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

Herausgeber: Eisenbibliothek

Band: 57 (1986)

Artikel: Kritische Gegenüberstellung der Theorien über die Metallurgie des Rennfeuers

Autor: Straube, Harald

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-378190

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: 15.08.2025

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

öfen und vielleicht in etwa eine weitere Verdreifachung mit der Einführung des indirekten Verfahrens. Die Kapazität des Stückofens ist gerade auch im Vergleich mit den frühen Beispielen des indirekten Verfahrens überraschend hoch. Es stellt sich die Frage, ob es auch ausserhalb der Steiermark Öfen einer solchen Kapazität gab? Manfred Sönnecken hat im Sauerland bei seinen Ausgrabungen Schmelzöfen von vier Metern Höhe entdeckt[17].

Die wirtschaftlichen Vorteile des indirekten Verfahrens gegenüber dem Stückofen sind erst langsam herausgetreten. Zunächst war bei gleicher Leistung der Holzverbrauch viel grösser. Dann steigerte sich die Ofenkapazität noch einmal erheblich, sehr rasch schon auf das Dreifache. Gleichzeitig konnten die Holzkosten gesenkt werden, worauf in der Diskussion des Kolloquiums besonders hingewiesen wurde.

Anmerkungen

1 *Zu den Problemen des Historikers mit seiner Überlieferung vgl. jetzt sehr anregend Arnold Esch, Überlieferungs-Chance und Überlieferungs-Zufall als methodisches Problem des Historikers. Historische Zeitschrift 1985, S. 529–570.*

2 *Rolf Sprandel, Das Eisengewerbe im Mittelalter, Stuttgart 1968.*

3 *Hubert Collin, Aux origines du Bassin sidérurgique de Briey. Mémoires de l'Academie Nationale de Metz 6e Série, 3, 1975, S. 75–98; Alain Girardot, A propos d'un bail de forge en 1391. Fonte et forges hydrauliques en Lorraine au XIVe siècle. Annales de l'Est, Série 5e, 28, 1976, S. 275–278.*

4 *H.R. Schubert, History of the British iron and steel industry from c. 450 B.C. to 1775, 1957, S. 140, Anm. 2.*

5 *Vgl. Diskussion bei Sprandel (wie Anm. 2) S. 250 f.*

6 *R.A. Mott, English bloomeries (1329–1589). Journal of the Iron and Steel Institut, June 1961, S. 149–161.*

7 *A. v. Muchar, Der steiermärkische Eisenberg. Steiermärkische Zeitschr. NF. 5. 1838, S. 41.*

8 *J. Wichner, Geschichte des Benediktiner Stiftes Admont III, Graz, 1878, S. 157.*

9 *Sprandel (wie Anm. 2) S. 69.*

10 *Wie o. Anm. 3*

11 *Wolfgang Oettingen (Hg.), A. A. Filaretes Traktat über die Baukunst, Wien 1890, S. 470–478.*

12 *Giovanni di Antonio da Uzzano, Pratica della mercatura, in: Della decima e delle altre gravezze IV, 1766, S. 106 u. 158.*

13 *H. Schubert, Geschichte der Nassauischen Eisenindustrie. Veröff. d. Histor. Kommission f. Nassau 9, 1937, S. 20–24.*

14 *Guy Thuillier, Forges et Fourneaux en Nivernais vers 1600. Bulletin philologique et historique (1957) 1958, S. 463–470.*

15 *A. Münch, Die Erzgruben und Hammerwerke im Fricktal und am Oberrhein. Argovia 24, 1893, S. 70–75.*

16 *J. G. Lori, Sammlung des Bayerischen Bergrechts 1764, Nr. 56 (12 Schinen auf 1 Amberger Zentner, dessen Gewicht – 61 kg – nach F. M. Ress, Geschichte und wirtschaftliche Bedeutung der oberpfälzischen Eisenindustrie. Ing. wiss. Diss. Clausthal 1950, S. 10).*

17 *Manfred Sönnecken, Die mittelalterliche – frühneuzeitliche Eisenerzeugung im märkischen Sauerland. Der Märker 34, 1985, S. 196.*

Kritische Gegenüberstellung der Theorien über die Metallurgie des Rennfeuers

Prof. Dr. Harald Straube, Wien

Der Rennofen war das Fundament des Eisenhüttenwesens von dessen Anfängen im zweiten Jahrtausend v.Chr. bis ins späte Mittelalter. Ab dem Zeitpunkt der Herstellung von Eisen in einem nach heutigem Sprachgebrauch für die damaligen Verhältnisse technischen Massstab hat dieser Werkstoff das Leben des Menschen in sehr nachdrücklicher Art beeinflusst. Dabei ist es gar nicht so selbstverständlich, dass die vordem als metallischer Werkstoff dominierende Bronze verdrängt wurde. Die Gewinnung des Eisens aus den Erzen ist nämlich schwieriger als die von Kupfer wegen des höheren Schmelzpunktes und der erforderlichen stärker reduzierenden Atmosphäre, ein Recycling im Wege des Wiedereinschmelzens war nicht möglich, vor allem aber ist kohlenstofffreies Eisen in seinen mechanischen Eigenschaften der Bronze unterlegen. So bleibt wohl die Häufigkeit der Vorkommen und die oft leichte Zugänglichkeit der Eisenerze, die für das Ende des Bronzezeitalters wahrscheinlich in erster Linie verantwortlich sind.

Angesichts der so lange andauernden Vormachtstellung des Rennofens, der spätestens zu Beginn unserer Zeitrechnung bereits in weiten Teilen Europas auch ausserhalb der Grenzen des römischen Reiches und selbst in Afrika[1] verbreitet war, ist es ein selbstverständliches Anliegen, die in ihm ablaufenden Vorgänge näher zu kennen, um damit Hinweise für die von den alten Hüttenleuten praktizierte Arbeitsweise zu erhalten. Aufzeichnungen zeitgenössischer Autoren tragen dazu wenig bei. Selbst die sonst so aufschlussreiche naturalis historia von Plinius enthält in den einschlägigen Stellen Angaben, die bisher eher verwirrend als klärend waren. Als zweifelsfrei und nicht fehlinterpretierbar kann jedoch die darin enthaltene Anmerkung über die Vielfalt der Arten der verwendeten Öfen angesehen werden. Aus damaligen Schriften aber auch aus Funden geht hervor, dass schon die alten Griechen ausser dem praktisch kohlenstofffreien weichen Eisen auch kohlenstoffhaltiges Eisen, also Stahl kannten und seine Härtung durch Abschrekken in Wasser zumindest vereinzelt beherrschten[2]. Die Überlegenheit von Stahl gegenüber Weicheisen wurde vor etwa 2000 Jahren von mehreren römischen Autoren beschrieben und hat viel später noch ihren Niederschlag in deutschen Sagen und arabischen Legenden gefunden. Stahl war somit ein begehrter Werkstoff nicht nur für Werkzeuge aller Art sondern auch für Waffen und hatte daher auch grosse wehrtechnische Bedeutung.

Umso bemerkenswerter erscheint es, dass dieser so wichtige Werkstoff offenbar nur in wenigen Gebieten, wie im Bereich der ehemals keltischen Provinz Noricum, gezielt hergestellt werden konnte. Lange Zeit herrschte die Meinung vor, dass der für eine erfolgreiche Abschreckhärtung erforderliche Kohlenstoffgehalt nur durch eine nachträgliche Aufkohlung des im Rennofen erzeugten weichen Eisens erreichbar war. Diese Ansicht ist allein schon durch zahlreiche Funde, die Grösse, Menge und den Verwendungszweck der Stahlprodukte widerlegt und heute wissen wir,

dass aus dem Rennofen als primärem Verhüttungsaggregat Eisen mit sehr unterschiedlichem Kohlenstoffgehalt gewonnen werden konnte[3–12]. Daraus ergibt sich die Frage nach den Gründen für die allem Anschein nach auf wenige Gebiete beschränkte gezielte Stahlherstellung. Grundsätzlich könnten dafür örtlich bestehende besonders günstige Gegebenheiten, etwa das verwendete Erz verantwortlich sein oder aber die Kunst der Hüttenleute, die den Verfahrensablauf im Rennofen besser beherrschten als dies anderwärts der Fall war oder überhaupt eine andere Arbeitsweise anwendeten.

Alte Aufzeichnungen liefern dazu so gut wie keine aufschlussreichen Informationen und auch die Aussagekraft von Funduntersuchungen ist diesbezüglich recht begrenzt, so dass eine Klärung am ehesten aus die alte Arbeitsweise simulierenden Versuchen in Verbindung mit den zugrundeliegenden metallurgischen Grundlagen zu erwarten sind. Der erste derartige Versuch, der allerdings weit bescheidenere Ziele verfolgte, wurde schon vor mehr als 100 Jahren von Graf Wurmbrandt unternommen[13]. Hinsichtlich des Ergebnisses ist ihm mit praktisch allen späteren bis etwa zum Jahr 1960 durchgeführten Verhüttungsversuchen in Rennöfen eines gemeinsam, nämlich dass als Produkt – wenn überhaupt eine metallische Phase in nennenswertem Umfang auftrat – kohlenstoffarmes weiches Eisen gewonnen wurde. Da die überwiegende Mehrheit aller bis dahin in Europa gemachten Funde von Rennofeneisen ebenfalls fast kohlenstofffrei waren, schien es unbestritten, dass solch ein nicht härtbares Weicheisen das typische Produkt des Rennofens sei, dass kohlenstoffhaltiges Eisen oder mit anderen Worten abschreckhärtbarer Stahl nur vergleichsweise selten als Zufallsprodukt anfiel[14] und dass nicht schmiedbares Eisen mit so hohen Kohlenstoffgehalten wie sie für Guss- und Roheisen charakteristisch sind, als unerwünschter Ausschuss anzusehen war.

Die bestehenden Vorstellungen ergaben folgendes Bild für den Verfahrensablauf im Rennofen: Im oberen Teil des Ofens wurden aus dem teigigen Erz zunächst kleine Eisenteilchen ausgeschieden, die sich später, im unteren Bereich des Ofens zu einem grösseren Gebilde, der Luppe vereinigten oder die mit Schlacke vermischt eine schwammähnliche Masse bildeten. Als besonderes Merkmal des Verfahrens wurde angegeben, dass die Temperatur im Rennofen jedenfalls nicht ausreichte, um das reduzierte Eisen in die schmelzflüssige Phase überzuführen, sondern dass das Eisen im festen oder teigigen Zustand anfiel[14–17]. Als weiteres Merkmal für den vollkommenen Ablauf des Rennofenverfahrens wurde die Bildung einer dünnflüssigen Schlacke und deren vollkommenes Ablaufen aus dem Ofen angesehen[18].

Das Vorliegen einer derartigen Schlacke erschien wegen ihrer guten Trennung vom Metall als wesentliche Voraussetzung für die Gewinnung schmiedbaren Eisens und dazu bedurfte es einer geeigneten Zusammensetzung auch ohne Zusatz von Flussmitteln und einer ausreichend hohen Temperatur. Tatsächlich sind die Rennofenschlacken mit ihren hohen FeO- und SiO_2-Gehalten ausgesprochen niedrigschmelzende Eisensilikatschlacken. Obwohl damit an sich gute Bedingungen für die Trennung von Metall- und Schlackenphase bestehen, war das gebildete Rennofeneisen sehr reich an Schlakkeneinschlüssen oder es lagen nur kleinere Eisenluppen umhüllt von Schlacke vor und es war daher allein schon zur Entfernung der Einschlüsse und zum Verschweissen mehrerer kleiner Luppen zu einem grösseren Stück notwendig, die Luppen durch Schmieden zu bearbeiten. Das so gewonnene Zwischenprodukt konnte hinsichtlich seiner Zusammensetzung und somit auch Eigenschaften recht heterogen sein. Diese erst in jüngerer Zeit beachtete Heterogenität von Fundstücken infolge ungleichmässiger Kohlenstoffverteilung wurde einfach darauf zurückgeführt, dass im Rennofen vereinzelt kohlenstoffhaltige Eisenteilchen entstanden, die mit kohlenstofffreien feuerverschweisst wurden[19] oder dass es in Luppen zu örtlichen Aufkohlungen kommen konnte, die wegen der in keiner Phase der Erzeugung eingetretenen Verflüssigung der metallischen Phase bis zum Zwischen- oder Endprodukt erhalten blieben[15,17].

Als Gründe für die fallweise nachgewiesenen, im Rennofen erfolgten örtlichen Aufkohlungen wurden in wenig überzeugender Form verschiedene Ursachen vermutet. Dazu zählt eine besondere Beschickung des Ofens mit Stück- und Feinerz[14], heissere Ofenführung bei zugleich vorsichtigerem Blasen(?)[14] und ein verlängertes Halten bei höheren Temperaturen in der Verbrennungszone bei direktem Kontakt des Eisens mit Holzkohle[15]. Grosse Aufmerksamkeit wurde diesem Problem über lange Zeit nicht zugewendet, wohl deshalb, da Aufkohlungen im Rennofen als ungezielt und zufällig angesehen[14] und Stahlerzeugnisse einer nachträglichen Aufkohlung zugeschrieben wurden, worauf schon O. Schaaber[19] hingewiesen hat.

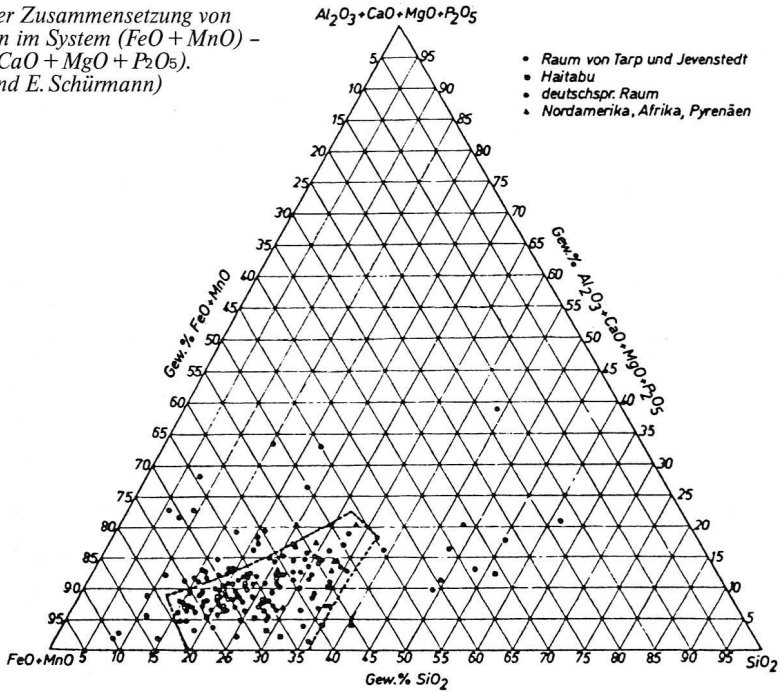
Auch ohne die Aussagen neuerer Rennofenversuche vorwegzunehmen, wird die Auffassung, dass der zur Stahlhärtung notwendige Kohlenstoff in der Regel oder gar ausschliesslich durch Zementation in das Eisen eingebracht wurde, durch mehrere Tatsachen erschüttert. Dazu zählen die vielen auch mengenmässig bedeutsamen Stahlfunde z.B. am Magdalensberg[20], die Verwendung von Stahl für Massenprodukte, die bei einem Grossfund von mehr als 875.000 Nägeln nachgewiesen wurde und die gerade bei einem Teil dieser Nägel festgestellte Kohlenstoffverteilung, die durch einen kohlenstoffreichen Kern, umgeben von weichem Eisen gekennzeichnet ist[15] und die eher für eine Aufkohlung im Rennofen spricht. Wenn für eine solche Massenware Stahl verwendet wurde, dann ist es recht unwahrscheinlich, dass er auf dem Wege der sehr teuren und langwierigen nachträglichen Aufkohlung hergestellt wurde. Auch die sehr gleichmässige Kohlenstoffverteilung in vielen anderen Stahlfunden aus keltisch-römischer Zeit spricht dagegen, dass eine Zementation der übliche Weg der Herstellung von Stahlgegenständen gewesen sei, weil abgesehen von langen Aufkohlungszeiten eine zusätzliche Langzeitglühung zur Erzielung homogen verteilten Kohlenstoffs erforderlich gewesen wäre.

Den wohl ersten Beitrag zur Bereitstellung von Grundlagen für das Rennofenverfahren lieferten W. Oelsen und E. Schürmann[21] mit der Untersuchung von mehr als 100 Rennfeuerschlackenfunden. Unabhängig vom Fundort handelte es sich fast durchwegs um niedrigschmelzende eisenreiche Eisensilikatschlak-

ken, die 55 bis 70% ($FeO + Fe_2O_3 + MnO$), 20 bis 30% SiO_2 und 10 bis 15% andere Oxide, nämlich CaO, Al_2O_3, MgO und P_2O_5 enthielten. Ihre Zusammensetzung liegt im zugehörigen Dreistoffsystem (Bild 1) in der Nähe der beiden im System FeO-SiO_2 links und rechts vom Fayalit ($2FeO \cdot SiO_2$) auftretenden, bei schon ca. 1180°C schmelzenden Eutektika (Bild 2[22/23]). Die Schlackenbestandteile CaO, Al_2O_3 und P_2O_5 erniedrigen in den nachgewiesenen Konzentrationen die an sich schon tiefen Schmelztemperaturen dieser Schlakken noch weiter. Selbstverständlich steht der sehr hohe Eisengehalt der Schlacke in Zusammenhang mit einem äusserst geringen Eisenausbringen und wäre aus der Sicht eines modernen Stahlwerkers alles andere als erwünscht. Für das Rennofenverfahren war er jedoch eine notwendige Voraussetzung, wenn unterstellt wird, dass die Schlacke bei der niedrigen Temperatur von 1100 bis 1200°C flüssig sein muss. Als weitere Schlussfolgerung ergab sich daraus, dass zur Erzielung derart niedrigschmelzender Schlacken im Rennofen nur eisenreiche Erze (>60% Fe) verhüttbar waren, wenn keine als Flussmittel für die Schlacke wirkenden Zuschlagstoffe verwendet wurden. Schliesslich war noch zu folgern, dass nur vorwiegend Kieselsäure als Gangart enthaltende Erze geeignet waren, in denen die Gehalte an sonstigen oxidischen Begleitstoffen in Summe etwa die Hälfte des SiO_2-Gehaltes betrugen.

Diese Ergebnisse stellten unzweifelhaft eine beachtliche Erweiterung des Kenntnisstandes über die Verhüttung im Rennofen dar, auch wenn damit noch keine direkten Aussagen über den Ablauf des Verfahrens und über das anfallende Produkt, vor allem den Weg der Erzeugung härtbaren Stahls ermöglicht wurden. Einen bedeutsamen Schritt in dieser Richtung unternahm jedoch E. Schürmann[24], der alle bis dahin vorliegenden, für die Reduktion des Eisens im Rennfeuer massgebenden Grundlagenuntersuchungen zusamnmenstellte, auswertete und erweiterte. Aus dem Zustandsschaubild Eisen-Eisen(III)-oxid (Fe_2O_3) folgt, dass bei Temperaturen unter 570° das Fe_2O_3 durch Sauerstoffabbau zu Magnetit (Fe_3O_4) und metallischem Eisen reduziert wird. Eisen kann sich jedoch auch während der Reduktion bei höheren Temperaturen bilden, wenn in der

Bild 1: Die Lage der Zusammensetzung von Rennfeuerschlacken im System (FeO + MnO) - (SiO_2) - (Al_2O_3 + CaO + MgO + P_2O_5). (nach W. Oelsen und E. Schürmann)



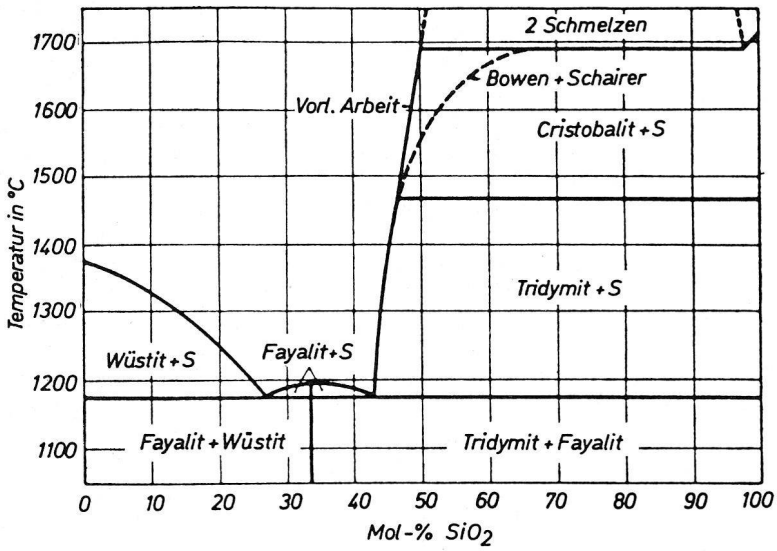


Bild 2: Das Zustandsschaubild (FeO) - (SiO_2). (Nach N.L. Bowen und J.F. Schairer sowie H. Schenck und G. Wiesner)

Oxidphase noch Fe_2O_3 vorhanden ist. Durch gleichzeitig anwesende Kieselsäure wird der Gehalt an Fe_2O_3 zu geringeren Werten verschoben und liegt bei flüssigen SiO_2-gesättigten Schlacken unter 2%. Auf alle Fälle findet aber vor der Reduktion zu Eisen und der damit verbundenen Verminderung des FeO- und Anreicherung des SiO_2-Gehaltes in der Oxidphase ein Abbau der höherwertigen Eisenoxide statt.

Die Gleichgewichte der durch Co-Co_2-Gasgemische erfolgenden Reduktion und Aufkohlung des Eisens werden durch das Bauer-Gläsner-Diagramm in Bild 3 wiedergegeben. Die Vorgänge werden anhand des für $pCO + pCO_2 = 1$ bar berechneten Teilbildes besprochen. Obwohl im Rennofen andere Verhältnisse bestehen, bleiben die grundsätzlichen Aussagen gültig. Die Kurven d,e,f,g zeigen, dass über 570°C die Reduktion von Eisen aus Wüstit erst dann beginnt, wenn die höherwertigen Oxide bereits zu Wüstit reduziert wurden. Bei 1000°C steht ein Gas mit ca. 28% CO_2 in Gleichgewicht mit Wüstit und Eisen, d.h. dass CO_2-ärmere Gasgemische den Wüstit vollständig zu Eisen reduzieren. Die Boudouard-Kurve a,b,c gibt die Zusammensetzung der CO/CO_2-Gemische an, die mit Kohlenstoff im Gleichge-

wicht stehen und daher dieselbe Reduktionsfähigkeit haben. Daraus ist ersichtlich, dass bei niedriger Temperatur auch sehr CO-arme Gase reduzierend wirken, bei hoher Temperatur aber hohe CO-Anteile für die Reduktion erforderlich sind. Gase, deren Zusammensetzung unter der Boudouard-Kurve liegen, haben eine noch stärkere Reduktionswirkung als fester Kohlenstoff, sind jedoch nicht stabil, und streben unter Abgabe von Kohlenstoff isotherm dem Gleichgewicht zu. Bei Temperaturen unter etwa 500° vermögen die CO_2-reichen Gase mit Gleichgewichtszusammensetzung – und damit auch der Kohlenstoff – die Reduktion von Fe_2O_3 nur bis zum Fe_3O_4 voranzutreiben. Um daraus Eisen und Eisencarbid zu reduzieren, bedarf es wesentlich CO-reicherer (instabiler) Gasgemische.

Bei entsprechenden Gasgemischen fallen als endgültige Reduktionsprodukte in Abhängigkeit von der Temperatur ungelösten Kohlenstoff enthaltendes Eisen (unter 720°C), α-Eisen (720 bis ca. 900°C) oder γ-Eisen (über ca. 900°C) an, wobei in letzterem schon bei der Reduktion aus dem Wüstit gelöster Kohlenstoff vorhanden ist. Gasgemische mit einer Zusammensetzung links der Boudouard-Kurve führen genauso wie reiner Kohlenstoff über 720°C zu einer Aufkohlung des Eisens bis zur Sättigung.

Der aufkohlenden Wirkung des CO-haltigen Gases bzw. des Kohlenstoffs wird somit durch die noch im Überschuss vorhandenen Eisenoxide entgegengesteuert, sie überwiegt aber bei bereits fortgeschrittener Reduktion von Eisen und kann bis zu dessen Kohlenstoffsättigung führen, bei ausreichend hoher Temperatur bis zum kohlenstoffgesättigten flüssigen Roheisen.

Um den Gegebenheiten des Rennofens näherzukommen, bezog E. Schürmann auch die bestehenden Grundlagen über den Einfluss der wichtigsten neben Eisenoxid im Eisenerz enthaltenen Oxide auf die Eisenreduktion in seine Betrachtung mit ein. Aus Gleichgewichtsuntersuchungen[25/26] geht hervor, dass MnO im Erz die Aufkohlung fördert und dass die Mangangehalte im reduzierten Eisen sehr gering sind, was mit Funduntersuchungen und den Ergebnissen von Rennofenversuchen völlig übereinstimmt. Die Reduktion des Mangan(II)-oxids ist also unbedeutend im Vergleich zu der des weniger stabilen Eisenoxids, so dass sich mit fortschreitender Reduktion MnO in der Oxidphase anreichert, womit auch die üblichen MnO-Gehalte etwas manganreicherer Erze zu beträchtlich verbesserter Aufkohlung führen können.

Der Einfluss von Kieselsäure auf die Reduktion von Eisen aus MnO- und SiO_2-haltigem Wüstit kann in Ermangelung genauer Gleichgewichtsuntersuchungen nur anhand eines von Körber und Oelsen[26] für 900°C aufgestellten Raummodells abgeschätzt werden. Daraus geht hervor, dass CO-CO_2-Gemische keine nennenswerte Silicium-Reduktion herbeiführen. Allenfalls in Rennfeuereisen festgestellte Siliciumgehalte sind daher – ganz analog zu Mangan – nicht dem metallischen Eisen zuzuschreiben sondern durch Schlackeneinschlüsse verursacht. Für die Eisenreduktion aus einer nur aus FeO und SiO_2 bestehenden Oxidphase ist zwar bei hohen über dem des Fayalits liegenden SiO_2-Gehalten ein sehr hoher CO-Gehalt im Gas erforderlich, doch haben schon kleine MnO-Gehalte einen starken Einfluss auf die Reduktion derart, dass gerade bei hohem Kieselsäureanteil die Aufkohlung des Eisens sehr gefördert wird.

Der im Rennofen grossteils über die Holzkohle eingebrachte Schwefel wird nur zu geringem Teil vom Eisen aufgenommen. Der Phosphorgehalt im Eisen kann in weiten Grenzen schwanken und hängt sowohl vom P_2O_5-Gehalt des Erzes als auch von der Reduktionsfähigkeit des Gases ab[24/26]. Höhere Phosphorgehalte im Eisen vermindern dessen Zähigkeit sehr stark. Darüber hinaus verdienen sie deshalb Beachtung, weil sie den Beständigkeitsbereich des Ferrits erweitern und so die Aufkohlung des Eisens beeinflussen können.

Mit den von E. Schürmann aufbereiteten Grundlagen wurde – auch wenn sie auf Gleichgewichtsbetrachtungen basieren, die lediglich die mögliche Endlage einer Reaktion beschreiben – endlich die Voraussetzung geschaffen, die vordem bestehenden recht vagen und allgemeinen Vorstellungen über die Vorgänge im Rennofen[14] abzulösen. Insbesondere war damit theoretisch nachgewiesen, dass es für die Herstellung von Stahl keineswegs notwendig war, die oft und immer wieder unterstellte nachträgliche Aufkohlung[27] vorzunehmen. Stahl und selbst Roheisen können durchaus Produkte des Rennofens sein, obwohl die dafür einzuhaltenden Bedingungen in vergleichsweise engen Grenzen liegen, so dass weiches, kohlenstoffarmes Eisen üblicherweise gewonnen wurde. Allen vorstehend beschriebenen Betrachtungen lag aber nach wie vor der Gedanke zugrunde, dass das Eisen stets im festen Zustand angefallen sei und nur die Schlacke im Rennofen verflüssigt wurde.

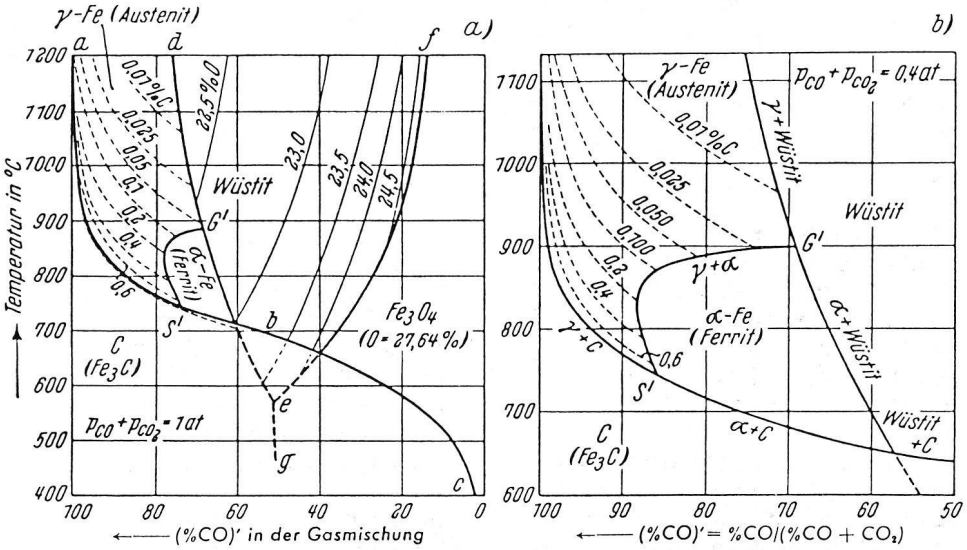


Bild 3: Gleichgewichte für die Reduktion von Wüstit zum Eisen und dessen Aufkohlung durch CO – CO_2 – Gasgemische (berechnet). (Nach E. Schürmann)
a) für $pCO + pCO_2 = 1$ bar
b) für $pCO + pCO_2 = 0{,}4$ bar

Die besprochenen Grundlagen beziehen sich vorwiegend auf Zusammensetzung und Zustand der entstehenden metallischen Phase und Schlacke, während sie über den Verfahrensablauf nur indirekte Aussagen liefern. Zur Beantwortung der diesen Punkt berührenden Fragen sollten die bereits erwähnten, die alte Verfahrensweise simulierenden Reduktionsversuche in nachgebauten Rennöfen besser geeignet sein, wobei natürlich die theoretischen Grundlagen einbezogen werden müssen. Solche Versuche wurden seit den fünfziger Jahren vermehrt an vielen Plätzen Europas aber auch in Asien und Afrika[28] durchgeführt. Über die darüber bis zum Jahr 1971 erfolgten Publikationen liegt eine Zusammenfassung von R. Pleiner[29] vor.

Eigene Versuche[4/5] im Jahre 1962 galten vor allem der Frage, auf welchem Weg die vor etwa 2000 Jahren nur vereinzelt, so vor allem in der Provinz Noricum beherrschte Stahlerzeugung erfolgte, d.h. ob dort der Prozess so geführt wurde, dass im Rennofen kohlenstoffhaltiges Eisen anfiel oder ob doch eine nachträgliche Aufkohlung als der wahrscheinlichere Weg zum norischen Stahl anzusehen ist.

Mit den anhand des Reduktionsgutes gefundenen Ergebnissen konnte nachgewiesen werden, dass die direkte Stahlherstellung im Rennofen grundsätzlich möglich ist. Darüber hinaus konnte damit auch der stattgefundene Verfahrensablauf belegt werden, der weit von der bisherigen Lehrmeinung abwich. Demnach lagen schon in mittlerer Schachthöhe stark reduzierende Bedingungen vor (hoher CO-Anteil, niedrige Temperatur, vgl. Bild 3), so dass nicht nur die Reduktion des Fe_2O_3 bis zum metallischen Eisen ablaufen konnte, sondern auch eine weitgehende Aufkohlung der zuerst gebildeten kleinen Eisenteilchen (kurzer Diffusionsweg) erfolgte, wie dies Bild 4 belegt. Mit der Aufkohlung wurde die Aufschmelztemperatur des Eisens stark herabgesetzt, so dass dieses beim Eintritt in tiefer gelegene heissere Zonen des Schachtes zumindest teilweise verflüssigt wurde, zusammenfliessen und eine grössere Luppe aus kohlenstoffreichem Eisen bilden konnte. Diese Luppe war dann im untersten Teil des Schachtes, besonders vor den Blasdüsen stark oxidierenden Bedingungen ausgesetzt (Windzufuhr, hohe Temperatur; ausser der Gasphase wirkte örtlich auch die FeO-reiche Schlacke entkohlend), wurde daher wieder entkohlt und erstarrte infolge des Anstiegs der Aufschmelztemperatur.

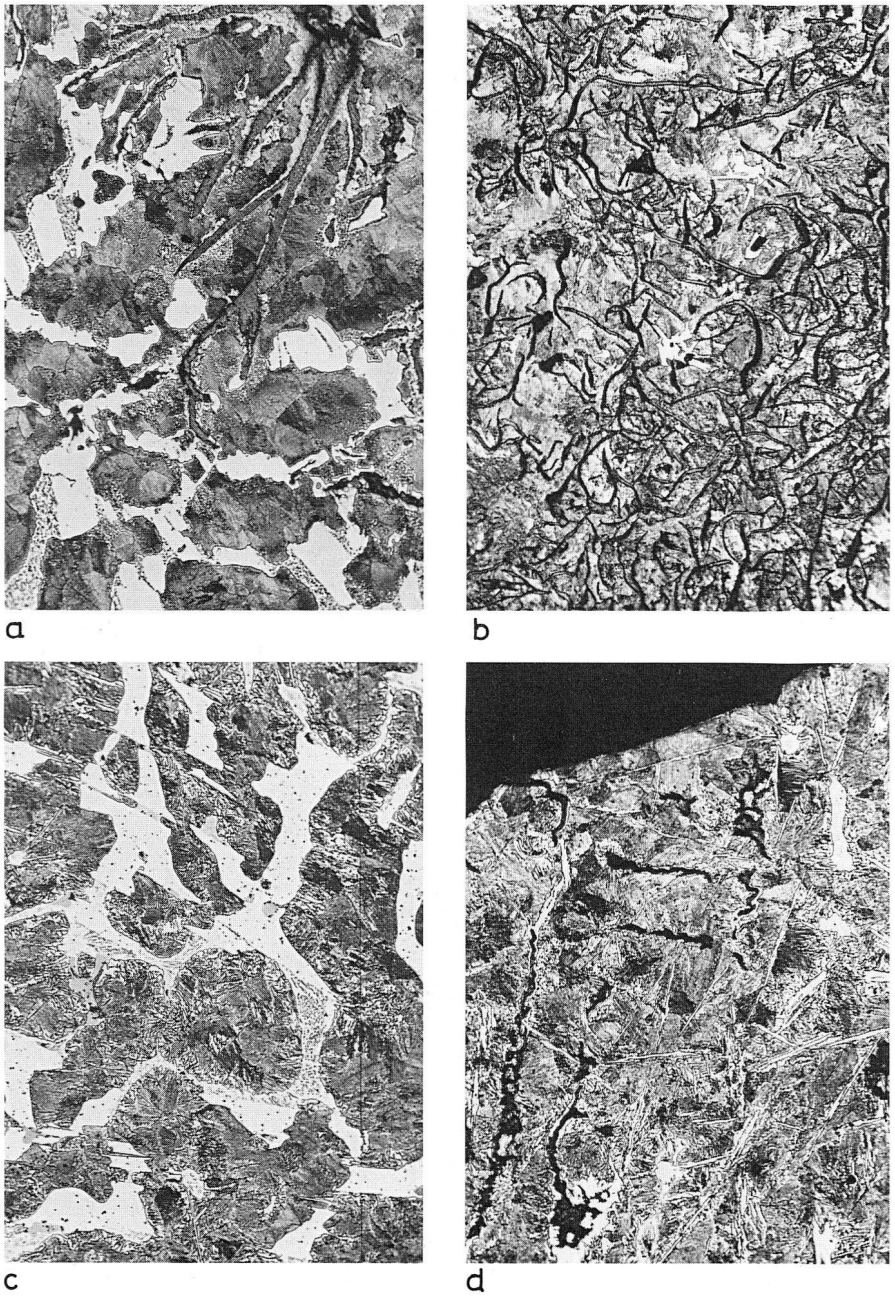
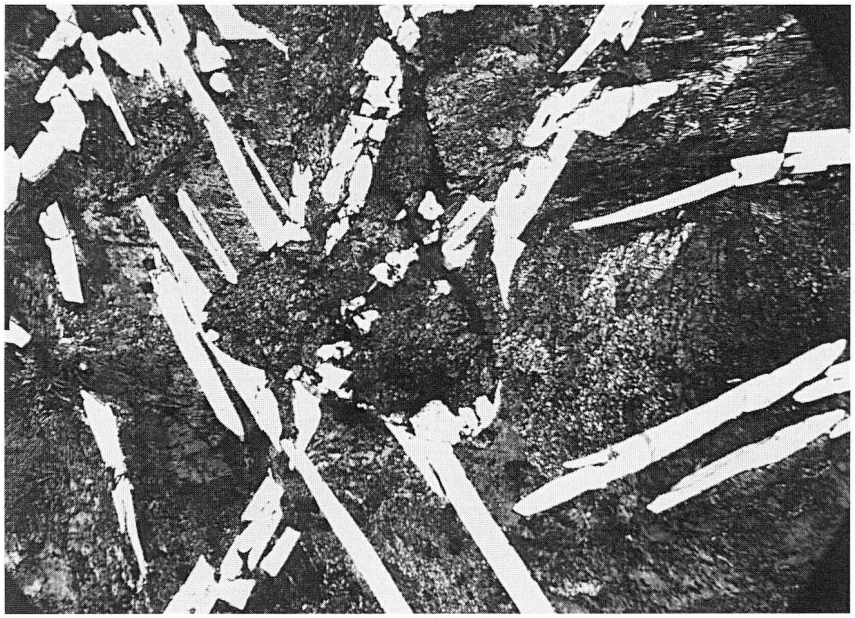


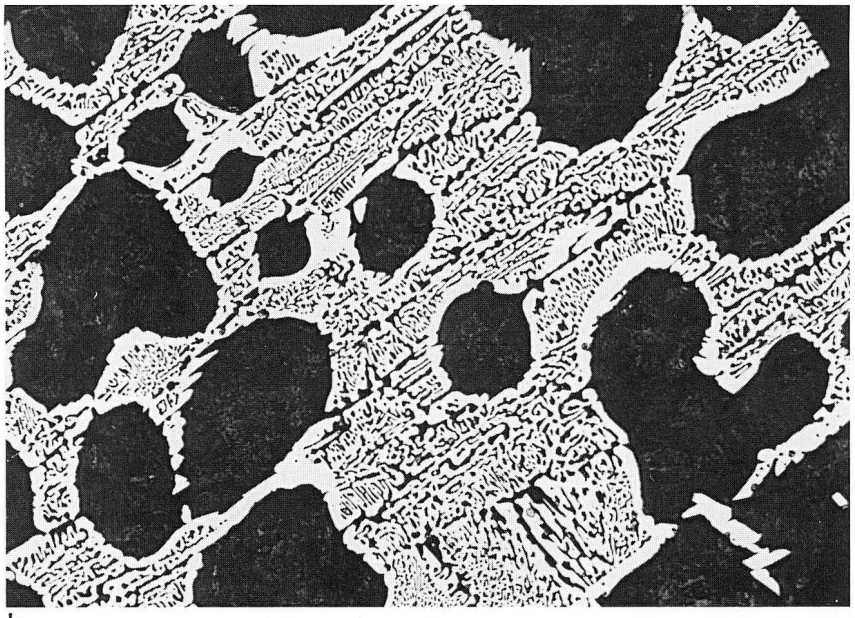
Bild 4: Gefüge stark aufgekohlter Eisenteilchen aus der mittleren Höhenlage des Reduktionsgutes von Rennofenversuchen am Magdalensberg. Massstab: 100:1
a) grosser Versuchsofen, b–d) kleiner Versuchsofen

In Zusammenhang mit diesen Versuchen vorgenommene Untersuchungen von aus dem ersten vorchristlichen Jahrhundert stammenden Funden vom Magdalensberg zeigten, dass dort die Kunst beherrscht wurde, auch kohlenstoffreicheren Stahl im Rennofen herzustellen. Bei den Funden handelte es sich um von Rennofenschlacke umgebenen Rohstahl. Die Schliffbilder liessen erkennen, dass dieser Stahl über die flüssige Phase entstanden war[5/30/31]. Weitere Funde, deren Untersuchung gerade in Angriff genommen wurde, bestätigen dies vollinhaltlich (Bild 5).

Eine lange Reihe weiterer Ergebnisse führen zur gleichen Aussage. R. Mitsche und Mitarbeiter[3] fanden in Luppen vom Magdalensberg auch hohe, örtlich z.T. stark unterschiedliche



a



b

Bild 5: Fundluppen vom Magdalensberg (1. Jahrhundert v.Chr.)
a) Streufund 1, C-reicher Stahl, Massstab: 300:1
b) Streufund 5, Roheisen, Massstab: 125:1

Kohlenstoffgehalte und wiesen bereits auf die Möglichkeit hin, dass die seinerzeitigen dortigen Hüttenleute ein Verfahren ausgeübt haben könnten, bei welchem bewusst auf höhere Kohlenstoffgehalte hingearbeitet wurde. O. Schaaber und Mitarbeiter[19/20/32/33] untersuchten zahlreiche bis 4 kg schwere Luppen vom Magdalensberg, wiesen bei allen hohe Kohlenstoffgehalte über 2% nach und das Vorliegen grösserer Bereiche von Ledeburit (C = 4,3%), der ausschliesslich über die flüssige Phase entstanden sein kann. Die festgestellte unverkennbare Tropfenform bewies ebenfalls, dass Verflüssigung eingetreten war. Der z.T. stark spiessige Zementit wies darauf hin, dass örtlich keine Aufschmelzung eingetreten war[32], woraus sich ergibt, dass die Aufkohlung im festen Zustand erfolgt war. Einen indirekten Hinweis auf den Erzeugungsablauf über die zumindest teilweise Verflüssigung gab die aussergewöhnlich hohe Schlakkenreinheit einer völlig entkohlten unverarbeiteten Luppe[33] und auch der Stahl- und Weicheisenerzeugnisse vom Magdalensberg. Der in den Luppen fallweise vorhandene Martensit bewies, dass sie in Wasser abgeschreckt worden waren, was sicherlich nicht zum Zweck der Härtung erfolgt war, sondern vielleicht zwecks einer leichteren Trennung von Metall und Schlacke. Auch an anderer Stelle, nämlich im Burgenland gemachte Stahlfunde, die allerdings aus etwas älterer Zeit stammen dürften, konnten als primäre Rennofenprodukte identifiziert werden[10]. Schliesslich ist noch anzumerken, dass die Ergebnisse der am Magdalensberg vorgenommenen Reduktionsversuche[4/5] H. Vetters[34] und später O. Schaaber[35] zu einer Neuübersetzung der einschlägigen bis dahin recht verwirrenden Stellen von Plinius anregten. Die nunmehr vorliegende Fassung[34] weist darauf hin, dass das Auftreten von flüssigem Eisen im Rennofen bekannt war[31/33].

Auch anderwärts durchgeführte Reduktionsversuche, wie die von H. Hagfeldt[8], R. Pleiner[7] und R.F. Tylecote et al.[9] bestätigen weitgehend den beschriebenen Reaktionsablauf. R. Pleiner[7] stellte ebenfalls eine bei niedriger Temperatur erfolgende Aufkohlung und ein offenbar späteres Wiederabnehmen des Kohlenstoffgehalts fest. Pleiner verwendete, anders als bei den eigenen Versuchen, ein sehr MnO-armes Erz. Ganz im Einklang mit den theoretischen Grundlagen wurde damit die oft geäusserte Ansicht widerlegt, dass der höhere MnO-Gehalt des örtlichen Erzes eine entscheidende und notwendige Voraussetzung für die Herstellung des norischen Stahls gewesen sei[37–39]. Eine eingehendere Erörterung hiezu wurde bereits an anderer Stelle vorgenommen[31]. Hinsichtlich des Verfahrensablaufs sei noch ergänzt, dass R. Pleiner[40] sowie G.R. Morton und J. Wingrove[41] auch für Rennöfen mittelalterlichen Typs zu ganz analogen Aussagen gelangten, wie sie aus den Versuchen am Magdalensberg hervorgingen.

Andere Vorstellungen über die Vorgänge im Rennofen entwickelte W.F. Schuster[42]. Demnach entstünden bei der Reduktion zuerst dünne Folien kohlenstofffreien Eisens, das dann aufgeschmolzen und erst im flüssigen Zustand aufgekohlt werde. Schliesslich erfahre das so entstandene stark überhitzte Roheisen durch den ebenfalls flüssigen Wüstit wieder eine Entkohlung bis zur Zusammen-

setzung von Stahl. Die Aufkohlung sei erst im flüssigen Zustand möglich, da die erstgebildeten Eisenfolien den Reduktionsablauf unterbrächen und die Zeit für eine Aufkohlung des festen Eisens nicht ausreiche. Die für das Schmelzen von kohlenstofffreiem Eisen notwendigen hohen Temperaturen, ja selbst 1700°C würden nach Schuster erreicht. Diese Angaben stehen jedoch in Widerspruch zu allen bei europäischen Rennofentemperaturen gemessenen Temperaturen im Schacht, die max. 1420°C betrugen. Sie gelten auch nur für lediglich mit Holzkohle und nicht mit Erz beschickte Öfen und sind daher kaum aussagekräftig. Schliesslich würden die für die Blasdüsen verwendeten Werkstoffe so hohe thermische Beanspruchungen, die gerade in ihrer Umgebung auftreten, nicht aushalten. Abgesehen von der Unvereinbarkeit mit den Grundlagen in mehreren Punkten widerspricht das Modell Schusters der in Reduktionsversuchen wiederholt nachgewiesenen im festen Zustand sehr wohl erfolgenden Aufkohlung[4/5/7/8/9]. Auf diese Widersprüche wurde bereits vor längerem hingewiesen[31] und B. Osann[43] hat durch eingehende wärmetechnische Betrachtungen die von Schuster unterstellten hohen Temperaturen widerlegt.

In Rennöfen anderer als in Europa nachgewiesener Bauart sollen allerdings nach D.H. Avery und P. Schmidt[1] so hohe wie von W.F. Schuster behauptete Temperaturen erreicht werden. Aus vermutlich ca. 2000 Jahre alten Schlackenfunden in Tansania, die Aufschmelztemperaturen um 1400°C hatten, wurde auf einen sehr heissen Ofengang geschlossen. Dieser soll dadurch erreicht worden sein, dass die aus Tonrohren bestehenden Winddüsen weit in das Schachtinnere hineinragten, so dass die einströmende Luft durch das die Rohre umgebende heisse Beschickungsgut vorgewärmt werde. Bei Versuchen wurden im Windrohr 500–600°C und an der Windeintrittstelle ca. 1600°C gemessen, wobei diese Temperatur auf die Strahlung durch die Verbrennungszone zurückgeführt wurde. Es wurde gefolgert, dass die Windvorwärmung die Einstellung reduzierender Bedingungen über 1800°C erlaube. Den Reaktionsablauf stellen sich Avery und Schmidt so vor, dass zunächst kleine Flocken von Eisen gebildet werden, dass mit Zunahme der Temperatur bis auf 1150°C das Erz schmilzt und es zur Bildung einer flüssigen Wüstit-Fayalit-Schlacke kommt. Die Schlacke sinke dann zusammen mit der Holzkohle nach unten und diese reduziere die Schlacke und kohle das so entstandene Eisen auf. Die im Eisen festgestellten Kohlenstoffgehalte lagen zwischen 0 und über 0,8%, im Durchschnitt bei 0,2 bis 0,6%. Die Verfasser zogen den Schluss, dass ein derartiger Ofentyp und die damit betriebene Stahlherstellung vor 2000 Jahren in Afrika weit verbreitet waren.

Für eine kritische Beurteilung dieser Arbeit sind die mitgeteilten Ergebnisse zu dürftig. Angaben über Zusammensetzungen von Erz und Schlacken fehlen völlig. Die dem Reaktionsmodell zugrunde gelegte Annahme einer dominierenden Rolle der direkten Reduktion und Aufkohlung kann aber wohl schwerlich ohne weiteres akzeptiert werden.
H.M. Friede et al.[44] vertreten darüber hinaus die Ansicht, dass die tatsächliche Luftvorwärmung viel geringer sei, theoretisch nicht mehr als 150 bis 160°C betragen kann und in praxi nur 80 bis 100°C erreiche. Demnach träfen die für diesen Ofentyp behaupteten hohen Temperaturen nicht zu. Friede et al. bestätigen auch, dass der Grossteil der Reduktion durch Gas-Feststoff-Reaktion, also indirekt erfolgt. Sie wird durch die guten kinetischen Bedingungen vor dem Erweichen des Beschickungsgutes begünstigt.

Die aus den Grundlagen, Versuchen und aus Funden abzuleitenden Aussagen können zu folgendem Gesamtbild zusammengefasst werden: Der Rennofen war über ca. 3 Jahrtausende das für die Reduktion der Eisenerze ausschliesslich verwendete Aggregat. Sein übliches und allerorts gewonnene Erzeugnis war praktisch kohlenstofffreies Weicheisen. Im Gegensatz zu der sehr lange Zeit vorherrschenden Meinung konnte aber unter bestimmten, allem Anschein nach nur vereinzelt beherrschten Bedingungen auch kohlenstoffreicher Stahl oder gar Roheisen gewonnen werden. Zu diesen Bedingungen gehören örtliche Gegebenheiten, z.B. die Erzzusammensetzung, ebenso wie die Arbeitsweise, etwa das Erz-Holzkohlen-Verhältnis, das Abziehen der Schlacke, die Parameter für die Windzufuhr[9], unterbrochener oder kontinuierlicher Betrieb u.a.m.

Man sollte daher das Rennofenverfahren differenziert nach dem anfallenden Produkt unterscheiden. Während für den Verfahrensablauf bei der Erzeugung von Weicheisen dessen Entstehung durch Reduktion im festen oder teigigen Zustand eine durchaus befriedigende Erklärung liefert und zu keinen Widersprüchen mit den vorhandenen theoretischen Grundlagen führt, war der von den alten Hüttenleuten bei der Stahlherstellung beschrittene Weg nicht so problemlos zu beschreiben, weshalb sich mehrere Arbeiten in jüngster Zeit gerade dieser Frage zuwendeten. Untersuchungen[4/5], die zur Klärung der in der Region Noricum geübten Arbeitsweise beitragen sollten, haben die Möglichkeit einer frühzeitigen Aufkohlung und einer Verflüssigung des kohlenstoffreichen Eisens aufgezeigt und dessen anschliessende teilweise Entkohlung im Versuch nachgewiesen. Diesen Ergebnissen widerspricht B. Osann[43] vorwiegend aufgrund von Gleichgewichtsbetrachtungen. Seinen Ausführungen zufolge ist u.a. die Entstehung von Roheisen im Rennofen unbedingt zu vermeiden, da sonst die Bildung einer flüssigen Schlacke schwierig wird. Roheisen sei kein dem Rennofen typisches Erzeugnis und der Eisengehalt des Erzes könne unmöglich grossteils in Roheisen umgewandelt werden. Von der hiezu bereits anderwärts erfolgten Stellungnahme[30/31] sei hier nur der Widerspruch zu einigen aus Versuchen, vor allem aber aus Originalfunden hervorgehenden Tatsachen wiederholt. Sogar die von Osann selbst beschriebene Fundluppe aus Gielde mit Kohlenstoffgehalten zwischen 0 und 4% lässt sich ihrer Entstehung nach schwerlich mit seinen Ansichten erklären. Die Entstehung von flüssigem Roheisen wurde nicht nur im Reduktionsversuch festgestellt, sondern war auch damals schon mit Funden belegt[19/20]. Inzwischen liegt zusätzlich ein Bericht von O. Schaaber[35] über eine 18,4 kg schwere Eisenluppe vor, die ihrer Form und ihrem Gefüge (Ledeburit) nach verflüssigt gewesen sein muss. Von 62 untersuchten Funden vom Magdalensberg[33] entsprachen 68% der Zusammensetzung von Stahl (0,3 bis 1,8%C), 11% der von Roheisen (über 1,8%C) und nur 21% wiesen weniger als 0,3%C auf.

Bemerkenswert an den bereits untersuchten aber auch noch in Untersuchung befindlichen kohlenstoffreicheren Fundstücken ist die ziemlich gleichmässige Verteilung des Kohlenstoffgehaltes. Diese ist bei einer Entkohlung wie im Reduktionsversuch am Magdalensberg wohl kaum zu erreichen, spricht aber für einen guten Konzentrationsausgleich in der metallischen Phase, wofür im flüssigen Zustand bevorzugte Bedingungen bestehen. Die von Tylecote et al.[9] vor den Düsen gemessene Temperatur von 1600°C könnte hiefür eine Erklärung geben. Sie weist auch auf einen doch heisseren Ofengang als aus anderen Versuchen gefolgert wurde, womit auch die Widersprüche zu den Überlegungen von Osann zumindest eingeschränkt würden.

Die zweite Erklärungsmöglichkeit für die gleichmässige Kohlenstoffverteilung könnte darin bestehen, dass das auf die beschriebene Weise gebildete Roheisen in einer im Herd vorhandenen flüssigen eisenreichen Schlacke und nicht durch den oxidierenden Gasstrom entkohlt wurde, womit sogar Einklang mit Osann bestünde. Schliesslich sollte noch eine dritte Möglichkeit nicht ausser Betracht bleiben, auf die bereits R. Mitsche et al.[3] hingewiesen haben, dass nämlich bewusst zunächst ein Produkt mit hohem Kohlenstoffgehalt erzeugt wurde. Die Voraussetzungen hiezu waren mit dem örtlich verfügbaren Erz (MnO-Gehalt um 4%, geringer SiO_2-Gehalt) günstig und die Erfahrung zur Schaffung der sonstigen Bedingungen, wie hoher Holzkohlenanteil im Einsatz, lange Durchsatzzeit, starke Vorwärmung, optimale Windzufuhr und hohe Ofentemperatur sollte den Hüttenleuten am Magdalensberg zugeschrieben werden können. Die Verminderung des Kohlenstoffgehalts bis zu Werten von schmied- und härtbarem Stahl wäre dann in einem zweiten Verfahrensschritt erfolgt. Geeignet hiefür wäre grundsätzlich eine Glühung in Holzkohle, die allerdings alleine schon wegen der langen Dauer weniger wahrscheinlich sein sollte, oder ein Wiedereinschmelzen unter oxidierenden Bedingungen, also die Durchführung eines Frischprozesses.

Aus Funden, Versuchen und Grundlagen gibt es somit viele Hinweise darauf, dass die Stahlerzeugung am Magdalensberg den Weg über das flüssige Zwischenprodukt Roheisen genommen hat. Wenn die wohl entscheidende Frage bezüglich der römerzeitlichen Stahlherstellung nach alter Auffassung darauf gerichtet war, wie das weiche Eisen aufgekohlt wurde, so gilt sie aus heutiger Sicht umgekehrt der für die Entkohlung eines kohlenstoffreichen Zwischenprodukts verwendeten Verfahrensweise. Hier ergeben sich für weitere Untersuchungen noch mancherlei Aufgaben.

Die bereits erwähnte Neuübersetzung von Plinius hat nicht nur den Hinweis auf das Bekanntsein der Entstehung von flüssigem Eisen gegeben sondern auch bisher verworren erscheinende Textstellen sinnvoll gemacht. Auch Textstellen in der Meteorologie von Aristoteles werden besser und zwangloser verständlich, wenn ihnen der Weg der Stahlerzeugung über Roheisen zugrunde gelegt wird. In der von H.D.P. Lee[45] stammenden Übersetzung heisst es: "Wrought iron indeed will melt and grow soft (like water), and then solidify again, and this is the way in which steel is made. For the dross* sinks to the bottom and is removed from below, and by repeated subjection to this treatment the metal is purified and steel produced."

*synon.f. "slag".

Schrifttum

1 *Avery, D.H.u. Schmidt, P.: Journ. of Metals 31 (1979), Nr. 10, S. 14/20.*

2 *Pleiner, R.: Iron Working in Ancient Greece. National Technical Museum, Prag 1969.*

3 *Khevenhüller, G., Mitsche R. u. Trojer, F.: Carinthia II, 71 (1961) S. 81/87*

4 *Straube, H.: Arch. Eisenhüttenwes. 35 (1964), S. 932/40.*

5 *Straube, H., Tarmann, B. u. Plöckinger, E.: Kärntner Museumsschriften 35 (1964), 68S.*

6 *Piaskowski, J.: Hutnik 31 (1964), S 378/83.*

7 *Pleiner, R.: Kovové Materialy (1966), S. 208/20; auch: Steel Times 196 (1968), S. 312/18.*

8 *Hagfeldt, H.: Examensarbeit am Inst. f. Eisenmetallurgie der königl. Techn. Hochschule Stockholm, Stockholm 1966.*

9 *Tylecote, R.F., Austin, J.N. u. Wraight, A.E.: Journ. Iron Steel Inst. 209 (1971) S. 342/63.*

10 *Nosek, E.: Wissensch. Arbeiten Burgenland 59 (1977), S. 71/82.*

11 *Hammann, H.: Die Heimat (Neumünster) 89 (1982), S. 413/19.*

12 *Souchopová, V. u. Stránský, K.: Památky archeologické 74 (1983), S. 527/44.*

13 *Graf Wurmbrandt: Correpondenzblatt München 1877, Nr. 10, S. 152.*

14 *Neumann, B.: die ältesten Verfahren der Erzeugung technischen Eisens. Freiberger Forsch.-H. D6, 1954.*

15 *Angus, N.S., Brown, G.T. u. Cleere, H.F.: Journ. Iron Steel Inst. 200 (1962), S. 956/68.*

16 *Bartuška, M. u. Pleiner, R.: Untersuchungen von Baustoffen und Schlacken aus den frühgeschichtlichen Rennofen Böhmens und Mährens. Techn. Beiträge zur Archäologie, Mainz 1965, 47S.*

17 *Thomsen, R.: In: Berichte über die Ausgrabungen in Haithabu. K. Wacholtz Verlag, Neumünster 1971, Bericht 5, S. 9/29.*

18 *Osann, B.: Stahl u. Eisen 79 (1959), S. 1206/11.*

19 *Schaaber, O.: AIF. Jahreshauptversammlung (1965) S. 31/52.*

20 *Schaaber, O.: Carinthia I 153 (1963). S. 129/279.*

21 *Oelsen, W. u. Schürmann, E.: Arch. Eisenhüttenwes. 25 (1954), S. 507/14.*

22 *Bowen. N.L. u. Schairer. J.F.: Amer. Journ. Sci. 5. Ser. 24 (1932), S. 177/213.*

23 *Schenck, H. u. Wiesner, G.: Arch. Eisenhüttenwes. 27 (1956), S. 1/11.*

24 *Schürmann, E.: Stahl u. Eisen 78 (1958), S. 1297/1308.*

25 *Schenck, R., Franz, H. u. Wille, H.: Z. anorg. allgem. Chem. 184 (1929), S. 1/38; vgl. Stahl u. Eisen 50 (1930), S. 519/20.*

26 *Körber, F. u. Oelsen, W.: Z. Elektrochem. 46 (1940), S. 188/94.*

27 *Roesch, K. u. Kühn, H.M.: Arch. Eisenhüttenwes. 47 (1976), S. 5/8.*

28 *Schmidt, P. u. Avery, D.H.: Science 201 (1978), S. 1085/89.*

29 *Pleiner, R.: In: Versuchsschmelzen und ihre Bedeutung für die Metallurgie des Eisens und dessen Geschichte. Interner Druck des Museums zu Allerheiligen/Schaffhausen u. des Archäologischen Institutes der Akademie der Wissenschaften Prag. 1978, S. 1/5.*

30 *Straube, H.: ibid. S. 6/16.*

31 *Straube, H.: Radex-Rdsch. 1973, S. 479/98.*

32 *Schaaber, O.: Jahrbuch der Wittheit zu Bremen XVIII (1974), S. 215/45.*

33 *Schaaber, O., Müller, H. u. Lehnert, I.: Archäologie u. Naturwissensch. 1-1977, S. 221/68.*

34 *Vetters, H.: Anzeigen der phil.-hist. Kl. d. österr. Akad. d. Wissensch. (1966), So. 6, S. 179/85.*

35 *Schaaber, O.: Jahreshefte des Österr. Archäol. Inst. Bd. 51 (1976/77), Hauptblatt, S. 85/105.*

36 *Pleiner, R.: Wie unter 29, S. 17/24.*

37 *Schulz, E.H.: Über die Ergebnisse neuerer metallkundlicher Untersuchungen alter Eisenfunde und ihre Bedeutung für die Technik u.*

Archäologie. Arb.-Gemeinsch. für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen, Reihe Naturwissenschaften, Nr. 91, Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen 1961.

38 *Pleiner, R.: Eisenverhüttung in der «Germania Magna» zur römischen Kaiserzeit. 45. Ber. der Römisch-Germanischen Kommission 1964, Berlin 1965, S. 11/86, siehe bes. S. 64.*

39 *Malzacher, H.: Carinthia I, 160 (1970), S. 611/22.*

40 *Pleiner R.: Památky archeologické LX (1969), S. 458/87, siehe bes. S. 486/87.*

41 *Morton, G.R. u. Wingrove, J.: Steel Times, April 1970.*

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

43 *Osann, B.: Rennverfahren und Anfänge der Roheisenerzeugung. Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Fachausschussbericht 9.001, Düsseldorf 1971, 170 S. u. Bildband.*

44 *Friede, H.M., Hejja, A.A., Koursaris, A. u. Steel, R.H.: Journ. South Afr. Inst. Min. Metall. 84 (1984), S. 285/97.*

45 *Aristoteles: Meteorologica IV-VIa (383a25-383b8), Übers. von H.D.P. Lee, ed. Loeb, London-Cambridge, Mass. 1962. Zitiert nach 2; vgl. 14, S. 81.*

Der Übergang vom Stuckofen zum Flossofen aus metallurgischer Sicht

Dr. Hans Jörg Köstler, Fohnsdorf

Im letztvergangenen halben Jahrtausend sind auf dem Gebiete der Eisenerzverhüttung und der Stahlerzeugung drei grundlegende Veränderungen vor sich gegangen:

- der Übergang vom Stuck-[1] zum Flossofen[2],
- die Verhüttung fast ausschliesslich mit Koks statt mit Holzkohle,
- die Einführung des Flussstahles anstelle des Schweissstahles[3].

Alle drei Massnahmen schufen nacheinander die Voraussetzungen für die zu Anfang des 19. Jhs. einsetzende Industrialisierung, die sich auch in einem enormen Gusseisen- und Stahlverbrauch ausdrückte. Dabei dürfte der allerdings wesentlich früher beginnenden und vielerorts sehr langsam platzgreifenden Erschmelzung flüssigen Roheisens anstatt der direkten Schweissstahlerzeugung die wichtigste Rolle zuzuordnen sein, denn erst der Floss- bzw. Hochofen[4] erlaubte eine Vervielfachung sowohl der spezifischen Ofenleistung als auch der Roheisenkapazität überhaupt.

Abb. 1 veranschaulicht zunächst die vom Eisenerz ausgehende Stahlherstellung auf direktem Weg (Rennfeuer/Schachtofen/Stuckofen-Ausheizfeuer) und auf indirektem Weg (Flossofen/Hochofen-Frischaggregat). Im ersten Fall entsteht eine ohne metallurgische Nachbehandlung niedriggekohlte, warmverformbare Luppe[5], während im anderen Fall (hochgekohltes) Roheisen erschmolzen wird, das zwecks Erzielung der Schmied- bzw. Walzbarkeit eines Frischprozesses bedarf. Die indirekte Stahlerzeugung bringt ausser grosser spezifischer Leistungen wirtschaftliche und qualitative Vorteile, welche ihrerseits die hochentwickelte Technologie aller Werkstoffe auf Eisenbasis ermöglicht haben.

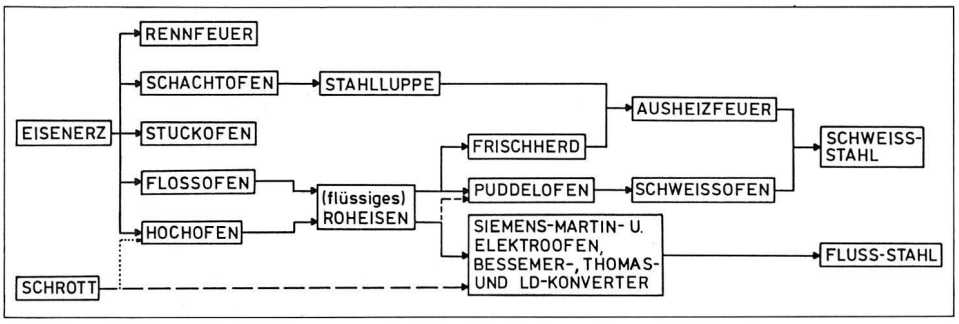


Abbildung 1: Schema der Stahlerzeugung (mit Berücksichtigung älterer Verfahren).

Vor Erörterung der metallurgischen Unterschiede zwischen Stuck- und Flossofenprozess sei die Herstellung eines Stuckes kurz dargestellt. Der 2–4 m hohe, schachtartige Ofen wurde nach Ingangsetzen der Blasbälge mit Holzkohle aufgeheizt und sodann mit Erz und Holzkohle begichtet. Während des Niedergehens der Beschikkung bildete sich im Gestell[7] eine Luppe (Stuck), die je nach Ofengrösse bzw. Gestelldurchmesser einige hundert Kilogramm oder gegen Ende des 18. Jhs. fast 2 Tonnen wog. Bei Prozessende stellte man die Bälge zur Seite, öffnete die Ofenbrust und zog mit einer Hakenkette, die sich auf einem wasserradbetriebenen Grindel aufwickelte, das heisse Stuck heraus, wie dies Abb. 2 zeigt. Das vor Weiterverarbeitung in Halbmasse geteilte Stuck enthielt ausser höchstens 1,5% Kohlenstoff keine nennenswerten Begleitelemente, jedoch viele Schlackeneinschlüsse. Der schlechte Reinheitsgrad, die ungleichmässige Kohlenstoffverteilung und die starke Porosität des Stuckes erforderten ein mehrmaliges Schmieden (Herausquetschen der Schlacke, Homogenisierung und Verdichtung), wofür die jeweilige Wiedererwärmung im Ausheizfeuer erfolgte.

Abbildung 2: Arbeiten beim Stuckofen: Herausziehen des Stuckes mit einer Kette (oben) und Teilen des Stuckes (Halbmasse). Ausschnitt aus einer mit 1613 datierten Zeichnung im Oberösterrichischen Landesarchiv, Linz (Donau). Nach E. Kurzel-Runtscheiner[6]

In heissgehenden Stucköfen – grössere Öfen mit günstigem Verhältnis Oberfläche/Inhalt und «scharf» blasenden Bälgen – entstand neben dem Stuck auch flüssiges Roheisen[8], das