

Ulrike Töchterle  
Gert Goldenberg  
Philipp Schneider  
Peter Tropper

## Spätbronzezeitliche Verhüttungsdüsen aus dem Bergbaurevier Mauken im Unterinntal, Nordtirol: Typologie, mineralogisch-petrographische Zusammensetzung und experimentelle Rekonstruktionsversuche

Das Forschungszentrum HiMAT – History of Mining Activities in the Tyrol<sup>1</sup> – an der Universität Innsbruck erforscht die Geschichte des Bergbaus in Tirol und seinen angrenzenden Gebieten unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf Umwelt und menschliche Gesellschaften. Im Rahmen eines vom österreichischen Forschungsfonds (FWF) geförderten Spezialforschungsbereichs (2007-2012) wurde das prähistorische Bergbaurevier Mauken bei Radfeld/Brixlegg im Unterinntal (Nordtirol) als key-area montanarchäologisch untersucht (Abb. 1). Das kleine Revier liegt am östlichen Rand der großen Fahlerzlagerstätten von Schwaz/Brixlegg, die sowohl während der Bronzezeit (Kupfer) als auch im späten Mittelalter und in der frühen Neuzeit (Silber und Kupfer) große Blütezeiten erlebten. Im Zuge der Forschungsarbeiten konnte die gesamte Produktionskette der Kupfergewinnung mit allen Arbeitsschritten vom Erzabbau über die Aufbereitung bis hin zur Verhüttung nachgewiesen werden. Die Befunde datieren von der späten Bronzezeit bis in die frühe Eisenzeit (SB II bis Ha C, ca. 1200-700 v. Chr.) und umfassen feuergesetzte Abbaue unter Tage (Mauk E), Pingenfelder (Mauk D), eine Erzaufbereitungsanlage (Mauk F) sowie einen Schmelzplatz (Mauk A)<sup>2</sup>. In den Jahren 2007/2008 konnten die auf dem Schmelzplatz bereits in den 1990er-Jahren begonnenen Ausgrabungen fortgeführt und intensiviert werden<sup>3</sup>. Bei der Durchsicht des keramischen Fundmaterials ließen sich zahlreiche Fragmente von Gebläsetöpfen

mit Düsenfunktion identifizieren. Diese stellen ein wesentliches Werkzeug bei pyrometallurgischen Prozessen dar und erfahren in der Literatur zumeist nur bedingt Aufmerksamkeit. Anhand der Düsenfragmente vom Schmelzplatz im Revier Mauken soll nun versucht werden, den status quo des bisherigen Forschungsstandes zum Thema Düsen neu zu beleuchten. Typologische Überlegungen, mineralogisch-petrographische Analysen und nicht zuletzt gezielte Experimente zu den Anwendungsbereichen der Düsen sollen einen Einblick in diesen relativ komplexen Themenbereich geben<sup>4</sup>.

### Der archäologische Befund

Trotz umfangreicher Bergbauspuren aus der späten Bronzezeit und frühen Eisenzeit, die in den Bergbaurevieren zwischen Schwaz, Brixlegg und Radfeld im Unterinntal mittlerweile nachgewiesen sind, konnten bislang nur zwei Verhüttungsplätze aus dieser Zeit aufgefunden werden. So stellt der 1994 entdeckte und inzwischen gut untersuchte Schmelzplatz „Mauk A“ in der Flur Hinter-Sommerau im Maukental, Gemeinde Radfeld<sup>5</sup> (Abb. 1), noch eine Ausnahme dar und ist deshalb von besonderer Bedeutung für die Rekonstruktion der spätbronzezeitlichen Kupfergewinnungsprozesse im Bereich des Unterinntales.

### *Late Bronze Age smelting tuyères from the Mauken mining district in the Lower Inn Valley, North Tyrol, Austria: typology, mineralogical and petrographical composition and experimental reconstruction attempts*

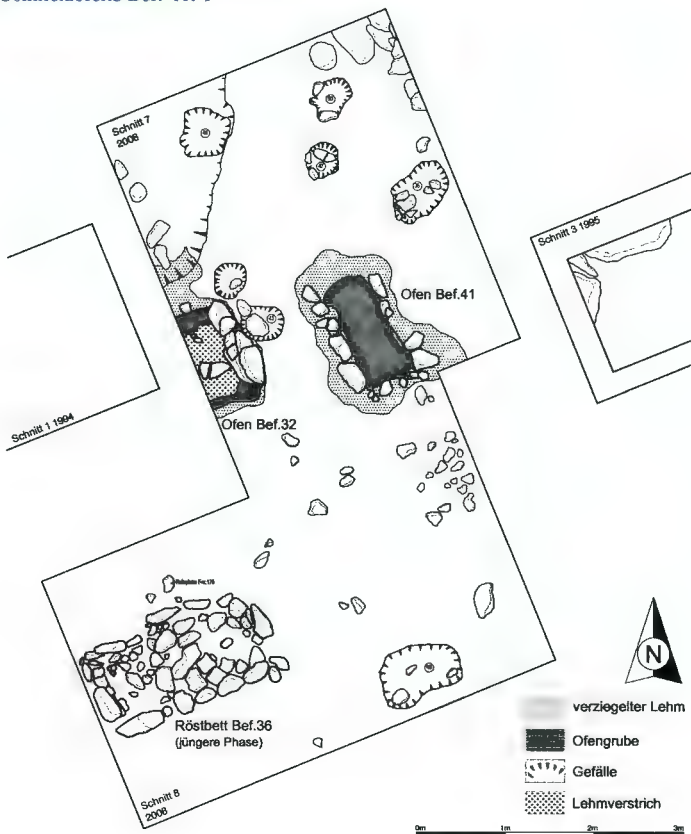
*Starting from archaeological findings from a Late Bronze Age copper-ore smelting site near Radfeld in North Tyrol, the topic of ceramic tuyères is discussed. Tuyères represent an important tool in pyrometallurgical processes, although they don't attract much attention in the literature. A comparison of artifacts and observations from pyrometallur-*

*gical contexts shows that primary and secondary copper metallurgy (smelting and melting) was first performed in crucibles or shallow hearths using blowpipes with attached short clay tuyères until the Early Bronze Age. At the end of the Early Bronze Age / beginning of the Middle Bronze Age low shaft furnaces were introduced for copper-ore smelting equipped with larger straight ceramic tuyères and bellows. Secondary metallurgy in contrast (refining, melting and casting) was still carried out in crucibles or fire pits (hearths), but larger bended ceramic tuyères connected with bellows replaced the former blow pipes. Typological considerations, mineralogical and petrographical analysis and experimental studies dealing with the application of different types of tuyères aim to get a deeper insight into this complex metallurgical subject.*



Abb. 1: Das prähistorische Bergbaurevier Mauken bei Radfeld/Brixlegg mit den archäologischen Fundplätzen

Abb. 2: Rechts: Grabungsbefund 2008 auf dem Schmelzplatz Mauk A bei Radfeld mit zwei Schmelzöfen und einem mehrphasigen Röstbett; links: Detailfoto des Schmelzofens Bef. 41. 1



Für die pyrometallurgische Weiterverarbeitung der in zahlreichen kleineren und größeren Grubenbauen im Bergbaurevier Mauken gewonnenen Kupfererze wurde an einem topographisch günstig gelegenen Standort ein zentraler Verhüttungsplatz eingerichtet. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Aufwand für die Einrichtung eines Schmelzplatzes relativ groß war und die Erzverhüttung nur von erfahrenen Spezialisten bzw. Hüttenleuten bewerkstelligt werden konnte, die die komplizierten metallurgischen Prozesse beherrschten. Für den Verhüttungsplatz Mauk A (Abb. 1) wurde ein natürliches Plateau im sonst meist steilen alpinen Gelände unterhalb der Sommerauer Wände ausgewählt, das von einem kleinen Quellbach durchflossen wird. Die Entdeckung des Schmelzplatzes erfolgte 1994 im Zuge einer montanarchäologischen Prospektion und wurde durch einen Aufschluss im Zuge eines Forstwegebbaus mit Drainagegraben ermöglicht. Im aufgebaggerten Graben, der das Gelände entwässert, kamen dunkle Schlackensande und prähistorische Keramikfunde zum Vorschein, darunter mehrere Fragmente mit Lochung (Abb. 8,1-3), wie dies von bronzezeitlichen Gebläsetöpfen bekannt ist<sup>6</sup>. Im Vorfeld der durchgeführten archäologischen Ausgrabungen wurde versucht, mit Hilfe von Magnetfeldmessungen mögliche Standorte ehemaliger Schmelzöfen im Untergrund zu lokalisieren. Dabei gelang es zunächst, Lage und ungefähres Ausmaß der Schlackensandhalde zu ermitteln. Mit Hilfe von Bohrungen mit einem Handbohrstock wurde eine Mächtigkeit der Schlackensandablagerung von bis zu 1,30 m sowie eine verbliebene Schlackenmenge in der Größenordnung von 100 t ermittelt. Daraus lässt sich – nach Erfahrungswerten – eine produzierte Kupfermenge in einer Größenordnung von ca. 5-10 t ableiten. Diese Zahl muss vor dem Hintergrund einer über viele Jahrzehnte andauernden Nutzung des Platzes gesehen werden.

Bei einer Grabung im Sommer 2008 wurde gezielt versucht, ehemalige Ofenanlagen im Untergrund aufzufinden. Unter einer 0,20-0,60 m mächtigen Überdeckung durch jüngere Muren-Abgänge (Kalksteinschotter) kamen dabei intensiv rot gebrannte und mit Holzkohle versetzte Lehmschichten und Steinpakete zum Vorschein, die als Überreste von weitgehend abgetragenen Öfen interpretiert werden können (Abb. 2). Im tiefsten Bereich des Befundes wurden schließlich die Überreste zweier Schmelzöfen freigelegt, die aus einer jeweils dreiseitig in Stein gesetzten rechteckigen Struktur bestehen<sup>7</sup>. Unmittelbar neben diesem Befund konnte ein noch gut erhaltenes zweiphasiges Röstbett aufgedeckt werden, in dem vor allem Arsen-, Antimon- und Schwefel-haltige Fahlerze geröstet wurden. Damit entspricht der archäologische Befund den aus der mittleren und späten Bronzezeit bekannten Strukturen zahlreicher gut dokumentierter Ofenanlagen in anderen ost- und südalpinen Kupferbergbaurevieren. Über den Schmelzprozess selbst geben zahlreiche Funde von Schlacken, Ofenlehm und Ofensteinen Auskunft. Mit Hilfe von mineralogischen Analysen lassen sich anhand dieser Funde die Rohstoffe (Ausgangserze, Zuschläge), Schmelzreaktionen und Prozessbedingungen während der Verhüttung weitgehend rekonstruieren.

Mehrere Fragmente von Gebläsetöpfen aus gebranntem Ton belegen den Einsatz von Blasebälgen, die für die Erzeugung der für den Schmelzprozess erforderlichen hohen Temperaturen (1.300°-1.350° C) benötigt wurden. Als Brennstoff und Reduktionsmittel wurde Holzkohle, eventuell auch Holz, eingesetzt. Weitere aufschlussreiche Informationen lieferte die Schlackensandhalde. Etwa 100 Tonnen sandfein zerkleinerte Kupferschlacken belegen eine systematische Aufbereitung der in den Schmelzöfen erzeugten Schlacken. Dies hatte offensichtlich zum Zweck, die in den

Schlacken verbliebenen Kupferrestgehalte (Kupferstein, Kupfer) zu gewinnen und damit die Ausbeute an Metall zu optimieren. Die Abtrennung der kupferhaltigen Einschlüsse erfolgte auf nassmechanischem Weg durch Schwerentrennung, ähnlich wie beim Goldwaschen. Für die „Schlackenwäsche“ wurden Wascherinne angelegt, über die der aufbereitete Schlackensand gespült wurde. Während die schweren kupferhaltigen Bestandteile am Boden des Gerinnes zurückblieben, wurde der Rest der leichteren Schlacken weggespült und lagerte sich unterhalb der Waschanlage ab. Ein spektakulärer Befund eines solchen mit Holz verschalteten Gerinnes konnte bei einer Grabung 1997 freigelegt werden<sup>8</sup>. Eine Besonderheit des Schlackensandes sind dessen konservierende Eigenschaften für organisches Material, hervorgerufen durch die Anwesenheit von Kupfersalzen. So sind z. B. in der Schlackensandhalde entsorgte Tierknochen als Speiseabfälle besonders gut erhalten und durch Kupfersalze meist intensiv grün gefärbt. Aber auch Textilreste in kleinen Fragmenten konnten aus dem Schlackensand geborgen werden. Für den Botaniker und Archäozoologen bilden die im Schlackensand erhaltenen Reste von Pflanzen und Kleinlebewesen (Insekten u. a.) eine wahre Fundgrube für die Rekonstruktion der damaligen Umwelt. Insgesamt zeigt der Schmelzplatz den Charakter einer „Werkplatzsiedlung“, worauf große Mengen an Haushaltskeramik und Speiseabfällen sowie weitere Kleinfunde hinweisen. Ob es sich dabei um eine ganzjährige oder nur um eine saisonale, auf die Sommermonate beschränkte Siedlung gehandelt hat, ist noch ungeklärt. Die Versorgung der Berg- und Hüttenleute mit Fleisch erfolgte zumindest teilweise von außerhalb, wie es die Auswertung archäozoologischer Analysen an Tierknochen ergeben hat<sup>9</sup>. Der Verhüttungsplatz datiert nach <sup>14</sup>C-Analysen, dendrochronologischen Ergebnissen und fundtypologischen Merkmalen in das 12./11. Jahrhundert v. Chr.

## Technologische Entwicklung der keramischen Düsen im inneralpinen Gebiet

Düsen und „Gebläsetöpfe“ zählen zur technischen Keramik. Die sehr eigenwilligen Keramikformen aus der Bronzezeit stehen in unmittelbarer Verbindung mit pyrometallurgischen Tätigkeiten und lassen sich aufgrund ihrer typologischen Entwicklung als technologische Leitformen bezeichnen. Dabei ist es nicht immer einfach, zu unterscheiden, ob die Düsen für eine primäre Metallurgie – die Kupfergewinnung aus Kupfererzen (englisch: smelting) – oder für eine sekundäre Metallurgie – die Verarbeitung von Metall durch Aufschmelzen und Gießen (englisch: melting) – genutzt worden sind. Erste Nachweise von Düsen zur Verhüttung von Kupfererzen (Funde von Tiegelfragmenten und Schlacken) sind bereits aus der mittleren und späten Kupferzeit<sup>10</sup> von Fundstellen in Nordtirol<sup>11</sup>, Südtirol<sup>12</sup> und im Trentino<sup>13</sup> bekannt. Es handelt sich um kleine, über Blasrohre betriebene Düsen, die meist im Verbund mit metallurgischen Abfallprodukten wie Schlacken auftreten.<sup>14</sup> Ab der Frühbronzezeit treten kurze Blasrohrdüsen zum Schmelzen von Kupfer bzw. Kupfererzen vermehrt auf (Abb. 3)<sup>15</sup>. Gerade in den frühbronzezeitlichen Siedlungen im Tiroler Unterinntal weisen Tondüsenfunde (Abb. 4), Gußformen<sup>16</sup>, Tiegelfragmente<sup>17</sup> und schlackengemagerte Keramik auf metallurgische Tätigkeiten hin, die zumindest im Rahmen kleinerer Werkstätten stattfanden.<sup>18</sup> Hier wurden Fahlerze aus dem Bergbaurevier Schwaz/Brixlegg verarbeitet, wie zum Beispiel am Kiechlberg bei Thaur<sup>19</sup>, am Buchberg bei Wiesing<sup>20</sup>

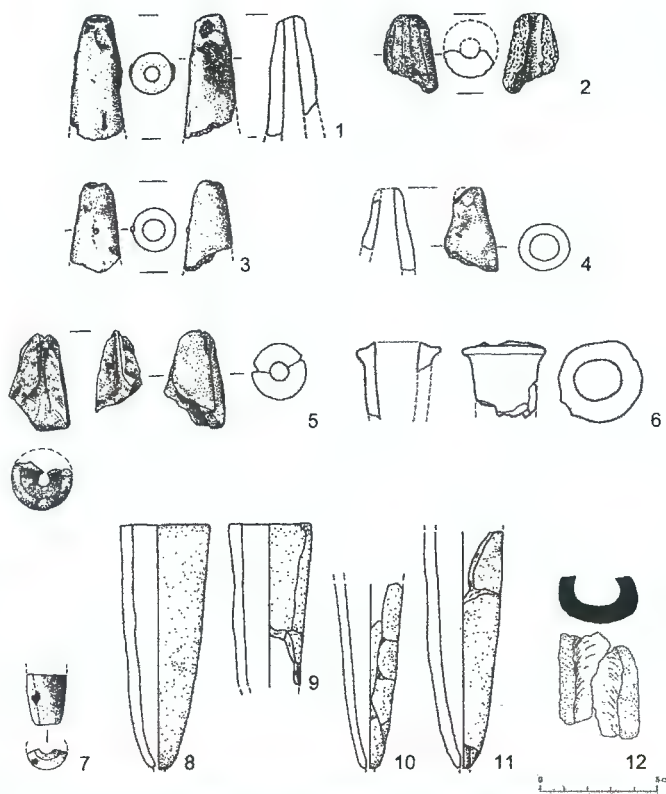
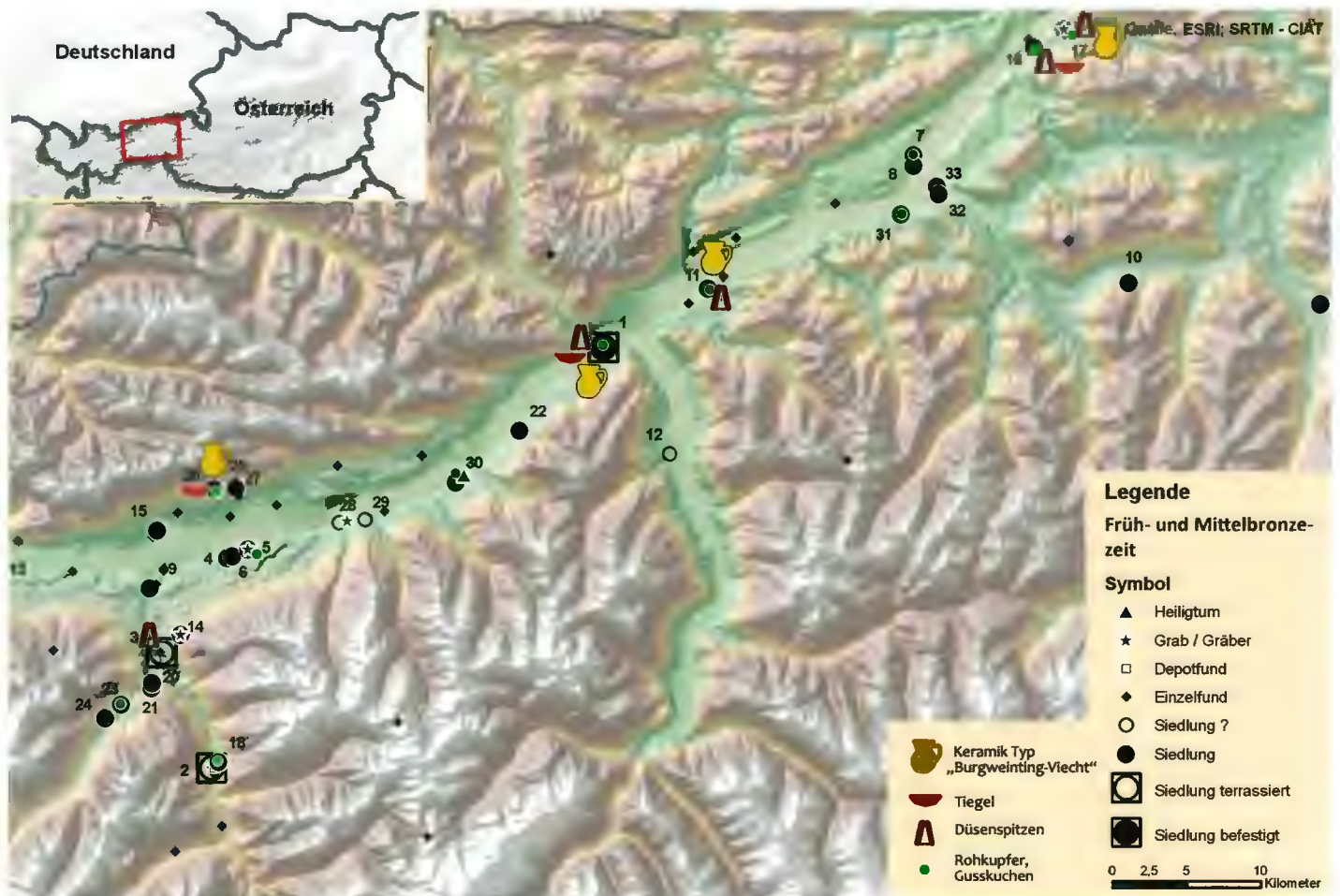


Abb. 3: Kurze Blasrohrdüsen aus Nordtirol. 1-4 Brixlegg-Mariahillberg und Hochkapelle; 5-6 Wiesing-Buchberg; 7 Kufstein-Festungsberg; 8-11 Kufstein-Tischofer Höhle; 12 Patsch-Europabrücke

und in der Tischofer Höhle bei Kufstein<sup>21</sup>. Ein kleines Kupfergußstück aus den frühbronzezeitlichen Schichten aus Angath läßt auch dort Fahlerzmetallurgie vermuten<sup>22</sup>. Das Auftreten der kurzen Blasrohrdüsen scheint tatsächlich mit der frühbronzezeitlichen Belegung der Unterinntaler Siedlungen ab FB Ib-IIa und dem Auftreten von Keramik der Gruppe Burgweinting/Viecht zu korrelieren<sup>23</sup> (Abb. 4). Einen indirekten Hinweis dafür liefert ein an der eponymen Fundstelle Burgweinting aufgefundenes Düsenfragment<sup>24</sup>. Wolfgang Sölder<sup>25</sup> ist der Ansicht, dass mit dem Auftreten der im Alpenvorland verbreiteten Keramikgruppe „Burgweinting/Viecht“ (FB Ib-IIa)<sup>26</sup> Personengruppen aus dem südbayrischen Raum, möglicherweise Erzprospektoren, ins Unterinntal eingewandert sind und damit auch das metallurgische „know how“ importiert haben (Abb. 4). Das Innsbrucker Becken und das Wipptal blieben von dieser frühen

Abb. 4: Verbreitungskarte zu den Hinweisen auf Metallurgie im Unterinntal und Wipptal. 1. Wiesing, Buchberg. – 2. Matrei a. Br., Gschleirsbühel. – 3. Patsch, Europabrücke. – 4. Ampass, Kogel. – 5. Ampass, Sonnenbühel. – 6. Ampass, Mensboden. – 7. Angath, Fürth. – 8. Angath, Kirchleiten. – 9. Aurach, Bacherbirg. – 10. Brixen i. T., Götschen/Kandleralm. – 11. Brixlegg, Hochkapelle. – 12. Fügen, Kapfing. – 13. Grinzens, Burgeben. – 14. Igl, Goldbichl. – 15. Innsbruck, Burgstadel. – 16. Kufstein, Festungsberg. – 17. Kufstein, Tischofer. – 18. Mühlbachl, Trautson. – 19. Natters, Sonnenburger Hügel. – 20. Schönberg, Hagebichl. – 21. Schönberg, Zauberbichl. – 22. Schwaz, Freundsberg. – 23. Telfes, Muiggensbichl. – 24. Telfes, Kapurga. – 25. Thaur, Altenburg. – 26. Thaur, Kiechlberg. – 27. Thaur, Meißerbichl. – 28. Volders. – 29. Volders Himmelreich. – 30. Weer, Cafe Günther. – 31. Wörgl, Inntalmilch. – 32. Wörgl, Egerndorfer Feld. – 33. Kirchbichl, Grattenberg!



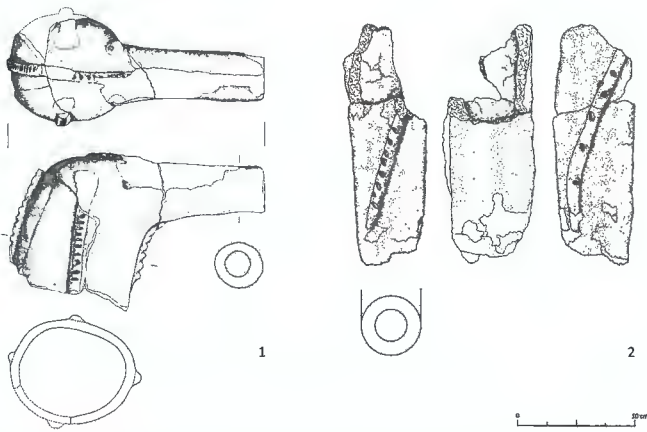


Abb. 5: Gebogene Düsen zum Aufschmelzen des Kupfers in Tiegeln bzw. Herdgruben. 1 Ampass-Palmbühel; 2 Grattenbergl bei Wörgl

Besiedlung mit Metallurgie vorerst noch unberührt, der Beginn der Siedlungen setzt hier frühestens in FB III (Bz A2) ein<sup>27</sup>. Sowohl das Verhütten von oxidischen als auch sulfidischen Erzen mittels Blasrohrdüsen in einfachen Herdgruben bzw. in flachen Tiegeln ließ sich in zahlreichen Experimenten erfolgreich rekonstruieren<sup>28</sup>.

Ab der ausgehenden Frühbronzezeit / mittleren Bronzezeit vollzieht sich ein Wandel in der Gebläsetechnologie, denn die Blasrohre werden nun durch leistungsfähigere Blasebälge und entsprechend größere Düsenaufsätze ersetzt. Bis ca. ins 5. Jahrhundert v. Chr.<sup>29</sup> verwendete man in Mitteleuropa zum Aufschmelzen von Schwarzkupfer/Kupfer/Bronze L-förmig gebogene Düsen, die erstmals den Gebrauch von Blasebälgen zur Erzeugung eines kontinuierlichen Luftstroms (beim Einsatz von zwei Bälgen im Wechsel) belegen<sup>30</sup> und somit einen deutlich verbesserten Schmelzpro-

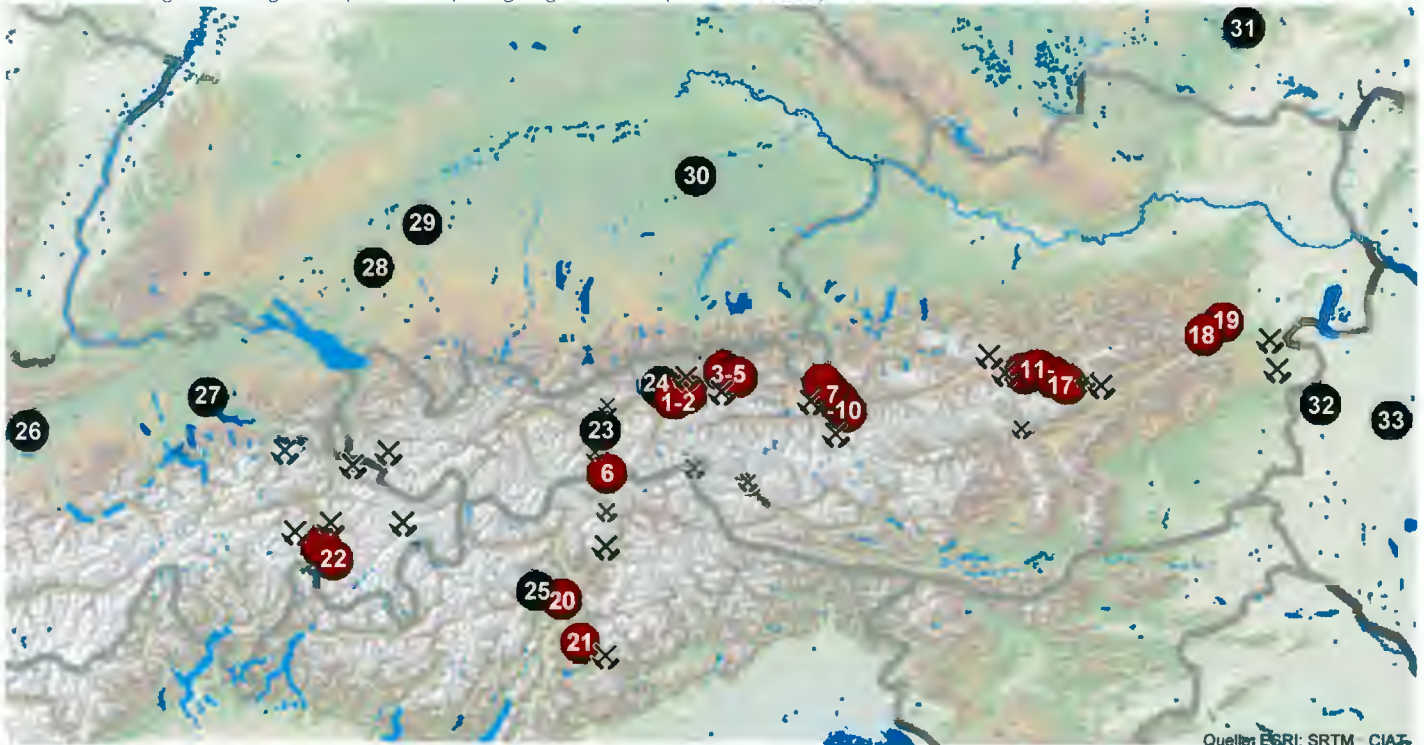
zess bewirken<sup>31</sup>. Die umsetzbare Energie ist höher als bei den auf Blasrohren aufgesetzten frühbronzezeitlichen Düsen<sup>32</sup>.

Als einziges bisher bekanntes Beispiel einer gebogenen Düse mit L-förmigem Knick aus Nordtirol sei an dieser Stelle die spätbronzezeitliche Düse vom Palmbühel bei Ampass erwähnt<sup>33</sup> (Abb. 5,1). Ein kürzlich entdecktes Fragment vom Grattenbergl bei Kirchbichl scheint ebenfalls diesem Typus anzugehören (Abb. 5,2)<sup>34</sup>. Die Leistenverzierung brachte man nicht nur aus funktionellen Gründen an, sie vermittelt eine zoomorph anmutende Oberflächengestaltung, die, wie bei zahlreichen anderen Vergleichsobjekten, mit einem bestimmten Symbolgehalt in Verbindung gebracht werden kann<sup>35</sup>. Die pferdekopffartige Ausgestaltung der Düsen ist durch das Ausformen von Mähne und Augen offensichtlich. Es liegt nahe, dass sich die prähistorischen Kupfer- und Bronzeschmelzer diese Düsen als belebte Objekte vorstellten. Durch das abwechselnde Einziehen und komprimierte Austreten des Luftstrahls ertönt beim Betrieb der Blasebälge aus den Düsen ein unüberhörbares „Schnaufen“.

Wie aus der Verbreitungskarte der gebogenen Düsen nach Christoph Roden (1988) hervorgeht, lagen zum Zeitpunkt seiner Publikation aus Gesamteuropa 28 Exemplare aus spätbronze- und ältereisenzeitlichen Fundkomplexen vor<sup>36</sup>. Die Stücke stammen überwiegend aus den Werkstattbereichen metallverarbeitender Siedlungen, wie auch das Stück von Ampass. In nur fünf Fällen liegt diese Düsenform auch aus Gräbern vor<sup>37</sup>.

In einer jüngst von Detlef Jantzen (2008)<sup>38</sup> vorgelegten Verbreitungskarte sind neben 39 Exemplaren aus Europa erstmals auch zwei Stücke aus Österreich erwähnt, nämlich Prein a. d. Rax in Niederösterreich<sup>39</sup> und Trieben-Versunkene Kirche in der Steiermark<sup>40</sup>. Auffallend ist, dass bei beiden Exemplaren die Form in keiner Weise dem Typus der gebogenen Düsen entspricht, sondern trotz einer leichten Krümmung vielmehr den Fragmenten vom Schmelzplatz im Maukental bei Radfeld (Nordtirol, Abb. 7) ähnelt<sup>41</sup>, die einen anderen Typus, den der „geraden Düsen“ re-

Abb. 6: Verbreitungskarte der geraden (rote Punkte) und gebogenen Düsen (schwarze Punkte)



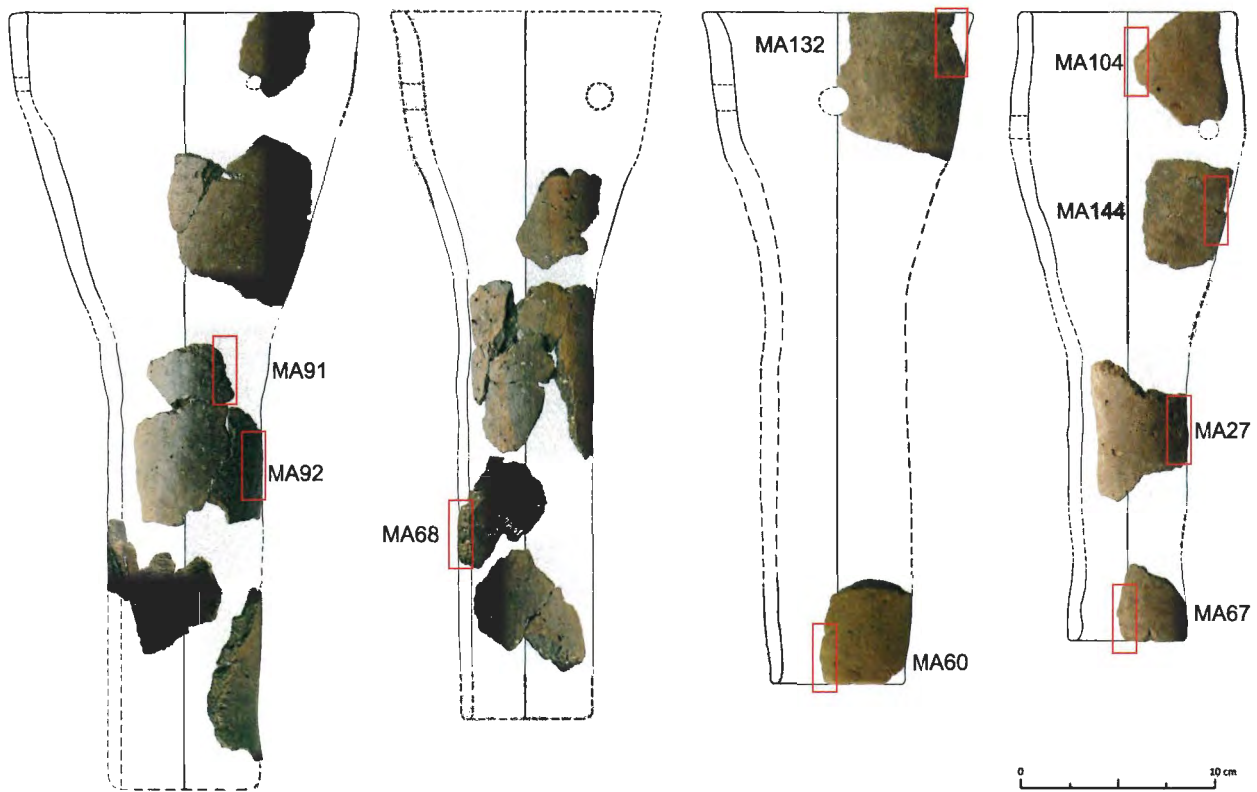


Abb. 7: Gerade Düsen vom Schmelzplatz Mauk A bei Radfeld. Rote Umrandung: Probenentnahme für Dünnschliffe

präsentieren. Die vorläufige Kartierung der Funde von gebogenen<sup>42</sup> und geraden Düsen zeigt (Abb. 6, Listen siehe Anhang), dass sich ein völlig differentes Verteilungsbild ergibt: während die geraden Düsen ausschließlich an Schmelzplätzen oder im unmittelbaren Umfeld der Kupferbergbaureviere vorkommen<sup>43</sup>, stammen die gebogenen Düsen ausnahmslos aus Siedlungszusammenhängen. Das Verbreitungsgebiet der geraden Düsen deckt sich mit den prähistorischen Abbaugebieten von Kupfererz. Damit besteht eindeutig ein Zusammenhang zwischen der Funktionalität des Fundortes, der Düsenform und letztendlich der Düsenverwendung. Gerade Düsen sind ein wesentlicher Bestandteil bei „primären“ metallurgischen Prozessen wie der Verhüttung in (kleinen) Schachtöfen mit Luftzufuhr von unten oder von der Seite, während gebogene Düsen bei „sekundären“ metallurgischen Prozessen wie der Raffination und Weiterverarbeitung von Kupfer bzw. Bronze in Tiegeln bzw. Grubenherden mit Luftzufuhr von oben Verwendung finden<sup>44</sup>. Die geraden Düsen, wie sie im Revier Mitterberg bereits ab der Mittelbronzezeit belegt sind (Abb. 8, 10.11)<sup>45</sup>, können somit dem Prozess der Verhüttung zugeordnet werden. Bereits 1981 hat Ronald F. Tylecote eine Unterteilung in verzierte Schmiededüsen („smithing tuyeres“) und unverzierte Verhüttungsdüsen („smelting tuyeres“) vorgenommen<sup>46</sup>.

### Gerade Verhüttungsdüsen vom Schmelzplatz Mauk A / Radfeld (Nordtirol): Typologische Merkmale und Zusammensetzung der Magerung

Diese relativ großen Düsen mit bis zu ca. 40 cm Länge sind alle unverziert, die Düsenspitzen wurden nicht oder nur leicht umgebogen (Abb. 7). Da die Düsenfunde oft in stark fragmentiertem

Zustand vorliegen, ist ein Erkennen der Düsenfunktion und damit die Unterscheidung von gewöhnlichen Gefäßbruchstücken oftmals sehr schwierig. Ein typisches Merkmal sind beispielsweise sehr grobe, horizontal verlaufende Glättspuren an der Innenseite, die im noch weichen Zustand des Tons angebracht wurden, sowie eine feine, in vertikaler Richtung verlaufende Glättung an der Außenseite, die im lederharten Zustand zugefügt wurde. Der obere Rand, der mit dem Blasebalg verbunden war, ist leicht nach außen gewulstet und abgestrichen. Einige Zentimeter unterhalb des Randes befinden sich meist zwei bis vier vor dem Brand eingebrachte Löcher<sup>47</sup>, die einen Durchmesser von ca. 1 cm haben und sehr wahrscheinlich zur Befestigung des Blasebalges dienten (Abb. 7; 8). Anzumerken ist, dass die bisher beobachtete Düsenkeramik keinerlei Spuren von Verschlackung aufweist.

Zur näheren Untersuchung der Keramik konnten am Institut für Mineralogie und Petrographie der Universität Innsbruck von ausgewählten Fragmenten polierte Dünnschliffe angefertigt und petrographisch analysiert werden. Das Hauptaugenmerk lag auf der qualitativen und quantitativen Analyse der Keramikproben mit Charakterisierung der Magerungsbestandteile. Die Auswahl der Proben erfolgte gezielt: Fragmente sowohl aus dem mittleren Düsenbereich als auch aus dem oberen und unteren Randbereich wurden für die Analysen herangezogen (Abb. 7, rote Rahmen). Fragmente aus dem unteren, dem Ofenraum zugewandten Bereich, bei denen anzunehmen ist, dass sie während des Betriebs des Schmelzofens besonders hohen Temperaturen ausgesetzt waren, wurden diesbezüglich genauer untersucht.

Voraussetzung für die Herkunftsbestimmung der intentionell zugesetzten nichtplastischen Gemengteile (Magerung)<sup>48</sup> ist die Kenntnis der regionalen Geologie. Das Maukental liegt, wie aus der geologischen Karte (Abb. 9) ersichtlich<sup>49</sup>, in triassischen Karbonatgesteinen mit eingeschalteten Gesteinsschollen aus Bunt-

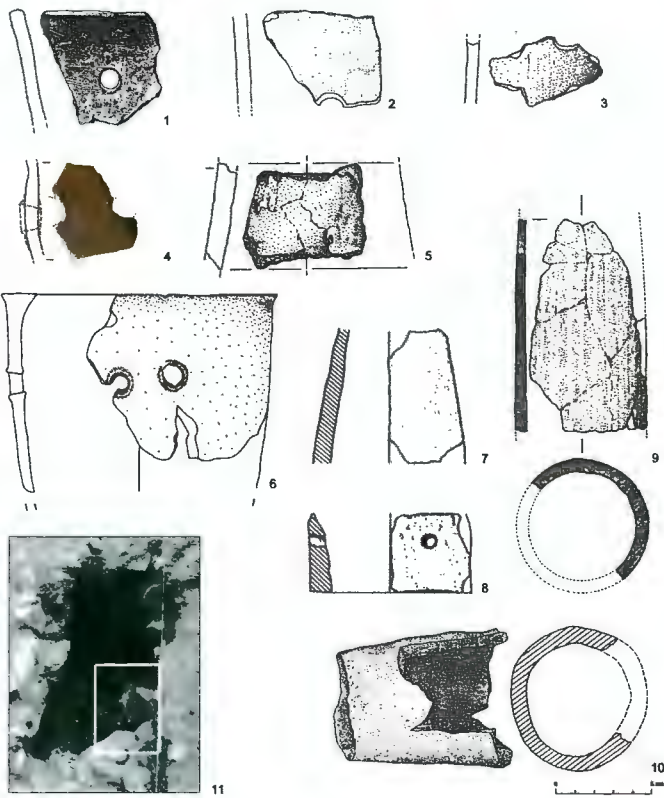
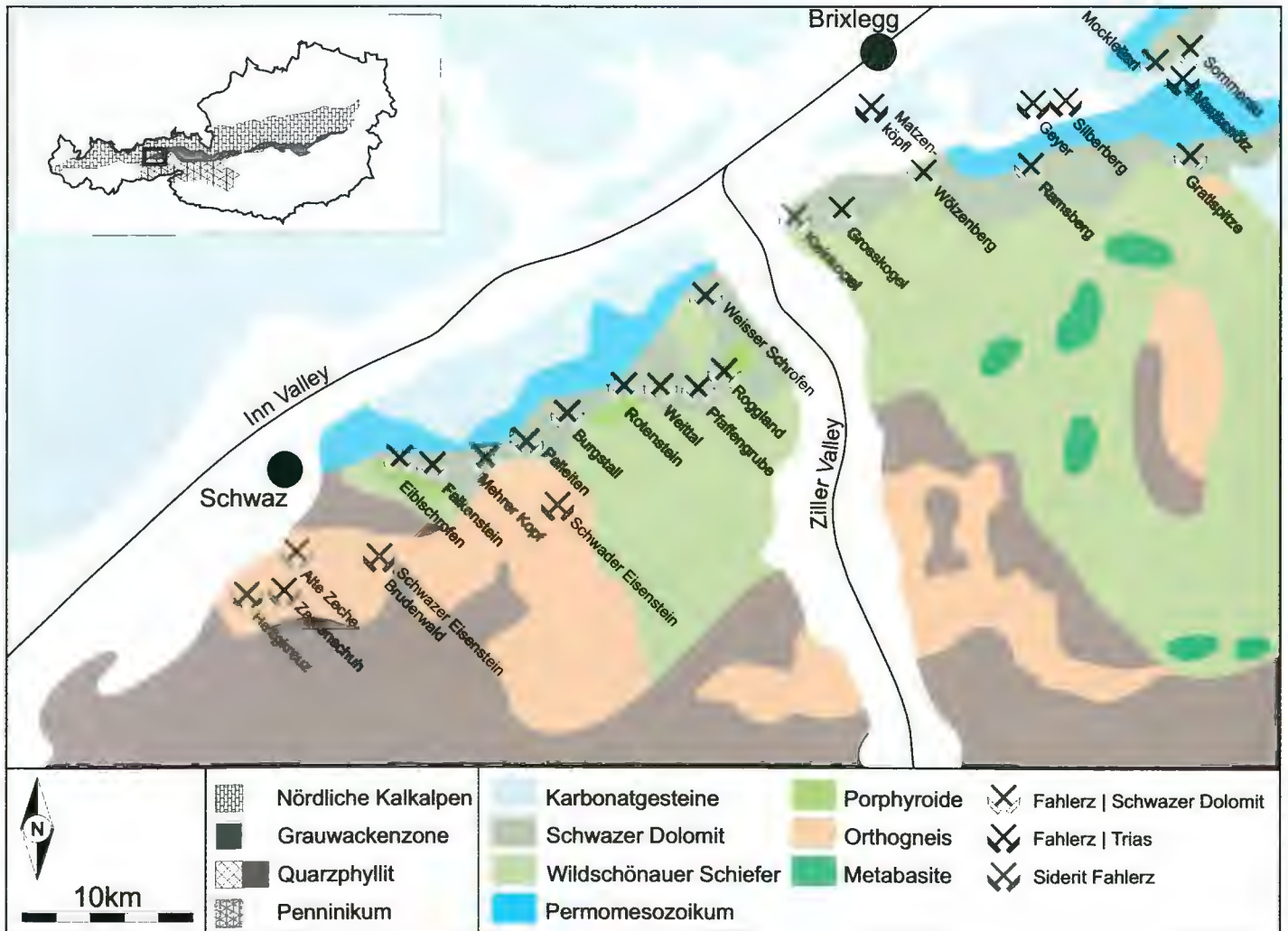


Abb. 8: Ost- und südalpine Verhüttungsdüsen. 1-3 Mauk A-Radfeld; 4 Gries am Brenner (Zeichnung U. Töchterle); 5 Au zu St. Veit; 6 Wald am Schoberpass-Vorwald; 7-8 Fennhals-Kurtatsch; 9 Acqua Fredda; 10 Mühlbach-Brennwald; 11 Mühlbach-Hochkeilhaus

sandstein (Permomesozoikum) sowie aus Schwazer Dolomit. Südlich des Maukentals dominieren phyllitische Gesteine der Wildschöner Schiefer sowie metamorph überprägte Granite der Kellerjochgneise (Orthogneis)<sup>50</sup>. In den devonischen Plattformkalken des Schwazer Dolomits kommen kupferhaltige Sulfiderze vor, die nachweislich ab der Frühbronzezeit zur Kupfergewinnung abgebaut wurden. Das Erz setzt sich vorwiegend aus relativ monotonen Fahlerzen zusammen. Fahlerze sind komplexe Sulfosalze mit einer variablen chemischen Zusammensetzung und bestehen im Wesentlichen aus Kupfer, Schwefel, Arsen, Antimon, Zink und Eisen mit der allgemeinen chemischen Formel:  $(\text{Cu,Ag})_6\text{Cu}_4(\text{Fe,Zn,Hg})_2(\text{As,Sb})_4\text{S}_{12}(\text{S,Se})$ . Im Fahlerz sind 0.5-2.0 Gew.-% Silber enthalten, das im späten Mittelalter und in der frühen Neuzeit Ausgangspunkt für die Blütezeit des Schwazer Bergbaus darstellte und in den Bergbaurevieren von Schwaz und Brixlegg neben Kupfer in großem Maßstab abgebaut wurde.

Abb. 9: Geologische Einheiten und Erzvorkommen im Raum Schwaz/Brixlegg mit dem Revier „Mauken“ (auf der Karte oberer rechter Bildrand)



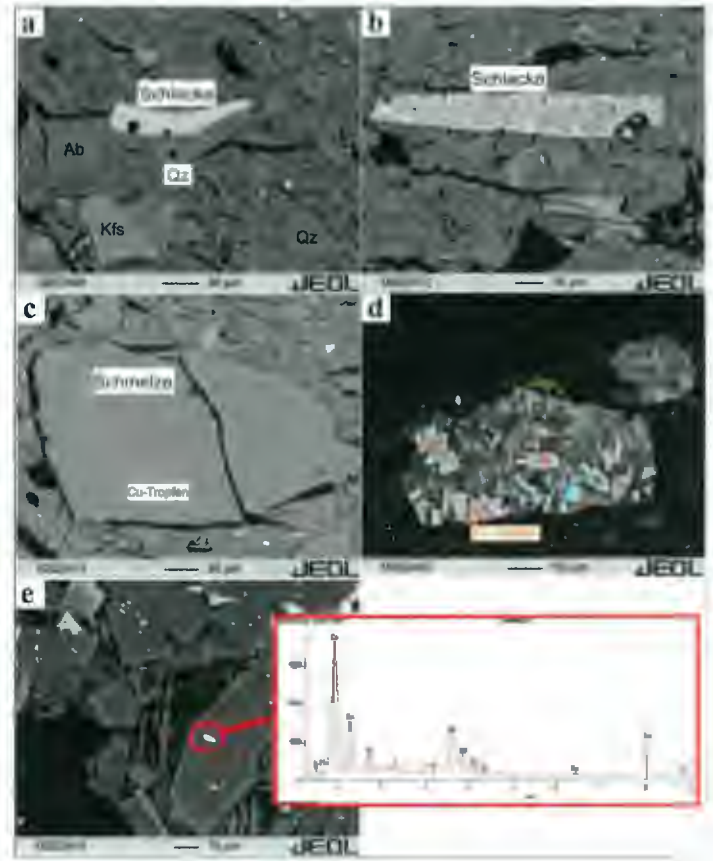
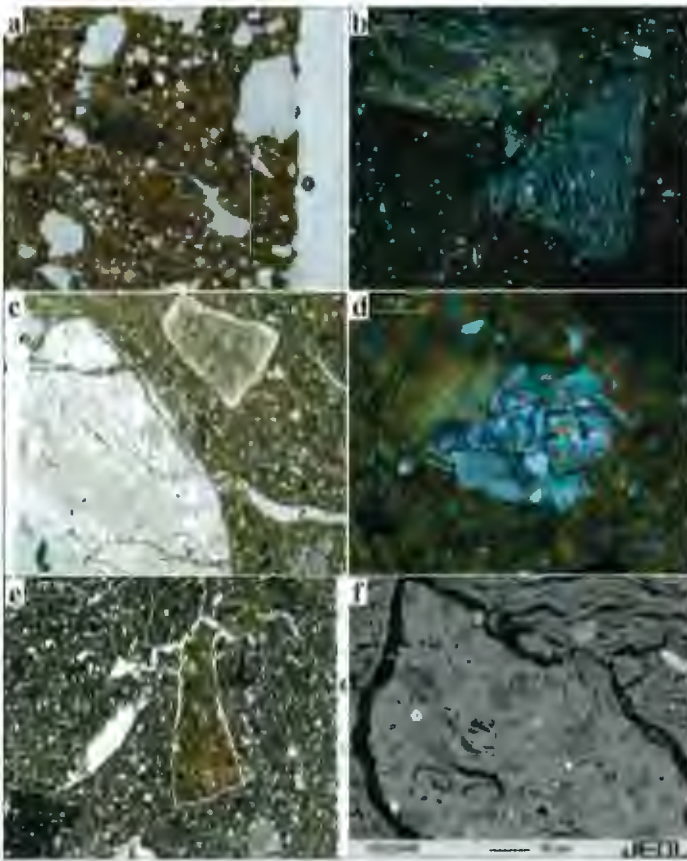


Abb. 10: Keramikfragmente und deren Magerungskomponenten im Durchlichtmikroskop: a) MA60b: dunkle, opake Bruchstücke (Schlacken), Quarz, Feldspat und Hellglimmer als Einzelminerale. Zentrum: Schlackenbruchstück mit ideomorphen Olivinen. b) MA 91: Phyllitische Gesteinsbruchstücke von Wildschönauer Schiefer (links oben), polykristalliner Quarzit. c) MA 91: Große Magerungskomponenten aus Kalk und Dolomit. d) MA 60a: Kellerjochgneisfragment: Quarz, Feldspat, Biotit, Muskovit und Epidot. e) MA 132: Bildmitte: Schamottbruchstück mit zahlreichen opaken Phasen (Magnetit und Klinopyroxen). f) MA 132: Schamottkorn: Wiederverwendung von schlackengemageter Keramik (a, c, e: parallele Nicols, b, d gekreuzte Nicols, f: Elektronenrückstreubild unter der Elektronenstrahlmikrosonde

Abb. 11: Erscheinungsformen von Schlacken im Elektronenrückstrahlbild. a) Zu Glas erstarrte Schmelze, die beim Abkühlen an ein Quarzbruchstück angehaftet ist. b) Schlackenbruchstück mit federförmigen Klinopyroxenkristallen. c) Zu Glas erstarrte Schmelze mit Kupfertropfen. d) Schlackenbruchstück mit Olivinkristallen (ol), Klinopyroxen (Cpx) und Magnetit (Mt). Innerhalb der Olivinkristalle treten Kupfertropfen auf. e) Durch energiedispersive Messungen mittels Elektronenstrahlmikrosonde konnten die Kupfertropfen im Olivin genauer untersucht werden. Sie enthalten neben Kupfer auch Arsen und Antimon

Die Dünnschliffe der Keramikproben vom Schmelzplatz Mauk A wurden zunächst mittels Durchlichtmikroskopie untersucht. Charakteristisch ist eine braun gefärbte Matrix aus gesinterten Tonmineralen, in der unterschiedliche Magerungskomponenten, bestehend aus Einzelmineralen und Gesteinsbruchstücken, auftreten. Den Großteil der Einzelminerale bilden Quarz-, Feldspat- und Glimmerkristalle. Diese Minerale liefern aufgrund ihrer verbreiteten Vorkommen keine näheren Informationen zum Herkunftsgebiet, vor allem wenn sie im Zuge sedimentologischer Prozesse aufgearbeitet, umgelagert und transportiert wurden. Gesteinsbruchstücke weisen dagegen durch ihre signifikante Mineralgesellschaft genauer auf ihr jeweiliges Herkunftsgebiet hin. So spiegeln auch die verschiedenen, dem Ton zugesetzten Magerungsbestandteile der Keramikproben vom Schmelzplatz Mauk A die regionalen geologischen Verhältnisse wider, wobei es sich in erster Linie um Gesteine von zwei großen austroalpinen Einheiten, der Grauwackenzone und den Nördlichen Kalkalpen, handelt (Abb. 9). Zu den nördlichen Kalkalpen gehören Buntsandstein und Karbonatgesteine aus der Trias, zur Grauwackenzone der Schwazer Dolomit, die Wildschönauer Schiefer und die

Kellerjochgneise. Keramikfragmente von Verhüttungsdüsen und deren Magerungskomponenten im Durchlichtmikroskop sind in Abbildung 10 a-f dargestellt. Abbildung 10a zeigt dunkle, opake Bruchstücke (Schlackenkörner) neben Quarz, Feldspat und Hellglimmer als Einzelminerale. Abbildung 10b zeigt phyllitische Gesteinsbruchstücke aus Wildschönauer Schiefer und ein polykristallines Quarzit-Aggregat. Aus dem umgebenden Kalkgestein (Abb. 10, c) stammen 1-2 mm große Bruchstücke aus Dolomit und Kalk. Ein Bruchstück mit der Mineralparagenese Quarz, Biotit, Muskovit und Epidot (Abb. 10, d) ist mit großer Wahrscheinlichkeit den angrenzenden Kellerjochgneisen zuzuordnen<sup>51</sup>. In den keramischen Dünnschliffproben kommt ein auffälliger Magerungsbestandteil in Form von Schlackensand/Schlacken-grus vor (Abb. 10, e,f). Dieser zeichnet sich durch seine opake Komponente Magnetit sowie durch Klinopyroxen aus, wobei bereits unter dem Auflichtmikroskop die typische Kristallform des Schlackenminerals Olivin erkennbar ist. Daneben lässt sich noch eine Reihe weiterer Schlackenphasen beobachten, wie zu Glas erstarrte Schmelze und Olivin (Abb. 11, a-d). Aufgrund der höheren mittleren Ordnungszahl erscheint die Schlacke im Elektro-



nenrückstreubild heller als die umgebende Matrix (Abb. 11, a,b). Die Ausbildung, nadeliger Klinopyroxenkristalle ist ebenfalls charakteristisch (Abb. 11, b).

In den Schlacken und hier insbesondere auch in den glasreichen Partien lassen sich feine, kupferreiche Tröpfchen beobachten (Abb. 11, c), die meist einen geringen Eisengehalt aufweisen. Die Kupfertropfen im Olivin (Abb. 11, e) erlauben hingegen genauere Aussagen über deren Zusammensetzung, die mittels Mikrosondenanalytik (energiedispersive Messung normiert auf 100 Gew.%) semiquantitativ ermittelt wurde: Cu (54,8 Gew.%), Sb (35,1 Gew.%), As (8,7 Gew.%), Fe (1,4 Gew.%). Es handelt sich um intermetallische Legierungen aus vorwiegend Kupfer, Antimon und Arsen (Abb. 11, e). Dies beweist, dass die Schlackenkörner aus der prähistorischen Fahlerzverhüttung stammen, sehr wahrscheinlich von der Schlackensandhalde auf dem Schmelzplatz Mauk A.

Die bislang nur im inneralpinen Bereich beobachtete Magerung der Keramik mit Schlackensand/Schlackengrus ist eine Besonderheit innerhalb der ostalpinen Kupferbergbaureviere und ließ sich bislang außerhalb dieses Gebietes noch nicht feststellen<sup>52</sup> (Abb. 12). Zumeist ist es auch schwierig, mit bloßem Auge an der Keramikoberfläche und im Bruch die Schlackenmagerung zu erkennen. Schlackenmagerung ist ein eindeutiges Indiz für Kupfermetallurgie und „[...] steht im direkten Zusammenhang mit dem Bergbau [...]“<sup>53</sup>. Schlackensand ist ein Abfallprodukt der Kupfergewinnung, das bei der Aufbereitung von Schlacken aus den Schmelzprozessen anfällt. Die prähistorischen Hüttenleute haben erkannt, dass beim Verhüttungsprozess Einschlüsse von kupferreichen Zwischenprodukten (Kupferstein) und feine Kupferkügelchen in der Schlacke verbleiben und sich die Metallphasen nicht vollständig abscheiden lassen. Durch eine mechanische Aufbereitung der Schlacken mittels Pochen, Mahlen und anschließender Anreicherung der kupferhaltigen Einschlüsse durch gravitatives Auswaschen wird eine Verbesserung bzw. Optimierung der Ausbeute an Metall erreicht<sup>54</sup>. Der dabei entstandene Schlackensand konnte entweder als Zuschlag einem weiteren Schmelzdurchgang zugesetzt oder als Magerungsmittel für die Keramikherstellung verwendet werden.

Herausragende Beispiele für Untersuchungen an schlackengemagerte Keramik liegen vom Klingelberg bei St. Veit im Pongau (ca. 1800-1400 v. Chr.) vor<sup>55</sup>. Die petrographischen Untersuchungen ergaben, dass ausschließlich die lokal hergestellte Keramik schlackengemagert ist<sup>56</sup>. Stephen Shennan schließt eine technische Verbesserung der Keramikeigenschaften durch Schlackensandzuschläge aus und vermutet ein eigentümliches Identitätsdenken der im Kupferbergbau involvierten Bewohner und Handwerker, die sich dadurch von anderen Bevölkerungs- und Berufsgruppen abheben wollten. Die Schlackenmagerung ist an der Keramikoberfläche jedoch nicht sichtbar und reicht somit für ein Identitätsmerkmal nach außen hin nicht aus. Man vermutete wohl auch, durch den Zuschlag von Schlacken eine bessere Festigkeit und Hitzebeständigkeit der Keramik zu erlangen<sup>57</sup>.

Stark gemagerte, bei niedrigen Temperaturen gebrannte Keramik, weist aufgrund der großen Porosität eine gute Temperaturwechselbeständigkeit auf<sup>58</sup>. Verschiedenste Untersuchungen haben allerdings gezeigt, dass ein hoher Quarzgehalt (>20 Vol.%) und Korngrößen bis 750 µm für die Temperaturwechselbeständigkeit von Keramik nicht geeignet sind<sup>59</sup>. Beim Überschreiten einer Temperatur von 550-573° C kommt es, bedingt durch den Phasenübergang von α- zu β-Quarz, zu einer deutlichen Volumenzunahme (+ 17 %), die sich stark auf das Bruchverhalten der

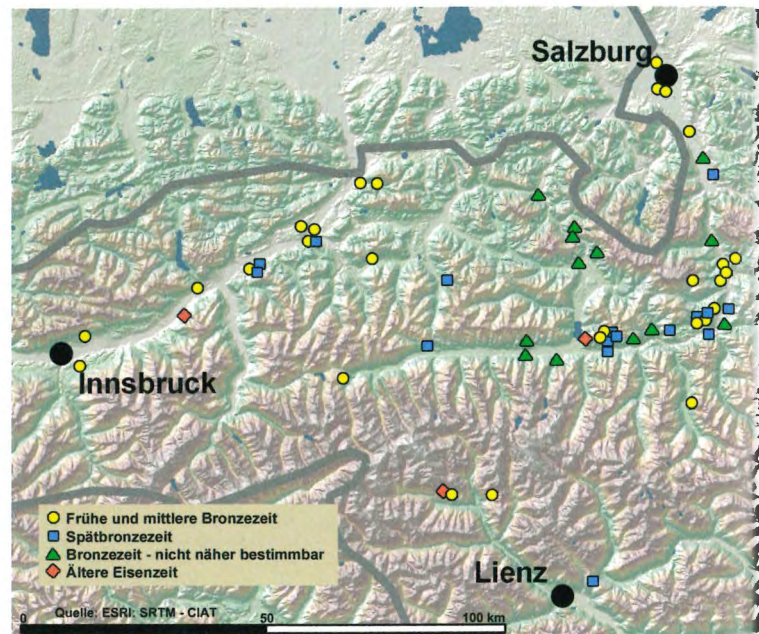


Abb. 12: Schlackengemagerte Gefäßkeramik als inneralpines Phänomen

gesamten Keramik auswirkt. Beim Abkühlen kehrt sich dieser Effekt wieder um und der Quarz erhält seine ursprüngliche Größe, wobei Schrumpfungsrisse auftreten können. Dies führt in der Matrix rund um die Quarzkörner zu Hohlräumen und zu einem erhöhten Porenvolumen. Ersetzt man die Quarzmagerung durch eine Schlackenmagerung, werden Volumensprünge beim Brennen weitgehend vermieden, da die Minerale Olivin und Klinopyroxen beim Brand keine Phasenänderungen durchlaufen.

Besonders hohe Anforderungen setzt man während der Befeu- erung der Verhüttungsöfen an die Haltbarkeit der Keramikdü- sen. Die Düsen müssen hohen Temperaturen und starken Tem- peratursprüngen standhalten. Dass man auch zur Herstellung von technischer Keramik Schlackensandzuschlag verwendete, erklärt sich durch die temperaturbeständigen Eigenschaften der zerstoßenen Schlacken. Oft werden Schlacken auch hydraulische Eigenschaften zugesprochen, doch dies hängt stark von der che- mischen Zusammensetzung ab, denn nur kalziumreiche Schla- cke kann die typischen Kalzium-Silikat-Hydrate ausbilden<sup>60</sup>. Das bedeutet, es bilden sich bei der Herstellung durch Zugabe von Wasser nadelförmige Kristalle (Kalzium-Silikat-Hydrate), die miteinander verzahnen und somit zu einer erhöhten Festigkeit führen. Diese Kalzium-Silikat-Hydrat-Phasen sind letztendlich für die hydraulischen Eigenschaften verantwortlich. Die Schla- cken in den untersuchten Keramikfragmenten weisen nur unter- geordnet Ca-Gehalte auf, es ließen sich auch keine Kalzium-Sili- kat-Hydrat-Phasen feststellen.

Das Magern mit Schlackensand führt somit zu einer technischen Verbesserung der gebrannten Keramik und bringt nicht nur bei der Düsenherstellung sondern auch für die Gebrauchskeramik wie Kochgeschirr deutliche Vorteile bezüglich der Hitzebestän- digkeit mit sich.

Als weiterer Zuschlagstoff ließ sich in den keramischen Dün- nschliffen von Mauk A Schamott (Abb. 10, e,f) feststellen. Scha- mott ist ein bereits gebrannter Ton und wird meist durch Zersto- ßen gebrauchter oder beschädigter Keramikfragmente gewonnen

(„Artefakt-Relikt“<sup>61</sup>). Im Dünnschliffbild heben sich diese Magerungsbestandteile meist deutlich von der umgebenden Matrix durch kantige Formen ab. Die Schamottkörner ändern beim Brand nicht ihr Volumen, da sie bereits gebrannt sind. Vorteil dieser Magerungskomponente ist die schnellere Trocknung des Gefäßes und die Vermeidung von Trocknungs- und Brandrissen<sup>62</sup>. Auch in den Schamottkörnern der Mauk A-Keramik treten die Schlackenphasen Magnetit und Klinopyroxen auf. Dies bedeutet, dass man zu Bruch gegangene, schlackengemagerte Keramik wiederverwertet hat.

Quantitative Analysen der Magerungskörner beziehen sich im Wesentlichen auf das prozentuale Verhältnis der Magerungsanteile zur Matrix sowie auf Kornform und Korngröße<sup>63</sup>. Die Dünnschliffbilder der Keramikproben von Mauk A wurden zur Auswertung einer quantitativen Analyse unterzogen (Abb. 13). Die Magerung sowie der Matrixanteil variieren zum Teil stark, während der Anteil an Poren und Rissen zwischen 13 und 18 Vol.% in etwa gleich liegt. Mit Dolomit und Phyllit gemagerte Keramikfragmente zeigen einen hohen Magerungsanteil von über 50 Vol.%. Die Magerungskomponenten sind wesentlich gröber als bei jenen Proben, die nur mit Quarz-, Feldspat- und Schlacken- grus gemagert wurden.

Die Bestimmung der Korngröße erfolgte nach der Unterteilung von Josef Riederer<sup>64</sup>. Die Gruppe mit der kleinsten Partikelgröße (zwischen 0.01-0.05 mm) hat einen Anteil von etwa 35 Vol.% und besteht hauptsächlich aus den Mineralen Quarz, Kalifeldspat, Chlorit, Muskowit, Biotit, Titanit und Zirkon. Den größten Anteil mit über 40 Vol.% bildet hingegen die Gruppe mit einem Korngrößendurchmesser von 0.1-0.5 mm. Die hier vorkommenden Magerungskomponenten wie Kellerjochgneis, Wildschönauer Schiefer oder Dolomit sind meist sehr charakteristisch für die einzelnen Dünnschliffproben. Schlackengrus tritt in beinahe jedem untersuchten Keramikfragment auf. Die Proben mit Dolomit und Kalkstein weisen den höchsten Magerungsanteil von über 52 Vol.% auf. Den geringsten Anteil mit etwa 18 Vol.% vertritt die Gruppe mit Korndurchmessern von 0.05-0.1 mm. Hier kommen überwiegend Quarz, Muskowit, Biotit und Kalifeldspat aber auch Dolomit bzw. kleine Schlackensandkörner vor.

Die Matrix der Keramikproben von Mauk A zeigt Spuren einer einseitigen thermischen Einwirkung in Form von rötlichen Verfärbungen entlang eines Gradienten. Die phyllitischen und karbonatischen Magerungskomponenten besitzen eine schlechte Temperaturbeständigkeit und zersetzen sich bei hohen Tempera-

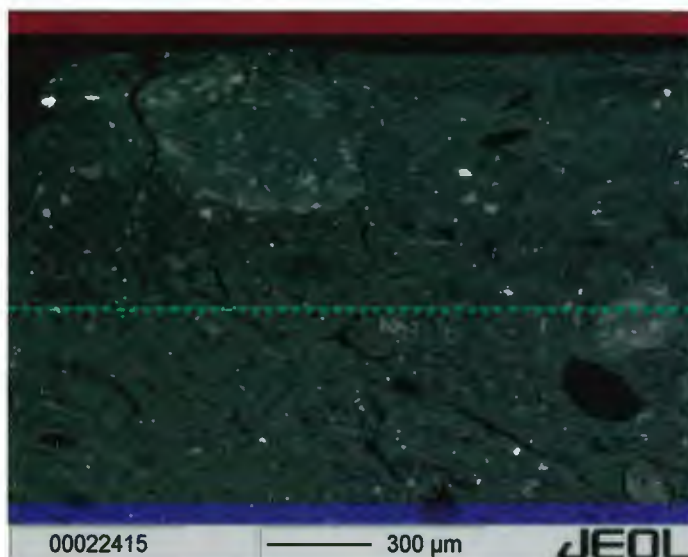


Abb. 14: Rückstrahlelektronenbild eines Keramik-Querschnitts aufgenommen mit Elektronenmikroskopie (Keramikfragment MA91): Übergang von kompakter Textur zu lockerer Textur mit großen Poren und Rissen. Rote Linie: thermische Einwirkung im Außenbereich; blaue Linie: Gefäßinnenseite ohne Einwirkung

turen. Bei 200°C entweicht aus den Mineralen Chlorit und Muskowit des Phyllits das physikalisch gebundene Wasser. Sie wandeln sich bei Temperaturen von 700-800°C in Olivin und Spinell um<sup>65</sup>. Karbonatische Minerale wie Kalzit und Dolomit zersetzen sich erst bei Temperaturen über 800°C. Derartige Reaktionen sind deutlich an einem Dolomitkorn zu beobachten, dessen äußerer Rand sich zersetzt und gelblich verfärbt hat. Diese einseitige thermische Einwirkung von außen verursachte eine Kompaktion des Gefüges und teilweise eine Verglasung der Matrix, wobei es zu einem Übergang von kompakter Textur zu lockerer Textur mit großen Poren und Rissen kommt (Abb. 14). Entlang der Magerungskomponenten verlaufen deutliche Risse. Ob die Ursache für diese temperaturbedingte Veränderung primär beim Brennen der Keramik oder sekundär während der Verwendung im Verhüttungsprozess zu suchen ist, kann hier aber nicht eindeutig geklärt werden.

Abb. 13: Quantitative Analyse der keramischen Dünnschliffbilder von Mauk A, Radfeld

	MA60b	MA60a	MA91	MA104
Magerung in Vol.%	35.1%	37.3%	53.0%	35.7%
Risse, Poren in Vol.%	13.3%	18.2%	10.3%	13.9%
Matrix in Vol.%	51.6%	44.5%	36.7%	50.4%
<b>Partikelgröße der Magerung</b>				
0.01-0.05 mm	38.6%	34.1%	24.3%	35.8%
0.05-0.1 mm	18.5%	18.3%	16.3%	17.1%
0.1-0.5 mm	42.9%	47.6%	30.4%	47.1%
0.5-1 mm	---	---	29.0%	---

## Verhüttungsdüsen im Experiment:

Um die Herstellungsweise und Anwendung von Verhüttungsdüsen besser zu verstehen, wurden mehrere Feldexperimente durchgeführt. Angefangen bei der Gewinnung des Tones über die Aufbereitung bis hin zur Magerung und Formgebung galt es dabei, möglichst authentische Repliken der archäologisch dokumentierten Originale zu erzeugen (Abb. 15). Der Brand der technischen Keramik erfolgte nach ausreichender Trocknung des Tones im reduzierenden Grubenbrand. Die sorgfältige und zeitintensive Herstellung der bronzezeitlichen Vorbilder weist darauf hin, dass die Düsen für eine längere Lebensdauer angefertigt wurden. Bei Experimenten von Detlef Jantzen mit rekonstruierten nordeuropäischen Düsen konnten seine Exemplare immerhin bis zu 30-mal verwendet werden<sup>66</sup>.

Laut antiker Überlieferungen verwendete man im östlichen Mittelmeerraum schlauchartige Gebläse, die aus Rinds- oder Ziegenleder gefertigt waren, meist mit der Fellseite nach außen. Gerd Weisgerber und Christoph Roden konnten im Zuge ihrer archäologischen Forschungen eine Verbindung zwischen dem Gebrauch von gebogenen Düsen und Schlauchgebläsen nachweisen<sup>67</sup>. Eine weitere Variante sind die sogenannten Membran-gebläse, die bis heute in Asien und Afrika bei der Eisenverhüttung in Gebrauch sind<sup>68</sup>.

Um eine mögliche Erklärung für die bei den Verhüttungsdüsen vom Schmelzplatz Mauk A unterhalb des Randes angebrachten Durchlochungen zu finden<sup>69</sup>, wurden Versuche zur Anbringung der Bälge an der Düse unternommen. Eine Möglichkeit ist die Verwendung von Holzstöckchen, die aus den Löchern der Düsen herausragen, durch Schlitzte im Leder gesteckt und mit einer Schnur umwickelt werden und damit zur Fixierung des Balges dienen (Abb. 16, a). Da es auch Fundstücke mit zwei nahe beieinander liegenden Löchern gibt<sup>70</sup>, ist auch ein direktes Einfädeln mit Lederschnüren denkbar (Abb. 16, b). Die Düsenprofile weisen am „kalten Ende“ meistens einen leichten Wulstrand auf, womit auch ein bloßes Umwickeln des Lederbalges mit einer Lederschnur oder einer nassen Rohhaut möglich ist. Noch stabiler ist die Umwicklung des Balges auf der umgedrehten Fellinnenseite, die sich dann wieder zurückstülpen lässt und vorher noch von außen abgebunden werden kann (Abb. 16, c). Bei Blasebälgen mit vier Öffnungen<sup>71</sup> könnte man auch eine Art Rückschlagmembran rekonstruieren. Denn, wie bei den Schmelzversuchen öfters der Fall, werden manchmal auch heiße Gase bzw. Flammen angesaugt, und der Balg ver-

sengt an der Innenseite (Abb. 16, d). Gegenüberliegende Löcher könnten auch nur zur Fixierung am Erdboden mit einer einfachen, die Düse „durchstechenden“ Holzrute gedient haben (Abb. 16, f).

Seit 2010 wurden, in Kooperation mit dem Deutschen Bergbaumuseum Bochum (Erica Hanning), der Universität Bergen, Norwegen (Nils Anfinset) sowie dem Denkmalamt in Trient (Elena Silvestri), einige Experimente nach dem Vorbild des „Nepal-Verfahrens“ durchgeführt. Ausgangspunkt hierfür lieferte eine in den 1990er-Jahren von Nils Anfinset durchgeführte ethnoarchäologische Studie über traditionelle Kupfermetallurgie in Nepal<sup>72</sup>. Man darf davon ausgehen, dass der in Nepal dokumentierte Verhüttungsprozess dem der Kupfergewinnung aus sulfidischen Erzen in der europäischen Bronzezeit in gewisser Weise sehr ähnlich ist<sup>73</sup>. Bei der experimentellen Rekonstruktion des „Nepal-Prozesses“<sup>74</sup> wurden nach den ethnologischen Vorbildern lange gebogene Düsen verwendet (Abb. 17, c,e). Der Einsatz gebogener Düsen bei der Verhüttung ist in diesem Fall durch den Ofenaufbau vorgegeben, der eine Luftzufuhr von oben auf die Holzkohle vorsieht. Mit je einem Blasebalg auf jeder Seite des Ofens bringt man die Luft im abwechselnden Rhythmus ein. Bei den Schmelzexperimenten kamen Schlauchgebläse zum Einsatz (Abb. 17, c,f). Deren gesamtes Volumen wurde auf jeweils 56 Liter bestimmt; da jedoch ein Balg während des Pumpens nicht vollständig gefüllt wird, kann man mit einem Pumpvolumen von ca. 35 Liter rechnen. Pro Minute konnten etwa 60-80 Pumpzyklen beider Bälge im Wechsel durchgeführt werden, so dass in dieser Zeit etwa 2.100 bis 2.800 Liter Luft zugeführt wurden<sup>75</sup>. Die geregelte Luftzufuhr und

Abb. 15: Herstellungsprozess für die keramischen Düsen: Wulstaufbau und Grubenbrand





Abb. 16: Verschiedene Verbindungsarten zwischen Blasebalg und Düse sowie diverse Funktionsmöglichkeiten der Lochungen unterhalb des Düsenrandes

vor allem die richtige Positionierung der Düsenspitzen waren ausschlaggebend für eine gleichmäßige Befuerung des Ofens. Bei den experimentellen Rekonstruktionsversuchen des „Mitterberger Prozesses“ von Erica Hanning<sup>76</sup> konnte der Einsatz gerader Verhüttungsdüsen in Kombination mit Schlauchgebläsen erprobt werden (Abb. 17.b). Die Düsen baute man direkt in eine Ofenstirn aus Lehm ein. Nachteil dabei ist jedoch, dass die Ar-

beiter am Blasebalg sehr nahe am Ofen sitzen und daher unmittelbar den Verbrennungsgasen und der großen Hitze ausgesetzt sind. Die Positionierung der Düsen in der vorderen Ofenwand führte zum regelmäßigen Verschlacken der Düsenstippen. Ein Verschlacken des „heißen“ Düsenendes ist jedoch so gut wie nie bei archäologischen Vergleichsstücken festzustellen (z. B. Abb. 7). Das Fritten und damit die thermische Deformierung der Dü-



Abb. 17: Verwendung eines keramischen Zwischenstücks (A), um Verschlackungen der Düsenspitze zu vermeiden (B, D); Der „Nepal-Prozess“ (C, E, F), Versuchsreihe 2012 in Jochberg, Tirol

senspitzen ließen sich vermeiden, indem man ein zweites, kurzes Düsenzweckstück aufsetzt und mit Lehm­schlicker abdichtet (Abb. 17, a). Entsprechende Schlickaufträge in mehreren Schichten an der heißen Düsen­spitze sind beispielsweise am Exemplar vom Grattenbergl belegt (Abb. 5,2). Aus der Fundsituation der gebogenen Düse vom Monte Ozol im Trentino<sup>77</sup> geht hervor, dass die gebogene Düse mit einer kurzen tönernen Zwischendüse direkt in die Ofenwand eingebaut wurde<sup>78</sup>. Bislang erbrachten jedoch keine weiteren spätbronzezeitlichen Befunde, weder in Siedlungen noch auf Verhüttungsplätzen entsprechende Düsenzweckstücke, es sei denn, sie sind in einem so stark verschlackten Zustand, dass sie nicht mehr erkannt werden können (Abb. 17, d).

## Zusammenfassung

Ausgehend von archäologischen Grabungsbefunden auf einem spätbronzezeitlichen Kupferverhüttungsplatz bei Radfeld in Nordtirol wird im vorliegenden Beitrag das Thema Düsenkeramik beleuchtet und diskutiert. Ein Vergleich von Funden und Beobachtungen aus pyrometallurgischen Zusammenhängen kommt zu dem Ergebnis, dass bis in die frühe Bronzezeit hinein bei der primären und sekundären Kupfermetallurgie in Tiegeln bzw. Grubenherden zunächst Blasrohre mit aufgesetzten Tondüsen verwendet wurden. Mit dem Aufkommen der Kupfererzverhüttung in (kleinen) Schachtöfen (Ende frühe Bronzezeit, mittlere

Bronzezeit) kam bei der Metallgewinnung technische Keramik in Form von Gebläsetöpfen bzw. geraden Düsen in Verbindung mit Blasebälgen zum Einsatz. Bei der sekundären Metallurgie (Raffination, Guss, Weiterverarbeitung von Kupfer und Bronze) wurden dagegen gebogene Düsen mit Blasebälgen eingesetzt. Der Unterschied erklärt sich in der Luftführung, die im Schachtofen von unten oder von der Seite erfolgen musste, im Tiegel bzw. im Grubenherd von oben. Noch unklar ist, ob bei der Gewinnung von Rohkupfer aus Kupferstein ebenfalls Grubenherde und damit sehr wahrscheinlich gebogene Düsen zum Einsatz kamen. Archäologische Befunde, die diese Frage klären könnten, liegen bislang nicht vor.

Der bei der mechanischen Aufbereitung von Verhüttungsschlacken anfallende Schlackensand/Schlackengrus konnte zweckmäßig als Magerung bei der Herstellung von Keramik, insbesondere von Düsenkeramik, verwertet werden (Recycling). Die Schlackenkörner verbessern aufgrund ihrer Kornform und mineralogischen Zusammensetzung die Eigenschaften der Keramik bereits beim Brennvorgang (formstabil, Verzahnung der Magerung mit der Tonmasse, Festigkeit) und später beim Einsatz als Düsenkeramik in Hochtemperaturprozessen (Temperaturbeständigkeit, formstabil); es liegt nahe, dass in diesem Zusammenhang auch Gebrauchskeramik mit Schlackensand gemagert wurde, wenn dieser im Umfeld von Bergwerksbetrieben mit Schmelzhütten zur Verfügung stand.

## Anhang

### Liste gerade/trichterförmige Düsen (Abb. 6, rote Punkte):

- 1 (A) Nordtirol, Radfeld, Mauken<sup>79</sup> (Abb. 7; 8,1-3)
- 2 (A) Nordtirol, Schmelzplatz Rotholz<sup>80</sup>
- 3 (A) Nordtirol, Jochberg, Wegstättalm<sup>81</sup>
- 4 (A) Nordtirol, Jochberg, Schmelzplatz Nr. 13<sup>82</sup>
- 5 (A) Nordtirol, Jochberg, Hechenberg<sup>83</sup>
- 6 (A) Nordtirol, Gries am Brenner<sup>84</sup> (Abb. 8,4)
- 7 (A) Salzburg, Mühlbach-Brennwald<sup>85</sup> (Abb. 8,10)
- 8 (A) Salzburg, Mühlbach-Hochkeilhaus<sup>86</sup> (Abb. 8,11)
- 9 (A) Salzburg, Mühlbach-Schmelzplatz Nr. 66, Schmaltalgraben<sup>87</sup>
- 10 (A) Salzburg, Au zu St. Veit<sup>88</sup> (Abb. 8,5)
- 11 (A) Steiermark, Eisenerzer Ramsau, Krumpental, Gemeindealm, S1<sup>89</sup>
- 12 (A) Steiermark, Eisenerzer Ramsau, Krumpental, Halsbach, S18<sup>90</sup>
- 13 (A) Steiermark, Eisenerzer Ramsau, Liezen/Trieben, Versunkene Kirche<sup>91</sup>
- 14 (A) Steiermark, Trieben, Schwarzenbach, Schlosser<sup>92</sup>
- 15 (A) Steiermark, Johnsbach, Kohlanger II<sup>93</sup>
- 16 (A) Steiermark, Radmer, Neuburgalm/Geißsteig-R2<sup>94</sup>
- 17 (A) Steiermark, Eisenerzer Ramsau, Wald am Schoberpass-Vorwald<sup>95</sup> (Abb. 8,6)
- 18 (A) Niederösterreich, Prein an der Rax, PII und PIII<sup>96</sup>
- 19 (A) Niederösterreich, Priggwitz-Gasteil<sup>97</sup>
- 20 (I) Südtirol, Fennhals, Kurtasch<sup>98</sup> (Abb. 8,7-8)
- 21 (I) Trentino, Acqua Fredda<sup>99</sup> (Abb. 8,9)
- 22 (CH) Graubünden, Oberhalbstein<sup>100</sup>

### Liste Gebogene Düsen (auf Kartenausschnitt Abb. 6, schwarze Punkte):

- 23 (A) Nordtirol, Ampass<sup>101</sup> (Abb. 5,1)
- 24 (A) Nordtirol, Grattenberg<sup>102</sup> (Abb. 5,2)
- 25 (I) Trentino, Monte Ozol<sup>103</sup>
- 26 (CH) Möringen, Kt. Bern<sup>104</sup>
- 27 (CH) Zürich-Alpenquai<sup>105</sup>
- 28 (D) Buchau, Kr. Biberach<sup>106</sup>
- 29 (D) Bellenberg, Kr. Neu-Ulm<sup>107</sup>
- 30 (D) Altdorf, Kr. Landshut<sup>108</sup>
- 31 (CZ) Hradek/Kramolin, Okr. Plzeň-jih<sup>109</sup>
- 32 (H) Velem St. Vid, Kom. Vas<sup>110</sup>
- 33 (H) Sághegy/Celldömök, Kom. Vas<sup>111</sup>

## Anmerkungen

- 1 Der SFB HiMAT wurde vom FWF (Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung in Österreich, dem Land Tirol und weiteren Sponsoren gefördert (FWF-Projekt F3106 G02). Weitere Informationen unter <http://www.uibk.ac.at/himat>
- 2 Goldenberg / Rieser 2004; Goldenberg 2008; Reider 2003.
- 3 Klaunzer u. a. 2010a; Krismer u. a. 2011; Goldenberg 2008; Goldenberg u. a. 2012.
- 4 Herzlicher Dank ergeht an Gert Goldenberg, der die archäometallurgischen Versuche im Zuge des SFB HiMAT initiiert hat, sowie an die Projektleiter Peter Tropper und Gerhard Tomedi und an alle begeisterten Mithelfer: Erica Hanning, Elena Silvestri, Nils Anfinset, Michael Klaunzer, Markus Staudt, Enrico Belgrado, Caroline Grutsch, Peter Lackner.
- 5 FWF-Projekt P 08738 GEO; Goldenberg / Rieser 2004.
- 6 Goldenberg / Rieser 2004; Reider 2003, 86-87, Taf. 11,2-5.
- 7 Goldenberg 2008; Goldenberg u. a. 2012.
- 8 Goldenberg / Rieser 2004; Goldenberg 2008.
- 9 Goldenberg u. a. 2012; Schibler u. a. 2011.
- 10 Roden 1988; Hundt 1988; Pedrotti 2001, Anm. 141; Pearce 2009.
- 11 Brixlegg-Mariahilfbergl (spätneolithische Schicht): Huijsmans u. a. 2004, Abb. 5,3-5.
- 12 Brixen-Milland: Dal Rì u. a. 2005; Colpani u. a. 2009; Artioli / Burger 2009.
- 13 Riparo-Marchi: noch unpubliziert; Posterpräsentation „Archaeometallurgy in Europe“ (Bochum 2011): E. Mottes, M. Bassetti, E. Silvestri / L. Stefan, The Copper Age archaeometallurgical site of „Riparo Marchi“ in the Adige Valley (Trento, Italy); Romagnano, Schicht Q: Perini 1973, 95 f., Fig. 4.4; Mottes / Nicolis 2002, Abb. 6,13-14; Artioli / Burger 2009; Riparo Gaban: Pedrotti 2001, Anm. 142; Acquaviva di Besenello: Angelini et al. 1980; Artioli / Burger 2009; Molina di Ledro, La Vela di Valbusa und Cisano: Ambert / Carozza 1998, Fig. 6; Zu weiteren fraglichen Düsen spitzen siehe Mottes / Nicolis 2002, Anm. 30.
- 14 Z. B. im Trentino; Acquaviva di Besenello und Riparo Gaban, Schicht C5: Pedrotti 2001, fig. 32,33; D'Amico u. a. 1998; Angelini u. a. 1980.
- 15 Fasnacht 1998, 237 f., Abb. 106, 107; Hundt 1988, 99-104; Roden 1988.
- 16 Z. B. Tischofer Höhle-Kufstein: Harb 2002, Taf. 17, 1-2; Kiahbichl-Faggen: Sydow 1998, 641, Abb. 8 und 9; Hochkapelle-Brixlegg: Huijsmans / Krauß 1998, 787, Abb. 458.
- 17 Z. B. Buchberg-Wiesing: Martinek 1996, 583, Abb. 21; Martinek / Sydow 2004, 211; Kiechlberg-Thaur: Töchterle u. a. 2012, 67-77, Abb. 3,4; Töchterle 2012.
- 18 Kienlin / Stöllner 2009, 88; Tomedi / Töchterle 2012.
- 19 Töchterle 2012; Töchterle u. a. 2012.
- 20 Martinek / Sydow 2004; Martinek 1996; Schubert 2005.
- 21 Neuningger u. a. 1970, Nr. 3; Mostler 1969.
- 22 Söldner 1987/1988, 9, Abb. 17.
- 23 Wiesing-Buchberg: Martinek 1996, 583, Abb. 20; Martinek / Sydow 2004, 211; Schubert 2005, 17, 20-22, Abb. 8, 52, 62; Brixlegg-Mariahilfbergl: Huijsmans / Krauß 1998, 787; Huijsmans / Krauß 1993, 690, Abb. 368; Kufstein-Tischofer Höhle: Harb 2002, Taf. 17,3-6; Kufstein-Festungsberg: Tischer 2004, Taf. 23,185; wahrscheinlich kann auch eine Keramikfragment aus Patsch im Wipptal als Düsenfragment bezeichnet werden: Huijsmans 1994, Taf. 33,6.
- 24 Hoppe 1993, Abb. 21,13.
- 25 Söldner 2002, 27.

- 26 Möslein 1997, 37-106; Buchberg-Wiesing: Sydow 1984, Taf. 3,21; Tischofer Höhle-Kufstein: Harb 2002, 24-26, Taf. 2,1-7; 3,2; Brixlegg: Huijsmans / Krauß 1995, Abb. 305.
- 27 Krösbacher 2004, 32 f.; Zemmer-Plank 1978; Tomedi / Töchterle 2012.
- 28 Hanning 2007, bes. 58-61; Hanning / Gauß / Goldenberg 2010, 294; Rehder 1994; Bourgarit 2007; O'Brian 2004; Fasnacht 1999.
- 29 Jantzen 2008, 214.
- 30 Weisgerber / Roden 1986, 2-26.
- 31 Binggeli / Boschetti / Müller 1997, 567-569.
- 32 Rehder 1994.
- 33 Töchterle 2009, 108-110, Taf. 19,381.382.
- 34 Publikation in Vorbereitung von Markus Staudt, Inst. für Archäologie, Univ. Innsbruck.
- 35 Miske 1908, 20, Taf. XXI, 1-4; Kaufmann 1975; Kaufmann 1978; Jantzen 2008, 205-215; Fiala 1899, 90, Fig. 104. Mit einfacher Leistenverzierung: Kuchař / Švácha 2007, 145-155; Bernatzky-Goetze 1987, 102, Taf. 176,1; Ambs / Wischenbarth 1990, 268; Perini 2002, 763-769, Fig. 3; Stapel 2011, 4.
- 36 Roden 1988, Abb. 15.
- 37 Derzeit von Albrecht Jockenhövel in Bearbeitung.
- 38 Jantzen 2008, 378, Taf. 119; 120.
- 39 Hampl 1953, Abb. 4, Taf. 2,1.
- 40 Preßlinger u. a. 1980, 131-142, Abb. 8.
- 41 Erste Exemplare der Grabungen von 1997 wurden bereits bei Reider 2003, 86-87, Taf. 11,2-5 als Düsenfragmente identifiziert.
- 42 Nach Jantzen 2008, 378, Taf. 119; 120.
- 43 Kürzlich von Daniel Modl für die Steiermark ausgearbeitet: Modl 2011, 243-256.
- 44 Jantzen 2008, 211. Ausnahmen gibt es beispielsweise nach ethnographischen Quellen in Nepal, wo auch gekrümmte Düsen zur Kupferverhüttung verwendet werden: Goldenberg u. a. 2011, 83-90; Anfinset 2011.
- 45 Eibner 1993, 35, Abb. 16.
- 46 Tylecote 1981, 118.
- 47 Die Graubündner Exemplare haben keine Lochungen unterhalb des Randes, typisch ist die Aufrauung der Außenseite mit Kammstrich, vermutlich zur besseren Haftung des Blasebalgleders. Schauer 2003.
- 48 Schneider 1989, 12; Noll 1991, 41-47; Maggetti 2008; Riederer 2004; Sterba u. a. 2009.
- 49 Martinek 1994, 70-73.
- 50 Piber 2005.
- 51 Ein mineralogischer sowie textueller Vergleich mit Dünnschliffen des Instituts für Mineralogie und Petrographie erhärtet diese Aussage.
- 52 Verbreitungskarte siehe Sölden 1987/1988, 6, Abb. 13, Anm. 3; Ergänzungen für die frühe und mittlere Bronzezeit: Igls-Goldbichl: Mündl. Mitteilung G. Tomedi; Thaur-Kiechlberg: Töchterle u. a. 2011; Wörgl-Bauareal Inntalmilch: Zemmer-Plank 1990, 123 f.; Kirchbichl-Grattenbergl: Zemmer-Plank 1978, Anm. 27; Brixen i. Thale-Götschen: Huijsmans 1994, 156, Anm. 3; Kufstein-Tischofer Höhle: Harb 2002, 33, Taf. 4,7; 13, 1. Brixlegg-Hochkapelle: Huijsmans / Krauß 1998, 438; Ergänzungen für die Spätbronzezeit: Radfeld-Mauken: Reider 2003, 93 f.; Kundl-St. Leonhard und Kundl-Liesfeld, Schottergrube Wimpfischer, M. Staudt in Vorbereitung; Ergänzungen zu Salzburg/Urnenfelderkultur: Höglinger 2003, 18.
- 53 Sölden 1987/1988, 6.
- 54 Allgemeine Literatur zu Aufbereitungstechnik und ostalpiner Verhüttungsprozess: Weisgerber / Goldenberg 2004; Anreiter u. a. 2010; Goldenberg u. a. 2011; Oeggel u. a. 2011; Cierny 2008.
- 55 Shennan 1995, 147-159.
- 56 Shennan 1995, 159-163.
- 57 Shennan 1995, 160, 175, 384.
- 58 Sterba u. a. 2009; Tite u. a. 2001.
- 59 Bronitsky / Hamer 1986, 89-101. Tite / Kilikoglou / Vekinis 2001, 301-324.
- 60 Richardson / Groves 1997.
- 61 Noll 1991, 42.
- 62 Weiss 1994, 116.
- 63 Dell Mour 1989. Maggetti 2008.
- 64 Riederer 2004, 143-158.
- 65 Schneider 2009, 97-105.
- 66 Jantzen 2008, 212.
- 67 Weisgerber / Roden 1986; Roden / Weisgerber 1988, 196-204.
- 68 Sasson 1964, 174-178. T. C.; Crawhall 1933, 41-43; Friede / Steel 1986, 12-16; Celis 1991; Davey 1979; Luschan 1909, 22-59.
- 69 Weitere Deutungsmöglichkeiten siehe: Jantzen 2008, 210 f.; Modl 2011, 252-256; Preßlinger u. a. 1980, 137 f.; Hampl 1953, 65.
- 70 Gies am Brenner (unpubl.) und Vorwald bei Wald am Schoberpass: Schamberger 2007, bes. 270-272, Taf. 19,137.138.
- 71 Zschocke / Preuschen 1932, 83-88, Taf. XXII,18; XXVIII,25.
- 72 Anfinset 2011.
- 73 Anfinset 2011.
- 74 Goldenberg u. a. 2011, 83-90.
- 75 Im Vergleich siehe die Berechnungen mit wesentlich kleineren Schlauchgebläsen (bis zu 427,5 Liter pro Minute pro Balg) bei Modl 2011, 255, Tab. 7.1; Rehder 1994.
- 76 Dissertation in Arbeit von Erica Hanning: Smelting of Sulfidic Ore During the Bronze Age in the Eastern Alpine Region: A Mining, Archaeological and Experimental Approach, Univ. Bochum; Weitere Versuche zum Mitterberger Prozess bei Herdits 1997; Modl 2011.
- 77 Perini 1999, Abb. 13; Marzatico 2001, 462, Fig. 33; Perini 2002, Fig. 3.
- 78 Zu Blasebalgdüsen in Verbindung mit Kuppelöfen: Jockenhövel 1986, 219; Gersbach 1995, 319, bes. Anm. 36; Weiterer Vergleich: Nagler-Zanier 1999, 112, Abb. 6,7.
- 79 Reider 2003, 86 f., Taf. 11,2-5; Goldenberg / Rieser 2004, Abb. 14,3; Goldenberg 2008, 69.
- 80 Klaunder et al. 2010b. Publikation in Vorbereitung von Markus Staudt, Univ. Innsbruck.
- 81 Noch unpubliziert, laufende Grabungen (seit 2011) des Doc-Teams der Akademie der Wissenschaften - FZ HiMAT, Univ. Innsbruck.
- 82 Pittioni 1958, 28.
- 83 Goldenberg 1998, 18-20; Goldenberg 2004, 173.
- 84 Lesefund Dominik Markl, Sistrans.
- 85 Herdits / Löcker 2004, 177-188, Abb. 5; Lippert 1994, 36.
- 86 Eibner 1993, 34-35, Abb. 16.
- 87 Zschocke / Preuschen 1932, 83-88, Taf. XXII,18; XXVIII,25.
- 88 Krauß 2001, 27, Taf. 3,4.
- 89 Klemm 2003, 96-97, Kat. Nr.: 1; FP 60104.001; Klemm 2004, Abb. 11.
- 90 Klemm 2003, 104, Kat. Nr.: 18; FP 60104.018, Taf. 1,5.
- 91 Klemm 2003, 90, Kat. Nr.: 245 FP 67512.001; Presslinger u. a. 1988, Abb. 8.
- 92 Golling 2002, 31, Taf. 24; Eibner 2004, 29 f.
- 93 Klemm 2003, 80, Kat. Nr. 203.
- 94 Klemm 2003, 53, Kat. Nr. 82.
- 95 Schamberger 2007, 235-326, bes. 270-272, Taf. 19,137.138.
- 96 Hampl 1953, Taf. I,2; II, III,1-2; Abb. 4.
- 97 Trebsche 2010.
- 98 Hauser 1986, 82, Abb. 11-12; Nothdurfter / Hauser 1988.
- 99 Marzatico 1995, 82-91, Abb. 6,12; Cierny 2008, Taf. 1,11.
- 100 Schauer 2003, 7-54.
- 101 Töchterle 2009, 108-110, Taf. 19,381.382.
- 102 Markus Staudt, Univ. Innsbruck, in Vorbereitung.
- 103 Perini 1999, Abb. 13; Marzatico 2001, fig. 33; Perini 2002, fig. 3; Jantzen 2008, 378, Fundortnr.: 29.
- 104 Bernatzky-Goetze 1987, Taf. 176,1; Jantzen 2008, 378, Fundortnr.: 25.
- 105 Jantzen 2008, 378, Fundortnr.: 26.
- 106 Jantzen 2008, 377, Fundortnr.: 9.
- 107 Ambs / Wischenbarth 1990, 268; Jantzen 2008, 377, Fundortnr.: 8.
- 108 Jantzen 2008, 377, Fundortnr.: 7.
- 109 Jantzen 2008, 378, Fundortnr.: 33.
- 110 Miske 1908, Taf. XXI, 1-4; Jantzen 2008, 378, Fundortnr.: 37.
- 111 Jantzen 2008, 378, Fundortnr.: 36.

## Bibliographie

- AMBERT, Paul / CAROZZA, Laurent:  
1998 Origine(s) et développement de la première métallurgie française. Etat de la question, in: Fritsch, B. / Maute, M. / Matuschik, I. / Müller, J. / Wolf, C. (Hrsg.): Tradition und Innovation. Prähistorische Archäologie als historische Wissenschaft. Internat. Arch. Studia honoraria 3, Rahden/Westf. 1998, S. 149-173.
- AMBS, Richard / WISCHENBARTH, Peter:  
1990 Metallverarbeitung in einer spätbronzezeitlichen Höhensiedlung bei Bellenberg (Schwabens), in: Bayer. Vorgeschbl. 55, 1990, S. 257-271.
- ANFINSET, Nils:  
2011 Social and Technological Aspects of Mining, Smelting and Casting Copper. An Ethnoarchaeological Study from Nepal, Bochum 2011.
- ANGELINI, Bruno / BAGOLINI, Bernardino / PASQUALI, Tullio:  
1980 Aquaviva di Besenello. Preist., in: Alpina 16, 1980, S. 67-69.
- ANREITER, Peter / GOLDENBERG, Gert / HANKE, Klaus / KRAUSE, Rüdiger / LEITNER, Walter / MATHIS, Franz / NICOLUSSI, Kurt / OEGGL, Klaus / PERNICKA, Ernst / PRAST, Mario / SCHIBLER, Jörg / SCHNEIDER, Ingo / STADLER, Harald / STÖLLNER, Thomas / TOMEDI, Gerhard / TROPFER, Peter (Hrsg.):  
2010 Mining in European History and its Impact on Environment and Human Societies – Proceedings for the 1st Mining in European Hi-

- story-Conference of the SFB HiMAT, 12.-15. November 2009, Innsbruck 2010.
- ARTIOLI, Gilberto / BURGER, Emilien:  
2009 Petrographic and chemical investigations of the earliest copper smelting slags in Italy: towards a reconstruction of the beginning of copper metallurgy, in: 2<sup>nd</sup> International Conference „Archaeometallurgy in Europe“ Aquileia-Italy, 17-21 June 2007, Selected papers, Milano 2009, S. 12-20.
- BERNATZKY-GOETZE, Monika:  
1987 Möringen. Die spätbronzezeitlichen Funde, in: *Antiqua* 16, Basel 1987.
- BINGGELI, Markus / BOSCHETTI, Adriano / MÜLLER, Felix:  
1997 Una dimostrazione di archeologia sperimentale: la fusione di oggetti in bronzo, in: Brea, M. B. / Cardarelli, A. / Cremaschi, M. (Hrsg.): *Le Terramare, La più antica civiltà padana*, Modena 1997, S. 567-569.
- BOURGARIT, David:  
2007 Chalcolithic copper smelting, in: La Niece, S. / Hook, D. / Craddock, P. (Eds.), *Metals and mines, studies in archaeometallurgy*, 2007, S. 1-14.
- BRONITSKY, Gordon / HAMER, Robert:  
1986 Experiments in Ceramic Technology: The Effects of Various Tempering Materials on Impact and Thermal Shock Resistance, in: *American Antiquity* 51-1, 1986, S. 89-101.
- CELIS, Georges:  
1991 Eisenhütten in Afrika. Les fonderies africaines du fer, Frankfurt a. M. 1991.
- CIERNY, Jan:  
2008 Prähistorische Kupferproduktion in den südlichen Alpen, Region Trentino Orientale. *Der Anschnitt Beiheft*, 22, Bochum 2008.
- COLPANI, Fabio / ANGELINI, Ivana / ARTIOLI, Gilberto / TECCHIATI, Umberto:  
2009 Copper smelting activities at the Millan and Gudon chalcolithic sites (Bolzano, Italy): chemical and mineralogical investigations of the archaeometallurgical finds, in: Moreau, J.-F. / Auger, R. / Chabot, J. / Herzog, A. (Hrsg.): *Proceedings Actes ISA 2006*. 36<sup>th</sup> International Symposium on Archaeometry 2-6 May 2006, Quebec City, Canada. *Cahiers d'archéologie du CELAT* 25, Série archéométrie 7, Québec 2009, S. 367-373.
- CRAWHALL, T. C.:  
1933 Iron Working in the Sudan, in: *MAN* 33 (Mar.), 1933, S. 41-43.
- D'AMICO, Claudio / GASPEROTTO, Giorgio / PEDROTTI, Annalisa:  
1998 Aspetti della prima metallurgia in Trentino attraverso l'analisi delle scorie di fusione del riparo Gaban e di Acquaviva di Besenello. Caratteri, provenienza ed estrazione del metallo, in: D'Amico, C. / Albore Livadie, C. (Hrsg.): *Le scienze della terra e l'archeometria. Atti del Convegno organizzato dall'Istituto Universitario Suor Orsola Benincasa, Napoli* 1998, S. 31-38.
- DAL RÌ, Lorenzo / RIZZI, Gianni / TECCHIATI, Umberto:  
2005 Die Untersuchungen einer spätkupferzeitlichen Struktur mit Hinweisen auf Erzgewinnung und Verhüttung in Milland bei Brixen, in: Abstracts zur internationalen Tagung „Der spätkupferzeitliche Schmelzplatz von Milland bei Brixen im Rahmen der beginnenden Metallurgie im alpinen Raum“, Bozen 2005.
- DAVEY, Christopher J.:  
1979 Some ancient Near Eastern pot bellows, in: *Levant* XI, 1979, S. 101-111.
- DELL MOUR, Rudolf W.:  
1989 Keramanalyse mit dem Polarisationsmikroskop. Methodik – Interpretation – Beispiele, in: *Arch. Austriaca* 73, 1989, S. 17-34.
- EIBNER, Clemens:  
1993 Fund- und Forschungsbericht Mitterberg/Mühlbach am Hochkönig, in: *Arch. Österreich* 4/2, 1993, S. 34-35.  
2004 Die mittelbronzezeitliche Fundstelle „Schlosser“ in Schwarzenbach, Stadtgemeinde Trieben, in: *res montanarum* 33, 2004, S. 27-30.
- FASNACHT, Walter:  
1998 Bronzetechnologie, in: Hochuli, S. / Niffeler, U. / Rychner, V. (Hrsg.): *Die Schweiz vom Paläolithikum bis zum frühen Mittelalter: Bronzezeit (SPM 3)*, Basel 1998, S. 232-241.  
1999 Experimentelle Rekonstruktion des Gebrauchs von frühbronzezeitlichen Blasdüsen aus der Schweiz: Kupferverhüttung und Bronze-guß. *Experimentelle Archäologie* 8, 1999, S. 237-246.
- FIALA, Franz:  
1899 Das Flachgräberfeld und die prähistorische Ansiedlung in Sanski-most, in: *Wiss. Mitt. Bosnien u. Herzegowina* 6, 1899, S. 62-128.
- FRIEDE, Heinrich / STEEL, Robbie:  
1986 Traditional Wooden Drum Bellows of South-Western Africa, in: *The South African Archaeological Bulletin* 41/143, 1986, S. 12-16.
- GERSBACH, Egon:  
1995 Baubefunde der Perioden IVc-IVa der Heuneburg, in: *Röm.-Germ. Forsch.* 53, Heuneburgstudien IX, Mainz 1995.
- GOLDENBERG, Gert / RIESER, Brigitte:  
2004 Die Fahlerzlagerstätten von Schwaz/Brixlegg (Nordtirol), in: *Weisgerber / Goldenberg* 2004, S. 37-52.
- GOLDENBERG, Gert:  
1998 L'exploitation du cuivre dans les Alpes autrichiennes à l'Âge du Bronze, in: Mordant, C. / Pernot, M. / Rychner R. (eds.): *L'Atelier du bronzier en Europe du XXe au VIIIe siècle avant notre ère. Actes du colloque international „Bronze 96“ Neuchâtel et Dijon*, 1996. Tome II, Du minerai au métal, du métal à l'objet, Paris 1998, S. 9-23.  
2004 Ein Verhüttungsplatz der mittleren Bronzezeit bei Jochberg (Nordtirol). Veröffentlichungen Deutsches Bergbaumuseum Bochum 122 / *Der Anschnitt Beiheft*, 17, Bochum 2004, S. 165-176.  
2008 Urgeschichtlicher Kupferbergbau bei Radfeld, in: *Dorfbuch Radfeld, Radfeld* 2008, S. 65-70.
- GOLDENBERG, Gert / BREITENLECHNER, Elisabeth / DESCHLER-ERB, Sabine / HANKE, Klaus / HIEBEL, Gerald / HÜSTER-PLOGMANN, Heide / HYE, Simon / KLAUNZER, Michael / KOVÁCS, Kristof / KRISMER, Matthias / Lutz, Joachim. / MAASS, Alexander / MOSER, Michael / NICOLUSSI, Kurt / OEGGL, Klaus / PERNICKA, Ernst / PICHLER, Thomas / PÖLLATH, Nadia / SCHIBLER, Jörg / STAUDI, Markus / STOPP, Barbara / THURNER, Andrea / TÖCHTERLE, Ulrike / TOMEDI, Gerhard / TROPPER, Peter / VAVTAR, Franz / WEINOLD, Thomas:  
2012 Prähistorischer Kupfererzbergbau im Maukental bei Radfeld/Brixlegg im Unterinntal, in: Goldenberg, G. / Töchterle, U. / Oeggel, K. / Krenn-Leeb, A. (Hrsg.): *Forschungsprogramm HiMAT – Neues zur Bergbaugeschichte der Ostalpen. Arch. Österreichs Spezial* 4, Wien 2012, S. 61-110.
- GOLDENBERG, Gert / ANFINSET, Nils / SILVESTRI, Elena / BELGRADO, Enrico / HANNING, Erica / KLAUNZER, Michael / SCHNEIDER, Philipp / STAUDI, Markus / TÖCHTERLE, Ulrike:  
2011 Das Nepal-Experiment – experimentelle Archäometallurgie mit ethnoarchäologischem Ansatz, in: *Oeggel u. a.* 2011, S. 83-90.
- GOLLING, Sven:  
2002 Schwarzenbach in der Stadtgemeinde Trieben (Steiermark/ Österreich). Ein Siedlungsplatz der Bronzezeit mit Hinweisen auf Kupferverhüttung. Ungedr. Diplomarbeit, Univ. Freiberg, Freiberg 2002.
- GRUNDMANN, GÜNTER / MARTINEK, KLAUS-PETER:  
1994: Erzminerale und Gangarten des Bergbaugesbietes Schwaz und Brixlegg, in: *Lapis* 19, 1994, H. 7-8, S. 28-40.
- HAMPL, Franz:  
1953 Urnenfelderzeitlicher Kupfererzbergbau im südöstlichen Niederösterreich, in: *Arch. Austriaca* 13, 1953, S. 47-72.
- HANNING, Erica / GAUSS, Roland / GOLDENBERG, Gert:  
2010 Metal for Zambujal: experimentally reconstructing a 5000-year-old technology, in: *Trabajos de Prehistoria* 67/2, 2010, S. 287-304.
- HANNING, Erica:  
2007 Early copper metallurgy on the Iberian Peninsula – an archaeometallurgical approach. *Maschinenschr. Magisterarbeit, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg*, Freiburg i. Br. 2007.
- HARB, Isabella:  
2002 Die Ausgrabungen in der Tischoferhöhle bei Kufstein in Tirol. *Præarchos* 1, Innsbruck 2002.
- HAUSER, Luis:  
1986 Die bronzezeitlichen Kupferschmelzöfen in „Fennhals“ über Kurltasch, in: *Schlern* 60, 1986, S. 75-87.
- HERDITS Hannes / LÖCKER, Klaus:  
2004 Eine bronzezeitliche Kupferhütte im Mitterberger Kupferkies-Revier (Salzburg), in: *Weisgerber / Goldenberg* 2004, S. 177-188.
- HERDITS, Hannes:  
1997 Ein bronzezeitlicher Kupferverhüttungsplatz in Mühlbach/Hochkönig (Salzburg). Ungedr. Dipl. Univ. Wien, Wien 1997.
- HOPPE, Michael:  
1993 Eine frühbronzezeitliche Siedlung von Burgweinting, in: *Arch. Jahr Bayern* 1993, S. 52-54.
- HUIJSMANS, Melitta / KRAUSS, Robert:  
1993 KG Brixlegg, MG Brixlegg, VB Kufstein, in: *Fundber. Österreich* 32, 1993, S. 690.  
1995 KG Brixlegg, MG Brixlegg, VB Kufstein, in: *Fundber. Österreich* 34, 1995, S. 649.  
1997 KG Brixlegg, MG Brixlegg, VB Kufstein, in: *Fundber. Österreich* 35, 1997, S. 438.  
1998 KG Brixlegg, MG Brixlegg, VB Kufstein, in: *Fundber. Österreich* 36, 1998, S. 787.
- HUIJSMANS, Melitta:  
1994 Die frühe und mittlere Bronzezeit in Nordtirol, *Maschinenschr. Diplomarbeit, Univ. Innsbruck, Innsbruck* 1994.
- HUIJSMANS, Melitta / KRAUSS, Robert / STIBICH, R.:



- 2004 Prähistorischer Fahlerzbergbau in der Grauwackenzone, in: Weisgerber / Goldenberg 2004, S. 53-62.
- HUNDT, Hans-Jürgen:  
1988 Einige Bemerkungen zu den älterbronzezeitlichen Tondüsen, in: Slovenská Arch. 36, 1988, S. 99-104.
- JANTZEN, Detlef:  
2008 Quellen zur Metallverarbeitung im Nordischen Kreis der Bronzezeit. Prähist. Bronzefunde, Abt. XIX, 2, Stuttgart 2008.
- JOCKENHÖVEL, Albrecht:  
1986 Struktur und Organisation der Metallverarbeitung in urnenfelderzeitlichen Siedlungen Süddeutschlands, in: Veröff. Mus. Ur- u. Frühgesch. Potsdam 20, 1986, S. 219.
- KAUFMANN, Dieter:  
1975 Ein Kultgegenstand mit Gesichtsdarstellung aus der Bernburger Gruppe von Polleben, Kr. Eisleben, in: Ausgrabungen und Funde 20, 1975, S. 17-20.  
1978 Kultgegenstand oder Blasebalgdüse?, in: Ausgrabungen und Funde 23, 1978, S. 170-173.
- KIENLIN, Tobias L. / STÖLLNER, Thomas:  
2009 Singen Copper, Alpine Settlement and Early Bronze Age Mining: Is There a Need for Elites and Strongholds?, in: Kienlin, T. L. / Roberts, B. (Hrsg.): Metals and Societies – Studies in honour of Barbara Ottaway. Universitätsforsch. Prähist. Arch. 169, Bonn 2009, S. 67-104.
- KLAUNZER, Michael / GOLDENBERG, Gert / HYE, Simon / STAUDI, Markus / TÖCHTERLE, Ulrike / TOMEDI, Gerhard:  
2010a Prehistoric Fahlore Mining and Metallurgy in the Mauken Valley, Radfeld/Brixlegg, North-Tyrol, in: Anreiter u. a. 2010, S. 345-349.  
KLAUNZER, Michael / STAUDI, Markus / GOLDENBERG, Gert / TOMEDI, Gerhard:  
2010b KG Buch, OG Buch bei Jenbach, PB Schwaz, in: Fundber. Österreich 49, 2010, S. 417.
- KLEMM, Susanne:  
2003 Montanarchäologie in den Eisenerzer Alpen, Steiermark. Mitt. Prähist. Komm. 50, Wien 2003.  
2004 Der prähistorische Kupferschmelzplatz S1 in der Eisenerzer Ramsau (Steiermark), in: Weisgerber / Goldenberg 2004, S. 189-198.
- KRAUSS, Robert:  
2001 Die bronzezeitliche Siedlung und das Bergwerk auf der Au zu St. Veit, Maschinschr. Dissertation Univ. Innsbruck, Innsbruck 2001.
- KRISMER, Matthias / GOLDENBERG, Gert / TROPPEL, Peter:  
2011 Die chemische Zusammensetzung von späbronzezeitlichen Schlacken vom Schmelzplatz Mauken/Brixlegg, in: Oegg u. a. 2011, S. 185-192.
- KRÖSBACHER, Romana:  
2004 Fundtopographie des nördlichen Wipptales. Maschinschr. Diplomarbeit Univ. Innsbruck, Innsbruck 2004.
- KUCHAĀK, Milan / ŠVĀCHA, Hynek:  
2007 Keramická dýza z Prahy 6 – Ruzyn. P ísp vek k metalurgii bronzu v mladší dob bronzové. Doba popelnicových polí a doba halštataká. P ísp vky z IX. konference, Bu ovíce 3.-6.10.2006, Brno 2007, S. 145-155.
- LIPPERT, Andreas:  
1994 Frühe Zeugnisse von Kupfermetallurgie im Raum Mühlbach am Hochkönig-Bischofshofen, in: Günther, W. / Eibner, C. / Lippert, A. / Paar, W. (Hrsg.): 5000 Jahre Kupferbergbau-Mühlbach am Hochkönig-Bischofshofen, Mühlbach am Hochkönig 1994, S. 27-40.
- LUSCHAN, Felix von  
1909 Eisentechnik in Afrika, in: Zeitschr. für Ethnologie 41, 1909, S. 22-59.
- MAGGETTI, Marino:  
2008 Naturwissenschaftliche Untersuchung antiker Keramik, in: Hauptmann, A. / Pingel, V. (Hrsg.): Archäometrie. Methoden und Anwendungsbeispiele naturwissenschaftlicher Verfahren in der Archäologie. Veröff. aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum 156, Stuttgart 2008, S. 91-109.
- MARTINEK, Klaus-Peter / SYDOW, Wilhelm:  
2004 Frühbronzezeitliche Kupfermetallurgie im Unterinntal (Nordtirol), in: Weisgerber / Goldenberg 2004, S. 199-211.
- MARTINEK, Klaus-Peter:  
1994 Das Mineralvorkommen des Bergbaugesbietes Schwaz-Brixlegg, in: Historisches Bergbaurevier für Silber und Kupfer in den Alpen. MM-Bergwerksportrait, Sonderschau der IU München und LMU München, München 1994, S. 70-73.  
1996 Archäometallurgische Untersuchungen zur frühbronzezeitlichen Kupferproduktion und -verarbeitung auf dem Buchberg bei Wiesing, in: Fundber. Österreich 34, 1996, S. 575-584.
- MARZATICO, Franco:  
1995 Endbronzezeitliche Kupferproduktion im Trentino, in: Der Anschnitt 47, 1995, S. 82-91.  
2001 La prima età del ferro, in: Lanzinger, M. / Marzatico, F. / Pedrotti, A. (Hrsg.): La preistoria e la protostoria. Storia del Trentino 1, Bologna 2001, S. 417-478.
- MISKE, Kálmán von:  
1908 Die prähistorische Ansiedlung Velem St. Vid, Wien 1908.
- MODL, Daniel:  
2011 Vom Kupfererz zur Bronzenadel – Experimentalarchäologische Untersuchungen zur urgeschichtlichen Kupfergewinnung und -verarbeitung im Bereich der heutigen Steiermark. Ungedr. Diplomarbeit, Univ. Graz, Graz 2011.
- MÖSLEIN, Stephan:  
1997 Die Straubinger Gruppe der donauländischen Frühbronzezeit – frühbronzezeitliche Keramik aus Südostbayern und ihre Bedeutung für die chronologische und regionale Gliederung der frühen Bronzezeit in Südbayern, in: Ber. Bayer. Bodendenkmalpflege 38, 1997, S. 37-106.
- MOSTLER, Helfried:  
1969 Geologisch-lagerstättenkundliche Untersuchung, in: Menghin, Osm. (Hrsg.): Beiträge zur Urgeschichte Tirols. Innsbrucker Beitr. Kulturwiss. Sonderh. 29, Innsbruck 1969, S. 115-116.
- MOTTES, Elisabetta / NICOLIS, Franco:  
2002 Il territorio del Trentino tra Neolitico recente ed età del Rame: analisi e interpretazione dei dati, in: Ferrari, A. / Visentini, P. (Hrsg.), Atti del Convegno „Il declino del mondo neolitico. Ricerche in Italia centrosettentrionale fra aspetti peninsulari, occidentali e nordalpini“, Pordenone 2001. Quaderni Mus. Archeol. Friuli Occidentale 4, Pordenone 2002, S. 237-256.
- NAGLER-ZANIER, Cordula:  
1999 Die hallstattzeitliche Siedlung mit Grabenanlage von Geiselhöring, Niederbayern. Das Projekt Geiselhöring-Süd, Teil II. Arbeiten zur Arch. Süddeutschlands 7, Büchenbach 1999.
- NEUNINGER, Heinz / PREUSCHEN, Ernst / PITTIONI, Richard:  
1970 Das Kupfer der Metallobjekte aus der Tischoferhöhle bei Kufstein, Tirol, in: Arch. Austriaca 47, 1970, 72-77.
- NOLL, Walter:  
1991 Alte Keramiken und ihre Pigmente. Studien zu Material und Technologie, Stuttgart 1991.
- NOTHDURFTER, Hans / Hauser, Luis:  
1988 Bronzezeitliche Kupferschmelzöfen aus Fennhals. Denkmalpflege in Südtirol, Tutela die beni Culturali in Alto Adige 1986, Bozen 1988, S. 177-190.
- O'BRIAN, W.:  
2004 Ross island: Mining metal and society in early Ireland. Bronze Age Studies 6. Dept. of Archaeology, N.U.I. Galway 2004.
- OEGGL, Klaus / GOLDENBERG, Gert / STÖLLNER, Thomas / PRAST, Mario (Hrsg.):  
2011 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, Innsbruck 2011.
- PEARCE, Mark:  
2009 How Much Metal was there in Circulation in Copper Age Italy?, in: Kienlin T. L., Roberts B. (eds.): Metals and Societies – Studies in honour of Barbara Ottaway. Universitätsforsch. Prähist. Arch. 169, Bonn 2009, S. 277-284.
- PEDROTTI, Annaluisa:  
2001 L'età del Rame, in: Lanzinger, M. / Marzatico, F. / Pedrotti, A. (Hrsg.): Storia del Trentino 1. La preistoria e la protostoria, Bologna 2001, S. 183-253.
- PERINI, Renato:  
1973 Romagnano – Toof de la Val (Trento), in: Preist. Alpina 9, 1973, S. 247-250.  
1999 Dati inediti su ritrovamenti retici nel Trentino, in: Archeoalp – Archeologia delle alpi 5, 1998, S. 120-156.  
2002 Il Ciaslir del monte Ozol, Revò-Romallo (Valle di Non, Trentino), in: Ziemmer-Plank, L. (Hrsg.) / Söldner, W. (Red.): Kult der Vorzeit in den Alpen. Opfergaben – Opferplätze – Opferbrauchtum. Schriftenr. Arbeitsgem. Alpenländer der Komm. III/Kultur, Bozen 2002, S. 763-769.
- PIBER, Andreas:  
2005 The metamorphic evolution of the Austro-Alpine nappes north of the Tauern window (Innsbruck Quartzphyllite Complex – Patscherkofel Complex – Kellerjochgneiss and Wildschönau Schist), unpubl. Dissertation, Universität Innsbruck, Innsbruck 2005.
- PITTIONI, Richard:  
1958 Der Schmelzplatz Nr. 13 im Bergbaugesbiet Jochberg bei Kitzbühel, Tirol, in: Arch. Austriaca Beih. 3, 1958, S. 19-40.
- PRESSLINGER, Hubert / EIBNER, Clemens / WALACH, G. / SPERL, Gerhard:  
1980 Ergebnis der Erforschung urnenfelderzeitlicher Kupfermetallurgie im Palental, in: Berg- und Hüttenmännische Monatsh. 133/7, 1980, S. 131-142.

- REHDER, J.:  
1994 Blowpipes versus bellow in ancient metallurgy, in: *Journal of Field Archaeology* 21 (3), 1994, S. 345-350.
- REIDER, Elisabeth:  
2003 Die spätbronzezeitlichen Kleinfunde aus den bergbauarchäologischen Untersuchungen im Raum Radfeld, maschinenschr. Diplomarbeit, Univ. Innsbruck, Innsbruck 2003.
- RICHARDSON, I. G. / GROVES, G.W.:  
1997 The structure of the calcium silicate hydrate phases present in hardened pastes of white Portland cement/blast-furnace slag blends, in: *Journal of Material Science* 32, 1997, S. 4793-4802.
- RIEDERER, Josef:  
2004 Thin Section Microscopy Applied to the Study of Archaeological Ceramics, in: *Hyperfine Interactions* 154, 2004, S. 143-158.
- RODEN, Christoph / WEISGERBER, Gerd:  
1988 Zum Gebläse griechischer Metallhandwerker – Die Düsen von Olympia im kulturhistorischen Vergleich, in: Gschwantler, K. / Bernhard-Walcher, A. (Hrsg.): *Griechische und römische Statuetten und Großbronzen*, Wien 1988, S. 196-204.
- RODEN, Christoph:  
1988 Blasrohrdüsen. Ein archäologischer Exkurs zur Pyrotechnologie des Chalkolithikums und der Bronzezeit, in: *Der Anschnitt* 40, 1988, S. 62-82.
- SASSON, Hamo:  
1964 Iron-Smelting in the Hill Village of Sukur, North-Eastern Nigeria, in: *MAN* 64 (Nov.-Dec.), 1964, S. 174-178.
- SCHAER, Andrea:  
2003 Untersuchungen zum prähistorischen Bergbau im Oberhalbstein (Kanton Graubünden), in: *Jahrb. Schweizer Ges. Ur- und Frühgesch.* 86, 2003, S. 7-54.
- SCHAMBERGER, Elisabeth:  
2007 Die bronzezeitlichen Siedlungsreste aus Vorwald bei Wald am Schoberpass, STMK, in: Tiefengraber, G. (Hrsg.): *Studien zur Mittel- und Spätbronzezeit am Rande der Südostalpen*. Universitätsforsch. Prähist. Arch. 148, Bonn 2007, S. 235-326.
- SCHIBLER, Jörg / BREITENLECHNER, ELISABETH / DESCHLER-ERB, Sabine / GOLDENBERG, Gert / HANKE, Klaus / HIEBEL, Gerald / HÜSTER PLOGMANN, Heidemarie / NICOLUSSI, Kurt / MARTI-GRÄDEL, Elisabeth / PICHLER, Sandra / SCHMIDL, Alexandra / SCHWARZ, Stefan / STOPP, Barbara / OEGGL, Klaus:  
2011 Miners and mining in the Late Bronze Age: a multidisciplinary study from Austria, in: *Antiquity* 85, 2011, S. 1259-1278.
- SCHNEIDER, Gerwulf (Red.):  
1989 Naturwissenschaftliche Kriterien und Verfahren zur Beschreibung von Keramik, in: *Acta Praehist. et Arch.* 21, 1989, S. 7-39.
- SCHNEIDER, Philipp:  
2009 Mineralogisch-petrologische Untersuchungen der Pyrometamorphose in Brandopferplätzen und Experimentelle Untersuchungen zum Rösten und Verhütten von Fahlerz, unpubl. Diplomarbeit, Universität Innsbruck, Innsbruck 2009.
- SCHUBERT, Matthias:  
2005 Die frühbronzezeitliche Kupferverarbeitung auf dem Buchberg im Unterinntal, Tirol, Diplomarbeit TU Bergakademie Freiberg, Freiberg 2005.
- SHENNAN, Stephen:  
1995 Bronze Age copper producers of the Eastern Alps. Excavations at St. Veit-Klingelberg. *Universitätsforsch. Prähist. Arch.* 27, Bonn 1995.
- SÖLDER, Wolfgang:  
1987/1988 Eine Siedlung der Bronzezeit bei Angath, in: *Tiroler Heimat* 51/52, 1987/1988, S. 5-36.  
2002 Zur Urgeschichte und Römerzeit in Nordtirol, in: Söldner, W. (Red.): *Zeugen der Vergangenheit. Archäologisches aus Tirol und Graubünden*. Ausstellungskat. Tiroler Landesmus. Ferdinandeum, Innsbruck 2002, S. 19-76.
- STAPEL, Andrea:  
2011 Düse kein Rätsel, in: *Bayerische Arch.* 2/2011, S. 4.
- STERBA, Johannes H. / MOMMSEN, Hans / STEINHAUSER, Georg / BICHLER, Max:  
2009 The influence of different tempers on the composition of pottery, in: *Journal of Archaeological Science* 36, 2009, S. 1582-1589.
- SYDOW, Wilhelm:  
1984 Die prähistorischen Wehranlagen auf dem Buchberg, OG Wiesing, in: *Fundberichte Österreich* 23, 1984, S. 179-207.  
1998 Die bronze- und latènezeitliche Siedlung auf dem Kiahbichl bei Faggen in Tirol, in: *Fundberichte Österreich* 37, 1998, S. 635-671.
- TISCHER, Thomas:  
2004 Der Kufsteiner Festungsberg in vorgeschichtlicher Zeit. *Prearchos* 2, Innsbruck 2004.
- TITE, Michael S. / KILIKOGLU, V. / VEKINIS, G.:  
2001 Strength, Toughness and Thermal Shock Resistance of ancient ceramics, and their influence on technological choice, in: *Archaeometry* 43, 2001, S. 301-324.
- TÖCHTERLE, Ulrike:  
2009 Kontinuität und Wandel: Funde aus prähistorischer Zeit, in: Mair D. / Töchterle, U.: *Archäologische Topographie der Siedlungskammer Ampass*. Ikarus 4, Innsbruck 2009, S. 29-243.  
2012 Der Kiechlberg bei Thaur als Drehscheibe zwischen den Kulturen nördlich und südlich des Alpenhauptkammes. Ein Beitrag zum Spätneolithikum und zur Früh- und Mittelbronzezeit in Nordtirol, unpubl. Dissertation, Univ. Innsbruck, Innsbruck 2012.
- TÖCHTERLE, Ulrike / BACHNETZER, Thomas / BRANDL, Michael / DESCHLER-ERB, Sabine / GOLDENBERG, Gert / KRISMER, Matthias / LUTZ, Joachim / OEGGL, Klaus / PERNICKA, Ernst / SCHEIBER, Esther / SCHIBLER, Jörg / SCHWARZ, Anton Stefan / TOMEDI, Gerhard / TROPPEL, Peter / VAVTAR, Franz:  
2012 Der Kiechlberg bei Thaur – eine neolithische bis frühbronzezeitliche Höhensiedlung, in: Goldenberg, G. / Töchterle, U. / Oeggel, K. / Krenn-Leeb, A. (Hrsg.): *Forschungsprogramm HiMAT – Neues zur Bergbaugeschichte der Ostalpen*. Arch. Österreichs Spezial 4, Wien 2012, S. 31-58.
- TÖCHTERLE, Ulrike / TROPPEL, Peter / TRAUNER, Sabine / KAINDL, Reinhard:  
2011 Stilistische und petrographische Untersuchungen prähistorischer Keramik vom Kiechlberg bei Thaur (Nordtirol), in: Cemper-Kiesslich, J. u. a. (Hrsg.): *Secundus Conventus Austriacus Archaeometriae*. Schriften zur Arch. und Archäometrie an der Paris Lodron Universität Salzburg 2, Salzburg 2011, S. 67-77.
- TOMEDI, Gerhard / TÖCHTERLE, Ulrike:  
2012 Der Kupferbergbau als movens für die früh- und mittelbronzezeitliche Auf siedelung Nordtirols, in: Anreiter, P. / Bánffy, E. / Bartosiewicz, L. / Meid, W. / Metzner-Nebelsick, C. (Hrsg.), *Archaeological, Cultural and Linguistic Heritage*. Festschrift für Erzsebet Jerem in Honour of her 70<sup>th</sup> Birthday. *Archaeolingua* 25, Budapest 2012, S. 587-600.
- TREBSCHKE, Peter:  
2010 Wiederaufnahme der Forschungen in der urnenfelderzeitlichen Bergbausiedlung Prigglitz-Gasteil, in: *Arch. Österreichs* 21/2, 2010, S. 18-19.
- TYLECOTE, Ronald F.:  
1981 From pot bellows to tuyeres, in: *Levant* 13, 1981, S. 107-118.
- WEISGERBER, Gerd / GOLDENBERG, Gert (Hrsg.):  
2004 Alpenkupfer – Rame delle Alpi. *Der Anschnitt Beiheft*, 17, Bochum 2004.
- WEISGERBER, Gerd / RODEN, Chr.:  
1986 Griechische Metallhandwerker und ihre Gebläse, in: *Der Anschnitt* 38, 1986, S. 2-26.
- WEISS, Johannes:  
1994 Erfahrungen beim Herstellen und Brennen von prähistorischen Keramikkopien, in: *Jahrbuch Schweizer Ges. Ur- und Frühgesch.* 77, 1994, S. 115-122.
- ZEMMER-PLANK, Liselotte:  
1978 Ein bronzezeitliches Gehöft auf dem Gschleirsbühel bei Matrei am Brenner, in: *Veröff. Tiroler Landesmus.* 58, 1978, S. 157-200.  
1990 Urzeitlicher Bergbau in Tirol, in: Ammann, G. (Red.): *Silber, Erz und weißes Gold*. Katalog Tiroler Landesausstellung 1990 in Schwaz, Innsbruck 1990, S. 74-97.
- ZSCHOCKE, Karl / PREUSCHEN, Ernst:  
1932 Das urzeitliche Bergbauggebiet von Mühlbach-Bischofshofen. *Mat. zur Urgeschichte Österreichs* 6, Wien 1932.

## Anschrift der Verfasser

Ulrike Töchterle	Philipp Schneider
Gert Goldenberg	Peter Tropper
Institut für	Institut für Mineralogie und
Archäologien	Petrographie,
Universität Innsbruck	Universität Innsbruck
Langer Weg 11	Innrain 52
A-6020 Innsbruck	A-6020 Innsbruck