

METALLKUNDLICHER NACHWEIS EINER ANTIKEN ROHEISENPRODUKTION

Werkstoffkundliche Untersuchung an einem römischen Eisenblock

Die werkstoffkundliche Untersuchung eines römischen Eisenkörpers aus den Jahren 75 bis 150 n. Chr. wies denselben als einen bis heute einzigartigen Fund aus. In ersten chemischen und metallographischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß der antike Eisenkörper über den schmelzflüssigen Zustand entstanden ist. Der Eisenblock aus Contiomagus (Saarland) stellt somit den ersten Feldbefund dar, der auf die Gewinnung von flüssigem Eisen in der römischen Antike hinweist. Es konnte erstmals die Annahme, daß die Metallurgen im Imperium Romanum nicht in der Lage waren, flüssiges Eisen zu erzeugen, widerlegt und in Contiomagus die früheste Produktion von flüssigem Eisen außerhalb Chinas nachgewiesen werden.

1. EINFÜHRUNG

Im Jahre 1988 wurden bei Grabungen in der römischen Siedlung Contiomagus - heute Dillingen-Pachten im Saarland - mehrere Eisenblöcke gefunden. Einer dieser Eisenblöcke mit einer Masse von 36,3 kg konnte gesichert werden. Dabei handelte es sich um einen stumpf-längsovalen Körper mit einer abgeplatteten Fläche (mittlerer Durchmesser: 25 cm). Die gegenüberliegende Fläche des Körpers zeigt sich domförmig aufgewölbt.

Nach ersten Voruntersuchungen in der Metallurgischen Abteilung der Dillinger Hüttenwerke wurde der Fund vom Landeskonservator des Saarlandes im Jahre 1994 dem Institut für Metallforschung - Metallkunde - der Technischen Universität Berlin zur weiteren Untersuchung übergeben. In werkstoffkundlichen Untersuchungen sollte hier die technikhistorische Bedeutung des Fundes ermittelt und Rückschlüsse auf die zur Erzeugung des Fundes erforderlichen Verfahrenstechniken gezogen werden.

2. VISUELLE UNTERSUCHUNGEN

Die charakteristische Form des Eisenblockes weist darauf hin, daß derselbe durch die Erstarrung einer Schmelze auf der Herdsohle eines im Boden eingetieften Rennfeuers entstanden ist (Bild 1).

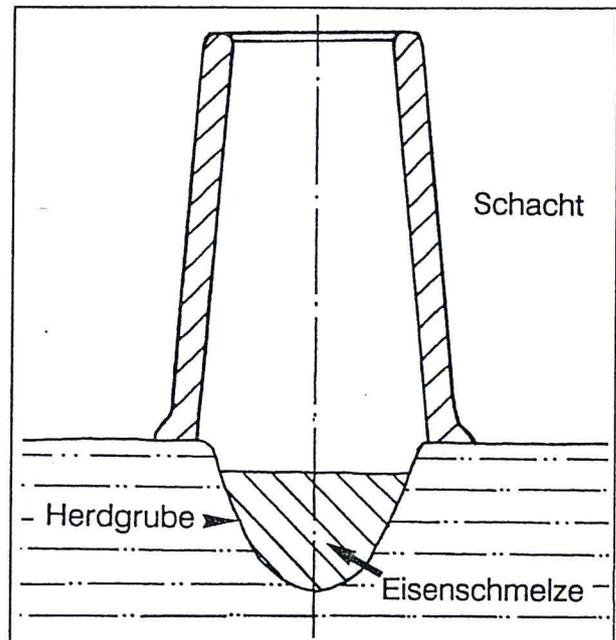


Bild 1: Rennfeuer mit eingetieftem Herd, in dem sich die Eisenschmelze ansammelte

Der Eisenkörper war mit einer nur wenige Millimeter dicken Korrosionsschicht umgeben. An der abgeplatteten Fläche fand sich lose bis fest haftendes sandförmiges, eisenoxidhaltiges Material. Aufgrund der sehr hohen Härte des Eisenblocks konnte diesem nur mittels einer Trennscheibe ein Probenstück mit einer Masse von etwa 1 kg entnommen. Die Trenflächen zeigten kompakte, durch Schmelzfluß entstandene Eisenstrukturen von etwa 80% Volumenerfüllung (Bild 2). 20% des Volumens bestanden aus - von der Eisenschmelze umhüllten - Holzkohlestücken (10 bis 30 mm) mit deutlicher Kohlestruktur sowie blässigen Hohlräumen.

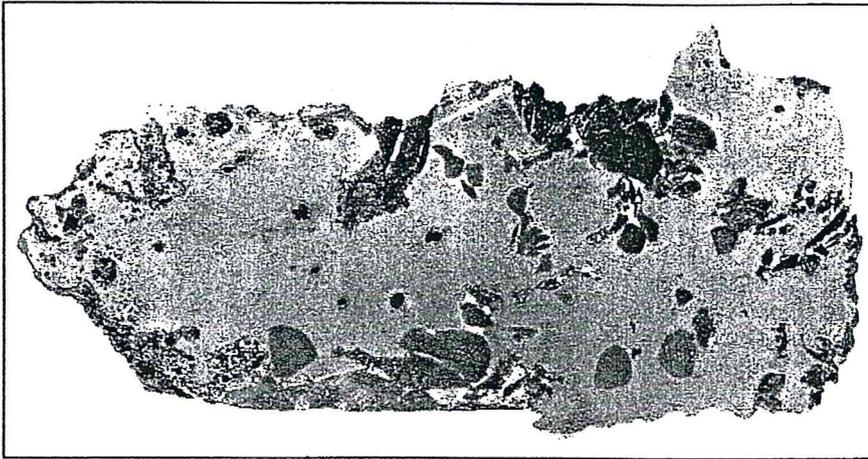


Bild 2: Struktur der Anschnittfläche

Der mineralische Anteil war sehr gering und ungleichmäßig verteilt.

kontinuität - wurde das Alter der im Eisenkörper eingeschlossenen Holzkohle mittels der von Libby im Jahre 1947 entwickelten "Radiocarbon-Methode" bestimmt. Das konventionelle ^{14}C -Alter der Holzkohle, die aufgrund ihres charakteristischen mikroskopischen Formenspektrums als Produkt der Verkohlung von mitteleuropäischer Buche identifiziert werden konnte, liegt zwischen 1.860 und 1.926 Jahren vor dem Jahre 1950 (**Bild 3**).

Nach dendrochronologischer Nachkalibrierung weist die Radiocarbon-Methode nach, daß die Holzkohle - und somit der Eisenblock - in den Jahren 75-150 n. Chr. hergestellt worden ist.

3. DATIERUNG DES FUNDES

Die römische Siedlung Contiomagus wurde nach der Unterwerfung der Gallier durch die Truppen des römischen Kaisers Gaius Julius Caesar in den Jahren 58 - 51 v. Chr. errichtet [1]. In den folgenden Jahrhunderten wurde die Siedlung als römisches Kastell zu einem Zentrum des wirtschaftlichen und religiösen Lebens. Ab dem dritten Jahrhundert wurde der Friede in den gallischen Provinzen von einfallenden Germanenstämmen gestört [1].

Nach dem Tode des römischen Kaisers Aurelian drangen Alemannen und Franken in das römische Reich ein. Contiomagus wurde in den Jahren 275/276 von den Franken vollständig zerstört.

Eine Vielzahl von archäologischen Funden weist auf eine kontinuierliche Weiterbesiedlung des heutigen Pachtens durch die germanischen Eroberer hin. Eine Wiederbesiedlung gilt jedoch erst für das 7. Jahrhundert als gesichert [1]. Zur Sicherung der Datierung - insbesondere angesichts der vermutlichen Siedlungs-

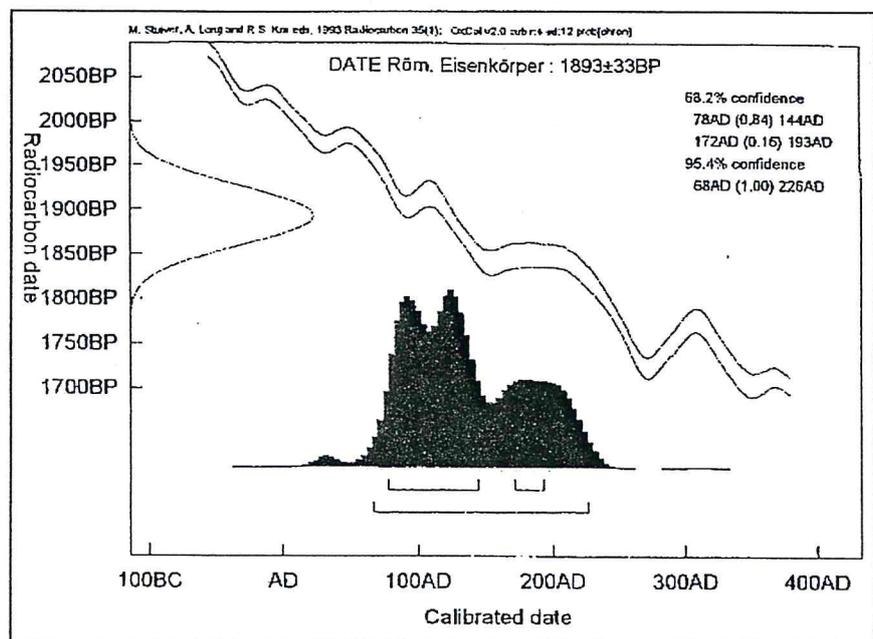


Bild 3: Radiocarbon-Datierung des römischen Eisenblocks

In diesem Zeitraum erlangte die römische Siedlung - dies bestätigen eine Vielzahl von weiteren datierten, archäologischen Funden - ihre größte wirtschaftliche Blüte.

4. GEFÜGEUNTERSUCHUNGEN

Die Gefügeuntersuchung ließ eine über den Querschnitt der Anschnittfläche sehr ungleichmäßige Gefügeausbildung erkennen.

Im Inneren des Eisenblocks überwiegt ein untereutektisches, perlitisches Gefüge mit grob ausgeschiedenen Graphitlamellen (**Bild 4**). Die ehemaligen Austenit-Korngrenzen werden von sekundär gebildetem Zementit umsäumt.

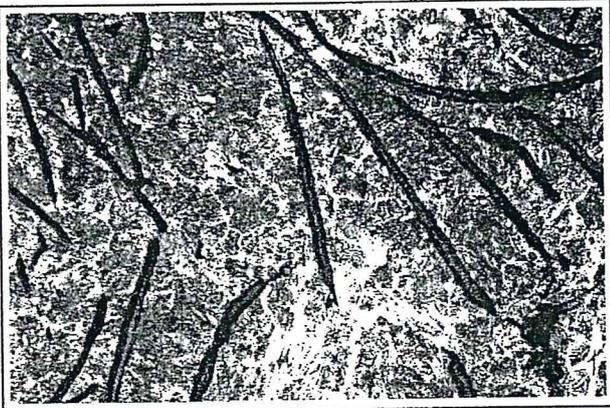


Bild 4: Graphit, Sekundär-Zementit und Perlit

In Zonen näher zur Oberfläche ist das Gefüge in der Regel weiß erstarrt und zeigt dort neben untereutektischen auch eutektische (Ledeburit) (**Bild 5**)



Bild 5: Ledeburit

bzw. übereutektische (Ledeburit und Primär-Zementit) (**Bild 6**) Bereiche. Unmittelbar daran grenzen Bereiche mit deutlich geringerem C-Gehalt.

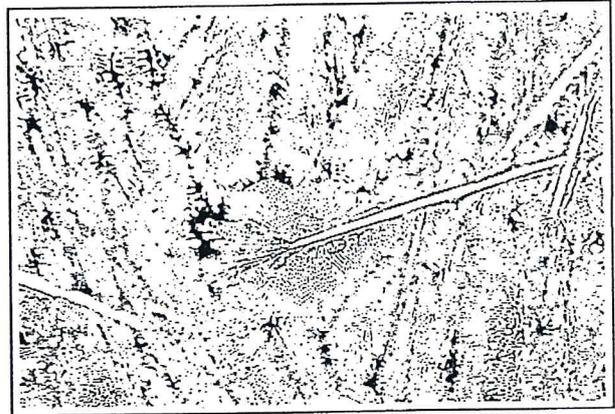


Bild 6: Primär-Zementit und Ledeburit

Das ebenfalls dendritische Gefüge besteht hier aus Perlit und Sekundär-Zementit (**Bild 7**). Der Zementit ist sehr verschieden ausgebildet. Er findet sich meist in sehr grober Form auf den ehemaligen Austenit-Korngrenzen oder in Widmannstätten'scher Anordnung im Korn. Die grobe Ausbildungform des Zementits weist auf eine Ausscheidung bei sehr hohen Temperaturen hin.

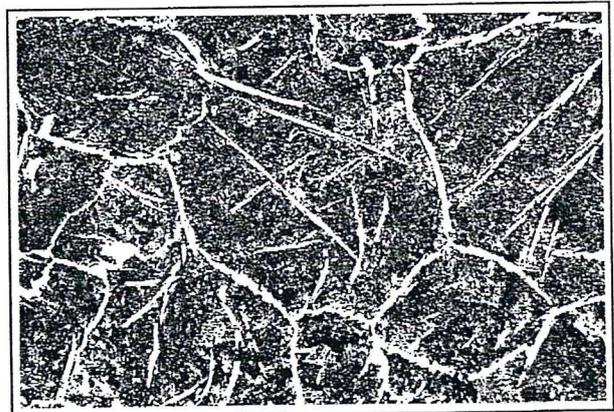


Bild 7: Sekundär-Zementit und Perlit

Die eutektische Ausscheidung von Kohlenstoff als Graphit wird bei geringen Si-Gehalten (<0.1%) nur durch eine extrem langsame Abkühlung der Schmelze im Ofen ermöglicht. Im Randbereich des Eisenblocks erstarrte die Schmelze deutlich schneller, so daß es nicht zu einer Graphitausscheidung kam und sich ein Gefüge aus Ledeburit (und Perlit) bzw. Ledeburit und Primär-Zementit bildete.

5. CHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN

5.1 Kohlenstoff-Analyse

Aus der kompakten metallischen Schnittfläche wurden dem Eisenkörper zur chemischen Analyse an 6 Stellen Späne durch Bohren entnommen.

Entsprechend der ungleichmäßigen Gefügeausbildung lieferte die chemische Analyse die in **Tabelle 1** dargestellten C-Gehalte.

1	2	3	4	5	6
1.60	1.78	2.31	2.53	2.59	2.65

Tabelle 1: C-Gehalte des Eisenkörpers [m%]

Die geringsten C-Gehalte liegen in einem Bereich zwischen 1.60 und 1.78%. Hier handelt es sich also um einen übereutektoiden Stahl mit entsprechend der Gefügeausbildung: Sekundär-Zementit und Perlit. Die gemessenen übrigen C-Gehalte sind das Produkt einer Volumenanalyse, die aufgrund der inhomogenen C-Verteilung (übereutektoider Stahl bis übereutektisches Roheisen) Mittelwerte zwischen 2.31 und 2.65% liefert. Sie gibt im Gegensatz zur metallographischen Analyse keinen Aufschluß über die lokale C-Konzentration.

5.2 Vergleich Erz und Roheisen

In **Tabelle 2** ist die weitere chemische Zusammensetzung des römischen Eisens sowie die Analyse von Erzresten, die an der abgeplatteten Fläche des Eisenkörpers hafteten, dargestellt. Zur Unterstützung der Versuchsergebnisse wurden in der unmittelbaren Umgebung der römischen Siedlung Erzproben aus dem Buntsandstein entnommen und ebenfalls chemisch analysiert. Weiterhin zeigt **Tabelle 2** die chemische Analyse einer Herdgußplatte, die im Jahre 1706 auf der Dillinger Hütte - als eines der ältesten datierten Erzeugnisse derselben - durch die Verhüttung von Dillinger Sanderzen hergestellt wurde.

Der Vergleich der Erzanalysen zeigt, daß es sich bei dem untersuchten Erzrest um ein Erz aus der unmittelbaren Umgebung der römischen Siedlung - entsprechend der Vergleichsprobe, um ein limonitisches Eisenerz aus dem dortigen Buntsandstein - handelt.

	Eisenerze		Eisen		
	EE	SE	RE1	RE2	HP
	[%]				
C	-	-	2,59	1,78	3,85
Fe	17,900	17,600	-	-	-
SiO ₂ /Si	63,220	63,060	0,079	0,009	0,960
CaO	1,533	1,700	-	-	-
MgO	0,523	1,700	-	-	-
Na ₂ O	0,079	0,082	-	-	-
K ₂ O	1,819	1,670	-	-	-
Al ₂ O ₃	5,902	4,390	-	-	-
P	0,376	0,170	0,103	0,069	0,40
Mn	0,049	0,090	0,130	0,047	0,070
	[ppm]				
S	384	372	230	90	720
Ti	287	319	20	33	134
Cr	52	36	23	35	88
V	<10	20	<10	23	102
Cu	56	45	69	46	102
Ni	586	530	43	64	371
Co	59	43	102	65	98
Mo	<10	<10	<10	<10	<10
As	90	25	306	484	60
Sn	1504	1185	<10	<10	<10
Zn	240	193	<10	<10	<10
Pb	216	201	<10	<10	<10
Zr	34	<10	<10	<10	<10
Nb	75	67	15	131	125

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung von Erzresten am Eisenblock (EE) und Sanderz aus Dillingen (SE) sowie chemische Analysen des röm. Eisenblocks (RE) und einer frühen Herdgußplatte aus Dillingen (HP) [2]

Die Schwefel-Gehalte des Eisens liegen aufgrund der Verwendung von Holzkohle als Reduktionsmittel und Energielieferant erwartungsgemäß niedrig. Auch die Gehalte an den im Ofen schwerreduzierbaren oxidischen Erzbestandteilen des Si, Mn, Ti, V und Cr sind im Vergleich zu den Anteilen im Erz ebenfalls sehr gering. Dies resultiert sowohl aus den im Vergleich zum heutigen Hochofen relativ niedrigen Schachttemperaturen als auch aus der verhältnismäßig niedrigen Schachthöhe des römischen Ofens, welche nur eine geringe Kontaktzeit des flüssigen Eisens mit der Schlackenschmelze ermöglichte.

Dagegen werden z.B. P-, Cu-, Ni-, Co-, Mo-, As- und Nb-Oxide bereits ab Temperaturen von 900° C vollständig reduziert und in das Roheisen überführt.

Daher enthält das frühe Roheisen einige dieser Elemente in Mengen, die in einer Überschlagsrechnung, die sich an einem Eisengehalt der Erzvariante von etwa 30% und an einem Verschlackungsgrad von 5%-Punkten orientiert, direkt aus der Erzzusammensetzung bezogen werden können. Lediglich die geringen P- und Ni-Anteile von etwa 0.1% bzw. 43-64 ppm sowie die auffallend hohen As-Gehalte des römischen Eisens von 306-484 ppm können nicht direkt aus den Erzanalysen abgeleitet werden.

Es wird jedoch deutlich, daß die chemische Zusammensetzung des Eisenblocks - abgesehen von den niedrigen C-Anteilen - deutliche Parallelen mit der chemischen Analyse der gußeisernen Herdgußplatte zeigt, die im Jahre 1706 auf der Dillinger Hütte aus Erzen aus ihrer unmittelbaren Umgebung erschmolzen wurde [2].

6. METALLURGISCHE DEUTUNG

6.1 Stand der technikhistorischen Forschung

Darstellungen primärer Metallurgie, also solche von der Arbeit an den Verhüttungsöfen, finden sich weder im griechischen noch im römischen Kulturkreis [3]. Alle Szenen der griechischen und römischen Antike thematisieren die "sekundäre Metallurgie". Dabei handelt es sich fast ausschließlich um das Schmieden des Eisens. Literarische Quellen zur primären Metallurgie sind selten und meist nicht detailliert, so daß Kenntnisse über die Art der Verhüttungsöfen ausschließlich auf archäologischen Funden basieren.

Diese zeigen, daß die erste Eisenerzverhüttung in kleinen Schachtöfen, den Rennfeuern erfolgte. Das Eisenerz, meist handelte es sich um oxidische Eisenverbindungen, wurde zu festem metallischen Eisen reduziert. Das Produkt war ein stahlartiges Gebilde, die Eisenluppe, welche durch Hämmern von Schlacke- und Holzkohleresten befreit und dann geschmiedet wurde. Die Bestückung der Rennfeuer erfolgte schichtweise mit zerkleinerten Eisenerzen und Holzkohle. Letztere diente als Wärmelieferant und Reduktionsmittel. Durch Zugabe von Flußmitteln (z.B. Hornstein) erhielt man eine leichtschmelzende Schlacke. Die Öfen hatten eine Schachthöhe von 1-1.5 m, bestanden aus Stampflehm oder wurden mit Lehm aus Steinen aufgemauert. Sie standen an Berghängen, nahe den Erztagebauen, den Pingen, und den Holzkohle liefernden Wäldern. Die Zuführung der

Verbrennungsluft besorgten die Hangwinde, später bediente man sich handbetriebener Blasebälge. Die in den Rennfeuern erreichbaren Temperaturen lagen in der Anfangszeit vorgeschichtlicher Verhüttung im Bereich von 800° C. Mit steigender Ofenkapazität und verbesserter Luftzufuhr nahmen die Temperaturen im Rennfeuer stetig zu. Die Möglichkeit zur Produktion von flüssigem Eisen war jedoch - nach dem bisherigen Stand der Kenntnis - eng an die Entwicklung der "Hohen Öfen" im Mittelalter und an die Einführung von mit Wasserkraft angetriebenen Blasebälgen gebunden. Die erhöhte Verweildauer des Eisens im mittelalterlichen Ofen und die - aufgrund der erhöhten Sauerstoffzufuhr - hohen Temperaturen führten zur verstärkten Aufkohlung und zur Verflüssigung des Eisens. Die älteste Roheisenproduktion in Europa wurde 1982 in Schweden nachgewiesen. Hier wurden Roheisen- und entsprechende Schlackenfunde in das 13. Jahrhundert datiert [4,5]. Auf der Schwäbischen Alb wurde 1983 ein Schmelzofen aus dem 11. Jahrhundert ausgegraben [6]. Im Jahre 1992 wurde eine Untersuchung von Eisen- und Schlackenfundstücken - ebenfalls von der Schwäbischen Alb - publiziert, die eine Roheisenproduktion in der Nähe von Metzingen bereits im 11.-12. Jahrhundert belegte [6]. Zur antiken Eisenverflüssigung im Rennfeuer liefert jedoch bereits der römische Forscher Cajus Plinius Sekundus aus der Zeit 24-79 n. Chr. folgende Auskunft: "...und es ist verwunderlich, daß beim Verhütten sich das Eisen gelegentlich wie Wasser verflüssigt und dann in schwammartige Gebilde zerbricht..." [7] In der Deskriptorenanalyse von O. Schaaber ist dazu folgender Kommentar zu finden: "Der Satz gibt die Beobachtung wieder, daß ein Eisen, das unter den damaligen Verhüttungsbedingungen flüssig wurde wie Wasser, wozu ein sehr hoher, nahezu eutektischer C-Gehalt notwendig ist, zwangsläufig beim Abkühlen in oder mit Wasser in einzelne Stücke zerbricht." [8] Ein Blick in die Originalfassung zeige, daß die Bedingung der Eisenverflüssigung keineswegs eindeutig zu übersetzen ist. "Aquae modo liquari ferrum" als Akusativ mit Infinitiv wurde als zufällige Einzelbeobachtung ausgedrückt, könnte aber ebenso eine zeitüberhobene Gesetzmäßigkeit aussprechen. O. Johannsen schreibt im Jahre 1917: "Im Altertum wurde Gußeisen sicher nicht gewerbsmäßig in größerem Umfang hergestellt. Daß man Eisengußwaren gelegentlich hergestellt und die Vergießbarkeit des Eisens gekannt hat, ist möglich, aber nicht erwiesen." [9]

6.2 Rückschlüsse auf die antike Verfahrenstechnik

Der Nachweis einer Produktion von flüssigem Eisen vorliegender Zusammensetzung und Masse im antiken Rennfeuer steht zunächst im Widerspruch zu den heutigen archäometallurgischen Erkenntnissen:

Aus dem T-CO/CO₂-Diagramm (sog. Bauer-Gläsner-Diagramm) (Bild 8) geht hervor, daß bei einem hohen CO/CO₂-Verhältnis und bei Temperaturen von über 900° C Wüstit zu metallischem γ -Eisen reduziert wird, welches max. 0.6% Kohlenstoff aufnehmen kann.

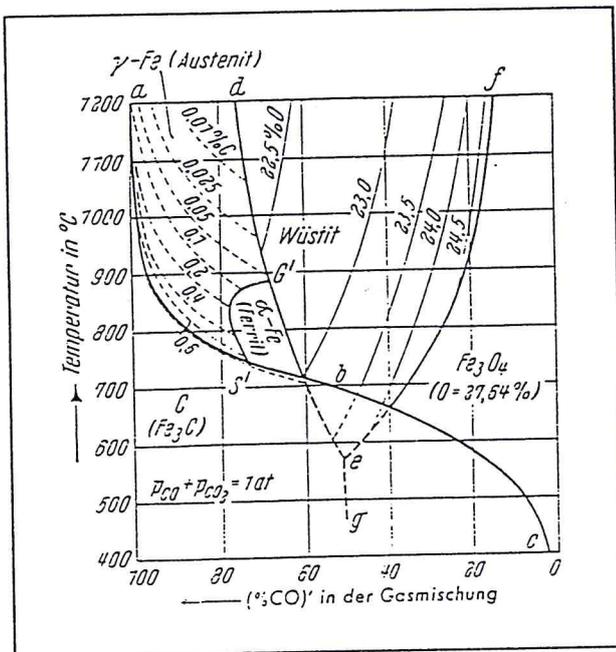


Bild 8: Bauer-Gläsner-Diagramm [10]

Eine weitere Aufkohlung des reduzierten Eisens - die eine Verflüssigung desselben ermöglichen könnte - ist jedoch erst dann möglich, wenn der FeO-Gehalt der Schlacke nahezu vollständig reduziert ist.

Eine vollständige Reduktion des FeO in der Schlacke erfordert jedoch - neben einer stark reduzierenden Atmosphäre - auch ausreichend hohe Ofentemperaturen, d.h. eine ausreichende Menge an eingeblasenem Sauerstoff, sowie eine ausreichend lange Reduktionszeit, d.h. Verweilzeit der Schlacke im Schacht. Nach dem bisherigen Stand der technikhistorischen Erkenntnisse war es mit den Rennfeuern der Antike jedoch nicht möglich, diese - für eine Erzeugung von flüssigem Roheisen erforderlichen - Prozeßparameter, zu liefern.

Diese Annahmen wurden bis heute aufrecht erhalten, obwohl R.F. Tylecote bereits im Jahre 1971 anhand

von 28 Versuchsschmelzen in einem reproduzierten römischen Rennfeuer aus dem 2. Jahrhundert n. Chr. zeigte, daß die Erzeugung von flüssigem Eisen im antiken Rennfeuer unter bestimmten Voraussetzungen möglich war: Es gelang ihm, mit einem hohen Verhältnis von Brennstoff/Erz von 2:1 (CO-Gehalt des reduzierenden Gases 70-80%) und einer Luftzufuhrmenge von 300l/min - unabhängig von der Erzsorte, jedoch mit einer minimierten Erzstückgröße ($d < 2.5$ cm) - den Fe-Gehalt der Schlacke auf etwa 10% zu reduzieren (Bild 9) [11]. Aus 7.3 kg aufbereitetem Eisenerz (60% Fe) konnte er 2.6 kg flüssiges Eisen mit etwa 1.7-1.8% C erzeugen. Die im unteren Teil des Ofens gemessene maximale Temperatur lag im Bereich von 1250° C.

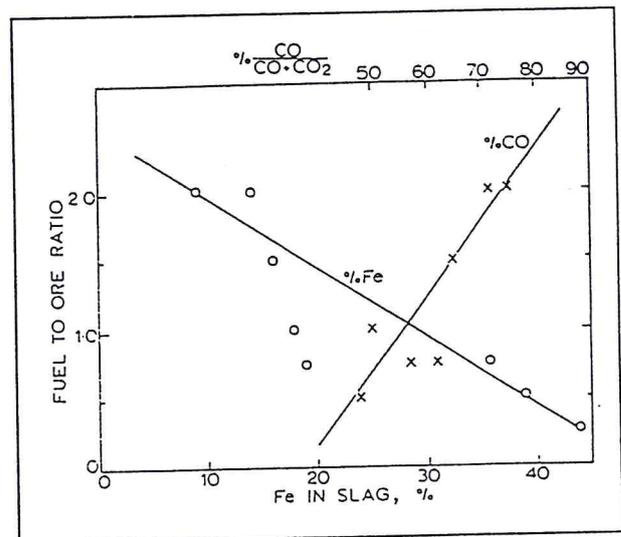


Bild 9: Einfluß des Verhältnisses Holzkohle/Erz auf den Fe-Gehalt der Schlacke und den CO-Gehalt der Reduktionsgase in einem reproduzierten römischen Rennfeuer [11]

Die C-Gehalte der von R.F. Tylecote im reproduzierten antiken Rennfeuer hergestellten Roheisenstücke liegen zwar deutlich unter den Gehalten des hier untersuchten Eisenblocks. Das von R.F. Tylecote erzeugte flüssige Eisen kann jedoch - ebenso wie der Eisenblock aus Contiomagus - als das Produkt eines unvollständigen Prozeßablaufs angesehen werden: Nach der nahezu vollständigen Reduktion des Wüstits aus der Schlacke reichert sich das austenitische Eisen mit Kohlenstoff an. In Abhängigkeit von den herrschenden Temperaturen überschreitet die C-Konzentration schließlich einen bestimmten kritischen Wert, bei dem sich das Eisen verflüssigt und auf der Herdsohle ansammelt. Auf ihrem Weg zum Ofenboden

kohlt die reduzierende Gasatmosphäre und insbesondere die glühende Holzkohle die Eisenschmelze weiter auf. Der Grad der Aufkohlung hängt somit einerseits vom CO-Gehalt des reduzierenden Gases, andererseits jedoch maßgeblich von dem während des Absinkens zurückgelegten Weg der Schmelze durch die glühende Holzkohle bzw. von der Verweilzeit des Eisens im Schacht ab. Bei geringer Schachthöhe erreicht ein wesentlicher Teil des flüssigen Eisens die Herdsohle bereits dann, wenn noch keine Kohlenstoffsättigung eingetreten ist. Die in der Schmelze schwebenden Holzkohlestücke kohlen den sie umgebenden Teil der Schmelze weiter auf. Auf diese Weise entsteht ein an Kohlenstoff ungleichmäßig angereichertes Gefüge.

Das Gefüge kann auch Auskunft über die herrschenden Ofentemperaturen geben: So existieren Bereiche mit übereutektoider Gefügeausbildung (Perlit und sekundär gebildetem Zementit) mit deutlich dendritischer Struktur. D.h. diese Bereiche haben sich durch Erstarrung aus dem Schmelzfluß gebildet. Bei geschätztem mittleren C-Gehalt von 1.6% wird deutlich, daß zur Entstehung dieses Gefüges eine Ofentemperatur von über 1250° C erforderlich war.

6.3 Dimensionierung des erzeugenden Ofens

Legt man die von R.F. Tylecote gewonnenen Erkenntnisse einer Überschlagsrechnung zu Grunde, so war für die Erzeugung von 36.3 kg Eisen bei einem Fe-Gehalt des Erzes von max. 35% und einem Fe-Gehalt der Schlacke von etwa 10% eine Erzeinsatzmenge von etwa 144 kg nötig. Bei einem erforderlichen Brennstoff/Erz-Verhältnis von 2:1 mußten 288 kg Holzkohle zugegeben werden. Für die Erzeugung des vorliegenden Eisenblocks war somit eine Gesamteinsatzmenge von 432 kg notwendig. Da eine kontinuierliche Ofenführung nicht möglich war, kann anhand dieser Einsatzmenge die Ofengröße abgeschätzt werden. Das in Großbritannien gefundene römische Rennfeuer mit einer Höhe von 1.80 m und einem Innendurchmesser von 30 cm ermöglichte die Produktion von Luppen mit einem Gewicht von etwa 9 kg. Anhand dieser Daten wird ersichtlich, daß die Dimensionen des Ofens, mit dem es möglich war, 36.3 kg flüssiges Eisen zu erzeugen, die Abmessungen der üblichen Öfen der Antike um ein Vierfaches überschritten haben müssen.

Neben den für die archäometallurgische Forschung ungewöhnlichen Dimensionen des antiken Ofens kann auch das Verfahren zur Luftzufuhr, das den antiken Metallurgen hier offenbar zur Verfügung gestanden haben muß, mit den heutigen technikhistorischen Erkenntnissen nicht in Einklang gebracht werden. Eine Luftmenge von 300l/min konnte mit den - bisher aus der Antike bekannten - handbetriebenen Spitzblasebälgen nur schwer eingebracht werden. So stellt sich erneut die in der technikhistorischen Forschung häufig gestellte Frage, ob bereits in der Antike die Wasserkraft zum Antrieb von Blasebälgen genutzt worden sein könnte.

7. SCHLUßFOLGERUNGEN

Die chemischen und metallographischen Untersuchungen des Eisenblocks aus der römischen Siedlung Contiomagus bestätigen erstmals die von R.F. Tylecote bereits im Jahre 1971 publizierten Ergebnisse von Versuchsschmelzen und die daraus sich ergebende Folgerung, daß die antiken Metallurgen durchaus in der Lage gewesen sein müssen, im Rennfeuer durch gezielte Einstellung des Brennstoff/Erz-Verhältnisses flüssiges Eisen zu erzeugen.

Der Fund aus Contiomagus stellt keinen Beweis für eine umfangreiche Roheisenproduktion in der Antike dar. Er belegt aber, daß im antiken Rennfeuer die Erzeugung von flüssigem Eisen generell möglich war. Ebenso wie der vorliegende Eisenblock als Fehlprodukt eines auf die Produktion von Eisenluppen ausgelegten Rennfeuers angesehen werden könnte, wäre es möglich, diesen als Fehlprodukt eines antiken "Rennfeuers" zu sehen, welches gezielt flüssiges Roheisen erzeugen sollte. Der Prozeß wurde jedoch frühzeitig abgebrochen, so daß die erforderliche C-Sättigung nicht erreicht wurde. Aufgrund der sehr hohen Härte des Eisenblocks war es nun nicht möglich, denselben - wie sprödes eutektisches Roheisen - zu zertrümmern, um in einem nachfolgenden Frischprozeß (Entkohlung durch Zuführung von Sauerstoff unter Hitze) kleinstückige Produkte in schmiedbares Eisen umzuwandeln.

Die Ursache dafür, weshalb die Metallurgen im Imperium Romanum auf eine umfangreiche Roheisenproduktion verzichtet haben könnten - wie es die Einzigartigkeit des Fundes bisher andeutet - könnte aus

dem Einfluß der chemischen Zusammensetzung der Eisenerze auf die mechanischen Eigenschaften des Eisens resultieren.

Die Produktion von "hochwertigem" Stahl zur Herstellung von Waffen war - besonders in der Nähe der Rheingrenze - oberstes Ziel der römischen Eisenindustrie. Die Qualität des Stahls ist jedoch stark vom Phosphor-Gehalt des Erzes abhängig. Ein Übergang des Phosphors in das Eisen kann zunächst durch eine Ofenführung vermieden werden, die durch Ofentemperaturen von unter 900° C die Reduktion der Phosphor-Oxide in der Schlacke vermeidet und eine schmiedbare Eisenluppe liefert. Eine Verflüssigung des Eisens führt jedoch unweigerlich zur verstärkten Phosphor-Reduktion. In einem nachfolgenden Frischprozeß kann lediglich Kohlenstoff - keinesfalls Phosphor - dem Eisen entzogen werden. Ein auf diese Weise hergestellter Stahl ist daher kaltbrüchig und konnte in römischen Waffenschmieden nicht verwendet werden.

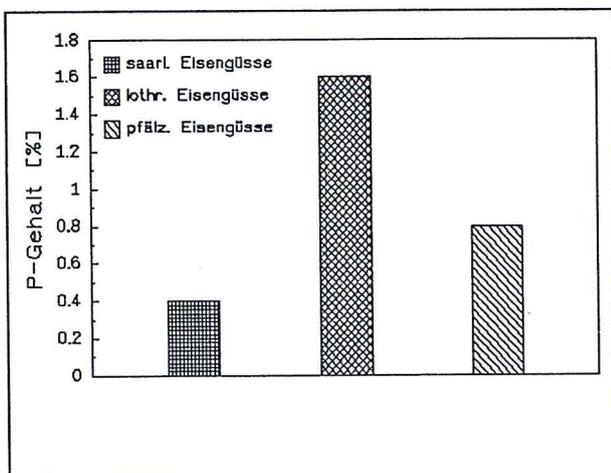


Bild 10: Mittlere Phosphor-Gehalte früher Eisengüsse [2]

D.h. in der Antike dürfte es nur in solchen Regionen zur Roheisenherstellung gekommen sein, die Erze mit ungewöhnlich niedrigen P-Gehalten enthalten. Solche Regionen sind in Mitteleuropa nur selten zu finden. Eines dieser Gebiete stellt jedoch die Region in den Grenzen des heutigen Saarlandes dar. **Bild 10** zeigt die P-Gehalte saarländischer Eisengüsse aus dem 16.-19. Jahrhundert im Vergleich mit P-Anteilen von Produkten aus dem angrenzenden Lothringen (Frankreich) und dem benachbarten Rheinland-Pfalz. Man erkennt, daß die P-Anteile der aus saarländischen Eisenerzen erschmolzenen Eisengüsse im Bereich von etwa 0.4% liegen. Aus dieser Darstellung

geht nicht hervor, daß das aus saarländischen Sanderzen erschmolzene Eisen in der Regel P-Gehalte im Bereich von ca. 0.2% hat. Die pfälzischen Eisengüsse enthalten dagegen mit etwa 0.8% die doppelte, die lothringischen im Mittel mit 1.6% die Vierfache Menge an Phosphor.

Schrifttum

- [1] Schmidt, G.: "Contiomagus Das Römische Pachten" Dillingen/Pachten 1986
- [2] Kremer, M.; Reif, W.: "Werkstoffwissenschaftliche Datierung und Lokalisierung von saarländischen und lothringischen Herdgußplatten des 16.-19. Jahrhunderts", Diplomarbeit Technische Universität, Berlin 1992
- [3] Weisgerber, G.; Roden, Ch.: "Griechische Metallhandwerker und ihre Gebläse", In: "Der Anschnitt 38", Heft 1, 1986
- [4] Magnusson, G.: "Lapphythan - An Example of Medieval Iron Production", In: "Medieval Iron Society 1. Jernkontoret Forskning Ser.", H. 34, 1985
- [5] Serning, I.; Hagfeldt, H.; Kresten, P., In: Vinarhyttan. Jernkontorets Forskning", H. 21, 1982
- [6] Yalçın, Ü.; Hauptmann, A.: "Zur Archäologie des Eisens auf der Schwäbischen Alb", In: "Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg", 1992
- [7] Knoll, H. u.a.: "Plinius der Ältere über das Eisen", Bericht des Geschichtsausschusses des VDEh, Nr. 81
- [8] Schaaber, O.: "Überlegungen zur Deutung der Plinius-Angaben über das Eisen aufgrund metallkundlicher Funduntersuchungen", In: "Jahreshefte des Österr. archäol. Institutes" Bd. 51. 1976/77
- [9] Johannsen, O.: "Geschichte des Eisens", Braunschweig 1953
- [10] Schürmann, E.: "Die Reduktion des Eisens im Rennfeuer" In: "Stahl und Eisen", Heft 19, 1958
- [11] Tylecote, R.F.; Austin, J.N.; Wraith, A.E.: "The Mechanism of the Bloomery Process in Shaft Furnaces", In: "Journal of the Iron and Steel Institute", 1971

Der römische Eisenblock aus Dillingen/Pachten wurde vom Landeskonservator des Saarlandes, Herrn Dr. G. Miron, für diese Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Für die Durchführung der chemischen Analysen und hilfreichen Diskussionen danken wir Herrn Dr. G. Staats, Metallurgische Abteilung der Dillinger Hüttenwerke. Die Radiocarbon-Datierung wurde vom Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg mit freundlicher Unterstützung durch Herrn Dr. B. Kromer durchgeführt. Für die mikroskopische Deutung der Holzkohlenanatomie danken wir Herrn Dr. Neef vom Deutschen Archäologischen Institut Berlin.

cand. ing. Andreas Henkel, Dipl.-Ing. Matthias Kremer, Prof. Dr.-Ing. Winfried Reif, Institut für Metallforschung - Metallkunde - Technische Universität Berlin