Zeitschrift: Ferrum : Nachrichten aus der Eisenbibliothek, Stiftung der Georg Fischer AG

Herausgeber: Eisenbibliothek

Band: 68 (1996)

Artikel: Archäo-Metallurgie, von Norwegen aus betrachtet

Autor: Espelund, Arne

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-378314

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Archäo-Metallurgie, von Norwegen aus betrachtet

Dozent Arne Espelund
Norwegische Technisch-Naturwissenschaftliche Universität
Institut für Metallurgie
N-7034 Trondheim

Auf einer Karte vom Jahre 1540 steht:

Schweden ist reich an Bergwerck/ Fischen/ Viehe/Wildprät/und Getreid/ das Königliche Hofläger Stockolm ligt/ wie Venedig/in dem See. Aus Norwegen bringt man Stockfisch.

Im 16. Jahrhundert war Norwegen offenbar ein armes Land, verglichen mit Schweden. Trotzdem eignet sich mein Land heutzutage ausgezeichnet für archäo-metallurgische Studien über die historische Eisenherstellung, die örtlich in der älteren Eisenzeit sogar wie eine Industrie betrieben wurde: Der Berggrund und die Moränen – ein Resultat der Vereisung – liefern in manchen Gebieten von Norwegen heute noch Raseneisenerz, welches die Rohstoff-Grundlage für Rennöfen bot. Reste von Tausenden von solchen Öfen mit ihren Schlackenhalden befinden sich unbeschädigt in den Bergen. Auf Grund von ^{14}C-Datierungen hat es sich gezeigt, dass die Herstellung zurück bis etwa 300 v.Chr. geführt werden kann und dass vier verschiedene Methoden sich gut identifizieren lassen.

Anscheinend wurde Eisen mit dem Direktverfahren das letzte Mal etwa 1820 gemacht. Relevante Ortsnamen und eine gewisse mündliche Tradition sind noch vorhanden. Das bedeutet, dass die neueste Methode sich nicht nur von Funden, sondern auch mit Hilfe von schriftlichen Quellen studieren lässt.

Auch Mittelalterdokumente sind von Interesse, sogar was Technik betrifft. Letztlich kann man sagen, dass die Herstellung von Eisen und auch die Fundplätze nicht von Kriegshandlungen unterbrochen oder zerstört worden sind.

Seit etwa 1982 ist Archäo-Metallurgie interdisziplinär an der Universität Trondheim im Gebiet Tröndelag betrieben worden. Die Zusammenarbeit, die auch Ausgrabungen umfasst, hängt besonders mit den zahlreichen und grossen Funden aus der älteren Eisenzeit zusammen. In dieser Arbeit möchte ich – als Metallurge – meine enge Zusammenarbeit mit dem Archäologen Lars F. Stenvik betonen. Mein Fach ist sowohl mit einer Voraussage auf Grund von Theorie als auch mit einer Analyse der Fundreste vertreten. – Ansonsten sind zum Teil grosse Ausgrabungen von Archäologen von der Universität Oslo gemacht worden. Die Namen Irmelin Martens, Jan Henning Larsen, Lars-Erik Narmo, Sigmund Jakobsen, Perry Rolfsen sollten erwähnt werden, gleichweise die Arbeit von Per Haavaldsen im Archäologischen Museum in Stavanger.

Ein Überblick

Eine der grössten Errungenschaften des *Homo sapiens* war die Ausnutzung und das Beherrschen des Feuers. Eines der Resultate des «Prometheus» war die Herstellung von Metallen, die vor mehr als 8000 Jahren anfing. Die Auswahl bestand zuerst aus Kupfer und Kupferlegierungen, danach kamen Eisen, Blei und Zinn dazu. Die Edelmetalle Gold und Silber lagen zum Teil gediegen in der Natur vor und liessen sich leicht ausnutzen. Der Ur-Mensch stiess auch ganz selten auf Eisen-Nickel-Legierungen in Form von Meteoriten.

Die Metalle wurden durch Giessen und Schmieden verarbeitet. Neben Schmuckgegenständen waren Werkzeuge und Waffen aller Typen das gezielte Resultat. Erst viel später wurde Metall für Konstruktionszwecke üblich.

In der etwa 3500 Jahren langen Geschichte der Eisenherstellung ist das *indirekte Verfahren* mit Herstellung von Roheisen im Hochofen mit nachfolgendem Frischen das logische Endresultat einer langen Entwicklung. Das Metall wird heute aus Erz flüssig im Hochofen her-

gestellt und flüssig weiterbehandelt, was zu einem enormen Produktionsanstieg und Energieersparnis geführt hat.
Das Hochofenverfahren hat sich prinzipiell in Europa seit der Einführung im 14. Jahrhundert kaum verändert, – höchstens hat die Winderhitzung etwas Neues mit sich gebracht. Die Frischverfahren sind mehr vielseitig und beruhen auf bestimmten Erfindungen, so wie das Konverterverfahren Bessemers in den 1850er Jahren und das LD-Blasen 100 Jahre später. Der Schweizer **Robert Durrer** hat zum Sauerstoff-Aufblasverfahren sehr Wichtiges beigetragen.

Das nicht schmiedbare Eisen, eventuell flüssig entstanden, war seit alters her bekannt, aber unerwünscht. Es wurde als «krank» angesehen, was aus dem heute noch gebräuchlichen Wort *Frischen* erkennbar ist. Dass das «kranke» Eisen in der Schmiedeesse und am Amboss sich «heilen» liesse, war eine Erfindung von unbekannten Schmieden. Vielleicht geschah auch das im 14. Jahrhundert. Erst da gab es eine wirtschaftliche Grundlage für einen grossen Produktionsanstieg des Hochofens und den Ausbau von Hüttenwerken. Die frühe Einführung war von einer Minimumsgrösse der Infrastruktur bedingt. Schliesslich musste Holzkohle in grossen Mengen hergestellt und transportiert werden; viel Erz war nötig, das kontinuierliche Verfahren erforderte Schichtarbeit und Rechte auf Wasserfälle wurden notwendig, nicht nur für Wassermühlen. Die kapitalistische Gesellschaft mit Teilung zwischen Kapital, Arbeitgeber/Grundbesitzer und Arbeiter war eine logische Voraussetzung für diese frühe Industrie.

Für den Hochofenprozess selbst war die *Wärmeökonomie* ausschlaggebend. Die Enthalpiegrössen sind von der Natur aus gegeben, und relativ grosse Öfen waren für den kalten «Wind» erforderlich, um überhaupt flüssiges Eisen zu erzeugen. Um die Produktivität zu steigern, wurden grössere Öfen gebaut. Mit verbesserter Wärmeökonomie wurde der Hochofen ständig mehr erfolgreich.

Es war auch notwendig, die Bildung einer flüssigen Hochofenschlacke zu gewährleisten. Man musste «strenge» und «flüssige» Erze, d.h. SiO_2- und CaO-reiche Erze richtig mischen können.

Das Direkt-Verfahren

Das grosse Paradox in der Geschichte des Eisens ist die Komplexität des früheren Verfahrens, d. h. der Rennofenprozess, worauf so viele späteren Ereignisse und überhaupt unsere heutige materielle Grundlage beruhen. Weil die Ofenreste im Gelände klein und anspruchslos aussehen, versuchen manche Leute immer wieder, solche Öfen zu bauen und schmiedbares Eisen herzustellen. Sie selbst betonen, dass sie in der gleichen Situation wie unsere Vorväter, also ohne Metallurgie-Kenntnisse arbeiten. Dazu kann man erstens – philosophisch bedingt – sagen, dass es unmöglich ist, die totale Situation der Vergangenheit mit den damaligen Erfahrungen nachzuahmen. Das typische Resultat solcher Experimente sind eine ungeschmolzene Schlacke und nur kleine Eisenstücke. Einige bekommen eine flüssige Schlacke, aber längst nicht die guten Luppen, die man als seltene und anspruchslose Streufunde in den Museen findet.

Für Metallurgen ist es nur befriedigend, zuerst die Probleme zu definieren und dann zu versuchen, die möglichen Wege zur erfolgreichen Herstellung zu skizzieren. Ich persönlich versuche die Metallurgie mit neueren historischen Belegen, Erfahrungen von Ausgrabungen und Mittelalterdokumenten zu ergänzen und zu korrigieren.

In dem ersten Teil dieses Artikels möchte ich nur die metallurgischen Probleme erörtern. Sie beruhen sehr stark auf Thermodynamik und können in vier Punkte geteilt werden:

A: Reduktion
Partielle Verbrennung bei einem Überschuss von Holzkohle gibt das «chemische Milieu», ein CO-reiches Gas gemäss dem boudouardschen Gleichgewicht bei Temperaturen bis 1100°C. Dieses Gas in Gegenstrom zum Fe_2O_3 kann das Erz in einem Schachtofen stufenweise zu metallischem Eisen reduzieren.

Probleme:
1) Zu viel C im Metall (siehe Teil C).
2) Keine Luppe, nur Eisenpulver (Teil B).
Der Metallurg braucht Daten von den Systemen C-O und Fe-O-C.

B: Sinterung von Eisenpulver
Erfordert eine reduzierende Umgebung und eine hohe Temperatur. Gefördert durch Bewegung.
Eine Schlacke, die das Metall feuchtet, ist vorteilhaft.
Wenig Daten vorhanden.

C: Kohlenstoff-Inhalt <1.2%
Erzielt durch Schlacken-Kontrolle, mit FeO in einer Fayalit-Schlacke. Diese Schlacke ist «aktiv». Sie wird erst nach dem Abstich Abfall.
Problem: Die Schlacke hat eine Tendenz, von FeO befreit zu werden, wobei festes SiO_2 entsteht und eine zu starke Aufkohlung beginnt.
Der Metallurg braucht Kenntnisse über die heterogenen Gleichgewichte, mit %C im Metall.

D: Ablassen der Schlacke
End-Temperatur etwa 1150°C.
Problem: Wie kann man die Temperatur beeinflussen? Erhöhte Verbrennung kann durch Gebrauch von Blasebälgen oder natürlichem Zug (Schornsteineffekt) erreicht werden.
Alternative: Vorerwärmung der Luft.
Der Metallurg braucht Schmelztemperaturen für aktuelle Systeme, so wie FeO-SiO_2, mit Al_2O_3 und MnO als «nächste» Elemente.

Im folgenden werden die vier Punkte näher behandelt:

1. Die Gleichgewichte im System Fe-C-O-N

In Fig. 1 ist das Bauer-Gläsner-Diagramm dargestellt. Es ist unentbehrlich für die Zusammenhänge zwischen Kohlenstoff-Inhalt und Qualität, wie schon u. a. E. Schürmann für das Rennofenverfahren betont hat (1958).

Das Diagramm ist für ein Gasgemisch bei Gesamtdruck 1 atm und mit 0,6 atm N_2 gültig, also für die charakteristischen Verbrennungsgase eines Schachtofens. Die Abszisse zeigt das Verhältnis $CO/CO + CO_2$, d. h. die reduzierende Kapazität des Gases. Die Ordinate zeigt die Temperatur als °C.
Die untere Kurve gilt für das boudouardsche Gleichgewicht

$$C + CO_2 = 2\,CO$$

bei Kohlenstoff-Sättigung. Die anderen Linien zeigen die Grenzen der Stabilitätsgebiete der drei festen Phasen «FeO», α-Fe und γ-Fe.

Von grösster Bedeutung ist das Gebiet des γ-Eisens: gestrichelte Linien zeigen den Inhalt an Kohlenstoff bei gegebener Zusammensetzung der Atmosphäre.

Das Metall, das bei Kohlenstoff-Sättigung entsteht, ist im Rennofen-Verfahren unerwünscht, denn Eisen mit mehr als etwa 1% C wurde als unschmiedbar angesehen.

Das Eisen, das dagegen in Gegenwart von Wüstit FeO entsteht, ist praktisch C-frei, es ist sehr gut schmiedbar und deswegen für die meisten Zwecke erwünscht. Kann das erzielt werden?

Natürlich lassen FeO und Fe, beide Festkörper, sich nicht trennen. Es besteht aber die Möglichkeit, FeO in der Form einer Silikatschlacke bei etwa 1150°C zu verflüssigen. Die Eigenschaften dieser Schlacke werden im vierten Teil behandelt.

Es ist möglich, im Diagramm nicht nur die Zusammenhänge zwischen dem Kohlenstoff-Inhalt des Austenits und reinem Wüstit oder gesättigten Schlacken, sondern auch für hypothetische verdünnte Silikatschlacken mit FeO auszudrücken. Solche Schlacken, also mit $\alpha_{FeO} < 1.0$ würde man als eine Linienschare parallel zu der Linie gamma + Wüstit einzeichnen können. Bei $\alpha_{FeO} = O$, also

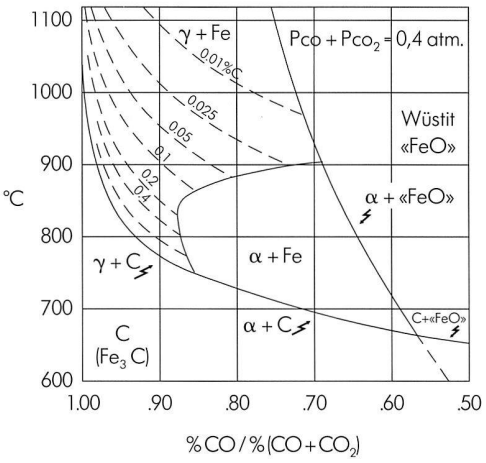

Fig. 1. Das Bauer-Gläsner-Diagramm für Gas – Feststoff – Gleichgewichte im System Fe-C-O-(N), bei Gesamtdruck 1 Atm.

annähernd eine Roheisenschlacke, sind die Verhältnisse von der Linie + C vertreten. Die Voraussetzung ist aber, dass Metall-Schlacke-Beziehungen von Bedeutung sind. Auf Grund von vielen Untersuchungen und in Übereinstimmung mit deutschen Fachleuten ist der Verfasser davon überzeugt (Schürmann 1958, Osann 1971).

2. Die Enthalpie

In einem mit Holzkohle gefüllten Schachtofen ist die Hauptreaktion im Herd

$2\,C + O_2 = 2\,CO$, mit delta $H_{298} = -224kJ$

Weil Luft etwa 21% O_2 enthält, kann man für die Stöchiometrie

$2\,C + O_2 + 4\,N_2 = 2\,CO + 4\,N_2$

mit genügend Genauigkeit angeben. Die wichtige Frage ist: welche Temperatur entsteht im Herd?

In Fig. 2 ist die Wärmebilanz graphisch dargestellt, mit Daten von Rosenqvist (1983). Die Abzisse zeigt die Temperatur °C, die Ordinate Enthalpie-Werte. Als Stoffmenge ist 2 Mol C gewählt. Die Beschickung wird von den emporsteigenden Gasen vorerwärmt (mit $[H_T - H_{298}]$ 2C angegeben). Die Reaktionsenthalpie $\triangle H°_{298}$ auf $2\,CO + 4\,N_2$ verteilt (mit $[H_T - H_{298}]$ $2\,CO + 4\,N_2$ gezeigt). Luftfeuchtigkeit ist nicht berücksichtigt worden, auch ist 25°C als Luft-Temperatur vorausgesetzt.

Die beiden Kurven kreuzen bei etwa 1400°C, was der *adiabatischen Temperatur entspricht.*

Drei verschiedene Wärmeverluste sind angedeutet: Entsprechend kann man in einem kleinen Ofen 1160°C erwarten und in einem grossen Ofen 1240°C, was für einen Hochofen als Minimum angesehen werden muss. 1160°C ist gerade ausreichend als Maximum für den Rennofen.

Die Frage ist: Was geschieht, wenn der Ofen auch mit Eisenoxyden gefüllt wird und die Rolle eines Rennofens spielt? Die Veränderung ist gering, weil alle Reduktions-Reaktionen indirekt über CO verlaufen, so wie

$Fe_xO_y + CO = FexO_{y-1} + CO_2$

und fast «a-therm» sind. Die sogenannte «direkte» Reduktion mit Kohlenstoff an Stelle von CO ist stark endotherm und kann erst bei viel höheren Temperaturen und grösserem Wärmezugang eine Rolle spielen.

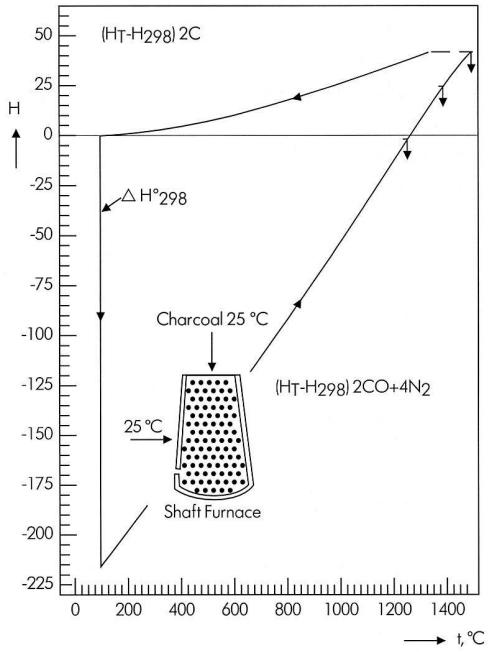

Fig. 2. Die Enthalpie-Balance bei Verbrennung von Holzkohle in einem Schachtofen (Espelund, A., 1995 a).

3. Das Sintern

Es ist anzunehmen, dass das reduzierte Eisen als Partikel oder dünne Folien entsteht. Verwendbar ist das Eisen erst, wenn Stücke gebildet werden, die man mit einer Zange glühend bearbeiten kann.

Allgemein wird als niedrigste Sinterungstemperatur die halbe Schmelztemperatur in Grad Kelvin betrachtet. Für Reineisen entspricht das (1537 + 273)/2 = 905 K = 633°C. Die Arbeitstemperatur eines Rennofens liegt meistens bei mehr als 1000°C, also weit oberhalb 633°C.

Sinterung wird natürlich von «Fremdstoffen» wie Holzkohle gehemmt, aber durch relative Bewegung gefördert. Es ist übrigens bekannt, dass Rennofeneisen sich in der Esse gut schweissen lässt. Das beruht auf der Qualität der

Schlacke, die FeO-reich ist und sich im Gleichgewicht mit dem Metall befindet. Bei den Bedingungen, die in einem gut verlaufenden Rennofenverfahren mit flüssiger Schlacke zu erwarten sind, ist das Sintern also kaum ein Problem.

4. Die Entfernung der Schlacke

Es ist oben erwähnt, dass eine Gegenwart von FeO notwendig ist, um die Qualität des Metalls zu gewährleisten. Das ist auch von der Gleichung

FeO (in SiO_2-Schlacke) +$\underline{C}$ (im Metall) = Fe + CO

ersichtlich (die Gleichgewichts-Konstante beträgt etwa 0.01). Gleichzeitig muss die Schlacke von der Luppe weitgehend entfernt werden. Glücklicherweise sind die Schmelztemperaturen im System FeO - SiO_2 niedrig, wie in Fig. 3 ersichtlich. Das FeO-reiche Eutektikum liegt bei etwa 1175°C.

Es ist bekannt, dass gerade Erze mit etwas SiO_2 im Rennofen verwendet wurden. In Norwegen war Sumpf- oder Raseneisenerz mit Sandpartikelchen aus Quarz und etwas Feldspat neben Göthit FeOOH das geeignete und viel verwendete Material. Weil Kalk FeO in der Schlacke ersetzt, sind kalkreiche Erze nicht geeignet. Obwohl man mit einer erhöhten Ausbeute rechnen kann, wird dann die Schlackenkontrolle für den C-Inhalt begrenzt. Kalkzusatz im Rennofen ist deswegen nicht mit Erfolg benutzt worden.

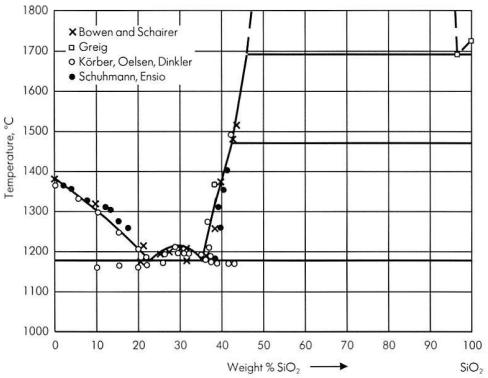

Fig. 3. Das System FeO_2 – SiO (VDEh-Schlackenatlas, Düsseldorf 1981)

Die «integrierte» Lösung:
Aus den oben genannten Punkten geht hervor, dass eine gelungene Herstellung eher stufenweise als kontinuierlich vorstellbar ist. Eine Reduktion müsste womöglich «trocken» stattfinden und sollte von einer raschen Temperaturerhöhung gefolgt werden, die zum 1) Sintern, 2) Verflüssigung der Schlacke und 3) Dekantieren führen sollte.

Die Gefahr einer zu weitgehenden Reduktion von FeO ist immer da. Es würde zu einem erhöhten C-Inhalt des Metalls und einer nicht schmelzbaren, SiO_2-reichen Schlacke führen.

Zwei Verfahren aus der Neuzeit beweisen, dass man auf verschiedene Weise das letztere vermieden hat:
Im «nordischen» Verfahren, angeblich im Grenzgebiet Schweden-Norwegen von etwa 1400 bis 1800 in Gebrauch, und von O. Evenstad sehr detailreich im Jahre 1782 beschrieben, wird das Erz weitgehend «trocken» reduziert (Evenstad/Blumhof 1801). Gegen Ende, wenn nur noch eine geringe Menge Holzkohle im Ofen ist und Schlacke und Metall beeinflusst werden können, werden 4 von insgesamt 24 l Erz zugesetzt. *Die Absicht ist offenbar, einen frischenden Charakter der Schlacke zu gewährleisten* (siehe u. a. Espelund 1995a). – Im Catalan-Verfahren wird ständig eine frischende Schlacke aufrechterhalten.
In beiden Verfahren ist die Luftzufuhr mässig und wird gegen Ende gesteigert (id., 1995 b).
Der Verfasser ist überzeugt, dass in *allen* gelungenen Rennofenverfahren die erwähnten Probleme berücksichtigt werden.
Die Frage ist natürlich, wie solche Massnahmen, die der moderne Metallurge physikalisch-chemisch beschreiben kann, in früheren Zeiten in einer vollkommen anderen Gesellschaft berücksichtigt wurden. Der Text von Ole Evenstad sagt deutlich «was» und «wie», ohne ein «warum» auszudrücken. Die Massnahmen der Schmelzer konnten aber mit Worten ausgedrückt werden und waren für die Teilnehmer ersichtlich. Das Verfahren konnte deswegen «tradiert» werden, ohne sich auf den Text Evenstads zu stützen. Für uns ist aber der Text notwendig als Grundlage, um Eisen mit der «nordischen» Rennofen-Methode herzustellen.

Der Verfasser hat auch mit Kollegen versucht, das Verfahren im «Tröndelags-Ofen» aus der vorrömischen und römischen Eisenzeit zu entziffern (Espelund 1995a). Auch wenn sehr gute Funde vorliegen und sorgfältig archäo-metallurgisch untersucht wurden, ist es beim Experiment im Sommer dieses Jahres noch nicht gelungen, gute Luppen herzustellen. Gewisse Fortschritte sind aber gemacht worden.

Einige Beispiele aus der archäometallurgischen Literatur:

Das *Comité pour la sidérurgie ancienne* hielt im Jahre 1970 in Schaffhausen eine Tagung mit dem Thema «Die Versuchschmelzen und ihre Bedeutung für die Metallurgie des Eisens und dessen Geschichte». Im Tagungsbericht vom Jahre 1973 liegen Arbeiten von Radomir Pleiner, Harald Straube, Robert Tylecote mit Mitarbeitern, Jean Maréchal, Olfert Voss, Kazimierz Bielenin, Bernhard Osann und Robert Thomsen vor (Guyan 1973). Im Schlusswort werden besonders die Bedingungen, die zu Stahl führen, gründlich vorgelegt.
Der Verfasser ist nicht überzeugt, dass viel Stahl begehrt war. Das Verhältnis Weicheisen/Stahl in Gegenständen lag vielleicht bei 20/1 (Thålin-Bergman pers. Mitt.).

Für einen Norweger sind gewisse experimentelle Resultate, die in den 1960er Jahren in Österreich erworben wurden (Straube & al. 1964, Schuster 1969) von Bedeutung, weil sie heute noch eine Grundlage für viel zitierte schwedische Arbeiten, wie die von Björkenstam, bilden (Björkenstam 1983, 1985, 1990). Auch Erik Tholander hat in Schweden viele Experimente durchgeführt (Tholander 1987).

Im folgenden werden diese Arbeiten den eher thermodynamisch betonten Arbeiten von E. Schürmann und B. Osann gegenübergestellt (Schürmann 1958, Osann 1971, 1973). Wichtig sind die gezeigten Zusammenhänge zwischen Schlacken- und Metallanalysen, besonders was FeO in der Schlacke und Kohlenstoff im Metall betrifft, sowie die Berechnungen der Ausbeute. Osann beschreibt auch Schmelzversuche von J. W. Gilles, die mit einem «normalen» Erz ausgeführt wurden (Osann 1971).

In beiden Arbeiten aus Österreich wurden «Rennöfen nordischer Bauart» als Grundlage benutzt. Diese Öfen sind nach Ausgrabungen von W. Schmid (1932) und W. Schuster (1969) charakterisiert worden. Dr. K. Kaus, Landesarchäologe im Burgenland, hat sich dazu kritisch geäussert: «Zu den Rekonstruktionsgrundlagen ist zu bemerken, dass die Datierung des 1929 ausgegrabenen Schachtofens in Lölling unsicher erscheint, da datierende Beifunde vom Ofen selbst fehlen». Nach einer Beschreibung einiger Funde folgt: «Sowohl die Abbildung der Tondüsen, als auch die Beschreibung der Keramik lässt vermuten, dass diese Fundstücke eher ins späte Mittelalter als in das Altertum zu stellen seien». W. Schmid hat ja auch die Spätmittelalter-Frühneuzeitkeramik von «Noreia» falsch datiert. Das gleiche gilt für die Grabungsfunde von der Feistawiese.
Ein weiteres Problem um die Schmelzversuche am Magdalensberg war die Annahme, die vorerst als Schlacken bezeichneten Eisenluppenstücke wären das Endprodukt des 1956/57 freigelegten Schachtofens gewesen. Schon der Grundriss der Öfen, besonders aber die mitgefundenen Wasserbottiche weisen nämlich darauf hin, dass es sich um Schmiedeöfen gehandelt hat». (Kaus 1981). Kaus kann mit Recht sagen, dass der sogenannte Burgenlandofen sehr viel besser charakterisiert worden ist (Bielenin 1975). – Der Verfasser möchte hinzufügen, dass eine gelungene Rennfeuerverhüttung grosse Mengen Schlacke hinterlässt, während Schmieden meistens zu wenig Abfall führt.
Dr. Kaus setzt fort (über W. Schmid): «Die meisten seiner leider vielzitierten Theorien und Behauptungen – auch zum Ferrum Noricum – sind daher heute abzulehnen.». (Kaus 1981). W. Schmid war Archäologe, während W. Schuster als Diplomingenieur ausgebildet war. Der letztere besass nicht die fachliche Voraussetzung eines Archäologen, was Datierung, Grabungstechnik und Dokumentation betreffen. Man muss deswegen heute annehmen, dass keine grabungsbedingte Grundlage für die erwähnten Experimentöfen vorhanden war. Die Experimente können natürlich trotzdem an sich beurteilt werden, bloss ändert sich der Charakter von «hypothetisch-deduktiv-archäologisch gesehen» zu «induktiv».

Die Experimente von Straube et al. (1964) wurden in zwei verschiedenen Schachtöfen durchgeführt. Relativ grosse Luppen mit sehr unterschiedlicher Zusammensetzung wurden hergestellt. Der Kohlenstoff-Inhalt schwankte zwischen dem des Ferrits in der Nähe der Düse bis Roheisenqualität weit weg von der Düse.
Die Verfasser behaupten auf Grund der Versuche, dass in einem solchen Rennofen Stahl direkt hergestellt wurde. Das Endresultat soll nach einer Primärbildung von ferritischem Eisen, das nachher aufgekohlt und verflüssigt wird, entstehen. Zuletzt folgt eine Entkohlung in der Düsenzone (Straube & al. 1964).

Zu den Versuchen ist zu bemerken, dass sehr enge Bedingungen eingehalten wurden:

1. Erzgrundlage: Das Erz enthielt 6.8% CaO, 4,25% MnO und 6,6% SiO_2. Die anderen Werte neben FeO waren «normal», d. h. niedrig. Wie bekannt, schwankt der MnO-Gehalt der Eisenerze sehr, und 4,25% MnO ist keine Ausnahme. Der Inhalt an CaO dagegen ist sehr hoch für den Rennofenprozess und führt wahrscheinlich zu einer frühen Verschlackung im Schacht. Sowohl CaO als auch MnO neigen dazu, FeO in der Schlacke zu ersetzen, die Aktivität des FeO zu erniedrigen und dadurch zu einer Erhöhung des C-Inhaltes des Metalls zu führen. Solche Zusammenhänge wurden auch von Osann (1971) erwähnt.

2. Die Luftzufuhr wurde mit einer Blas-Maschine besorgt, die eine konstante und grosse Menge lieferte. Wie repräsentativ war das? Auch wenn die *Maximalwerte der Luftzufuhr* vergleichbar waren, so ist es nicht gesagt, dass die alten Blasebälge kontinuierlich benutzt wurden (siehe auch das Evenstad- und das Catalan-Verfahren oben).

3. Das Verhältnis Holzkohle/Erz war sehr hoch, 375/75 und 155/45, also 5:1 und 3,5:1.

4. Es wurde nicht versucht, die Schlacke abzustechen.

Die Temperaturmessungen wurden mit Thermopaaren gemacht und scheinen repräsentativ zu sein. Sie lagen meistens bei 750 – 1100°C.

Die Schlackenanalysen dagegen zeigen aber, dass sie nichts ausser Punktanalysen vertreten. Im Erz liegt das Verhältnis CaO:MnO:SiO_2 bei 6,8:4,25:6,6. Weil keine der Oxyde reduziert werden, sollte das Verhältnis in einer homogenen Schlacke nach einer gewissen Entfernung von FeO gleich sein. Als Beispiel kann eine Schlackenanalyse mit 10,5% CaO, 2,5% MnO und 29,5% SiO_2 dienen (Straube 1964:32), was eine fünffache und logische Anreicherung von SiO_2 bedeutet, während der Inhalt an MnO halbiert und CaO fast verdoppelt wurde! Der Aussagewert solcher Analysen ist deswegen sehr gering. Vielleicht dreht es sich um einen verflüssigten Anteil der sonst festen Oxyde.

Solche Angaben mögen Nebensache sein. Das Fehlen einer flüssigen Schlacke, die sich abstechen liess, kann dagegen nicht repräsentativ für ein Rennofen-Verfahren des Noricums sein. Der Ofen kann eher als ein Miniatur-Hochofen betrachtet werden, im Betrieb bei Temperaturen unterhalb des Eutektikums im System Fe - C, d.h. 1145°C.

Es wäre interessant, wenn die Verfasser neben Ofenresten auch römerzeitliche Rennofenschlacken als Grundlage für die Experimente benutzt hätten. Im Gegensatz zum Schmieden entstehen beim Schmelzen in Rennöfen grosse Mengen Schlacke, die bei der Anlage noch da sein sollten. Nach Erfahrungen in vielen Ländern wurden Rennofenschlacken nur bei Erzmangel in naheliegenden Hochöfen entfernt.

In einer neueren Veröffentlichung aus dem Jahre 1985 wird die Arbeit Schürmanns stark berücksichtigt (Straube 1985). Trotzdem wird die Annahme, dass in Rennöfen unabhängig von der Schlackenanalyse Stahl hergestellt werden konnte, aufrechterhalten. Metallographische Bilder von Resultaten der Versuchsschmelzen (Straube & al. 1964) und auch von Luppen, die am Magdalensberg gefunden wurden, werden gezeigt. Diese Versuchsschmelzen sind vom Verfasser oben kritisch beurteilt. Bei den gegebenen Bedingungen wurde Eisen mit sehr unterschiedlicher Zusammensetzung hergestellt. War das bei unseren Vorvätern wünschenswert, an Stelle von einem leicht schmiedbaren und homogenen Weicheisen? Wieviel

Stahl war eigentlich erforderlich?
Aus eigenen Erfahrungen in Norwegen wissen wir, dass Eisen mit 1,2% C als unschmiedbar angesehen und weggeworfen wurde. – Oben ist auch erwähnt, dass Magdalensberg eher als ein Schmiedeplatz als eine Verhüttungsanlage betrachtet werden muss (Kaus 1981).

Straube ist kritisch zu den Temperaturangaben Schusters – siehe unten – und ist der Meinung, dass in einem Rennofen 1420°C als Maximum entstehen kann. Andererseits vertritt er die Ansicht, dass der Blaswind in einer Tondüse vorerwärmt werden kann. In solchen Düsen sind anscheinend bis 500-600°C gemessen worden. (Avery & al 1979). Solche Messungen sind aber sehr abhängig von den Versuchsbedingungen. Die Frage ist, wie viele kJ überführt werden und zu welcher Temperaturerhöhung dies im praktischen Versuch führt.

Schuster (1969) gibt zuerst einen Überblick über die Entwicklung der eisenproduzierenden Öfen, nachdem gewisse Erfahrungen in der Buntmetallurgie gemacht worden waren.

Auch Schuster macht Experimente in einem «norischen Rennofen», der eher ein Phantasieprodukt als eine Tatsache ist. Auch hat der auf Abb. 18 abgebildete «schwedische» Rennofen nichts mit Swedenborg zu tun. Der Ofen entspricht dem «Evenstadofen», abgesehen davon, dass Schuster den Ofen mit einem Abstichloch und einer flüssigen Schlacke ausgestattet hat. Wie oben erwähnt, ist der «Evenstadofen» als Fund in Norwegen zurück bis etwa 1400 n. Chr. angetroffen worden (Espelund 1995) und geht nicht, wie Schuster ohne Unterlagen behauptet, bis 100 v.Chr. zurück (1969:74, 1969:Beilage).

Schuster gibt auf Grund von eigenen Messungen an, dass Temperaturen bis 1700°C in Rennöfen auftreten und benutzt dies als Grundlage für die Annahme, dass flüssiges Roheisen im Schacht auftritt und in der Düsenzone entkohlt wird. Grob gesehen entspricht das der Konklusion Straubes & al. (1964).

Seine Messungen wurden offensichtlich mit einem optischen Pyrometer gemacht. In dem ersten Teil der vorliegenden Arbeit ist gezeigt worden, dass eine Temperatur bis 1400°C bei einer Gleichgewicht-Verbrennung mit Kaltwind in einem Überschuss an Kohlenstoff (Holzkohle) entstehen kann. Eine gemessene Temperatur von 1700°C kann durch eine falsche Grundlage für solche Messungen oder von einer erheblichen Co_2-Bildung verursacht werden. Optisch kann man nämlich nicht die Temperatur eines Gases messen. Das Pyrometer «sieht» Festkörper: entweder ein Stück Holzkohle, die Aussenwand oder ein Stück glühender Schlacke.

Es ist anzunehmen, dass die von Schuster angegebenen höchsten Temperaturen an einem Stück Holzkohle gemessen wurden. Dort nimmt Kohlenstoff in einem Luftstrom an einer Primär-Verbrennung teil. Dabei entsteht bei hoher Luftzufuhr etwas CO_2, das aber unmittelbar in CO verwandelt wird. Der Enthalpiewert für die Bildung von CO beträgt – 110,5 kJ/Mol, für CO_2 – 393,5 kJ/Mol. An Stelle von etwa 1400°C bei CO-Bildung entsteht etwa 2200°C als adiabatische Temperatur bei CO_2-Bildung. Solche Werte sind in Schusters Arbeit gezeigt (Abb. 3, S. 24). 1700°C kann als «Kompromiss» zwischen 1400 und 2200 angesehen werden. Das Stück Holzkohle «sieht» auch kältere Flächen wie Ofenwand, Schlacke u.s.w.

Schuster behauptet, dass Temperaturen um 1700°C für metallurgische Zwecke ausgenutzt werden können. Dabei kann man annehmen, dass die Direktreduktion (stark endotherm) eine grosse Rolle spielt, dass gekohltes Eisen als Tropfen im mittleren Teil des Schachtes entsteht, und dass letztlich ein Frischen in der Düsenebene stattfindet.

1700°C als *reelle* Temperatur kann aber nur entstehen, wenn der Anteil CO_2 fast gleich gross wie der des CO ist. Ein solches Gemisch ist nicht reduzierend, was aus Abb. 1 ersichtlich oder zumindestens vorstellbar ist.
Der Verfasser behauptet also, dass die Temperatur von *1700°C nichts mit dem Gesamt-Milieu im Inneren eines Rennofens zu tun hat.* Das kann mit anderen Angaben ergänzt werden: Sowohl die Schmelztemperatur einer typischen Rennofenschlacke als auch die von gebrannter Tonerde bestehende Ofenwand weisen auf Arbeitstemperaturen um 1100 – 1200°C.

Ein Mangel in Schusters Arbeit ist die sehr mangelhafte Beschreibung der Versuchsbedingungen. Er erwähnt weder die Zusammensetzung der benutzten Erze noch die Schlackenanalysen. Es ist, als ob die gelungene Herstellung vom schmiedbaren Eisen nur von Temperatur und der Zusammensetzung der Gase abhängig ist. Auch ist nur die Aussenseite einer Luppe auf Seite 117 gezeigt. Angaben über die Verteilung Metall/ Schlacke liegen nicht vor.

Auch die Temperaturmessungen von Tholander sind nicht zuverlässig, selbst wenn sie mit Thermoelementen gemessen wurden. 1500 – 1600°C vertritt die Spitze des Elementes, die offenbar von Strahlung und Rückstrahlung beeinflusst war (Tholander 1987). Seine Rohstoffe waren nicht repräsentativ für das Rennofenverfahren.

Der Schwede Nils Björkenstam hat selbst keine Versuchsschmelzen gemacht, vertritt aber in drei Veröffentlichungen sehr intensiv die Ansichten Schusters (Björkenstam 1983, 1985, 1990). Er kannte Schuster persönlich und erhielt direkt Versuchergebnisse als auch Kopien von der Korrespondenz mit Prof. E. Schürmann, der den Geschichtsausschuss des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute vertrat und sehr kritisch zu Schusters Arbeit war. (Ganz deutlich werden Schürmann und Schuster von Björkenstam wie Goliath und David gegenübergestellt!).

Björkenstam legt viel Wert auf die von Schuster gemessene Maximal-Temperatur 1700°C und akzeptiert, dass im Schacht gekohltes und flüssiges Eisen entsteht und zuletzt gefrischt wird. Weiter wird ein grosser Anteil des entstehenden Eisens bei einer Direktreduktion gebildet (Björkenstam 1983). Auch verlässt er sich auf die «Ausgrabungen» Schusters.

Weitere Arbeiten, die von Björkenstam erwähnt werden, sind die Ausgrabung eines Hochofens von I. Bohm (1927) und eine experimentelle Arbeit von H. Hagfeldt (1966).

Der vielversprechende Titel des Buches Björkenstams «Vesteuropeisk järnframställning under medeltiden» – «Die Eisenherstellung Westeuropas im Mittelalter» (1990) lässt vermuten, dass eine typische Rennofenanlage der Periode gründlich beschrieben wird, zumal das Buch als «Archaeological Report» von Stockholm vorgelegt wird. Das ist aber nicht der Fall. Björkenstam schreibt vorwiegend über die Grundlage des frühen Hochofens in Schweden. Im Nachbarland Norwegen, – auch ein Teil West-Europas – war ein Rennofentyp aus der Periode etwa 700 – 1300 jedoch ganz einheitlich. Etwa 100 Öfen sind archäologisch und zum Teil auch metallurgisch untersucht worden.

Die Ansichten Björkenstams angehend Reduktionsmechanismus sind trotz neuer Erfahrungen in einer späteren Dissertation wiederholt (Hjärtner-Holdar 1993:24).

Kommentare

Der Verfasser ist erstens erstaunt, wie wenig Wert auf sorgfältige archäologische Untersuchungen in den erwähnten Arbeiten gelegt wird. Wohl kennt der Archäologe kaum die Metallurgie, die von Schlacke, Ofenresten u.s.w. als Funde vertreten ist. Auf Grund der Stratigraphie und Kontext haben immerhin die Grabungsberichte einen grossen Wert, was Ofenkonstruktion und Zeitalter betrifft. In Norwegen haben wir durch echte archäo-metallurgische Arbeit erfahren, dass die römerzeitlichen und mittelalterlichen Rennofenschlacken sehr homogen sind und man sie als Fayalitschlacke mit hoher FeO-Aktivität bezeichnen kann. Sie waren bei etwa 1100°C flüssig und sind proportional zu der Menge des produzierten Eisens. Wenn man einen hohen Gehalt an Kohlenstoff feststellt, also eine mögliche Direkt-Herstellung von Stahl, scheint es mit einer hohen Temperatur, mit einem sehr reinen Erz und/oder MnO in der Schlacke verbunden zu sein.

Zweitens werden Rennofenverfahren, die in der damaligen Gegenwart eingehend beschrieben wurden, nicht berücksichtigt. Der letzte schwedische Rennofen in einer Tradition, die bis 1400 zurückgeht, erlosch etwa 1870. In Norwegen wurde dieser Ofentyp das letzte Mal etwa 1820 benutzt.

Der grösste Einwand dieses Verfassers ist – abgesehen von den Arbeiten Schürmanns und Osanns – der Mangel

an Thermodynamik, eine Disziplin, die sich seit etwa 1880 stark entwickelt hat und heute weitgehend sowohl qualitativ als quantitativ metallurgische Systeme beschreiben kann. In erster Reihe würden Arbeitstemperaturen wie 1700 °C abgelehnt werden. Dadurch würde auch der alternative Weg über flüssiges Roheisen für kleine Öfen mit Blasebalgbetrieb wegfallen. In zweiter Reihe würde man Wert auf Zusammenhänge zwischen Analysen von Schlacken und Metall legen.

Die Behauptung Björkenstams führt auch zu dem traurigen Resultat, dass Archäologen kaum die *Schlackenmengen* auf einer Grabungsstelle berücksichtigen. Die Schlacke war im Ofen selbst «aktiv» und vertritt in Wirklichkeit indirekt das produzierte Eisen.

Ein letzter Punkt: Bei der Herstellung war Homogenität im Metall wünschenswert und sie wurde auch erzielt. Das ist nicht zu erwarten, wenn ein gekohltes Metall von der Luft gefrischt wird. Der homogene Charakter der FeO-reichen Schlacken mit Einschlüssen von Weicheisen auf den Fundstellen zeigt, dass Frischen von der Schlacke und nicht von der Luft ausgeübt wurde.

Schlusswort

In Ähnlichkeit mit dem Jungen in «Des Kaisers neue Kleider» muss man als Forscher Fragen stellen und nicht ohne weiteres oft zitierte Arbeiten akzeptieren. In der vorliegenden Arbeit ist gezeigt, dass manche Publikationen von den letzten etwa 12 Jahren auf falschen Temperaturmessungen vor etwa 25 Jahren beruhen. Der Verfasser ist überzeugt, dass eine enge Zusammenarbeit zwischen Archäologen und Metallurgen notwendig ist, um die Totalität des Rennofenverfahrens zu beherrschen. Dabei entsteht ein «Synergie-Effekt».

Archäo-Metallurgie ist ein neues Wort. Man muss sowohl die Archäologie als auch die Metallurgie ernst nehmen. In manchen der erwähnten Arbeiten sind weder Archäologie noch eine auf Thermodynamik basierte Metallurgie berücksichtigt worden.

Es ist besonders im deutschsprachigen Gebiet heutzutage eine Tendenz, dass die Metallurgie von anderen Fachleuten wie Mineralogen behandelt wird. Die Mineralogen sind Spezialisten für chemische und morphologische Zusammenhänge in erstarrten Proben. Solche Daten haben aber wenig Aussagewert für den thermischen und chemischen Verlauf in Rennöfen. Das Schmelzen beruht auf Verbrennung, wobei sowohl feste, flüssige und gasförmige Phasen auftreten. Wichtige Daten sind die Grössen, die in der Thermodynamik üblich sind, so wie Enthalpie, Temperatur, Aktivitäten und Gleichgewichtskonstante.

Die erwähnten Arbeiten aus Österreich sind nicht länger repräsentativ für die Alpenländer. Mit einigen Ausnahmen hat, nach Ansichten des Verfassers, für die Herstellung von Eisen in Rennöfen in Schweden kaum die Archäo-Metallurgie begonnen.

Nachsatz

Der Verfasser hat kürzlich mit Genehmigung der Archäologen das Glück gehabt, eine 9,3 kg schwere Luppe zu untersuchen. Sie wurde als Streufund beim Pflügen im Jahre 1936 oder 1937 etwa 200 km nördlich vom Trondheim gefunden. Metallographisch und chemisch wurde festgestellt, dass die Luppe an der Oberfläche entkohlt war. Das Innere bestand aus homogenem Stahl mit eutektoider Zusammensetzung. Die Luppe mit etwa 0,7% C als Fe_3C ist in Uppsala, Schweden, mit der ^{14}C-Methode datiert worden. Ganz eindeutig ist das Alter AD 390-545 festgestellt worden. Diese Luppe ist eigentlich die Hälfte einer runden Luppe, die mit einer Axt geteilt worden war und ursprünglich ein Gesamtgewicht von etwa 20 kg aufwies.

Die Luppe ist relativ dicht und enthält bloss grosse innere Hohlräume. Trotz Mangel an Bearbeitung hat die Luppe innen keine Anhäufungen von Schlacke, dagegen aber viel feinere Einschlüsse von überwiegend FeO. Aus dem Metall sind als Proben ein kleines Messer und ein Nagel geschmiedet worden.

Dieser Fund führt dazu, dass die römerzeitlichen Anlagen in Tröndelag sowohl von 200 Fundstellen mit erheblichen Mengen Schlacke, gebranntem Ton von den Schächten, gut erhaltenen Schlackengruben als auch von zeitgemässem repräsentativen Metall vertreten sind. – Die in dem Metall vorliegenden Schlackeneinschlüsse werden nun mit Röntgen-Mikroanalysator untersucht und liefern interessante Angaben über die letzten Stufen der Herstellung. Anscheinend hatten die Hersteller ein sehr reiches Erz zur Verfügung, ein Erz, das wegen Feinkörnigkeit auch getestet werden konnte.

Es dreht sich offenbar um ein «*ferrum nor(d)icum*»!

Anmerkungen

Avery, D.H., Schmidt, P.: Journ. of Metals 31, 1979, 10, S. 14–20 (wie von Straube 1985 zitiert)

Bielenin, K.: Einige Bemerkungen über das altertümliche Eisenhüttenwesen im Burgenland. Symposium Eisenstadt 1975 «Archäologische Eisenforschung in Europa», S. 49–62, Eisenstadt 1977

Björkenstam, N.: Förhistorisk och medeltida järnframställning. Reaktionsförlopp vid reduktion av järnmalmer i låga schaktugnar, in: Jernkontorets bergshistoriska utskott 1983, H 27, S. 1–42, Stockholm

id., Prehistoric and Medieval Iron Production, in: Historical Metallurgy 19 (1985) 2

id., Västeuropeisk järnframställning under medeltiden, in: Stockholm Archaeological Reports 1990, Nr. 25; Jernkontorets bergshistoriska skriftserie 1990, Nr. 26, Stockholm

Espelund, A.: Iron Production in Norway during two Millenia. Arketype, Trondheim 1995

id., The Catalan Process as presented in Scandinavian Literature from about 1770 to 1880. La farga catalana en el marc de l'arquelogie siderúrgica (Ripoll 1993), S. 169–176, Andorra la vella

Evenstad, O.: Praktische Abhandlung von den Eisensteinen, welche sich in Norwegen in Sümpfen und Morästen befinden und von der Methode solche in Eisen und Stahl zu verwandeln. Übersetzung von J.G.L. Blumhof, Göttingen 1801 (Neue Ausgabe mit Erklärungen, Trondheim 1991)

Guyan, W. U. (Red.): Die Versuchsschmelzen und ihre Bedeutung für die Metallurgie des Eisens und dessen Geschichte. Symposium (der Arbeitsgemeinschaft «Comité pour la Sidérurgie ancienne» Schaffhausen 1970), Schaffhausen 1973

Hjärtner-Holdar, E.: Järnets och järnmetallurgins introduktion in Sverige, in: Societas Archaelogica Upsaliensis Aun 16. Uppsala 1993

Klaus, K.: Lagerstätten und Produktionszentren des Ferrum Noricum, in: Eisengewinnung und -verarbeitung in der Frühzeit. Leobener Grüne Hefte – Neue Folge 2, 1981, S. 74–92

Osann, B.: Rennverfahren und Anfänge der Roheisenerzeugung. Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Fachausschussbericht 9.001, Düsseldorf 1971

id., Direkter Ablauf des Rennverfahrens oder Ablauf über das Zwischenprodukt Roheisen, in: Versuchsschmelzen und ihre Bedeutung für die Metallurgie des Eisens und dessen Geschichte, Symposium Schaffhausen 1970, S. 72–80

Rosenqvist, T.: Thermochemical Data for Metallurgists. Trondheim 1983

Schmid, W.: Norisches Eisen, in: Beiträge zur Geschichte des österreichischen Eisenwesens, Abt. 1, Heft 2, Wien-Berlin-Düsseldorf 1932

Schuster, W.: Das alte Metall- und Eisenschmelzen, Technologie und Zusammenhänge, in: Technikgeschichte in Einzeldarstellungen, Nr. 12. VDI-Verlag, Düsseldorf 1969

Schürmann, E.: Die Reduktion des Eisens im Rennfeuer, in: Stahl und Eisen 78, 1958, 12, S. 1297–1308

Straube, H.; Tarmann, B.; Plöckinger, E.: Erzreduktionsversuche in Rennöfen norischer Bauart, in: Kärntner Museumsschriften 3 / Mitteilung aus den Forschungsanstalten der Edelstahlwerke Gebr. Böhler & Co., Klagenfurt 1964

Straube, H.: Untersuchungen über die römerzeitliche Stahlherstellung im Gebiet Noricum, in: Die Versuchsschmelzen und ihre Bedeutung für die Metallurgie des Eisens und dessen Geschichte, Symposium Schaffhausen 1970, S. 6–16

id., Kritische Gegenüberstellung der Theorien über die Metallurgie des Rennfeuers, in: FERRUM Nr. 57, S. 20–28, Schaffhausen 1986

Tholander, E.: Experimental Studies on early Iron-Making. Diss. KTH, Stockholm 1987