

Jahresschrift für mitteldeutsche Vorgeschichte	80	S. 263 - 304	Halle (Saale)	1998
--	----	--------------	---------------	------

Versuche im Rennofen - eine Bilanz

von Rosemarie Leineweber, Halle (Saale), und Bernd Lychatz, Freiberg/Sachsen

Der vorliegende Beitrag ist eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus zehn Jahren interdisziplinärer Zusammenarbeit auf dem Gebiet der Archäometallurgie des Eisens und spezieller experimentalarchäologischer Fragestellungen. In diesem Zeitraum wuchs das fachspezifische Verständnis des Metallurgen für die Archäologie ebenso wie das der Archäologin für die Metallurgie. Dieser Beitrag zeigt die erzielten Ergebnisse auf, soll jedoch zugleich die Verständnisebene zwischen Natur- und Geisteswissenschaften ausbauen.

Forschungsgeschichte

Seit etwa 2 500 Jahren versucht der Mensch in Mitteleuropa in einem einfach anmutenden Verfahren, im Rennofen aus Eisenerzen und Holzkohle Eisen zu erzeugen. So lieferte auch fast jeder Siedlungsplatz aus den Jahrhunderten um Christi Geburt Eisenschlackenfunde, die bisher allgemein nur wenig Beachtung erfuhren.

Grundlegenden Arbeiten von H. Beck, O. Johannsen und I. Undset¹ zur Geschichte des Eisens in Europa folgten durch K. Bielenin, F. J. Ernst, A. Espelund, H. Hingst, D. Horstmann, R. Pleiner, G. Sperl und R. F. Tylecote in den vergangenen Jahrzehnten wesentliche zusammenfassende Beiträge zur Archäometallurgie des Eisens². Verfahrenstechnische Erkenntnisse zur Rennofenschmelze beinhalteten Arbeiten von A. Espelund, B. Neumann, B. Osann und E. Schürmann³.

Im Jahre 1957 führte die Gründung des *Comités pour la Sidérurgie ancienne del' Union Internationale des Sciences Préhistoriques et Protohistoriques* alle an der Archäometallurgie interessierten Fachkollegen unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen zusammen. Eine jahrzehntelange interdisziplinäre und teilweise auch internationale Zusammenarbeit begann. Begünstigt durch die Herausgabe der "Communications" durch den langjährigen Sekretär des *Comités*, Prof. Dr. R. Pleiner, Prag⁴, war stets aktueller Informationsfluß gesichert. Nicht nur Ergebnisse archäologischer Feldforschung, sondern ebenso solche der Metallurgie oder der Metallographie und seit einigen Jahren auch die Erkenntnisse der experimentellen Archäologie erfahren durch diese periodisch erscheinenden Zusammenfassungen schnelle Verbreitung. Internationale Symposien und Workshops führten darüber hinaus zu engeren Kontakten und zum Gedankenaustausch.

In Sachsen-Anhalt beschäftigte sich W. Witter⁵ schon in den dreißiger Jahren unseres Jahrhunderts mit archäometallurgischen Fragen, die sich zumeist auf die Gewinnung und Verarbeitung von Kupfer und Bronze bezogen, jedoch in kleinerem Umfang auch der Eisenmetallurgie gewidmet waren. Er führte in einer kurzen Zusammenfassung der Eisengewinnung anhand bekannter Literatur u. a. auch einige Funde aus Mitteldeutschland auf.

Im Jahre 1964 veröffentlichte T. Voigt die erste und bislang einzige Vorlage aller Rennofen- und Schlackenfunde Sachsen-Anhalts⁶. 1989 stellte Verfasserin eine erste Ergänzung für die Altmark unter besonderer Beachtung des Fundplatzes Zethlingen, Ldkr. Salzwedel, vor⁷. Die jüngste Zusammenstellung der altmärkischen Schlacken- und Rennofenplätze aus der spätrömischen Kaiserzeit erfolgte 1997⁸. Bereits im Jahre 1989 wurde eine metallurgische Auswertung der historischen Schlacken von Zethlingen erarbeitet und 1992 auch veröffentlicht⁹.

Einen Abriß des Forschungsstandes zwischen Elbe und Oder legte unlängst A. Leube aus archäologischer Sicht dar¹⁰. Umfassende archäometallurgische Untersuchungen liefen im Rahmen von Projekten der Volkswagenstiftung auf der Schwäbischen Alb¹¹, in Schleswig-Holstein¹² und im Lahn-Dill-Gebiet¹³.

In den vergangenen Jahren erschienen auch über archäologische Versuche zur Eisen-technologie zahlreiche Veröffentlichungen, von denen u. a. die von H. Barbré und R. Thomsen, P. Crew, F. Nikulka, V. Pawliska u. a., M. Radwan und R. Pleiner, G. Sperl und H. Straube u. a. stellvertretend genannt seien¹⁴.

Die auf den Grabungsbefunden von Zethlingen basierenden und seit 1990 begonnenen Versuchsschmelzen wurden zwar vereinzelt teilveröffentlicht, mitunter aber an schwer zugänglicher Stelle¹⁵. Eine Übersicht über die gesamte Versuchsreihe, ihre mehr oder auch weniger erfolgreichen Phasen und die daraus entstandenen Erkenntnisse sollen hier zusammenfassend vorgestellt, aber auch eine Bilanz über die Ergebnisse der 25 Schmelzversuche gezogen werden¹⁶. Zugleich versuchen die Autoren in diesem Beitrag, fachspezifische Verständigungsprobleme zwischen Archäologie und Metallurgie abzubauen (s. Begriffserklärungen am Ende des Aufsatzes).

Grabungsergebnisse

Die archäologischen Kenntnisse zur Eisengewinnung während der spätrömischen Kaiserzeit in der Altmark gehen vor allem auf den bei Zethlingen, Ldkr. Salzwedel, seit dem Jahre 1980 teiluntersuchten Werkstattplatz zurück, der bisher mit 12 Rennöfen, zahlreichen Gruben und auf Holzbauten schließende Pfostensetzungen die aussagekräftigsten Befunde lieferte¹⁷. Die Öfen gehören dem in Norddeutschland und Skandinavien häufig verbreiteten Typ des freistehenden Schachtofens mit eingetiefter Schlackenrube an. Die Zethlinger Schlackenruben besitzen einen Durchmesser von 0,40 bis 0,55 m und eine Tiefe bis zu 0,80 m. Die genaue Form der Schlackenrube war bei der Mehrzahl der Ofenreste nicht mehr erkennbar. Oft blieb nur eine muldenförmige Eintiefung als dunkle Verfärbung im anstehenden hellen Sand erhalten, die unter einer alten Oberfläche oder dem rezenten Humushorizont lag. Die Schlackenruben enthielten neben tropfenförmigen Schlackenstücken Teile des zerschlagenen Schlackenklotzes in sekundärer Lage, eingebettet in holzkohlehaltige schwarzgraue bis schwarze Erde. Bei fast allen Öfen war als lokale Besonderheit der Konstruktion ein Schlackenrubenkanal von 7 bis 9 cm Durchmesser nachweisbar, der zwischen der vorgelagerten Arbeitsrube und dem unteren Teil der Schlackenrube verlief. Zu Form und Aufbau des Lehmmantels sind aufgrund geringer Mantelfragmente kaum Aussagen möglich. Düsenstücke und damit Hinweise auf den Einsatz künstlichen Zuges fehlen. Auch die Konstruktion im Über-

gangsbereich zwischen Schlackengrube und Lehmmantel sowie die Mantelhöhe blieben aufgrund fragmentarischer Befunde fraglich.

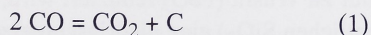
Bei den untersuchten Gruben wurde der Versuch einer Funktionszuweisung nach Differenzierung der Form und des Inhalts vorgenommen¹⁸. Danach könnte es sich bei fünf Gruben um Ausheizherde (zur Verarbeitung des Eisenschwammes in schmiedbares Eisen) gehandelt haben, da sie Holzkohle und kleinstückige Schlacke in graubrauner Erde enthielten. Als Röstgruben (zur Aufbereitung des Raseneisenerzes) werden zwei weitere Gruben mit Holzkohle und Raseneisenerz als Inhalt anzusehen sein. Rostrote Grubenfärbungen sind als Lager aufbereiteten Erzes interpretiert worden. Und letztlich deuten dunkle Färbung und Anreicherung mit Holzkohle auf Grubenmeiler hin. In unmittelbarer Nähe zu oder direkt in den Gruben waren häufig Pfostensetzungen anzutreffen, die eine zumindest zeitweise Überdachung der Anlagen nahelegen.

Zwischenzeitlich gelang in Orpensdorf und Nahrstedt, beide Ldkr. Stendal, durch Neufunde von Düsenziegeln¹⁹ auch der Nachweis von Gebläseöfen zur Eisenherstellung im Arbeitsgebiet. Die Untersuchung eines Ofens mit Abstichschlacke im April 1994 in Walsleben, Ldkr. Stendal²⁰, unterstreicht diese Erkenntnis.

Den römischen Hüttenwerkern der Altmark scheint es nur in Ausnahmefällen gelungen zu sein (z. B. Lindstedt und Chüttlitz, beide Ldkr. Salzwedel, sowie Dobbrun, Ldkr. Stendal), einen zusammenhängenden Eisenschwamm zu erzeugen, sofern wir die Befunde richtig interpretieren und der kompakte Schlackenklötz als Nebenprodukt eines solchen Prozesses das erklärte Ziel der Metallurgen war²¹. Zumeist - und das gilt für alle Zethlinger Öfen - waren die Reste zerschlagener Schlackenklötze als Indiz für einzelne Teile metallischen Eisens im Schmelzprodukt anzutreffen. Die Weiterverarbeitung der den Schlackenklötzen entnommenen Eisengranalien in Ausheizherden zum Entfernen von Schlackenteilen und Verbinden der Eisenteile durch Schmieden ist nach den Funden dieser Schlackenrösten von Zethlingen gesichert. Allem Anschein nach steht der Fundzusammenhang des zweiten in Zethlingen freigelegten Hauses mit zahlreichen Schlackenrösten, einschließlich des vor dem Bauwerk liegenden großen Feldsteines, der vom Ausgräber leider nicht auf Schlagspuren hin untersucht wurde²², in diesem Kontext. Als Neufund ist hier eine eingetiefte Schmiedewerkstatt mit Amboßstein von Nahrstedt, Ldkr. Stendal, zu ergänzen²³.

Theoretische Grundlagen der Rennofentechnologie

Die Eisengewinnung ist generell ein Reduktionsprozeß; d. h. der Sauerstoff des Eisenerzes wird eliminiert, indem man ein Ion mit höherer Sauerstoffaffinität als Ersatz für das Eisen zur Verfügung stellt. Beim Rennofenprozeß ist der Kohlenstoff der Holzkohle bzw. das daraus entstehende Kohlenmonoxid das Reduktionsmittel. Das Gleichgewicht der Verbrennungsgase Kohlenmonoxid und Kohlendioxid bei hinreichender Verfügbarkeit von Kohlenstoff wird durch die Boudouardreaktion



bestimmt. Das kombinierte Baur-Glaessner-Boudouard-Schaubild (Abb. 1)²⁴ stellt die temperaturabhängigen Gleichgewichtsphasen im System Fe-O-C dar. Aus der Abbildung

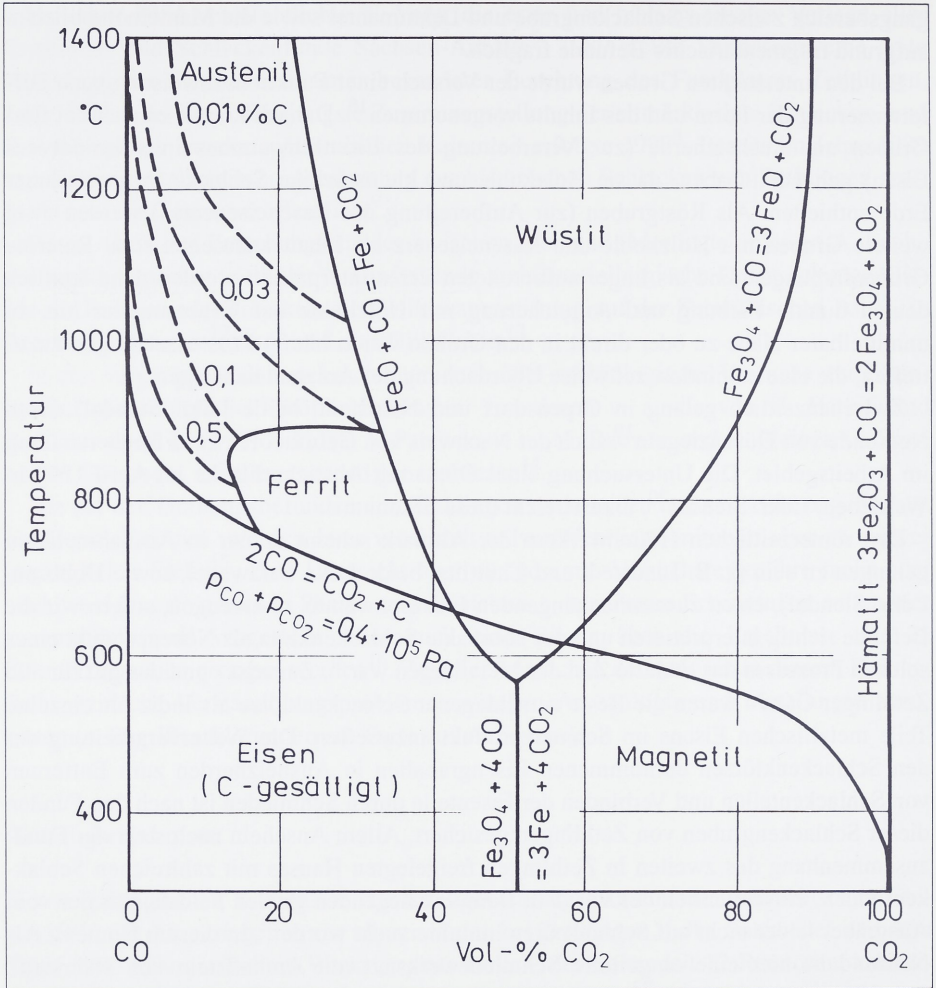
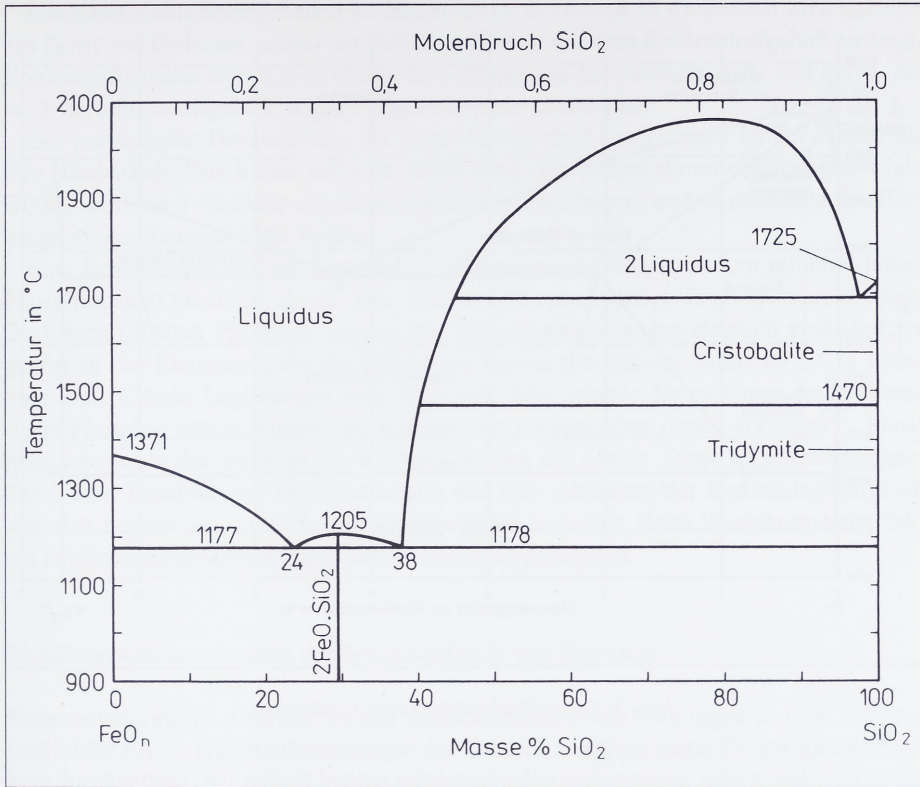


Abb. 1: Kombiniertes Baur-Glaessner-Boudouard-Schaubild

läßt sich entnehmen, daß zur Gewinnung metallischen Eisens aus Eisenoxiden der CO-Gehalt im Reaktionsgas über 55 Vol.-% und die Temperatur über 640 °C betragen müssen. Diese Angaben stellen Gleichgewichtswerte dar und müssen deutlich überschritten werden, damit die Kinetik der Reaktion die Herstellung von Eisen in technisch vertretbaren Zeiträumen gestattet.

Die Reduktion der Eisenoxide zu Eisen erfolgt im Rennofen im festen Zustand, und das Zusammensintern der Eisenpartikel zur Luppe erfolgt unterhalb der Düsen. Ein Teil des Eisenoxides, welches nur zu Wüstit (FeO) reduziert wird, bildet mit der im Erz enthaltenen Gangart (im wesentlichen SiO₂) eine niedrighschmelzende fayalitische Schlacke (2 FeO * SiO₂). Diese fließt in die Schlackengrube ab und formiert den sogenannten Schlackenklotz.

Abb. 2: Zustandsschaubild FeO-SiO₂

Die Produktion von Eisen nach dem Rennverfahren kann demnach nur funktionieren, wenn das verwendete Eisenerz mehr Eisen als die sich bildende fayalitische Schlacke enthält. Eine Abschätzung dazu liefert das Zustandsschaubild FeO-SiO₂ (Abb. 2)²⁵. Weiterhin unterstützt dieses Schaubild die Aussage, daß zur Herstellung einer flüssigen fayalitischen Schlacke Temperaturen von mindestens 1175 °C notwendig sind. Da es sich bei den Rennofenschlacken um Vielstoffsysteme handelt (die Schlacken enthalten in Abhängigkeit von den eingesetzten Erzen noch geringe Mengen an Al₂O₃, MnO, K₂O, CaO, MgO und P₂O₅) und zusätzliche Komponenten in einem System gewöhnlich den Schmelzpunkt senken, ist davon auszugehen, daß im Rennofen ab Temperaturen von ca. 1150 °C mit nennenswerter Schlackenbildung zu rechnen ist.

Folgende Zusammensetzungen sind typisch für Rennfeuerschlacken:

1. 55 - 70 % FeO und MnO
2. 15 -30 % SiO₂
3. 5 - 15 % Al₂O₃ , K₂O, CaO, MgO und P₂O₅

Das Endprodukt des Rennofenprozesses ist die Luppe, eine schwammartige Eisenmasse mit Schlackeneinschlüssen und Hohlräumen. Zur Weiterverarbeitung muß die Rohluppe in einem Ausheizherd erneut erwärmt und ausgeschmiedet werden, um die

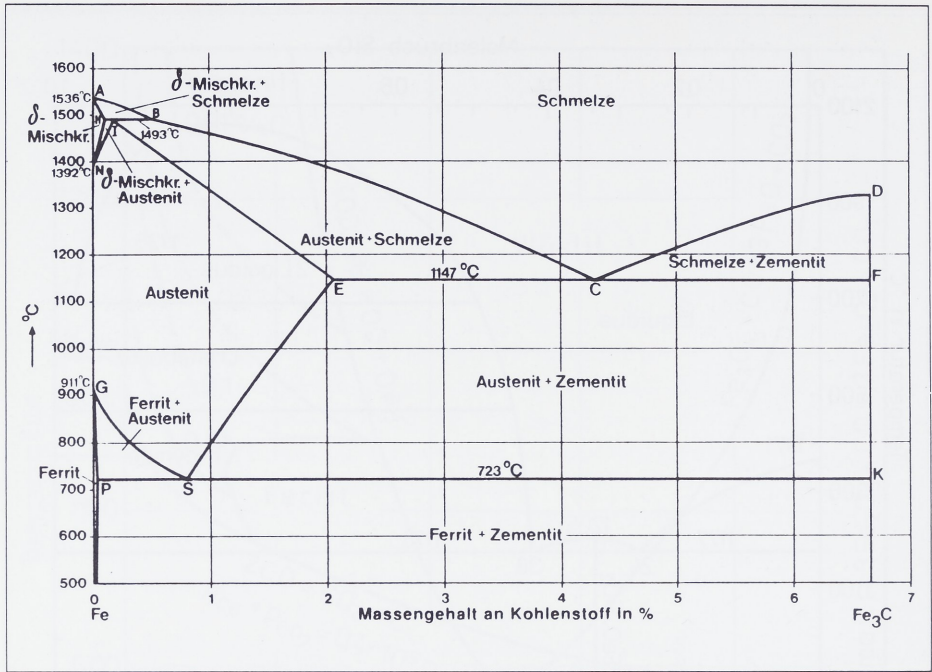


Abb. 3: Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff

Verunreinigungen durch Schlacken auszutreiben und die Hohlräume zu verschweißen. Das Eisenausbringen einer Rennofenschmelze ist damit im wesentlichen abhängig vom Anreicherungsgrad und der Kompaktheit des Eisens in der Luppe sowie der Kunst des Schmiedes, die Zunder- und Trinnereisenverluste (Abplatzen der Randpartien) gering zu halten. Die mechanischen Eigenschaften des metallischen Eisens werden primär durch dessen chemische Zusammensetzung bestimmt. Von besonderer Bedeutung ist hierbei das System Eisen-Kohlenstoff (Abb. 3)²⁶.

Folgende grundlegende Aussagen lassen sich aus diesem Diagramm treffen:

1. Mit steigendem Kohlenstoffgehalt verringert sich die Schmelztemperatur des Eisens.
2. Eisen bzw. Eisen-Kohlenstoff-Legierungen unterliegen im Bereich bis 2,06 % C polymorphen Umwandlungen, d. h. von der kubisch raumzentrierten Kristallstruktur (α -Eisen) zur kubisch flächenzentrierten Elementarzelle (γ -Eisen) und unterhalb der Linie GSE wieder zur kubisch raumzentrierten Struktur (α -Eisen).
3. Es können in Abhängigkeit von der Temperatur unterschiedliche Kohlenstoffgehalte im Eisengitter gelöst werden. Bei Raumtemperatur sind nur äußerst geringe Kohlenstoffgehalte im Eisen löslich.

Reines Eisen besitzt ein ferritisches Gefüge und ist durch eine geringe Härte charakterisiert. Eine Eisen-Kohlenstoff-Legierung mit 0,8 % Kohlenstoffgehalt (eutectoide Zusammensetzung) zeichnet sich durch ein vollständiges perlitisches Gefüge aus. Die Festigkeitswerte dieses Gefüges liegen aufgrund der Zementitanteile deutlich höher als beim Reineisen.

Eisen mit Kohlenstoffgehalten zwischen 0,015 % und 0,8 % weisen ein Mischgefüge aus Ferrit und Perlit auf, wobei der Perlitanteil linear mit dem Kohlenstoffgehalt ansteigt. Kohlenstoffgehalte über 0,8 % führen zu Gefügen aus Sekundärzementit und Perlit. Ab ca. 2 % Kohlenstoffgehalt ist das Eisen nicht mehr schmiedbar.

Die polymorphe Umwandlung der Eisen-Kohlenstoff-Legierungen ist der Grund für ihre Härbarkeit. Durch eine schnelle Abkühlung von Temperaturen oberhalb der Linie GOSK wird die γ -Struktur des Eisens praktisch eingefroren, und es entstehen die Härtingsgefüge Martensit bzw. Bainit.

Eine Besonderheit des im Rennverfahren gewonnenen Eisens ist sein mitunter hoher Phosphorgehalt, bedingt durch den Einsatz phosphorreicher Erze (Raseneisenerze, Sumpferze). Durch Phosphor werden die Phasenumwandlungen deutlich verändert; es gehört zu den Elementen, die das Gebiet des Eisens abschnüren. Schon ab 0,6 % Phosphor sind C-freie Legierungen rein ferritisch. Eine genaue Betrachtung des Systems Eisen-Phosphor würde jedoch den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen²⁷. Phosphor verursacht des weiteren die Kaltversprödung des Stahls. Diese ist gekennzeichnet durch eine Zunahme der Festigkeitswerte und eine Abnahme der Kerbschlagzähigkeit, was sich negativ auf die Gebrauchseigenschaften auswirkt. Hohe Phosphorgehalte führen zur Festigkeitsverbesserung, jedoch auch zu Sprödigkeit.

Metallurgische Auswertung der Schlackenfunde von Zethlingen

Erste metallurgische Analysen zu den Schlackenfunden von Zethlingen wurden 1989 am Institut für Eisen- und Stahltechnologie der Technischen Universität Bergakademie Freiberg durchgeführt. Am selben Institut erfolgten in den vergangenen Jahren weiterführende Untersuchungen durch den Autor. Die einzelnen Analysen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Im wesentlichen weisen die untersuchten Schlacken die für Rennofenschlacken typischen Zusammensetzungen auf. Das Verhältnis FeO zu SiO_2 gibt Aufschluß darüber, daß die Basis der Schlackenbildung der Fayalit ist. Die Anteile der weiteren Schlackenkomponenten hängen im wesentlichen von der Zusammensetzung des eingesetzten Erzes ab.

Die Schlacken W III, W IV, W IX, S 2 und S 3 weisen untypisch hohe Gehalte an SiO_2 auf. Das in diesen Schlacken enthaltene Eisen liegt zu großen Teilen als Fe_2O_3 vor, was auf geringe Reduktionsgrade schließen läßt. Die Schlackenbildung beruht hier nur zum Teil auf der Entstehung von Fayalit. Insgesamt lassen sich diese Schlacken schwer einordnen. Möglich erscheint eine Verfälschung des Ergebnisses durch mitanalyisierte Anteile aus der Ofenwandung.

Nennenswert sind weiterhin die allgemein hohen Anteile an P_2O_5 in den untersuchten Schlacken. Parallel zur Reduktion der Eisenerze findet im Rennofen die Reduktion des Phosphoroxides zu Phosphor statt. Es muß davon ausgegangen werden, daß im hergestellten Eisen für heutige Verhältnisse vergleichsweise sehr hohe Phosphorgehalte enthalten waren.

Schwefel stellte damals offensichtlich kein metallurgisches Problem dar, sofern kein schwefelhaltiges Erz (Pyrit) verwendet wurde. Die Holzkohle enthält praktisch keinen Schwefel. Für die Zethlinger Schlacken ergeben sich geringe Schwefelgehalte.

Die Anteile des alkalischen K_2O in der Schlacke resultieren weitestgehend aus der Holzkohlenasche.

Tab. 1: Analysen der Schlackenfunde der Grabung Zethlingen in Masse-% (n. b. = nicht bestimmt)

Schlacke-Nr.	Fe ges.	Fe met.	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	P ₂ O ₅	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	S
W I/1	52,65	0,36	52,10	16,80	1,56	21,10	n. b.	n. b.	2,66	3,67	n. b.	n. b.	n. b.
W III	24,81	0,22	11,60	22,20	6,85	45,90	n. b.	n. b.	1,52	4,68	n. b.	n. b.	n. b.
W IV	4,13	0,07	0,44	5,30	1,56	77,10	n. b.	n. b.	1,31	8,03	n. b.	n. b.	n. b.
W V	54,85	0,34	51,80	20,20	11,74	15,90	n. b.	n. b.	1,24	2,26	n. b.	n. b.	n. b.
W VI	43,90	0,22	40,40	17,50	6,56	27,80	n. b.	n. b.	2,74	3,97	n. b.	n. b.	n. b.
W VII	47,72	0,44	47,00	15,30	7,41	22,80	n. b.	n. b.	0,98	3,38	n. b.	n. b.	n. b.
W VIII	50,79	0,56	46,10	20,50	1,31	20,60	n. b.	n. b.	2,98	2,61	n. b.	n. b.	n. b.
W IX	36,17	0,46	27,60	20,40	15,01	35,20	n. b.	n. b.	2,68	0,88	n. b.	n. b.	n. b.
W XI/1	55,17	0,50	49,36	22,59	1,09	18,74	5,49	0,61	2,25	0,66	1,08	0,070	0,047
W XI/2	51,42	2,00	54,47	9,34	0,71	19,08	4,38	0,53	1,72	0,77	1,00	0,079	0,043
W XI/3	53,77	0,30	52,06	17,85	0,61	13,09	4,69	0,53	1,91	0,61	0,92	0,088	0,041
W XI/4	50,92	1,45	52,88	12,44	0,63	18,89	4,51	0,60	1,60	0,70	1,08	0,074	0,041
W XI/5	57,21	0,32	59,44	14,43	0,57	10,40	4,82	0,55	1,77	0,43	0,36	0,056	0,058
W XIII/1	41,87	0,30	40,99	13,28	7,88	25,80	1,77	0,65	2,24	1,36	1,26	0,013	0,048
W XIII/2	45,44	0,30	48,37	10,14	7,86	20,70	2,04	0,66	1,84	1,05	1,07	0,120	0,055
W XIII/3	44,11	0,44	40,06	16,63	9,06	21,28	2,57	0,63	3,39	1,21	1,17	0,093	0,079
W XIII/4	46,94	0,32	49,66	10,75	8,51	17,47	1,52	0,83	2,56	0,67	1,26	0,079	0,075
W XIII/5	48,02	0,54	48,79	13,07	7,71	16,14	1,84	0,64	2,33	0,44	1,14	0,078	0,061
S 1	47,59	0,12	40,95	22,36	0,56	31,00	1,60	0,56	2,02	2,57	0,83	0,180	0,026
S 2	25,17	0,08	16,24	17,83	1,36	55,50	1,16	0,67	4,85	4,64	1,92	0,270	0,030
S 3	38,08	0,12	35,24	14,83	1,87	37,30	1,55	0,52	5,96	3,11	1,17	0,230	0,049
S 4	57,02	0,56	71,13	1,67	0,16	16,50	1,81	0,27	<0,5	1,61	0,43	0,170	0,030
S 5	50,62	0,34	47,14	19,50	0,27	25,30	1,76	0,38	1,73	1,76	0,64	0,180	0,029
S 6	43,87	0,30	6,90	56,63	2,50	14,80	4,98	0,23	<0,5	0,79	0,32	0,075	0,097
S 7	45,33	0,30	22,42	39,46	2,46	21,40	3,41	0,56	2,17	1,20	0,46	0,130	0,021
S 8	45,86	4,86	50,15	2,89	5,01	23,90	1,38	0,56	2,74	1,94	0,90	0,170	0,037
S 9	45,63	1,12	26,44	34,26	0,56	22,00	2,78	0,50	3,22	1,89	0,75	0,180	0,029
S 10	45,28	0,26	41,97	17,73	0,87	24,80	2,61	0,59	4,62	1,18	0,77	0,100	0,032

Das archäologische Experiment

Im archäologischen Experiment rückt die menschliche Leistung in den Mittelpunkt²⁸. Hierzu zählen beispielsweise die Prozesse der Entstehung technischer oder baulicher Anlagen und deren Nutzung. Aber auch die verschiedensten Herstellungsprozesse von Gegenständen oder Materialien sind Gegenstand archäologischer Versuchsreihen. Das Experiment soll jedoch ebenso Aussagen über den Originalzustand einer Anlage und deren Gebrauchsfähigkeit überprüfen²⁹. Insbesondere öffnet sich dort die Möglichkeit archäologischer Experimente, wo der Grabungsbefund allein keine zufriedenstellende Interpretation zuläßt. Die Anforderungen an ein wissenschaftliches Experiment³⁰ und an die experimentelle Archäologie sind nur bedingt vergleichbar³¹. Dennoch ist, analog zu den Natur- und Sozialwissenschaften, eine Gesamtdokumentation des Experiments, seiner Voraussetzungen, seiner Ausgangssituation, des angewandten Instrumentariums, des Prozeßverlaufs und letztendlich der Ergebnisse unerlässlich. Erst auf dieser Grundlage kann das Versuchsergebnis gedeutet werden.

Nach Information über den archäologischen Hintergrund sollte der Publikationsstand des vorgesehenen Experiments ergründet und so die Wiederholung gleicher Experimente vermieden werden, während eine Weiterführung auf dem bereits erreichten Niveau sinnvoller wäre.

Im Vorfeld jedes Experiments liegt die Phase der Erprobung, der praktischen Vorstufen. Uns sind heute viele Handfertigkeiten verlorengegangen, die den Generationen vor uns noch geläufig waren. Der Umgang mit Materialien, deren Eigenschaften, selbst die Handhabung des Geräts und die Grundzüge heute nicht mehr gebräuchlicher Technologien und Handlungsabläufe müssen neu erlernt, d. h. "begriffen" werden, indem sich ein Gefühl für den Vorgang und die Abfolge von Handgriffen entwickelt. Oft macht erst das Erlernen einstiger Techniken die Durchführung eines Versuches möglich. In neuen, unerwarteten eintretenden und unbekanntenen Situationen innerhalb des Versuchsablaufs hilft - und auch das lernten wir im Laufe der Versuche - nur selten das Schulwissen, jedoch die Intuition für die entsprechend notwendigen Handgriffe, denn beispielsweise lesen Schmiede oder Töpfer bereits seit Jahrhunderten an Farbe und Geruch die Temperatur und das Stadium des laufenden Prozesses ab. Weder praktisches Können noch lebenslange Erfahrung sind durch das Aufstellen langer Meßreihen zu ersetzen³². Diese dienen der Dokumentation und darüber hinaus der Kontrolle oder dem Abgleich eigener gewonnener praktischer Erfahrungswerte mit meßtechnisch faßbaren Größen. Die Vorlage der Meßkurven beruhigt zugleich jedoch diejenigen Kritiker der experimentellen Archäologie, die allein in nachprüfbaren Zahlenkolonnen die Wissenschaftlichkeit eines Experimentes anerkennen.

Vor Zeitaufwandsberechnungen muß jedoch gewarnt werden, weil trotz des Übens den heutigen Experimentatoren die generationenlange empirische Erfahrung (prä-)historischer Bevölkerungen fehlt. So könnten diese Zeitangaben lediglich ausweisen, wie schnell ein Mensch des 20. Jh. in einzelnen Lebensalterstufen bestimmte Handlungen erlernt und ausführt.

In Vorbereitung auf das Experiment ist das Erarbeiten einer konkreten Fragestellung und die Festlegung der Rahmenbedingungen sowie aller dazu benötigten Parameter unerlässlich. Nach Auswahl der technischen Ausstattung und des zu verwendenden Materials kann der eigentliche Versuch beginnen.

Da im allgemeinen der erste Versuch nicht gelingt, stellt er trotzdem eine Variante des auch der experimentellen Archäologie zu zollenden "Lehrgeldes" dar, dem die Fehlersuche folgt (vgl. Versuch 1). Oft äußert sich gerade darin der Widerspruch zwischen theoretischer Überlegung und deren Umsetzung in die Praxis. Dennoch zeigte sich bei Versuchen, deren Ergebnis nicht den Erwartungen entsprach, daß etwas, wenn überhaupt, dann allerdings nicht so funktionierte. Was aber beweist ein geglückter Versuch? Er zeigt, daß auf die erprobte Weise ein Vorgang möglich gewesen sein kann - jedoch nicht muß. Die experimentelle Archäologie zeigt also Lösungsvarianten auf und liefert Aussagen mit einem gewissen Wahrscheinlichkeitsgrad, der von den Experimentatoren jedoch stets kritisch hinterfragt werden sollte. Unter diesen Voraussetzungen stellt die experimentelle Archäologie eine durchaus ernstzunehmende Methode zur Erweiterung archäologischer Erkenntnisse dar.

Aufgabenstellung der Versuche

Die theoretische Auswertung der archäologischen Befunde des Eisenverhüttungsplatzes von Zethlingen warf aus archäologischer wie auch aus metallurgischer Sicht eine Reihe ungeklärter Fragen zu einzelnen Sachverhalten auf, deren Beantwortung durch die experimentelle Archäologie, speziell durch Eisenverhüttungsversuche, einer Lösung zugeführt werden sollte.

- Hält die theoretische Funktionszuweisung der Anlagen (Ofen, Gruben) der praktischen Überprüfung überhaupt stand?
- Welche Aufschlüsse zur Ofenkonstruktion sind durch die Versuche hinsichtlich der Gestalt des Ofens (Höhe, Durchmesser, Wandstärke, Profilverlauf), zum Baumaterial und dessen Zusammensetzung, zur Bauart, zum Bauablauf, zu Anordnung, Anzahl, Stellung und Form der Düsen oder zur Anlage des Schlackengrubenkanals zu erhalten?
- Methoden der Erzaufbereitung, des Röstens, der Korngröße, des Eisen-, Silikat-, Mangan- und Phosphorgehaltes;
- Art, Zusammensetzung und Heizwert des Brennstoffs, Korngröße und Qualität der Holzkohle, Verwendung von Brennholz;
- natürliche Luftzufuhr, Verwendung von Blasebalg/Gebläse, Kombination zwischen natürlichem Windzug und Gebläse;
- Art und Weise der Beschickung und des Mischungsverhältnisses der Einsatzstoffe;
- Wärmehaushalt in der Schlackengrube zur Bildung des Schlackenklotzes;
- Funktion des Schlackengrubenkanals;
- Methoden zum Erreichen des notwendigen Temperaturregimes während der einzelnen Phasen;
- Material- und Zeitaufwand im Verhältnis zum Ergebnis;
- Verhüttungsprodukt und dessen Weiterverarbeitung;
- Vergleich historischer mit experimentellen Schlacken und Eisen.

Die Aufstellung macht sowohl die große Bandbreite sich ergebender Fragen als auch deren Komplexität und gegenseitige Beeinflussung offenkundig. Pro Experiment ist jeweils nur ein Parameter zu verändern, um dessen konkrete Auswirkung auf das Ver-

suchsergebnis zu analysieren. Der Gesamtumfang des Rennofenprozesses erschwert jedoch den Abgleich aller Veränderlichen untereinander, da sowohl Anzahl der Versuche als auch Zeitaufwand und Kosten entscheidende Randbedingungen darstellen.

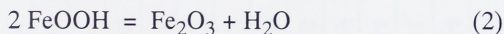
Der Versuch 1 war so nahe wie möglich an den Grabungsergebnissen von Ofen 1 aus Zethlingen orientiert. Die Abmessungen der Schlackengrube, ihre Form und ihre Auskleidung mit Lehm, aber auch die Lage der Arbeits- zur Schlackengrube und der Verbindungskanal zwischen beiden mußten dem archäologischen Befund entsprechen.

Neben den schon angeführten Fragestellungen interessierte aus metallurgischer Sicht insbesondere, inwieweit die Versuche Aussagen zur Theorie der im Ofen ablaufenden Prozesse zulassen, da darüber im Schrifttum³³ unterschiedliche Auffassungen existieren.

Einsatzstoffe der Versuche

Während der Versuche 1 bis 12 kam Raseneisenerz aus der Umgebung von Zethlingen zum Einsatz. Raseneisenerz ist mineralogisch gesehen Goethit (FeOOH), versetzt mit Gangart. Dabei handelte es sich um ausgepflügte und an den Feldrainen angehäufte Erzbrocken. Die weitere Beschaffung von eisenreichem Raseneisenerz gestaltete sich als schwierig, weil die bekannten anstehenden Vorkommen nicht der erforderlichen Qualität (Eisen-Kieselsäureverhältnis) entsprachen.

Die Aufbereitung dieses Erzes geschah durch Zerschlagen auf eine Korngröße zwischen 5 bis 15 mm mit einem Feinanteil von ca. 5 %. Der Arbeitsaufwand für 130 kg Raseneisenerz betrug dabei 12 Stunden (Tab. 2). Eine wesentliche Minimierung des manuellen Arbeitsaufwandes konnte durch das Rösten des Erzes erreicht werden (Taf. 1a). Unter Rösten ist das Austreiben von Kristallwasser und karbonatischen Anteilen aus dem Eisenerz zu verstehen. Das anhaftende Kristallwasser wird bei Temperaturen von ca. 550 °C nach der Reaktion



ausgetrieben. Zugleich kommt es zum Auflockern der Erzstruktur und zum Erleichtern der mechanischen Aufbereitung. Weiterhin wird der Rennofenprozeß wärmetechnisch entlastet, da es sich bei Reaktion (2) um einen endothermen Vorgang handelt. Problematisch für den Rennofenprozeß ist jedoch die sehr heterogene Zusammensetzung der Raseneisenerze mit teilweise sehr hohen Gehalten an SiO_2 . Da diese hohen Gehalte, wie die Versuche zeigten, sich sehr negativ auf die Metallurgie des Rennofenprozesses auswirkten und Erze ausreichender Qualität nicht zur Verfügung standen, wurde ab Versuch 13 auf eine hämatitische Erz Mischung zurückgegriffen. Es handelte sich dabei um Erze, die in modernen Sinteranlagen zur Erzeugung von Einsatzstoffen für den Hochofen Verwendung finden. So konnte ein für den Rennofenprozeß günstiges Verhältnis von FeO zu SiO_2 eingestellt werden (Tab. 2). Ab Versuch 21 wurde der Eisenanteil in der Erz Mischung nochmals leicht erhöht, um das zu erzeugende Luppengewicht zu steigern.

Als Brennstoff kam Holzkohle zum Einsatz: für die Versuche 1-12, 14-17, 19-23 Mischholzkohle mit einem geringen Anteil an Hartholzkohle, für Versuch 13 ebenfalls Mischholzkohle mit ca. 1/3 Birkenanteil und ab Versuch 24 Eichen-Buchen-Holzkohle. Nur im Versuch 18 (Gastversuch an der Norwegischen Technischen Universität Trondheim) bestand das gesamte Brennmaterial aus Holz.

Tab. 2: Analysen der verwendeten Eisenerze in Masse-% (n. b. = nicht bestimmt)

Versuch	Fe ges.	MnO	SiO ₂	P ₂ O ₅	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	S	Glühverlust	Bemerkungen
I											
1. Probe	35,17	0,65	28,36	3,37	1,04	<0,05	n. b.	n. b.	0,17	11,10	Raseneisenerz ungeröstet
2. Probe	36,80	1,04	31,90	2,56	0,19	0,53	3,61	n. b.	0,18	13,14	Raseneisenerz ungeröstet
3. Probe	35,50	1,18	34,40	2,66	0,17	0,55	3,41	n. b.	0,19	12,62	Raseneisenerz ungeröstet
2-8											
1. Probe	31,99	0,98	32,10	2,64	0,30	2,15	5,95	n. b.	<0,005	11,52	Raseneisenerz ungeröstet
2. Probe	32,72	1,29	40,40	2,11	0,24	1,79	5,95	n. b.	<0,005	2,32	Raseneisenerz geröstet
3. Probe	27,30	3,58	42,40	1,64	0,35	2,10	8,12	n. b.	<0,005	2,88	Raseneisenerz geröstet
4. Probe	31,09	1,20	41,30	2,19	0,31	2,10	7,95	n. b.	<0,005	3,04	Raseneisenerz geröstet
5. Probe	42,44	1,16	25,00	3,53	0,35	2,40	7,90	n. b.	<0,005	2,73	Raseneisenerz geröstet
6. Probe	28,18	0,99	45,70	2,50	0,28	1,90	6,40	n. b.	<0,005	4,08	Raseneisenerz geröstet
9											
	38,24	0,89	26,69	2,49	0,50	0,82	1,38	1,14	0,027	11,28	Raseneisenerz ungeröstet
10											
	39,41	0,82	24,50	2,53	0,58	0,86	1,51	1,06	0,019	11,34	Raseneisenerz ungeröstet
11											
	37,32	1,07	25,29	2,18	0,20	1,32	2,78	0,52	0,024	9,29	Raseneisenerz ungeröstet
12											
	41,21	1,08	21,95	2,36	0,18	1,41	2,56	0,43	0,006	5,97	Raseneisenerz ungeröstet
13-20											
	53,35	0,19	14,55	0,01	0,39	0,65	1,60	0,40	0,06	2,45	Hämatit
21-22											
	56,60	0,15	10,60	0,01	0,36	0,70	1,33	0,50	0,08	3,27	Hämatit
23											
	55,76	0,10	11,69	0,01	0,43	0,19	1,45	0,07	0,033	n. b.	Hämatit
24											
	55,78	0,09	11,47	0,01	0,42	0,20	1,48	0,07	0,029	n. b.	Hämatit
25											
	55,81	0,09	11,54	0,01	0,43	0,23	1,50	0,06	0,028	n. b.	Hämatit

Holzkohle ist das Ergebnis einer unvollständigen Zersetzung des Holzes bei der trockenen Destillation unter mehr oder weniger hohen Temperaturen bei Luftabschluß. Der Heizwert ist im wesentlichen nur abhängig vom Kohlenstoffgehalt der Holzkohle. Meilerholzkohle besitzt in der Regel ca. 86 bis 88 % Kohlenstoff, was einem Heizwert von etwa 30 600 bis 30 900 kJ/kg entspricht. Die verschiedenen Holzkohlearten unterscheiden sich jedoch wesentlich durch ihr Porenvolumen und ihr Schüttgewicht. So verfügt Birkenkohle bei einem Porenvolumen von 80 % über ein Schüttgewicht von 237 kg/m³, während Tannenkohle bei einem Porenvolumen von 89 % ein Schüttgewicht von 159 kg/m³ besitzt³⁴. Diese unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften müssen bei der Planung und Durchführung der Rennofenversuche berücksichtigt werden, da sie erheblichen Einfluß auf die Ausbildung der unterschiedlichen Wärmezonen im Rennofen besitzen.

Zum Ofenbau wurde anstehender Lehm verwendet. Die chemische Analyse ist aus Tabelle 3 zu ersehen. Es handelt sich um ein stark SiO₂-haltiges Material, welches die wärmetechnischen Ansprüche an ein Rennofenfeuerfestmaterial voll erfüllt.

Tab. 3: Analysen des Ofenbaumaterials für Versuch 22 in Masse-%

Probe	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O
LO 1R	88,4	1,09	1,75	6,23	0,38	0,058
LO 2S	85,9	0,70	2,25	6,59	0,47	0,083
LO 3	78,9	5,11	1,95	7,05	0,56	0,023
LO 4	87,5	< 0,01	1,86	6,87	0,42	0,027

Ofenbau

Ausgehend vom Grabungsbefund in Zethlingen, wurde auf die einfache Übernahme publizierter Rennofenrepliken aus umliegenden Landschaften verzichtet³⁵. Bekannt waren Schlackengrubendurchmesser, -form und die Existenz von Arbeitsgrube und Schlacken-grubenkanal bei einigen der Öfen sowie die Körperhöhe der damaligen Menschen³⁶.

Für den ersten Versuch fehlten sowohl Kenntnisse im Umgang mit dem und zum Verhalten des Baumaterials als auch zu zweckbedingten Bauelementen des Ofens. Der Aufbau des Ofens begann mit dem Ausschachten von Schlacken- und Arbeitsgrube sowie dem Anlegen eines Verbindungskanals zwischen beiden, entsprechend des archäologischen Befundes. Zu ebener Erde entstand über einem massiven Lehmring der konische Ofenmantel aus aufbereitetem Lehm. Pro Ofen wurden etwa 0,5 m³ anstehender Lehm benötigt. Nach anfänglich stärkerer, höherer oder gedrungenerer Ofenform erschien eine Mantelhöhe von ca. 1,2 m bei nachgewiesener durchschnittlicher Körperhöhe der römischen Menschen des Fundplatzes von 1,6 m³⁷ für den Prozeßverlauf und die Handhabung der Ofenanlage als vorteilhaft.

Die Schlackengrube des ersten Ofens wurde mit Reisig ausgefüllt. Der Lehm mantel entstand über einer Stützkonstruktion aus Weidengeflecht. Die Magerung des Lehms erfolgte mit Sand und trockenem Heu. Der Ofen erhielt eine Windeintrittsöffnung von

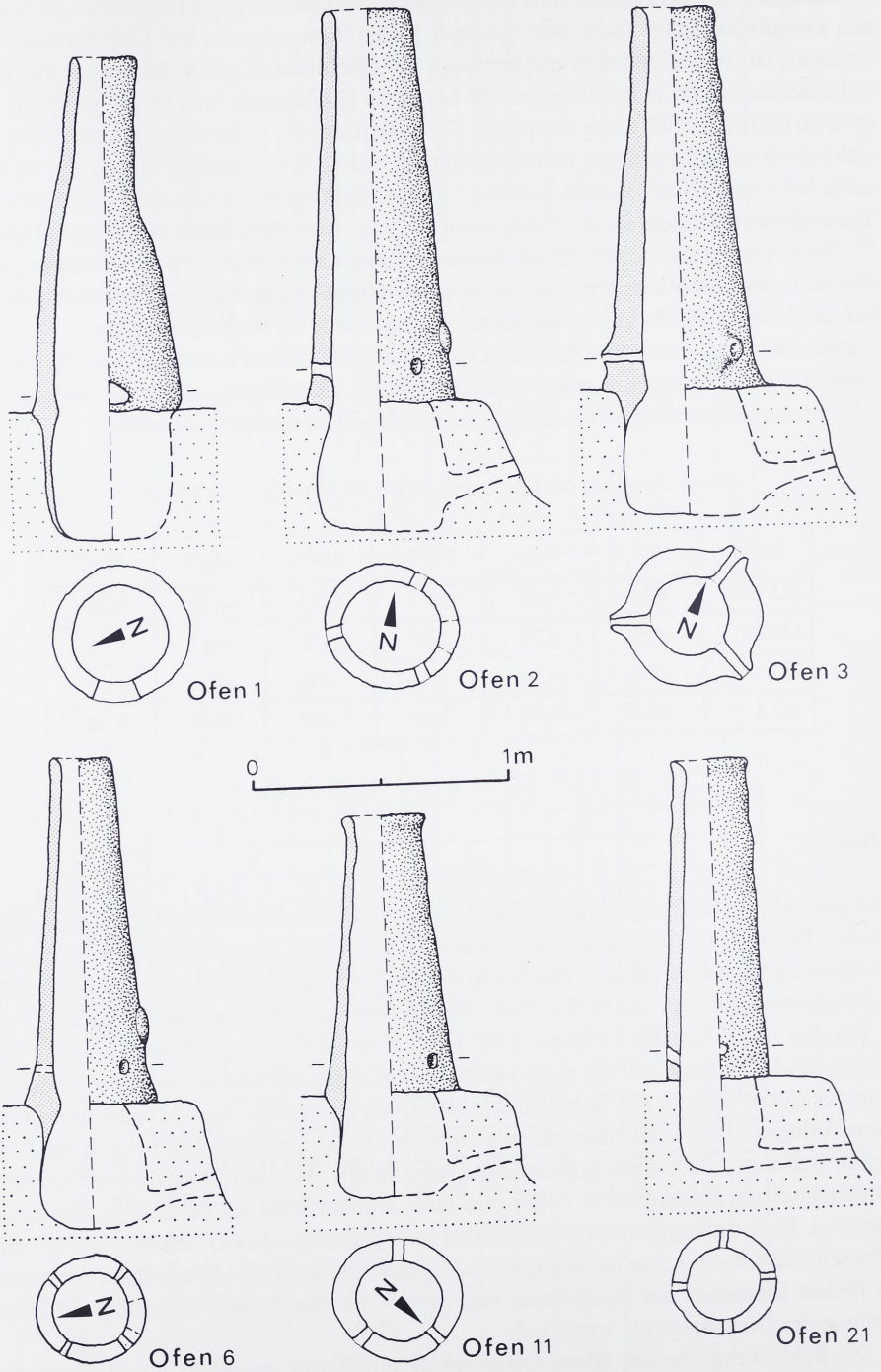


Abb. 4: Ausgewählte Rennofenkonstruktionen in Schnitt und Aufsicht

15 cm x 10 cm in Hauptwindrichtung am Fuß des Ofenmantels, die zugleich als Arbeitsöffnung genutzt wurde. Die Unerfahrenheit im Zeitmaß bei den Trockenvorgängen des Lehms führte beim Bau dieses ersten Ofens zu dessen Instabilität und plastischer Verformung nach Beendigung der Aufbauphase während des Trockenfeuerns (Abb. 4). Für den Bau des Ofens des Versuchs 1 benötigten drei Personen je 13 Arbeitsstunden.

Beim zweiten Ofen (Abb. 4) wurden, abweichend vom ersten, außer den veränderten Abmessungen die Arbeitsöffnung verschließbar gestaltet und drei kleine Windeintrittsöffnungen in symmetrischer Anordnung über dem Schachtfuß angebracht. Damit waren Arbeits- und Windöffnungen voneinander getrennt. Der lufttrockene Ofen mußte einige Stunden trockengeheizt werden, damit die Restfeuchtigkeit, die anderenfalls die Betriebstemperatur merklich herabsenken würde, noch vor Prozeßbeginn vollständig entweichen konnte.

Der Durchmesser der Windeintrittsöffnungen oder Düsen bestimmt wesentlich die zugeführte Menge des Luftsauerstoffs. Neben der bereits genannten Veränderung der Anzahl war auch die Gestalt dieser Öffnungen Gegenstand von Experimenten. Im zweiten Versuch wurde der Düsendurchmesser für einen langsameren Durchsatz der Einsatzstoffe zeitweise bis auf 1 cm verringert. Beim Ofen des Versuchs 3 (Abb. 4) erhielten sie trichterförmige Verlängerungen an der Ofenaußenseite, um größere Ansaugwirkung zu erzielen. Dem Zerstoren der Düsen durch das wiederholte mechanische Freistoßen von Fließschlacke sollte durch leicht verdickte Ausstülpungen an der Innenwandung des Schachtes im Versuch 11 (Abb. 4) vorgebeugt werden. Ab Versuch 14 wurden die Düsen im Neigungswinkel von 45 Grad zur Wandung in den Ofenmantel eingefügt (Abb. 4, Ofen 21), um eine günstigere Ausbildung der für den Prozeß notwendigen Wärmezonen zu erreichen. Dies brachte aber nicht den gewünschten Effekt. Ab Ofen 25 liegen die Düsen wieder waagrecht in der Wandung.

Einen weiteren Faktor beim Ofenbau stellt die Zusammensetzung des Lehms dar. Eine Magerung mit Sand und langfaserigem Pflanzenmaterial erwies sich für die Haltbarkeit der Ofenkonstruktion trotz der Trockenrisse generell als günstig, förderte aber auch gleichzeitig die Wärmeisolation der Ofenwand durch die entstehenden Hohlräume. Bei Verwendung von Brietzer Ton³⁸ und Lehm im Volumenverhältnis 1 : 1 (Versuch 8) im Reaktionsbereich, d. h. bis ca. 50 cm über den Düsen, zeigte sich eine geringere Rißbildung bereits beim Trocknen. Die Sprödigkeit des verwendeten Ofenmaterials führte beim Freistoßen der Düsen von Schlacke jedoch zu größerer Beschädigung der Ofenwand, als das bei dem Parallelversuch (Ofen 7: Lehm und Holzäsche + Holzkohle³⁹ im Volumenverhältnis 1 : 1) der Fall war. Dort trat andererseits eine größere Neigung zur Rißbildung der Ofenwand auf. Besonders im Bereich der Reaktionszone kommt daher wegen besserer Haltbarkeit seit dem Versuch 11 ein Gemisch aus aufgemahlener alter Ofenwandung, Holzkohle und Asche zu den genannten Bestandteilen der Lehmmagerung. Sicher ist der Gedanke der Wiederverwendung von Rohstoffen und restlosen Verwertung anfallender Stoffe keine Erfindung unserer Tage!

Seit dem Bau des Ofens für den Versuch 11 wurde auf ein Weidengerüst verzichtet. Zum einen behinderten die aufrecht stehenden Ruten den Fortgang der Arbeiten, zum anderen überstanden sie die Phasen des leichten oder auch stärkeren Trockenfeuerns zum Beschleunigen des Ofenbaus nicht. Als günstigste Abmessung der Ofenwand hinsichtlich des Verhältnisses von Stabilität und Rißbildung bzw. der Reparatur während des

Schmelzprozesses erwies sich eine Stärke von 5 bis 7 cm. Eine kritische Stelle liegt am Schnittpunkt von Schlackengrubenrand und Ofenfuß. Die starke Hitzeentwicklung führte hier oft zum Abrutschen des ausgetrockneten Sandes. Ein breiter Ofenfuß beugt der Unterhohlung des Ofens vor.

Die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) liegt für Kohlenmonoxid bei 30 ppm (parts per million). Erreicht wurden beim Ofenbau bei gleichzeitigem Trockenheizen des noch feuchten Lehms, bedingt durch unvollständige Verbrennung, Werte von bis zu 300 ppm. Durch die umgebende Frischluft tritt jedoch eine sofortige Verdünnung der CO-Konzentration ein. Zusätzlich ist durch Beachten der Windrichtung, Einhalten geeigneter Schutzmaßnahmen und verantwortungsvolles Handeln den eventuellen Vergiftungserscheinungen vorzubeugen. Unter diesen genannten Bedingungen (und trockener Witterung) ist es möglich, einen Ofen von einer Person in zwei bis drei Tagen zu errichten. Ohne Trockenfeuern verlängert sich die Bauzeit des Ofens um die Trockenphasen, die wiederum von Luftfeuchtigkeit und Außentemperatur bestimmt werden. Der gleichzeitige Bau mehrerer Öfen erweist sich in diesem Fall als arbeits- und zeitökonomisch.

Nach 25 Versuchen scheinen neben den archäologisch vorgegebenen Schlackengrubenmaßen und der Arbeitsgrube ein konischer Ofenmantel mit einer Höhe von 1,10 bis 1,20 m über Düsenebene, vier symmetrisch radiale (Ofen 6, Abb. 4) und waagrecht angeordnete Düsen, eine verschließbare Arbeitsöffnung 10 cm oberhalb der Düsen und ein Gichtdurchmesser von 20 bis 25 cm die für das Rennverfahren in beschriebener Weise günstigsten Parameter der Ofenform darzustellen.

Versuchsdurchführung

Der eigentliche Rennofenprozeß kann in drei Phasen unterteilt werden. In der ersten, der Vorheizphase, wird der Rennofen auf die nötige Prozeßtemperatur gebracht. Daran anschließend folgt die Beschickungsphase, in der Holzkohle und Erz gesetzt werden. Die sogenannte Nachheizphase umfaßt den Zeitraum vom letzten Erzsetzen bis zum Abschluß des Ofenganges. In Tabelle 4 sind die Verfahrenskennwerte der 25 durchgeführten Eisenverhüttungsversuche niedergelegt. Zuerst soll der Verfahrensverlauf der Rennöfen 1 bis 20, welche mit natürlichem Zug betrieben wurden, an ausgewählten Beispielen dargestellt werden.

Das Anheizen der Öfen erfolgte in der Regel mit Holz. Beim ersten Versuch wurde nach fünf Stunden Anheizen mit dem Aufgeben des Erzes begonnen. Holzkohle und Erz sind im Verhältnis 1,15 : 1 schichtweise beschickt worden, wobei ungeröstetes Raseneisenerz zum Einsatz gelangte, welches zuvor durch Pochen auf ca. Walnußgröße gebracht worden war. Etwa zwei Stunden nach der ersten Erzzugabe konnte das Abtropfen von Schlacke durch die Düsenöffnung beobachtet werden. Dieser Vorgang setzte sich während des gesamten Ofenganges fort. Zur Vermeidung eines Sauerstoffüberangebotes im Unterofen - das bedeutet Gewährleistung einer reduzierenden Atmosphäre - ist die Luftzufuhr durch Verkleinern der Wind- und Arbeitsöffnung zwischenzeitlich mehrfach gedrosselt worden.

Im Verlaufe des Rennofenversuches wurde der Schlackengrubenkanal zweimal geöffnet. Somit gelangte Luftsauerstoff in die Schlackengrube, wodurch sich das darin befind-

liche Reisig entzünden sollte, um ein Absenken der sich im Bereich der Arbeitsöffnung angesammelten Schlacke zu ermöglichen. Dieses Absenken mußte jedoch durch Niederdrücken der Schlacke mittels Eisenstangen unterstützt werden. Nach 25 Stunden endete der Versuch durch Unterbinden der Luftzufuhr und Herunterfahren des Ofens. Insgesamt kamen 103,8 kg Erz und 162,3 kg Holzkohle zum Einsatz.

Die nachfolgenden Öfen (Versuche 2 bis 12) wurden mit einer wesentlich längeren Holzanheizphase betrieben, um eine vollständigere Trocknung des Ofenmantels und Erwärmung des die Schlackengruben umgebenden Erdreichs zu erzielen. Der Luftzufuhr dienten drei (später vier) in den Unterofenbereich eingebrachte Düsenöffnungen von 2 bis 3 cm Durchmesser. Die verschließbare Arbeitsöffnung wurde nur noch zum Absenken der Schlacke geöffnet und die verwendeten Raseneisenerze jetzt im gerösteten Zustand (Taf. 1b) eingesetzt (Tab. 2), wobei das Holzkohle-Erz-Verhältnis höher als im ersten Versuch gewählt wurde (Tab. 4).

Das an der Gicht entstehende und dort abgepackelte Reduktionsgas brannte mit einer für Kohlenmonoxid charakteristischen blauen Flamme. Es gelang, eine stabile Prozeßführung bei Höchsttemperaturen von 1 200 °C im Düsenbereich zu erreichen (Abb. 5). Jedoch war immer gegen Ende der Versuche ein Zuwachsen der Düsen mit Schlacke zu verzeichnen. Der Ofengang wurde beendet, wenn das Freihalten der Düsen mittels Eisenstangen nicht mehr zu gewährleisten war.

Das Öffnen des ersten Ofens ließ erkennen, daß sich durch die einseitige Luftzufuhr ein sehr heterogenes Temperaturfeld aufgebaut hatte. Eine Schlackenbildung erfolgte nur im Radius von ca. 25 cm um die Wind- und Arbeitsöffnung. In den anderen Ofenzonen waren die zur Schlackenbildung notwendigen Temperaturen nicht erreicht worden. Über

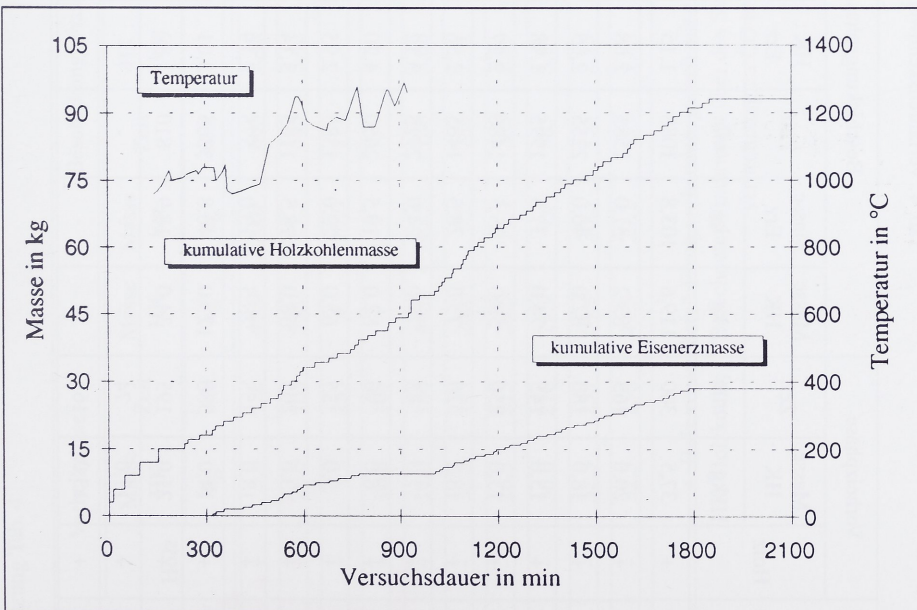


Abb. 5: Verfahrensdiagramm des Rennofenversuchs 6, 1991

Fortsetzung Tab. 4

Versuch	Vorheizphase			Beschickungsphase						Nachheizphase			Summen			Bemerkungen
	Masse HK	Zeit	Holz	Masse HK	Masse Erz	Zeit	HK : Erz	D ²⁾	Windmenge ¹⁾	Masse HK	Zeit	HK	Zeit	Eisen		
	kg	min		kg	kg	min		kg/h	m ³ /h	kg	min	kg	min	kg		
16	+	3,0	20	49,0	20,0	605	2,45	4,86	18,3	1,0	10	53,0	645	*	natürlicher Zug	
17	+	20,0	165	53,0	15,5	645	3,42	4,93	18,6	0,0	0	73,0	810	*	natürlicher Zug	
18	+	+	235	+	15,0	112	-	-	-	+	27	+	374	*	Holzversuch	
19	+	10,0	105	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Vorversuch	
20	+	11,0	160	46,0	12,5	720	3,68	3,83	14,4	1,0	160	58,0	1040	*	natürlicher Zug	
21	-	32,5	145	20,0	9,5	285	2,11	4,21	15,9	4,0	95	56,5	525	2,7	Gebläse, 1 Düse	
22	-	26,5	215	28,5	11,0	365	2,59	4,68	17,6	5,0	225	59,5	805	2,4	Gebläse, 1 Düse	
23	-	30,0	270	29,9	9,6	585	3,11	3,10	11,7	2,3	30	62,2	885	2,7	Gebläse, 1 Düse	
24	-	32,3	255	64,4	30,3	755	2,15	5,10	19,3	0,0	70	96,6	1080	5,7	Gebläse, 2 Düsen	
25	-	32,5	250	42,5	29,2	455	1,45	5,60	21,1	3,8	225	78,8	945	4,9	Gebläse, 2 Düsen	

+ Holz verwendet; * Eisen vorhanden, jedoch mit zu viel Schlacke versetzt, so daß ein Schmelzen nicht möglich war;

HK Holzkohle; ¹⁾ Berechnete Windmenge über den Sauerstoffbedarf des in der Holzkohle enthaltenen Kohlenstoffs, der zur Verbrennung zu CO benötigt wird; ²⁾ Durchsatz Holzkohle

der Arbeitsöffnung hatte sich eine große, jedoch wenig kompakte Schlackenglocke gebildet. Eine Probe aus dem oberen Bereich dieser Schlackenglocke ergab einen Anteil von 10 % metallischen Eisens (Tab. 5). Dieser Wert sank für die Probe aus dem direkten Bereich der Windzufuhr auf praktisch Null.

Im Verlauf der Versuche 2 bis 10 entstand immer ein relativ kompakter Schlackenklotz, der sich unterhalb der Düsenebene ausbildete (Taf. 2a, b). Es gelang jedoch nie, die Schlacke in den unteren Teil der Schlackengrube abfließen zu lassen und vom Eisenschwamm zu trennen. Als Ursache hierfür wurde der zu hohe Anteil an SiO_2 im Raseneisenerz angesehen (Tab. 2), der zu einer strengflüssigen Schlacke führte, die nicht in die Schlackengrube abfließen konnte. Die Schlackenanalysen zeigten (Tab. 5), daß das während des Rennofenprozesses gebildete FeO immer mehr SiO_2 lösen mußte, als für eine optimale Schlackenzusammensetzung mit einem niedrigen Schmelzbereich günstig war (s. Abb. 2).

Aus diesem Grund wurde auf die schon beschriebene hämatitische Erzmischung zurückgegriffen, um ein für den Rennofenprozeß günstiges Fe/SiO_2 -Verhältnis zu erhalten (Tab. 2). Diese Mischung kam erstmalig bei Versuch 13 zum Einsatz, der während des Eisensymposiums am Openluchtmuseum in Eindhoven (Niederlande) durchgeführt wurde⁴⁰. Der Versuch begann nach dem Ausfüllen der Schlackengrube mit Stroh und Holz. Das Anheizen erfolgte zuerst mit Holz, dann mit Holzkohle. Nach drei Stunden war eine Ofentemperatur von ca. 1 230 °C im Düsenbereich erreicht, und die Beschickung des Rennofens mit Erz konnte beginnen. Schichtenweise kamen die Holzkohle und das Holzkohle-Erz-Gemisch zum Einsatz. Der Verfahrensverlauf ist in Abb. 6 dokumentiert. Insgesamt wurden während des Rennofenprozesses 59 kg Holzkohle und 18,9 kg Erz verwendet, was einem Verhältnis von ca. 3,1 : 1 entspricht. In der Beschickungsphase bestand jedoch ein Holzkohle-Erz-Verhältnis von 1,8 : 1. Die Verbrennungsleistung der Holzkohle lag bei 2,5 kg pro Stunde. Der Rennofenprozeß mußte vorzeitig beendet werden, nachdem die flüssige Schlacke aus den Düsen trat und diese verschloß. Die Ursache waren Prozeßstörungen beim Abfließen der Schlacke in die Schlackengrube, womit es zu einer Verschiebung der Schlackenbildungsprozesse in höhere Bereiche des Rennofens kam. Zurückzuführen sind diese Störungen auf das nicht vollständige Beherrschen des Wärmehaushaltes der Schlackengrube, so daß sich diese nicht in erhofftem Maße mit Schlacke füllen konnte. Das Versuchsergebnis stellte einen Schlackenblock mit eingebetteter Eisenluppe dar. Der Einsatz des eisenreichen Erzes ermöglichte die Bildung einer Schlacke auf der Grundlage von Fayalit ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$), welche im optimalen Bereich des Zustandsschaubildes FeO/SiO_2 (Abb. 2) liegt und einen Schmelzpunkt unter 1 200 °C besitzt.

Die daraufhin durchgeführten Versuche 14 bis 17, 19 und 20 waren als Vor- und Vollversuche angelegt. Sie sollten vor allem über das Verkohlungsverhalten der vor Beginn der Schmelze in die Schlackengrube eingestapelten Hölzer Aufschluß geben. Es stellte sich heraus, daß deren Inkohlung während des Prozesses nicht zu den erwünschten Freiräumen in der Schlackengrube beitrug⁴¹, sondern daß die in der Grube herrschenden niedrigen Temperaturen zu einer schnellen Erstarrung der zunächst abtropfenden Schlacke bereits kurz unterhalb der Düsen führte und somit ein Abfließen mit nachfolgender "Klotz"bildung verhinderte. Der Ersatz von Holz durch Stroh brachte demgegenüber eine zu schnelle Inkohlung und damit ein Nachsacken der glühenden Holzkohle aus dem Schacht

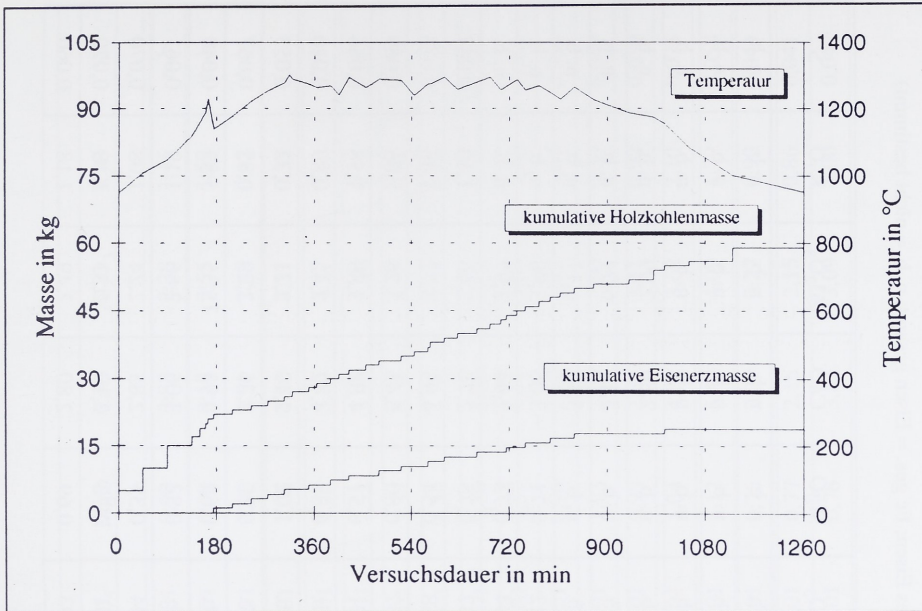


Abb. 6: Verfahrensdiagramm des Rennofenversuchs 13, 1993

in die Schlackenrube mit sich, d. h. wiederum keinen Platz für nachtropfende Schlacke, da die Holzkohle in dieser Grube unter Luftabschluß nicht verbrennen konnte.

Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde im Versuch 21 die Verwendung eines kleinen Gebläses erprobt, welches in der Leistung dem eines mittleren Blasebalges entsprach (s. u.). Ziel war die starke Erwärmung der Schlackenrube mittels dieses Gebläses über den Schlackenrubenkanal, was auch durch die Verbrennung von 32,5 kg Holzkohle in der Vorheizphase gelang (Tab. 4 und Abb. 7). Nach dem Verschließen des Schlackenrubenkanals und dem Umsetzen des Gebläses an die dem Schlackenrubenkanal gegenüberliegende Düse begann das Beschicken mit Holzkohle und Erz. Dem Beaufschlagen nur einer Düse mit Gebläsewind folgte ein Ausflammen an den übrigen drei Düsen (Taf. 2c). Dieses Vorgehen erzeugte ein gleichmäßigeres Temperaturprofil im Unterofenbereich, als es beim Verschließen der anderen drei Düsen der Fall gewesen wäre. Im Vergleich zu Versuch 20 wurde der Durchsatz an Holzkohle nur unwesentlich von 3,8 kg auf 4,2 kg pro Stunde gesteigert. Jedoch erfolgte die Verbrennung der Holzkohle vor nur einer Düse im Gegensatz zu vier Düsen im vorigen Versuch. Diese Erhöhung der düsenspezifischen Verbrennungsleistung hatte ein Ansteigen der Spitztemperatur im Düsenbereich von ca. 1 230 °C auf ca. 1 430 °C zur Folge. Diese maximale Verbrennungstemperatur nahm jedoch über den Ofenquerschnitt relativ schnell ab und erreichte an der dem Gebläse gegenüberliegenden Düsenöffnung nur noch Werte von 1 050 bis 1 100 °C.

Die Temperaturmessung gestaltete sich bei den Spitzenwerten als äußerst kompliziert, da die im Ofen gebildete FeO-reiche Schlacke die Thermolemente stark verschleiß. Weiterhin überschreiten die erreichten Temperaturen den mit Nickel-Chrom-Nickel-Thermolementen maximal zu erfassenden Spitzenwert von 1 370 °C. Somit müßten wesentlich teurere Platin-Rhodium-Thermolemente eingesetzt werden. An die Stelle der Tempera-

Tab. 5: Schlackenanalysen der Rennofenversuche in Masse-% (Fe met. = metallisches Eisen; Fe ges. = Eisen gesamt; n. b. = nicht bestimmt)

Versuch	Probe	Fe ges.	Fe met.	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	P ₂ O ₅	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	S
I	1	39,80	10,70	37,36	0,00	n. b.	37,72	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	2	35,20	3,48	21,56	22,00	n. b.	37,52	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
	3	38,10	0,22	19,12	32,90	n. b.	30,80	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
2	1	46,36	23,36	10,63	21,07	1,50	34,65	n. b.	n. b.	2,80	7,99	n. b.	n. b.
	2	35,77	16,80	11,64	14,14	1,45	40,60	n. b.	n. b.	3,15	6,94	n. b.	n. b.
	3	40,77	11,82	19,82	19,36	1,51	33,66	n. b.	n. b.	3,15	6,11	n. b.	n. b.
3	1	34,06	1,60	28,14	15,10	1,75	41,25	3,12	0,71	3,06	3,90	n. b.	n. b.
	2	33,97	1,49	28,29	14,97	1,72	41,15	2,94	0,73	2,94	3,97	n. b.	n. b.
9/10	3	40,08	0,46	40,97	11,29	2,46	32,12	2,37	0,75	2,76	2,66	1,40	0,047
	4	36,96	0,37	42,50	5,07	1,47	30,56	2,68	0,54	4,93	3,72	1,46	0,073
11		38,49	5,91	36,75	5,73	1,49	27,30	2,57	0,80	6,45	3,26	2,05	0,069
		35,88	1,69	38,30	6,32	1,46	31,85	2,51	0,51	4,88	3,88	1,58	0,066
	1	49,20	23,08	33,55	0,06	0,44	23,82	n. b.	0,88	4,42	2,42	0,89	0,010
12	2	47,03	0,54	54,18	6,25	0,41	25,89	n. b.	1,02	2,47	2,21	0,72	0,053
	3	50,40	17,05	42,47	0,66	0,37	24,42	n. b.	0,85	2,26	2,29	0,85	0,067
	4	5,15	0,60	5,42	0,49	0,10	64,68	n. b.	0,62	0,93	15,35	5,83	0,040
13	5	49,88	23,49	32,48	1,77	0,32	21,33	n. b.	0,82	3,06	2,66	1,19	0,061
	1	49,69	0,84	53,30	10,60	0,19	22,00	0,04	0,35	2,85	2,24	1,08	0,070
	2	48,04	0,08	57,20	5,00	0,18	23,60	0,01	0,73	3,19	2,31	1,18	0,070
	3	47,96	0,01	56,80	5,40	0,17	24,20	0,03	0,69	2,80	2,49	1,18	0,060

Fortsetzung Tab. 5

Versuch	Probe	Fe ges.	Fe met.	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO	SiO ₂	P ₂ O ₅	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	S
21	1	42,20	0,31	55,00	0,00	0,52	25,90	<0,01	0,90	2,83	2,28	1,46	n. b.
	2	42,80	0,34	55,70	0,00	0,57	27,60	<0,01	0,98	3,18	2,55	1,52	n. b.
	3	43,10	0,20	57,70	0,00	0,54	27,00	<0,01	0,90	2,91	2,49	0,62	n. b.
22	1	47,56	0,22	40,63	22,53	0,57	37,60	<0,01	1,26	4,20	4,31	0,37	0,07
	2	48,11	0,17	41,10	22,86	0,51	36,70	<0,01	1,25	3,84	4,27	0,66	0,07
	3	48,74	0,37	42,32	22,12	0,54	34,90	<0,01	1,32	3,91	3,90	0,55	0,08
	4	33,80	0,20	41,80	1,58	0,56	39,30	<0,01	1,32	n. b.	4,38	0,62	n. b.
	5	32,00	0,76	41,80	0,00	0,58	30,70	<0,01	1,39	n. b.	3,28	0,64	n. b.
24	1	46,80	0,34	54,69	5,64	0,52	26,06	<0,01	1,16	3,88	2,88	1,17	0,085
	2	44,24	0,76	52,63	3,67	0,57	27,44	<0,01	1,37	4,41	3,08	1,32	0,086
	3	47,64	0,19	56,91	4,59	0,32	24,75	<0,01	0,96	2,19	3,47	1,07	0,064
	4	49,34	0,28	57,60	6,13	0,34	22,68	<0,01	1,03	2,10	2,80	0,80	0,049
	5	48,68	0,19	55,34	7,82	0,34	24,85	<0,01	0,98	2,39	3,11	0,90	0,050
25	1	44,20	0,55	50,64	6,13	0,24	26,47	<0,01	1,04	4,71	3,62	2,10	0,075
	2	51,29	0,45	46,92	20,54	0,24	30,61	<0,01	1,12	5,42	4,09	1,79	0,058
	3	53,45	0,17	64,21	4,82	0,14	17,04	<0,01	0,76	2,22	2,27	0,90	0,044
	4	53,78	0,50	63,62	5,47	0,15	16,99	<0,01	0,77	2,15	2,15	0,86	0,041
	5	47,22	8,87	44,90	4,93	0,12	26,42	<0,01	0,78	3,81	3,09	1,00	0,042

turmessung in kurzen Intervallen traten nun die punktuelle Überprüfung der Temperatur sowie eine präzise Regelung der Gebläsewindmenge und somit der Verbrennungsleistung, die entscheidenden Einfluß auf die Temperaturzonen im Ofen hat.

Die im Vergleich zu den mit natürlichem Zug betriebenen Öfen erreichten Spitzentemperaturen führten bei einer optimalen Schlackenzusammensetzung zu einer deutlich höheren Überhitzung der Schlacken und damit zu einem relativ guten Schlackenabfluß in die Grube, obwohl diese mit Holzkohle gefüllt war. Unterhalb der mit Wind beaufschlagten Düse hatte sich eine 2,7 kg schwere Luppe gebildet, die etwa bis in die Ofenmitte hineinreichte. Ein Großteil der entstandenen Schlacke war in die Schlackengrube abgelaufen. Der als Wiederholungsversuch mit nur geringfügig veränderten Parametern angelegte Versuch 22 bestätigte die im Versuch 21 gewonnenen Erkenntnisse und lieferte eine 2,4 kg schwere Luppe (Taf. 2d). Die Analyse des Luppeneisens ergab einen relativ hochgekohlten Stahl mit sehr heterogenem Kohlenstoffgehalt von ca. 0,3 bis 1,3 % (Tab. 6 und Abschnitt Ergebnisse der Versuche).

Tab. 6: Analysen des erzeugten Eisens in Masse-%

Versuch	Probe	C	Si	Mn	P	S
13	1	0,02	0,46	0,110	0,19	0,034
21	1	0,81	0,08	0,013	0,024	0,005
	2	0,27	0,03	0,009	0,032	0,011
	3	0,63	0,01	0,008	0,036	0,007
	4	1,28	0,03	0,010	0,055	0,011
22	1	0,75	0,01	0,001	0,028	0,012
	2	1,51	0,01	0,003	0,030	0,020
	3	1,34	0,01	0,001	0,038	0,018
	4	0,36	0,06	0,008	0,048	0,015
	5	0,41	0,04	0,008	0,075	0,018
	6	0,59	0,04	0,013	0,068	0,018
	7	0,86	0,01	0,003	0,062	0,004
23	1	0,29	1,65	0,115	0,066	0,018
	2	0,70	0,14	0,009	0,028	0,009
24	1	0,30	0,26	0,025	0,017	0,008
	2	0,06	0,05	0,005	0,012	0,005
	3	0,28	0,07	0,008	0,029	0,008
25	1	0,36	1,27	0,060	0,092	0,022
	2	0,55	0,02	0,003	0,054	0,005
	3	0,88	0,02	0,004	0,032	0,006

Ziel der weiteren Versuche war es, über die Zwischenstufe eines kohlenstoffärmeren Stahls ein weiches Schmiedeeisen herzustellen, um die gesamte Bandbreite der Rennofenmetallurgie nachzuvollziehen. Der Folgeschritt bestand im Senken der Verbrennungsleistung der Holzkohle im Ofen. Dies sollte eine geringere Aufkohlung der

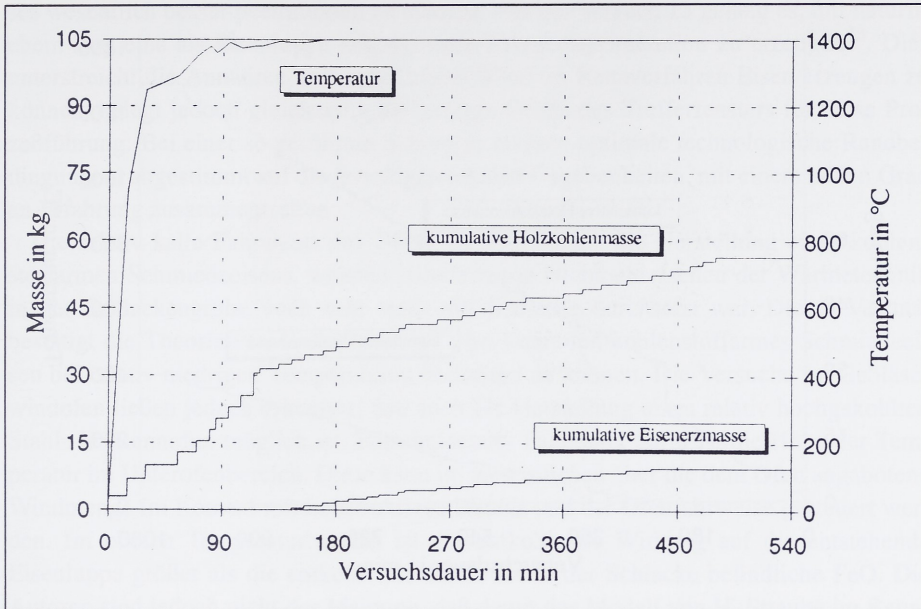


Abb. 7: Verfahrensdiagramm des Rennofenversuchs 21, 1995

Eisenluppe bewirken und zudem eine Erhöhung der Luppengewichte erbringen sowie die Auslastung der Schlackengrube mit Schlacke erhöhen. Die Versuche 23 bis 25 waren auf dieses Hauptziel gerichtet. In Versuch 23 wurde dann auch die Verbrennungsleistung in der Beschickungsphase im Vergleich zu Versuch 22 auf 66,2 % gesenkt, was folglich einen kohlenstoffärmeren Stahl zum Ergebnis hatte. Eine weitere Senkung der spezifischen Düsenverbrennungsleistung um weitere 11,8 % (Tab. 4) gelang im Versuch 24 durch den Einsatz von nun zwei Gebläsen, die an jeweils gegenüberliegenden Düsenöffnungen wirksam wurden (Abb. 8). Dies führte zugleich zur Bildung von je einer Luppe hinter den windbeaufschlagten Düsen, die im Zentrum der Düsenebene lose durch ein Gemisch von Schlacke und Eisen miteinander verbunden waren. Die kältere Fahrweise des Ofens brachte jedoch gleichzeitig eine geringere Überhitzung der sich gebildeten fayalitischen Schlacke mit sich und somit ein wiederum nicht ausreichendes Abfließen in die mit Holzkohle gefüllte Schlackengrube.

Im Versuch 25, der während des Nordic Iron Seminars im Historisk-Arkæologisk Forsøgscenter in Lejre (Dänemark) stattfand, wurde deshalb wieder eine Änderung der Prozeßführung vorgenommen. Eine zeitweise Beaufschlagung des Schlackengrubenkanales mit Gebläsewind sollte die sich in der Schlackengrube befindende Holzkohle verbrennen und somit Hohlräume zum Abfließen der Schlacke aus der Düsenzone schaffen. Da es jedoch hinter den Ausflammdüsen zu einem Nachrutschen der Holzkohle in die Schlackengrube kam, führte auch dieses Vorgehen nicht zum Erfolg. Erreicht wurde im Gegenteil nur ein Steigern der Verbrennungsleistung, was sich wiederum auf die Erhöhung des Kohlenstoffgehaltes in der Luppe auswirkte.

Der Versuch 18 stellte eine Besonderheit dar. Wie erwähnt, fand er auf Einladung der Norwegischen Technischen Hochschule Trondheim im Freilichtmuseum Storbekken,

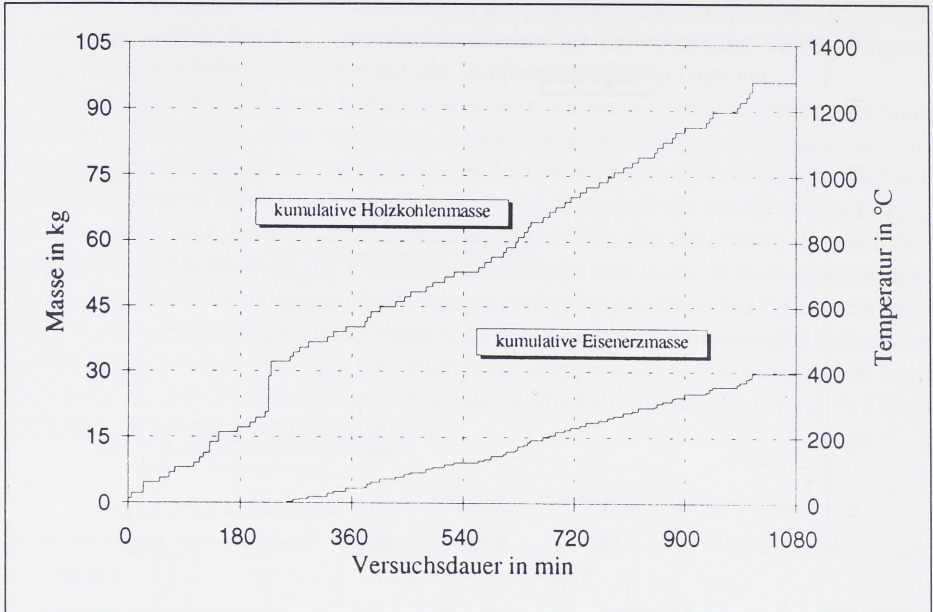


Abb. 8: Verfahrensdigramm des Rennofenversuchs 24, 1996

Gemeinde Ennod, statt⁴². Allein der Ofenbau setzte durch Klima und Standortfaktoren andere Maßstäbe: Verwendung von fettem Ton mit Strohmagerung anstelle des bekannten gemagerten Lehms und Bau des Herdraumes aus in Ton gesetzten Steinen. Völlig ungewohnt war der durch Ausgrabungsfunde belegte Einsatz von Holz, das am Standort durch die kurze jährliche Vegetationsperiode kompakt in der Struktur war und dadurch über einen hohen Heizwert verfügte. Die stark veränderten Rahmenbedingungen - gleichzeitige Veränderungen einer Summe von Parametern - stellten die Experimentatoren vor eine nur schwer zu bewältigende Herausforderung, die sich im metallurgischen Versuchsergebnis zwar negativ niederschlug, jedoch neue Erkenntnisse zur Handhabung des Brennstoffes Holz und der Ofenbautechnik brachte.

Ergebnisse der Versuche

Die durchgeführten Rennofenversuche zeigten, daß die Herstellung metallischen Eisens unter den reduzierenden Bedingungen ohne weiteres möglich ist. Selbst aus sehr eisenarmen Erzen wird metallisches Eisen reduziert. Die Problematik des Rennofenprozesses besteht darin, die jeweiligen technologischen Randbedingungen so zu wählen, daß eine fayalitische Schlacke gebildet und von der gleichzeitig entstehenden Eisenluppe separiert wird. Der Vorteil der mit Gebläsewind beaufschlagten Öfen besteht im Unterschied zu den mit natürlichem Windzug betriebenen in der Möglichkeit, über den steuerbaren Parameter Windmenge und damit über die Verbrennungsleistung den Verlauf des Prozes-

ses wesentlich besser beeinflussen zu können. Nur bei Versuch 13 gelang es, mit natürlichem Zug eine als Eisenluppe ansprechbare Eisenkongglomeration zu erzeugen⁴³. Dies unterstreicht die Annahme, mit natürlichem Wind im Rennverfahren Eisen erzeugen zu können, belegt jedoch gleichzeitig die geringe Größe des Trefferfensters für diese Prozeßführung. Bei einer so geführten Schmelze müssen optimale technologische Randbedingungen, abgestimmt auf die jeweiligen lokalen Gegebenheiten, mit einem hohen Grad an Erfahrung zusammentreffen.

Die relativ kalte Fahrweise des Ofens 13 ermöglichte die Herstellung eines kohlenstoffarmen Schmiedeeisens, welches jedoch durch Nichtbeherrschen der Wärmetechnik in der Schlackengrube noch sehr stark mit Schlacke durchsetzt war. Dieser Versuch bestätigt die Theorie von E. Schürmann⁴⁴, im Rennofen kohlenstoffarmes Schmiedeeisen bei relativ niedrigen Temperaturen herstellen zu können. Die Versuche im Gebläsewindofen ließen jedoch erkennen, daß auch die Herstellung eines relativ hochgekohlten Stahls im Rennofen möglich ist. Entscheidender Parameter dafür ist die Höhe der Temperatur im Unterofenbereich. Diese kann im wesentlichen über die dem Ofen angebotene Windmenge im Kontext mit konstruktiven Details und der Ofenfahrweise gesteuert werden. Im oberen Temperaturbereich ist die aufkohlende Wirkung auf die entstehende Eisenluppe größer als die entkohlende durch das in der Schlacke befindliche FeO. Die Autoren sind jedoch nicht der Meinung, daß damit das Modell von H. Straube im Rennofenprozeß⁴⁵ Gültigkeit besitzt. Es besagt, daß im Rennofen vor den Düsen über den Zwischenschritt Roheisen Stahl entsteht, der anschließend durch den Sauerstoff des Windes entkohlt wird. Sie sind vielmehr der Auffassung, daß eine Erhöhung der Unterofen-temperatur zu einer Aufkohlung des Eisens führt, was eine Erweiterung der Theorie E. Schürmanns⁴⁶ darstellt. Ab einem noch zu ermittelnden Temperaturbereich erfolgt dann der Übergang zur Roheisenherstellung, der jedoch nicht Ziel des Rennofenprozesses sein konnte und auch eine völlig andere Schlackenfahrweise verlangt. Ausführlichere Überlegungen zur Erweiterung der Theorie der Rennofenmetallurgie, die unter anderem auf den Versuchen der Autoren beruhen, sollen nach weiteren Recherchen zu einem späteren Zeitpunkt in einer metallurgischen Fachzeitschrift veröffentlicht werden.

Durch gesteuertes Variieren der Windmenge gelang es, Stahl mit unterschiedlichen Kohlenstoffgehalten herzustellen. In Versuch 24 wurde ein Stahl mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,06 bis 0,30 % erzeugt (Tab. 6), der über gute schmiedetechnische Eigenschaften verfügte, wie weiter unten auszuführen sein wird.

Die in den Gebläseöfen hergestellten Luppen sind makroskopisch betrachtet mit einer Vielzahl von Hohlräumen (Abb. 9) und geringen Schlackeneinschlüssen versetzt. Es war somit eine gute Trennung zwischen dem Luppeneisen und der darunter befindlichen Schlacke erreicht worden.

Der Vergleich historischer Schlacken (Tab. 1) mit den in Versuchen erzeugten Schlacken (Tab. 5) brachte folgende Ergebnisse: Der Kieselsäuregehalt der mit natürlichem Zug entstandenen Versuchsschlacken (Versuche 1-12) ist im Durchschnitt wesentlich höher als bei den archäologischen Fundstücken. Als Ursachen sind die zu hohen Kieselsäureanteile im verwendeten Raseneisenerz und zu niedrige Prozeßtemperaturen anzusehen. Versuch 13 sowie die Gebläseofenversuche 21 bis 25 erreichten im Eisengesamt- und im Kieselsäuregehalt den historischen Schlacken adäquate Werte. Die metallischen

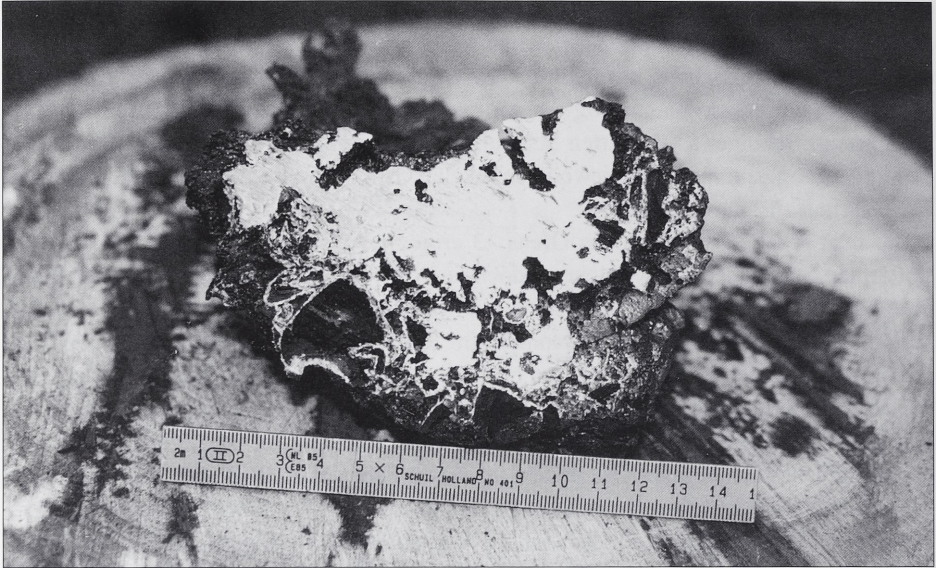


Abb. 9: Im Rennofenversuch 24 erzeugte Eisenluppe. Masse des abgetrennten Luppenstückes 1680 g

Eisengehalte dieser Schlacken sind im allgemeinen sehr gering und zeugen von einer jeweils guten Trennung von Eisen und Schlacke durch die historischen Hüttenleute. Die stark differierenden Werte an P_2O_5 sind auf die unterschiedliche Herkunft der zum Einsatz gelangten Erze zurückzuführen. Damit war es bei den Experimenten möglich, die Gesamtproblematik des Phosphors im Rennofenprozeß außer acht zu lassen, da es bei den Versuchen als primär angesehen wurde, das Luppenbildungsverhalten und deren Aufkohlung zu untersuchen.

Die Versuche zeigten weiterhin, daß eine Eisenerzeugung im Rennofenprozeß ohne Zuschlagstoffe auskommt, da die Hauptbestandteile der Schlacke in der Gangart des Erzes, der Holzkohlenasche sowie in der Ofenwand in ausreichenden Mengen enthalten sind. Historische und experimentelle Schlacken widersprechen einer Verwendung von Wiesenkalk im Rennofenprozeß.

Die einstigen Standorte aufgelassener Öfen gaben Erkenntnisse über die Erhaltungsbedingungen bzw. Zerfallerscheinungen der Rennofenstellen nach ein bis zwei Jahren. Da der Ofenmantel nur im Bereich der Reaktionszone und des Herdraumes (also bis ca. 30 cm oberhalb der Düsenebene) die keramische Garbrandphase erreichte und damit eine irreversible Veränderung der Kristallstruktur eintrat, zersetzte sich der obere Ofenmantelteil sehr rasch wieder bis zur Unkenntlichkeit. Zurück blieben bereits nach einem Winter oberflächlich nur noch zwischen der Vegetation wenig sichtbare und geringe Rotlehmreste des vergangenen Ofenmantels. Die Schlackengruben waren oberflächlich als solche schon nicht mehr erkennbar.

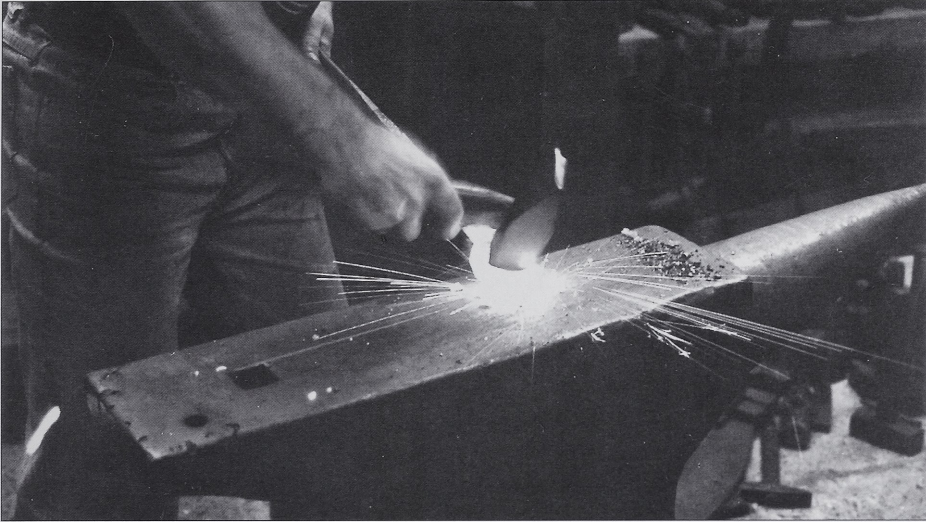


Abb. 10: Ausschmieden der Eisenluppe

Ausschmieden der Luppen

Das Ausschmieden der Luppen (Abb. 10) erfolgte in der Schmiedewerkstatt des Kunstschmiedemeisters Thys van de Manakker, Helenaveen (Niederlande)⁴⁷. Von der in Versuch 13 gewonnenen Luppe mit ca. 1,5 kg Masse wurde ein 510 g schweres Stück abgetrennt und im Holzkohlefeuer auf ca. 1 250 °C erwärmt (Ausheizen). Durch Ausschmieden - wobei der erste Arbeitsschritt mehr ein Pressen darstellt - sollte die noch enthaltene Schlacke entfernt werden, was aber nur zum Teil gelang. Der erzeugte Eisenbarren mit einem Gewicht von 150 g hatte noch eine Vielzahl von Schlackeneinschlüssen. Da diese bei der weiteren Bearbeitung des Eisenbarrens ein Abplatzen der Randpartien bewirkten, war die Grenze für erneutes Aus- und Umschmieden erreicht.

Auch die Luppen der Versuche 21, 24 und 25 erfuhren eine Weiterbehandlung. Die besten Verarbeitungseigenschaften zeigte Luppe 24, die einen geringen Kohlenstoffgehalt aufwies. Es wurde ein Luppenstück von 2 950 g (Abb. 9) im Holzkohlefeuer erwärmt und zu einem 650 g schweren Barren (Abb. 11) und einem weiteren von 410 g ausgeschmiedet. Der Arbeitsaufwand für einen einzelnen Schmied betrug sieben Arbeitsstunden. Während des Schmiedens auftretende Risse im Eisenbarren konnten relativ problemlos feuerverschweißt werden. Die Warmverformungseigenschaften (Duktilität) des ferritisch-perlitischen Materials (Abb. 12) waren als gut einzuschätzen. Erst beim sehr flachen Ausschmieden eines Barrenendes und anschließendem Umformen über einem Dorn erreichte das Material die Grenzen seiner Duktilität. Ursache waren die noch enthaltenen mikroskopischen Schlackeneinschlüsse, die als Kerben wirkten und somit zum Aufreißen des Materials führten. Abbildung 13 ist ein Gefügebild der im Rennofenversuch 25 erzeugten Luppe, das Schlackeneinschlüsse zeigt, von denen solche Rißansätze ausgehen. Den heterogenen Aufbau des Luppeneisens stellt Abbildung 14 dar.

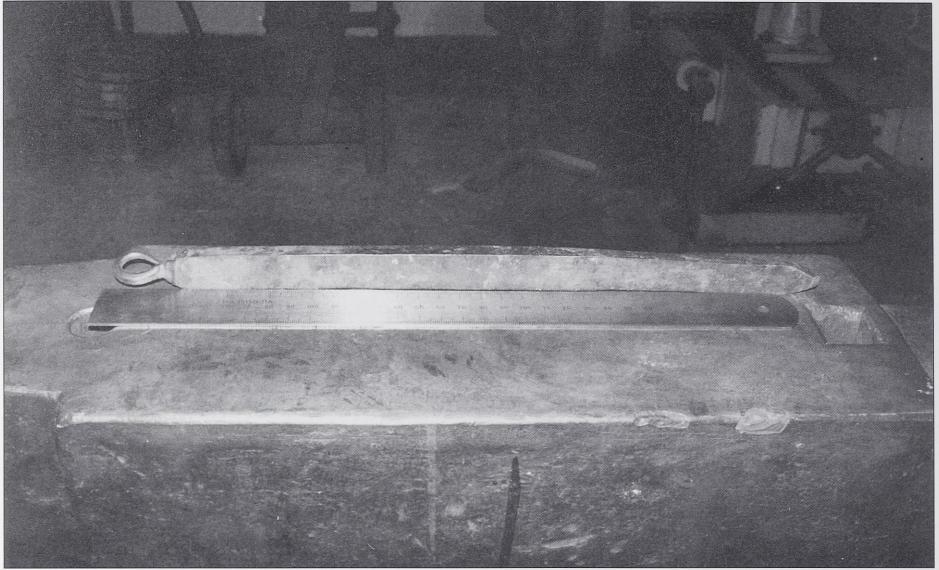


Abb. 11: Ausgeschmiedeter Eisenbarren, Masse: 650 g

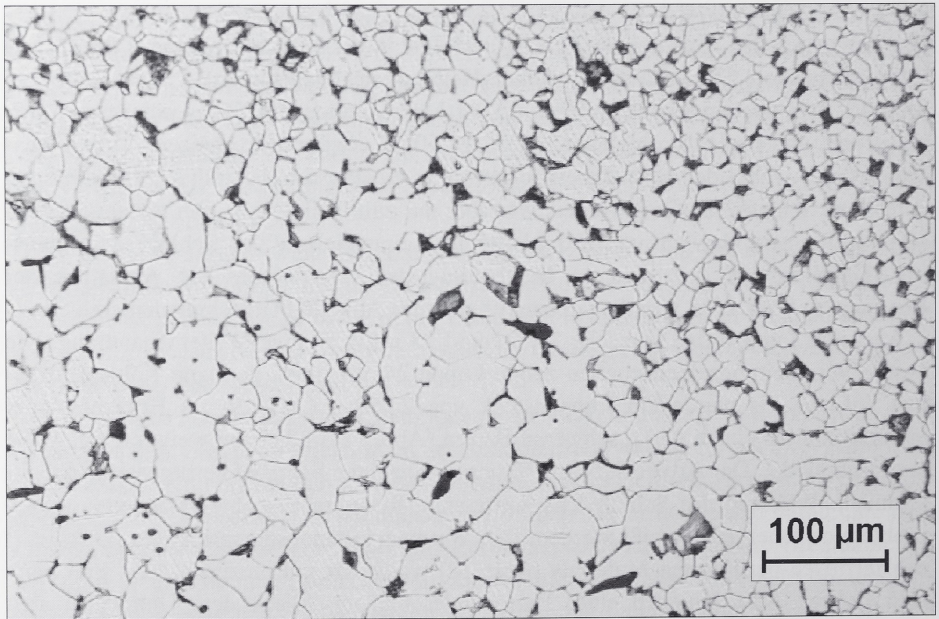


Abb. 12: Gefügebild der im Rennofenversuch 24 erzeugten Luppe (ausgeschmiedet).
Ferritisch-perlitische Struktur, geätzt mit 3 %iger alkoholischer HNO_3

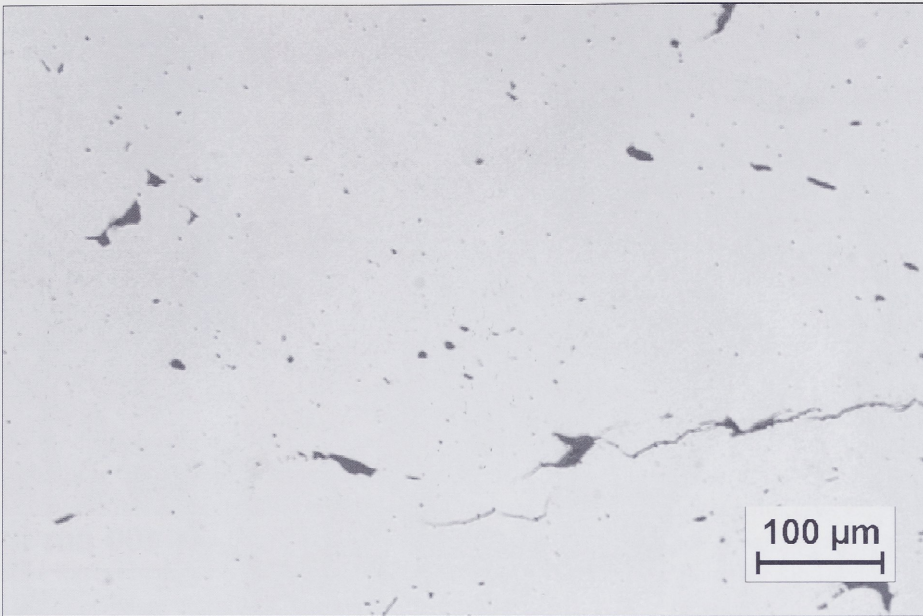


Abb. 13: Gefügebild der im Rennofenversuch 25 erzeugten Luppe (ausgeschmiedet).
Schlackeneinschlüsse mit Rißansatz, poliert

Obwohl Luppe 24 zu großen Teilen niedriggekohlt ist, treten Partien mit hohem Kohlenstoffgehalt auf. Die Abbildung zeigt eine Feuerverschweißung zwischen ferritischen und perlitischen Gefügestrukturen. Auch die Feuerverschweißungsschlacken, die während des Ausschmiedens der Luppe in die Eisenmatrix gelangten, führten zu derartigen Aufreißungen im Material. Das Ausbringen aus der Luppe beim Ausschmieden betrug 35,9 %. Zu diesem Wert muß jedoch gesagt werden, daß er bei zwei Schmieden wesentlich höher gewesen wäre. Die größten Eisenverluste treten durch Zunder auf. Je geringer die Anzahl der Schweißhitzen beim Schmieden gehalten werden kann, desto höher ist das Ausbringen. Zwei Schmiede benötigen wesentlich weniger Schweißhitzen zum Ausschmieden, da einer die Luppe halten kann, während der andere schlägt.

Wesentlich problematischer gestaltete sich das Ausschmieden der hoch kohlehaltigen Luppen (Tab. 6). Hohe Kohlenstoffgehalte bewirken im Stahl eine Absenkung der maximal möglichen Warmumformungstemperatur. Um die Luppen jedoch zu einem Barren ausschmieden zu können, müssen sie auf Schweißtemperatur (ca. 1 250 °C) gebracht werden. Das heißt, das Trefferfenster für den Schmied zur Erzeugung eines Eisenbarrens aus diesem Ausgangsmaterial wird sehr klein und stellt höchste Anforderungen an dessen Können, und nur sehr erfahrene Schmiede beherrschen diese Technik.

In Abbildung 15 wird ein perlitisches Gefüge mit Sekundärzementit dargestellt, welches aus der im Rennofenversuch 21 erzeugten und ausgeschmiedeten Luppe bei Luftabkühlung stammt. Dieser hoch kohlenstoffhaltige Stahl (ca. 0,9 % C) eignet sich hervorragend zum Härten und somit als Werkstoff für Werkzeuge mit hohem Verschleißsprü-

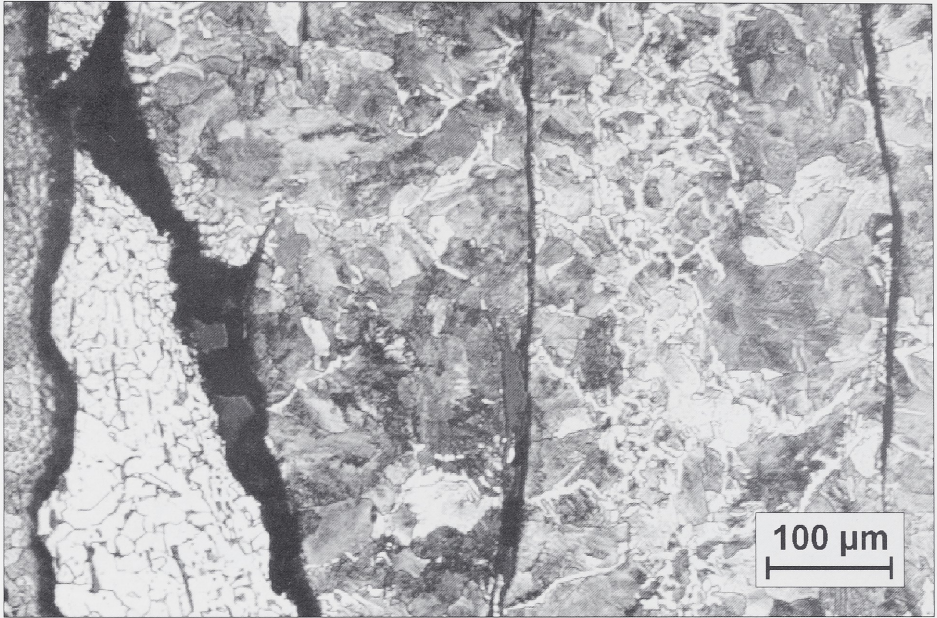


Abb. 14: Gefügebild der im Rennofenversuch 24 erzeugten Luppe (ausgeschmiedet). Feuerschweißung zwischen ferritischen und perlitischen Gefügestrukturen mit Schlackeneinschlüssen, geätzt mit 3 %iger alkoholischer HNO_3

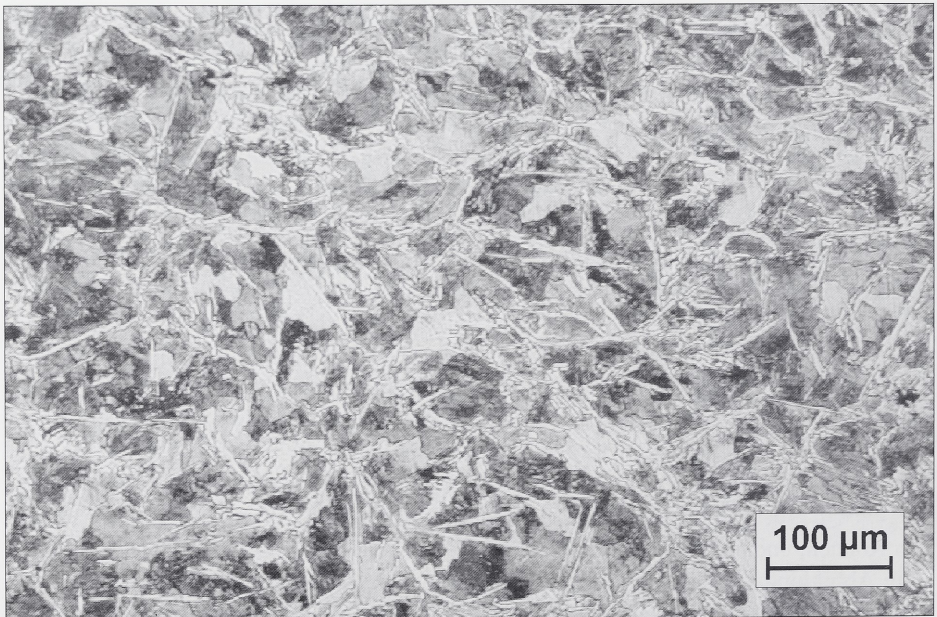


Abb. 15: Gefügebild der im Rennofenversuch 21 erzeugten Luppe (ausgeschmiedet). Perlitische Struktur mit Sekundärzementit, geätzt mit 3 %iger alkoholischer HNO_3

chen. Ein Teil des Barrens wurde abgetrennt und einem Härtungsvorgang unterzogen. Der durch das Härten erzeugte Martensit (Abb. 16) wies dann eine Härte von 824 HV10 auf, im Vergleich zu 262 HV10 des Ausgangsmaterials⁴⁸.

Das Hochrechnen von Arbeitszeiten auf hergestellte Gegenstände und der Vergleich zu Arbeitsvorgängen in historischen Zeitepochen muß jedoch, wie im Abschnitt über das archäologische Experiment bereits ausgeführt, auch weiterhin unbeachtet bleiben. Zum Ausschmieden von insgesamt 6,17 kg Luppe zu 2,31 kg Barrenmaterial benötigte der erfahrene Schmied 19 Arbeitsstunden. Jedoch wäre der Zeitaufwand bei zwei Schmieden durch die auftretenden Synergieeffekte um mehr als die Hälfte reduziert worden.

Zusammenfassung

Die für die Versuche zur Verfügung stehenden Raseneisenerze minderer Qualität sind nur nach aufwendiger Aufbereitung verhüttbar, welche jedoch bisher aufgrund des hohen Zeit- und Arbeitsaufwandes nicht in ausreichendem Maße stattfinden konnte. Aus Erz-mischungen, die in ihren physikalischen wie chemischen Eigenschaften denen der aufbereiteten Raseneisenerze (mit Ausnahme des Phosphorgehaltes) vergleichbar sind, können sowohl im Rennverfahren mit natürlichem Windzug als auch im Gebläseofen Luppeneisen erzeugt werden. Der Vorteil des Gebläseofens liegt in der wesentlich besseren Steuerung des Verhüttungsprozesses über die zugeführte Windmenge. Trotz unterschiedlich

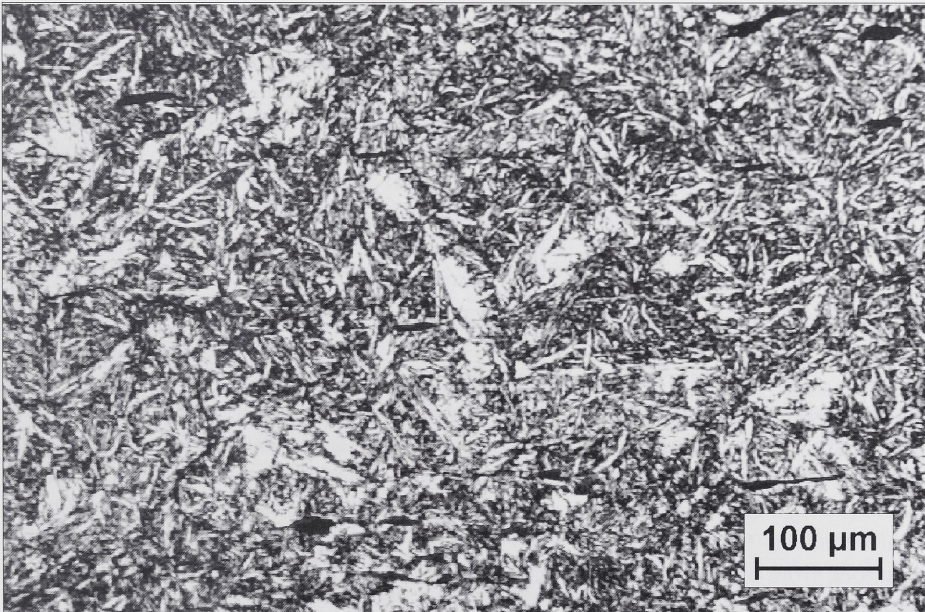


Abb. 16: Gefügebild der im Rennofenversuch 21 erzeugten Luppe (ausgeschmiedet und gehärtet). Martensitische Struktur mit Restaustenit, geätzt mit 3 %iger alkoholischer HNO_3

angelegter Versuche gelang es bisher nicht, den vollständigen Schlackenabfluß in die Schlackengrube wärmetechnisch zu beherrschen.

Auch beeinflussen die Zusammensetzung des Ofenbaumaterials und konstruktive Details der Ofenanlage das Ergebnis einer Erzverhüttung in chemischer und physikalischer Hinsicht.

Die im Gebläseofen erzeugten Luppengewichte betragen 2,4 bis 5,7 kg, was einem Eisenausbringen von ca. 30 bis 50 % entspricht. Der Kohlenstoffgehalt schwankte je nach Ofenfahrweise mit geringem bzw. stärkerem Windangebot zwischen niedriggekohlter (ca. 0,2 % C) und hochgekohlter Luppe (ca. 0,9 % C). Im Schmiedeprozess erwies sich die niedriggekohlte Luppe als gut schmiedbar, während die hochgekohlte schmiedetechnisch schwieriger zu handhaben war, jedoch im Gegensatz zur kohlenstoffarmen Luppe eine sehr gute Härte aufwies. Insgesamt wurden aus 6,17 kg Luppenmaterial 2,31 kg Barrenmaterial ausgeschmiedet, was einem Ausbringen von 37,4 % entspricht.

Zukünftig wird zum einen auf den Einsatz aufbereiteter Raseneisenerze zu orientieren sein, wobei der im Erz vorhandene Phosphor und dessen Überführung in die Schlacke einen weiteren Forschungsansatz bilden soll. Andererseits ist die Problematik der Schlackengrube weiter zu verfolgen, und es sind Blasebälge zur Erhöhung der Authentizität einzusetzen.

Die Fortführung der Versuche dient dem Ziel, den archäologischen Funden adäquate Eisenwerkzeuge herzustellen, deren Gebrauchswert zu testen und einen Abgleich zwischen archäologischen und experimentellen Eisenwerkzeugen als Beitrag zur Kulturge-schichte unter Einbeziehung der experimentellen Archäologie zu erreichen. Doch bis dahin ist es trotz der erzielten Teilerfolge noch ein weiter Weg.

Summary

The article sums the results from ten years of interdisciplinary collaboration covering ferrous archeometallurgy and its specific experimental issues.

Bloomery iron was produced both by natural draft and in ventilation kiln from ore mixtures which physical and chemical characteristics (with exception of phosphorous content) resembled those of treated bog ores. The advantage of ventilation furnaces is the markedly improved process control via the amount of air.

Furthermore the composition of the refractory materials and constructional details of the furnace influence the result of the metallurgical process in physical and chemical concern. The weights of bloom produced in the aspirated furnace were 2.4 - 5.7 kg, representing an iron production efficiency of about 30-50%. The carbon content varied depending on the process routes between low carbon (about 0.2 %C) and high carbon (about 0.9 %C) blooms. During smithing the low carbon bloom was easily manageable while the high carbon bloom was more difficult to forge, but much more susceptible to heat treatment.

In total from 6.17 kg bloom 2.31 kg of product was obtained during forging, resulting in an efficiency of 37.4 %.

Begriffserklärungen

Arbeitsgrube: Dem Rennofen vorgelagerte Grube zur besseren Bedienung des Ofens

Aufkohlen: Anreicherung des Eisens mit Kohlenstoff

Austenit: Das Eisen besitzt eine kubisch flächenzentrierte Gitterstruktur und kann bei 1 147 °C bis zu 2,06 % Kohlenstoff lösen. Beim Absenken der Temperatur wandelt sich die Gitterstruktur bei 1 392 °C in kubisch flächenzentriert und bei 911 °C zurück in kubisch raumzentriert um. Benannt wurde diese Gefügestruktur nach dem englischen Metallurgen W. C. Roberts-Austen (1843-1902).

Begleitelemente: Begleitelemente sind chemische Elemente, die im Eisen unbeabsichtigt enthalten sind, z. B. Phosphor, Schwefel und Stickstoff.

Beschickung: Bezeichnung für das Einbringen der Einsatzstoffe in den Rennofen.

Einsatzstoffe: Zu den Einsatzstoffen zählen bei einem Verhüttungsprozeß die verwendeten Erze, die Brennstoffe und gegebenenfalls die Zuschläge. Sie werden über die Gicht dem Ofen zugeführt.

Eisen: Das Eisen (lat. ferrum) ist ein chemisches Element. Technisches Eisen ist eine Legierung mit üblicherweise mehr als 94 % Eisen, Legierungs- und Begleitelementen (siehe dort).

Eisenausbringen: Der prozentuale Anteil des in den Ofen bzw. Schmiedevorgang eingebrachten Eisens, welcher nach dem Prozeß in metallischer Form zur Weiterverwendung zur Verfügung steht. Den Differenzbetrag findet man beim Rennofenprozeß in der Schlacke, beim Schmieden in der Schmiedeschlacke und im Zunder.

eutektoide Reaktion: Beschreibt die Reaktion bei 723 °C, in welcher der Austenit (mit 0,8 % Kohlenstoff) bei sinkenden Temperaturen in Ferrit und Zementit zerfällt. Die entstehende lamellare Struktur wird Perlit genannt.

Fayalit: Dieses Eisensilikat ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) ist Hauptbestandteil der Schlacken aus dem Rennofenprozeß.

Ferrit: Ferrit (lat. ferrum) ist die metallographische Bezeichnung für α -Eisen mit kubisch raumzentrierter Gitterstruktur, die bei 723 °C maximal 0,02 % Kohlenstoff zu lösen vermag. Bei einer Abkühlung wandelt Eisen bei 911 °C von Austenit in Ferrit um.

Feuerschweißen: Beim Feuerschweißen wird unter Wirkung einer Preßkraft (Hammerschlag des Schmiedes) der Werkstoff im teigigen Zustand zusammengeschweißt (unlösbar miteinander verbunden).

Gangart: Als Gangart bezeichnet man die in den Erzen enthaltenen nichtmetallischen Stoffe, z. B. Kieselsäure, Kalk, Tonerde u. a., die bei der Verhüttung unter eventueller Zugabe von Zuschlägen und der Asche von Holzkohle oder Koks die Schlacke bilden.

Gefüge: Anordnung und Aussehen der Kristalle bzw. Kristallite in einem metallischen Werkstoff. Die Metallographie hat für typische Gefügebestandteile und -ausbildungen besondere Namen geprägt, z. B. Ferrit, Austenit, Perlit, Martensit usw.

Goethit: Ein Eisenhydroxid der Zusammensetzung $\alpha\text{-FeOOH}$. Es ist einer der beiden Hauptbestandteile des Limonits. Als Verwitterungsprodukt bildet es den Hauptbestandteil des Raseneisenerzes. Benannt von Lenz (1806) nach J. W. v. Goethe.

Gicht: Allgemeine Bezeichnung für den oberen Teil von Schachtöfen. Durch die Gicht wird die Beschickung des Ofens vorgenommen.

Hämatit: Dieses nach seiner blutroten Farbe benannte Eisenoxid ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), welches bereits von Theophrastos (315 v. Chr.) erwähnt wurde, stellt heute weltweit das wichtigste Eisenerz dar.

Härten: Als Härten bezeichnet man die Kombination von Erwärmung (Austenitisieren) und Abschrecken, dessen Zweck die Einstellung eines martensitischen Gefüges ist.

Hammerschlag: Hammerschlag ist beim Schmieden anfallender Zunder (siehe dort).

Legierung: Die Legierung ist eine Lösung von Metallen oder Nichtmetallen in Metallen. Ihr Aggregatzustand ist fest (kristalline Struktur).

Legierungselemente: Legierungselemente sind chemische Elemente, die in einem Grundmetall wie z. B. Eisen zugefügt, d. h. zulegiert werden mit dem Ziel, die Eigenschaften des Grundmetalls in einer bestimmten Richtung zu beeinflussen.

Luppe: Als Luppe wird das Eisenprodukt der nach dem Rennverfahren (siehe dort) arbeitenden Öfen bezeichnet.

Martensit: Entsteht bei extrem schneller Abkühlung von Austenit, z. B. Abschrecken in kaltem Wasser. Durch die schnelle Abkühlung ist der Kohlenstoff zwangsgelöst, was zu einer tetragonal verzerrten Gitterstruktur führt. Diese ist verantwortlich für die hohe Härte und die Sprödigkeit des Martensits. Unter dem Mikroskop zeigt er eine nadlige Struktur. Benannt wurde diese Gefügestruktur nach dem deutschen Werkstoffkundler A. v. Martens (1850-1914).

Metallographie: Oberbegriff für makroskopische und mikroskopische Prüfungen von Metallen. Hierbei wird die geschliffene und geätzte Werkstoffoberfläche im Mikroskop betrachtet und eventuell fotografiert.

Ofengang: Betreiben des Ofens zu Produktionszwecken

Ofensau: Bezeichnung für einen im Ofen erstarrten Metallblock. Dieser Begriff sollte nicht für Schlackenblöcke oder -klötze verwendet werden.

Perlit: Charakteristisches lamellares Gefüge, bestehend aus einer Wechselfolge von Ferrit und Zementit, welches sich bei langsamer Abkühlung infolge der eutektoiden Reaktion bildet. Die Bezeichnung Perlit wurde von dem englischen Naturforscher H. G. Sorby 1826 eingeführt, und sollte ursprünglich an die Streifen der Schale einer Perlmuschel erinnern.

Pyrit: Dieses sulfidische Erz (FeS_2), landläufig als Katzensgold bekannt, spielt heute in der Eisengewinnung keine Rolle mehr, stellt aber mit seinem Schwefelgehalt von 53,4 % das wichtigste Schwefelerz dar.

Reduktion: Als Reduktion wird bei der Erzeugung von Eisen die Überführung der in der Natur vorkommenden Oxidationsstufen des Eisens, Fe_2O_3 und Fe_3O_4 , in Wüstit, FeO , und in Eisen bezeichnet. Als Reduktionsmittel werden dabei CO , H_2 und fester Kohlenstoff genutzt.

Rennofen: Verhüttungssofen, in dem im direkten Verfahren aus Eisenerz schmelzbares Eisen gewonnen wird. Es existieren zahlreiche Ausführungen dieses Ofentyps, welche sich in der Bauart (Konstruktion, Dimensionen, Materialien) unterscheiden.

Rennverfahren: Rennverfahren nennt man das metallurgische Verfahren, bei dem direkt aus dem Eisenerz schmelzbares Eisen im teigigen Zustand gewonnen wird.

Restaustenit: Durch schnelles Abkühlen (Abschrecken) oder durch isotherme Umwandlung bei ausreichend tiefer Temperatur können Anteile von nicht umgewandeltem Austenit (Restaustenit) im Gefüge auftreten. Häufig weist Martensit in übereutektoiden Eisen-Kohlenstofflegierungen (C-Gehalt $>0,8$ Masse-%) kleine Restaustenitgehalte von 2-5 Vol-% auf.

Roheisen: Roheisen ist eine Legierung aus Eisen und mindestens 2 % Kohlenstoff, die noch Silizium, Mangan, Phosphor und Schwefel enthält. Es ist ein Produkt des Hochofens oder seiner mittelalterlichen Vorläufer, wie Floß- oder Blauofen. Roheisen ist im Unterschied zu Stahl nicht kalt oder warm verformbar. Im westlichen Kulturkreis erst seit dem 13./14. Jh. in Gebrauch, in China bereits seit dem 5. Jh. v. Chr. bekannt. Der Begriff Roheisen sollte im Zusammenhang mit Eisenprodukten aus dem Rennofenprozeß nicht verwendet werden, um Verwechslungen zu vermeiden. Für diese Eisenprodukte sollten die Begriffe Luppe, Luppeneisen oder Rennfeueisen verwendet werden.

Schlacke: Schlacken sind schmelzflüssige oder erstarrte Mischungen geschmolzener Oxide bzw. nach der Iontheorie sind es Mischungen einfacher und/oder polymerisierter Anionen, die durch Kationen elektrisch neutralisiert werden. Gebildet wird sie aus der Gangart, der eventuellen Zugabe von Zuschlägen wie z.B. Kalk, Flußspat oder Sand und der Asche des verwendeten Brennstoffs. Analytisch besteht Schlacke vor allem aus Eisenoxiden (FeO , Fe_2O_3) sowie den Oxiden CaO , Al_2O_3 , MnO , MgO , P_2O_5 , Na_2O und K_2O . Die Schmelztemperaturen der Eisenverhüttungsschlacken liegen im allgemeinen deutlich unter denen des erzeugten Eisens.

Die Schlacken der Eisen- und Stahlmetallurgie können nach unterschiedlichen Kriterien geordnet werden (wobei hier nur auf Schlacken eingegangen werden soll, die für die Metallurgie bis zum 17. Jh. von Interesse sind): 1. nach dem Erzeugungs- oder Verarbeitungsverfahren: Rennofen-, Stückofen-, Floßofen-, Hochofen-, Frischfeuer- und Schmiedeschlacken; 2. nach den Hauptbestandteilen: $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MnO}$ bei den Floß- und Hochofenschlacken, FeO-MnO-SiO_2 bei den Rennofen-, Frischfeuer- und Schmiedeschlacken; 3. nach dem Aussehen und der Form der erstarrten Schlacke: Als Laufschlacke wird die Schlacke bezeichnet, die während des Schmelzprozesses aus dem Ofen fließt und im erstarrten Zustand typische Fließstrukturen aufweist. Als Ofenschlacke bezeichnet man die Schlacke, welche nach dem Prozeß im Ofen 4 verbleibt und dort erstarrt und die keine bzw. nur geringe Fließstrukturen aufweist. Als Schlackenklotz werden große Schlackenblöcke bezeichnet, die durch Abfließen der Schlacke aus dem Rennofen in die darunter befindliche Schlackengrubeentstanden sind. Die Masse dieser Schlackenklötze beträgt meist mehr als 10 kg und kann bis zu mehreren hundert Kilogramm betragen.

Schlackengrube: Unter dem Rennofen befindliche Grube, welche zur Aufnahme der abfließenden Schlacke dient

Schlackengrubenkanal: Verbindungskanal zwischen Schlackengrube und vorgelagerter Arbeitsgrube

Schweißhitze: Die Temperatur des Werkstücks, die nötig ist, damit es feuergeschweißt werden kann. Da sich das Werkstück beim Schmieden abkühlt, sind in der Regel mehrere Schweißhitzen notwendig, um es fertig zu schmieden.

Stahl: Stahl ist nach einer älteren Definition alles Eisen, welches härtbar ist (siehe dort), heute heißt Stahl alles schmiedbare Eisen mit Kohlenstoffgehalten in der Regel unter 2 %, also auch nicht härtbares Eisen.

Trinnereisen: Abplatzungen der Randpartien des Werkstoffes beim Schmieden

Unterofen: Unterer Teil des Rennofens

Wüstit: Bezeichnung für ein Eisenoxid, das üblicherweise als FeO gekennzeichnet wird. Die Formel ist so jedoch nicht richtig, korrekterweise müßte es Fe_{1-x}O heißen.

Zementit: Dieses Eisenkarbid (Fe_3C) ist eine metastabile Phase, welche im Gleichgewichtszustand in Eisen und Kohlenstoff zerfällt. Sekundärzementit bildet sich nach der Erstarrung aus dem primär gebildeten Austenit in Eisen-Kohlenstoff-Legierungen (0,8 % C-Gehalt < 2,06 %).

Zunder: Als Zunder bezeichnet man die bei hohen Temperaturen anfallenden oxidischen Korrosionsprodukte des Eisens.

Anmerkungen

¹ Beck 1881 – Johannsen 1953 – Undset 1882

² Bielenin 1976 – Bielenin 1992 – Ernst 1966 – Espelund 1995 – Hingst 1958 – Hingst 1983 – Horstmann 1995 – Pleiner 1965 – Pleiner 1981 – Sperl 1980 – Tylecote 1987

³ Espelund 1991 – Neumann 1954 – Osann 1971 – Schürmann 1958

⁴ Die Meldungen von Aktivitäten und Publikationen erfolgen durch die Mitglieder des Comités.

⁵ Witter 1942

⁶ Voigt 1964

⁷ Leineweber 1989 – Leineweber 1989a

⁸ Leineweber 1997 – siehe auch Leineweber 1994

⁹ Fennert 1992

¹⁰ Leube 1992

¹¹ Hauptmann/Yalcin 1995

¹² Jöns 1993

¹³ Jockenhövel 1995 – Kronz/Keesmann 1995

¹⁴ Barbré/Thomsen 1983 – Crew 1991 – Nikulka 1990 – Pawliska/Schneider/Schuler 1983 – Radwan/Pleiner 1963 – Sperl 1988 – Straube/Tarmann/Plöckinger 1964

- ¹⁵ Fennert/Leineweber/Lychatz 1994 – Leineweber 1991 – Leineweber 1993 – Leineweber 1993a – Leineweber 1993b – Leineweber 1995 – Leineweber 1996 – Lychatz 1995 – Lychatz/Fennert 1992
- ¹⁶ Versuche 1-12 Zethlingen, Ldkr. Salzwedel; 13 Eindhoven (Niederlande); 14-17 Zethlingen, Ldkr. Salzwedel; 18 Storbekken (Norwegen); 19-24 Zethlingen, Ldkr. Salzwedel; 25 Lejre (Dänemark). Dank gilt all denen, die mitgeholfen haben, die Versuche vorzubereiten und durchzuführen, vor allem Roland Bannat, Günter Bürger, Mario Fennert, Thomas Fenzel, Volkmar Held, Jörg Hunger, Gunnar Jentsch, Ulrich Kreher und Dirk Letzel.
- ¹⁷ Leineweber 1989 – Leineweber/Kirsch 1982 – Leineweber/Kirsch 1989 und unveröffentlicht
- ¹⁸ vgl. Hingst 1983, S. 166 ff.
- ¹⁹ freundl. Mitteilung von Herrn M. Kolb, seinerzeit Landesamt für Archäologie Halle, Stützpunkt Walsleben, und Herrn D. Ludwig, Stendal
- ²⁰ die dankenswerterweise Herr M. Kolb unter Mithilfe von Herrn F. Kirsch, seinerzeit Museum Arneburg, ermöglichte; die Auswertung der Befunde ist noch nicht abgeschlossen.
- ²¹ s. dazu Abschnitt Theorie der Rennofentechnologie
- ²² Mittag 1992
- ²³ freundliche Mitteilung von Frau W. Krause-Kleint, seinerzeit Stendal
- ²⁴ Fenzke 1984
- ²⁵ Schlackenatlas 1981
- ²⁶ Horstmann 1985
- ²⁷ Schumann 1991
- ²⁸ Leineweber 1996a
- ²⁹ Lünig 1991, S. 16
- ³⁰ Brockhaus 1988, S. 23: “Ein Experiment ist die methodisch-planmäßige Herbeiführung von meist variablen Umständen zum Zwecke wissenschaftlicher Beobachtung. Das Experiment ist das wichtigste Hilfsmittel aller Erfahrungswissenschaften, bei denen sich Experimentierbedingungen künstlich herbeiführen und reproduzieren lassen.”
- ³¹ Schmidt 1993, S. 11
- ³² vgl. dazu auch Schmidt 1993, S. 11 – Boonstra 1991, S. 115 – Bürger 1994, S. 40 f.
- ³³ Schürmann 1958 – Osann 1971 – Straube 1996
- ³⁴ Pawlow 1952
- ³⁵ Nikulka 1990 – Gebers/Linke 1987
- ³⁶ Müller 1979
- ³⁷ Müller 1979, S. 270
- ³⁸ Tongrube, nach 1989 geschlossen, in der Gemarkung Brietz, heute eingemeindet zu Salzwedel
- ³⁹ ein Gemisch aus Holzkohle und Lehm wird bei Agricola 1556 (in der Ausgabe von 1972, S. 328) “Gestübbe” genannt
- ⁴⁰ Fennert/Leineweber/Lychatz 1994
- ⁴¹ Die Rekonstruktion von H. Jöns 1993 hat dem praktischen Nachvollzug nicht standgehalten und kann somit verworfen werden. Wie in diesem Beispiel bringen Versuche oft den Beweis, wie es nicht vonstatten gehen konnte.
- ⁴² Gedankt sei an dieser Stelle Herrn Prof. A. Espelund und seinem Team für die Möglichkeit, in Norwegen arbeiten zu können.
- ⁴³ Lychatz 1995
- ⁴⁴ Schürmann 1958
- ⁴⁵ Straube 1996
- ⁴⁶ Schürmann 1958
- ⁴⁷ Herzlicher Dank gilt an dieser Stelle Herrn Kunstschmiedemeister Thys van de Manakker für die durchgeführten Schmiedearbeiten.
- ⁴⁸ HV 10 - Härte nach Vickers mit 10 kp Last. Zum Vergleich: Bronze mit 20 % Sn besitzt eine Härte von 140 HV und Messing mit 35 % Zn eine von 60 HV.

Literaturverzeichnis

- Agricola, G. 1556
Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen, Nachdruck 1977 - Nörtlingen
- Barbré, H./Thomsen, R. 1983
Rekonstruktionsversuche zur frühgeschichtlichen Eisengewinnung - Offa 40, Neumünster, S. 153-156
- Beck, L. 1881
Die Geschichte des Eisens (in technischer und kultureller Beziehung), Erste Abteilung: Von der ältesten Zeit bis um das Jahr 1500 n. Chr. - Braunschweig
- Bielenin, K. 1976
Eingetieftete Rennöfen der frühgeschichtlichen Eisenverhüttung in Europa - Festschrift für Richard Pittioni zum siebzigsten Geburtstag 2, Wien, S. 13-27
- Bielenin, K. 1992
Starożytne górnictwo i hutnictwo zelaza w górach swietokrzyskich - Kielce
- Boonstra, A. 1991
Experimentalarchäologie im Prähistorischen Freilichtmuseum in Eindhoven - Experimentelle Archäologie, Bilanz 1991, Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, Beiheft 6, Oldenburg, S. 113-117
- Brockhaus-Enzyklopädie 1988
Bd. 7 - Mannheim, S. 23-24
- Bürger, G. 1994
Rennversuche anlässlich des Symposiums Eindhoven - Ijzersterk, Protokollband Symposium Eindhoven 1993, Ommel, S. 40-42
- Crew, P. 1991
The experimental production of prehistoric bar-iron - Historical metallurgy, vol. 25.1, London, S. 1-26
- Ernst, F.-J. 1966
Die vorgeschichtliche Eisenerzeugung - Mitteilungen des Bezirksfachausschusses für Ur- und Frühgeschichte des Kulturbundes Neubrandenburg 14, Waren
- Espelund, A. 1991
A retrospective view of direct iron production - Bloomery Ironmaking during 2000 Years, Trondheim, S. 71-99
- Espelund, A. 1995
Archäo-Metallurgie, von Norwegen aus betrachtet - FERRUM - Nachrichten aus der Eisenbibliothek, Nr. 68, Langwiesen, S. 43-53
- Fennert, M. 1992
Metallurgische Aspekte zur Eisengewinnung im Rennofen unter direkter Bezugnahme auf eine spätrömerzeitliche Verhüttungsstelle bei Zethlingen, Kr. Salzwedel - Archäologische Informationen aus der Altmark 3, Billerbeck, S. 36-40
- Fennert, M./Leineweber, R./Lychatz, B. 1994
Eisenerzeugung im Rennofen - Ijzersterk, Protokollband Symposium Eindhoven 1993, Ommel, S. 20-22
- Fenzke, H.-W. 1984
Metallgewinnung Eisen und Stahl - Lehrbrief TU Bergakademie Freiberg, Eisenhütten-Institut, Freiberg
- Gebers, W./Linke, F.-A. 1987
Experimentelle Archäologie - eine Aufgabe der Denkmalpflege? - Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, Heft 3, Hameln, S. 70-74

- Hauptmann, A./Yalcin, Ü. 1995
Zur Archäometallurgie des Eisens auf der Schwäbischen Alb - Beiträge zur Eisenverhüttung auf der Schwäbischen Alb, Stuttgart, S. 269-310
- Hingst, H. 1958
Vor- und frühgeschichtliche Eisenverhüttung in Schleswig-Holstein - Neue Ausgrabungen in Deutschland, Berlin, S. 258-267
- Hingst, H. 1983
Das Eisenverhüttungsrevier auf dem Kammerberggelände in Joldelund, Kr. Nordfriesland - Offa 40, Neumünster, S. 163-176
- Horstmann, D. 1985
Das Zustandsdiagramm Eisen-Kohlenstoff, 5. Auflage - Düsseldorf
- Horstmann, D. 1995
Metallkundliche Untersuchungen an Klingen von zwei römischen Dolchen - Ausgrabungen und Funde in Westfalen-Lippe (Münster) 9/B, Münster, S. 111-135
- Jöns, H. 1993
Eisengewinnung im norddeutschen Flachland - Alter Bergbau in Deutschland, Stuttgart, S. 63-69
- Johannsen, O. 1953
Geschichte des Eisens - 3. Auflage, Düsseldorf
- Jockenhövel, A. 1995
Archäometallurgische Forschungen an der oberen Dill und Dietzhölze (Lahn-Dill-Kreis): Das "Dietzhölzta-Projekt (DHT)" - Die vorneuzeitliche Eisentechnologie im Lahn-Dillgebiet: Chemische und mineralogische Untersuchungen - Pinsker, B. (Hrsg.), Eisenland. Zu den Wurzeln der Nassauischen Eisenindustrie, Ausstellungskatalog, Wiesbaden, S. 1-14
- Kronz, A./Keesmann, I. 1995
Die vorneuzeitliche Eisentechnologie im Lahn-Dillgebiet: Chemische und mineralogische Untersuchungen - Pinsker, B. (Hrsg.), Eisenland. Zu den Wurzeln der Nassauischen Eisenindustrie, Ausstellungskatalog, Wiesbaden, S. 215-234
- Leineweber, R. 1989
Ein spätrömerzeitlicher Verhüttungsplatz im Bereich eines zeitgleichen Brandgräberfeldes von Zethlingen, Kr. Salzwedel - Jahresschrift für mitteldeutsche Vorgeschichte 72, Berlin, S. 97-120
- Leineweber, R. 1989a
Ein spätkaiserzeitlicher Werkstattkomplex zur Eisengewinnung in der Altmark - Archaeometallurgy of Iron, Prag, S. 229-238
- Leineweber, R. 1991
"Langobardenwerkstatt Zethlingen" - Lebendiges Museum mit archäologischen Experimenten nach Grabungsbefunden des 2.-4. Jh.s. in der Altmark - Experimentelle Archäologie, Bilanz 1991. Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, Beiheft 6, Oldenburg, S. 119-129
- Leineweber, R. 1993
Römerzeitliche Eisenverhüttung in der Altmark. Schmelzversuche nach Grabungsbefunden - Archäologie in Deutschland, Stuttgart, S. 28-31
- Leineweber, R. 1993a
Eisenerzeugung in der Altmark. Archäologischer Befund und Rekonstruktion - Bloomery Iron-making during 2000 Years, Trondheim, S. 41-50
- Leineweber, R. 1993b
Rekonstruktionen und archäologische Experimente nach Grabungsbefunden in der Langobardenwerkstatt Zethlingen - Das Altertum 39, Berkshire, S. 27-38
- Leineweber, R. 1994
Kultur- und Besiedlungsgeschichte der Altmark in spätrömischer Zeit - Ungedruckte Dissertation Berlin

- Leineweber, R. 1995
Zur Entstehung der "Langobardenwerkstatt Zethlingen" (Altmark). Vier Jahre experimentelle Archäologie und Museumspädagogik in einer historischen Werkstatt. Eine Bilanz - Jahresschrift für mitteldeutsche Vorgeschichte 77, Halle (Saale), S. 331-337
- Leineweber, R. 1996
"Langobardenwerkstatt Zethlingen" - Eine historische Werkstatt mit Experimentiergelände im Altmarkkreis Salzwedel - Archäologisches Nachrichtenblatt, Heft 1, Berlin, S. 230-232
- Leineweber, R. 1996a
Experimentelle Archäologie - Archäologische Berichte aus Sachsen-Anhalt 1995, Halle (Saale), S. 183-192
- Leineweber, R. 1997
Die Altmark in spätrömischer Zeit - Veröffentlichungen des Landesamtes für Archäologie - Landesmuseum für Vorgeschichte - Sachsen-Anhalt 50, Halle (Saale)
- Leineweber, R./Kirsch, F. 1982
Eisenverhüttungsöfen von Zethlingen, Kr. Kalbe/M. - Ausgrabungen und Funde 27, Berlin, S. 180-182
- Leineweber, R./Kirsch, F. 1989
Ein römischer Werkstattkomplex zur örtlichen Eisengewinnung von Zethlingen, Kr. Salzwedel - Ausgrabungen und Funde 34, Berlin, S. 180-186
- Leube, A. 1992
Eisenerzeugung und -verarbeitung während der römischen Kaiser- und Völkerwanderungszeit im Gebiet zwischen Elbe und Oder - Ethnographisch-Archäologische Zeitschrift 33, Berlin, S. 471-498
- Lüning, J. 1991
Bemerkungen zur experimentellen Archäologie - Experimentelle Archäologie, Bilanz 1991, Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, Beiheft 6, Oldenburg, S. 15-18
- Lychatz, B. 1995
Rekonstruktionsversuch zur Eisenerzeugung im Rennofen mit eingetiefter Schlackengrube - Experimentelle Archäologie, Bilanz 1994, Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, Beiheft 8, Oldenburg, S. 247-253
- Lychatz, B./Fennert, M. 1992
Auf den Spuren der Langobarden - Eisenerzeugung im Rennofen, Industriearchäologie, Heft 2, Umiken, S. 8
- Mittag, L. 1992
Ausgrabung auf einem Siedlungsplatz der spätrömischen Kaiserzeit in Zethlingen, Landkreis Salzwedel - Ungedruckte Abschlußarbeit an der Technischen Fachhochschule Berlin
- Müller, C. 1979
Ergebnisse der anthropologischen Untersuchung der Leichenbrände aus dem kaiserzeitlichen Gräberfeld von Zethlingen, Kr. Kalbe/M. - Zeitschrift für Archäologie 13, Berlin, S. 265-278
- Neumann, B. 1954
Die ältesten Verfahren der Erzeugung technischen Eisens - Freiburger Forschungshefte D 6, Berlin
- Nikulka, F. 1990
Eisenerzhüttung im Experiment - Experimentelle Archäologie in Deutschland, Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland, Beiheft 4, Oldenburg, S. 377-393
- Osann, B. 1971
Rennverfahren und Anfänge der Roheisenerzeugung - Verein deutscher Eisenhüttenleute - Fachauschußbericht 9.001, Düsseldorf
- Pawliska, V./Schneider, S./Schuler, A. 1983
Schmelzversuche in eingetieften Rennöfen - Archiv für Eisenhüttenwesen, 54. Jahrgang Nr. 12, Düsseldorf, S. 477-480

Pawlow, M. A. 1952

Metallurgie des Roheisens - Band 1, Berlin, S.158-163

Pleiner, R. 1965

Die Eisenverhüttung in der Germania Magna zur römischen Kaiserzeit - 45. Bericht der Römisch-Germanischen Kommission, Mainz, S. 11-86

Pleiner, R. 1981

Die Wege des Eisens nach Europa - Haefner, H. (Hrsg.), Frühes Eisen in Europa, Schaffhausen, S. 115-128

Radwan M./Pleiner R. 1963

Polnisch-tschechoslowakische Schmelzversuche in den Rennöfen der römerzeitlichen Bauarten - Archeologicke rozhledy 15, Praha, S. 47-71

Schlackenatlas 1981

Verlag Stahleisen m. b. H. - Düsseldorf

Schmidt, M. 1993

Entwicklung und status quo der experimentellen Archäologie - Das Altertum, Band 39, Berkshire, S. 9-22

Schumann, H. 1991

Metallographie - Leipzig, S. 453-460

Schürmann, E. 1958

Die Reduktion des Eisens im Rennfeuer - Stahl und Eisen, 78. Jahrgang Nr. 19, Düsseldorf, S. 1297-1308

Sperl, G. 1980

Über die Typologie urzeitlicher, frühgeschichtlicher und mittelalterlicher Eisenhüttenschlacken - Studien zur Industriearchäologie 7, Wien

Sperl, G. 1988

Der Ferrum-Noricum-Prozeß. Ein Rezept zur Ausführung von Versuchen nach dem Rennverfahren der Frühzeit - Leoben

Straube, H./Tarmann, B./Plöckinger, E. 1964

Erzreduktionsversuche in Rennöfen norischer Bauart - Klagenfurt

Straube, H. 1996

Ferrum Noricum und die Stadt auf dem Magdalensberg. Mit Beiträgen von H. Dolenz und G. Piccottini - Wien/New York

Tylecote, F. R. 1987

The early history of metallurgy in Europe - Longman archeology series, London/New York

Undset, I., 1882

Das erste Auftreten des Eisens in Nordeuropa - Hamburg

Voigt, T. 1964

Die Rennöfen von Riestedt, Kreis Sangerhausen - Jahresschrift für mitteldeutsche Vorgeschichte 48, Berlin, S. 219-308

Witter, W. 1942

Einiges über die Eisengewinnung im Altertum - Mitteldeutsche Volkheit 9, Burg, S. 46-59

Anschriften

Dr. phil. Rosemarie Leineweber, Landesamt für Archäologie - Landesmuseum für Vorgeschichte - Sachsen-Anhalt, Richard-Wagner-Str. 9-10, D - 06114 Halle (Saale)

Dr.-Ing. Bernd Lychatz, TU Bergakademie Freiberg, Institut für Eisen- und Stahltechnologie, Leipziger Str. 34, D - 09596 Freiberg (Sachsen)

Zeichnungen: M. Wiegmann, Halle (Saale); Fotos: E. Hunold, Halle (Saale) (Taf. 2c, d), R. Leineweber (Taf. 1a-2b), B. Lychatz (Abb. 9-16)

Manuskriptabgabe: 27.06.1997



Tafel 1a (oben): Geröstetes Raseneisenerz

Tafel 1b (unten): Raseneisenerz nach Aufbereitung durch Rösten und Pochen



Tafel 2a (oben links): Öffnen der Ofenbrust am Ende des Versuches 7, 1992

Tafel 2b (oben rechts): Geöffneter Rennofen. Der Schlackenklotz mit den Eisenanteilen ist bereits entnommen. Versuch 4, 1991

Tafel 2c (unten links): Rennofen in Betrieb. Versuch 21, 1995

Tafel 2d (unten rechts): Geöffneter Rennofen mit Luppe und Schlackenklotz. Versuch 22, 1995