr. 957	Röstbett 1	RB1-4	54	41	41	102,5	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, grau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke, rötlich verwittert	
MA-101434	FNr. 973	Röstbett 2	2 Pl. 157	33	32	22	24,8	✓	heterogen, schwärzlichgrau, Quarzbruchstücke (< 3 mm), messingfarbener Sulfideinschluss (\varnothing 4 mm), rötlich verwittert	
MA-092831	FNr. 1219	Röstbett 2	21 Pl. 210	57	41	28	99,2	✓	homogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 5 mm), dunkelsiena verwittert	Cpx, Fa, Gls, Mag, Qtz
MA-092832	FNr. 1221	Röstbett 2	29 Pl. 211	76	72	37	272,7	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 1 mm), rötlich verwittert	
MA-092833	FNr. 1335	Röstbett 3	42	69	45	49	261,2	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 5 mm), rötlich verwittert	
MA-092834	FNr. 1335	Röstbett 3	42	49	39	28	104,1	×	Pyrit, Hämatit, Quarz	Mag, Hem, Brt, Qtz
MA-110606	FNr. 1609	Röstbett 3	42	44	36	17	29,9	✓	heterogen, dunkelgrau, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 3 mm), bläulichgrauer Sulfideinschluss (\varnothing 3 mm), rostbraun verwittert	Fa, Gls, Mag, Del, Mlc
MA-092835	FNr. 1144	Röstbett 3	48	65	62	32	95,6	✓	heterogen, dunkelgrau, rostbraun verwittert	Cpx, Fa, Mag, Cs
MA-101431	FNr. 1593	Röstbett 4	11 Pl. 136	24	25	23	13,2	✓	heterogen, schwärzlichsiena verwittert, Quarzbruchstücke (< 1 mm)	Fa, Matrix zer- setzt

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-092836	FNr. 4162	Röstbett 4	16 (=9?) Pl. 291	43	33	24	39,7	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 1 mm), bläulich-grauer Sulfideinschluss (ø 3 mm), rötlich verwittert	Fa, Cpx, Qtz, Ccp, Cs, Mag
MA-101432	FNr. 4162	Röstbett 4	16 (=9?) Pl. 291	35	28	24	25,4	✓	heterogen, olivschwarz, Quarzbruchstücke (< 10 mm), rotschwarz verwittert	
MA-092837	FNr. 506	Röstbett 5	1 Pl. 89	51	45	33	70,2	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 4 mm), bläulich-graue Sulfideinschlüsse (ø 3 mm), rötlich verwittert	
MA-092838	FNr. 641	Röstbett 5	2 Pl. 89	55	50	10	34,0	✓	homogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, dunkelbraun verwittert	Fa, Gls, Qtz, Mag
MA-092839	FNr. 683	Röstbett 5	8 Pl. 115	81	55	27	179,0	✓	homogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 1 mm), hellbraun verwittert	
MA-092840	FNr. 1645	Röstbett 7	44	66	47	47	226,5	✓	homogen, unterer Teil stark porig, dunkelgrau, rostbraun verwittert	
MA-092841	FNr. 4409	Röstbett 7	44	77	65	30	182,4	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 1 mm), schwärzlichbraunoliv verwittert	Fa, Gls, Mag, Cs, Qtz
MA-101426	FNr. 1340	Röstbett 7	44	38	38	29	47,7	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 3 mm), graubraun verwittert	
MA-101427	FNr. 1340	Röstbett 7	44	40	37	36	37,1	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 3 mm), dunkelgelbocker verwittert	
MA-101428	FNr. 4409	Röstbett 7	44	62	51	31	132,5	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 5 mm), schwärzlichbraun verwittert	
MA-101435	FNr. 1429	Röstbett 7	44	59	56	33	124,4	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 1 mm), schwärzlicholivbraun verwittert	
MA-092842	FNr. 1252	Röstbett 7	58	118	74	19	348,2	✓	homogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 2 mm), olivbraun verwittert	
MA-092843	FNr. 1200	Röstbett 7	58	66	53	33	189,9	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 2 mm), schwärzlich-chorangebraun verwittert	Fa, Cpx, Cs, Mag, Qtz

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-092844	FNr. 1200	Röstbett 7	58	51	36	24	49,4	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 1 mm), ockerbraun verwittert	
MA-101429	FNr. 1252	Röstbett 7	58	57	47	29	92,8	✓	heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, dunkelbraun verwittert	
MA-101430	FNr. 1200	Röstbett 7	58	-	-	-	13,4	✓	heterogen, schwärzlichbraunocker verwittert, Fragmente	
MA-110598	FNr. 4830	Röstbett 7	2 Pl. 984	34	21	23	16,4	×	feiner gebrannter Lehm, schwärzlichrotorange, Gesteinsbruchstücke (< 1 mm)	
MA-092845	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	72	69	28	226,4	✓	homogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, rostbraun verwittert	Fa, Cpx, Mag, Cu, Cs
MA-113458	FNr. 3075	Röstbett 9	1 Pl. 465	47	23	7	25,6	✓	an der Oberfläche hellgrün verwittertes Metallstück	Cu, Bn, Cv
MA-092846	FNr. 3046	Röstbett 9	1 Pl. 475	61	47	39	132,4	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm), rostbraun verwittert	
MA-110597	FNr. 4474	Röstbett 9	1 Pl. 749	63	47	31	65,7	×	feiner gebrannter Lehm, schwärzlichrotorange, Gesteinsbruchstücke (< 1 mm)	
MA-092849	FNr. 3994	Röstbett 9	26 Pl. 691	50	38	32	66,2	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 1 mm), rostbraun verwittert	Fa, Cpx, Mag, Cs, Qtz
MA-092850	FNr. 3589	Röstbett 9	26 Pl. 691	108	81	60	741,1	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 4 mm), dunkelrötlichbraun verwittert	Fa, Cpx, Mag, Cu, Cs, Mlc
MA-110592	FNr. 3656	Röstbett 9	27 Pl. 691	33	23	22	13	×	feiner Lehm, hellgraugelb, teilweise gebrannt	
MA-110596	FNr. 3946	Röstbett 9	27 Pl. 749	-	-	-	15,8	×	feiner Lehm, orangeweiß, wenige Gesteinsbruchstücke (< 3 mm), teilweise gebrannt	
MA-110594	FNr. 3819	Röstbett 9	27 Pl. 771	34	24	24	9,2	×	feiner Lehm, orangeweiß, wenige Gesteinsbruchstücke (< 3 mm), teilweise gebrannt	
MA-110595	FNr. 3847	Röstbett 9	27 Pl. 771	-	-	-	22,6	×	feiner Lehm, orangeweiß, wenige Gesteinsbruchstücke (< 3 mm), teilweise gebrannt	
MA-110593	FNr. 3675	Röstbett 9	28 Pl. 749	-	-	-	10,6	✓	feiner gebrannter Lehm, schwärzlichrotorange	

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-110590	FNr. 3235	Röstbett 9	34 Pl. 691	60	26	22	26,4	×	feiner Lehm, hellgraugelb bis orangeweiß, teilweise gebrannt	
MA-092851	FNr. 3348	Röstbett 9	45 Pl. 691	68	67	37	130,5	✓	heterogen, dunkelgrau, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 1 mm), messingfarbener Sulfideinschluss (ø 3 mm), dunkelrötlichbraun verwittert	
MA-092847	FNr. 2249	Röstbett 9	6 Pl. 465	94	61	37	202,4	✓	heterogen, dunkelgrau, wulstige Verdickungen, Quarzbruchstücke (< 1 mm), ockerbraun verwittert	Fa, Cpx, Qtz, Mag
MA-092848	FNr. 3113	Röstbett 9	9 Pl. 465	44	31	30	82,7	✓	homogen, schwärzlich-siena, Fließstrukturen, dunkelrötlichbraun verwittert	
MA-113465	FNr. 468	Ofen 1	Füllmaterial	35	25	9	5,9	✓	teilweise gebrannter Lehm, orangebraun, sekundäre Kupferminerale	
MA-101385	FNr. 1102	Ofen 1	Nordwand	70	36	19	50,1	✓	feinkörniger Sandstein, dunkelviolettblau, quarzreich, einseitig verschlackt (1 mm)	
MA-110601	FNr. 4960	Ofen 1	Ofenbrust	54	35	46	31,1	×	feiner Lehm, gelb- bis rotgrau, Gesteinsbruchstücke (< 2 mm), Holzkohle, Knochenfragmente (< 2 mm)	
MA-110602	FNr. 1583	Ofen 1	Ofenversturz	74	65	23	109,4	×	feiner Lehm, hellbraungrau, teilweise gebrannt, Gesteinsbruchstücke (< 1 mm)	
MA-101386	FNr. 5283	Ofen 1	Ostwand	42	46	37	75,9	×	feinkörniger, homogener Sandstein, blaugrau, quarzreich, einseitig verschlackt (1 mm)	Qtz - Gls, Mag
MA-101387	FNr. 5302	Ofen 1	Ostwand	34	43	42	38,1	✓	feinkörniger, homogener Sandstein, dunkelviolettblau, quarzreich, einseitig verschlackt (5-10 mm)	Qtz, Fsp - Gls, Mag
MA-101388	FNr. 5394	Ofen 1	Ostwand	37	42	24	30,0	✓	feinkörniger Sandstein, hellolivbraun, einseitig verschlackt (4 mm), sekundäre Kupferminerale	
MA-101389	FNr. 5394	Ofen 1	Ostwand	25	30	23	9,5	✓	feinkörniger, homogener Sandstein, dunkelgrau, einseitig verschlackt (5-10 mm), sekundäre Kupferminerale	
MA-101390	FNr. 4941	Ofen 1	Ostwand	21	25	34	19,3	✓	feinkörniger, homogener Sandstein, dunkelviolettblau, quarzreich, einseitig verschlackt (2 mm)	Qtz, Fsp, Cal? - Gls, Fa, Mag, Ccp
MA-101382	FNr. 5316	Ofen 1	Westwand	47	64	31	95,7	✓	feinkörniger, homogener Sandstein, blaugrau, quarzreich, einseitig verschlackt (12 mm), sekundäre Kupferminerale	Qtz, Fsp - Gls, Ccp, Cv, Mlc

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-101383	FNr. 3921	Ofen 1	Westwand	17	34	56	30,6	✓	feinkörniger, homogener Sandstein, dunkelviolettblau, quarzreich, einseitig verschlackt (1 mm)	Qtz, Fsp, Ms - Gls, Mag
MA-101384	FNr. 4958	Ofen 1	Westwand	38	45	33	62,3	✓	feinkörniger, homogener Sandstein, blaugrau, quarzreich, einseitig verschlackt (2 mm)	Qtz, Fsp - Gls, Mag
MA-101397	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	61	54	29	59,2	✓	feinkörniger, homogener Sandstein, hellbraun, Quarzbruchstücke (< 3 mm), einseitig verschlackt (7 mm)	
MA-101398	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	56	34	34	42,2	✓	feinkörniger, homogener Sandstein, hellbraun, einseitig verschlackt (16 mm), sekundäre Kupferminerale	Qtz, Fsp - Gls, Mag, Cu, Mlc
MA-101399	FNr. 5476	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	53	35	38	51,5	✓	feinkörniger, homogener Sandstein, dunkelviolettblau, einseitig verschlackt (4 mm), sekundäre Kupferminerale	Qtz, Fsp, Ms - Gls, Mag, Cu, Cs
MA-101393	FNr. 5509	Ofen 2	Nordwand	64	78	38	167,8	✓	feinkörniger, homogener Sandstein, hellbraun, quarzreich, einseitig verschlackt (8 mm)	Qtz, Fsp, Cal? - Gls, Qtz, Mag, Hem, Mfr
MA-101394	FNr. 5511	Ofen 2	Nordwand	69	68	49	182,9	✓	heterogen, hellrötlichbraun, einseitig verschlackt (10 mm)	Qtz, Ton - Gls, Mag
MA-101395	FNr. 5555	Ofen 2	Nordwand	76	79	23	143,7	✓	Quarzporphyr, hellolivbraun, einseitig verschlackt (1 mm)	Qtz, Fsp, Gls, Fa, Mag, Wus, Cu, Cpr, Mlc
MA-113466	FNr. 5484	Ofen 2	Nordwand	-	-	-	6,7	×	feiner Lehm, hellbraun, sekundäre Kupferminerale, Holzkohlestücke	
MA-101396	FNr. 5451	Ofen 2	Ostwand	25	28	14	14,1	✓	heterogen, sekundäre Kupferminerale, teilweise rostbraun verwittert	
MA-110603	FNr. 5426	Ofen 2	Ostwand	58	26	30	34,7	×	feiner Lehm, hellbraungrau, teilweise gebrannt, Gesteinsbruchstücke (< 1 mm)	
MA-110604	FNr. 5429	Ofen 2	Ostwand	66	56	14	54,8	×	feiner gebrannter Lehm, hellrötlichorange, Gesteinsbruchstücke (< 2 mm)	
MA-110605	FNr. 5587	Ofen 2	Ostwand	71	50	30	91,5	×	feiner gebrannter Lehm, hellrötlichorange, Gesteinsbruchstücke (< 2 mm)	
MA-101391	FNr. 5551	Ofen 2	Westwand	53	59	27	59,2	✓	feinkörniger, homogener Sandstein, dunkelviolettblau, einseitig verschlackt (10 mm)	
MA-101392	FNr. 5551	Ofen 2	Westwand	41	50	28	45,5	✓	feinkörniger Sandstein, hellolivbraun, einseitig verschlackt (1 mm)	

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-092854	FNr. 1772	Vorplatz Ofen 1/2	12 Pl. 68	40	34	6	14,8	✓	homogen, Fließstrukturen, rostbraun verwittert	Fa, Gls, Mag, Cu
MA-092852	FNr. 1709	Vorplatz Ofen 1/2	4 Pl.68	59	45	21	64,6	✓	heterogen, olivschwarz, im Handstück rotschwarz, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 2 mm)	Fa, Gls, Mag, Hem, Mlc
MA-092853	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	104	70	49	387,5	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 1 mm), dunkelorangebraun verwittert	Fa, Cpx, Cs, Mag, Qtz
MA-113464	FNr. 313	Vorplatz Ofen 1/2	SE Ofen 2	38	24	6	11,5	✓	homogen, dunkelgrau, im Handstück rotschwarz, Fließstrukturen	
MA-113463	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	41	20	7	14,9	✓	homogen, dunkelgrau, im Handstück rotschwarz, Fließstrukturen	Fa, Gls, Mag, Cs
MA-113468	FNr. 706	Ofen 3	Nordwand, abgebr.	68	48	54	154,1	✓	heterogen, hellbraunorange, Quarzstücke (< 2 mm), einseitig mehrfach verschlackt (27 mm)	Qtz, Ton - Gls, Mag, Cu - Ton - Gls
MA-113476	FNr. 707/2	Ofen 3	Nordwand	102	77	18	102	✓	heterogen, dunkelgrau, im Handstück olivschwarz, anhaftende Lehmstücke	
MA-113469	FNr. 1895	Ofen 3	Ostwand	64	60	14	57,8	✓	heterogen, schwarz, im Handstück rotschwarz, anhaftende Lehmstücke	Gls, Qtz, Ton, Mag, Cu
MA-113471	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	78	74	65	279,5	✓	feinkörniger, homogener Sandstein, dunkelviolettblau, einseitig mehrfach verschlackt (30 mm), sekundäre Kupferminerale	Qtz, Fsp - Gls, Cpx, Mag, Cu - Ton - Gls, Cpx, Mag
MA-101400	FNr. 4876	Ofen 4	Westwand	73	65	43	126,7	✓	heterogen, Stücke von dunkelviolettblauen Sandstein, Quarzbruchstücke (2 mm), einseitig verschlackt (6 mm)	Ton, Qtz - Gls, Mag
MA-101401	FNr. 4902	Ofen 4	Westwand	38	33	19	18,2	✓	feinkörniger Quarzit, grauweiß, einseitig verschlackt (2 mm)	Qtz, Cal? - Gls, Mag
MA-101402	FNr. 5064	Ofen 4	Westwand	30	23	14	6,9	✓	feinkörniger Sandstein, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 3 mm), einseitig verschlackt (1 mm)	Qtz, Fs, Ms - Fa, Gls, Ccp, Cv, Bn, Mlc, Mag
MA-110600	FNr. 4858	Ofen 4	Westwand	52	52	53	75,7	×	feiner gebrannter Lehm, hellrötlichorange	
MA-101418	FNr. 5246	Ofen 5	ältere Phase, Nordwand	45	30	14	17,9	✓	heterogen, schwarz, im Handstück rotschwarz, sekundäre Kupferminerale	

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-101419	FNr. 5267	Ofen 5	ältere Phase, Nordwand	58	32	20	28,7	✓	heterogen, schwarz, im Handstück schwärzlicholivbraun, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 2 mm)	Gls, Mag, Wus, Cu, Del
MA-101420	FNr. 5262	Ofen 5	ältere Phase, Ostwand	26	25	13	7,4	✓	heterogen, schwärzlichgrau, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 5 mm)	
MA-101417	FNr. 5264	Ofen 5	ältere Phase, Westwand	35	27	12	8,5	✓	heterogen, schwarz, im Handstück rotschwarz, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 2 mm)	
MA-101409	FNr. 5182	Ofen 5	Nordwand	81	60	32	137,8	✓	heterogen, hellbraunorange, Quarzstücke (< 2 mm), einseitig verschlackt (15 mm)	Qtz, Ms, Ton - Gls, Mag, Cu, Cs
MA-101410	FNr. 5198	Ofen 5	Nordwand	46	45	28	71,2	✓	heterogen, braunschwarz, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 1 mm)	
MA-101411	FNr. 5191	Ofen 5	Nordwand	39	32	26	40,7	✓	heterogen, dunkelgrau, im Handstück rotschwarz, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 1 mm)	
MA-101412	FNr. 5241	Ofen 5	Nordwand, 2. Schicht	32	26	31	20,2	✓	feinkörniger Sandstein, blaugrau, einseitig verschlackt (6-10 mm), sekundäre Kupferminerale	Qtz, Fsp, Ms - Gls, Mag, Cu, Mlc
MA-101413	FNr. 5120	Ofen 5	Ostwand	73	39	21	37,4	✓	heterogen, dunkelgrau, im Handstück rotschwarz, sekundäre Kupferminerale, Gesteinsbruchstücke (< 5 mm)	Gls, Mag, Cu, Mlc
MA-101414	FNr. 4483	Ofen 5	Ostwand	38	29	32	27,7	✓	heterogen, hellbraunorange, Quarzstücke (< 2 mm), einseitig verschlackt (8 mm)	Qtz, Ms, Ton - Gls, Mag
MA-101415	FNr. 4489	Ofen 5	Ostwand	55	42	34	45,1	✓	feinkörniger, homogener Sandstein, blau- bis violettgrau, einseitig verschlackt (5 mm), sekundäre Kupferminerale	Qtz, Fs - Gls, Mag
MA-101416	FNr. 5150	Ofen 5	Ostwand, 2. Schicht	38	34	7	10,9	✓	heterogen, schwarz, im Handstück rotschwarz	Gls, Mag, Qtz
MA-101403	FNr. 5127	Ofen 5	Westwand	40	39	27	26,7	✓	feinkörniger Sandstein, blaugrau, einseitig verschlackt (7 mm)	Qtz, Ms, Fsp - Gls, Mag, Mfr, Cu, Mlc, Del
MA-101404	FNr. 5144	Ofen 5	Westwand	47	16	19	10,8	✓	feinkörniger, homogener Sandstein, dunkelviolettblau, quarzreich, einseitig verschlackt (5 mm)	Qtz, Fsp, Ms - Gls, Mag, Cu

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-101405	FNr. 5149	Ofen 5	Westwand	37	26	18	16,9	✓	feinkörniger Sandstein, dunkelviolettgrau, quarzreich, einseitig verschlackt (5 mm), sekundäre Kupferminerale	
MA-101406	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	59	36	14	52,5	✓	heterogen, braunschwarz, im Handstück rotschwarz, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 2 mm)	Gls, Mag, Wus, Qtz, Cu, Cpr, Mlc
MA-101407	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	71	54	31	95,3	✓	heterogen, braunschwarz, im Handstück rotschwarz, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 2 mm)	Gls, Mag, Wus, Cu, Cpr, Del, Mlc
MA-101408	FNr. 5242	Ofen 5	Westwand, 2. Schicht	40	28	28	24,5	✓	feinkörniger Sandstein, blaugrau, einseitig verschlackt (5 mm), sekundäre Kupferminerale	Qtz, Fs, Ms - Gls, Mag, Cu
MA-092855	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	102	65	12	180,3	✓	homogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 2 mm), dunkelolivbraun verwittert	
MA-092856	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	62	49	40	153,4	✓	heterogen, dunkelgrau, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 2 mm), messingfarbener Sulfideinschluss, graubraun verwittert	Fa, Cpx, Cs, Qtz, Py
MA-092857	FNr. 1901	Vorplatz Ofen 4/5	4 Pl. 358	82	66	47	307,3	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen Quarzbruchstücke (< 3 mm), rostbraun verwittert	
MA-110599	FNr. 4845	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 320	46	24	12	9,2	×	feiner Lehm, hellbraungrau, teilweise gebrannt, Gesteinsbruchstücke (< 1 mm)	
MA-092858	FNr. 3647	Vorplatz Ofen 7/8	25 Pl. 760	57	42	60	201,0	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm), schwärzlich-siena verwittert	
MA-092859	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	48	39	46	118,6	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm), schwärzlichockerbraun verwittert	Fa, Cpx, Mag, Mfr, Cs
MA-110591	FNr. 3633	Ofen 10	49 Pl. 758	56	49	18	41,3	✓	feiner Lehm, grüngrau, Gesteinsbruchstücke (< 2 mm)	
MA-092861	FNr. 3397	Vorplatz Ofen 9/10	15 Pl. 652	35	32	24	46,3	✓	heterogen, rotschwarz, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 1 mm), schwärzlichgraubraun verwittert	

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-101422	FNr. 3397	Vorplatz Ofen 9/10	15 Pl. 652	34	31	20	21,4	✓	heterogen, dunkelgrau, im Handstück rotschwarz, Quarzbruchstücke (< 1 mm), teilweise rostbraun verwittert	
MA-101423	FNr. 3397	Vorplatz Ofen 9/10	15 Pl. 652	35	28	21	20,4	✓	heterogen, dunkelgrau, rostbraun verwittert	
MA-092860	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	34	28	49	46,5	✓	heterogen, dunkelgrau, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 3 mm), bläulichgrauer Sulfideinschluss (\varnothing 2 mm), rostbraun verwittert	Fa, Cpx, Ccp, Cv, Qtz, Mlc, Cpr
MA-101421	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	61	51	24	58,9	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 5 mm), dunkelbraunocker verwittert	
MA-092862	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	72	54	21	151,5	✓	homogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 1 mm), teilweise rostbraun verwittert	Fa, Cpx, Gls, Qtz, Ccp, Cv, Mag, Py
MA-092863	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	73	70	48	269,5	✓	heterogen, grau, Quarzbruchstücke (< 3 mm), rostbraun verwittert	
MA-101424	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	62	43	37	95,6	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 10 mm), rostbraun verwittert	
MA-101425	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	54	51	39	94,3	✓	heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 5 mm), rostbraun verwittert	
MA-113467	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	53	40	8	27,5	✓	homogen, dunkelgrau, im Handstück rotschwarz, Fließstrukturen, teilweise rostbraun verwittert	Fa, Cpx, Gls, Mag, Cs
MA-113472	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	45	28	23	36,9	✓	homogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, schwärzlichgraubraun verwittert	Fa, Cpx, Gls, Qtz, Mag, Cu
MA-113473	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	65	41	28	118,2	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm), schwärzlichgraubraun verwittert	Fa, Cpx, Mag, Cs
MA-113474	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	42	37	20	31,3	✓	heterogen, olivgrau, wulstartige verdickungen, Quarzbruchstücke (< 2 mm), rotschwarz verwittert	
MA-113475	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	48	29	27	43,8	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 3 mm), teilweise rostbraun verwittert	
MA-113470	FNr. 4106	Vorplatz Ofen 11	53	34	23	18	15,4	✓	heterogen, dunkelgrau, rostbraun verwittert	Fa, Cpx, Gls, Mag, Cs, Qtz

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-091446	FNr. 595	Halde 1	5	79	59	31	179,1	✓	heterogen, schwärzlichgrau, sekundäre Kupferminerale, bläulichgrauer Sulfideinschluss (\varnothing 3 mm), rostbraun verwittert	
MA-091447	FNr. 595	Halde 1	5	57	34	12	49,9	✓	homogen, olivschwarz bis schwarz, Fließstrukturen	Fa, Gls, Mag, Cs, Ccp, Cv
MA-091448	FNr. 694	Halde 1	5	68	57	32	101,4	✓	heterogen, dunkel- bis grüngrau, Quarzbruchstücke (< 5 mm), bläulichgraue Sulfideinschlüsse (\varnothing 3 mm), Holzkohleabdrücke, teilweise rostbraun verwittert	
MA-091449	FNr. 1228	Halde 1	5	56	39	28	47,9	✓	heterogen, dunkelgrau, Handstück graubraun, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm)	Fa, Cpx, Qtz, Mag, Cu, Cv, Cs, Mlc
MA-091450	FNr. 1332	Halde 1	5	63	50	46	214,2	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, schwärzlichgraubraun, Quarzbruchstücke (< 2 mm), dunkelbraun verwittert	Fa, Gls, Mag, Mfr, Cs, Cv
MA-091451	FNr. 1332	Halde 1	5	54	47	8	28,8	✓	heterogen, braun- bis rotschwarz, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 1 mm)	
MA-091452	FNr. 558	Halde 1	6	45	16	7	20,1	✓	homogen, schwarz, im Handstück rotschwarz, Fließstrukturen	Fa, Gls, Cpx, Mag, Ccp
MA-091453	FNr. 899	Halde 1	6	1780	95	47	659,6	✓	heterogen, schwarzgrau, Fließstrukturen, sekundäre Kupferminerale in einigen Poren, Quarzbruchstücke (< 3 mm), braunschwarz bis graubraun verwittert	
MA-091454	FNr. 634	Halde 1	6	74	52	17	48,6	✓	heterogen, schwarzgrau, Quarzbruchstücke (< 3 mm)	
MA-091455	FNr. 650	Halde 1	6	31	23	48	79,0	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Handstück graubraun, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 4 mm)	Fa, Cpx, Mag, Qtz, Cs
MA-091456	FNr. 696	Halde 1	6	75	45	23	168,9	✓	homogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, dunkelbraun verwittert	
MA-091457	FNr. 1152	Halde 1	6	41	37	25	54,8	✓	heterogen, schwärzlichgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 2 mm), rostbraun verwittert	Fa, Gls, Qtz, Py, Cs, Cu, Cv
MA-091458	FNr. 1152	Halde 1	6	49	33	8	20,4	✓	homogen, braunschwarz, im Handstück rotschwarz, Fließstrukturen	
MA-091459	FNr. 695	Halde 1	7	98	68	35	203,9	✓	homogen, unterer Teil stark porig, dunkelgrau, Fließstrukturen, graubraun verwittert	

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-091460	FNr. 1054	Halde 1	7	59	47	28	78,5	✓	heterogen, schwärzlichgrau, im Handstück grünlichgrau, Fließstrukturen	
MA-091461	FNr. 1029	Halde 1	7	40	29	33	39,1	✓	heterogen, dunkelgrau, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 3 mm), rotschwarz verwittert	Fa, Cpx, Gls, Qtz, Mag, Ccp, Cs, Cu, Mlc
MA-091462	FNr. 1179	Halde 1	7	64	45	32	110,4	✓	homogen, braunschwarz, dunkelbraun verwittert	Cpx, Fa, Gls, Mag, Cs, Cu, Mlc
MA-091463	FNr. 1179	Halde 1	7	47	38	28	38,7	✓	heterogen, dunkelgrau, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 1 mm), dunkel- bis rostbraun verwittert	
MA-091464	FNr. 538	Halde 1	7	73	61	49	246,9	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, schwärzlichgrau, sekundäre Kupferminerale, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm), dunkelolivbraun verwittert	
MA-091465	FNr. 825	Halde 1	7	62	58	39	172,1	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm) im heterogenen Teil, dunkel- bis rostbraun verwittert	
MA-091466	FNr. 974	Halde 1	7	71	58	32	170,2	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm)	
MA-091499	FNr. 2078	Halde 2	2	72	32	34	89,7	✓	heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 2 mm), bläulichgrauer Sulfideinschluss (ø 3 mm)	Fa, Gls, Cs, Cv - Fa, Cpx, Mag, Cs, Mlc
MA-091500	FNr. 2078	Halde 2	2	88	63	38	277,2	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 5 mm) im heterogenen Teil, teilweise rostbraun verwittert	
MA-091501	FNr. 2078	Halde 2	2	48	44	43	72,1	✓	heterogen, braunschwarz, wulstartige Verdickungen, Quarzbruchstücke (< 3 mm), teilweise rostbraun verwittert	Fa, Cpx, Mag, Cs, Cu
MA-092823	FNr. 2615	Halde 2	2	72	69	42	243,5	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 2 mm) im heterogenen Teil, rostbraun verwittert	Fa, Cpx, Gls, Qtz, Ccp, Cs, Cu

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-091502	FNr. 2095	Halde 2	3	56	38	57	158,0	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm) im heterogenen Teil, rostbraun verwittert	
MA-091503	FNr. 2095	Halde 2	3	53	42	32	69,4	✓	heterogen, dunkelgrau, im Handstück braunschwarz, Quarzbruchstücke (< 1 mm)	Fa, Gls, Mag, Qtz, Ccp, Bn, Cu, Cs
MA-092816	FNr. 2614	Halde 2	3	58	35	33	95,4	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 2 mm), bläulichgrauer Sulfideinschluss (ø 3 mm), graubraun verwittert	Fa, Gls, Mag, - Fa, Cpx, Mag, Cs, Mlc
MA-092817	FNr. 2614	Halde 2	3	58	52	31	102,6	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 3 mm), dunkelockerbraun verwittert	
MA-092818	FNr. 2856	Halde 2	3	73	49	31	128,7	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, im Handstück rotschwarz, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 5 mm)	Cpx, Fa, Mag, Cu, Qtz, Ccp
MA-092824	FNr. 2721	Halde 2	4	48	29	31	65,0	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 2 mm), schwärzlichbraun verwittert	
MA-091506	FNr. 2295	Halde 2	6	46	45	43	90,8	✓	heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 3 mm), bläulichgrauer Sulfideinschluss (ø 3 mm), graubraun verwittert	
MA-091507	FNr. 2320	Halde 2	6	57	44	53	119,8	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm), graubraun verwittert	
MA-092822	FNr. 2867	Halde 2	6	95	77	38	197,6	✓	heterogen, grau, Quarzbruchstücke (< 3 mm), rostbraun verwittert	
MA-091508	FNr. 2265	Halde 2	7	52	35	37	67,3	✓	heterogen, grau, Quarzbruchstücke (< 5 mm), rostbraun verwittert	Fa, Gls, Cs, Qtz, Py, Ccp
MA-091509	FNr. 2342	Halde 2	7	63	30	23	82,1	✓	homogen, grau, Quarzbruchstücke (< 2 mm), braun verwittert	
MA-092821	FNr. 2976	Halde 2	7	48	39	30	114,1	✓	heterogen, braunschwarz, Quarzbruchstücke (< 1 mm), rostbraun verwittert	Mag, Mfr, Fa, Gls, Cs, Cu, Cv
MA-091510	FNr. 2287	Halde 2	11	72	42	26	69,2	✓	heterogen, dunkelgrau, im Handstück oliv- bis braunschwarz, Quarzbruchstücke (< 5 mm)	

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-091511	FNr. 2267	Halde 2	17	50	39	40	93,8	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm), messingfarbener Sulfideinschluss (\varnothing 3 mm), Holzkohleabdrücke, olivbraun verwittert	Fa, Cpx, Cs, Ccp, Cv, Bn, Mag, Qtz
MA-091512	FNr. 2350	Halde 2	19	58	35	55	178,3	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 5 mm), bläulichgrauer Sulfideinschluss (\varnothing 3 mm), schwärzlichgraubraun verwittert	
MA-091513	FNr. 1936	Halde 2	22	38	33	10	25,5	✓	homogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, rostbraun verwittert	Fa, Gls, Mag, Cs
MA-113459	FNr. 2090	Halde 2	5 Pl. 410	-	-	-	0,1	✗	vollständig verwittertes Fragment des Nadelschafts	Mlc, Az,
MA-092819	FNr. 2722	Halde 2	21 Pl. 569	46	44	43	141,9	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, grau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 2 mm), dunkelolivbraun verwittert	Fa, Cpx, Gls, Mag, Qtz, Ccp, Bn, Cv, Cs
MA-092826	FNr. 3178	Halde 2	21 Pl. 569	51	40	36	84,6	✓	heterogen, grau, Quarzbruchstücke (< 5 mm), rostbraun verwittert	
MA-092820	FNr. 3310	Halde 2	21a Pl. 569	67	52	39	131,7	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 2 mm), rostbraun verwittert	
MA-092825	FNr. 3293	Halde 2	21b Pl. 648	88	64	54	285,8	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 1 mm), schwärzlichbraun verwittert	Fa, Cpx, Gls, Mag, Cs, Mlc
MA-091487	FNr. 3666	Halde 3	4	65	48	31	126,3	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 5 mm), rostbraun verwittert	Fa, Gls, Mag, Ccp, Cu, Mlc
MA-091488	FNr. 3666	Halde 3	4	52	38	31	51,6	✓	heterogen, dunkelgrau, rotschwarz im Handstück, wulstartige Verdickungen, Quarzbruchstücke (< 2 mm), rostbraun verwittert	
MA-091489	FNr. 3225	Halde 3	5	37	29	14	12,3	✓	heterogen, dunkelgrau, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 4 mm), bläulichgrauer Sulfideinschluss (\varnothing 3 mm), schwärzlichgraubraun verwittert	Fa, Gls, Mlc, Cup, Qtz, Mag, Mfr, Cs

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-091490	FNr. 4917	Halde 3	5	57	43	41	108,4	✓	heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 4 mm), bläulichgraue Sulfideinschlüsse (ø 3 mm), rostbraun verwittert	Fa, Cpx, Mag, Cs, Mlc
MA-091491	FNr. 3659	Halde 3	10	70	45	33	79,2	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 1 mm), Holzkohl- abdrücke, graubraun verwittert	
MA-091492	FNr. 4178	Halde 3	22	53	38	25	29,6	✓	heterogen, dunkelgrau, rostbraun verwittert	
MA-091493	FNr. 5053	Halde 3	22	70	53	48	207,4	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, braunschwarz, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 1 mm), Holzkohl- abdrücke, dunkelbraun verwittert	Fa, Cpx, Mag, Cs
MA-091494	FNr. 4500	Halde 3	23	78	54	51	216,0	✓	heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm), rostbraun verwittert	Fa, Cpx, Mag, Mfr, Cs, Cu
MA-091495	FNr. 4529	Halde 3	23	73	61	25	87,5	✓	homogen, dunkelgrau, wulstartige Form, rostbraun verwittert	
MA-091496	FNr. 4543	Halde 3	24	55	41	27	62,3	✓	heterogen, dunkelgrau, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 6 mm), messingfarbene Metal- leinschlüsse (ø 1 mm), rostbraun verwittert	Fa, Cpx, Cs, Cv, Qtz, Mlc
MA-091497	FNr. 4252	Halde 3	25	64	45	46	192,8	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, braunschwarz, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm) im heterogenen Teil	Fa, Gls, Qtz, Ccp, Mag, Cs
MA-113462	FNr. 4469	Halde 3	25a Pl. 884	31	22	12	11,2	✓	heterogen, dunkelgrau, sekundäre Kupferminerale, rostbraun verwittert	
MA-091470	FNr. 3042	Halde 3	2	88	76	43	223,2	✓	heterogen, olivschwarz, Quarzbruchstücke (< 10 mm)	
MA-091471	FNr. 3042	Halde 3	2	59	43	4	18,3	✓	homogen, schwarz, im Handstück rotschwarz, Fließstrukturen	Fa, Gls, Cs, Mag, Mlc
MA-091472	FNr. 2994	Halde 3	2	114	61	60	434,7	×	Chalkopyrit, sekundäre Kupferminerale, Quarz/Quarzit	Ccp, Cc, Qtz
MA-091473	FNr. 4558	Halde 3	2	76	62	9	90,5	✓	homogen, schwarz, Fließstrukturen, verwittert	Fa, Cpx, Mag, Ccp, Bn, Cs

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-091474	FNr. 4104	Halde 3	2	78	39	40	143,2	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm) im heterogenen Teil, rostbraun verwittert	
MA-091475	FNr. 3066	Halde 3	2a	52	43	32	84,4	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 5 mm), graubraun verwittert	Fa, Cpx, Gls, Ccp, Cv, Bn, Mag
MA-091476	FNr. 3078	Halde 3	2b	66	44	41	94,9	✓	heterogen, unterer Teil stark porig, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 3 mm), graubraun verwittert	
MA-091477	FNr. 4708	Halde 3	2c	49	38	43	118,0	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 1 mm), bläulichgrauer Sulfideinschluss (ø 3 mm), rostbraun verwittert	Fa, Cpx, Gls, Mag, Cs, Qtz
MA-091478	FNr. 3037	Halde 3	9	41	46	31	88,8	✓	heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 8 mm), dunkelolivbraun verwittert	
MA-091479	FNr. 4433	Halde 3	9	48	31	14	29,3	✓	homogen, dunkelgrau, im Handstück rotschwarz, sekundäre Kupferminerale	Fa, Cpx, Gls, Mag, Mfr, Cu, Ccp
MA-091486	FNr. 3190	Halde 3	13	66	39	37	133,6	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 2 mm), Holzkohleabdrücke, rostbraun verwittert	
MA-091481	FNr. 4145	Halde 3	17	61	43	45	175,0	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Quarzbruchstücke (< 1 mm), bläulichgrauer Sulfideinschluss (ø 1 mm)	Fa, Cpx, Qtz, Ccp, Cs, Mag
MA-091482	FNr. 4780	Halde 3	17	102	60	47	352,4	✓	heterogen, dunkelgrau, wulstartige Verdickungen, Quarzbruchstücke (< 5 mm), Holzkohleabdrücke, graubraun verwittert	
MA-091483	FNr. 3625	Halde 3	18	65	45	38	124,9	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, bläulichgraue Sulfideinschlüsse (ø 2 mm), rostbraun verwittert	

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-091484	FNr. 4153	Halde 3	18	44	41	39	136,2	✓	heterogen, dunkelgrau, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 2 mm), bläulichgrauer Sulfideinschluss (ø 3 mm), Holzkohleabdrücke, dunkelockerbraun verwittert	
MA-091485	FNr. 4153	Halde 3	18	49	43	13	36,8	✓	homogen, dunkelgrau, Handstück rotschwarz, wulstartige Form, Quarzbruchstücke (< 1 mm)	Fa, Gls, Qtz, Mag, Mfr
MA-091480	FNr. 3646	Halde 3	11a	46	40	15	43,7	✓	homogen, braunschwarz, teilweise rostbraun verwittert	
MA-113461	FNr. 3423	Halde 3	2 Pl. 678	24	12	4	4,1	✓	unförmiges, an der Oberfläche rotschwarz verwittertes Metallstück	Cu, Bn, Cv
MA-092827	FNr. 3873	Spitzgraben	14 Pl. 692	61	31	27	71,7	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm), dunkelgraubraun verwittert	Cpx, Fa, Mag, Cs, Qtz, Py, Ccp
MA-091440	FNr. 518	Allgemein	1, Halde 1	67	50	54	185,7	✓	heterogen, unterer Teil stark porig, dunkelgrau, sekundäre Kupferminerale, rostbraun verwittert	
MA-091441	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	34	29	9	19,1	✓	homogen, dunkelgrau, im Handstück rotschwarz, Fließstrukturen	Fa, Mag, Cu, Cv, Ccp, Gls
MA-091442	FNr. 1069	Allgemein	1, Halde 1	55	32	23	32,2	✓	heterogen, olivschwarz, Quarzbruchstücke (< 1 mm), braunschwarz verwittert	Fa, Mag, Cu, Del, Qtz, Gls
MA-091498	FNr. 2272	Allgemein	1, Halde 2	44	39	24	46,6	✓	heterogen, dunkelgrau, im Handstück graugrün, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 3 mm)	
MA-091467	FNr. 2968	Allgemein	1, Halde 3	59	49	23	115,5	×	Pyrit, Hämatit, Quarz	Mag, Hem, Brt, Qtz
MA-091468	FNr. 2968	Allgemein	1, Halde 3	57	38	26	52,8	✓	heterogen, dunkelgrau, wulstartige Verdickungen, Holzkohleabdrücke, braunschwarz verwittert	
MA-091469	FNr. 3029	Allgemein	1, Halde 3	55	49	35	81,6	✓	heterogen, grau bis dunkelgrau, im Handstück schwärzlichgraubraun, Quarzbruchstücke (< 8 mm)	Fa, Gls, Cu, Qtz, Ccp, Bn, Cv
MA-091443	FNr. 699	Allgemein	2, Halde 1	79	56	24	116,8	✓	heterogen, graurosa bis weiß gebrannt, nahezu vollständig verschlackt (1 mm)	Fa, Qtz, Gls
MA-091444	FNr. 699	Allgemein	2, Halde 1	38	35	42	65,9	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, braunschwarz, Quarzbruchstücke (< 3 mm) im heterogenen Teil, dunkelbraun verwittert	Fa, Cpx, Cs, Mag, Qtz

Tab. A.2.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Länge (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Gewicht (g)	Magnetik	Beschreibung	Phasenbestand
MA-091445	FNr. 1153	Allgemein	2, Halde 1	67	57	12	73,0	✓	homogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 1 mm), dunkelbraun verwittert	
MA-091504	FNr. 2118	Allgemein	4, Halde 2	62	40	26	87,1	✓	oberer Teil homogen, unterer Teil heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, sekundäre Kupferminerale, Quarzbruchstücke (< 5 mm), dunkelolivbraun verwittert	Fa, Cpx, Mag, Cs, Mlc
MA-091505	FNr. 2118	Allgemein	4, Halde 2	47	39	37	99,9	✓	heterogen, dunkelgrau, Fließstrukturen, Quarzbruchstücke (< 5 mm), bläulichgrauer Sulfideinschluss (ø 2 mm), dunkelolivbraun verwittert	
MA-113460		Kupfergraben		71	45	44	196,9	×	Quarz mit einzelnen Pyritkristallen	

Tab. A.3.: Chemische Pauschalanalysen mittels WD-RFA von verschiedenen Schlackentypen und Ofenwandverschlackungen vom Kupferschmelzplatz S1. Haupt- und Nebenkomponenten in Gewichtsprozent, Spuren in mg/kg (n.n. = nicht nachgewiesen, die mit * gekennzeichneten Proben wurden am Institut für Geowissenschaften der Universität Tübingen gemessen, alle anderen am Institut für Geowissenschaften der Universität Heidelberg).

		MA-092828*	MA-092828	MA-092829*	MA-092830*	MA-101433	MA-101434	MA-092831*
		FNr. 258	FNr. 258	FNr. 32	FNr. 981	FNr. 957	FNr. 973	FNr. 1219
		Röstoffbett 1	Röstoffbett 1	Röstoffbett 1	Röstoffbett 1	Röstoffbett 1	Röstoffbett 2	Röstoffbett 2
		Schicht RB1-1	Schicht RB1-1	Schicht RB1-1	Schicht RB1-3	Schicht RB1-4	Schicht 2 Pl. 157	Schicht 21 Pl. 210
SiO ₂	[Gew.-%]	31,60	32,62	34,36	44,58	35,77	36,20	34,03
TiO ₂		0,12	0,12	0,15	0,17	0,19	0,18	0,19
Al ₂ O ₃		3,24	3,40	3,66	3,40	4,58	4,27	3,94
FeO		47,99	46,48	41,67	36,78	41,75	45,85	44,67
MgO		2,55	3,03	2,90	1,50	1,99	2,89	2,16
MnO		0,60	0,66	0,57	0,52	0,47	0,48	0,65
CaO		11,19	10,97	12,90	10,56	11,98	7,19	12,29
Na ₂ O		n.n.	0,072	0,038	0,016	0,199	0,050	0,015
K ₂ O		0,64	0,56	1,56	1,32	1,31	0,77	0,58
P ₂ O ₅		0,46	0,50	0,49	0,52	0,39	0,57	0,54
S		0,12	0,21	0,21	0,05	0,24	0,26	0,10
Cu		0,71	0,67	0,65	0,27	0,40	0,56	0,35
Co	[mg/kg]	244	500	102	197	417	524	195
Zn		18	237	n.n.	111	185	110	124
Ni		152	207	124	108	132	63	129
Sb		406	606	131	n.n.	245	105	318
Ba		148	273	315	290	422	367	318
As		63	375	n.n.	n.n.	167	159	220
V		n.n.	34	17	n.n.	36	48	n.n.
Y		34	52	48	197	91	91	195
Sr		46	61	71	111	89	89	124
Rb		27	14	49	108	71	35	129
Zr		25	26	42	n.n.	37	35	318
Cr		n.n.	14	10	290	34	15	318
Cl		n.n.	86	n.n.	n.n.	209	82	220
Pb		n.n.	72	n.n.	n.n.	91	80	n.n.
Nb		n.n.	16	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
W		n.n.	142	n.n.	n.n.	249	392	n.n.
Bi		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Summe	[Gew.-%]	99,33	99,57	99,25	99,83	99,53	99,48	99,78

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-092832*	MA-092833*	MA-092835*	MA-101431	MA-092836*	MA-101432	MA-092838*
		FNr. 1221	FNr. 1335	FNr. 1144	FNr. 1593	FNr. 4162	FNr. 4162	FNr. 641
		Röstoffbett 2	Röstoffbett 3	Röstoffbett 3	Röstoffbett 4	Röstoffbett 4	Röstoffbett 4	Röstoffbett 5
		Schicht 29 Pl. 211	Schicht 42	Schicht 48	Schicht 11 Pl. 136	Schicht 16 (=9?) Pl. 291	Schicht 16 (=9?) Pl. 291	Schicht 2 Pl. 89
SiO ₂	[Gew.-%]	35,06	34,16	29,37	32,23	32,15	52,31	34,21
TiO ₂		0,17	0,15	0,17	0,30	0,19	0,31	0,28
Al ₂ O ₃		4,44	3,36	4,30	3,09	3,96	10,69	3,99
FeO		41,94	46,99	51,98	44,71	46,91	24,53	44,91
MgO		2,27	1,80	2,45	4,58	2,73	2,26	2,90
MnO		0,57	0,53	0,60	0,66	0,52	0,25	0,87
CaO		12,88	9,74	8,75	11,52	10,63	4,87	10,09
Na ₂ O		0,0003	0,009	n.n.	0,058	n.n.	0,308	n.n.
K ₂ O		0,94	1,02	0,66	0,20	0,84	3,11	0,67
P ₂ O ₅		0,44	0,43	0,51	1,21	0,62	0,23	0,65
S		0,09	0,34	0,10	0,19	0,10	0,11	0,13
Cu		0,49	0,47	0,60	0,17	0,83	0,32	0,23
Co	[mg/kg]	160	222	n.n.	643	n.n.	324	274
Zn		n.n.	n.n.	156	388	65	116	107
Ni		173	126	377	363	112	307	654
Sb		359	131	n.n.	1228	n.n.	266	n.n.
Ba		297	326	187	198	272	414	216
As		99	n.n.	433	1058	79	958	730
V		23	17	n.n.	94	n.n.	81	36
Y		51	36	n.n.	31	n.n.	29	32
Sr		71	67	156	62	65	34	39
Rb		41	45	377	20	112	73	n.n.
Zr		51	44	n.n.	78	n.n.	119	63
Cr		n.n.	n.n.	187	63	272	45	7
Cl		n.n.	152	433	91	79	84	144
Pb		n.n.	n.n.	n.n.	127	n.n.	42	n.n.
Nb		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	12	n.n.
W		n.n.	n.n.	n.n.	600	n.n.	473	n.n.
Bi		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	30	n.n.
Summe	[Gew.-%]	99,43	99,11	99,72	99,41	99,59	99,63	99,24

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-092839*	MA-092840*	MA-092841*	MA-101426	MA-101427	MA-101428	MA-101435
		FNr. 683	FNr. 1645	FNr. 4409	FNr. 1340	FNr. 1340	FNr. 4409	FNr. 1429
		Röstoffbett 5	Röstoffbett 7	Röstoffbett 7	Röstoffbett 7	Röstoffbett 7	Röstoffbett 7	Röstoffbett 7
		Schicht 8 Pl. 115	Schicht 44	Schicht 44	Schicht 44	Schicht 44	Schicht 44	Schicht 44
SiO ₂	[Gew.-%]	38,17	27,05	35,96	43,90	39,54	38,01	40,95
TiO ₂		0,26	0,11	0,13	0,17	0,15	0,26	0,17
Al ₂ O ₃		5,04	3,06	3,08	4,14	4,09	5,29	3,87
FeO		38,64	54,60	44,61	35,36	39,77	38,65	37,10
MgO		1,76	1,43	1,95	2,79	2,27	1,67	1,84
MnO		0,93	0,48	0,57	0,47	0,49	0,52	0,72
CaO		11,95	7,33	10,76	10,52	8,44	11,11	12,22
Na ₂ O		0,015	n.n.	n.n.	0,091	0,125	0,146	0,104
K ₂ O		1,12	1,78	1,07	0,84	1,33	1,69	1,12
P ₂ O ₅		0,44	0,47	0,60	0,54	0,50	0,62	0,54
S		0,25	0,46	0,18	0,21	0,68	0,31	0,27
Cu		0,39	1,96	0,29	0,31	1,09	0,76	0,39
Co	[mg/kg]	90	n.n.	269	382	434	394	336
Zn		23	108	n.n.	175	193	109	151
Ni		225	122	152	90	164	156	82
Sb		468	n.n.	224	304	140	244	252
Ba		550	496	305	354	459	589	438
As		79	n.n.	n.n.	244	150	142	110
V		48	n.n.	7	41	46	55	36
Y		47	n.n.	33	75	42	104	82
Sr		72	108	61	77	68	97	88
Rb		52	122	33	45	35	45	30
Zr		70	n.n.	40	42	40	73	37
Cr		n.n.	496	n.n.	43	55	79	41
Cl		n.n.	n.n.	n.n.	81	136	115	65
Pb		n.n.	n.n.	n.n.	106	55	72	56
Nb		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	11	n.n.	9
W		n.n.	n.n.	n.n.	330	290	215	190
Bi		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	30	36	28
Summe	[Gew.-%]	99,13	98,87	99,33	99,56	98,70	99,30	99,51

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-092842*	MA-092842	MA-092843*	MA-092844*	MA-101429	MA-101430	MA-092845
		FNr. 1252	FNr. 1252	FNr. 1200	FNr. 1200	FNr. 1252	FNr. 1200	FNr. 1795
		Röstoffbett 7	Röstoffbett 7	Röstoffbett 7	Röstoffbett 7	Röstoffbett 7	Röstoffbett 7	Röstoffbett 8
		Schicht 58	Schicht 58	Schicht 58	Schicht 58	Schicht 58	Schicht 58	Schicht 15 Pl. 136
SiO ₂	[Gew.-%]	31,91	33,37	24,34	41,14	42,20	36,39	31,03
TiO ₂		0,19	0,18	0,21	0,16	0,18	0,21	0,19
Al ₂ O ₃		3,85	4,39	4,02	3,78	3,50	3,73	4,00
FeO		46,35	44,36	57,32	39,07	37,88	41,69	47,51
MgO		1,45	1,84	1,32	1,74	1,51	2,27	2,33
MnO		0,54	0,52	0,37	0,44	0,37	0,48	0,59
CaO		12,04	11,54	8,14	10,39	12,48	10,90	10,84
Na ₂ O		n.n.	0,082	n.n.	n.n.	0,071	0,147	0,084
K ₂ O		0,97	0,85	1,34	0,93	0,37	0,60	0,57
P ₂ O ₅		0,41	0,48	0,40	0,47	0,46	0,57	0,58
S		0,29	0,48	0,56	0,35	0,21	0,96	0,54
Cu		0,87	0,76	0,78	0,67	0,26	0,26	0,52
Co	[mg/kg]	301	388	116	156	361	543	448
Zn		n.n.	211	94	84	167	142	134
Ni		123	132	151	92	73	82	90
Sb		130	158	n.n.	n.n.	174	366	418
Ba		403	451	287	438	317	840	476
As		n.n.	159	n.n.	104	n.n.	174	655
V		24	54	n.n.	n.n.	64	45	58
Y		102	99	116	156	98	60	80
Sr		101	107	94	84	78	89	67
Rb		38	34	151	92	19	10	19
Zr		53	57	n.n.	n.n.	22	40	39
Cr		n.n.	37	287	438	36	48	32
Cl		n.n.	89	n.n.	104	87	77	96
Pb		n.n.	89	n.n.	n.n.	56	75	89
Nb		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
W		n.n.	108	n.n.	n.n.	215	546	n.n.
Bi		n.n.	32	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	37
Summe	[Gew.-%]	99,01	99,08	98,95	99,31	99,67	98,51	99,06

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-092846*	MA-092850*	MA-092851*	MA-092851	MA-101385	MA-101387	MA-101388
		FNr. 3046	FNr. 3589	FNr. 3348	FNr. 3348	FNr. 1102	FNr. 5302	FNr. 5394
		Röstoffbett 9	Röstoffbett 9	Röstoffbett 9	Röstoffbett 9	Ofen 1	Ofen 1	Ofen 1
		Schicht 1 Pl. 475	Schicht 26 Pl. 691	Schicht 45 Pl. 691	Schicht 45 Pl. 691	Nordwand	Ostwand	Ostwand
SiO ₂	[Gew.-%]	41,74	37,26	34,51	34,46	43,69	51,80	50,19
TiO ₂		0,21	0,16	0,19	0,20	0,73	0,85	0,65
Al ₂ O ₃		4,33	4,31	4,75	5,03	14,67	17,48	9,96
FeO		38,33	39,00	40,69	40,93	16,51	8,02	14,62
MgO		0,92	1,81	1,94	2,23	2,18	1,46	2,93
MnO		0,44	0,63	0,74	0,77	0,66	0,84	0,45
CaO		10,85	12,49	13,83	13,09	7,36	8,46	6,77
Na ₂ O		0,0001	0,017	0,008	0,105	0,703	0,232	0,183
K ₂ O		0,98	1,78	1,02	0,88	4,35	6,67	3,69
P ₂ O ₅		0,63	0,38	0,52	0,57	0,50	0,88	0,19
S		0,24	0,13	0,12	0,18	0,11	0,06	0,39
Cu		0,40	1,11	0,86	0,83	4,48	1,50	7,04
Co	[mg/kg]	102	190	145	345	336	229	286
Zn		n.n.	68	n.n.	118	5975	2131	634
Ni		69	202	145	140	508	155	448
Sb		n.n.	357	269	349	10325	3902	1111
Ba		219	350	333	459	1153	1537	596
As		n.n.	57	26	333	1928	820	2442
V		21	18	13	59	122	128	87
Y		87	64	84	91	32	36	42
Sr		69	77	69	81	106	140	85
Rb		31	46	37	39	194	196	92
Zr		39	41	48	36	103	161	163
Cr		n.n.	45	n.n.	35	114	99	71
Cl		140	122	139	125	312	99	135
Pb		n.n.	n.n.	n.n.	68	681	106	106
Nb		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	11	13	n.n.
W		n.n.	n.n.	n.n.	133	873	883	796
Bi		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	33	n.n.	n.n.
Summe	[Gew.-%]	99,14	99,25	99,32	99,52	98,22	99,29	97,78

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-101389	MA-101397	MA-101398	MA-101399	MA-101393	MA-101394	MA-101395
		FNr. 5394	FNr. 5475	FNr. 5475	FNr. 5476	FNr. 5509	FNr. 5511	FNr. 5555
		Ofen 1	Ofen 2	Ofen 2	Ofen 2	Ofen 2	Ofen 2	Ofen 2
		Ostwand	ältere Phase, Ostwand	ältere Phase, Ostwand	ältere Phase, Ostwand	Nordwand	Nordwand	Nordwand
SiO ₂	[Gew.-%]	48,06	48,23	51,18	58,30	45,08	49,50	40,54
TiO ₂		0,66	0,56	0,69	0,57	0,51	0,58	1,70
Al ₂ O ₃		10,96	12,12	13,45	8,69	12,01	13,39	13,05
FeO		14,98	18,08	16,23	14,45	19,53	16,71	21,15
MgO		1,61	1,19	1,17	1,84	1,93	1,38	2,63
MnO		0,65	0,93	0,54	0,47	0,82	0,55	0,52
CaO		8,66	7,57	5,86	8,20	7,63	5,54	11,32
Na ₂ O		0,153	0,224	0,407	0,132	0,092	0,224	0,143
K ₂ O		4,41	3,35	4,27	2,90	3,05	3,26	3,31
P ₂ O ₅		0,49	0,60	0,49	0,62	0,57	0,40	0,47
S		0,53	0,12	0,21	0,11	0,12	0,19	0,09
Cu		5,60	5,01	3,58	2,36	5,66	5,68	3,29
Co	[mg/kg]	368	246	221	350	303	241	302
Zn		1453	238	322	167	3384	1364	786
Ni		277	529	377	422	618	478	676
Sb		3264	791	1054	776	3578	2401	2186
Ba		1070	931	1559	589	875	830	539
As		472	1096	1035	658	1537	829	598
V		76	111	99	70	81	111	174
Y		38	44	38	38	38	23	40
Sr		106	97	105	140	67	46	102
Rb		90	111	106	45	97	100	128
Zr		163	102	104	211	115	120	145
Cr		58	78	79	42	85	128	334
Cl		104	95	271	146	32	52	198
Pb		126	78	70	46	544	271	241
Nb		23	16	18	7	14	15	11
W		1219	346	635	1266	550	388	338
Bi		n.n.	n.n.	27	n.n.	n.n.	22	n.n.
Summe	[Gew.-%]	97,65	98,47	98,68	99,13	98,18	98,15	98,90

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-101396	MA-101391	MA-101392	MA-092854	MA-092852	MA-092853*	MA-113464
		FNr. 5451	FNr. 5551	FNr. 5551	FNr. 1772	FNr. 1709	FNr. 1570	FNr. 313
		Ofen 2	Ofen 2	Ofen 2	Vorplatz Ofen 1/2	Vorplatz Ofen 1/2	Vorplatz Ofen 1/2	Vorplatz Ofen 1/2
		Ostwand	Westwand	Westwand	Schicht 12 Pl. 68	Schicht 4 Pl.68	Schicht 5 Pl. 281	SE Ofen 2
SiO ₂	[Gew.-%]	29,53	59,75	62,39	30,14	38,81	36,64	30,54
TiO ₂		0,19	0,95	0,87	0,18	0,47	0,30	0,17
Al ₂ O ₃		3,96	14,47	11,10	3,66	11,32	6,77	3,43
FeO		44,06	7,20	5,58	48,16	25,80	39,57	43,06
MgO		3,02	2,53	3,46	2,96	1,92	1,50	3,19
MnO		0,78	0,39	0,38	0,62	0,78	0,53	0,77
CaO		11,34	7,58	9,30	10,33	5,02	9,39	14,24
Na ₂ O		0,097	0,413	0,382	0,148	0,247	0,062	0,063
K ₂ O		1,70	5,38	5,07	0,83	3,51	2,65	1,33
P ₂ O ₅		0,56	0,27	0,20	0,51	0,73	0,39	0,64
S		0,64	0,03	0,09	0,54	0,12	0,18	0,30
Cu		1,85	0,41	0,40	0,45	7,52	1,24	0,95
Co	[mg/kg]	570	258	468	390	407	258	384
Zn		693	483	339	677	3441	91	634
Ni		181	139	123	80	825	156	155
Sb		2236	331	166	1662	6054	179	2273
Ba		1034	552	374	914	904	335	1023
As		629	103	33	702	2426	n.n.	669
V		76	99	94	57	98	n.n.	53
Y		36	43	39	22	31	258	41
Sr		89	83	119	56	79	91	75
Rb		22	133	105	21	119	156	32
Zr		33	343	358	32	87	179	36
Cr		68	70	78	34	77	335	30
Cl		147	115	126	303	371	n.n.	114
Pb		58	107	106	91	115	n.n.	106
Nb		n.n.	16	18	n.n.	n.n.	n.n.	15
W		466	1117	2004	n.n.	147	n.n.	n.n.
Bi		31	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	46
Summe	[Gew.-%]	98,36	99,77	99,67	99,03	97,76	99,42	99,23

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-113463	MA-113476	MA-113469	MA-101400	MA-101402	MA-101418	MA-101419
		FNr. 207	FNr. 707/2	FNr. 1895	FNr. 4876	FNr. 5064	FNr. 5246	FNr. 5267
		Vorplatz Ofen 1/2	Ofen 3	Ofen 3	Ofen 4	Ofen 4	Ofen 5	Ofen 5
		Füllmaterial Ofen 2	Nordwand	Ostwand	Westwand	Westwand	ältere Phase, Nordwand	ältere Phase, Nordwand
SiO ₂	[Gew.-%]	33,09	44,55	53,68	51,54	56,72	22,26	14,97
TiO ₂		0,23	0,84	0,77	0,92	0,62	0,22	0,18
Al ₂ O ₃		4,46	20,28	17,68	20,20	13,81	5,34	4,26
FeO		45,08	14,23	13,43	9,28	14,97	39,69	43,16
MgO		2,68	0,97	1,10	1,18	2,22	2,42	2,76
MnO		1,00	0,67	0,38	0,77	0,38	0,77	0,93
CaO		10,42	4,64	5,34	5,52	4,73	4,28	4,35
Na ₂ O		0,084	0,234	0,213	0,424	0,264	0,013	0,025
K ₂ O		0,74	7,76	5,03	6,00	4,22	0,79	0,37
P ₂ O ₅		0,43	0,84	0,54	1,08	0,45	0,44	0,46
S		0,33	0,06	0,07	0,06	0,07	0,23	0,23
Cu		0,48	3,59	1,12	1,53	0,87	17,70	21,73
Co	[mg/kg]	385	139	132	222	206	665	818
Zn		167	421	207	1232	484	644	572
Ni		90	180	123	164	131	937	2915
Sb		253	20	59	3502	716	5699	3529
Ba		1521	999	824	1205	505	394	329
As		339	252	142	704	270	2664	1672
V		53	122	128	128	64	76	48
Y		42	51	44	51	28	35	26
Sr		115	86	82	108	95	35	24
Rb		26	246	171	210	168	48	15
Zr		27	140	153	191	129	48	25
Cr		34	86	67	121	65	39	54
Cl		136	92	93	96	167	91	85
Pb		106	62	73	83	82	126	156
Nb		10	11	26	14	11	n.n.	n.n.
W		n.n.	n.n.	33	414	n.n.	274	208
Bi		n.n.	30	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Summe	[Gew.-%]	99,36	98,95	99,59	99,35	99,62	95,34	94,47

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-101420	MA-101417	MA-101409	MA-101410	MA-101411	MA-101412	MA-101413
		FNr. 5262	FNr. 5264	FNr. 5182	FNr. 5198	FNr. 5191	FNr. 5241	FNr. 5120
		Ofen 5	Ofen 5	Ofen 5	Ofen 5	Ofen 5	Ofen 5	Ofen 5
		ältere Phase, Ostwand	ältere Phase, Westwand	Nordwand	Nordwand	Nordwand	Nordwand, 2. Schicht	Ostwand
SiO ₂	[Gew.-%]	45,15	19,12	45,08	37,71	39,53	46,54	40,65
TiO ₂		0,56	0,31	0,37	0,26	0,21	0,48	0,58
Al ₂ O ₃		11,84	7,13	8,59	6,07	4,81	9,73	11,28
FeO		21,55	45,66	27,78	34,11	37,74	22,57	28,92
MgO		2,02	3,46	1,50	1,68	1,74	1,30	1,65
MnO		0,66	0,99	0,57	0,53	0,50	0,38	0,64
CaO		9,59	5,52	7,60	6,97	7,20	4,71	6,90
Na ₂ O		0,225	0,168	0,320	0,156	0,115	0,277	0,186
K ₂ O		2,84	0,87	2,82	2,52	2,03	3,42	2,96
P ₂ O ₅		0,39	0,54	0,59	0,45	0,41	0,33	0,62
S		0,24	0,10	0,12	0,39	0,17	0,13	0,43
Cu		2,91	11,80	2,95	6,07	3,48	7,26	2,88
Co	[mg/kg]	490	902	314	440	448	237	375
Zn		1210	477	988	1169	1256	681	1030
Ni		571	1464	317	563	311	1072	418
Sb		2259	4818	2392	3462	3344	2748	2941
Ba		661	273	886	1191	1335	728	886
As		908	2903	1207	1323	1272	1151	1215
V		92	65	76	64	50	105	82
Y		34	23	22	26	18	28	32
Sr		76	41	68	55	59	50	62
Rb		70	47	56	49	39	79	95
Zr		111	61	71	58	34	86	122
Cr		91	79	71	49	58	39	55
Cl		81	126	96	80	64	104	92
Pb		83	96	125	135	59	184	97
Nb		14	14	n.n.	n.n.	n.n.	11	12
W		1340	559	256	280	430	n.n.	372
Bi		n.n.	37	n.n.	44	n.n.	n.n.	37
Summe	[Gew.-%]	98,78	96,86	98,97	97,82	98,81	97,86	98,48

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-101403	MA-101405	MA-101406	MA-101407	MA-092856*	MA-092857*	MA-092858*
		FNr. 5127	FNr. 5149	FNr. 5155	FNr. 5169	FNr. 2965	FNr. 1901	FNr. 3647
		Ofen 5	Ofen 5	Ofen 5	Ofen 5	Vorplatz Ofen 4/5	Vorplatz Ofen 4/5	Vorplatz Ofen 7/8
		Westwand	Westwand	Westwand	Westwand	Schicht 3 Pl. 358	Schicht 4 Pl. 358	Schicht 25 Pl. 760
SiO ₂	[Gew.-%]	43,22	35,66	43,43	33,43	37,91	38,68	34,44
TiO ₂		0,58	0,29	0,30	0,15	0,19	0,24	0,17
Al ₂ O ₃		10,64	6,68	6,98	3,75	4,47	3,98	5,13
FeO		18,89	31,90	29,94	40,82	40,17	37,71	42,09
MgO		1,62	1,83	1,86	1,81	1,57	1,81	2,76
MnO		0,94	0,58	0,58	0,55	0,50	0,47	0,57
CaO		8,47	6,34	7,24	6,75	9,26	13,82	11,21
Na ₂ O		0,296	0,259	0,145	0,157	0,040	n.n.	0,021
K ₂ O		4,16	2,94	3,01	1,67	1,45	1,18	1,70
P ₂ O ₅		1,07	0,49	0,54	0,55	0,56	0,40	0,40
S		0,43	0,28	0,12	0,68	0,31	0,25	0,21
Cu		6,45	8,75	3,50	6,15	2,33	0,72	0,67
Co	[mg/kg]	272	407	400	393	204	187	230
Zn		1610	2078	1620	1346	71	130	116
Ni		349	1020	845	336	86	87	139
Sb		2029	4684	3869	3278	n.n.	416	n.n.
Ba		1367	1340	972	988	437	238	209
As		1337	1401	1136	1680	185	164	157
V		140	58	69	33	n.n.	n.n.	n.n.
Y		24	12	25	13	204	187	230
Sr		107	56	73	55	71	130	116
Rb		116	58	75	41	86	87	139
Zr		108	51	57	26	n.n.	416	n.n.
Cr		78	61	64	46	437	238	209
Cl		104	61	84	271	185	164	157
Pb		144	309	259	106	n.n.	n.n.	n.n.
Nb		21	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
W		313	428	402	124	n.n.	n.n.	n.n.
Bi		n.n.	n.n.	37	26	n.n.	n.n.	n.n.
Summe	[Gew.-%]	97,60	97,20	98,65	97,36	98,97	99,50	99,54

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-092859	MA-092861*	MA-101422	MA-101423	MA-092860*	MA-101421	MA-092862*
		FNr. 4389	FNr. 3397	FNr. 3397	FNr. 3397	FNr. 3242	FNr. 3242	FNr. 2863
		Vorplatz Ofen 7/8	Vorplatz Ofen 9/10	Vorplatz Ofen 9/10	Vorplatz Ofen 9/10	Vorplatz Ofen 9/10	Vorplatz Ofen 9/10	Vorplatz Ofen 9/10
		Schicht 28 Pl. 909	Schicht 15 Pl. 652	Schicht 15 Pl. 652	Schicht 15 Pl. 652	Schicht 16 Pl. 652	Schicht 16 Pl. 652	Schicht 2 Pl. 633
SiO ₂	[Gew.-%]	32,44	45,93	40,18	22,95	42,76	30,47	36,55
TiO ₂		0,18	0,12	0,21	0,16	0,23	0,28	0,21
Al ₂ O ₃		5,39	2,44	4,17	3,55	4,60	7,22	3,82
FeO		42,01	30,88	36,64	58,61	34,44	48,73	37,97
MgO		3,51	3,19	2,14	2,42	2,23	1,55	2,14
MnO		0,65	0,60	0,60	0,52	0,58	0,59	0,54
CaO		12,28	14,08	12,83	6,87	11,70	6,89	15,46
Na ₂ O		0,157	n.n.	0,187	0,071	n.n.	0,091	n.n.
K ₂ O		1,40	0,69	0,76	0,64	0,85	1,21	1,39
P ₂ O ₅		0,49	0,37	0,58	0,76	0,37	0,98	0,34
S		0,25	0,06	0,20	0,57	0,20	0,34	0,15
Cu		0,51	1,04	0,55	1,42	1,17	0,69	0,78
Co	[mg/kg]	352	208	491	795	142	508	128
Zn		193	70	192	137	115	119	152
Ni		172	245	188	151	109	215	90
Sb		382	n.n.	1044	303	673	229	407
Ba		308	153	364	286	n.n.	321	266
As		268	512	521	347	636	272	154
V		43	n.n.	46	47	n.n.	56	n.n.
Y		52	208	79	101	142	81	128
Sr		78	70	70	108	115	56	152
Rb		42	245	4	9	109	49	90
Zr		34	n.n.	66	29	673	63	407
Cr		44	153	38	51	n.n.	64	266
Cl		71	512	323	128	636	95	154
Pb		106	n.n.	106	52	n.n.	70	n.n.
Nb		19	n.n.	9	20	n.n.	n.n.	n.n.
W		n.n.	n.n.	1098	465	n.n.	184	n.n.
Bi		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Summe	[Gew.-%]	99,48	99,65	99,52	98,85	99,46	99,29	99,58

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-092863*	MA-101424	MA-101425	MA-113467	MA-113472	MA-113473	MA-113474
		FNr. 2863	FNr. 2863	FNr. 2863	FNr. 4160	FNr. 4160	FNr. 4160	FNr. 4160
		Vorplatz Ofen 9/10	Vorplatz Ofen 9/10	Vorplatz Ofen 9/10	Vorplatz Ofen 11	Vorplatz Ofen 11	Vorplatz Ofen 11	Vorplatz Ofen 11
		Schicht 2 Pl. 633	Schicht 2 Pl. 633	Schicht 2 Pl. 633	Schicht 17	Schicht 17	Schicht 17	Schicht 17
SiO ₂	[Gew.-%]	36,49	45,00	37,07	25,55	36,13	37,97	33,99
TiO ₂		0,21	0,24	0,28	0,18	0,20	0,15	0,23
Al ₂ O ₃		5,96	5,07	4,48	4,30	3,91	4,03	4,16
FeO		40,55	32,30	39,75	55,34	40,28	40,92	42,50
MgO		2,01	0,95	1,42	2,52	2,52	1,99	1,85
MnO		0,55	0,27	0,36	0,49	0,60	0,55	0,47
CaO		10,05	10,08	13,21	8,98	13,20	10,97	14,26
Na ₂ O		n.n.	0,135	0,080	0,106	0,125	0,199	0,105
K ₂ O		1,71	1,16	0,55	0,37	0,87	0,60	0,94
P ₂ O ₅		0,73	0,54	0,62	0,81	0,43	0,51	0,59
S		0,18	0,39	0,32	0,26	0,47	0,19	0,19
Cu		0,84	2,40	0,94	0,42	0,29	1,05	0,18
Co	[mg/kg]	234	334	378	479	381	368	400
Zn		141	142	159	125	209	243	151
Ni		143	114	82	98	82	205	114
Sb		n.n.	242	157	200	209	957	122
Ba		291	390	290	159	327	318	317
As		208	181	277	197	95	261	142
V		n.n.	41	50	46	52	48	55
Y		234	203	137	64	81	34	139
Sr		141	151	106	64	85	73	105
Rb		143	33	27	20	54	40	37
Zr		n.n.	97	34	47	37	21	65
Cr		291	71	69	12	26	38	46
Cl		208	99	85	156	115	302	58
Pb		n.n.	58	85	79	66	87	47
Nb		n.n.	17	12	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
W		n.n.	247	116	n.n.	107	n.n.	n.n.
Bi		n.n.	n.n.	n.n.	72	30	n.n.	35
Summe	[Gew.-%]	99,48	98,78	99,29	99,51	99,22	99,42	99,64

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-113475	MA-113470	MA-091446*	MA-091447*	MA-091448*	MA-091450*	MA-091452*
		FNr. 4160	FNr. 4106	FNr. 595	FNr. 595	FNr. 694	FNr. 1332	FNr. 558
		Vorplatz Ofen 11	Vorplatz Ofen 11	Halde 1	Halde 1	Halde 1	Halde 1	Halde 1
		Schicht 17	Schicht 53	Schicht 5	Schicht 5	Schicht 5	Schicht 5	Schicht 6
SiO ₂	[Gew.-%]	62,82	45,50	30,66	33,99	52,64	29,94	34,42
TiO ₂		0,12	0,16	0,14	0,15	0,19	0,14	0,19
Al ₂ O ₃		3,24	3,26	2,92	2,62	3,60	3,38	3,69
FeO		22,05	34,68	45,86	45,93	32,20	50,84	46,17
MgO		1,20	2,27	2,62	1,04	1,05	1,98	1,59
MnO		0,37	0,58	0,46	0,33	0,49	0,50	0,85
CaO		7,64	10,93	10,70	11,88	5,41	8,38	9,60
Na ₂ O		0,092	0,125	n.n.	0,030	0,019	n.n.	0,016
K ₂ O		0,97	1,16	0,97	1,72	1,37	1,42	1,25
P ₂ O ₅		0,37	0,36	0,48	0,30	0,40	0,43	0,45
S		0,14	0,16	0,57	0,45	0,13	0,34	0,21
Cu		0,39	0,23	2,77	0,49	1,28	1,53	0,62
Co	[mg/kg]	181	283	190	243	182	82	163
Zn		134	176	45	2	634	52	642
Ni		197	106	119	37	218	66	167
Sb		341	766	244	n.n.	828	n.n.	277
Ba		281	327	318	379	325	340	494
As		816	348	345	n.n.	1761	n.n.	223
V		51	52	n.n.	18	19	24	35
Y		42	56	88	121	30	76	37
Sr		28	59	100	103	39	96	66
Rb		29	31	23	29	35	22	24
Zr		26	35	32	41	45	29	43
Cr		10	4	40	8	n.n.	n.n.	24
Cl		157	101	195	n.n.	142	167	n.n.
Pb		59	35	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Nb		n.n.	n.n.	n.n.	45	n.n.	n.n.	n.n.
W		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Bi		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Summe	[Gew.-%]	99,65	99,66	98,32	99,05	99,21	98,98	99,29

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-091453*	MA-091455	MA-091456*	MA-091458*	MA-091461	MA-091462*	MA-091462
		FNr. 899	FNr. 650	FNr. 696	FNr. 1152	FNr. 1029	FNr. 1179	FNr. 1179
		Halde 1	Halde 1	Halde 1	Halde 1	Halde 1	Halde 1	Halde 1
		Schicht 6	Schicht 6	Schicht 6	Schicht 6	Schicht 7	Schicht 7	Schicht 7
SiO ₂	[Gew.-%]	47,02	36,44	33,19	25,29	47,12	32,58	33,48
TiO ₂		0,24	0,18	0,13	0,19	0,21	0,19	0,21
Al ₂ O ₃		4,87	4,96	2,76	3,24	4,75	3,81	4,30
FeO		31,35	38,83	46,59	53,88	30,52	43,28	41,14
MgO		2,11	2,09	2,02	1,38	1,65	2,43	2,84
MnO		0,64	0,70	0,58	0,79	0,56	0,55	0,59
CaO		9,11	12,68	10,74	8,11	11,59	12,83	12,71
Na ₂ O		0,036	0,125	0,005	0,016	0,124	0,051	0,178
K ₂ O		1,75	1,83	1,21	2,41	1,38	1,82	1,65
P ₂ O ₅		0,59	0,71	0,34	0,58	0,59	0,33	0,37
S		0,06	0,25	0,41	0,23	0,17	0,30	0,52
Cu		1,16	0,47	0,91	2,26	0,58	0,81	0,79
Co	[mg/kg]	225	336	234	304	287	137	436
Zn		223	159	65	167	176	31	151
Ni		814	123	141	2121	106	112	123
Sb		1010	348	n.n.	1034	1359	n.n.	96
Ba		438	643	357	618	336	322	450
As		1012	205	n.n.	216	403	n.n.	n.n.
V		39	43	6	23	56	21	36
Y		30	64	39	36	89	125	119
Sr		46	81	76	39	83	115	115
Rb		46	50	35	30	48	42	36
Zr		65	31	27	37	36	57	44
Cr		8	18	27	31	15	96	79
Cl		n.n.	115	129	n.n.	125	n.n.	71
Pb		n.n.	97	n.n.	n.n.	36	349	437
Nb		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	14
W		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	216
Bi		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Summe	[Gew.-%]	99,33	99,48	99,00	98,85	99,55	99,14	99,03

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-091501*	MA-091502*	MA-091502	MA-092817*	MA-091506*	MA-091507*	MA-092822*
		FNr. 2078	FNr. 2095	FNr. 2095	FNr. 2614	FNr. 2295	FNr. 2320	FNr. 2867
		Halde 2	Halde 2	Halde 2	Halde 2	Halde 2	Halde 2	Halde 2
		Schicht 2	Schicht 3	Schicht 3	Schicht 3	Schicht 6	Schicht 6	Schicht 6
SiO ₂	[Gew.-%]	35,11	35,25	36,20	42,25	33,66	44,38	46,96
TiO ₂		0,19	0,14	0,15	0,24	0,16	0,28	0,19
Al ₂ O ₃		3,59	3,70	4,11	4,07	3,62	6,15	4,19
FeO		42,80	41,55	39,61	33,09	44,67	31,29	33,28
MgO		2,39	2,57	2,99	1,79	2,53	2,01	1,05
MnO		0,55	0,65	0,66	0,50	0,53	0,51	0,36
CaO		11,92	12,82	12,85	13,49	10,76	10,63	10,07
Na ₂ O		0,010	n.n.	0,092	0,045	0,054	0,091	0,001
K ₂ O		1,29	1,53	1,38	1,44	1,73	2,47	1,19
P ₂ O ₅		0,54	0,35	0,43	0,54	0,35	0,37	0,47
S		0,15	0,10	0,19	0,21	0,23	0,14	0,18
Cu		0,73	0,70	0,63	1,29	0,84	0,86	1,10
Co	[mg/kg]	227	188	394	180	172	195	77
Zn		92	96	201	n.n.	100	71	n.n.
Ni		124	145	189	109	153	126	83
Sb		143	329	454	n.n.	232	244	n.n.
Ba		293	232	393	355	312	342	396
As		n.n.	154	277	n.n.	129	89	n.n.
V		19	20	39	48	16	36	134
Y		81	39	55	110	59	62	142
Sr		76	70	77	92	68	75	65
Rb		50	48	37	43	44	79	29
Zr		41	36	44	41	41	71	45
Cr		n.n.	n.n.	36	49	14	37	8
Cl		119	n.n.	72	n.n.	n.n.	n.n.	139
Pb		n.n.	n.n.	63	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Nb		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
W		n.n.	n.n.	174	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Bi		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Summe	[Gew.-%]	99,40	99,48	99,52	99,05	99,27	99,33	99,15

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-091509*	MA-092821*	MA-091511	MA-091512*	MA-091513	MA-092820*	MA-092825*
		FNr. 2342	FNr. 2976	FNr. 2267	FNr. 2350	FNr. 1936	FNr. 3310	FNr. 3293
		Halde 2	Halde 2	Halde 2	Halde 2	Halde 2	Halde 2	Halde 2
		Schicht 7	Schicht 7	Schicht 17	Schicht 19	Schicht 22	Schicht 21a (Pl. 569)	Schicht 21b (Pl. 648)
SiO ₂	[Gew.-%]	37,37	20,10	41,77	41,69	30,97	42,81	35,48
TiO ₂		0,23	0,11	0,18	0,14	0,26	0,17	0,12
Al ₂ O ₃		4,43	2,73	4,63	3,17	4,13	4,18	3,10
FeO		38,27	61,31	35,29	38,16	44,60	35,48	43,85
MgO		2,55	1,24	2,14	2,18	4,36	2,43	2,37
MnO		0,97	0,59	0,48	0,51	0,88	0,52	0,57
CaO		12,59	7,15	11,03	10,76	11,70	11,35	11,65
Na ₂ O		0,076	0,025	0,156	0,031	0,105	0,048	0,022
K ₂ O		1,90	1,75	1,40	1,41	0,99	1,52	1,06
P ₂ O ₅		0,45	0,30	0,57	0,44	0,77	0,33	0,31
S		0,04	0,37	0,34	0,15	0,17	0,09	0,18
Cu		0,43	2,72	1,03	0,60	0,34	0,40	0,48
Co	[mg/kg]	222	380	287	164	417	190	216
Zn		213	n.n.	150	90	351	n.n.	n.n.
Ni		389	281	114	225	449	158	158
Sb		1043	368	253	321	738	311	221
Ba		563	351	355	240	577	227	295
As		336	n.n.	150	321	511	91	n.n.
V		28	n.n.	38	n.n.	76	8	n.n.
Y		52	45	109	55	44	41	28
Sr		75	47	82	69	45	59	69
Rb		54	n.n.	69	47	22	41	45
Zr		65	19	43	35	50	47	26
Cr		n.n.	9	52	7	41	8	20
Cl		n.n.	n.n.	99	n.n.	92	n.n.	n.n.
Pb		n.n.	n.n.	106	n.n.	93	n.n.	n.n.
Nb		n.n.	n.n.	12	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
W		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	56	n.n.	n.n.
Bi		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Summe	[Gew.-%]	99,61	98,55	99,22	99,39	99,61	99,44	99,30

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-091489	MA-091493*	MA-091494*	MA-091495*	MA-091496	MA-091497*	MA-091470*
		FNr. 3225	FNr. 5053	FNr. 4500	FNr. 4529	FNr. 4543	FNr. 4252	FNr. 3042
		Halde 3	Halde 3	Halde 3	Halde 3	Halde 3	Halde 3	Halde 3
		Schicht 5	Schicht 22	Schicht 23	Schicht 23	Schicht 24	Schicht 25	Schicht 2
SiO ₂	[Gew.-%]	50,98	36,24	38,25	28,19	50,12	38,49	48,13
TiO ₂		0,43	0,14	0,16	0,17	0,15	0,19	0,43
Al ₂ O ₃		8,10	3,88	3,91	3,30	3,12	3,65	8,43
FeO		23,96	43,27	39,48	53,92	32,87	40,72	18,69
MgO		1,27	2,40	2,08	2,27	1,51	1,84	1,87
MnO		0,40	0,54	0,55	0,60	0,50	0,65	0,75
CaO		5,99	10,82	13,04	9,54	8,00	11,34	5,86
Na ₂ O		0,134	0,028	0,025	n.n.	0,156	0,007	0,194
K ₂ O		2,17	1,10	1,04	0,50	1,24	1,60	3,58
P ₂ O ₅		0,37	0,35	0,55	0,43	0,56	0,45	0,54
S		0,46	0,12	0,11	0,12	0,25	0,12	0,03
Cu		3,24	0,43	0,30	0,32	0,76	0,38	8,35
Co	[mg/kg]	263	270	185	283	304	119	202
Zn		1056	74	50	56	126	40	1532
Ni		497	313	63	154	90	102	1634
Sb		3303	299	n.n.	322	122	137	1226
Ba		766	261	270	133	319	355	670
As		1833	341	n.n.	193	190	n.n.	1123
V		105	n.n.	10	16	52	10	60
Y		21	31	46	28	34	71	14
Sr		69	56	87	40	61	77	55
Rb		65	38	25	n.n.	33	42	86
Zr		76	34	38	54	37	47	97
Cr		55	n.n.	n.n.	15	57	16	n.n.
Cl		136	130	144	145	136	n.n.	n.n.
Pb		126	n.n.	n.n.	n.n.	64	n.n.	85
Nb		10	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
W		40	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Bi		23	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Summe	[Gew.-%]	98,35	99,50	99,59	99,51	99,41	99,53	97,54

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-091471*	MA-091473*	MA-091474*	MA-091474	MA-091478*	MA-091479	MA-091482*
		FNr. 3042	FNr. 4558	FNr. 4104	FNr. 4104	FNr. 3037	FNr. 4433	FNr. 4780
		Halde 3	Halde 3	Halde 3	Halde 3	Halde 3	Halde 3	Halde 3
		Schicht 2	Schicht 2	Schicht 2	Schicht 2	Schicht 9	Schicht 9	Schicht 17
SiO ₂	[Gew.-%]	37,43	36,43	38,62	40,67	50,89	28,91	39,43
TiO ₂		0,19	0,23	0,15	0,16	0,21	0,22	0,16
Al ₂ O ₃		3,20	4,00	3,65	4,28	4,95	4,63	3,33
FeO		42,26	36,61	40,86	37,32	28,88	48,71	43,26
MgO		2,12	3,82	2,31	2,86	1,82	1,69	0,93
MnO		0,70	0,87	0,49	0,53	0,40	0,66	0,49
CaO		10,22	14,98	11,48	11,50	9,16	8,65	8,37
Na ₂ O		0,039	0,022	n.n.	0,135	0,145	0,127	n.n.
K ₂ O		1,67	1,35	1,09	0,99	1,98	1,77	1,96
P ₂ O ₅		0,31	0,47	0,30	0,38	0,42	0,51	0,52
S		0,09	0,09	0,12	0,20	0,07	0,49	0,06
Cu		0,61	0,36	0,35	0,33	0,53	2,14	0,86
Co	[mg/kg]	252	180	184	406	163	484	293
Zn		1047	457	90	167	58	134	81
Ni		219	323	140	196	99	221	256
Sb		2095	879	347	418	242	209	135
Ba		512	406	182	261	188	625	426
As		806	405	179	379	119	229	n.n.
V		6	32	10	43	21	38	15
Y		27	41	51	51	65	40	53
Sr		57	73	66	82	56	67	77
Rb		28	41	43	44	56	49	37
Zr		41	55	44	40	61	57	34
Cr		40	n.n.	24	48	9	44	21
Cl		123	n.n.	124	146	137	96	n.n.
Pb		n.n.	n.n.	n.n.	51	n.n.	135	n.n.
Nb		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
W		n.n.	n.n.	n.n.	132	n.n.	n.n.	n.n.
Bi		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Summe	[Gew.-%]	99,37	99,53	99,55	99,59	99,58	98,75	99,52

Tab. A.3.: Fortsetzung

		MA-091484*	MA-091485*	MA-091440*	MA-091444*	MA-091444	MA-091445*
		FNr. 4153	FNr. 4153	FNr. 518	FNr. 699	FNr. 699	FNr. 1153
		Halde 3	Halde 3	Allgemein	Allgemein	Allgemein	Allgemein
		Schicht 18	Schicht 18	Schicht 1, Halde 1	Schicht 2, Halde 1	Schicht 2, Halde 1	Schicht 2, Halde 1
SiO ₂	[Gew.-%]	26,06	40,51	26,56	35,25	35,62	25,98
TiO ₂		0,08	0,19	0,16	0,18	0,19	0,23
Al ₂ O ₃		2,56	3,45	3,91	3,73	4,17	4,26
FeO		48,06	38,75	48,74	42,70	41,83	54,10
MgO		2,34	2,63	1,49	1,59	1,92	1,39
MnO		0,48	0,52	0,95	0,47	0,50	0,62
CaO		9,49	11,38	12,96	12,11	11,64	9,44
Na ₂ O		n.n.	0,042	n.n.	0,031	0,063	0,014
K ₂ O		1,64	1,33	0,76	1,22	1,06	1,47
P ₂ O ₅		0,23	0,21	0,79	0,59	0,67	0,56
S		1,34	0,14	0,24	0,25	0,41	0,38
Cu		4,43	0,22	2,13	0,99	0,90	0,62
Co	[mg/kg]	247	102	191	146	378	223
Zn		n.n.	183	115	7	109	51
Ni		243	101	188	80	77	99
Sb		n.n.	524	959	n.n.	33	205
Ba		237	287	245	356	534	365
As		144	293	246	n.n.	135	n.n.
V		30	17	72	30	51	17
Y		37	56	85	127	126	81
Sr		52	74	83	82	85	75
Rb		n.n.	30	n.n.	25	25	25
Zr		21	44	51	37	34	55
Cr		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	29	n.n.
Cl		121	n.n.	133	165	77	154
Pb		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	72	n.n.
Nb		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
W		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	232	n.n.
Bi		n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Summe	[Gew.-%]	96,83	99,55	98,94	99,21	99,17	99,20

Tab. A.4.: EDX-Flächenanalysen vollständig aufgeschmolzener Teilbereiche ausgewählter Schlacken und Ofenwandverschlackungen vom Kupferschmelzplatz S1. Angaben in Gewichtsprozent (n.n. = nicht nachgewiesen).

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cu	Ni	Sb
MA-092830_1	FNr. 981	Röstoffbett 1	RB1-3	37,3	n.n.	3,4	41,1	1,8	0,8	12,9	1,9	0,2	0,4	0,1	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092831_1	FNr. 1219	Röstoffbett 2	21 Pl. 210	35,2	0,3	3,9	41,0	3,6	0,9	13,7	n.n.	0,8	0,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-110606_1	FNr. 1609	Röstoffbett 3	42	39,8	0,5	9,7	26,8	3,1	1,8	9,5	1,1	2,7	1,0	0,1	3,9	n.n.	n.n.
MA-092835_1	FNr. 1144	Röstoffbett 3	48	33,3	n.n.	3,8	43,7	4,2	0,7	12,8	0,3	0,5	0,4	0,2	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092836_1	FNr. 4162	Röstoffbett 4	16 (=9?) Pl. 291	31,9	n.n.	4,9	49,4	3,9	0,9	5,7	0,9	0,8	0,5	0,2	1,0	n.n.	n.n.
MA-092838_1	FNr. 641	Röstoffbett 5	2 Pl. 89	31,6	n.n.	4,3	47,1	3,6	1,1	10,2	0,4	0,5	0,9	0,1	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092841_1	FNr. 4409	Röstoffbett 7	44	39,7	n.n.	3,5	36,8	3,5	0,8	13,4	n.n.	1,7	0,3	0,2	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092843_1	FNr. 1200	Röstoffbett 7	58	28,6	n.n.	4,9	50,0	2,8	n.n.	9,4	n.n.	1,8	0,7	0,8	0,9	n.n.	n.n.
MA-092845_1	FNr. 1795	Röstoffbett 8	15 Pl. 136	35,9	n.n.	3,8	39,0	4,4	0,7	13,5	n.n.	1,0	0,5	0,2	1,1	n.n.	n.n.
MA-092850_1	FNr. 3589	Röstoffbett 9	26 Pl. 691	37,7	n.n.	4,4	37,8	3,2	0,8	13,3	n.n.	2,3	0,4	0,1	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092850_2	FNr. 3589	Röstoffbett 9	26 Pl. 691	40,2	n.n.	4,5	36,0	3,2	0,8	13,4	n.n.	1,2	0,6	0,2	n.n.	n.n.	n.n.
MA-101384_1	FNr. 4958	Ofen 1	Westwand	47,4	0,8	9,3	11,0	1,8	n.n.	12,6	n.n.	5,7	1,2	0,3	9,9	n.n.	n.n.
MA-101398_1	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	45,2	0,1	9,8	21,1	3,0	0,7	10,2	1,1	4,4	0,6	n.n.	3,7	n.n.	n.n.
MA-101394_1	FNr. 5511	Ofen 2	Nordwand	53,0	0,6	10,5	11,0	2,4	0,4	11,4	n.n.	2,6	0,6	0,0	7,5	n.n.	n.n.
MA-101394_2	FNr. 5511	Ofen 2	Nordwand	50,2	1,2	33,4	2,3	1,0	n.n.	5,7	0,4	4,1	0,2	n.n.	1,5	n.n.	n.n.
MA-092854_1	FNr. 1772	Vorplatz Ofen 1/2	12 Pl. 68	36,5	n.n.	4,3	38,7	4,0	0,8	11,9	n.n.	1,4	0,6	0,7	1,0	n.n.	n.n.
MA-092853_1	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	33,4	n.n.	3,2	43,5	2,8	0,9	12,5	0,1	2,0	0,4	0,4	0,8	n.n.	n.n.
MA-092853_2	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	29,1	n.n.	4,0	51,7	3,3	1,0	8,1	0,7	0,5	0,7	0,3	0,6	n.n.	n.n.
MA-092853_3	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	37,4	0,9	5,5	21,0	8,0	1,0	23,6	n.n.	n.n.	1,4	n.n.	1,2	n.n.	n.n.
MA-113463_1	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	34,9	0,4	4,9	42,6	2,9	1,3	10,4	n.n.	0,8	0,6	0,3	0,9	n.n.	n.n.
MA-113468_1	FNr. 706	Ofen 3	Nordwand, abgebr.	43,7	0,5	10,0	21,5	2,7	0,9	11,4	n.n.	4,0	0,8	n.n.	4,5	n.n.	n.n.
MA-113468_2	FNr. 706	Ofen 3	Nordwand, abgebr.	41,2	0,5	7,3	26,5	2,5	0,6	13,4	n.n.	4,0	0,7	n.n.	3,5	n.n.	n.n.
MA-113469_1	FNr. 1895	Ofen 3	Ostwand	38,2	0,6	12,3	24,4	3,2	1,4	14,5	0,6	2,7	0,8	n.n.	1,3	n.n.	n.n.
MA-113471_1	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	36,0	0,4	6,0	34,8	3,7	0,9	12,9	n.n.	2,1	0,6	0,1	2,5	n.n.	n.n.
MA-113471_2	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	44,8	n.n.	9,7	24,7	2,6	1,1	11,4	n.n.	3,1	0,7	n.n.	1,8	n.n.	n.n.
MA-101402_1	FNr. 5064	Ofen 4	Westwand	42,8	0,4	7,8	31,8	4,2	1,0	7,3	0,5	2,5	1,0	0,1	0,6	n.n.	n.n.
MA-101419_1	FNr. 5267	Ofen 5	ältere Phase, Nordwand	26,3	n.n.	4,9	37,1	3,6	0,8	10,6	n.n.	1,7	0,7	0,2	14,2	n.n.	n.n.
MA-101406_1	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	42,3	n.n.	3,1	26,3	4,9	0,7	18,4	n.n.	1,8	0,8	n.n.	1,6	n.n.	n.n.
MA-101407_1	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	42,9	n.n.	3,2	30,2	4,2	0,9	13,9	0,3	2,1	0,6	n.n.	1,5	n.n.	n.n.
MA-092856_1	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	38,6	n.n.	4,3	38,9	2,6	0,7	10,8	0,2	1,5	0,6	0,3	1,5	n.n.	n.n.
MA-092859_1	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	35,8	n.n.	4,4	37,0	4,7	0,9	13,9	n.n.	2,0	0,4	0,3	0,7	n.n.	n.n.
MA-092860_1	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	29,3	n.n.	6,5	50,6	2,0	0,5	6,9	n.n.	0,5	0,2	0,2	3,2	n.n.	n.n.
MA-092862_1	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	38,2	0,4	4,0	34,1	3,7	0,7	15,8	n.n.	1,5	0,4	0,1	0,9	n.n.	n.n.
MA-113467_1	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	33,7	n.n.	3,9	44,5	3,6	0,8	10,6	n.n.	1,0	0,6	0,4	0,9	n.n.	n.n.
MA-113472_1	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	35,6	n.n.	4,0	40,2	3,3	0,9	13,0	0,4	1,0	0,5	0,2	0,9	n.n.	n.n.
MA-113473_1	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	35,5	0,3	3,1	41,4	3,4	0,8	12,4	0,5	0,8	0,5	0,2	0,8	0,3	n.n.

Tab. A.4.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cu	Ni	Sb
MA-113473_2	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	35,0	n.n.	3,8	42,6	3,5	0,8	11,9	n.n.	0,6	0,5	0,2	1,2	n.n.	n.n.
MA-113470_1	FNr. 4106	Vorplatz Ofen 11	53	39,8	n.n.	4,2	37,1	3,4	0,9	12,5	n.n.	1,3	0,5	0,2	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091447_1	FNr. 595	Halde 1	5	34,1	0,1	3,8	41,6	0,9	0,5	14,1	0,4	2,8	0,6	0,5	0,5	n.n.	n.n.
MA-091450_1	FNr. 1332	Halde 1	5	20,6	0,3	4,5	68,0	0,7	n.n.	2,8	n.n.	n.n.	0,3	0,4	2,5	n.n.	n.n.
MA-091452_1	FNr. 558	Halde 1	6	40,0	n.n.	4,6	39,3	2,2	1,0	9,9	0,3	1,3	0,6	0,3	0,5	n.n.	n.n.
MA-091455_1	FNr. 650	Halde 1	6	29,6	0,6	5,4	55,1	4,0	n.n.	1,6	0,5	3,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091461_1	FNr. 1029	Halde 1	7	32,0	0,2	3,7	43,3	3,2	0,6	9,5	0,4	0,8	0,5	0,5	4,7	n.n.	0,6
MA-091462_1	FNr. 1179	Halde 1	7	42,6	0,5	9,7	26,4	2,1	0,7	9,8	1,2	5,2	0,6	0,3	1,0	n.n.	n.n.
MA-092821_1	FNr. 2976	Halde 2	7	35,1	n.n.	4,3	36,7	3,1	1,1	16,3	n.n.	3,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_1	FNr. 2267	Halde 2	17	40,3	0,1	3,7	32,7	7,0	0,3	12,6	n.n.	0,2	0,1	0,4	2,7	n.n.	n.n.
MA-091513_1	FNr. 1936	Halde 2	22	36,1	n.n.	4,8	36,5	5,0	1,2	13,8	n.n.	1,9	0,6	0,2	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092825_1	FNr. 3293	Halde 2	21b Pl. 648	36,1	n.n.	3,4	40,2	3,6	0,8	12,6	0,6	1,2	0,3	0,3	0,9	n.n.	n.n.
MA-091493_1	FNr. 5053	Halde 3	22	38,4	n.n.	3,7	38,6	3,8	0,3	12,3	n.n.	2,0	n.n.	0,3	0,6	n.n.	n.n.
MA-091494_1	FNr. 4500	Halde 3	23	38,7	n.n.	4,0	36,3	3,6	0,8	12,8	0,4	1,6	0,6	0,3	0,7	n.n.	n.n.
MA-091496_1	FNr. 4543	Halde 3	24	51,2	n.n.	8,2	26,4	2,6	n.n.	7,8	0,3	3,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091471_1	FNr. 3042	Halde 3	2	36,6	n.n.	3,6	43,5	3,2	0,6	9,7	0,4	1,3	0,4	0,1	0,8	n.n.	n.n.
MA-091473_1	FNr. 4558	Halde 3	2	40,9	n.n.	2,4	27,7	7,0	0,3	19,8	n.n.	0,1	0,3	0,3	1,1	n.n.	n.n.
MA-091479_1	FNr. 4433	Halde 3	9	32,8	0,3	5,3	44,7	1,3	0,4	11,5	0,1	2,9	0,5	0,2	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091441_1	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	34,9	n.n.	4,2	45,2	2,0	1,0	8,7	0,6	1,3	0,6	0,4	1,0	n.n.	n.n.

Tab. A.5.: EDX-Analysen von Olivinen ausgewählter Schlacken vom Kupferschmelzplatz S1. Angaben in Gewichtsprozent (n.n. = nicht nachgewiesen).

Probnummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cu
MA-092830_2	FNr. 981	Röstbett 1	RB1-3	28,1	n.n.	n.n.	62,3	4,6	1,3	3,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092830_3	FNr. 981	Röstbett 1	RB1-3	28,6	n.n.	0,2	60,1	6,3	1,2	3,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092830_4	FNr. 981	Röstbett 1	RB1-3	28,2	n.n.	0,2	61,2	6,1	1,3	3,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092830_5	FNr. 981	Röstbett 1	RB1-3	28,2	n.n.	n.n.	61,8	5,2	1,3	3,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092830_6	FNr. 981	Röstbett 1	RB1-3	28,5	n.n.	0,1	61,0	6,0	1,3	3,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092831_2	FNr. 1219	Röstbett 2	21 Pl. 210	32,1	n.n.	n.n.	44,6	18,1	1,1	4,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092831_3	FNr. 1219	Röstbett 2	21 Pl. 210	27,9	n.n.	n.n.	59,4	5,9	1,5	5,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092831_4	FNr. 1219	Röstbett 2	21 Pl. 210	31,3	n.n.	n.n.	48,3	15,7	1,3	3,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092835_2	FNr. 1144	Röstbett 3	48	30,6	n.n.	n.n.	52,6	12,2	1,4	3,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092835_3	FNr. 1144	Röstbett 3	48	29,8	n.n.	n.n.	53,8	10,0	1,4	5,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092835_4	FNr. 1144	Röstbett 3	48	29,5	n.n.	n.n.	54,4	9,3	1,5	5,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092836_2	FNr. 4162	Röstbett 4	16 (=9?) Pl. 291	29,2	n.n.	1,0	54,6	8,3	1,1	2,4	n.n.	n.n.	0,2	n.n.	3,1
MA-092836_3	FNr. 4162	Röstbett 4	16 (=9?) Pl. 291	28,6	n.n.	0,2	57,6	7,1	1,2	4,3	n.n.	n.n.	n.n.	0,2	0,6
MA-092836_4	FNr. 4162	Röstbett 4	16 (=9?) Pl. 291	29,8	n.n.	n.n.	55,9	10,3	1,3	2,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092838_2	FNr. 641	Röstbett 5	2 Pl. 89	29,6	n.n.	n.n.	56,8	9,3	1,6	2,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092838_3	FNr. 641	Röstbett 5	2 Pl. 89	29,4	n.n.	n.n.	58,2	8,2	1,6	2,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092838_4	FNr. 641	Röstbett 5	2 Pl. 89	29,7	n.n.	n.n.	57,3	8,7	1,5	2,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092838_5	FNr. 641	Röstbett 5	2 Pl. 89	29,4	n.n.	n.n.	55,5	10,8	1,6	2,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092841_2	FNr. 4409	Röstbett 7	44	32,0	n.n.	0,0	54,7	8,1	1,3	3,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092841_3	FNr. 4409	Röstbett 7	44	31,6	n.n.	n.n.	54,5	9,1	1,4	3,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092841_4	FNr. 4409	Röstbett 7	44	31,7	n.n.	0,1	55,2	8,6	1,3	3,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092841_5	FNr. 4409	Röstbett 7	44	31,4	n.n.	n.n.	56,0	9,6	1,2	1,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092841_6	FNr. 4409	Röstbett 7	44	31,3	n.n.	n.n.	56,9	8,9	1,1	1,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092843_2	FNr. 1200	Röstbett 7	58	29,5	n.n.	n.n.	56,9	6,6	1,0	6,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092843_3	FNr. 1200	Röstbett 7	58	29,0	n.n.	n.n.	57,7	5,9	1,2	6,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092843_4	FNr. 1200	Röstbett 7	58	30,3	n.n.	n.n.	55,0	8,2	1,0	5,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092843_5	FNr. 1200	Röstbett 7	58	29,9	n.n.	0,1	56,3	8,2	1,0	4,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092845_2	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	30,6	n.n.	n.n.	51,3	12,7	1,4	4,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092845_3	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	30,3	n.n.	n.n.	52,4	12,0	1,3	4,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092845_4	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	29,5	n.n.	n.n.	49,9	7,0	1,2	12,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092850_3	FNr. 3589	Röstbett 9	26 Pl. 691	29,7	n.n.	n.n.	56,2	9,7	1,4	3,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092850_4	FNr. 3589	Röstbett 9	26 Pl. 691	28,2	n.n.	n.n.	59,8	6,3	1,5	3,9	n.n.	n.n.	0,3	n.n.	n.n.
MA-092850_5	FNr. 3589	Röstbett 9	26 Pl. 691	29,2	n.n.	n.n.	57,1	9,4	1,4	3,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092854_2	FNr. 1772	Vorplatz Ofen 1/2	12 Pl. 68	30,9	n.n.	0,2	54,2	7,4	1,3	5,8	n.n.	0,2	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092854_3	FNr. 1772	Vorplatz Ofen 1/2	12 Pl. 68	31,2	n.n.	n.n.	54,8	7,2	1,2	5,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092853_4	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	29,6	n.n.	n.n.	56,2	9,0	1,3	3,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092853_5	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	29,6	n.n.	n.n.	55,8	10,1	1,3	3,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

Tab. A.5.: Fortsetzung

Probnummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cu
MA-092853_6	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	29,6	n.n.	n.n.	55,6	10,3	1,4	3,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092853_7	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	29,0	n.n.	n.n.	58,0	6,8	1,3	4,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092853_8	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	28,2	n.n.	n.n.	58,5	5,4	1,4	6,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113463_2	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	28,6	n.n.	0,2	59,0	7,4	2,0	2,6	n.n.	n.n.	0,3	n.n.	n.n.
MA-113463_2	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	32,0	n.n.	3,1	51,1	2,9	1,7	7,4	n.n.	0,7	0,4	0,2	0,5
MA-113463_3	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	28,5	n.n.	0,1	60,3	6,1	2,0	2,7	n.n.	n.n.	0,3	n.n.	n.n.
MA-101402_2	FNr. 5064	Ofen 4	Westwand	30,3	n.n.	n.n.	60,4	6,6	1,4	1,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-101402_3	FNr. 5064	Ofen 4	Westwand	30,9	n.n.	n.n.	58,2	7,9	1,7	1,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092856_2	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	28,2	n.n.	n.n.	59,2	6,8	1,2	3,0	n.n.	n.n.	n.n.	0,4	1,2
MA-092856_3	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	28,7	n.n.	0,2	60,5	6,4	1,1	2,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,3
MA-092856_4	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	29,2	n.n.	n.n.	56,2	9,9	1,2	3,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092859_2	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	31,4	n.n.	n.n.	50,4	13,8	1,3	3,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092859_3	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	31,2	n.n.	n.n.	50,8	13,3	1,2	3,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092859_4	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	30,1	2,0	n.n.	52,7	12,2	1,4	1,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092860_2	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	28,5	n.n.	n.n.	61,7	4,3	1,8	3,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092860_3	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	28,3	n.n.	n.n.	62,0	5,1	1,8	2,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092860_4	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	29,2	n.n.	n.n.	58,6	7,4	1,6	3,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092862_2	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	28,8	n.n.	0,4	56,5	5,9	1,2	7,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092862_3	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	28,8	n.n.	0,5	51,1	4,4	1,3	13,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113467_2	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	29,9	n.n.	0,1	56,5	8,4	1,2	3,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113467_3	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	29,4	n.n.	0,2	57,2	8,2	1,1	3,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113467_4	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	30,5	n.n.	0,1	52,4	11,9	1,1	4,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113472_2	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	29,1	n.n.	0,1	57,9	8,0	1,5	3,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113472_3	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	29,3	n.n.	0,1	57,3	8,9	1,4	3,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113472_4	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	27,8	n.n.	0,2	61,8	4,3	1,5	4,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113473_3	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	28,4	n.n.	0,3	60,2	5,5	1,3	4,2	n.n.	0,2	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113473_4	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	28,2	n.n.	0,4	60,1	5,1	1,3	4,5	n.n.	0,3	0,0	0,0	n.n.
MA-113473_5	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	27,9	n.n.	0,1	60,4	6,2	1,2	4,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113470_2	FNr. 4106	Vorplatz Ofen 11	53	31,2	n.n.	1,9	56,7	4,4	1,4	2,5	n.n.	1,4	0,4	n.n.	n.n.
MA-113470_3	FNr. 4106	Vorplatz Ofen 11	53	29,7	n.n.	1,2	61,2	2,3	1,4	3,0	n.n.	1,0	0,2	n.n.	n.n.
MA-113470_4	FNr. 4106	Vorplatz Ofen 11	53	28,2	n.n.	1,1	62,6	2,4	1,4	3,0	n.n.	0,4	0,2	n.n.	0,6
MA-091447_2	FNr. 595	Halde 1	5	28,5	n.n.	0,6	60,0	3,5	0,8	5,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1,1
MA-091447_3	FNr. 595	Halde 1	5	27,9	n.n.	0,2	61,2	2,2	1,0	7,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091447_4	FNr. 595	Halde 1	5	29,7	n.n.	1,4	58,1	2,3	0,8	6,5	n.n.	1,2	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091450_2	FNr. 1332	Halde 1	5	25,1	n.n.	6,7	59,3	1,6	n.n.	1,2	1,1	n.n.	3,0	0,2	2,0
MA-091450_3	FNr. 1332	Halde 1	5	28,5	n.n.	0,2	62,2	5,5	1,1	2,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091450_4	FNr. 1332	Halde 1	5	20,2	n.n.	3,0	68,0	4,0	0,7	0,9	n.n.	n.n.	0,6	0,2	2,4

Tab. A.5.: Fortsetzung

Probnummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cu
MA-091450_5	FNr. 1332	Halde 1	5	29,9	n.n.	n.n.	59,2	6,7	1,0	2,1	n.n.	n.n.	0,1	n.n.	1,0
MA-091450_6	FNr. 1332	Halde 1	5	30,3	n.n.	n.n.	53,3	12,3	n.n.	4,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091450_7a	FNr. 1332	Halde 1	5	29,1	n.n.	n.n.	57,9	8,6	1,0	3,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091450_7b	FNr. 1332	Halde 1	5	32,7	n.n.	n.n.	40,1	19,6	1,1	6,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091450_8	FNr. 1332	Halde 1	5	29,6	n.n.	n.n.	56,4	9,6	n.n.	4,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091452_2	FNr. 558	Halde 1	6	35,3	n.n.	2,5	51,5	3,6	1,4	3,6	n.n.	1,6	0,5	0,1	n.n.
MA-091452_3	FNr. 558	Halde 1	6	35,9	n.n.	2,7	50,8	4,0	1,4	3,3	n.n.	1,5	0,3	0,1	n.n.
MA-091452_4	FNr. 558	Halde 1	6	31,0	n.n.	1,2	58,2	3,6	1,7	2,9	n.n.	1,1	0,3	n.n.	n.n.
MA-091452_5	FNr. 558	Halde 1	6	28,4	n.n.	n.n.	62,9	5,1	1,6	2,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091455_2	FNr. 650	Halde 1	6	28,4	n.n.	n.n.	60,2	5,0	1,5	5,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091455_3	FNr. 650	Halde 1	6	28,4	n.n.	0,3	64,4	3,1	0,7	3,0	n.n.	0,2	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091455_4	FNr. 650	Halde 1	6	9,5	n.n.	n.n.	79,1	1,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,3	9,7
MA-091461_2	FNr. 1029	Halde 1	7	33,8	n.n.	n.n.	52,5	7,9	1,5	4,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091461_3	FNr. 1029	Halde 1	7	34,6	n.n.	n.n.	48,8	11,0	1,3	4,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091461_4	FNr. 1029	Halde 1	7	34,2	n.n.	0,3	49,0	9,4	1,4	5,3	n.n.	0,3	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091462_2	FNr. 1179	Halde 1	7	35,3	n.n.	0,1	43,4	14,4	1,4	5,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091462_3	FNr. 1179	Halde 1	7	35,7	n.n.	n.n.	42,4	13,5	1,4	6,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091462_4	FNr. 1179	Halde 1	7	36,2	n.n.	0,0	43,0	13,8	1,3	5,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091462_5	FNr. 1179	Halde 1	7	28,9	n.n.	0,4	44,6	3,9	1,3	20,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092821_2	FNr. 2976	Halde 2	7	28,5	n.n.	0,8	41,4	2,9	1,5	23,9	n.n.	1,0	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092821_3	FNr. 2976	Halde 2	7	29,1	n.n.	n.n.	49,7	3,3	1,5	16,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_2	FNr. 2267	Halde 2	17	30,0	n.n.	0,5	58,4	4,5	1,3	5,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_3	FNr. 2267	Halde 2	17	36,9	n.n.	4,4	34,9	3,8	n.n.	11,4	n.n.	n.n.	n.n.	0,5	8,1
MA-091511_4	FNr. 2267	Halde 2	17	35,3	n.n.	8,4	34,8	1,3	n.n.	9,2	0,6	4,7	3,2	0,8	1,9
MA-091511_5	FNr. 2267	Halde 2	17	30,1	n.n.	n.n.	55,5	11,3	1,2	1,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_6	FNr. 2267	Halde 2	17	30,4	n.n.	n.n.	56,4	10,1	1,1	2,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_7	FNr. 2267	Halde 2	17	29,0	n.n.	n.n.	60,3	6,7	1,1	2,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_8	FNr. 2267	Halde 2	17	22,0	n.n.	4,6	55,2	4,3	n.n.	1,2	n.n.	n.n.	3,2	1,3	8,2
MA-091511_9	FNr. 2267	Halde 2	17	29,6	n.n.	n.n.	59,5	8,9	n.n.	2,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091513_2	FNr. 1936	Halde 2	22	32,1	n.n.	n.n.	44,8	16,7	1,8	4,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091513_3	FNr. 1936	Halde 2	22	31,6	n.n.	n.n.	48,8	13,2	1,8	4,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091513_4	FNr. 1936	Halde 2	22	33,1	n.n.	3,4	37,7	4,2	1,3	18,0	n.n.	1,8	0,4	0,1	n.n.
MA-091513_5	FNr. 1936	Halde 2	22	29,8	n.n.	1,9	29,2	4,5	21,0	6,7	n.n.	0,3	0,1	0,2	6,2
MA-091513_6	FNr. 1936	Halde 2	22	39,2	0,2	7,3	28,2	2,0	1,0	17,4	0,6	3,3	0,9	0,0	n.n.
MA-092825_2	FNr. 3293	Halde 2	21b Pl. 648	29,3	n.n.	n.n.	58,6	8,2	1,1	2,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092825_3	FNr. 3293	Halde 2	21b Pl. 648	29,1	n.n.	n.n.	57,2	10,0	1,2	2,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091493_2	FNr. 5053	Halde 3	22	36,6	n.n.	0,3	42,2	10,6	0,8	9,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

Tab. A.5.: Fortsetzung

Probnummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cu
MA-091493_3	FNr. 5053	Halde 3	22	30,5	n.n.	n.n.	55,7	10,3	1,2	2,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091493_4	FNr. 5053	Halde 3	22	31,5	n.n.	n.n.	51,9	13,5	1,2	1,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091493_5	FNr. 5053	Halde 3	22	33,0	n.n.	n.n.	44,5	19,5	1,1	1,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091494_2	FNr. 4500	Halde 3	23	31,8	n.n.	1,1	51,0	7,9	1,2	6,3	n.n.	0,7	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091494_3	FNr. 4500	Halde 3	23	31,6	n.n.	1,1	51,5	7,3	1,1	6,7	n.n.	0,7	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091494_4	FNr. 4500	Halde 3	23	31,3	n.n.	1,1	51,3	7,8	1,1	6,5	n.n.	0,8	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091471_2	FNr. 3042	Halde 3	2	41,6	n.n.	5,1	37,1	3,3	0,8	8,3	n.n.	3,1	0,7	n.n.	n.n.
MA-091471_3	FNr. 3042	Halde 3	2	34,3	n.n.	3,2	50,5	4,0	1,2	3,8	n.n.	2,7	0,3	n.n.	n.n.
MA-091471_4	FNr. 3042	Halde 3	2	34,8	n.n.	3,3	49,1	3,3	1,1	7,0	n.n.	1,4	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091473_2	FNr. 4558	Halde 3	2	28,8	n.n.	0,4	54,7	7,7	1,8	5,9	n.n.	0,4	0,4	n.n.	n.n.
MA-091473_3	FNr. 4558	Halde 3	2	29,8	n.n.	n.n.	51,8	13,5	1,8	3,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091473_4	FNr. 4558	Halde 3	2	31,1	n.n.	n.n.	51,2	12,8	1,4	3,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091479_2	FNr. 4433	Halde 3	9	19,9	n.n.	2,1	57,9	n.n.	n.n.	13,5	n.n.	6,6	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091479_3	FNr. 4433	Halde 3	9	28,8	n.n.	n.n.	62,2	6,9	n.n.	2,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091479_4	FNr. 4433	Halde 3	9	20,9	n.n.	7,2	60,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,7	0,4	10,8
MA-091479_5	FNr. 4433	Halde 3	9	28,0	n.n.	n.n.	62,1	4,6	1,5	3,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091441_2	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	32,8	n.n.	2,2	53,3	3,0	1,3	5,3	n.n.	1,5	0,5	0,1	n.n.
MA-091441_3	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	29,3	n.n.	0,2	61,4	5,3	1,6	2,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091441_4	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	28,6	n.n.	0,3	62,6	3,3	1,6	3,2	n.n.	0,4	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091441_5	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	29,2	n.n.	n.n.	61,7	5,4	1,5	2,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

Tab. A.6.: EDX-Analysen von Pyroxenen ausgewählter Schlacken vom Kupferschmelzplatz S1. Angaben in Gewichtsprozent (n.n. = nicht nachgewiesen).

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cu
MA-092830_7	FNr. 981	Röstbett 1	RB1-3	46,4	n.n.	2,4	25,7	3,0	n.n.	22,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092830_8	FNr. 981	Röstbett 1	RB1-3	43,2	n.n.	2,4	29,2	2,9	n.n.	22,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092830_9	FNr. 981	Röstbett 1	RB1-3	44,3	n.n.	2,0	27,4	3,6	0,4	22,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092830_10	FNr. 981	Röstbett 1	RB1-3	46,3	n.n.	1,5	23,6	5,3	n.n.	23,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092831_5	FNr. 1219	Röstbett 2	21 Pl. 210	45,9	n.n.	1,5	20,7	6,6	0,6	24,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092831_6	FNr. 1219	Röstbett 2	21 Pl. 210	44,2	n.n.	2,5	23,7	5,4	0,6	23,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092831_7	FNr. 1219	Röstbett 2	21 Pl. 210	43,8	n.n.	2,6	24,4	4,8	0,7	23,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092835_5	FNr. 1144	Röstbett 3	48	44,8	n.n.	2,6	23,6	4,6	n.n.	24,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092835_6	FNr. 1144	Röstbett 3	48	46,4	n.n.	1,7	20,9	6,2	n.n.	24,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092835_7	FNr. 1144	Röstbett 3	48	46,0	n.n.	1,4	20,9	6,4	n.n.	25,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092836_5	FNr. 4162	Röstbett 4	16 (=9?) Pl. 291	45,1	n.n.	2,0	23,9	4,5	0,5	23,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092836_6	FNr. 4162	Röstbett 4	16 (=9?) Pl. 291	45,6	n.n.	1,8	24,4	4,2	n.n.	24,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092836_7	FNr. 4162	Röstbett 4	16 (=9?) Pl. 291	45,0	n.n.	2,2	23,3	4,4	n.n.	25,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092841_7	FNr. 4409	Röstbett 7	44	46,5	n.n.	1,8	21,3	5,5	n.n.	24,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092841_8	FNr. 4409	Röstbett 7	44	46,5	n.n.	1,9	21,4	5,7	n.n.	24,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092841_9	FNr. 4409	Röstbett 7	44	46,8	n.n.	1,8	21,6	5,3	n.n.	24,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092841_10	FNr. 4409	Röstbett 7	44	46,4	n.n.	1,8	24,2	4,4	n.n.	23,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092841_11	FNr. 4409	Röstbett 7	44	44,6	n.n.	2,6	27,6	2,8	n.n.	22,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092845_5	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	46,8	n.n.	1,7	18,8	6,9	0,3	25,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092845_6	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	46,4	n.n.	1,4	19,6	6,8	0,6	25,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092845_7	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	43,8	n.n.	2,6	24,4	4,2	0,5	24,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092850_6	FNr. 3589	Röstbett 9	26 Pl. 691	43,2	n.n.	2,4	27,4	2,6	0,7	23,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092850_7	FNr. 3589	Röstbett 9	26 Pl. 691	44,3	n.n.	2,4	26,3	3,1	0,7	23,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092850_8	FNr. 3589	Röstbett 9	26 Pl. 691	44,0	n.n.	2,2	26,2	3,3	0,6	23,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092853_9	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	39,9	n.n.	3,3	31,6	1,4	0,5	22,5	n.n.	n.n.	0,7	n.n.	n.n.
MA-092853_10	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	41,8	n.n.	5,4	27,5	1,5	n.n.	21,4	0,5	1,4	0,7	n.n.	n.n.
MA-092853_11	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	39,6	n.n.	3,8	31,5	1,0	0,7	22,0	n.n.	0,8	0,4	0,1	n.n.
MA-092853_12	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	41,6	n.n.	3,4	29,0	1,7	n.n.	23,7	n.n.	n.n.	0,6	n.n.	n.n.
MA-092853_13	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	41,7	n.n.	4,0	28,4	1,4	n.n.	23,0	n.n.	0,8	0,6	n.n.	n.n.
MA-113468_3	FNr. 706	Ofen 3	Nordwand, abgebr.	38,4	0,6	6,4	20,7	7,4	1,3	23,5	n.n.	0,3	0,4	n.n.	1,0
MA-113468_4	FNr. 706	Ofen 3	Nordwand, abgebr.	41,4	0,3	7,9	20,2	5,1	1,1	19,9	n.n.	2,0	0,5	n.n.	1,5
MA-113468_5	FNr. 706	Ofen 3	Nordwand, abgebr.	37,3	n.n.	6,4	23,4	6,1	1,2	23,6	n.n.	0,8	n.n.	0,1	1,2
MA-113471_3	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	40,2	0,3	4,7	19,6	8,8	0,7	23,2	0,6	0,4	0,5	n.n.	1,0
MA-113471_4	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	40,0	n.n.	4,7	20,5	9,3	0,7	22,7	0,6	n.n.	0,6	n.n.	0,9
MA-113471_5	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	42,1	n.n.	4,7	22,5	6,3	0,8	22,5	n.n.	1,0	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113471_6	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	40,8	n.n.	3,0	21,5	7,5	0,7	26,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113471_7	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	39,2	n.n.	3,4	22,6	6,8	0,8	26,8	n.n.	n.n.	0,3	n.n.	n.n.

Tab. A.6.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cu
MA-101419_2	FNr. 5267	Ofen 5	ältere Phase, Nordwand	39,7	n.n.	4,4	19,1	9,5	0,8	23,8	n.n.	n.n.	1,1	n.n.	1,6
MA-101419_3	FNr. 5267	Ofen 5	ältere Phase, Nordwand	41,3	n.n.	4,3	16,5	10,4	0,6	24,0	n.n.	n.n.	1,1	n.n.	1,7
MA-101419_4	FNr. 5267	Ofen 5	ältere Phase, Nordwand	39,3	n.n.	5,1	19,5	9,3	0,6	24,0	n.n.	n.n.	1,0	n.n.	1,2
MA-092856_5	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	45,7	n.n.	1,5	26,3	3,8	n.n.	22,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092856_6	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	43,3	0,2	2,0	29,6	1,5	n.n.	23,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092856_7	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	44,6	0,2	1,8	29,4	1,9	n.n.	22,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092859_5	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	43,0	n.n.	3,3	23,6	5,1	0,6	24,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092859_6	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	41,8	n.n.	3,6	26,4	3,5	0,6	24,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092859_7	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	44,1	n.n.	2,8	21,9	5,8	0,5	24,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092860_5	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	47,1	n.n.	0,9	21,6	6,3	0,7	23,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092860_6	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	47,1	n.n.	1,3	20,1	6,8	0,6	24,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092860_7	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	46,8	n.n.	1,3	21,8	5,9	0,7	23,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092862_4	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	43,6	n.n.	2,9	27,1	2,7	n.n.	23,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092862_5	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	43,7	n.n.	2,7	26,4	3,0	n.n.	24,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113467_5	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	43,5	n.n.	2,4	24,9	4,6	0,6	23,6	n.n.	n.n.	0,3	n.n.	n.n.
MA-113467_6	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	42,4	n.n.	2,5	27,1	3,4	0,6	23,5	n.n.	n.n.	0,5	n.n.	n.n.
MA-113467_7	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	43,7	n.n.	2,3	24,3	4,9	0,6	23,8	n.n.	n.n.	0,4	n.n.	n.n.
MA-113472_5	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	43,9	n.n.	2,5	25,0	4,0	0,6	23,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113472_6	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	44,3	n.n.	2,5	24,0	4,5	0,6	24,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113472_7	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	44,4	n.n.	2,4	24,2	4,4	0,6	24,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113470_5	FNr. 4106	Vorplatz Ofen 11	53	44,9	n.n.	1,6	25,7	5,8	0,8	21,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113470_6	FNr. 4106	Vorplatz Ofen 11	53	45,6	n.n.	1,5	25,0	6,0	0,9	20,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113470_7	FNr. 4106	Vorplatz Ofen 11	53	44,9	n.n.	1,9	25,9	5,6	0,7	21,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091450_9	FNr. 1332	Halde 1	5	42,4	n.n.	2,0	31,5	0,8	n.n.	21,8	0,4	n.n.	1,0	n.n.	n.n.
MA-091455_5	FNr. 650	Halde 1	6	40,5	n.n.	3,0	31,3	2,2	n.n.	22,5	n.n.	n.n.	0,6	n.n.	n.n.
MA-091455_6	FNr. 650	Halde 1	6	39,9	0,5	3,6	29,7	1,5	n.n.	23,1	n.n.	0,9	0,6	n.n.	n.n.
MA-091455_7	FNr. 650	Halde 1	6	46,5	0,6	6,8	23,0	1,3	n.n.	17,4	n.n.	3,7	0,6	n.n.	n.n.
MA-091455_8	FNr. 650	Halde 1	6	45,2	n.n.	1,9	24,1	4,8	n.n.	23,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091455_9	FNr. 650	Halde 1	6	48,2	n.n.	2,9	32,6	2,2	0,8	11,4	n.n.	1,8	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091455_10	FNr. 650	Halde 1	6	46,4	n.n.	1,8	24,9	6,0	n.n.	20,0	n.n.	1,0	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091455_11	FNr. 650	Halde 1	6	42,2	n.n.	5,5	28,6	2,8	n.n.	15,0	1,3	1,6	1,4	n.n.	1,6
MA-091455_12	FNr. 650	Halde 1	6	46,7	n.n.	1,3	23,3	6,5	n.n.	21,7	n.n.	0,6	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091461_5	FNr. 1029	Halde 1	7	49,1	n.n.	1,6	17,3	6,5	n.n.	25,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091461_6	FNr. 1029	Halde 1	7	49,8	n.n.	1,4	17,0	7,0	n.n.	24,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091461_7	FNr. 1029	Halde 1	7	46,9	n.n.	2,8	21,3	3,7	n.n.	25,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_10	FNr. 2267	Halde 2	17	46,2	n.n.	1,2	25,3	4,9	n.n.	22,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_11	FNr. 2267	Halde 2	17	49,7	0,7	6,0	21,7	0,8	n.n.	15,3	n.n.	0,9	0,6	0,4	3,9

Tab. A.6.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cu
MA-091511_12	FNr. 2267	Halde 2	17	47,4	n.n.	1,2	20,8	6,4	n.n.	24,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_13	FNr. 2267	Halde 2	17	47,0	n.n.	1,3	22,4	6,4	n.n.	22,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_14	FNr. 2267	Halde 2	17	47,2	n.n.	1,4	21,5	6,5	n.n.	23,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_15	FNr. 2267	Halde 2	17	48,3	n.n.	1,1	18,8	7,3	n.n.	24,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_16	FNr. 2267	Halde 2	17	42,2	0,7	3,5	29,6	0,7	n.n.	21,3	0,8	n.n.	1,2	n.n.	n.n.
MA-092825_4	FNr. 3293	Halde 2	21b Pl. 648	40,4	n.n.	3,3	31,7	1,4	0,6	22,0	n.n.	n.n.	0,5	0,1	n.n.
MA-091493_6	FNr. 5053	Halde 3	22	47,2	n.n.	1,5	21,5	6,0	n.n.	23,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091493_7	FNr. 5053	Halde 3	22	45,9	n.n.	2,1	23,4	5,1	n.n.	23,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091493_8	FNr. 5053	Halde 3	22	46,3	n.n.	1,9	22,8	5,7	n.n.	23,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091493_9	FNr. 5053	Halde 3	22	46,5	n.n.	1,8	22,3	5,0	n.n.	24,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091494_5	FNr. 4500	Halde 3	23	41,6	n.n.	1,9	29,3	4,9	0,8	20,6	n.n.	0,9	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091494_6	FNr. 4500	Halde 3	23	42,0	n.n.	2,2	29,8	3,9	0,7	20,6	n.n.	0,9	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091494_7	FNr. 4500	Halde 3	23	41,5	n.n.	2,1	30,1	4,0	0,7	20,7	n.n.	0,9	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091473_5	FNr. 4558	Halde 3	2	47,6	n.n.	1,8	16,1	9,3	n.n.	25,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091473_6	FNr. 4558	Halde 3	2	47,2	n.n.	1,9	17,0	8,6	n.n.	25,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091473_7	FNr. 4558	Halde 3	2	49,6	n.n.	1,8	14,3	11,3	n.n.	22,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

Tab. A.7.: EDX-Punktanalysen von Gläsern in ausgewählten Schlacken vom Kupferschmelzplatz S1. Angaben in Gewichtsprozent (n.n. = nicht nachgewiesen).

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cu	Sb
MA-092831_8	FNr. 1219	Röstbett 2	21 Pl. 210	37,4	n.n.	17,0	31,4	0,6	0,5	3,0	1,2	7,5	0,9	0,1	0,4	n.n.
MA-092835_8	FNr. 1144	Röstbett 3	48	32,7	n.n.	14,5	42,7	1,0	n.n.	3,5	0,7	0,6	1,6	0,1	2,5	n.n.
MA-092836_8	FNr. 4162	Röstbett 4	16 (=9?) Pl. 291	54,0	n.n.	20,7	2,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	22,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092838_6	FNr. 641	Röstbett 5	2 Pl. 89	38,1	0,3	3,9	32,9	3,8	0,8	19,3	n.n.	0,3	0,6	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092841_12	FNr. 4409	Röstbett 7	44	34,7	0,2	10,5	44,8	1,2	n.n.	1,9	1,3	2,0	1,6	0,6	1,3	n.n.
MA-092843_6	FNr. 1200	Röstbett 7	58	47,9	0,1	22,1	9,9	n.n.	n.n.	0,3	0,6	18,6	n.n.	0,4	n.n.	n.n.
MA-092850_8	FNr. 3589	Röstbett 9	26 Pl. 691	53,0	n.n.	21,1	5,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	20,5	n.n.	n.n.	0,4	n.n.
MA-092854_4	FNr. 1772	Vorplatz Ofen 1/2	12 Pl. 68	36,4	0,3	4,5	36,3	2,1	n.n.	17,6	0,4	1,3	0,5	0,5	n.n.	n.n.
MA-092853_14	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	53,2	0,4	21,3	4,2	0,3	n.n.	n.n.	0,2	19,9	n.n.	n.n.	0,4	n.n.
MA-113463_4	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	39,2	0,6	7,8	28,4	0,8	0,7	19,2	0,4	0,7	0,8	0,5	1,0	n.n.
MA-113468_6	FNr. 706	Ofen 3	Nordwand, abgebr.	50,2	0,6	10,3	10,9	1,9	0,8	15,5	n.n.	4,7	1,0	n.n.	4,2	n.n.
MA-113469_2	FNr. 1895	Ofen 3	Ostwand	47,8	0,6	14,1	14,5	2,7	1,1	12,2	1,1	4,5	0,9	n.n.	0,5	n.n.
MA-113471_8	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	53,8	0,5	11,2	12,0	1,8	0,6	12,3	0,6	5,1	1,1	n.n.	1,0	n.n.
MA-101402_4	FNr. 5064	Ofen 4	Westwand	45,5	n.n.	6,9	23,7	3,8	0,9	17,0	n.n.	1,3	0,9	n.n.	n.n.	n.n.
MA-101419_5	FNr. 5267	Ofen 5	ältere Phase, Nordwand	42,4	n.n.	5,9	11,4	4,4	0,9	26,3	0,3	2,8	1,0	0,2	4,4	n.n.
MA-101406_2	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	52,5	n.n.	6,9	18,7	2,6	0,7	11,3	0,7	5,1	0,8	n.n.	0,6	n.n.
MA-101407_2	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	56,0	n.n.	4,6	6,9	4,1	1,1	19,4	0,8	4,2	0,9	0,1	1,9	n.n.
MA-092856_8	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	50,6	0,4	24,8	10,4	0,8	n.n.	1,7	0,4	10,2	0,1	0,1	0,5	n.n.
MA-092859_8	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	49,9	n.n.	21,8	9,1	n.n.	n.n.	3,7	0,4	14,3	0,2	n.n.	0,6	n.n.
MA-092860_8	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	15,0	1,1	14,7	61,5	n.n.	n.n.	3,1	n.n.	n.n.	1,5	1,0	2,1	n.n.
MA-092862_6	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	24,1	n.n.	9,6	51,4	0,2	n.n.	2,0	0,3	2,9	0,5	2,0	6,8	0,3
MA-113472_8	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	41,3	0,5	6,6	32,3	0,7	0,7	13,2	0,7	3,0	1,0	0,1	n.n.	n.n.
MA-113473_6	FNr. 4160	Vorplatz Ofen 11	17	41,0	n.n.	3,5	29,7	1,3	0,6	22,2	0,2	1,1	0,4	0,0	n.n.	n.n.
MA-091447_5	FNr. 595	Halde 1	5	41,2	0,5	3,5	29,4	1,1	0,5	22,6	n.n.	0,7	0,5	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091450_10	FNr. 1332	Halde 1	5	53,1	n.n.	16,1	17,5	0,4	n.n.	10,8	1,5	0,4	0,3	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091452_6	FNr. 558	Halde 1	6	44,9	0,2	3,7	24,2	3,5	0,8	20,9	0,4	0,8	0,4	0,2	n.n.	n.n.
MA-091455_13	FNr. 650	Halde 1	6	54,6	n.n.	19,6	3,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	21,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091461_8	FNr. 1029	Halde 1	7	51,9	n.n.	19,0	7,0	1,6	n.n.	5,6	1,6	13,0	0,3	0,1	n.n.	n.n.
MA-091462_6	FNr. 1179	Halde 1	7	47,7	n.n.	8,5	18,3	2,4	n.n.	17,3	1,8	2,6	1,0	0,3	n.n.	n.n.
MA-092821_4	FNr. 2976	Halde 2	7	40,6	0,3	13,2	25,4	n.n.	n.n.	4,0	1,6	13,1	1,3	0,5	n.n.	n.n.
MA-091511_17	FNr. 2267	Halde 2	17	48,6	0,4	7,8	24,0	1,1	0,1	10,7	0,2	3,0	0,4	0,3	3,4	n.n.
MA-091493_10	FNr. 5053	Halde 3	22	63,2	n.n.	18,2	6,1	1,7	n.n.	n.n.	0,9	9,7	0,2	0,1	n.n.	n.n.
MA-091494_8	FNr. 4500	Halde 3	23	45,5	n.n.	14,3	18,5	1,0	0,5	5,7	n.n.	13,9	n.n.	0,2	0,2	n.n.
MA-091471_5	FNr. 3042	Halde 3	2	41,9	n.n.	5,0	29,4	1,7	0,5	17,7	0,4	2,0	0,3	0,3	0,8	n.n.
MA-091479_6	FNr. 4433	Halde 3	9	47,6	n.n.	19,0	15,2	0,4	0,3	1,1	0,2	16,0	n.n.	0,0	0,3	n.n.
MA-091441_6	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	44,4	n.n.	6,5	24,9	1,5	0,3	17,0	0,8	3,0	0,8	0,1	0,7	n.n.

Tab. A.8.: EDX-Analysen von Spinellen ausgewählter Schlacken vom Kupferschmelzplatz S1. Angaben in Gewichtsprozent (n.n. = nicht nachgewiesen).

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cu	Ni	Sb	As
MA-092830_11	FNr. 981	Röstoffbett 1	RB1-3	3,7	n.n.	0,6	93,8	0,5	n.n.	0,5	n.n.	0,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092830_12	FNr. 981	Röstoffbett 1	RB1-3	0,4	n.n.	0,2	94,8	0,3	0,6	0,2	n.n.	0,3	1,3	0,2	1,7	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092830_13	FNr. 981	Röstoffbett 1	RB1-3	0,2	n.n.	0,7	85,2	12,7	1,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092831_9	FNr. 1219	Röstoffbett 2	21 Pl. 210	1,6	0,8	1,5	94,7	0,1	0,7	0,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092831_10	FNr. 1219	Röstoffbett 2	21 Pl. 210	5,3	n.n.	4,6	85,9	0,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,9	0,4	2,1	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092831_11	FNr. 1219	Röstoffbett 2	21 Pl. 210	0,7	n.n.	0,6	98,3	0,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-110606_2	FNr. 1609	Röstoffbett 3	42	2,2	0,8	2,5	90,1	0,9	1,2	0,4	n.n.	n.n.	0,3	n.n.	1,6	n.n.	n.n.	n.n.
MA-110606_3	FNr. 1609	Röstoffbett 3	42	0,5	0,7	0,9	66,3	1,1	4,6	0,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	25,4	n.n.	n.n.	n.n.
MA-110606_4	FNr. 1609	Röstoffbett 3	42	0,3	n.n.	1,2	85,2	8,2	1,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	3,6	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092835_9	FNr. 1144	Röstoffbett 3	48	0,2	n.n.	0,5	97,3	1,6	0,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092835_10	FNr. 1144	Röstoffbett 3	48	0,3	n.n.	0,7	97,0	1,1	0,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092836_9	FNr. 4162	Röstoffbett 4	16 (=9?) Pl. 291	0,7	1,5	1,4	95,1	0,1	0,6	0,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092836_10	FNr. 4162	Röstoffbett 4	16 (=9?) Pl. 291	0,1	n.n.	0,1	59,8	n.n.	n.n.	0,4	n.n.	n.n.	n.n.	0,0	39,5	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092838_7	FNr. 641	Röstoffbett 5	2 Pl. 89	0,5	n.n.	1,0	95,1	2,3	0,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,6	n.n.	n.n.
MA-092838_8	FNr. 641	Röstoffbett 5	2 Pl. 89	0,4	0,5	3,3	92,9	2,1	0,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092838_9	FNr. 641	Röstoffbett 5	2 Pl. 89	0,1	n.n.	0,0	79,6	19,0	1,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092838_10	FNr. 641	Röstoffbett 5	2 Pl. 89	0,3	n.n.	0,9	74,2	3,9	0,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	4,1	16,1	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092841_13	FNr. 4409	Röstoffbett 7	44	0,6	0,8	1,9	95,1	1,0	0,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092843_7	FNr. 1200	Röstoffbett 7	58	0,5	0,8	0,9	97,5	0,2	n.n.	0,1	n.n.	0,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092843_8	FNr. 1200	Röstoffbett 7	58	0,4	0,7	1,4	96,6	0,3	0,4	0,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092845_8	FNr. 1795	Röstoffbett 8	15 Pl. 136	4,6	1,3	1,6	90,1	0,6	0,4	1,0	n.n.	0,4	0,0	0,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092845_9	FNr. 1795	Röstoffbett 8	15 Pl. 136	0,5	n.n.	0,9	95,5	2,0	0,9	0,1	n.n.	n.n.	n.n.	0,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092845_10	FNr. 1795	Röstoffbett 8	15 Pl. 136	0,4	n.n.	0,4	96,5	2,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092845_11	FNr. 1795	Röstoffbett 8	15 Pl. 136	0,2	n.n.	0,0	77,1	21,2	1,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092850_9	FNr. 3589	Röstoffbett 9	26 Pl. 691	5,8	0,2	1,1	88,4	0,3	0,5	0,3	n.n.	n.n.	0,4	0,8	2,2	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092850_10	FNr. 3589	Röstoffbett 9	26 Pl. 691	0,4	n.n.	0,6	94,9	2,0	0,9	0,2	n.n.	n.n.	0,6	0,1	0,5	n.n.	n.n.	n.n.
MA-101384_2	FNr. 4958	Ofen 1	Westwand	0,9	0,7	1,2	84,8	2,0	2,5	0,6	n.n.	0,2	n.n.	n.n.	6,5	0,7	n.n.	n.n.
MA-101384_3	FNr. 4958	Ofen 1	Westwand	2,1	0,6	3,4	60,5	3,8	4,5	0,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	24,2	n.n.	n.n.	n.n.
MA-101398_2	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	0,7	0,9	3,0	69,0	3,1	1,9	0,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	20,9	n.n.	n.n.	n.n.
MA-101398_3	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	0,8	0,2	1,7	91,5	2,3	1,3	0,2	n.n.	n.n.	n.n.	0,2	1,8	n.n.	n.n.	n.n.
MA-101394_3	FNr. 5511	Ofen 2	Nordwand	3,6	0,7	1,8	87,6	1,2	0,9	1,1	n.n.	0,3	0,1	n.n.	2,7	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092854_5	FNr. 1772	Vorplatz Ofen 1/2	12 Pl. 68	0,3	n.n.	0,3	98,1	0,2	n.n.	0,7	n.n.	0,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092853_15	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	0,8	1,0	1,6	95,3	0,4	0,6	0,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092853_16	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	1,1	0,8	1,6	94,9	0,6	0,6	0,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092853_17	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	0,2	0,4	2,6	85,1	4,2	1,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	5,7	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113463_5	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	1,4	0,1	0,8	93,4	0,9	1,2	0,5	n.n.	n.n.	0,2	0,0	1,5	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113468_7	FNr. 706	Ofen 3	Nordwand abgebr.	1,3	0,5	2,1	75,6	2,9	1,8	0,4	n.n.	0,1	n.n.	n.n.	15,3	n.n.	n.n.	n.n.

Tab. A.8.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cu	Ni	Sb	As
MA-091455_15	FNr. 650	Halde 1	6	2,9	0,4	3,3	78,2	8,8	0,8	0,4	n.n.	n.n.	1,8	n.n.	3,3	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091461_9	FNr. 1029	Halde 1	7	0,5	n.n.	1,7	96,2	0,8	n.n.	0,7	n.n.	n.n.	0,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091461_10	FNr. 1029	Halde 1	7	5,1	1,8	2,7	85,4	0,8	0,8	1,1	1,3	0,4	0,5	0,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091462_7	FNr. 1179	Halde 1	7	1,4	1,1	4,0	86,6	3,4	n.n.	0,5	n.n.	0,4	0,5	0,6	1,5	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091462_8	FNr. 1179	Halde 1	7	4,2	n.n.	1,0	62,4	28,2	1,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,8	2,1	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091462_9	FNr. 1179	Halde 1	7	0,5	n.n.	1,0	89,3	9,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092821_5	FNr. 2976	Halde 2	7	7,1	n.n.	0,2	69,3	0,6	n.n.	2,2	n.n.	n.n.	n.n.	0,9	19,7	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092821_6	FNr. 2976	Halde 2	7	0,4	n.n.	0,3	96,8	1,2	1,1	0,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092821_7	FNr. 2976	Halde 2	7	0,3	n.n.	0,3	97,3	0,8	1,0	0,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092821_8	FNr. 2976	Halde 2	7	22,6	n.n.	0,7	66,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,4	9,5	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092821_9	FNr. 2976	Halde 2	7	0,2	0,5	0,4	97,3	0,5	0,7	0,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_18	FNr. 2267	Halde 2	17	0,5	0,6	2,2	96,2	0,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_19	FNr. 2267	Halde 2	17	13,5	n.n.	n.n.	61,3	1,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	1,1	23,0	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_20	FNr. 2267	Halde 2	17	0,0	n.n.	0,2	87,7	11,1	0,9	n.n.	n.n.	n.n.	0,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_21	FNr. 2267	Halde 2	17	0,1	n.n.	0,3	74,5	23,7	1,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_22	FNr. 2267	Halde 2	17	0,3	n.n.	0,1	87,8	9,6	2,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091511_23	FNr. 2267	Halde 2	17	0,6	n.n.	0,2	98,9	0,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091513_7	FNr. 1936	Halde 2	22	2,0	0,8	1,3	91,6	2,5	0,9	0,8	n.n.	0,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091513_8	FNr. 1936	Halde 2	22	0,4	0,8	2,0	94,6	0,9	0,6	0,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091513_9	FNr. 1936	Halde 2	22	0,3	n.n.	0,3	89,6	8,5	1,2	n.n.	n.n.	n.n.	0,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091513_10	FNr. 1936	Halde 2	22	0,2	n.n.	0,3	94,6	3,9	1,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091513_11	FNr. 1936	Halde 2	22	1,4	n.n.	0,2	79,8	16,5	1,4	0,4	n.n.	0,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092825_5	FNr. 3293	Halde 2	21b Pl. 648	0,2	n.n.	0,1	84,3	14,3	1,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092825_6	FNr. 3293	Halde 2	21b Pl. 648	0,3	n.n.	1,1	92,5	5,2	0,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092825_7	FNr. 3293	Halde 2	21b Pl. 648	0,5	0,5	1,6	96,1	0,7	0,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-092825_8	FNr. 3293	Halde 2	21b Pl. 648	0,3	n.n.	0,1	98,8	0,2	n.n.	0,3	n.n.	n.n.	n.n.	0,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091493_11	FNr. 5053	Halde 3	22	0,3	n.n.	0,9	93,7	4,0	0,8	0,4	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091493_12	FNr. 5053	Halde 3	22	0,6	n.n.	0,4	96,9	0,8	n.n.	0,1	n.n.	n.n.	0,1	0,2	0,9	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091494_9	FNr. 4500	Halde 3	23	2,3	n.n.	0,9	88,9	5,0	0,8	0,3	n.n.	n.n.	n.n.	0,9	0,9	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091494_10	FNr. 4500	Halde 3	23	1,7	n.n.	0,3	82,0	14,3	1,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,1	0,6	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091473_8	FNr. 4558	Halde 3	2	0,8	n.n.	0,3	83,5	13,9	1,0	0,5	n.n.	n.n.	0,1	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091479_7	FNr. 4433	Halde 3	9	2,4	0,5	0,7	94,4	0,2	0,4	1,1	n.n.	0,2	0,0	0,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091479_8	FNr. 4433	Halde 3	9	1,7	2,4	3,0	91,1	0,3	0,5	0,7	n.n.	0,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091441_7	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	0,3	n.n.	2,0	95,4	1,3	n.n.	0,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,8	n.n.	n.n.	n.n.
MA-091441_8	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	0,2	0,8	1,9	92,0	2,2	0,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,5	1,9	n.n.	n.n.	n.n.

Tab. A.9.: EDX-Analysen von Cu/Fe-Sulfiden und metallischen Kupfereinschlüssen ausgewählter Schlacken und Ofenwandverschlackungen vom Kupferschmelzplatz S1. Angaben in Gewichtsprozent (n.n. = nicht nachgewiesen).

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	S	Fe	Cu	Sb	O
MA-092830_14	FNr. 981	Röstbett 1	RB1-3	22,4	11,9	65,7	n.n.	n.n.
MA-092830_15	FNr. 981	Röstbett 1	RB1-3	25,2	14,1	60,7	n.n.	n.n.
MA-092830_16	FNr. 981	Röstbett 1	RB1-3	18,3	1,8	79,8	n.n.	n.n.
MA-092830_17	FNr. 981	Röstbett 1	RB1-3	18,6	2,8	78,6	n.n.	n.n.
MA-092831_12	FNr. 1219	Röstbett 2	21 Pl. 210	18,9	6,5	74,6	n.n.	n.n.
MA-092835_11	FNr. 1144	Röstbett 3	48	0,2	5,0	94,9	n.n.	n.n.
MA-092835_12	FNr. 1144	Röstbett 3	48	0,2	5,3	94,6	n.n.	n.n.
MA-092835_13	FNr. 1144	Röstbett 3	48	19,8	6,2	74,0	n.n.	n.n.
MA-092836_11	FNr. 4162	Röstbett 4	16 (=9?) Pl. 291	25,4	1,3	73,2	n.n.	n.n.
MA-092836_12	FNr. 4162	Röstbett 4	16 (=9?) Pl. 291	26,6	n.n.	73,4	n.n.	n.n.
MA-092836_13	FNr. 4162	Röstbett 4	16 (=9?) Pl. 291	24,0	0,7	75,3	n.n.	n.n.
MA-092836_14	FNr. 4162	Röstbett 4	16 (=9?) Pl. 291	n.n.	2,4	94,8	n.n.	2,8
MA-092841_14	FNr. 4409	Röstbett 7	44	26,9	17,6	55,5	n.n.	n.n.
MA-092841_15	FNr. 4409	Röstbett 7	44	28,2	19,3	52,5	n.n.	n.n.
MA-092841_16	FNr. 4409	Röstbett 7	44	28,1	19,0	52,9	n.n.	n.n.
MA-092841_17	FNr. 4409	Röstbett 7	44	23,6	6,2	70,2	n.n.	n.n.
MA-092843_9	FNr. 1200	Röstbett 7	58	31,7	33,8	34,5	n.n.	n.n.
MA-092843_10	FNr. 1200	Röstbett 7	58	31,3	50,1	18,6	n.n.	n.n.
MA-092843_11	FNr. 1200	Röstbett 7	58	26,2	55,4	18,4	n.n.	n.n.
MA-092843_12	FNr. 1200	Röstbett 7	58	34,9	50,9	14,1	n.n.	n.n.
MA-092843_13	FNr. 1200	Röstbett 7	58	26,6	17,7	55,6	n.n.	n.n.
MA-092843_14	FNr. 1200	Röstbett 7	58	25,2	14,1	60,6	n.n.	n.n.
MA-092843_15	FNr. 1200	Röstbett 7	58	29,5	7,2	63,4	n.n.	n.n.
MA-092845_12	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	25,2	20,4	54,4	n.n.	n.n.
MA-092845_13	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	22,1	16,3	61,6	n.n.	n.n.
MA-092845_14	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	22,2	25,6	52,2	n.n.	n.n.
MA-092845_15	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	n.n.	5,8	90,7	n.n.	3,5
MA-092845_16	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	0,3	4,9	90,8	n.n.	4,0
MA-092845_17	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	n.n.	4,4	92,5	n.n.	3,1
MA-092845_18	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	n.n.	5,1	90,2	n.n.	4,7
MA-092845_19	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	0,3	4,7	91,8	n.n.	3,2
MA-092845_20	FNr. 1795	Röstbett 8	15 Pl. 136	n.n.	4,8	92,0	n.n.	3,1
MA-092850_11	FNr. 3589	Röstbett 9	26 Pl. 691	31,3	18,0	50,7	n.n.	n.n.
MA-101398_4	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	30,4	n.n.	69,6	n.n.	n.n.
MA-101398_5	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	n.n.	n.n.	100,0	n.n.	n.n.
MA-101398_6	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	n.n.	1,7	96,6	1,7	n.n.
MA-101398_7	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	n.n.	2,2	94,7	3,2	n.n.
MA-101398_8	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	n.n.	2,0	98,0	n.n.	n.n.
MA-101398_9	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	n.n.	2,8	93,6	3,7	n.n.
MA-101398_10	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	n.n.	2,4	94,3	3,3	n.n.
MA-101398_11	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	n.n.	2,0	95,8	2,1	n.n.
MA-101398_12	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	n.n.	1,6	96,4	2,0	n.n.
MA-101398_13	FNr. 5475	Ofen 2	ältere Phase, Ostwand	25,5	1,9	72,6	n.n.	n.n.
MA-092854_6	FNr. 1772	Vorplatz Ofen 1/2	12 Pl. 68	33,4	36,0	30,6	n.n.	n.n.
MA-092854_7	FNr. 1772	Vorplatz Ofen 1/2	12 Pl. 68	32,2	35,9	31,9	n.n.	n.n.
MA-092854_8	FNr. 1772	Vorplatz Ofen 1/2	12 Pl. 68	29,5	27,8	42,7	n.n.	n.n.
MA-092854_9	FNr. 1772	Vorplatz Ofen 1/2	12 Pl. 68	29,6	25,3	45,0	n.n.	n.n.

Tab. A.9.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	S	Fe	Cu	Sb	O
MA-092854_10	FNr. 1772	Vorplatz Ofen 1/2	12 Pl. 68	28,8	19,3	51,9	n.n.	n.n.
MA-092854_11	FNr. 1772	Vorplatz Ofen 1/2	12 Pl. 68	29,2	16,5	54,3	n.n.	n.n.
MA-092853_18	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	26,3	17,1	56,6	n.n.	n.n.
MA-092853_19	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	23,8	12,9	63,3	n.n.	n.n.
MA-092853_20	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	25,9	19,3	54,8	n.n.	n.n.
MA-092853_21	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	24,5	17,2	58,3	n.n.	n.n.
MA-092853_22	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	23,8	1,3	74,9	n.n.	n.n.
MA-092853_23	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	23,6	10,3	66,1	n.n.	n.n.
MA-092853_24	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	23,6	10,5	65,9	n.n.	n.n.
MA-092853_25	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	28,3	17,9	53,8	n.n.	n.n.
MA-092853_26	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	0,1	1,8	98,1	n.n.	n.n.
MA-092853_27	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	0,1	1,7	98,2	n.n.	n.n.
MA-113463_6	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	24,2	15,7	60,1	n.n.	n.n.
MA-113463_7	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	30,3	1,4	68,3	n.n.	n.n.
MA-113463_8	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	26,2	10,3	63,6	n.n.	n.n.
MA-113463_9	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	21,1	4,8	74,1	n.n.	n.n.
MA-113463_10	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	20,8	5,6	73,6	n.n.	n.n.
MA-113463_11	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	27,8	4,2	68,0	n.n.	n.n.
MA-113463_12	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	27,7	3,6	68,6	n.n.	n.n.
MA-113463_13	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	30,5	1,9	67,7	n.n.	n.n.
MA-113463_14	FNr. 207	Vorplatz Ofen 1/2	Füllmaterial Ofen 2	21,7	6,0	72,3	n.n.	n.n.
MA-113469_5	FNr. 1895	Ofen 3	Ostwand	n.n.	2,3	94,4	n.n.	3,3
MA-113469_6	FNr. 1895	Ofen 3	Ostwand	0,3	2,0	97,7	n.n.	n.n.
MA-113469_7	FNr. 1895	Ofen 3	Ostwand	n.n.	2,5	94,4	n.n.	3,1
MA-113469_8	FNr. 1895	Ofen 3	Ostwand	n.n.	4,1	89,6	n.n.	6,3
MA-113469_9	FNr. 1895	Ofen 3	Ostwand	0,3	1,8	97,9	n.n.	n.n.
MA-113469_10	FNr. 1895	Ofen 3	Ostwand	0,1	2,9	97,0	n.n.	n.n.
MA-113469_11	FNr. 1895	Ofen 3	Ostwand	0,4	1,7	97,9	n.n.	n.n.
MA-113469_12	FNr. 1895	Ofen 3	Ostwand	0,2	1,3	98,5	n.n.	n.n.
MA-113469_13	FNr. 1895	Ofen 3	Ostwand	0,2	1,4	98,3	n.n.	n.n.
MA-113469_14	FNr. 1895	Ofen 3	Ostwand	0,2	1,3	98,4	n.n.	n.n.
MA-113471_11	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	18,9	0,5	80,6	n.n.	n.n.
MA-113471_12	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	18,6	2,0	79,3	n.n.	n.n.
MA-113471_13	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	n.n.	2,0	94,7	n.n.	3,3
MA-113471_14	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	n.n.	2,5	93,1	n.n.	4,4
MA-113471_15	FNr. 1792	Ofen 3	Westwand	0,1	2,2	97,7	n.n.	n.n.
MA-101402_8	FNr. 5064	Ofen 4	Westwand	21,7	4,9	73,3	n.n.	n.n.
MA-101402_9	FNr. 5064	Ofen 4	Westwand	20,1	2,3	77,6	n.n.	n.n.
MA-101402_10	FNr. 5064	Ofen 4	Westwand	20,9	2,7	76,4	n.n.	n.n.
MA-101402_11	FNr. 5064	Ofen 4	Westwand	21,8	2,7	75,5	n.n.	n.n.
MA-101402_12	FNr. 5064	Ofen 4	Westwand	28,6	10,8	60,7	n.n.	n.n.
MA-101406_5	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	n.n.	n.n.	100,0	n.n.	n.n.
MA-101406_6	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	n.n.	3,7	94,1	n.n.	2,2
MA-101406_7	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	n.n.	2,0	95,5	n.n.	2,6
MA-101406_8	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	n.n.	1,6	96,2	n.n.	2,2
MA-101406_9	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	n.n.	2,1	95,4	n.n.	2,5
MA-101406_10	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	n.n.	2,5	93,5	n.n.	4,0

Tab. A.9.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	S	Fe	Cu	Sb	O
MA-101406_11	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	n.n.	2,8	94,4	n.n.	2,8
MA-101406_12	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	n.n.	1,6	96,6	n.n.	1,8
MA-101406_13	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	n.n.	2,1	95,7	n.n.	2,2
MA-101406_14	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	n.n.	3,5	94,0	n.n.	2,5
MA-101407_7	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	n.n.	2,9	92,1	n.n.	5,0
MA-101407_8	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	n.n.	2,0	95,2	n.n.	2,8
MA-101407_9	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	n.n.	2,5	95,1	n.n.	2,4
MA-101407_10	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	n.n.	2,4	95,4	n.n.	2,2
MA-101407_11	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	n.n.	2,8	94,5	n.n.	2,8
MA-101407_12	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	n.n.	3,1	94,6	n.n.	2,3
MA-101407_13	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	n.n.	3,3	94,0	n.n.	2,7
MA-101407_14	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	n.n.	2,3	95,4	n.n.	2,2
MA-101407_15	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	n.n.	3,1	94,6	n.n.	2,3
MA-101407_16	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	n.n.	n.n.	100,0	n.n.	n.n.
MA-092856_9	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	22,9	11,6	65,5	n.n.	n.n.
MA-092856_10a	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	0,1	1,1	96,9	n.n.	n.n.
MA-092856_10b	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	21,4	7,9	70,7	n.n.	n.n.
MA-092856_11	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	25,9	12,5	61,6	n.n.	n.n.
MA-092856_12	FNr. 2965	Vorplatz Ofen 4/5	3 Pl. 358	26,6	18,6	54,8	n.n.	n.n.
MA-092859_12	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	26,0	22,2	51,7	n.n.	n.n.
MA-092859_13	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	27,5	5,3	67,2	n.n.	n.n.
MA-092859_14	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	21,9	10,6	67,4	n.n.	n.n.
MA-092859_15	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	25,4	14,9	59,8	n.n.	n.n.
MA-092859_16	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	28,3	27,1	44,7	n.n.	n.n.
MA-092859_17	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	29,8	34,6	35,6	n.n.	n.n.
MA-092859_18	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	26,7	20,9	52,4	n.n.	n.n.
MA-092859_19	FNr. 4389	Vorplatz Ofen 7/8	28 Pl. 909	25,0	21,8	53,2	n.n.	n.n.
MA-092860_12	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	29,4	23,2	47,4	n.n.	n.n.
MA-092860_13	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	28,8	20,5	50,7	n.n.	n.n.
MA-092860_14	FNr. 3242	Vorplatz Ofen 9/10	16 Pl. 652	28,3	19,2	52,5	n.n.	n.n.
MA-092862_10	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	30,0	18,6	51,5	n.n.	n.n.
MA-092862_11	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	25,0	28,7	46,4	n.n.	n.n.
MA-113467_9	FNr. 4160	Ofen 11	17	23,7	24,8	51,5	n.n.	n.n.
MA-113467_10	FNr. 4160	Ofen 11	17	22,8	16,5	60,6	n.n.	n.n.
MA-113467_11	FNr. 4160	Ofen 11	17	27,6	29,3	43,1	n.n.	n.n.
MA-113472_11	FNr. 4160	Ofen 11	17	24,2	53,5	22,3	n.n.	n.n.
MA-113472_12	FNr. 4160	Ofen 11	17	22,3	21,2	56,5	n.n.	n.n.
MA-113472_13	FNr. 4160	Ofen 11	17	24,5	15,1	60,4	n.n.	n.n.
MA-113472_14	FNr. 4160	Ofen 11	17	n.n.	1,9	95,4	n.n.	2,7
MA-113473_9	FNr. 4160	Ofen 11	17	26,9	16,3	56,8	n.n.	n.n.
MA-113470_9	FNr. 4106	Ofen 11	53	18,7	6,6	74,8	n.n.	n.n.
MA-113470_10	FNr. 4106	Ofen 11	53	19,5	6,0	74,5	n.n.	n.n.
MA-113470_11	FNr. 4106	Ofen 11	53	18,9	5,9	75,3	n.n.	n.n.
MA-091447_6	FNr. 595	Halde 1	5	22,9	20,8	56,4	n.n.	n.n.
MA-091447_7	FNr. 595	Halde 1	5	29,3	38,1	32,6	n.n.	n.n.
MA-091447_8	FNr. 595	Halde 1	5	29,5	52,7	17,8	n.n.	n.n.
MA-091452_9	FNr. 558	Halde 1	6	28,6	22,8	48,6	n.n.	n.n.

Tab. A.9.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	S	Fe	Cu	Sb	O
MA-091452_10	FNr. 558	Halde 1	6	22,3	13,1	64,6	n.n.	n.n.
MA-091452_11	FNr. 558	Halde 1	6	31,4	22,1	46,6	n.n.	n.n.
MA-091455_16	FNr. 650	Halde 1	6	22,1	11,2	65,5	n.n.	n.n.
MA-091455_17	FNr. 650	Halde 1	6	27,4	16,4	56,2	n.n.	n.n.
MA-091462_10	FNr. 1179	Halde 1	7	35,5	16,5	48,0	n.n.	n.n.
MA-091462_11	FNr. 1179	Halde 1	7	36,6	12,3	51,1	n.n.	n.n.
MA-091462_12	FNr. 1179	Halde 1	7	34,5	13,2	52,3	n.n.	n.n.
MA-091462_13	FNr. 1179	Halde 1	7	34,7	12,0	53,3	n.n.	n.n.
MA-091462_14	FNr. 1179	Halde 1	7	33,0	10,3	56,7	n.n.	n.n.
MA-091462_15	FNr. 1179	Halde 1	7	35,9	12,7	51,4	n.n.	n.n.
MA-092821_10	FNr. 2976	Halde 2	7	0,2	1,7	98,1	n.n.	n.n.
MA-092821_11	FNr. 2976	Halde 2	7	20,1	2,6	77,2	n.n.	n.n.
MA-092821_12	FNr. 2976	Halde 2	7	0,1	0,9	99,0	n.n.	n.n.
MA-092821_13	FNr. 2976	Halde 2	7	0,1	0,8	99,1	n.n.	n.n.
MA-092821_14	FNr. 2976	Halde 2	7	0,5	0,9	98,5	n.n.	n.n.
MA-092821_15	FNr. 2976	Halde 2	7	0,1	0,9	99,0	n.n.	n.n.
MA-092821_16	FNr. 2976	Halde 2	7	0,1	3,4	96,5	n.n.	n.n.
MA-092821_17	FNr. 2976	Halde 2	7	19,1	1,9	79,1	n.n.	n.n.
MA-092821_18	FNr. 2976	Halde 2	7	20,9	6,7	72,4	n.n.	n.n.
MA-092821_19	FNr. 2976	Halde 2	7	21,5	10,7	67,7	n.n.	n.n.
MA-092821_20	FNr. 2976	Halde 2	7	0,1	2,6	97,3	n.n.	n.n.
MA-092821_21	FNr. 2976	Halde 2	7	25,3	23,6	51,1	n.n.	n.n.
MA-092821_22	FNr. 2976	Halde 2	7	20,9	6,5	72,7	n.n.	n.n.
MA-091511_24	FNr. 2267	Halde 2	17	28,3	23,5	48,3	n.n.	n.n.
MA-091511_25	FNr. 2267	Halde 2	17	28,8	19,6	51,7	n.n.	n.n.
MA-091511_26	FNr. 2267	Halde 2	17	27,9	19,0	53,1	n.n.	n.n.
MA-091511_27	FNr. 2267	Halde 2	17	21,8	12,7	65,5	n.n.	n.n.
MA-091511_28	FNr. 2267	Halde 2	17	23,1	6,6	70,3	n.n.	n.n.
MA-091513_12	FNr. 1936	Halde 2	22	22,0	8,6	69,5	n.n.	n.n.
MA-091513_13	FNr. 1936	Halde 2	22	24,4	9,8	65,9	n.n.	n.n.
MA-091513_14	FNr. 1936	Halde 2	22	25,0	19,5	55,5	n.n.	n.n.
MA-091513_15	FNr. 1936	Halde 2	22	24,2	12,6	63,1	n.n.	n.n.
MA-091513_16	FNr. 1936	Halde 2	22	24,3	14,1	61,7	n.n.	n.n.
MA-091513_17	FNr. 1936	Halde 2	22	21,3	13,2	65,5	n.n.	n.n.
MA-091513_18	FNr. 1936	Halde 2	22	26,4	4,5	69,1	n.n.	n.n.
MA-092825_9	FNr. 3293	Halde 2	21b Pl. 648	24,8	20,4	54,8	n.n.	n.n.
MA-092825_10	FNr. 3293	Halde 2	21b Pl. 648	22,3	18,6	59,1	n.n.	n.n.
MA-092825_11	FNr. 3293	Halde 2	21b Pl. 648	24,9	19,3	55,8	n.n.	n.n.
MA-092825_12	FNr. 3293	Halde 2	21b Pl. 648	28,1	28,4	43,5	n.n.	n.n.
MA-091493_13	FNr. 5053	Halde 3	22	29,2	21,7	49,2	n.n.	n.n.
MA-091493_14	FNr. 5053	Halde 3	22	23,5	9,3	67,2	n.n.	n.n.
MA-091493_15	FNr. 5053	Halde 3	22	31,7	8,1	60,1	n.n.	n.n.
MA-091493_16	FNr. 5053	Halde 3	22	36,2	19,5	44,3	n.n.	n.n.
MA-091496_2	FNr. 4543	Halde 3	24	23,0	3,7	73,3	n.n.	n.n.
MA-091496_3	FNr. 4543	Halde 3	24	23,6	6,4	70,0	n.n.	n.n.
MA-091496_4	FNr. 4543	Halde 3	24	24,7	8,6	66,7	n.n.	n.n.
MA-091496_5	FNr. 4543	Halde 3	24	21,3	4,5	74,3	n.n.	n.n.

Tab. A.9.: Fortsetzung

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	S	Fe	Cu	Sb	O
MA-091496_6	FNr. 4543	Halde 3	24	23,3	5,4	71,3	n.n.	n.n.
MA-091496_7	FNr. 4543	Halde 3	24	25,3	21,7	53,0	n.n.	n.n.
MA-091496_8	FNr. 4543	Halde 3	24	24,1	24,1	51,8	n.n.	n.n.
MA-091496_9	FNr. 4543	Halde 3	24	28,4	31,3	40,3	n.n.	n.n.
MA-091496_10	FNr. 4543	Halde 3	24	28,8	31,8	39,4	n.n.	n.n.
MA-091471_6	FNr. 3042	Halde 3	2	25,4	4,9	69,6	n.n.	n.n.
MA-091471_7	FNr. 3042	Halde 3	2	19,5	3,6	76,9	n.n.	n.n.
MA-091471_8	FNr. 3042	Halde 3	2	21,1	4,0	74,9	n.n.	n.n.
MA-091471_9	FNr. 3042	Halde 3	2	25,6	2,9	71,5	n.n.	n.n.
MA-091471_10	FNr. 3042	Halde 3	2	28,9	2,6	68,5	n.n.	n.n.
MA-091471_11	FNr. 3042	Halde 3	2	19,9	3,1	77,0	n.n.	n.n.
MA-091471_12	FNr. 3042	Halde 3	2	30,4	6,4	63,2	n.n.	n.n.
MA-091473_9	FNr. 4558	Halde 3	2	22,2	16,0	61,8	n.n.	n.n.
MA-091479_9	FNr. 4433	Halde 3	9	22,1	7,2	70,6	n.n.	n.n.
MA-091479_10	FNr. 4433	Halde 3	9	20,7	6,7	72,6	n.n.	n.n.
MA-091479_11	FNr. 4433	Halde 3	9	22,7	5,2	72,1	n.n.	n.n.
MA-091479_12	FNr. 4433	Halde 3	9	23,7	13,3	63,0	n.n.	n.n.
MA-091441_9	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	29,3	18,5	52,2	n.n.	n.n.
MA-091441_10	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	28,8	19,5	51,7	n.n.	n.n.
MA-091441_11	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	0,7	6,1	93,2	n.n.	n.n.
MA-091441_12	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	0,1	3,3	96,6	n.n.	n.n.
MA-091441_13	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	0,1	2,2	97,7	n.n.	n.n.
MA-091441_14	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	28,6	25,4	46,0	n.n.	n.n.
MA-091441_15	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	27,5	23,2	49,2	n.n.	n.n.
MA-091441_16	FNr. 535	Allgemein	1, Halde 1	31,3	34,0	34,7	n.n.	n.n.

Tab. A.10.: EDX-Analysen an ausgewählten Erzproben vom Kupferschmelzplatz S1. Angaben in Gewichtsprozent.

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Mineral	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	K ₂ O	BaO	S	Cu	Fe	O
MA-092834_1	FNr. 1335	Röstbett 3	42	Erz_pauschal	34,2	0,5	55,6		7,7	2,0			
MA-092834_2	FNr. 1335	Röstbett 3	42	Baryt	2,6				79,3	18,2			
MA-092834_3	FNr. 1335	Röstbett 3	42	Hämatit								68,8	31,2
MA-092834_4	FNr. 1335	Röstbett 3	42	Hämatit								65,8	34,2
MA-092834_5	FNr. 1335	Röstbett 3	42	Hämatit								64,8	35,2
MA-091472_1	FNr. 2994	Halde 3	2	Erz_pauschal	53,5	1,3	22,3	0,5		8,5	13,8		
MA-091472_2	FNr. 2994	Halde 3	2	Pyrit						49,7		50,3	
MA-091472_3	FNr. 2994	Halde 3	2	Pyrit						49,4		50,6	
MA-091472_4	FNr. 2994	Halde 3	2	Chalkopyrit						33,3	34,1	32,6	
MA-091472_5	FNr. 2994	Halde 3	2	Chalkopyrit						32,2	35,8	32,0	
MA-091472_6	FNr. 2994	Halde 3	2	Chalkopyrit						33,0	35,5	31,5	
MA-091472_7	FNr. 2994	Halde 3	2	Chalkopyrit						32,5	34,0	33,5	
MA-091467_1	FNr. 2968	Allgemein	1, Halde 3	Erz_pauschal	5,9	0,7	74,1	0,1	15,6	3,5			
MA-091467_2	FNr. 2968	Allgemein	1, Halde 3	Baryt	2,4	1,5			78,7	17,4			
MA-091467_3	FNr. 2968	Allgemein	1, Halde 3	Magnetit								75,9	24,1
MA-091467_4	FNr. 2968	Allgemein	1, Halde 3	Magnetit								76,3	23,7
MA-091467_5	FNr. 2968	Allgemein	1, Halde 3	Magnetit								75,0	25,0
MA-091467_6	FNr. 2968	Allgemein	1, Halde 3	Magnetit								75,0	25,0

Tab. A.11.: Chemische Pauschalanalysen mittels ED-RFA der Metallfunde vom Kupferschmelzplatz S1. Angaben in Gewichtsprozent.

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Fe	Cu	Co	Zn	Ni	Sb	As	Ag	Sn	Se	Te	Pb	Bi
MA-113458	FNr. 3075	Röstoff 9	1 Pl. 465	3,2	95	0,021	< 0,2	0,299	0,190	0,86	0,006	0,006	< 0,005	< 0,005	< 0,01	< 0,01
MA-113461	FNr. 3423	Halde 3	2 Pl. 678	9,8	89	0,055	< 0,2	0,162	0,246	0,289	0,003	0,013	< 0,005	< 0,005	< 0,01	< 0,01

Tab. A.12.: EDX-Analysen an den Metallfunden vom Kupferschmelzplatz S1. Angaben in Gewichtsprozent (n.n. = nicht nachgewiesen).

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Stelle	S	Fe	Cu	Ni	Sb	As	O
MA-113458_1	FNr. 3075	Röstoff 9	1 Pl. 465	Metall	2,0	1,5	90,6	n.n.	n.n.	n.n.	5,8
MA-113458_2	FNr. 3075	Röstoff 9	1 Pl. 465	Metall	n.n.	2,4	95,2	n.n.	1,2	1,1	n.n.
MA-113458_3	FNr. 3075	Röstoff 9	1 Pl. 465	Sulfideinschluss	25,9	18,2	55,9	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113458_4	FNr. 3075	Röstoff 9	1 Pl. 465	Sulfideinschluss	20,7	4,8	74,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113458_5	FNr. 3075	Röstoff 9	1 Pl. 465	Sulfideinschluss	24,7	14,3	61,0	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113461_1	FNr. 3423	Halde 3	2 Pl. 678	Metall	1,1	2,6	91,4	0,2	1,7	0,7	2,2
MA-113461_2	FNr. 3423	Halde 3	2 Pl. 678	Metall	n.n.	2,9	92,2	0,1	0,2	0,2	4,3
MA-113461_3	FNr. 3423	Halde 3	2 Pl. 678	Sulfideinschluss	18,5	n.n.	81,5	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113461_4	FNr. 3423	Halde 3	2 Pl. 678	Sulfideinschluss	18,8	0,5	80,6	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113461_5	FNr. 3423	Halde 3	2 Pl. 678	Sulfideinschluss	18,7	n.n.	81,3	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
MA-113461_6	FNr. 3423	Halde 3	2 Pl. 678	Sulfideinschluss	18,0	9,2	72,8	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

Tab. A.13.: Spurenelementanalysen mittels Neutronenaktivierung an Lehmproben vom Kupferschmelzplatz S1. Angaben in mg/kg (Fe, Na und K in Gewichtsprozent).

	MA-110598	MA-110597	MA-110592	MA-110596	MA-110594	MA-110595	MA-110593	MA-110590
	FNr. 4830	FNr. 4474	FNr. 3656	FNr. 3946	FNr. 3819	FNr. 3847	FNr. 3675	FNr. 3235
	Röstdbett 7	Röstdbett 9	Röstdbett 9	Röstdbett 9	Röstdbett 9	Röstdbett 9	Röstdbett 9	Röstdbett 9
	Schicht 2 Pl. 984	Schicht 1 Pl. 749	Schicht 27 Pl. 691	Schicht 27 Pl. 749	Schicht 27 Pl. 771	Schicht 27 Pl. 771	Schicht 28 Pl. 749	Schicht 34 Pl. 691
Fe	[Gew.-%] 5,8	4,8	5,7	5,9	5,3	5,1	8,0	4,6
Na	0,350	0,320	0,370	0,239	0,314	0,294	0,208	0,156
K	3,9	3,6	4,8	4,3	4,8	4,0	3,0	5,2
Sc	[mg/kg] 15,0	15,3	12,1	11,7	10,6	11,6	9,9	19,0
Cr	84	81	79	80	81	76	55	109
Co	20,0	14,1	5,6	4,1	5,6	3,3	15,4	2,9
Zn	49	34	20	16	20	15	310	27
As	176	62	241	340	180	212	226	75
Rb	177	172	153	154	140	156	162	198
Zr	130	120	130	130	150	170	118	120
Sb	79	19	27	32	20	40	97	13
Cs	18,6	17,0	17,1	16,0	15,6	14,9	31,0	18,3
Ba	640	520	370	600	1000	470	360	1400
La	50,5	48,9	44,5	44,3	45,7	48,5	19,7	29,5
Ce	101	95	93	86	92	100	53	48
Nd	44	41	45	33	41	50	40	22
Sm	7,4	7,4	7,8	6,6	6,6	7,9	5,9	3,7
Eu	1,35	1,32	1,43	1,21	1,13	1,40	1,32	0,88
Tb	0,88	0,84	0,96	0,76	0,74	0,88	0,68	0,71
Yb	2,9	3,2	2,5	2,7	2,2	2,7	1,9	2,6
Lu	0,41	0,43	0,39	0,36	0,37	0,39	0,30	0,36
Hf	6,3	6,1	5,8	5,5	5,6	6,2	2,7	5,0
Ta	1,6	1,6	1,5	1,5	1,3	1,5	0,9	2,0
Th	16,5	14,5	13,1	13,0	12,8	12,6	7,7	11,0
U	4,7	4,7	3,8	3,2	3,5	3,5	4,3	2,9

Tab. A.13.: Fortsetzung

		MA-110601	MA-110602	MA-110603	MA-110604	MA-110605	MA-110600	MA-110599	MA-110591
		FNr. 4960	FNr. 1583	FNr. 5426	FNr. 5429	FNr. 5587	FNr. 4858	FNr. 4845	FNr. 3633
		Ofen 1	Ofen 1	Ofen 2	Ofen 2	Ofen 2	Ofen 4	Vorplatz Ofen 4/5	Ofen 10
		Ofenbrust	Ofenversturz	Ostwand	Ostwand	Ostwand	Westwand	Schicht 3 Pl. 370	Schicht 49 Pl. 758
Fe	[Gew.-%]	10,7	3,4	3,3	3,7	3,7	5,2	1,4	4,5
Na		0,191	0,332	0,348	0,105	0,232	0,138	0,345	0,125
K		2,5	5,1	5,1	5,7	4,3	5,1	3,7	3,7
Sc	[mg/kg]	12,7	24,8	23,5	25,7	22,5	24,7	12,7	16,4
Cr		70	122	123	131	112	118	77	84
Co		77,0	18,5	18,2	8,4	25,6	27,1	2,3	18,5
Zn		820	61	56	45	47	100	25	310
As		1200	89	138	128	114	202	39	182
Rb		85	237	231	260	223	220	191	128
Zr		112	160	190	190	220	200	140	150
Sb		1600	53	41	45	18	75	13	20
Cs		9,6	22,5	21,3	28,4	23,1	21,2	15,7	9,6
Ba		900	870	910	1100	1110	850	440	320
La		42,1	67,0	65,0	49,9	72,0	50,6	53,6	46,8
Ce		78	123	121	87	131	107	102	93
Nd		70	60	56	40	60	46	40	50
Sm		10,4	10,4	10,5	9,2	10,5	9,7	7,6	8,1
Eu		2,20	2,18	2,15	2,03	2,24	2,22	1,25	1,50
Tb		1,10	0,69	1,00	0,80	0,84	0,80	0,85	0,93
Yb		2,1	4,2	4,0	3,9	4,0	4,1	3,5	3,4
Lu		0,50	0,61	0,51	0,59	0,55	0,54	0,44	0,49
Hf		4,0	4,9	5,0	5,4	4,9	5,0	7,3	7,0
Ta		1,4	2,0	2,1	2,1	1,9	1,9	1,9	1,5
Th		9,9	18,9	18,9	19,8	17,3	18,1	14,2	15,4
U		4,5	4,0	4,4	4,1	3,9	4,1	4,4	5,0

Tab. A.14.: Bleisotopenverhältnisse von Schlacken, Ofenwandverschlackungen, Erzen und Metallen vom Kupferschmelzplatz S1.

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	Material	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
MA-092831	FNr. 1219	Röstbett 2	21 Pl. 210	Laufschlacke	2,0295	0,80150	39,825	15,728	19,623
MA-092834	FNr. 1335	Röstbett 3	42	Erz	2,0342	0,83071	38,436	15,696	18,895
MA-101431	FNr. 1593	Röstbett 4	11 Pl. 136	Blasenschlacke	2,0761	0,83514	38,989	15,684	18,780
MA-101427	FNr. 1340	Röstbett 7	44	Blasenschlacke	2,0373	0,80334	39,880	15,725	19,575
MA-113458	FNr. 3075	Röstbett 9	1 Pl. 465	Metallfragment	2,0217	0,79937	39,773	15,726	19,673
MA-101396	FNr. 5451	Ofen 2	Ostwand	Schlackenhaut	2,0544	0,81819	39,442	15,708	19,199
MA-092853	FNr. 1570	Vorplatz Ofen 1/2	5 Pl. 281	Schlackentyp A+B	2,0411	0,80796	39,710	15,719	19,455
MA-101406	FNr. 5155	Ofen 5	Westwand	Schlackenhaut	2,0656	0,82385	39,343	15,692	19,047
MA-101407	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	Schlackenhaut	2,0527	0,81759	39,416	15,699	19,202
MA-092862	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	Laufschlacken	2,0423	0,80695	39,800	15,726	19,488
MA-092863	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	Blasenschlacke	2,0509	0,81749	39,412	15,710	19,217
MA-091450	FNr. 1332	Halde 1	5	Schlackentyp A+B	1,9857	0,78151	40,034	15,756	20,161
MA-091501	FNr. 2078	Halde 2	2	Blasenschlacke	2,0410	0,80586	39,834	15,728	19,517
MA-113459	FNr. 2090	Halde 2	5 Pl. 410	Metallnadelfragment	2,0698	0,82930	39,161	15,690	18,920
MA-091472	FNr. 2994	Halde 3	2	Erz	2,0318	0,80553	39,651	15,720	19,515
MA-091473	FNr. 4558	Halde 3	2	Laufschlacke	2,0603	0,81978	39,473	15,706	19,159
MA-113461	FNr. 3423	Halde 3	2 Pl. 678	Metallfragment	2,0280	0,80272	39,720	15,722	19,586
MA-091467	FNr. 2968	Allgemein	1, Halde 3	Erz	2,0888	0,85150	38,440	15,670	18,403

Tab. A.15.: Mössbauer Parameter, Eisenoxidationstufen und Identifikation der Mineralphasen der untersuchten Schlacken vom Kupferschmelzplatz S1 (¹ Isomeriewerschiebung relativ zu α -Fe bei Raumtemperatur, ² Quadrupolaufspaltung (ΔE_Q ; Dublett Unterspektren) oder Quadrupolverchiebung (ϵ ; Sextett Unterspektren), ³ internes Magnetfeld, ⁴ Linienbreite (in mm/s (Dublett Unterspektren) oder T (Sextette)), ⁵ Flächenverhältnis (proportional zum Eisengehalt der Mineralphase)).

δ^1 [mm/s]	ΔE_Q bzw. ϵ^2 [mm/s]	Bhf ³ [T]	σ^4 [mm/s bzw. T]	A ⁵ [%]	Fe ox.	Mineral
MA-092830 (FNr. 981, Röstbett 1, Schicht RB1-3)						
0,37	1,05	-	0,3	7,67	Fe ³⁺	paramagnet. Fe ³⁺
1,15	2,81	-	0,1	16,62	Fe ²⁺	Olivin
1,17	2,29	-	0,5	54,80	Fe ²⁺	Pyroxen
0,26	0,00	49,2	1,0	2,55	Fe ³⁺	Magnetit
0,67	0,00	46,1	1,0	1,49	Fe ^{2,5+}	Magnetit
0,40	0,00	22,0	16,6	16,87	Fe ³⁺	Eisen-(III)-Oxid
MA-092831 (FNr. 1219, Röstbett 2, Schicht 21 Pl. 210)						
0,48	0,72	-	0,3	20,73	Fe ³⁺	paramagnet. Fe ³⁺
1,16	2,85	-	0,1	6,61	Fe ²⁺	Olivin
1,09	2,50	-	0,5	39,26	Fe ²⁺	Pyroxen
0,37	-0,10	51,8	0,8	8,12	Fe ³⁺	Hämatit
0,26	-0,01	49,0	2,0	6,91	Fe ³⁺	Magnetit
0,67	0,00	46,0	2,0	1,88	Fe ^{2,5+}	Magnetit
0,40	0,00	18,3	13,8	16,48	Fe ³⁺	Eisen-(III)-Oxid
MA-092836 (FNr. 4162, Röstbett 4, Schicht 16 (=9?) Pl. 291)						
0,48	0,65	-	0,4	19,99	Fe ³⁺	paramagnet. Fe ³⁺
1,17	2,85	-	0,2	12,82	Fe ²⁺	Olivin
1,11	2,46	-	0,4	33,29	Fe ²⁺	Pyroxen
0,37	-0,10	51,8	0,6	5,69	Fe ³⁺	Hämatit
0,26	-0,01	42,8	8,7	13,80	Fe ³⁺	Magnetit
0,67	0,00	46,0	2,4	4,73	Fe ^{2,5+}	Magnetit
0,40	0,00	11,1	3,2	9,68	Fe ³⁺	Eisen-(III)-Oxid
MA-092843 (FNr. 1200, Röstbett 7, Schicht 58)						
0,32	0,96	-	0,4	11,15	Fe ³⁺	paramagnet. Fe ³⁺
1,17	2,81	-	0,2	23,70	Fe ²⁺	Olivin
1,17	2,37	-	0,4	25,60	Fe ²⁺	Pyroxen
0,26	-0,01	49,0	0,7	7,85	Fe ³⁺	Magnetit
0,67	0,00	46,0	1,8	12,13	Fe ^{2,5+}	Magnetit
0,98	-0,20	17,0	12,9	19,57	Fe ³⁺	Eisen-(III)-Oxid
MA-101393 (FNr. 5509, Ofen 2, Nordwand)						
0,39	1,00	-	0,2	15,16	Fe ³⁺	paramagnet. Fe ³⁺
1,15	2,80	-	0,2	0,53	Fe ²⁺	Olivin
1,15	2,00	-	0,2	0,25	Fe ²⁺	Pyroxen
0,37	-0,08	51,8	0,8	30,04	Fe ³⁺	Hämatit

Tab. A.15.: Fortsetzung

δ^1 [mm/s]	ΔE_Q bzw. ϵ^2 [mm/s]	Bhf^3 [T]	σ^4 [mm/s bzw. T]	A^5 [%]	Fe ox.	Mineral
0,26	0,00	32,2	17,4	35,07	Fe ³⁺	Magnetit
0,56	0,00	45,9	4,4	14,41	Fe ^{2,5+}	Magnetit
0,40	0,34	-	0,2	4,54	Fe ³⁺	Delafossit
MA-101395 (FNr. 5555, Ofen 2, Nordwand)						
0,38	1,07	-	0,5	23,50	Fe ³⁺	paramagnet. Fe ³⁺
1,20	2,12	-	0,5	28,55	Fe ²⁺	Pyroxen
0,37	-0,10	51,8	1,4	9,38	Fe ³⁺	Hämatit
0,26	-0,01	48,8	0,9	15,70	Fe ³⁺	Magnetit
0,67	0,00	44,9	3,8	22,96	Fe ^{2,5+}	Magnetit
MA-101407 (FNr. 5169, Ofen 5, Westwand)						
0,40	0,80	-	0,3	11,40	Fe ³⁺	paramagnet. Fe ³⁺
1,04	2,75	-	0,2	5,02	Fe ²⁺	Olivin
1,14	1,93	-	0,2	7,43	Fe ²⁺	Pyroxen
0,37	-0,10	51,8	1,0	5,64	Fe ³⁺	Hämatit
0,32	0,01	48,9	0,9	28,00	Fe ³⁺	Magnetit
0,62	0,01	45,1	2,1	42,26	Fe ^{2,5+}	Magnetit
0,40	0,33	-	0,2	0,25	Fe ³⁺	Delafossit
MA-092862 (FNr. 2863, Vorplatz Ofen 9/10, Schicht 2 Pl. 633)						
0,29	1,14	-	0,4	10,30	Fe ³⁺	paramagnet. Fe ³⁺
1,18	2,82	-	0,1	8,95	Fe ²⁺	Olivin
1,18	2,28	-	0,5	57,50	Fe ²⁺	Pyroxen
0,37	-0,10	51,8	1,0	3,27	Fe ³⁺	Hämatit
0,26	-0,01	49,0	1,0	4,35	Fe ³⁺	Magnetit
0,67	0,00	46,0	1,0	3,56	Fe ^{2,5+}	Magnetit
0,40	0,00	13,9	6,5	12,10	Fe ³⁺	Eisen-(III)-Oxid
MA-092863 (FNr. 2863, Vorplatz Ofen 9/10, Schicht 2 Pl. 633)						
0,40	0,89	-	0,4	17,34	Fe ³⁺	paramagnet. Fe ³⁺
1,14	2,75	-	0,3	31,80	Fe ²⁺	Olivin
1,20	2,13	-	0,6	33,90	Fe ²⁺	Pyroxen
0,26	0,00	49,2	1,0	2,56	Fe ³⁺	Magnetit
0,67	0,00	46,1	1,0	0,73	Fe ^{2,5+}	Magnetit
0,40	0,00	23,6	17,5	13,70	Fe ³⁺	Eisen-(III)-Oxid

Tab. A.16.: $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ -Verhältnisse der untersuchten Schlacken vom Kupferschmelzplatz S1.

Probennummer	Fundnummer	Objekt	Schicht	$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}_{\text{total}}$
MA-092830	FNr. 981	Röstoffbett 1	RB1-3	0,72
MA-092831	FNr. 1219	Röstoffbett 2	21 Pl. 210	0,47
MA-092836	FNr. 4162	Röstoffbett 4	16 (=9?) Pl. 291	0,48
MA-092843	FNr. 1200	Röstoffbett 7	58	0,55
MA-101393	FNr. 5509	Ofen 2	Nordwand	0,08
MA-101395	FNr. 5555	Ofen 2	Nordwand	0,40
MA-101407	FNr. 5169	Ofen 5	Westwand	0,34
MA-092862	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	0,68
MA-092863	FNr. 2863	Vorplatz Ofen 9/10	2 Pl. 633	0,66

B. Spektren

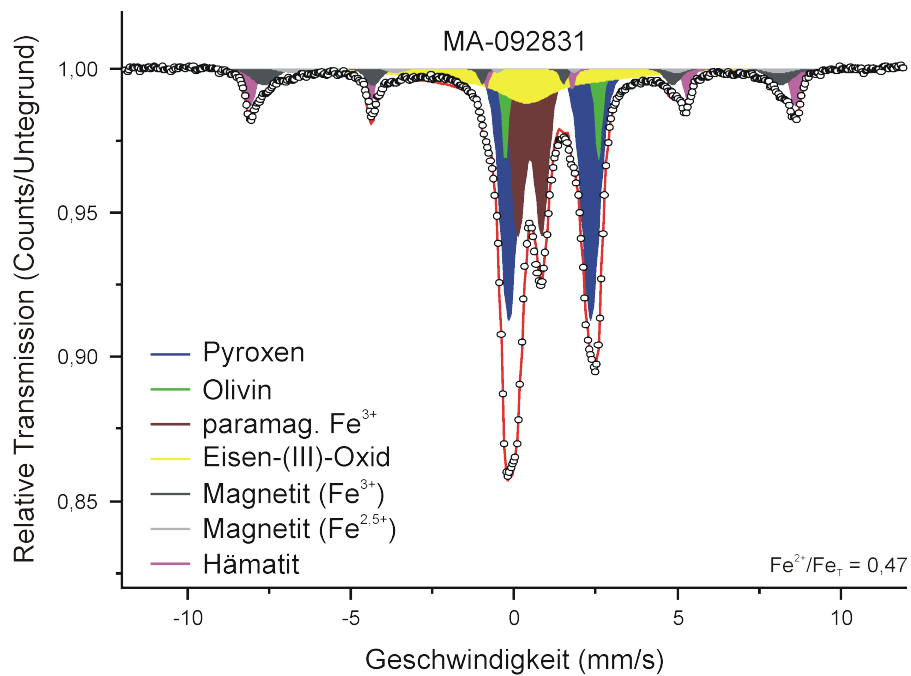
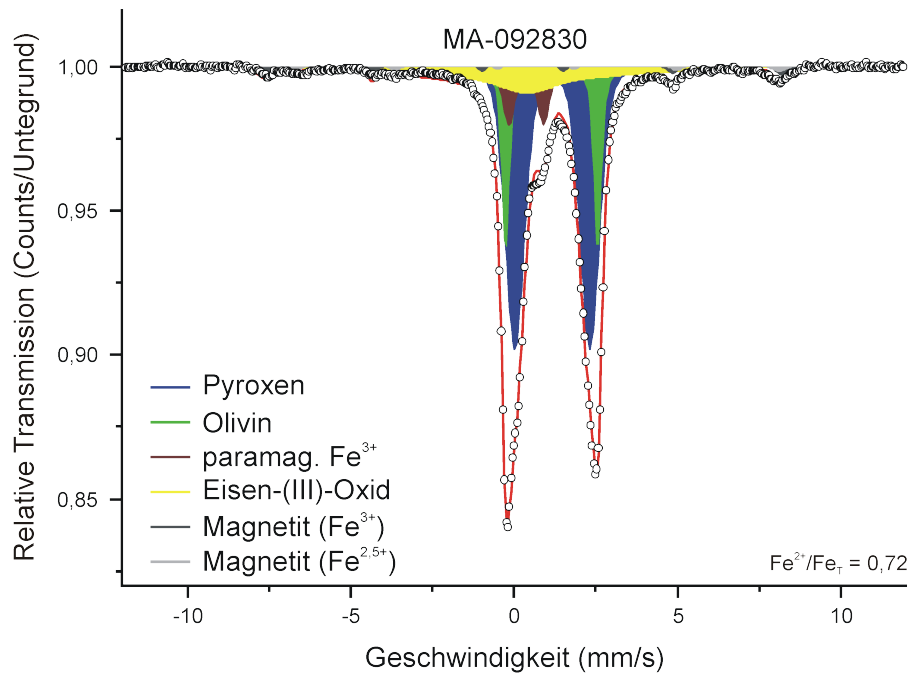


Abb. B.1.: Mößbauer-Spektren der untersuchten Schlacken aus Röstbett 1 (oben) und Röstbett 2 (unten) vom Kupfer-schmelzplatz S1.

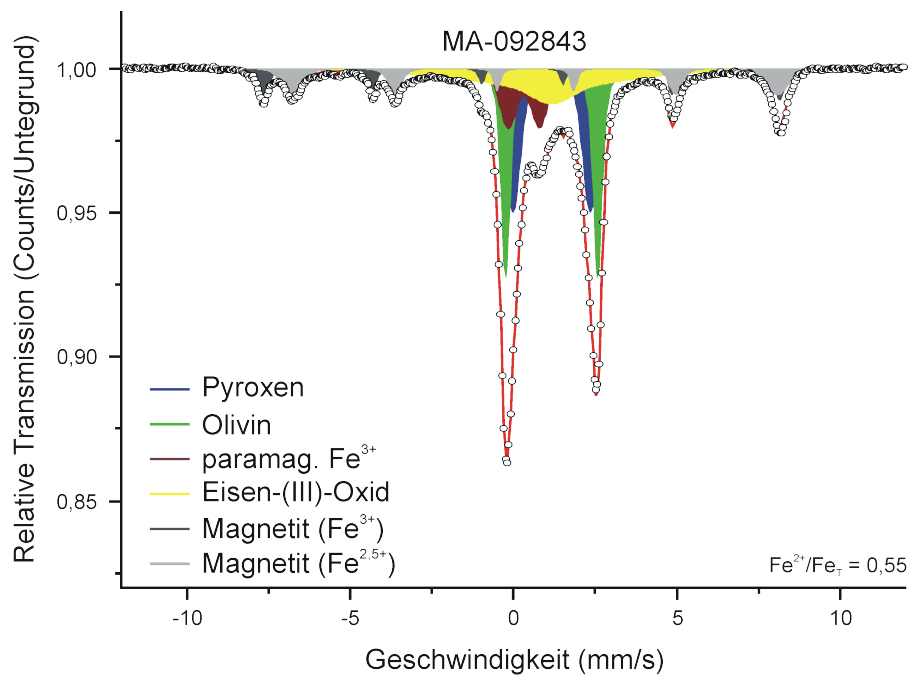
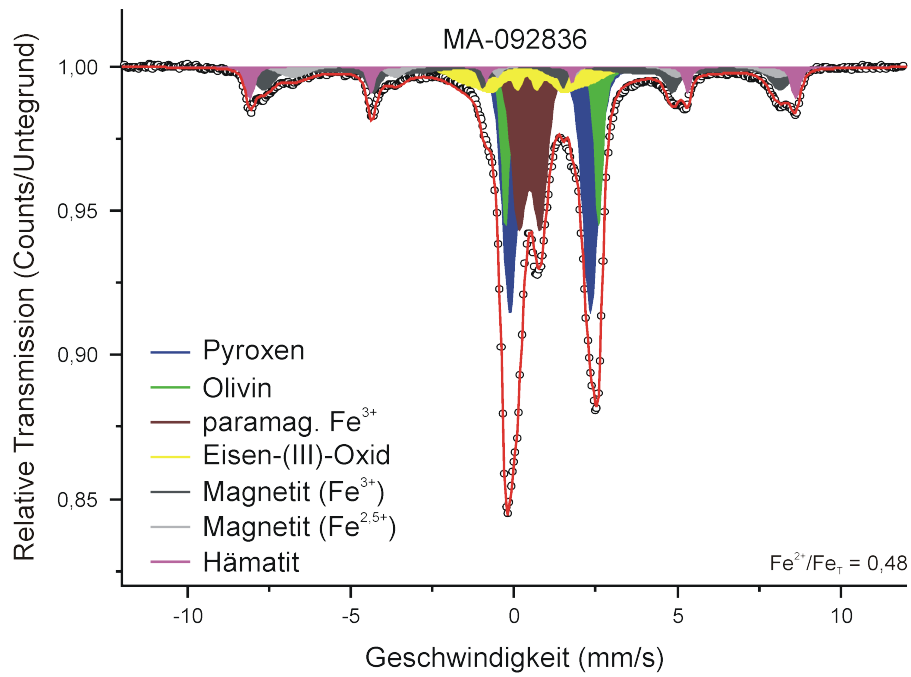


Abb. B.2.: Mößbauer-Spektren der untersuchten Schlacken aus Röstbett 4 (oben) und Röstbett 7 (unten) vom Kupfer-schmelzplatz S1.

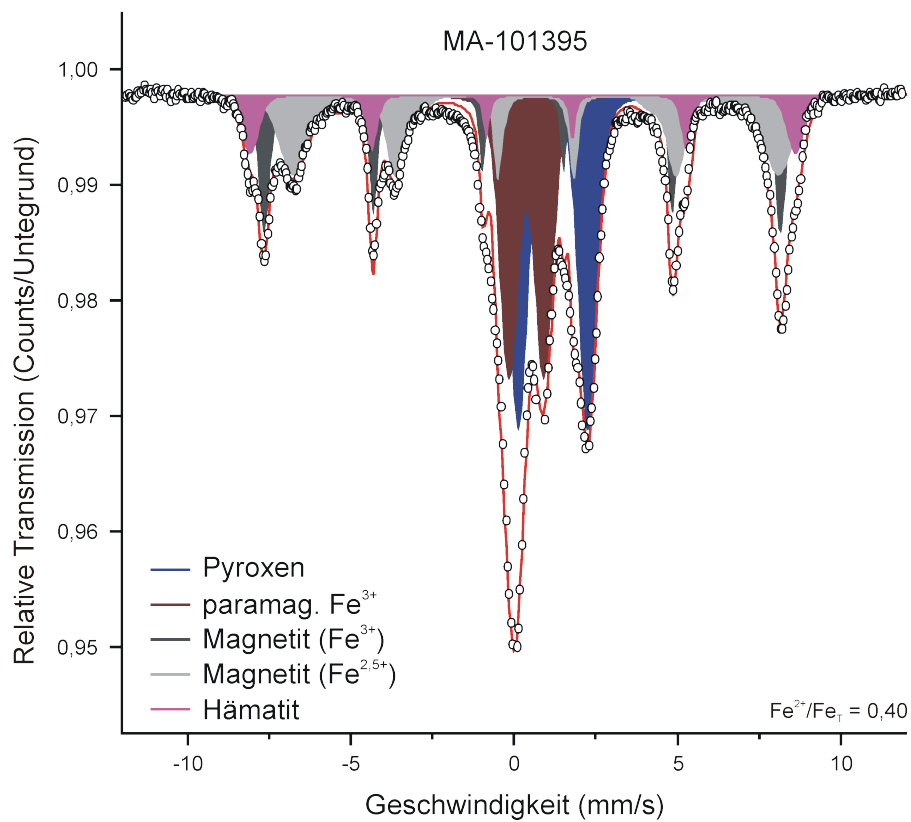
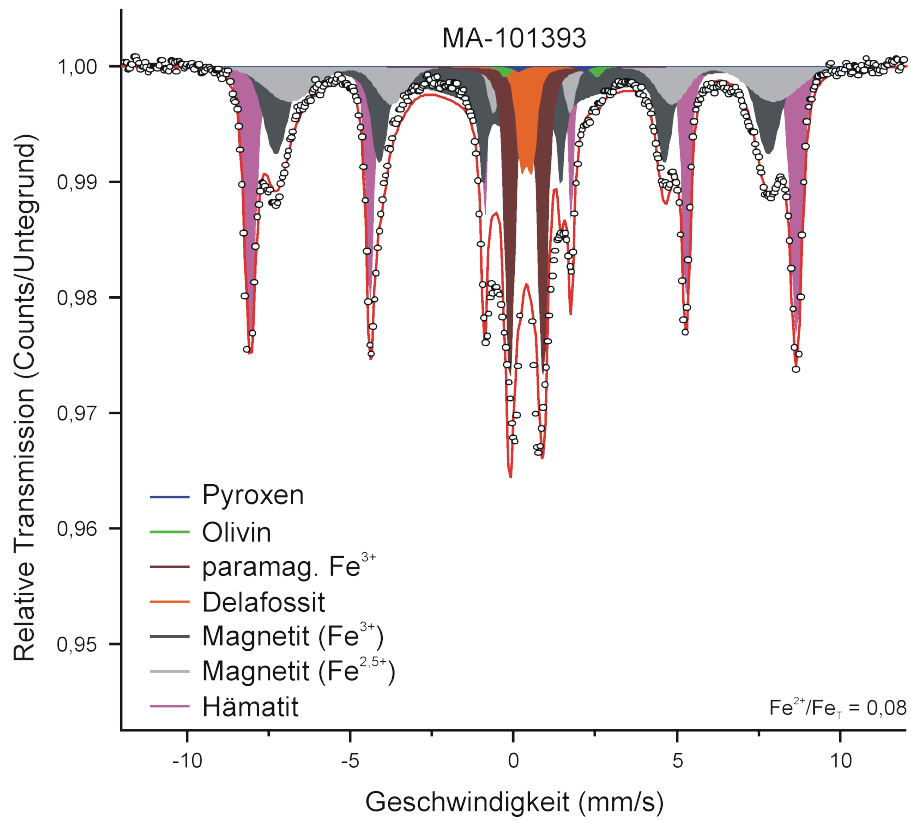


Abb. B.3.: Mößbauer-Spektren der untersuchten Ofenwandverschlackungen aus Schmelzofen 2 vom Kupferschmelzplatz S1.

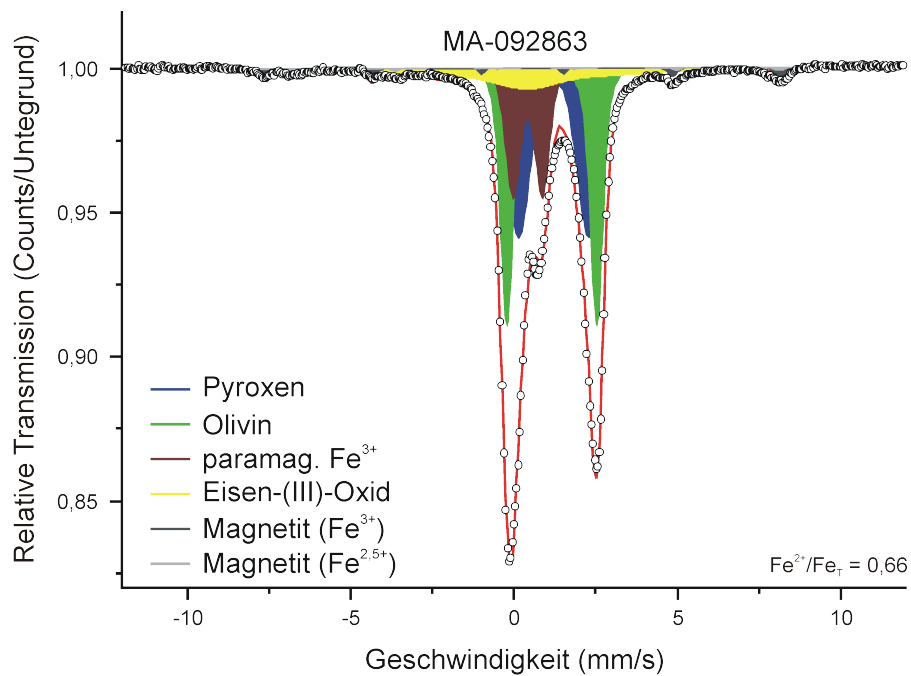
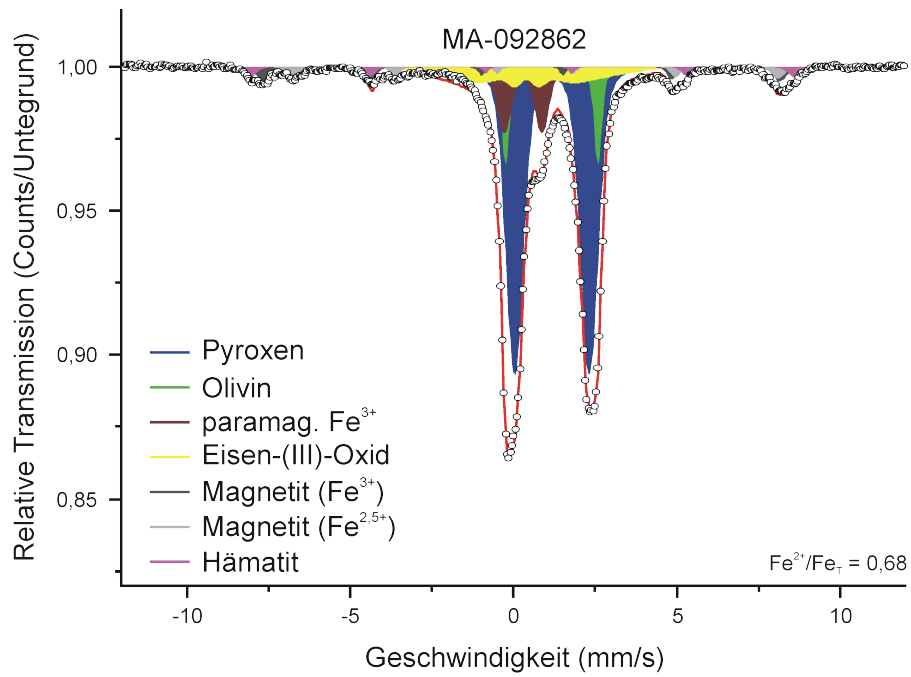


Abb. B.4.: Mößbauerspektren der untersuchten Schlacken vom Vorplatz der Doppelofenanlage 9/10 vom Kupferschmelzplatz S1.

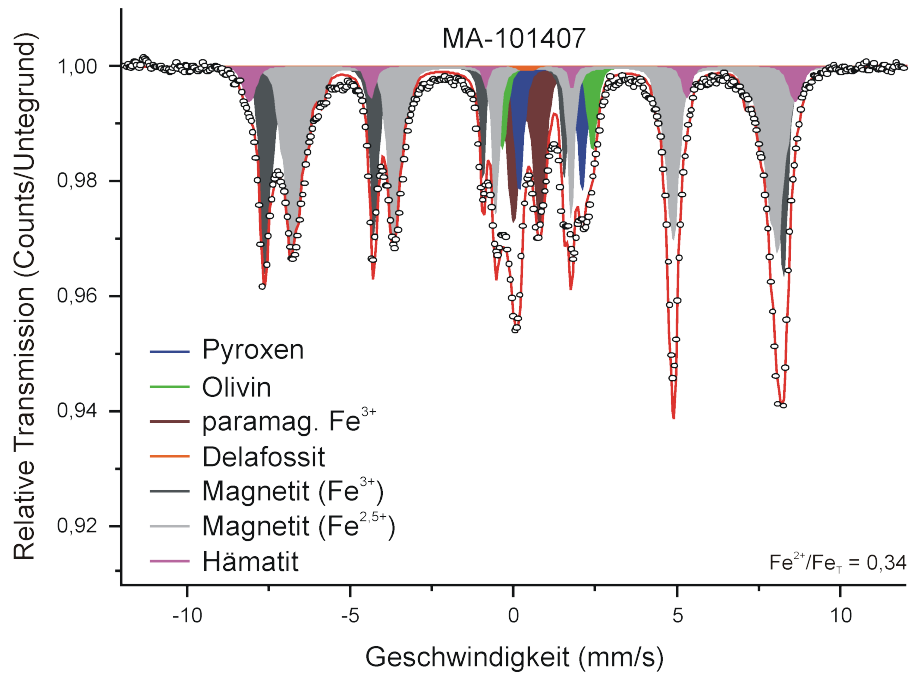


Abb. B.5.: Mößbauer-Spektrum der untersuchten Ofenwandverschlackung aus Schmelzofen 5 vom Kupferschmelzplatz S1.

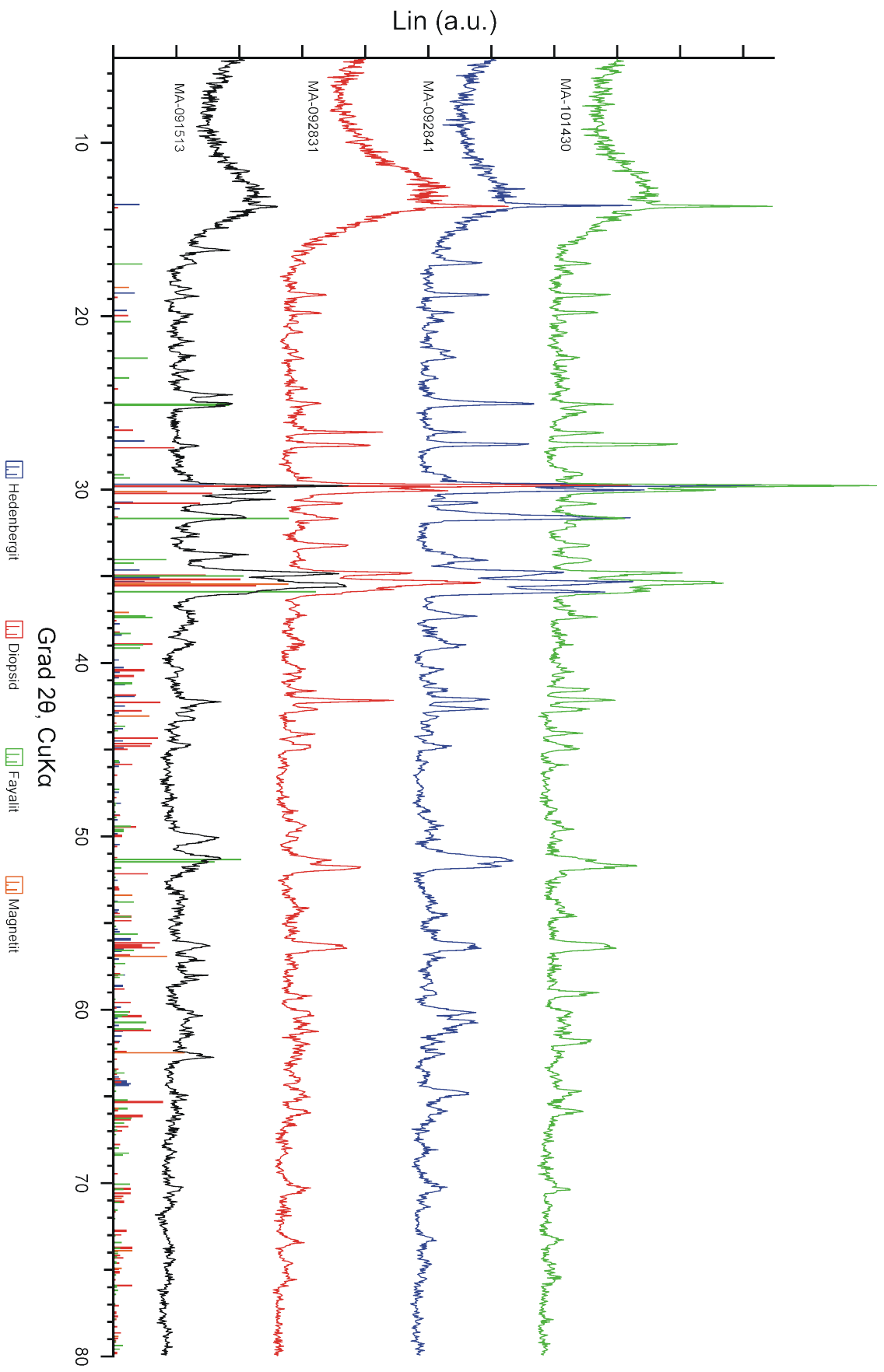


Abb. B.6.: Röntgendiffraktogramme der untersuchten Schlacken vom Kupferschmelzplatz S1.