

# Experimente zur Simulation prähistorischer Kupfergewinnung: Zur Verfahrenstechnik von Windöfen

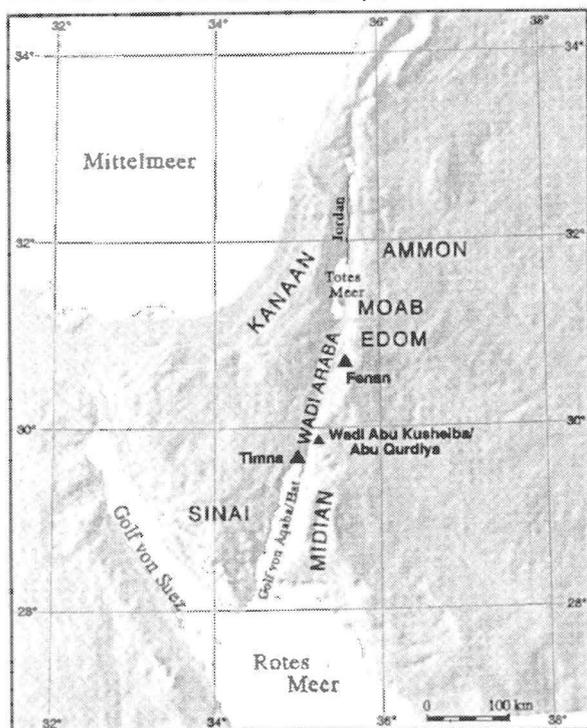
St. Kölschbach, G. Woelk, A. Hauptmann & W.G.J. Bunk

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Verfahrenstechnik von Schmelzöfen zur Kupfergewinnung mit natürlichem Wind auf der Basis archäologischer Befunde aus der Frühbronzezeit des Vorderen Orients (ca. 2900-2150 v.Chr.) simuliert und experimentell untersucht. Nach Vorversuchen im Windkanal an der RWTH Aachen wurden an den originalen Ofenstandorten in Fenan/Jordanien Schmelzexperimente durchgeführt. Starke und kontinuierliche Winde führten in den rekonstruierten Schmelzöfen zu Temperaturen > 1200 °C.

Abb. 1: Die geographische Lage Fenans am Ostrand des Wadi Arabah im heutigen Jordanien mit den umgebenden historischen Landschaften. Gezeigt sind außerdem die kleineren Kupferreviere von Timna und den Wadis Abu Kusheiba und Abu Qurdiya.

Fig. 1: Geographic location of Feinan at the eastern margin of the Wadi Arabah in Jordan. Indicated are also historic landscapes and minor copper occurrences at Timna and Wadi Abu Kusheiba and Abu Qurdiya.



Das in den Versuchen eingesetzte oxidische Kupfererz, verwachsen mit Manganoxiden, Dolomit und Tonstein, wurde zum Metall reduziert, das Nebengestein verschlackt. Dies bestätigte die These, dass die alten Hüttenleute Kupfer in Windöfen produzieren konnten, ohne Düsen und Blasebälge einzusetzen.

## Abstract

In this study we report on experimental reconstruction of Early Bronze Age (ca. 2900-2150 B.C.) copper smelting by wind powered furnaces. The work was done based upon archaeological evidence from Feinan, Jordan. Smelting experiments were carried out in a first step in a wind tunnel at the RWTH Aachen, in a later stage in the field exactly on smelting sites at Feinan, Jordan, where copper was produced in prehistoric times. Strong and continuous winds led to furnace temperatures far above 1200 °C and provided firing conditions suitable to produce copper. Slag was formed containing copper prills reduced from oxidic copper ores intergrown with manganese ore, dolomite and siltstone. Herewith, we could confirm the previously published hypothesis of copper production by wind driven furnaces without tuyeres and bellows.

## Einführung

Der Kupfererzdistrikt von Fenan befindet sich etwa 60 km südlich des Toten Meeres im heutigen Jordanien (Abb. 1). Er liegt zwischen dem Jordanischen Hochplateau im Osten, das sich bis zu 1300 m über Normalnull erhebt und dem Grabenbruch des Wadi Arabah im Westen, in dem die politische Grenze zu Israel verläuft. In dünn besiedelter Umgebung gelegen, wurde das für die frühe und möglicherweise auch moderne Kupfergewinnung so wichtige Gebiet erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts von Europäern wiederentdeckt. In den achtziger Jahren wurden dann in einem Forschungsvorhaben zur frühen Kupfergewinnung in SüdJordanien vom Deutschen Bergbaumuseum, Bochum (DBM) und dem Department of

Antiquities, Amman (DAA), archäometallurgische Untersuchungen zur prähistorischen Kupfergewinnung im Gebiet von Fenan durchgeführt, durch die Fenan wieder in das Bewusstsein der Archäologie und der Technikgeschichte rückte.

Dadurch, dass die Kupferlagerstätte von Fenan nicht die wirtschaftlichen Voraussetzungen für eine moderne bergbauliche Nutzung erfüllt und zudem noch in einem relativ abgelegenen Gebiet mit begrenzter Infrastruktur gelegen ist, sind die Zeugnisse prähistorischer Metallgewinnung im Vergleich zu anderen „alten“ Lagerstätten außerordentlich gut erhalten. Hierdurch bot sich die wohl einmalige Gelegenheit, Umfang und technischen Fortschritt der Metallurgie in den einzelnen Epochen vom Präkeramischen Neolithikum bis in die früharabische Zeit zu verfolgen. Mit der jetzt erschienenen Monographie über Fenan von Hauptmann (2000) liegt eine umfassende Darstellung der archäometallurgischen Funde und Befunde und ihrer Interpretation in diesem Gebiet vor.

Die frühe Kupfergewinnung in Fenan trug durchaus industrielle Züge. Verteilt über ein Gebiet von etwa 20 x 25 km<sup>2</sup>, zeugen zahlreiche Verhüttungsplätze mit insgesamt 150.000 bis 200.000 Tonnen an Schlacke von einer Kupferproduktion, die die Aktivitäten in Timna weitaus übertreffen. Erze aus Fenan wurden seit dem 5. Jahrtausend verhüttet, wobei sie von der Lagerstätte selbst in die Siedlungen der chalcolithischen Hochkulturen im Beer-Sheva-Becken transportiert und dort im Rahmen einer „Haushaltsmetallurgie“ in kleinen Tiegeln verhüttet wurden. Zu Beginn des dritten Jahrtausend setzt mit der vollen Entfaltung der Frühbronzezeit in Fenan eine Kupferproduktion in größerem, über den eigenen Bedarf hinausgehenden Umfang ein, die auf gravierenden technologischen Verbesserungen bergbaulicher Aktivitäten und einer Prozessoptimierung im Hüttenwesen basierte. Statt kleiner Schmelztiegel kamen nun Verhüttungsöfen zum Einsatz – die ältesten sicher datierten Schmelzöfen, die in der Alten Welt bekannt sind. Industrielle Ausmaße erreichte die Kupfergewinnung in der Eisenzeit. Aus dieser Epoche stammt der größte Teil der Schlackenhalde. Aber auch in römischer Zeit war Fenan das Zentrum der Kupfergewinnung in der gesamten Arabah.

Die Arbeiten des DBM hatten und haben eine großräumige Erfassung berg- und hüttenmännischer Relikte in Fenan aus allen Epochen zum Ziel sowie die Rekonstruktion der Kupfergewinnung und die Verbreitung von Fenan-Kupfer in der Levante. Hierbei wurden auch die Überreste von mehr als 50 Kupferschmelzöfen gefunden, die über eine Serie von Radiokarbon-Datierungen in die Zeit zwischen ca. 2900 und 2150 v.Chr. datiert werden konnten (Hauptmann 2000). Sie gehören zu den ältesten sicher da-

tierten Schmelzöfen der Alten Welt und wurden bereits von Hauptmann & Roden (1988) als Windöfen interpretiert. Die damit verbundene, z.T. heftige Diskussion (z.B. Rothenberg & Shaw 1990) führte schließlich zu einer ingenieurwissenschaftlichen Studie, um die formulierte These zu verifizieren. Es wurden im Rahmen einer Dissertation des Erstautors (Kölschbach 1999) an der RWTH Aachen zunächst auf der Grundlage von Literaturrecherchen die Verbreitung bekannter Windöfen untersucht und unter Zuhilfenahme von theoretischen Überlegungen und Simulationen ihre Funktionsweise ermittelt. Anhand experimenteller Untersuchungen im Labor und im Feld wurden dann auf der Basis der archäologischen Evidenz die frühbronzezeitlichen Kupferschmelzprozesse nachgestellt, deren wichtigste Ergebnisse hier in einer Kurzfassung vorgestellt sind. Die vollständige Fassung der Dissertation ist vom Erstautor erhältlich.

### *Die frühbronzezeitlichen Kupferschmelzöfen von Fenan*

Im Gebiet von Fenan wurden 12 Schmelzplätze aus der Frühbronzezeit II – IV gefunden. Hier liegen insgesamt ca. 5000 t Schlacke, die auf eine Kupferproduktion von rund 300-500 t in einem Zeitraum von rund 1000 Jahren hinweisen (Hauptmann et al. 1992).

*Abb. 2: Schmelzplatz Fenan 9. Die frühbronzezeitlichen Schmelzöfen 24-25. Zu erkennen sind die Überreste der vielfach erneuerten Ofenrückseite und der Ofensohle, die einen halbkreisförmigen Grundriss aufweist. Aus Hauptmann & Roden (1988).*

*Figure 2: Smelting site Feinan 9. Early Bronze Age smelting furnaces 24-25 at Feinan 9. Note the relics of the multiple renewed backside of the furnace and the semicircular bottom. From Hauptmann & Roden (1988).*



Diese Metallproduktion hatte demnach durchaus überregionale wirtschaftliche Bedeutung. Insgesamt wurden 42 Schmelzöfen vom DAA unter der Leitung von Dr. Mohammed Najjar und vom DBM an den Schmelzplätzen Fenan 9 und Fenan 15 ausgegraben. Im Wesentlichen waren lediglich noch Steinsetzungen und schalen- oder schüsselförmig konstruierte Bereiche aus der Ofensohle erhalten, die aus dünnen Lehmschichten bestehen und im hinteren Teil oft über zwanzig mal erneuert wurden (Abb. 2, 3). Die einzelnen Verstrichschichten waren etwa ein bis drei Zentimeter dick und sehr sorgfältig geglättet. Die halbkreisförmige Ofensohle – an der Vorderseite gerade begrenzt – fiel im allgemeinen leicht nach vorne ab, so dass deren tiefster Punkt etwa vorne in der Mitte lag. Ein vermutlicher Oberbau dieser Öfen wurde nur in Fragmenten gefunden; Details über die Ofenfront sind nicht erhalten. Ein integraler Bestandteil der Ofenwandungen sind etwa fingerdicke Tonstäbe aus quarzreicher Keramik, die zu Tausenden auf den Schmelzplätzen unter der Schlacke verstreut lagen (Abb. 4). Es wird weiter unten gezeigt werden, dass diese Tonstäbchen vermutlich zur Armierung der Ofenwandung eingesetzt wurden. Die Öfen waren in den Hang gebaut und standen in der Regel direkt auf dem anstehenden Gestein. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass an den frühbronzezeitlichen Schlackenhalde – im Gegensatz zu den späterer Epochen – nicht eine einzige Düse oder deren Fragmente gefunden wurden.

Die Standorte der Öfen wurden gezielt an windexponierten Stellen im Gelände gewählt, meist an

der oberen Kante z.T. ausgesprochen steiler Bergänge und Abbrüche, immer am Kopf der Halden. Wasser, Lehm und andere Materialien für den Ofenbau, Erz und Holzkohle mussten demnach offensichtlich mühsam transportiert werden. Die jeweilige Vorderfront der Öfen war stets einheitlich nach der Haupt-Windrichtung ausgerichtet, die je nach Geländesituation wechselte. Die wiederholt durchgeführten Ausbesserungen der Öfen belegen, dass einmal ermittelte Ofenstandorte immer wieder genutzt wurden und somit offensichtlich vorher optimal ausgesucht waren. Wie die Beispiele Fenan 9 und Fenan 15 zeigen, wurde stets eine größere Zahl von Öfen zu einzelnen Batterien nebeneinandergesetzt.

Die an den frühbronzezeitlichen Schmelzplätzen produzierten Schlacken haben eine charakteristische „Äußere Typologie“, die Rückschlüsse auf Feuerungsbedingungen und Prozessparameter erlauben. Sie bestehen in der Regel aus einer Vielzahl mm- bis cm-großer, oft vertikal abgelaufener Schlackentropfen, die gelegentlich zu kopfgroßen Blöcken zusammengeschweißt sind, z.T. auch keinerlei Fließgefüge aufweisen. Dazwischen sind sporadisch Klümpchen und Kügelchen von metallischem Kupfer eingelagert, die darauf hindeuten, dass eine (gravitative) Tren-

Abb. 3: Photogrammetrische Auswertung der Öfen 24-25 vom frühbronzezeitlichen Verhüttungsplatz Fenan 9. Dargestellt ist die Aufsicht auf das Ofenfragment. Vgl. Abb. 2.

Figure 3: Photogrammetric measurement of furnaces 24-25 from the Early Bronze Age smelting site Feinan 9. See also Fig. 2.

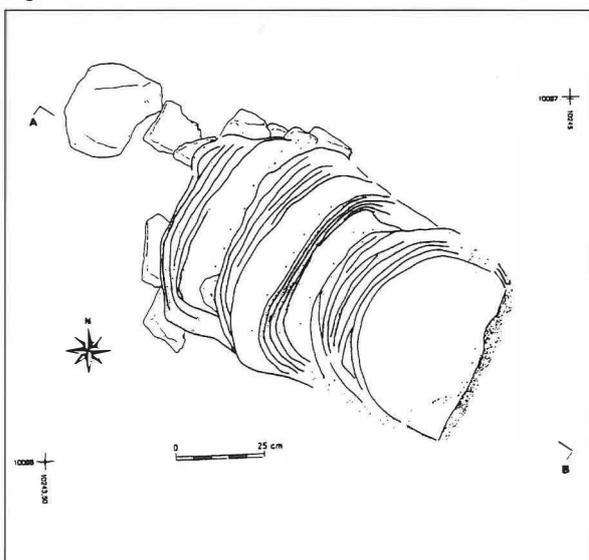
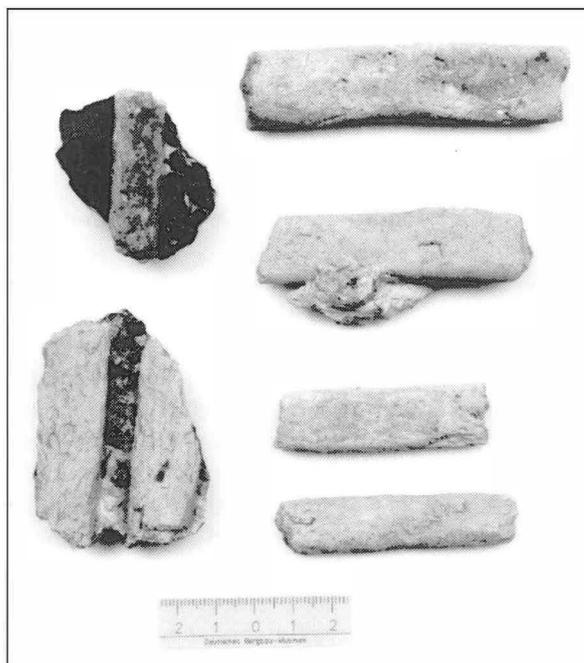


Abb. 4: Tonstäbchen, die zu Tausenden auf den frühbronzezeitlichen Schmelzplätzen im Fenan-Gebiet gefunden wurden. Sie bestehen aus quarzreichem Ton, sind also hoch refraktär und wurden vermutlich als Armierung der aus Ton hergestellten Ofenwandung eingesetzt.

Fig. 4: Thousands of clay rods were found on Early Bronze Age smelting sites in the Feinan district. They consist of quartz-rich clay, and were probably used to reinforce the furnace lining made of local calcium-rich clay.



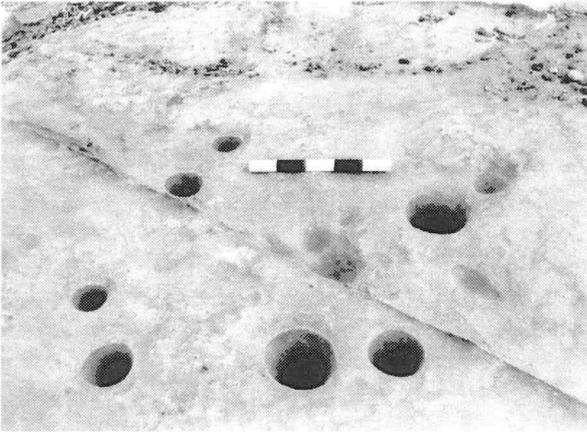


Abb. 5: Ras en-Naqab, Fenan. Unmittelbar neben den frühbronzezeitlichen Schlackenhalden finden sich auf einem Felsplateau hunderte von napfförmigen Vertiefungen, in denen Schlacke aufbereitet wurde, um Metalleinschlüsse zu bergen. Vermutlich war dies ein fester Verfahrensschritt der frühbronzezeitlichen Kupfermetallurgie. Aus Hauptmann (2000).

Fig. 5: Ras en-Naqab, Feinan. Close to the Early Bronze Age slag heaps we discovered hundreds of holes which resulted from crushing slags to recover metal inclusions. We assume that this procedure was a fixed part of metal production. From Hauptmann (2000).

nung des entstehenden Metalls nicht oder nicht vollständig gelungen ist. Kupfer und Schlacke wurden offenbar nur zum Teil aus dem Ofen abgestochen. Nach dem eigentlichen Schmelzprozess war eine mechanische Trennung des Kupfers von der Schlacke im festen Zustand notwendig. Das wird zudem augenscheinlich durch faustgroße Ambosssteine sowie die zugehörigen Unterlagsplatten belegt, die an den Schmelzplätzen gefunden wurden. Besonders eindrucksvoll wird dieser Arbeitsgang wahrscheinlich durch hunderte von napfförmigen Vertiefungen im Sandstein bei Ras en-Naqab im Fenan-Gebiet belegt (Abb. 5), die mit Schlackengrus gefüllt sind. Es ist sehr wahrscheinlich, dass diese Aufbereitung der Schlacken der frühbronzezeitlichen Kupfergewinnung zuzuordnen ist.

Der Einsatz von Windöfen war offenbar nicht auf Fenan beschränkt; sie sind möglicherweise auch auf der Westseite der Arabah (Rothenberg & Glass 1992) bis in den Sinai (Goren, Bachmann, mdl. Mitt.) und nach Ägypten bekannt gewesen, wo im Wadi Dara vergleichbare Öfen gefunden wurden (Castel et al. 1995). Auch in der Ägäis wird von Gale et al. (1985) ein frühbronzezeitlicher Schmelzplatz von der Insel Kythnos beschrieben, wo sehr wahrscheinlich in Windöfen Kupfer geschmolzen wurde. Er liegt etwa 150 m über dem Meeresspiegel, weitab jeglicher Vererzungen und ist den Nordwinden voll ausgesetzt.

## Vorbereitende Untersuchungen an der RWTH-Aachen

Es war zunächst vorgesehen, die Funktion alter Schmelzöfen mit natürlicher Windzufuhr zu untersuchen und unter enger Anlehnung an den archäologischen Befund wurde am Beispiel Fenan versucht, Einzelheiten zu den frühbronzezeitlichen Verhüttungsvorgängen zu rekonstruieren. So wurden z.B. die Windverhältnisse von Fenan untersucht, wobei das Augenmerk sowohl auf die globalen als auch auf die lokalen Windverhältnisse direkt an den Ofenstandorten gerichtet war. In Zusammenarbeit mit Archäometallurgen war ein Ofenkonzept zu entwickeln, das einerseits mit der archäologischen Evidenz in Einklang zu bringen war, auf der anderen Seite aber auch grundlegende Kriterien des Ofenbaus erfüllte. Mit Hilfe eines physikalischen Modells mussten erste qualitative Erkenntnisse über das Strömungsverhalten innerhalb und außerhalb des Ofens gewonnen werden.

Es wurde ein Versuchsstand entworfen, der die Durchführung von Feuerungs- und Verhüttungsexperimenten an Ofenmodellen in Originalgröße ermöglichte. Dabei fand die exponierte Lage der Ofenstandorte im Gelände durch die Art des Versuchsaufbaus Berücksichtigung. An diesem Versuchsstand wurden im Aachener Labor (Windkanal) Feuerungs- und Verhüttungsexperimente durchgeführt.

Begleitend zu den experimentellen Arbeiten wurde ein mathematisches Ofenmodell unter Verwendung eines kommerziell verfügbaren Programmpaketes zur Strömungssimulation entwickelt.

In abschließenden Feldversuchen wurden in Fenan an den originalen, frühbronzezeitlichen Verhüttungsplätzen die gewonnenen Erkenntnisse umgesetzt und Verhüttungsexperimente mit originalem Erz durchgeführt.

Trotz der umfangreichen Feldarbeiten in Fenan lagen außer subjektiven Eindrücken und Erfahrungen keine verlässlichen Daten über vorherrschende Windrichtungen und -stärken und über die sich daraus speziell an den einzelnen Ofenstandorten ergebenden Bedingungen vor.

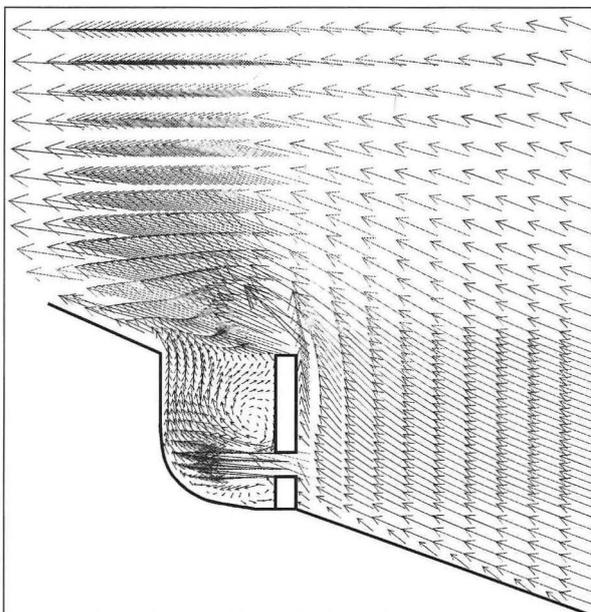
Da diese für die Arbeitsweise eines Windofens aber entscheidende Bedeutung besitzen, wurden sie mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden näher untersucht. Neben einer Auswertung von Winddaten aus Fenan nahegelegenen Wetterstationen wurden experimentelle Untersuchungen an physikalischen Modellen in unterschiedlichen Windkanälen durchgeführt und mathematische Modelle am Computer ausgearbeitet. Grundlage hierfür waren die Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls und Energie. Für die Simulationsberechnung wurde das betrachtete Gebiet in einzelne Zellen unterteilt, man nennt dies Diskretisierung, und für jede dieser Zellen wurden

die Erhaltungsgleichungen aufgestellt. Das angewandte Computational-Fluid-Dynamics-Programm (CFD) verwendet als Diskretisierungsmethode das sogenannte Finite-Volumen-Verfahren. Hierbei werden nichtüberlappende, aneinanderstoßende Zellen über das gesamte Berechnungsgebiet gelegt. Ein Gitterpunkt repräsentiert dabei eine gesamte Zelle, das heißt, dass der Wert der Erhaltungsgröße an einem Gitterpunkt für die ganze Zelle gültig ist. Für jedes einzelne Volumenelement werden die Erhaltungsgleichungen gelöst. Als Ergebnis erhält man ein System von Gleichungen, in dem die Erhaltungsgröße an einem Gitterpunkt in Abhängigkeit der benachbarten Punkte formuliert wird, mit diesen also gekoppelt vorliegt. Das resultierende System gekoppelter Gleichungen kann dann iterativ von dem CFD-Programm gelöst werden. Abbildung 6 zeigt das auf diese Weise gewonnene Ergebnis für die Berechnung der Strömungsgeschwindigkeiten an einem Windofenstandort.

In Aachen standen zwei Windkanäle für die experimentellen Untersuchungen zur Verfügung. Zunächst wurde ein topographisches Modell des Verhüttungsplatzes Fenan 9 mit einem Maßstab von 1:250 erstellt, in dem nicht nur die Ofenstandorte, sondern auch die

*Abb. 6: Simulation der Strömungsverhältnisse von einem am Hang liegenden Ofen. Der ungefüllte Ofen und der Hang sind im Schnitt dargestellt. Die Pfeile geben Windgeschwindigkeiten (Länge) und Windrichtung (Orientierung) wieder. Die Anströmgeschwindigkeit am rechten Bildrand beträgt 10 m/s.*

*Fig. 6: Simulation of flow conditions exemplified for a furnace located at a slope (section of the furnace without charge). Arrows indicate windspeed (length) and direction (orientation). Initial windspeed (right) is 10 m/s.*



nähere Umgebung nachgebildet wurde. Anhand der Vermessung dieses Modells im ersten Windkanal wurde der Einfluss des Geländeprofiles auf die Windverhältnisse am jeweiligen Ofenstandort festgestellt, wobei unterschiedliche Windrichtungen untersucht werden konnten.

Aus diesen Untersuchungen ergab sich, dass exakt an den Ofenstandorten kurz unterhalb von Bergkuppen lokal hohe Windgeschwindigkeiten auftraten und dies bei Windrichtungen, die mit der Orientierung des jeweiligen Ofens übereinstimmte. Dies belegt eine ausgezeichnete Kenntnis der alten Hüttenleute über Wetter und Geländebeziehungen, denn starke lokale Winde waren die Grundvoraussetzung für erfolgreiche Schmelzprozesse. Der einmal ausgesuchte Ofenstandort wurde nachweislich intensiv genutzt, wie die mehrfache Erneuerung und die auf kleinem Raum angelegten Ofenbatterien zeigen.

An diese Untersuchungen schlossen sich experimentelle Verhüttungsversuche in Öfen in der vermuteten Originalgröße an, die im zweiten Windkanal durchgeführt wurden. Die erzeugte Luftströmung wurde dabei derart eingestellt, dass sie den aus dem Geländemodell abgeleiteten Windverhältnissen entsprach. Im Verlauf der Experimente wurden zu verschiedenen Zeitpunkten Geschwindigkeiten von 2,5 - 7,7 m/s eingestellt. Über eine geeignete Messeinrichtung wurden Ofentemperaturen und Zusammensetzung der Gasatmosphäre gemessen, in einem Messrechner gespeichert und angezeigt. Darüber hinaus wurden anhand von Rauchgassondenuntersuchungen die Strömungsverhältnisse an der Ofenfront und dort besonders an den Lufteintrittsöffnungen beurteilt.

Für die Experimente im Windkanal wurde ein auf Rollen gelagerter Versuchsstand konzipiert, der während der Versuche vor die Düse des Windkanals gefahren wurde. Neben dem Ofen selbst wurde durch Leitbleche auch die unmittelbar umgebende Topographie des Geländes bzw. die Strömungsrichtung des Windes simuliert. Das Modell des Windofens wurde weitgehend nach dem archäologischen Befund entwickelt, wobei thermodynamische und verfahrenstechnische Aspekte Berücksichtigung fanden. In Abbildung 7 ist ein vermaßtes Modell dargestellt. Während der Arbeiten wurden sowohl Ofenhöhe als auch -vorderwand variiert, beide Kriterien waren sowieso offen. Ofenwandungen wurden aus einer industriell vorge-mischten Masse von Ton und Schamotte hergestellt. Die verwendete Masse wies eine Zusammensetzung von 30%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 62%  $\text{SiO}_2$  und 1,3%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  auf.

Die Temperaturmessung erfolgte auf thermoelektrische Weise mit Hilfe von Nickelchrom-Nickel (NiCr-Ni) Thermoelementen. Da der Inconelmantel der Thermoelemente bei Temperaturen oberhalb von etwa 800 °C durch die reduzierende Atmosphäre des

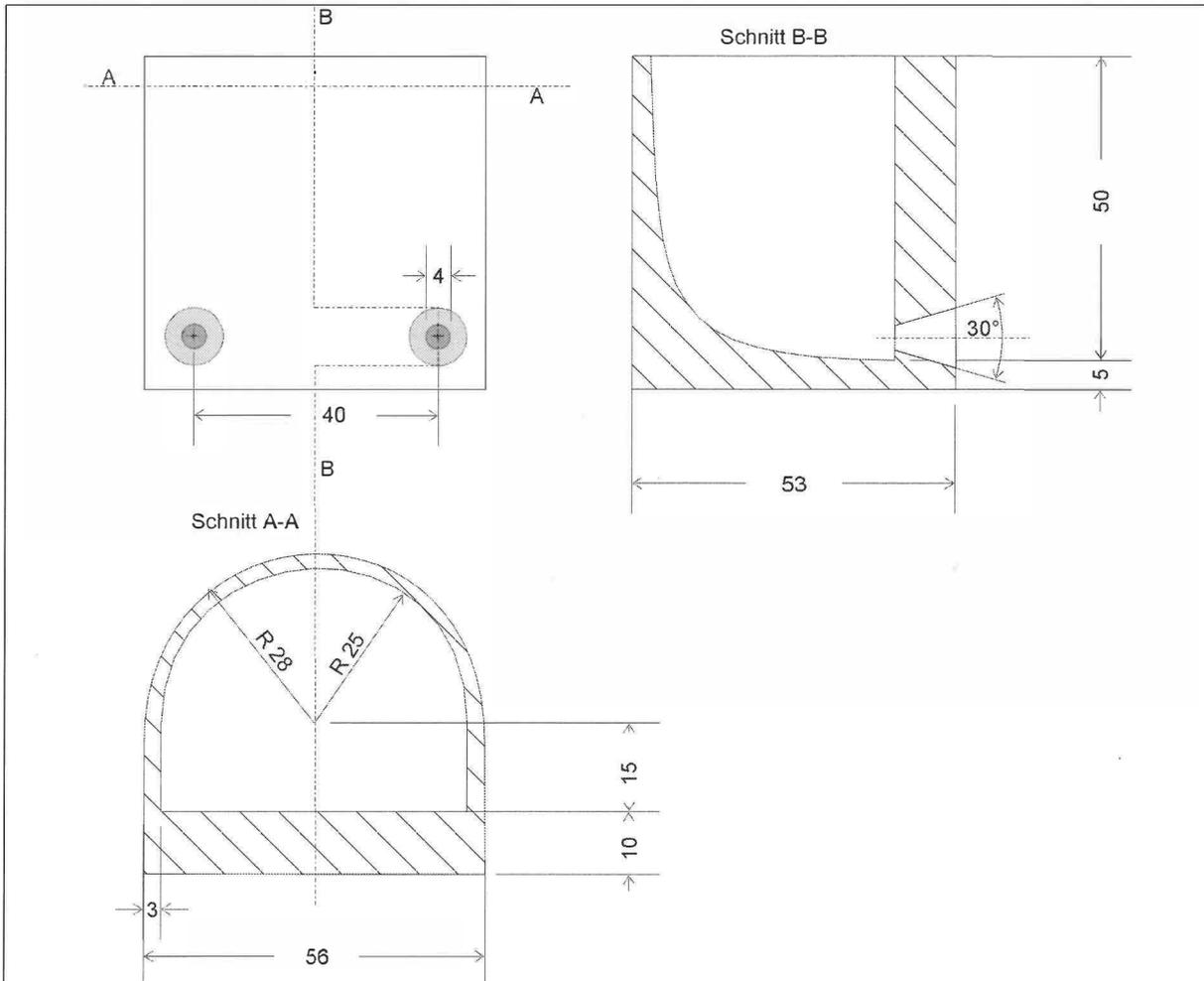


Abb. 7: Modell des Windofens für die Verhüttungsuntersuchungen im Windkanal. Ofenhöhe und Ofenvorderwand wurden im Verlaufe der Experimente variiert. Aufgrund ausgeprägter Rundungen ergaben sich teilweise geringere lichte Abstände zwischen Ofenfront und Rückwand im unteren Abschnitt des Ofens.

Fig. 7: Reconstruction of a wind-powered furnace used for experimental work in the wind tunnel. Height and front were varied during the different runs. Due to the semi-circular design of the bottom the distance between front and backside was smaller than in the upper part.

Ofens angegriffen worden wäre, wurden die Thermoelemente zusätzlich mit keramischen Schutzrohren versehen.

Nach der Positionierung des Ofenmodells auf dem Versuchsstand wurde es mit Steinen isoliert, mit Thermoelementen versehen und das Experiment gestartet. Bei zunächst geringen Windgeschwindigkeiten wurde das Feuer im Ofen entzündet. Als Brennstoff wurde Grillholzkohle in einer Stückgröße von 3-5 cm verwendet. Im weiteren Verlauf wurde der Ofen langsam mit Holzkohle aufgefüllt. Der gefüllte Ofen wurde weiter vorgeheizt. Die Vorheizphase betrug zwischen 2,5 und 4 Stunden. Eine Verlängerung der Vorheizphase führte allerdings nicht zu einem Anstieg der maximalen Temperaturen im Ofen.

Als Beispiel wird im Folgenden einer von mehreren Versuchen im Windkanal vorgestellt. Insgesamt wurden 55,5 kg Holzkohle benötigt, davon 35 kg für

die Erzeugung einer glühenden Holzkohlefüllung im Ofen, die nach 1:40 h abgeschlossen war. 3:20 h nach Versuchsbeginn wurde die Vorheizphase beendet und es wurde zum ersten Mal Erz chargiert. Bis zu diesem Zeitpunkt waren mittlerweile insgesamt 48,5 kg Holzkohle in den Ofen gefüllt worden.

Für den Versuch stand oxidisches Kupfererz aus Fenan zur Verfügung, allerdings mit einem wesentlich niedrigeren Mangengehalt, als in der Frühbronzezeit verhüttet worden ist. Um hier vergleichbare Voraussetzungen zu schaffen, wurde das vorliegende Erz mit Mangandioxid (Pyrolusit) gemischt und schließlich nach einer Aufbereitung pelletiert. Die Pellets wurden im Verlaufe des Versuchs in einzelnen Schichten entlang der Vorderwand des Ofens in einem Abstand zur Wand von 5-10 cm chargiert. Insgesamt wurden in diesem Versuch fünf Schichten von jeweils 1 kg Erz gemischt mit 500 g Holzkohle in ei-

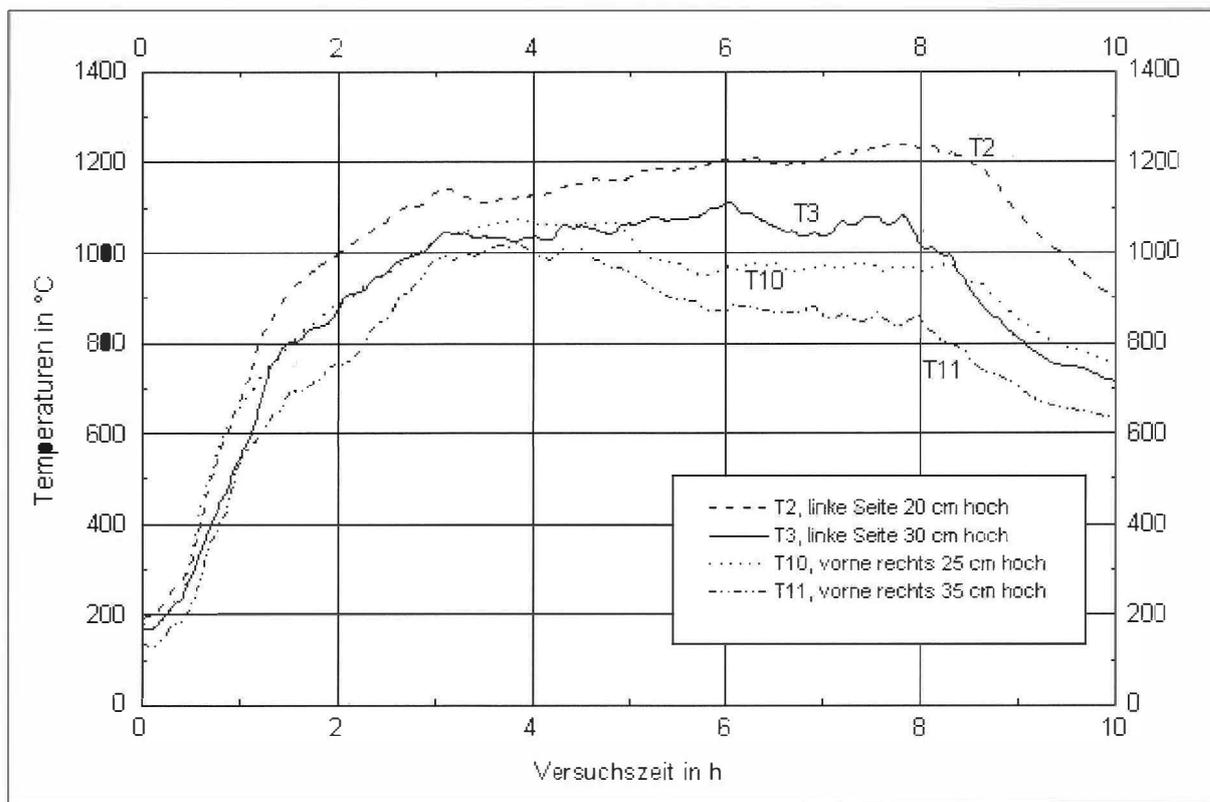


Abb. 8: Temperaturverlauf an verschiedenen Stellen der Ofenwandung im vorderen Bereich des Ofens während eines Verhüttungsversuchs im Windkanal. Nach 3:00 h ist die Vorheizphase abgeschlossen. Beachte die absinkenden Temperaturen, die mit der Chargierung der Erze einsetzt. Auch lange nach der letzten Holzkohlezufuhr (4:30 h) bleiben die Temperaturen auf einem hohen Niveau.

Fig. 8: Temperatures of a smelting experiment in the wind tunnel measured by thermocouples at different positions near the furnace's front part. After 3 hours, preheating is finished. Note the decrease of temperatures due to the charging of ore. Temperatures are still high for a long time after the last charcoal was added (4:30 h).

nem zeitlichen Abstand von jeweils 10 Minuten in den Ofen gegeben. Da während des Chargierens die Höhe der gemischten Erz-Kohleschicht in dem Ofen abnahm, wurde eine zusätzliche Zwischenschicht von 1,5 kg Holzkohle chargiert. Die Chargierphase dauerte insgesamt 40 Minuten (3:20-4:00 h nach Versuchsbeginn). Nach der Erzchargierung wurden noch 3 kg Holzkohle chargiert, um die nötigen Temperaturen im Ofenraum für eine längere Zeit zu gewährleisten und dem Verhüttungsprozess mehr Zeit zu geben. Dabei wurde 4:30 h nach Versuchsbeginn zum letzten Mal Kohle chargiert.

In Abbildung 8 sind vier der aufgenommenen Temperaturkurven aus dem vorderen Teil des Ofens wiedergegeben. Es fällt auf, dass mit dem Beginn der Erzchargierung die Temperaturen tendenziell absinken, aber auch noch lange nach der letzten Holzkohlezufuhr (nach 4:30 h) ein hohes Niveau beibehielten.

Interessant war die Beobachtung, dass das Chargenmaterial nur in unmittelbarer Nähe der Ofenvorderwand reagierte; im Ofen wurden hier 1340 °C ge-

messen, es war der heißeste Bereich des Ofens. Im hinteren Teil des Ofens sanken die Temperaturen um mehrere hundert Grad ab, so dass das chargierte Material kaum verschlackt wurde und sich fast unverändert an der Ofensohle wiederfand. Im Bereich der heißen Reaktionszone wurden Vorderwand und die vorderen Bereiche der Seitenwände teilweise sehr stark durch Schlacke angegriffen. Dass sich im hinteren Bereich des Ofens und an der Sohle keine Schlacke bildete, ist mit dem archäologischen Befund vereinbar, denn in keinem Fall wurden an solchen Stellen Verschlackungen gefunden. Eine Trennung von Schlacke und Metall im Ofen fand nicht statt. Es wurde vielmehr ein schwammartiges Konglomerat mit Einschlüssen von Kupfertröpfchen erzeugt, die durch mechanische Aufbereitung ausgelesen werden mussten. Die Kupfertröpfchen waren 8-10 mm groß. Daneben konnten auch am Ofenboden kleinere Kupfertröpfchen aus der Asche ausgelesen werden. Während und nach der Chargierung des Erzes sank die Schüttung im allgemeinen nur langsam ab. Teilweise bildeten sich durch die entstehende Schlacke Hohlräume innerhalb der Schüttung.



Abb. 9: Unterer Teil des im Bau befindlichen Verhüttungs-ofens 3 in Fenan 9. Der Ofen wurde aus örtlich anstehendem, mit Stroh gehäckseltem Mergel errichtet. Anstelle der in den Wänden steckenden, horizontal verlaufenden Holzstöcke wurden beim Schmelzversuch Thermoelemente eingesetzt. An den thermisch besonders beanspruchten Bereichen der Ofenfront wurden gebrannte Tonstäbchen als zusätzliche Armierung eingebaut.

Fig. 9: Lower part of smelting furnace no. 3 during construction. It was built by straw-tempered, local marl. Wooden sticks in the front part of the furnace were replaced by thermocouples during the experiment. Note the reinforcement of this part by claysticks.

### Experimente an den originalen Ofenstandorten in Fenan

Direkt an dem Schmelzplatz Fenan 9 (zur näheren Beschreibung des Platzes siehe Hauptmann 2000) wurden im Frühjahr 1998 drei Versuchsöfen errichtet. Dies war ohne weitere Einschränkungen möglich, denn 12 Jahre nach der Ausgrabung waren jegliche archäologischen Überreste vollkommen zerstört.

Hier dargestellt wird exemplarisch ein Versuchsverlauf in Ofen 3, der an dem südwestlich abfallenden Hang des Schmelzplatzes errichtet und dessen Vorderfront mit den Windöffnungen auch in diese Richtung orientiert wurde. Zunächst wurde ein etwa 0,4 m tiefes, 0,8 x 0,8 m großes Fundament ausgehoben, in das eine 10 cm mächtige Lage kleinstückiger Schlacke (1-4 cm Ø) eingebracht wurde. Auf diese Schicht wurden flache Steine verlegt, die als Grundlage für den aus Ton bestehenden Ofenboden dienten. Der Raum zwischen Ofenrückwand und anstehendem Gestein am Hang wurde sukzessive mit Schlacken, Steinbrocken und Aushub verfüllt. Man erkennt in Abb. 9 die dem archäologischen Befund nachempfundene Rundung von Ofensole zu -rückwand. Die horizontal in die Ofenwandung eingesetzten Holzstöcke markieren die Positionen der später eingesetzten Thermoelemente.

Zum Bau des Ofens wurde Lisan-Mergel verwendet, der in der Umgebung der Siedlung von Qurayqira, etwa 12 km von Fenan entfernt, ansteht. Seine chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 1 wiedergegeben. Der Mergel wurde trocken gesiebt, mit gehäckseltem Stroh gemagert und zu einer gut formbaren Masse zubereitet, die zugedeckt mehrere Tage gut bearbeitbar blieb. Dennoch bildeten sich während des Baus des Ofens und auch später, trotz langsamen und sorgfältigen Vorheizens Risse. An den thermisch sehr stark beanspruchten Stellen innerhalb der Ofenvorderwand und den vorderen Bereichen der Seitenwände wurden als „Armierung“ dicht nebeneinander gebrannte Tonstäbchen vertikal in die Wandung eingesetzt, die aus dem Aushub der früheren Ausgrabungen der Halde entnommen wurden. Denn in den vorausgegangenen Experimenten in den Öfen 1 und 2 hatte sich der verwendete Mergel allein an diesen Stellen als nicht temperaturstabil erwiesen. Die Länge der Tonstäbchen betrug 3-8 cm.

Der fertiggestellte Ofen (Abb. 10, 11) war mit zwei Windöffnungen (10 cm Ø) im unteren Teil der Ofenfront versehen, die sich nach innen auf einen Durchmesser von etwa 4 cm verengten. Weiterhin wurde in der Mitte der Ofenfront, an der tiefsten Stelle der

Abb. 10: Im Betrieb befindlicher Verhüttungs-ofen 3 während der Experimente in Fenan. Im vorderen Bereich des Ofens sind die angebrachten Thermoelemente zu sehen.

Fig. 10: Smelting furnace no. 3 during experimental work. Note the position of the thermocouples at the front and side parts of the furnace. Two openings (left, right) served for air supply, the middle for tapping.

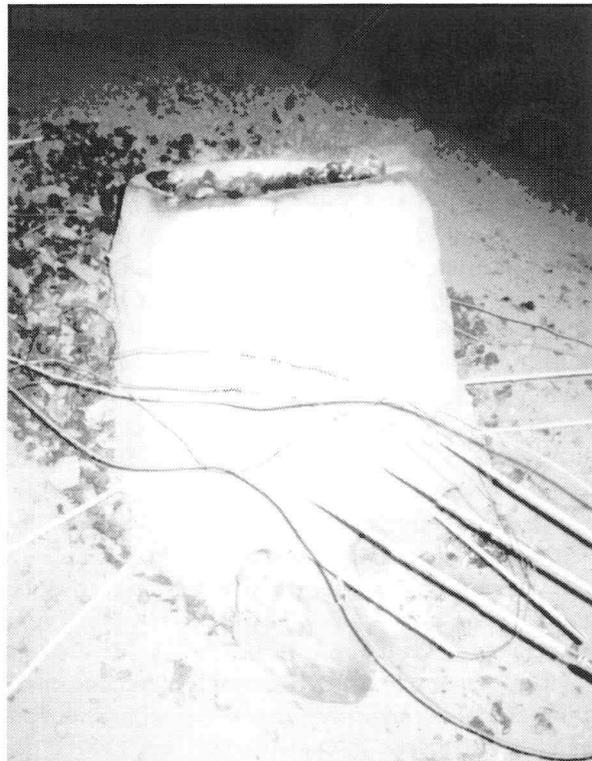
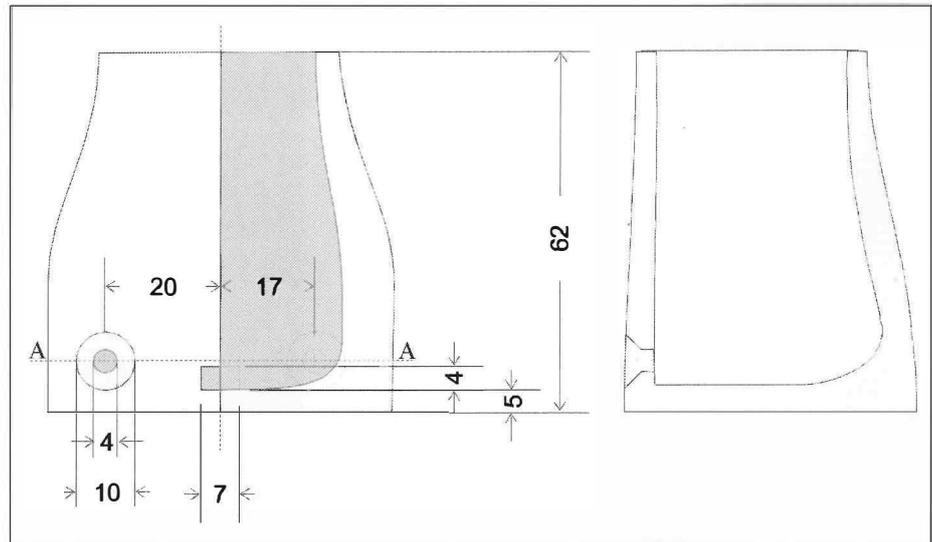


Abb. 11: Vorderansicht und Querschnitt des rekonstruierten Verhüttungs-ofens 3, wie er in Fenan zu den Schmelzexperimenten eingesetzt wurde.

Fig. 11: Front view and cross-section of reconstructed furnace no. 3 as used for smelting experiments at Feinan.



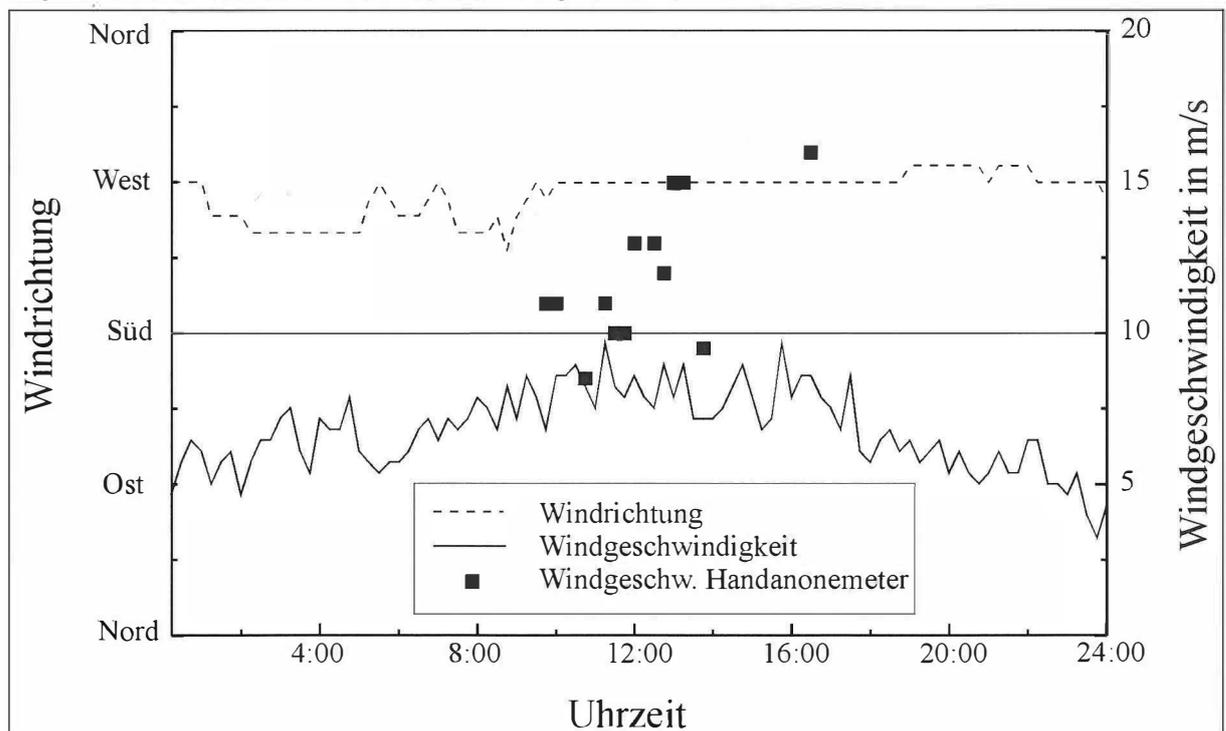
muldenförmigen Ofensole, ebenfalls sich nach innen verengend, ein Schlackenabstichloch angebracht. Der Schacht des Ofens verjüngte sich nach oben von 0,5 x 0,4 m auf 0,35 x 0,3 m, ebenso die Dicke der Ofenwandung, von 5-7 cm im unteren auf ca. 3 cm im oberen Teil. Der Vergleich der Ofenkonstruktion (Abb. 11) mit dem archäologischen Befund (Abb. 2, 3) zeigt, dass Grundriss und Form der originalen Ofen-

sole in die Rekonstruktion integriert war. Der aufgehende Schacht mit den Wind- und Abstichöffnungen wurde jedoch nach den Erfahrungswerten der vorangegangenen Versuche gestaltet.

In Abbildung 12 sind die Windverhältnisse am Standort des Ofens 3 zusammengefasst, die am 18. März 1998 aufgenommen wurden. Sie wurden mit zwei

Abb. 12: Windverhältnisse in Fenan 9 vom 18. März 1998. Die kontinuierliche Windmessung erfolgte mit Hilfe von zwei Messinstrumenten in Höhe von 30 cm über dem Boden. Zusätzlich wurden punktuelle Messungen mit einem tragbaren Schalenkreuzanemometer in einer Höhe von etwa 50 cm direkt neben dem Verhüttungs-ofen durchgeführt (schwarze Punkte). Dabei ergaben sich deutlich höhere Windgeschwindigkeiten.

Fig. 12: Windspeed and -direction measured during March 18, 1998 at the smelting site Feinan 9. Measurements by two anemometers. In addition, measurements were carried out by a mobile anemometer next to the smelting furnace in a height of about 0,5 m (black dots). These pointed to higher wind speeds.



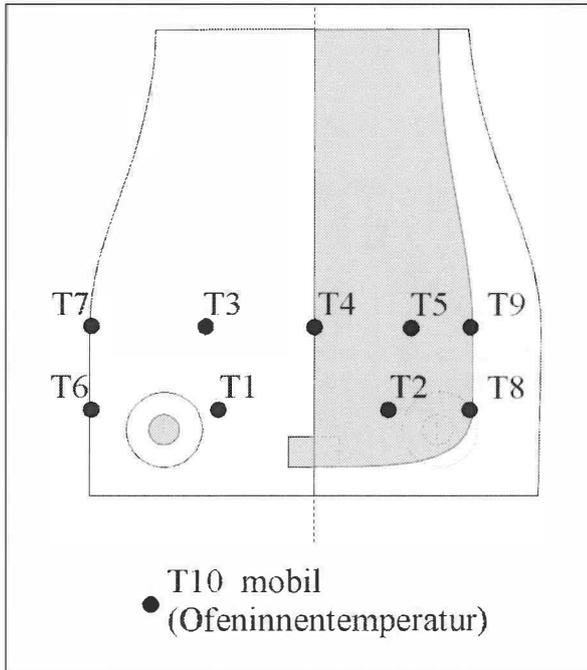


Abb. 13: Schematische Darstellung des Verhüttungsofens 3 mit den Positionen der Thermoelemente (T6-T9 befinden sich 13 cm in die Zeichenebene versetzt).

Fig. 13: View of furnace no. 3 (front side) showing the position of 9 thermocouples. T6 to T9 are approximately 13 cm below the plan view. Thermocouple no. 10 was used to measure temperatures at different spots inside the furnace.

Anemometern gemessen, die etwa 30 cm über dem Boden aufgestellt wurden. An diesem Tag herrschten auffallend starke Winde, die mehrere Stunden anhielten und Windgeschwindigkeiten von 10-14 m/s erreichten. Zusätzliche punktuelle Messungen mit einem tragbaren Schalenkreuzanemometer in einer Höhe von etwa 50 cm direkt neben dem Verhüttungsofen ergaben sogar noch höhere Werte; in Böen wurden auch bis zu 20 m/s gemessen (nicht verzeichnet in Abb. 12). Die Windrichtung von Westen blieb weitgehend konstant.

Im Folgenden wird als ein Beispiel ein Experiment beschrieben, das in Ofen 3 am 19. März 1998 durchgeführt wurde. Insgesamt wurden für diesen Versuch 41 kg Holzkohle benötigt, davon 31 kg zum Vorheizen und zur Erzeugung eines glühenden Holzkohlebetts, das den gesamten Ofenschacht füllte. Dies war 3:15 h nach Versuchsbeginn abgeschlossen. Erst sechs Stunden nach Versuchsbeginn konnte jedoch aufgrund der Windbedingungen Erz chargiert werden. Der Ofen war auf 240 °C ausgerichtet, so dass er südwestliche Winde ideal nutzen konnte, wie sie zu Beginn des Versuches vorherrschten. Die Windrichtung änderte sich allerdings dann auf West und später auf Nordwest. Darüber hinaus ließ der anfangs für die Verhüttung durchaus ausreichende Wind (Windge-



Abb. 14: Ofen 3 während des Schmelzversuchs am 20. März 1998. Zu den Tätigkeiten während des Verhüttungsvorgangs zählte auch das Entfernen von Schlacke vor der Abstich- bzw. den Windöffnungen. Zu beachten ist die Flamme entlang der Ofenfront.

Fig. 14: Furnace no. 3 during the experimental run at March 20, 1998. During smelting, tapping- and wind- holes had to be cleaned continuously from solidified slag. Note the flame at the front of the furnace.

schwindigkeiten ca. 4-5 m/s) immer mehr nach und flaute zeitweise ganz ab. Bei diesen ungünstigen Windbedingungen konnte der Ofen nicht ausreichend erwärmt werden. Nach sechs Stunden frischte der Wind jedoch auf (Windgeschwindigkeiten ca. 10 m/s) und der Ofen erreichte die für die Verhüttung notwendigen Temperaturen, obwohl die herrschende Windrichtung für den Ofen nicht optimal war.

Abb. 15: Zustand des Verhüttungsofens 3 nach dem Experiment. Auf dem Bild erkennbar ist eine leichte Rissbildung, nicht jedoch die thermische Zersetzung der Ofenfront im Inneren des Ofens.

Fig. 15: Smelting furnace no. 3 after the experiment. The furnace wall made of marl is slightly damaged by cracks, in the front part, and inside the marl is partly molten.

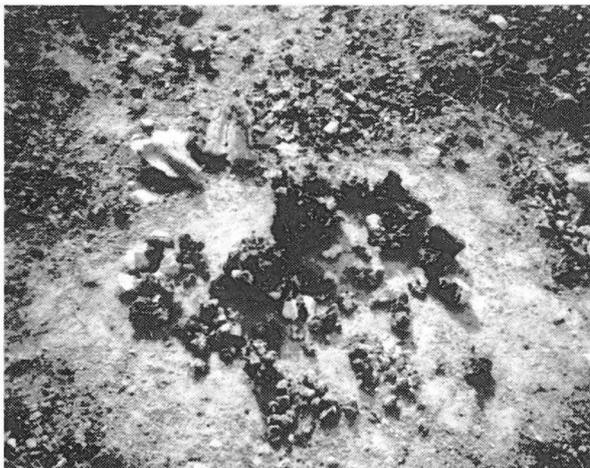


Während des gesamten Schmelzversuchs wurden vor allem im vorderen Bereich des Ofens, im direkten Umfeld der Windöffnungen neun Thermoelemente fest installiert (Abb. 13), zudem wurden mit einem mobilen Thermoelement die Temperaturen innerhalb des Ofenraums gemessen. Nach der von mehreren windstillen Perioden unterbrochenen Vorheizphase wurden während des Chargierens in der Ofenwandung Temperaturen  $> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , z.T. sogar  $> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  gemessen. Die Temperaturen im Ofeninnenraum lagen mit rund  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  erheblich darüber. Der Spitzenwert betrug  $1340\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Für den Versuch wurde oxidisches Kupfererz eingesetzt, das an Erzausbissen in der Umgebung aufgesammelt wurde. Trotz händischer Auslese erreichte das Erz nur einen  $\text{Cu}_2\text{O}$ -Gehalt von 7,4 Gew.% (Tab. 1). Aus den Untersuchungen der archäologischen Schlacken geht hervor, dass das Kupfererz gemeinsam mit dem verwachsenen Manganerz chargiert wurde und somit eine unbeabsichtigte Zugabe von Manganerz als Flussmittel erfolgte. Um eine derartige Verwachsung und schließlich eine Mangansilikatschlacke zu erhalten, wurde das vorliegende Erz ebenfalls mit Manganerz im Verhältnis von 1:1 gemischt. Hierfür wurde in einer Manganmine im Wadi Dana, etwa 5 km vom Ofenstandort entfernt, Manganerz aufgesammelt. Die Erzbrocken wurden auf Nussgröße zerkleinert und mit dem Kupfererz gemischt. Sobald der Ofen auf Betriebstemperatur erhitzt war, wurde in einem zeitlichen Abstand von 5 Minuten das Erz in einzelnen Schichten 5-10 cm nahe der Ofenfront chargiert und anschließend mit Holzkohle abgedeckt. Danach wurden sukzessive noch weitere 4 kg Holzkohle zugegeben, um über einen längeren Zeitraum die er-

*Abb. 17: Schmelzexperiment in Ofen 3 vom 20. März 1998: nur ein Teil der produzierten Schlacke lief im flüssigen Zustand aus dem Ofen ab.*

*Fig. 17: Smelting experiment in furnace no. 3, March 20, 1998: The slag produced reached only partially the fully liquid state.*



*Abb. 16: Vorderansicht des VerhüttungsOfen 3 nach dem Experiment. An der Ofenfront haben sich Risse gebildet, durch die z.T. Falschluf ins Innere des Ofens gelangte.*

*Fig. 16: Front view of smelting furnace no. 3 after the experiment. Cracks affected the front part and partly caused uncontrolled air access into the furnace.*

forderlichen Temperaturen zur Umsetzung und Verschlackung der Charge zu gewährleisten. Sieben Stunden nach Versuchsbeginn wurde zum letzten Mal Holzkohle chargiert. Die Abbildungen 14-17 sollen einen Einblick in die Bedingungen während und nach den Versuchen ermöglichen.

## Diskussion der Versuchsergebnisse

Insgesamt lassen sich zu den Versuchen in Fenan, auch im Vergleich mit den Experimenten im Aacheener Windkanal, folgende Aussagen treffen:

Grundsätzlich ist es möglich, in Schmelzöfen, die nach dem archäologischen Befund von Fenan 9 rekonstruiert wurden, mit natürlichem Wind Temperaturen und eine Gasatmosphäre zu erreichen, die für eine Verhüttung von oxidischem Kupfererz erforderlich sind. Damit ist die von Hauptmann & Roden (1988) formulierte Hypothese einer frühbronzezeitlichen Verhüttung von Kupfererzen ohne Einsatz von Blasebälgen und Düsen, allein unter Ausnutzung der lokalen Windverhältnisse für das Gebiet von Fenan erbracht. Gleichzeitig sind die von Rothenberg (1990) und Rothenberg & Shaw (1990) vorgebrachten Bedenken entkräftet. Die bei den Versuchen beobachteten Unre-

gelmäßigkeiten beruhen z.T. auf der Wetterabhängigkeit dieser Öfen und bestätigen die Vermutung Weisgerbers (1994): „Man nutzte die jahreszeitlichen Starkwinde zum Erreichen der Temperaturen und konnte so – dem gestiegenen Bedarf entsprechend – größere Metallmengen produzieren, war aber von den jeweiligen Wetterverhältnissen abhängig. So manche Ofenreise wird durch plötzlich nachlassenden Wind daneben gegangen sein. Das ist auch aus der Zusammensetzung der Schlacken abzulesen.“

In allen Versuchen wurden innerhalb der Öfen stark schwankende Temperaturen gemessen und es zeigte sich, dass nur im Bereich der Ofenfront die für eine Verhüttung erforderlichen Reaktionen abliefen. Im hinteren Bereich des Ofens eingesetztes Material wurde auf rund 700-800 °C erhitzt, es bildete sich aber keine Schlackenschmelze. In diesem Zusammenhang erscheint die sorgfältig ausgearbeitete Rundung der Ofenrückwand, so wie sie sich in den archäologischen Funden darstellt, überflüssig, es besteht keine Notwendigkeit, dies als charakteristisches Konstruktionsmerkmal bei den Rekonstruktionen zu übernehmen. Die abgerundeten Formen der Ofensohle bzw. -rückwand in Fenan 9 lassen sich vielleicht damit erklären, dass die Schmelzöfen wiederholt an derselben Stelle wieder aufgebaut wurden, wobei die bestehenden Reste immer wieder integriert wurden. Vom technischen Standpunkt ist lediglich hervorzuheben, dass dies eine zusätzliche Isolation des Ofenraums darstellte und zu einer Einengung des (für die Verhüttung ohnehin nicht notwendigen) hinteren Ofenraums führte.

Im Bereich der heißen Reaktionszone verschlackten die Vorderwand und die vorderen Bereiche der Seitenwände sehr stark und es kam bei den Experimenten sogar zu einer Aufschmelzung des Mergels, der mit der entstehenden Schlacke der Charge reagierte. Dagegen konnten – in Übereinstimmung mit dem archäologischen Befund – an der Rückwand und dem Boden des Ofens keinerlei Verschlackung festgestellt werden. Während also die rückwärtigen Ofenpartien und die Ofensohle kaum in Mitleidenschaft gezogen wurden, musste die Ofenfront nach jedem Versuch in erheblichem Umfang ausgebessert werden. Aus den Funden von stark vitrifiziertem Ofenbruch an den frühbronzezeitlichen Schmelzplätzen ergibt sich die Vermutung, dass auch den alten Hüttenleuten kein ausreichend refraktäres Baumaterial zur Verfügung stand. Sie hatten ebenfalls mit dem Problem des „partiellen Schmelzens“ der Ofenwand zu kämpfen. Wir gehen deshalb davon aus, dass bei jedem Verhüttungsgang der Ofen aufgrund der starken Beschädigung zum Teil zerstört wurde, was zusätzlich die Entnahme von Schlacke und Kupfer erleichtert haben mag.

Das ungewöhnlich starke Aufschmelzen der Ofenfront bei unseren Experimenten führte zur Überle-

gung, die Tonstäbchen als zusätzliche Armierung in die Wandung einzusetzen und so durch einen „Verbundwerkstoff“ deren Feuerbeständigkeit zu erhöhen. Tatsächlich wurden hierdurch sowohl Rissbildung als auch Abschmelzen verringert; die Experimente belegen hiermit zumindest eine sinnvolle Verwendungsmöglichkeit dieser bislang nicht befriedigend zu erklärenden Tonstäbe. Die anfangs von Mergel umschlossenen Tonstäbchen waren nach dem Versuch teilweise freigelegt und zeigten sporadisch Verschlackungen. Auch diese Beobachtungen stimmen mit dem archäologischen Befund überein, nach dem durchaus auch verschlackte Tonstäbchen gefunden wurden.

Eine Trennung von Schlacke und Metall im Ofen konnte in keinem Experiment erreicht werden. Die eingesetzte Charge wurde größtenteils zu einem partiell verflüssigten „Schlackenkonglomerat“ umgesetzt, das eingeschlossene Kupfertröpfchen enthielt. Gelegentlich bildete sich flüssige Schlacke („Laufschlacke“), die jedoch schon im Bereich der Windöffnungen erstarrte. Die „Schlackenkonglomerate“ ähnelten denen von Fenan 1 aus römischer Zeit. Die erforderliche mechanische Trennung von Kupfer und Schlacke erwies sich als recht aufwendig, wobei die Kupferausbeute in den Windkanalversuchen größer war als bei den Feldversuchen. Vermutlich wurde hier zu geringhaltiges Erz eingesetzt.

Die deutlichste Parallele zu den frühbronzezeitlichen Windöfen von Fenan stellen mittelalterliche Eisenverhüttungsöfen dar, die in Samanalawewa auf Sri Lanka gefunden wurden (Juleff 1996). Die archäologischen Ausgrabungen und anschließende experimentelle Arbeiten zur Simulation der Eisengewinnung führten zu vergleichbaren Ergebnissen in nahezu allen Details. Wie in Fenan wurden nur die Rückwände der Öfen gefunden, die Reaktionszone war auf den Bereich der (stark vitrifizierten) Ofenfront beschränkt, das eingesetzte Erz wurde nur z.T. umgesetzt, der Abstand von Ofenfront zur Rückwand war vergleichsweise gering, die Höhe der Öfen nicht über 1 m. Die Schmelzöfen von Samanalawewa waren lediglich z.T. breiter angelegt (bis zu 2 m).

### **Anhang: Materialanalytische Untersuchungen an Erz und Schlacken**

#### *Manganreiche Kupfererze und -schlacken*

Der weitaus größte Teil der Erzlagerstätte von Fenan liegt in Form einer flözartigen Vererzung in der Dolomit-Kalk-Tonsteinfohle (DLS) vor, die in der Frühbronzezeit abgebaut wurde. Diese Vererzung erreicht eine Mächtigkeit von 1-2 m und ist mit Manganoxiden verwachsen. Die Zusammensetzung dieser Ver-

Tab. 1: Chemische Zusammensetzung der im Windkanal eingesetzten Erze aus Fenan (1, 2, 3a, 3b, Pickproben), sowie die Mittelwerte von drei bzw. vier Schlacken aus drei Versuchen (4, 5, 6). Zum Vergleich ist das Mittel der chemischen Zusammensetzung von fünf frühbronzezeitlichen Schlacken aus Fenan (7 FBZ) angegeben.

Tab. 1: Chemical composition of ores used for smelting experiments in the wind tunnel (1, 2, 3a, 3b, hand-sized specimens), and of slags produced in three experiments (4, 5, 6, averages of 3 to 4 samples). For comparison, the average composition of 5 Early Bronze Age smelting slags from Feinan 9 is shown (7 FBZ).

[Gew. %]	1 Erz	2 Erz	3a Erz	3b Erz	4 Schlacke	5 Schlacke	6 Schlacke	7 Schlacke FBZ
SiO <sub>2</sub>	45,1	15,2	22,3	21,7	38,4	40,9	27,7	31,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,61	2,51	3,29	2,84	7,61	6,2	4,24	5,00
TiO <sub>2</sub>	0,15	0,15	0,17	0,17	0,35	0,4	0,29	0,23
FeO	1,93	1,88	1,81	1,90	3,12	2,9	2,43	2,80
MnO	6,12	17,5	15,1	15,0	8,95	22,7	18,5	28,5
MgO	1,13	0,98	1,25	1,22	3,25	2,0	2,30	3,0
CaO	3,02	7,00	14,3	13,8	8,02	5,5	12,8	11,9
BaO	3,08	1,63	0,95	0,99	2,06	2,4	1,09	3,1
Na <sub>2</sub> O	0,75	0,11	1,21	1,31	0,47	1,5	1,37	0,40
K <sub>2</sub> O	0,34	0,51	1,43	1,52	2,94	1,7	2,07	1,75
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,06	3,96	7,44	7,81	2,27	1,1	8,17	3,2
Cu <sub>2</sub> O	29,27	25,73	4,93	4,37	24,94	11,0	5,41	3,2
Summe	101,1	77,9	74,5	73,1	-	-	-	-

erzeugung brachte für die frühe Metallgewinnung in Fenan mehrere Vorteile mit sich:

- Durch das Fehlen von sulfidischen Bestandteilen war prinzipiell eine Verhüttung in einem einstufigen Prozess möglich, da der Röstvorgang entfiel.
- Durch die starke Verwachsung mit Mangan ergab sich ein selbstgehendes Erz. Flüssige Schlacke konnte ohne Zusatz von Flussmitteln produziert werden.
- Aufgrund des sehr geringen Eisenanteils war es möglich, unter relativ schwach reduzierenden Bedingungen zu arbeiten.

Die bei der Verhüttung von Erzen erzeugten Schlacken enthalten wichtige Informationen zur Rekonstruktion archäometallurgischer Prozesse. Aus der Frühbronzezeit liegen Mangansilikatschlacken mit den Hauptkomponenten MnO (23-40 Gew.%), SiO<sub>2</sub> (28-35 Gew.%) und CaO (7-15 Gew.%) vor. Zusätzlich können noch Gehalte bis 6 Gew.% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> auftreten. Die Kupfergehalte liegen bei rund 3 Gew.%. Der mineralogische Phasenbestand umfasst im wesentlichen Tephroit (Mn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>). Im Gegensatz zu den weit verbreiteten Schlacken mit dem Hauptbestandteil Fayalit (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) treten Mangansilikatschlacken in der Archäometallurgie eher selten auf. Eine Gegenüberstellung der Zusammensetzungen von Erz und Schlacke ergibt, dass der Mangananteil im Erz als natürliches Flussmittel zur Bildung der Mangansilikatschlacken ausreichend war. In der frühen Bronzezeit fand außer einer händischen Auslese vermutlich keine weitere Aufbereitung der Erze statt.

Mangansilikatschlacken haben im Vergleich zu Eisensilikatschlacken in ihrem chemisch-physikalischen

Verhalten einige wichtige hüttenmännische Vorteile. Das schlackenbildende MnO ist wesentlich unempfindlicher gegenüber Schwankungen der beiden wichtigsten Parametern alter Hüttenprozesse – Sauerstoffgehalt in der Gasatmosphäre und Temperatur – als das vergleichbare Eisenoxid (Hauptmann 2000). Zum einen wird es erst bei so niedrigen Sauerstoffpartialdrücken zum Metall reduziert, dass eine metallische Ausscheidung von Mangan unter den damals möglichen Betriebsbedingungen nicht stattfinden konnte, zum anderen ist die Bildung von Mangansilikatschlacken sogar noch unter Zutritt von Luft möglich. Beide Eigenschaften waren bei den damals unvermeidlichen, betriebsbedingten Störungen von großer Bedeutung.

### Die Versuche im Windkanal

Es erscheint zweckmäßig, die analytischen Untersuchungen in zwei Abschnitte zu gliedern und sie den Versuchen im Windkanal und den Feldversuchen zuzuordnen. Denn bei den jeweiligen Experimenten wurden unterschiedliche Ausgangsstoffe und Baumaterialien für die Öfen verwendet, zudem waren diese unterschiedlich konstruiert.

Bei den Versuchen im Windkanal in Aachen wurde oxidisches und silikatisches Kupfererz aus der DLS aus Fenan verwendet, das jedoch einer vergleichsweise manganarmen Partie der Vererzung entnommen worden war (Tab. 1). Einzelne Pickproben zeigten schwankende Zusammensetzungen (SiO<sub>2</sub> 15-45 Gew.%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2,5-8,6 Gew.%, CaO 3-14 Gew.%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

1-8 Gew.%), die nicht nur die Variationsbreite der Erze aus diesem Bereich der Lagerstätte wiedergeben, sondern auch die der frühbronzezeitlichen Schlacken erklären. Um wie in der Frühbronzezeit manganreiche Schlacken zu produzieren, wurde Manganoxid ( $\text{MnO}_2$ ) in Form von pulverigem Pyrolusit zugesetzt. Hierdurch sollte eine möglichst niedrigschmelzende, tephroitisches Schlacke erzeugt werden. Trotzdem wurden in den experimentell erzeugten Schlacken nicht die  $\text{MnO}$ -Konzentrationen der archäologischen Schlacken erreicht (Tab. 1). Es stellte sich heraus, dass sich die Pelletierung des Erzes ungünstig auf die Schlackenbildung auswirkte: diese waren porös, heterogen und nur in Kleinbereichen verflüssigt worden. Es hatten sich nur wenig Kupfertröpfchen gebildet, ein großer Teil verblieb als Cuprit ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) in der Schlacke.

Eine befriedigende Separation zwischen Metall und Schlacke im flüssigen Zustand wurde nicht erreicht. In der Regel konnte man nach den Experimenten zwar kleine Kupferkügelchen in der Asche aussortieren, der überwiegende Teil des Kupfers war aber nicht von der Schlacke zu trennen, so dass Kupfergehalte bis über 25 Gew.% anfielen. Diese Kupfergehalte sind wesentlich höher als die in den frühbronzezeitlichen Schlacken aus Fenan (s.o.), in denen maximal etwa 8 Gew.% gemessen wurden (Hauptmann 2000). Vermutlich wurde in diesen das Metall in prähistorischer Zeit mechanisch herausgearbeitet.

#### Feldversuche

Die bei den Feldversuchen eingesetzten Erze und Schlacken konnten erst nach Abschluss der Kampagne in Deutschland analysiert werden, so dass bei diesen Versuchen nicht von vornherein optimale Chargierungen vorgenommen werden konnten. Die analytischen Untersuchungen des verwendeten Kupfer- und Manganerzes ergaben einige überraschende Ergebnisse, welche die durchgeführten Versuche in einem anderen Licht erscheinen lassen. Die chemischen Analysen für die in den Feldversuchen verwendeten Ausgangsmaterialien und produzierten Schlacken sind in Tabelle 2 wiedergegeben.

Das für die Versuche verwendete Erz unterscheidet sich in seiner chemischen Zusammensetzung deutlich von dem im Windkanal eingesetzten, obwohl es ebenfalls aus der DLS entnommen wurde. Mit etwas mehr als 7 Gew.% ist es z.B. sehr viel ärmer an  $\text{Cu}_2\text{O}$  als das in den ersten beiden Windkanalversuchen eingesetzte Erz. Der  $\text{SiO}_2$ -Gehalt des Erzes liegt über 70 Gew.%.  $\text{MnO}$  ist nur in Spuren vorhanden. Da das zusätzlich chargierte Manganerz mit etwa 40 Gew.% ebenfalls einen hohen  $\text{SiO}_2$ -Gehalt aufweist und nur zu etwa 40 Gew.% aus  $\text{MnO}$  besteht, ergibt sich eine Chargenzusammensetzung, die einen zu hohen Anteil an  $\text{SiO}_2$  aber zu wenig  $\text{MnO}$  enthält.

Tab. 2: Chemische Zusammensetzung der in den Windofenexperimenten in Fenan eingesetzten Erze, des für den Ofenbau verwendeten Mergels und einer repräsentativen Schlacke. Die Zusammensetzung der Schlacke variierte sehr stark. Der Kupfergehalt ist in  $\text{Cu}_2\text{O}$  angegeben, da ein großer Teil des Kupfers in Form von Cuprit in den Schlacken vorlag.

Tab. 2: Chemical composition of ore, slag, and the marl used for furnace construction at Fenan. In general, the composition of slags showed a large range of variations. Due to the presence of cuprite, the copper concentration is given as  $\text{Cu}_2\text{O}$ .

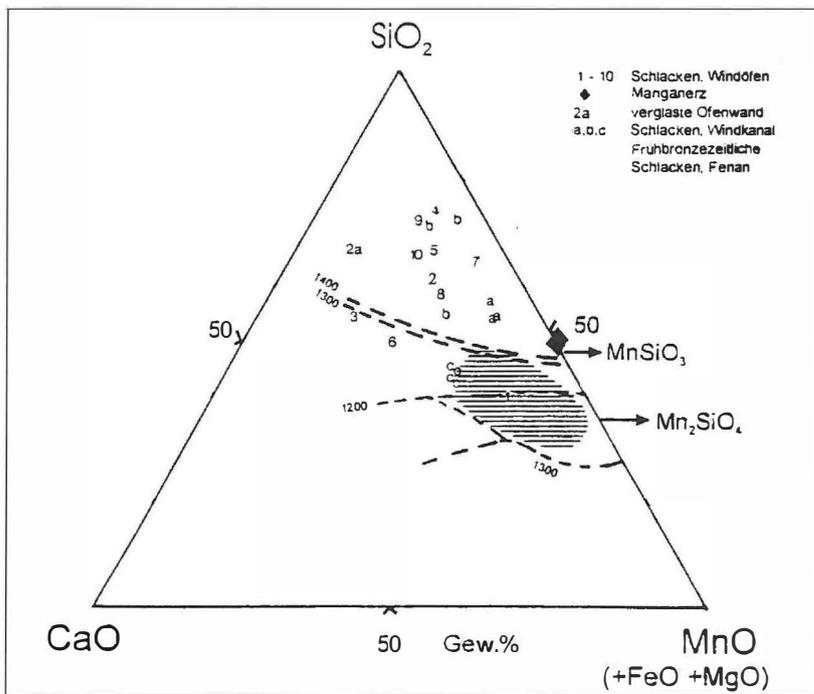
	1 Mergel	2 Mn-Erz	3 Cu-Erz	4 Schlacke
[Gew. %]				
$\text{SiO}_2$	37,6	40,1	71,4	46,3
$\text{Al}_2\text{O}_3$	6,38	5,82	3,16	6,49
$\text{TiO}_2$	0,44	0,26	0,09	0,31
$\text{FeO}$	3,16	1,26	0,40	1,66
$\text{MnO}$	0,03	40,2	0,29	18,1
$\text{MgO}$	2,69	1,04	0,46	1,84
$\text{CaO}$	20,1	0,47	4,55	11,2
$\text{BaO}$	0,02	3,54	1,12	2,44
$\text{Na}_2\text{O}$	1,02	1,10	0,10	0,48
$\text{K}_2\text{O}$	0,94	2,33	1,35	3,32
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,17	<0,01	0,70	3,35
$\text{Cu}_2\text{O}$	0,013	3,53	7,44	4,66
Summe	72,6	99,7	91,1	100,2

Die Auswirkungen dieser Charge auf die Schlackenbildung werden in Abbildung 18 deutlich. Überträgt man die auf die Hauptkomponenten reduzierte Zusammensetzung der frühbronzezeitlichen Schlacken in das Dreistoffsystem  $\text{CaO-SiO}_2\text{-MnO(+FeO+MgO)}$ , gruppieren sie sich in einem niedrigschmelzenden Bereich, der in etwa dem Liquidusfeld Mn-reicher Olivine entspricht. Das bedeutet, dass sich hier im Bereich von 1150 und 1300 °C Schlackenschmelzen gebildet haben. Im Gegensatz hierzu plotten fast alle Schlacken aus den Schmelzversuchen in einen Bereich, in dem eine Verflüssigung der Charge theoretisch erst in einem Temperaturbereich weit über 1400 °C möglich ist. Dass diese Temperaturen überhaupt nicht erreicht wurden, geht nicht nur aus den entsprechenden Messungen während der Experimente hervor. Gefügeanalysen und Diffraktometeraufnahmen belegen, dass die Schlacken fast regelmäßig erhebliche Volumenanteile an unzersetztem Quarz aus der Charge enthalten. Diese ist demnach überhaupt nur partiell verflüssigt worden, wobei lediglich aus eutektisch zusammengesetzten Teilbereichen geringe Anteile an Schmelzen tephroitischer Zusammensetzung entstanden sind, die als Fließschlacke aus dem Ofen entfernt werden konnten.

Auffallend sind die teilweise extrem hohen  $\text{CaO}$ -Gehalte der Schlacken aus den Schmelzversuchen.

Abb. 18: Projektion der bei den Feldversuchen produzierten Schlacken im ternären System CaO-SiO<sub>2</sub>-MnO (+FeO+MgO). Nur einige Schlacken innerhalb des gestrichelten Bereichs (entsprechend den frühbronzezeitlichen Schlacken von Feinan) haben sich in einem relativ niedrigen Temperaturbereich gebildet. Die meisten der Proben zeigen sehr hohe SiO<sub>2</sub>-Gehalte. Hier handelt es sich lediglich um verschlackte Charge, die sich nicht (vollständig) verflüssigt hat.

Fig. 18: Slags from field experiments in the ternary system CaO-SiO<sub>2</sub>-MnO(+FeO+MgO). Samples within the hatched field (representing the composition of Early Bronze Age slags) are the only which correspond to eutectic compositions. Most of the slags are extremely high in SiO<sub>2</sub>. These are partially slagged ore which did not reach the fully liquid state.



Sie erreichen gelegentlich über 20 Gew.% und liegen damit erheblich über dem des eingesetzten Kupfer- und Manganerzes (4,55 bzw. 0,47 Gew.%). Die hohen CaO-Gehalte der Schlacken sind auf eine partielle Resorption der Ofenwandung zurückzuführen (vgl. Tab. 2), auf die schon bei der Beschreibung der Schmelzversuche hingewiesen wurde. Bemerkenswert ist, dass dies vollkommen dem archäologischen Befund

entspricht: an fast allen Schmelzplätzen der Frühbronzezeit sind erhebliche Mengen verschlackter keramischer Ofenwandung zu finden.

Dementsprechend konnte auch der vergleichsweise geringe Anteil an Kupfer kaum von der Schlacke getrennt werden. Die Auswertung von Anschliffen ergab kleine, feinverteilte Tröpfchen, die meist mit Cuprit verwachsen waren (Abb. 19) und ähnlich wie die

Abb. 19: Schlacke aus den Feldversuchen. Das Gefüge zeigt eine nur partielle Verflüssigung der Charge. Kupfertropfen (hell) sind unterschiedlich groß ausgebildet. Die kleineren sind feinverteilt und mit Cuprit vergesellschaftet. In diesem Bereich ist ein hohes Porenvolumen zu beobachten (dunkle Kreise). Anschliff, Ölimmersion. Deutsches Bergbau-Museum.

Fig. 19: Slag produced during the field experiments at Feinan. It shows only partially liquified ore. Note copper prills (white) embedded in a rather porous (dark holes) glassy matrix and intergrown with cuprite. Mounted sample, Deutsches Bergbau-Museum.

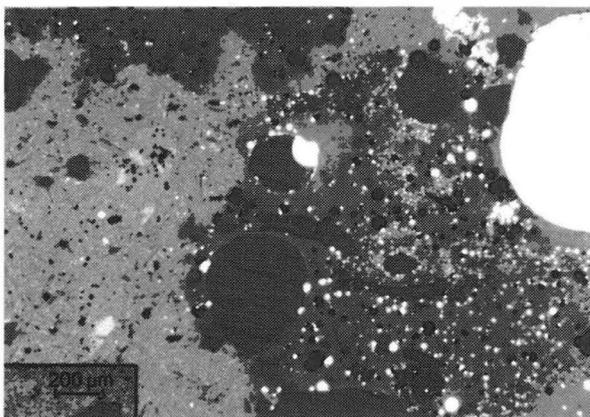
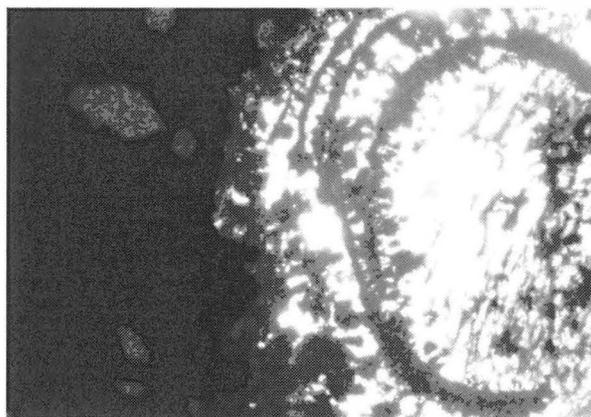


Abb. 20: Schlacke aus Ofen 3: Inhomogenes Gefüge unvollständig zersetzter Charge. Manganerz (links, schwarz) und Cuprit (rechts), der der Probe ein kirschrotes Aussehen verlieh. Dünnschliff, RWTH-Aachen (Förster 1999).

Fig. 20: Slag from furnace no. 3: Inhomogeneous texture of a nearly incomplete decomposed fragment of ore. Manganese oxide (left, black) and cuprite (right) which macroscopically caused the dark red colour of the sample. Thin section, RWTH Aachen (Förster 1999).



frühbronzezeitlichen Schlacken eine eher schwache Reduktion während der Prozessführung belegten. Diejenigen Bereiche, in denen Kupfer vorkam, zeichneten sich durch ein sehr großes Porenvolumen aus. In den Randbereichen waren Nester von Spinell, Cuprit und Delafossit zu beobachten (Abb. 20).

Die Dünnschliffuntersuchungen wurden durch die Röntgenbeugungsanalysen bestätigt. Abbildung 20 gibt ein Beispiel der Schlacken aus dem Ofen 3.

## Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Ofen-Prozess zur Kupfergewinnung in der Bronzezeit vorgestellt. Aufgrund vorliegender archäometallurgischer Funde und Befunde ergab sich die Vermutung, dass die frühesten metallurgischen Öfen ausschließlich auf der Grundlage natürlicher Luftzufuhr gearbeitet hatten (sogenannte Windöfen). Anhand des Bergbau- und Verhüttungsgebietes von Fenan, in dem eine große Anzahl gut erhaltener und archäologisch genau untersuchter Fragmente von frühbronzezeitlichen Schmelzöfen in exponierter Geländelage vorliegt, wurde der Frage nach dem Arbeitsprinzip von Windöfen nachgegangen.

Für einen nur mit natürlichem Wind betriebenen Ofentyp sind die sich einstellenden Strömungsverhältnisse von entscheidender Bedeutung. Deswegen wurden mit Hilfe eines topographischen Geländemodells die Strömungsverhältnisse an den einzelnen Ofenstandorten im Windkanal untersucht und das Strömungsverhalten in dem und um den Ofen im Rechner simuliert. In diesem Zusammenhang wurden Ofenkonzepte an der RWTH-Aachen entwickelt, die die archäologischen Ergebnisse mit den feuerungstechnischen Erfordernissen verbanden. Der pyrometallurgische Verhüttungsvorgang wurde an Ofenmodellen in Originalgröße rekonstruiert, wobei die Experimente zunächst in einem Windkanal und anschließend an frühbronzezeitlichen Schmelzplätzen mit originalen Bau- und Einsatzmaterialien im Gebiet von Fenan, Jordanien, durchgeführt wurden.

Auf der Grundlage der erfolgten Untersuchungen ergab sich als Fazit, dass die Gewinnung von Kupfer aus seinen oxidischen Erzen in nur mit natürlichem Wind betriebenen Öfen möglich ist und diese Art der Verhüttung in einem über das Gebiet von Fenan hinausragenden Rahmen verbreitet war. Die für eine Verhüttung notwendigen Temperaturen wurden mit Hilfe von natürlichem Wind erzeugt, teilweise sogar überschritten. Kupfer konnte reduziert werden und aus dem Ofen fließende Schlacke wurde produziert. Die Auswahl der Ofenstandorte richtete sich nach den vorliegenden Windverhältnissen. An den Ofenstandorten wurden Strömungsprofile gemessen, die eine

örtliche Windgeschwindigkeitserhöhung ergaben und sich dadurch positiv auf eine ausreichende Luftversorgung der Öfen während des Verhüttungsprozesses auswirkten.

Im einzelnen sind folgende Ergebnisse festzuhalten: Für einen erfolgreichen Verhüttungsverlauf müssen Windverhältnisse vorhanden sein, die in ihrer Richtung über mehrere Stunden eine annähernde Konstanz aufweisen, die der Orientierung des Ofens entspricht. Die Richtung des Windes stellte sich als wichtiger heraus als die Windstärke, da bei schwachen Windgeschwindigkeiten die Möglichkeit bestand, den Ofen bis zu einem gewissen Temperaturniveau aufzuheizen und „warmzuhalten“. Bei aufkommenden stärkeren Winden erreichte der Ofen schnell seine Betriebstemperatur und die Chargierung des Erzes konnte erfolgen. Starke Winde wurden demnach für die eigentliche Verhüttung, weniger für den Zeitraum des Aufheizens benötigt.

Der in den Versuchen verwendete, lokal anstehende Ton stellte sich als nicht ausreichend temperaturbeständig heraus, wurde während der Verhüttung partiell geschmolzen und ging in beträchtlichem Umfang in die Schlacke ein. Verglaste Bruchstücke von Ofenwand bewiesen aber, dass auch den frühbronzezeitlichen Schmelzern kein temperaturbeständiges Wandmaterial zur Verfügung gestanden hatte. Während der Experimente führte die Verwendung der zu Tausenden in den Schlackehalden vorliegenden Tonstäbchen („Ladyfinger“) als Armierung für die stark beanspruchten Stellen der Ofenwand zu einer Verringerung des Abfließens des Tons.

Die analytischen Untersuchungen ergaben, dass das in den Feldversuchen eingesetzte Erz eine für die Verhüttung ungünstige Zusammensetzung aufgewiesen hatte, obwohl es aus der in der Frühbronzezeit abgebauten Vererzung stammte. Daraus ergab sich eine dementsprechende Zusammensetzung der produzierten Schlacken, die sich von den frühbronzezeitlichen Schlacken abhoben. Die damaligen Hüttenleute mussten demnach in der Lage gewesen sein, aus der betreffenden Erzsicht diejenigen Bereiche zu erkennen, die für sie mit ihrer Technik zu verhütten waren. In diesem Zusammenhang wären weitere Experimente mit Erzen geeigneterer Zusammensetzung sinnvoll, um mit einer Ofencharge eine größere Menge Kupfer gewinnen und damit die Möglichkeiten dieser Verhüttungstechnik genauer einzuschätzen zu können.

## Danksagung

Die Arbeiten wurden durch die wohlwollende Förderung der Volkswagen-Stiftung ermöglicht, wofür an dieser Stelle der Stiftung sehr zu danken ist. Wei-

terhin sind wir dem ehemaligen Direktor des Department of Antiquities, Amman, Herrn Dr. Ghazi Bisheh und den Herren Yahya Khalid und Chris Johnson von der Royal Society for the Conservation of Nature, ebenfalls Amman, für die Unterstützung der Feldarbeiten sehr zu Dank verpflichtet. Last, but not least, gebührt Dank für vielfältige Unterstützung und Entgegenkommen dem Direktor des Deutschen Evangelischen Instituts in Amman, Herrn Dr. Hans-Dieter Bienert.

### *Anschriften der Verfasser:*

Dr.-Ing. Stephan Kölschbach, Stentenbergr. 26b, 51702 Bergneustadt

PD Dr. Andreas Hauptmann, Institut für Archäometallurgie, Deutsches Bergbau-Museum, Herner Str. 45, 44787 Bochum

Prof. Dr. Wolfgang G. J. Bunk, Am Hagen 14, 51503 Rösrath

Prof. Dr. Günther Woelk, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen, Lehrgebiet Industrieofenbau, Kopernikusstr. 16, 52056 Aachen

### *Literatur*

Castel, G., Mathieu, B., Pouit, G., El Hawari, M.A., Shaaban, G., Hellal, H., Abdallah, T. & Ossama, A. (1995): Wadi Dara Copper Mines. In: A. Feisal (Hrsg.), *Proceedings of the 1st International Conference of Ancient Egyptian Mining and Metallurgy and Conservation of Metallic Artifacts*. Ministry Cult. Cairo, April 1995, 15-31.

Förster, H. (1999): *Bericht über die Analysen der Proben aus Fenan*. Lehr- und Forschungsgebiet Mineralogie, Petrographie und Erzlagerstättenlehre. Interner Bericht RWTH Aachen.

Gale, N.H., Papastamatakis, A., Stos-Gale, Z.A. & Leonis, K. (1985): Copper Sources and Copper Metallurgy in the Aegean Bronze Age. In: P.T. Craddock & M.J. Hughes (Hrsg.), *Furnaces and Smelting Technology in Antiquity*. British Museum Occasional Papers, Number 48, 81-101.

Hauptmann, A. (2000): Zur frühen Metallurgie des Kupfers in Fenan/Jordanien: *Der Anschnitt, Beiheft 11*, Bochum.

Hauptmann, A. & Roden, C. (1988): Archäometallurgische Untersuchungen zur Kupferverhüttung der frühen Bronzezeit in Fenan, Wadi Arabah, Jordanien. *Sonderdruck aus dem Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz*, 35. Jahrgang, 510-516.

Hauptmann, A., Begemann, F., Heitkemper, E., Pernicka, E. & Schmitt-Strecker, S. (1992): Early Copper Produced at Feinan, Wadi Arabah, Jordan: The Composition of Ores and Copper. *Archaeometals* 6(1), 1-33.

Juleff, G. (1996): An Ancient Wind-Powered Iron Smelting Technology in Sri Lanka. *Nature* 379(4), 60-63.

Kölschbach, S. (1999): *Experimente zur Simulation prähistorischer Kupfergewinnung; Zur Verfahrenstechnik von Windöfen*. Dissertation, Institut für Industrieofenbau, RWTH-Aachen.

Rothenberg, B. (1990): Copper Smelting Furnaces, Tuyeres, Slags, Ingot-Moulds and Ingots in the Arabah: The Archaeological Data. In: B. Rothenberg (Hrsg.), *Researches in the Arabah 1959-1984, Vol. 2: The Ancient Metallurgy of Copper*. Inst. Archaeo-Metall. Studies, London, 1-77.

Rothenberg, B. & Shaw C.T. (1990): The Discovery of a Copper Mine and Smelter from the End of the Early Bronze Age (EB IV) in the Timna Valley. *Inst. Archaeo-Metallurgical Studies* 15/16, 1-12.

Rothenberg, B. & Glass, J. (1992): The Beginnings and the Development of Early Metallurgy and the Settlement and Chronology of the Western Arabah, from the Chalcolithic Period to Early Bronze Age IV. *Levant* XXIV, 141-157.

Weisgerber, G. (1994): Briefwechsel mit Prof. Bunk, in dem er „Zur kulturgeschichtlichen Relevanz von Windöfen“ Stellung nimmt.

### *Weiterführende Literatur*

Bachmann, H.G. & Rothenberg, B. (1980): Die Verhüttungsverfahren von Site 30. In: *Antikes Kupfer im Timna-Tal; 4000 Jahre Bergbau und Verhüttung in der Araba (Israel)*, Der Anschnitt, Beiheft 1, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums, 215-236, Bochum.

- Bachmann, H.G. (1977): Schlacken: Indikatoren archäometallurgischer Prozesse. In: W. Hennicke (Hrsg.), *Mineralogische Rohstoffe als kulturhistorische Informationsquelle*, Hagen.
- Bamberger, M. & Wincierz, P. (1990): Ancient Smelting of Oxide Copper Ore. In: B. Rothenberg (Hrsg.), *The Ancient Metallurgy of Copper - Researches in the Arabah 1959-1984*, Institute for Archaeo-Metallurgical Studies (IAMS), Institute of Archaeology, University College London.
- Fiedeler, K. G. (1841): *Reise durch alle Theile des Königreichs Griechenland*, Leipzig.
- Gerhardt, H.J. & Kramer, C. (1974): Atmosphärische Turbulenz und ihre Simulation im Windkanal. In: C. Kramer & H.J. Gerhardt (Hrsg.), *Dokumentation zum Kolloquium über Industrieaerodynamik*, Aachen.
- Hauptmann, A. (1987): Frühe Kupfergewinnung in Fenan. *Geowissenschaften in unserer Zeit* **5/5**, VCH Verlagsgesellschaft, 166-173, Weinheim.
- Hauptmann, A. (1989): The Earliest Periods of Copper Metallurgy in Feinan, Jordan. In: *Archäometallurgie der Alten Welt*, Der Anschnitt, Beiheft **2**, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums, 119-135, Bochum.
- Hauptmann, A. (1996): *Kupfer aus Fenan - Archäometallurgie eines (prä-)historischen Kupferverurs*, Vorträge der Jahrestagung der Georg-Agricola-Gesellschaft, Bochum.
- Hauptmann, A. (1997): Archäometallurgie einer alten Kupferhütte, *Der Anschnitt* **49/4**, 102-113.
- Hess, K. (1999): *Untersuchungsbericht über die Proben aus den Schmelzexperimenten in Windöfen in Fenan*, Institut für Archäometallurgie, Deutsches Bergbau-Museum Bochum.
- Ottaway, B.S. (1994): *Prähistorische Archäometallurgie*, Verlag Marie L. Leidorf, Espelkamp.
- Prange, M. & Götze, H.J. (1995): Analyse früher Kupfer- und Eisenschlacken mittels optischer Atom-spektrometrie (ICP-OES), *Metalla* **2.1**, 29-41.
- Slota, R. (1995): *Jahresbericht des Deutschen Bergbau-Museums 1994*, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums, Bochum.
- Tylecote, R.F. (1976): *A History of Metallurgy*, London.
- Woelk, G., Gelhoit, P. & Bunk, W.G.J. (1998): Reconstruction and Operation of a Bronze Age Copper-Reduction Furnace, *Der Anschnitt*, Beiheft **8**, Selbstverlag des Deutschen Bergbau-Museums, 263-277, Bochum.

**metallum, i, n:**  
Grube, Bergwerk (oft pl.);  
Metall, auch Gestein, Mineral

μεταλλον, το:  
Grube, Stollen;  
bsd. a) Bergwerk (meist pl.)  
b) Steinbruch



**DBM**

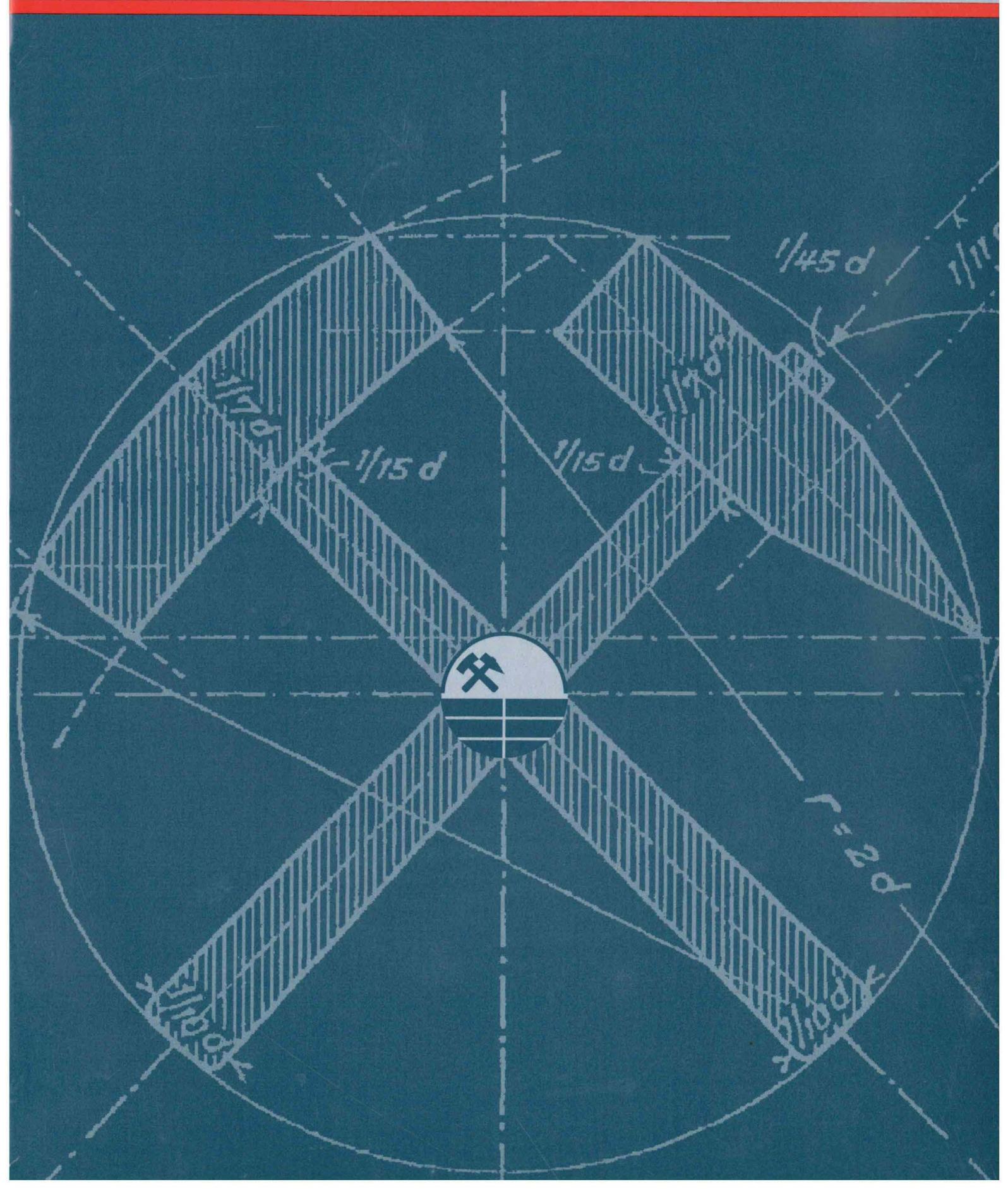
Deutsches Bergbau-Museum  
Bochum

## **Inhalt**

## **Seite**

St. Kölschbach, G. Woelk, A. Hauptmann & W.G.J. Bunk <i>Experimente zur Simulation prähistorischer Kupfergewinnung: Zur Verfahrenstechnik von Windöfen</i>	5
P. Hammer <i>Zur Gruppierung von Kupferlegierungen – Der Terminus „Aes“ bei Plinius</i>	23
Th. Rehren <i>Zur Klassifizierung und Interpretation antiker Kupferlegierungen</i>	33

# METALLA



**METALLA (Bochum)**

*Forschungsberichte des Deutschen Bergbau-Museums* erscheint in zwei Heften jährlich.

Bezugspreis DM 50,- pro Jahr incl. Porto und Verpackung, Bestellungen formlos an das Deutsche Bergbau-Museum Bochum  
Am Bergbaumuseum 28  
D-44791 Bochum

**Wissenschaftliche Beratung:**

Prof. Dr. G. Eggert, Stuttgart  
Dr. St. Fritz, Berlin  
PD Dr. A. Hauptmann, Bochum  
Dr. L. Klappauf, Goslar  
Prof. Dr. H. Leisen, Köln  
Dr. B. Ottaway, Sheffield  
PD Dr. G. Schneider, Berlin  
PD. Dr. Ü. Yalçin, Bochum

**Impressum***Herausgeber:*

Deutsches Bergbau-Museum Bochum  
Museumsdirektor: Prof. Dr. Rainer Slotta

*Schriftleiter:*

Dr. rer. nat. Michael Prange

Layout: Dipl.-Ing. Angelika Friedrich

Titelgestaltung: Dipl.-Des. Karina Schwunk

*Druck und Verarbeitung:*

DMT-LB, Bochum

**ISSN 0947-6229**