

# RÖMISCHE EISENBLÖCKE VON DER SAALBURG

## UNTERSUCHUNGEN ZUR FERTIGUNGSTECHNIK

von Thilo REHREN und Andreas HAUPTMANN, Bochum

### Einleitung

Von dem römischen Kastell Saalburg (Ende des 1. bis Mitte des 3. Jahrhunderts n. Chr.) sind, wie auch aus anderen römischen Fundstätten, seit über hundert Jahren eine Anzahl eigenartiger, schwerer Eisenblöcke bekannt (Batz 1991). Die meisten sind nur mehr Fragmente; mit Gewichten bis zu über 200 kg handelt es sich aber fraglos um beachtliche Objekte römischen Metallhandwerks.

Aus der Vielzahl an Deutungsversuchen hat sich ihre Ansprache als Stützbalken in den Heizräumen römischer Thermen als die überzeugendste herausgebildet (Abb. 1), oft mit sekundärer Verwendung in Praefurnien oder als Gegengewicht für Hebeeinrichtungen schon zu römischer Zeit (Batz 1991).

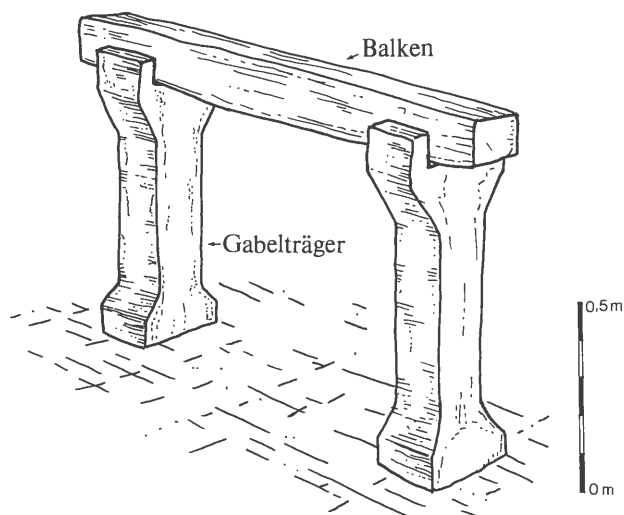


Abb. 1 Rekonstruktionsversuch des Trägersystems mit eisernen Gabelträgern und Eisenbalken (nach Batz 1991, 28 Abb. 5).

Der vorliegende Beitrag behandelt die Fertigungstechnik dieser gewaltigen Blöcke, die in jüngster Zeit kontrovers diskutiert worden ist: Handelt es sich um geschmiedete Objekte oder um Gußstücke? (Tylecote 1962: 237 ff., Becker & Dick 1965, Krapp 1987, Hauptmann & Maddin 1991).

Nachdem die Produktion von Gußeisen aus dem römischen Reich praktisch unbekannt ist und Gußstücke dieser Größe eine Sensation wären, soll hier mit einer erneuten Untersuchung der von Krapp (1987) als gegossen publizierten Proben eine Klärung des Sachverhaltes versucht werden.

### Die Schmiede-These

Tylecote (1962), Becker & Dick (1965) und Hauptmann & Maddin (1991) folgern aus eigenen und teilweise unveröffentlichten

fremden Untersuchungen, daß die Blöcke aus einzelnen Rennfeuer-Luppen zusammengeschmiedet worden sind, wie es für römische Eisenobjekte generell angenommen wird. Sie stützen sich dabei auf den Befund, daß alle untersuchten Blöcke aus ferritischem Eisen mit typischen Schlackenverunreinigungen bestehen, die aus der Luppe stammen. Diese Schmiedethese deckt sich zwanglos mit einem Feldbefund in Corbridge, England, wo ein Balken in situ senkrecht in einem großen Schmiedeofen steht (Tylecote 1962: 239 f.): offensichtlich gerade im Prozeß der Herstellung.

### Die Guß-These

Krapp (1987) hat zwei Balken von der Saalburg im Makro- und im Mikrobereich metallographisch untersucht und kommt zu dem Ergebnis, daß sie zwar aus ferritischem Eisen bestehen, aber doch deutliche Gußmerkmale zeigen. Wesentliche Argumente für den Guß der Eisenbalken sind nach Krapp (1987):

Ein Makrogefüge mit X-Struktur im Querschnitt; äußere „Speckschicht“ und zentrale Anordnung von Schlacken und Lunkern in Trichterform im Längsschnitt, weniger deutlich auch im Querschnitt; Dendriten und metallgefüllte Gasblasen im Mikrogefüge.

Demgegenüber steht die Kohlenstoff-Armut beider Blöcke, erkennbar am ferritischen Gefüge und verschiedenen chemischen Analysen, die alle unter 0,1% C ergeben. Diese Diskrepanz wird von Krapp (1987) mit einer Entkohlung des flüssigen Metalls durch eingeschlossene Schlacke und Eisenoxide erklärt, die nach dem Guß in der Form stattfand; die Gewinnung C-armen Eisens direkt im Rennofen im flüssigen Zustand schließt er wegen der dazu erforderlichen, seinerzeit nicht erreichbaren Temperaturen von über 1500 °C aus.

### Eigene Arbeiten

Beide von Krapp (1987) untersuchten Blöcke wurden im Institut für Archäometallurgie des Deutschen Bergbau-Museums erneut metallographisch und chemisch untersucht. Dazu wurden die von Krapp hergestellten Quer- bzw. Längsschnitte der Träger erneut poliert, angeätzt (3% HNO<sub>3</sub> in Alkohol) und mit einem Binokular im Auflicht gemustert. Weiterhin wurde von einer kleineren Teilprobe, die makroskopisch erkennbar Bereiche mit unterschiedlichem Metallgefüge enthielt, gezielt Bohrproben von drei verschiedenen Punkten entnommen und mit der AAS auf ihre chemische Zusammensetzung hin untersucht. Schließlich wurden aus dieser Teilprobe drei metallographische Anschliffe hergestellt, die

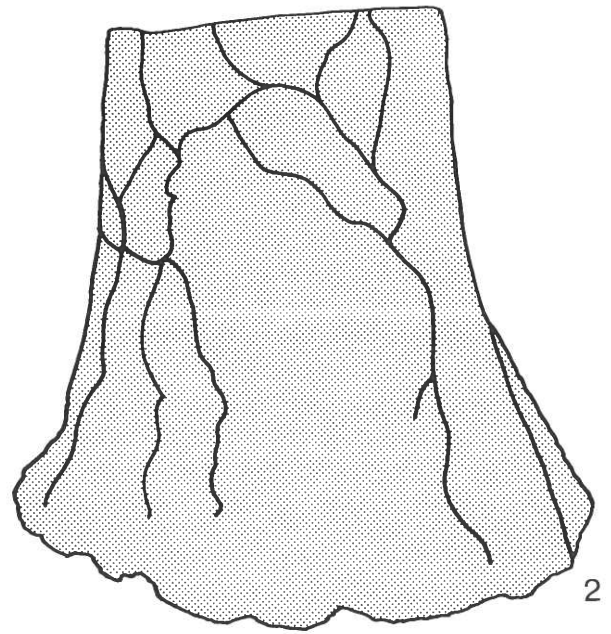
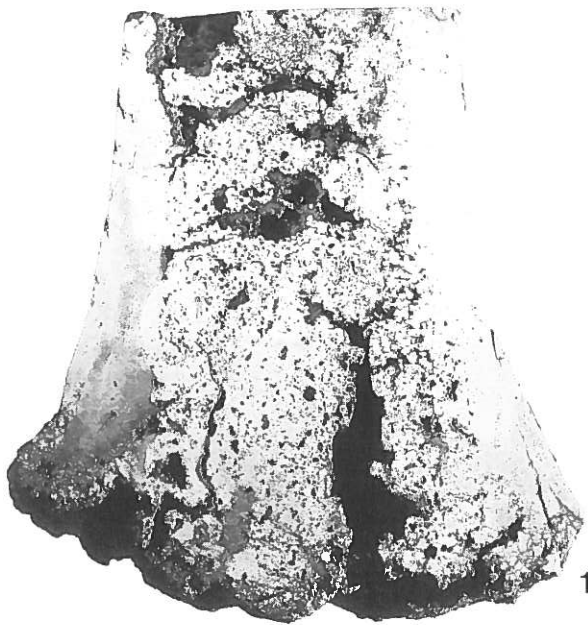


Abb. 2. Saalburg, Eisenblock S 1113. 1 Längsschnitt, polierte Fläche. 2 Längsschnitt mit eingezeichneten Luppengrenzen. M. 1 : 4.

- a) einen relativ homogenen Bereich nahe der Außenkante,
- b) einen schon makroskopisch erkennbaren Grenzbereich zwischen zwei unterschiedlichen Metallgefügen und
- c) einen anderen Abschnitt nahe der Außenseite repräsentieren.

Die Anschliffe wurden lichtmikroskopisch vor und nach der Ätzung untersucht; weiterführende Arbeiten erfolgten am Raster-Elektronenmikroskop mit EDX und WDX-Analysezusatz.

Die Ergebnisse sind kurz zusammengefaßt:

- Das Metall ist ferritisch. Zementit tritt nur vereinzelt auf Korngrenzen auf. Der Anteil an Schlackeneinschlüssen aus Wüstit, Fayalit und Glas sowie teilweise Spinell und Iscorit liegt zwischen 0,5 und 3%.
- Die Blöcke sind aus makroskopisch, mikroskopisch und chemisch unterschiedlichen Bereichen aufgebaut (Abb 2, Tabelle 1). Die Porosität nimmt, im Querschnitt gut erkennbar, von innen nach außen deutlich ab. Der Randbereich ist am stärksten verdichtet.
- Die Bereiche mit unterschiedlichem Gefüge sind klar umrissen und lassen sich kartieren; am Beispiel des Längsschnittes ist dies in Abb 2 dargestellt.

### Interpretation der Befunde

Die makroskopisch und mikroskopisch unterscheidbaren Bereiche gleichen in ihrer Größe und ihren metallographischen, schlackenmineralogischen und chemischen Charakteristika den gut bekannten Luppen römischer Rennfeueröfen. Daher werden diese Bereiche als einzelne Luppen interpretiert, die zu Trägern zusammengeschweißt worden sind.

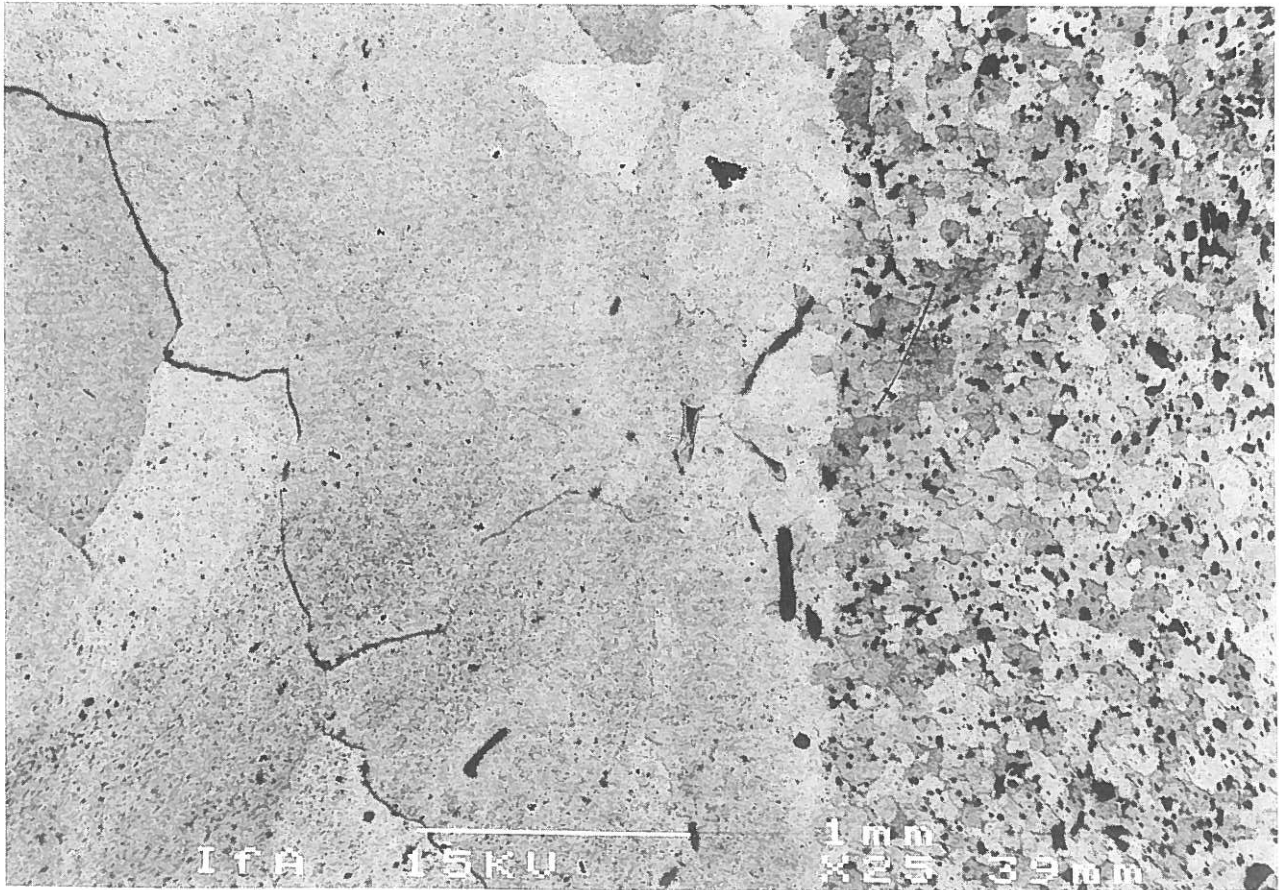
Zwar sind, wie schon Osann festhält, „Rennfeueisen und Frischfeueisen<sup>1)</sup>“ vollständig gleichartige Erzeugnisse; man kann sie nicht voneinander unterscheiden“ (Osann 1971, S. 92). Dem gleichen Problem gehen auch Rostoker & Dvorak (1990) und Piaskowski (1992) nach. Alle drei sind sich darin einig, daß die Unterschiede sich am ehesten in der Art und Menge der Schlackeneinschlüsse wiederfinden, nicht aber im Metallgefüge.

Da also eine nur metallographische Aussage in diesem Fall keine verlässliche Klärung bietet, beziehen wir auch die Analyse der Schlackeneinschlüsse in den Eisenblöcken in die Untersuchung mit ein. Zusätzlich gibt es deutliche Merkmale im Mikro- und Makrogefüge, die sich mit der Luppeninterpretation besser erklären lassen als mit dem Guß. Abschließend sprechen auch mehrere theoretische Überlegungen gegen die Gußtheorie.

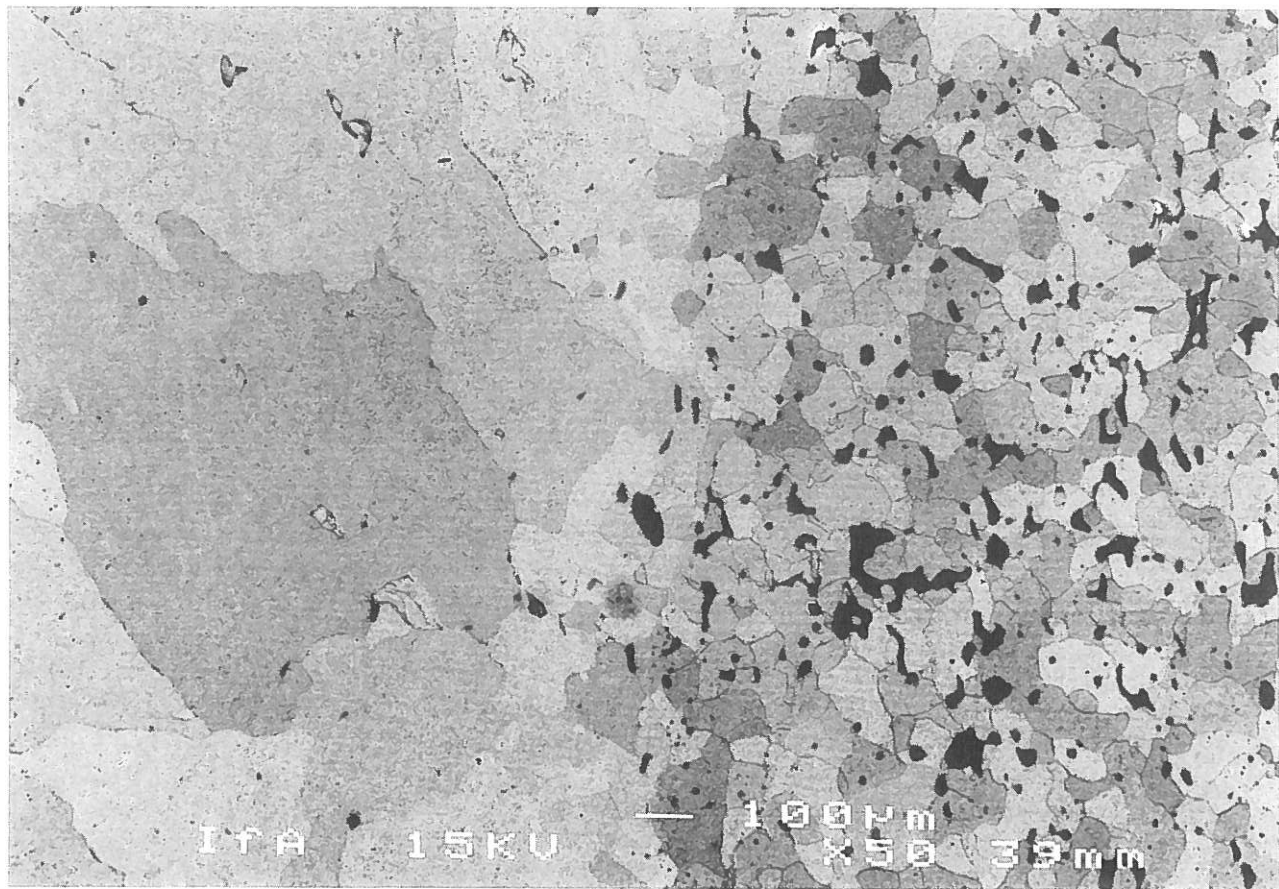
### Die Schlacken

Schlackeneinschlüsse sind in allen Bereichen enthalten, wenn auch in unterschiedlichen Anteilen (Abb 3 a, b). Überwiegend sind es mehrphasige Einschlüsse mit Fayalit, Eisenoxid und Phosphaten; daneben treten Iscorit und Hercynit auf (Abb 4). Sie sind meist an Korngrenzen gebunden, eine ausgeprägte Orientierung ist nicht zu erkennen (Abb 5); große Einschlüsse sind langgestreckt (Abb 6 a, b). Die in vielen Einschlüssen auffallend niedrigen Eisenoxid-Anteile mögen auf eine Reaktion zwischen Eisenoxid und Kohlenstoff aus dem Eisen zurückzuführen sein. Da aber Wüstit und Roheisen nebeneinander nicht stabil sind, hätte eine Roheisen-Schlacke von

<sup>1)</sup> Frischfeueisen entspricht dem, was Krapp als entkohltes Gußeisen bezeichnet; Anm. d. Verf.



1



2

Abb. 3. Saalburg, Eisenblock S 1113. Mikroaufnahmen einer Luppengrenze, sehr kontrastreiche Kopie. Schlacke erscheint schwarz; ferritisches Eisen erscheint in unterschiedlichen Grautönen, wodurch die Korngrößen erkennbar werden. REM-Bild, Rückstreuelektronen.

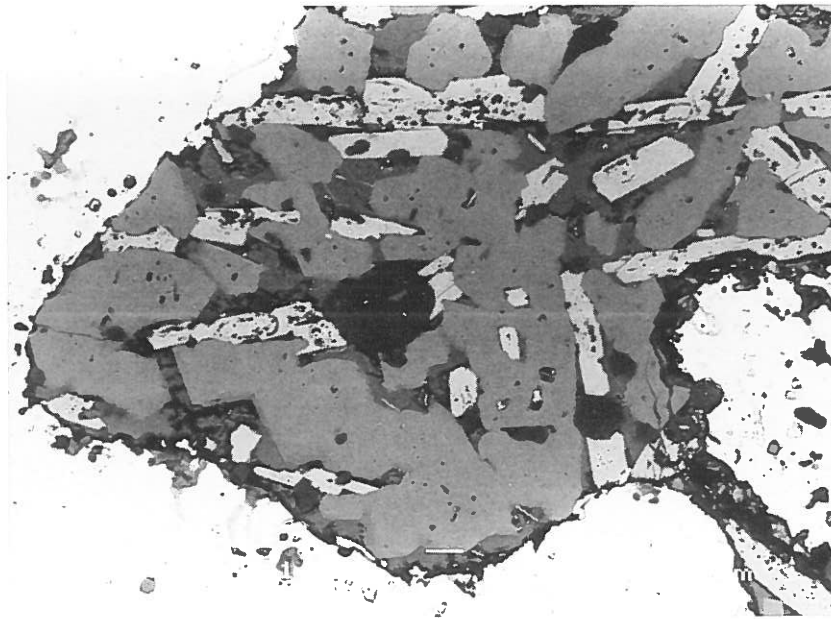


Abb. 4. Saalburg, Eisenblock S 1113. Mehrphasiger Schlackeneinschluß. Iscorit umschließt Eisenoxid (beide hellgrau); Fayalit (grau) ist isometrisch kristallisiert. In der Bildmitte Hercynit (ganz dunkel); auf Zwickeln zwischen Fayalit liegt Eisenphosphat. Außen ferritisches Eisen (weiß). REM-Bild, Rückstreuielektronen. Maßstabslänge 0,01 mm.

vornherein kein freies Eisenoxid mehr enthalten. Vielmehr dürfte es sich hier um die Erzeugnisse eines gut kontrollierten Rennverfahrens handeln, das eine wüsttarmer Schlacke neben leicht kohlenstoffhaltigem Eisen produziert hat. Restliche Wüstit-Anteile mögen während der Benutzung der Träger, d. h. also unter hohen Temperaturen in den Brennräumen der Thermen, mit dem im Eisen gebundenen Kohlenstoff reagiert haben. Für eine solche Gleichgewichtseinstellung, verbunden mit einer Rekristallisation von Metall und Schlacke, spricht auch das Gefügebild: Isometrischer Ferrit mit Zementit auf Korngrenzen und gut kristallisierte Schlacken in den Zwickeln. Größere Schlackeneinschlüsse enthalten dagegen oft noch freies Eisenoxid (Abb. 4) und sind im Abstand von 20 bis 50  $\mu$  von einem dünnen Band kugelförmiger Eisenphosphate umgeben (Abb. 6). Dies Phänomen, das sich auch auf manchen Luppengrenzen findet, wird als Oxidation des im Eisen vorliegenden Phosphors gedeutet, wobei das Perlenband die Oxidationsfront darstellt, die von den Schlackeneinschlüssen ausgeht.

Insgesamt entsprechen die Schlackeneinschlüsse typischen Rennfeuerschlacken (Bachmann 1982). Sie haben jedoch keine Ähnlichkeit mit den frühesten bekannten Roheisenschlacken (Yalçin 1992), die bei calciumsilikatischer Zusammensetzung sehr viel eisenärmer sind und weder Wüstit noch Fayalit führen.

## Das Metall

Der wichtigste metallographische Befund, der für die Herstellung der Träger aus einzelnen verschweißten Luppen spricht, sind die scharfen abgegrenzten Bereiche, die Luppen selbst (Abb. 3 a, b). Eine Kartierung der Luppen ist teilweise mit bloßem Auge möglich und in Abb. 2 durchgeführt. Im mittleren, wenig verdichteten Teil

sind die Grenzen schlecht auszumachen, während sie im Randbereich teilweise sehr markant sind.

An drei unterschiedlichen Stellen eines kleineren Abschnitts wurden Bohrproben zu je etwa 150 mg entnommen und mit dem Atomabsorptionsspektrometer (AAS) analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengestellt; sie zeigen deutliche Unterschiede für die Legierungselemente Co, Ni, Cu, As und P, aber auch für die an Schlackeneinschlüsse gebundenen Elemente Mn, Ti und Si zwischen den einzelnen Luppen.

| Probe Nr. | Co  | Ni    | Cu  | As  | P     | Mn  | Ti  | Si    |
|-----------|-----|-------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|
| D28/1 a   | 109 | 895   | 188 | 233 | 2 440 | 50  | <20 | 2 270 |
| D28/1 b   | <10 | 50    | 92  | <10 | 1 280 | 168 | 160 | 3 800 |
| D28/1 c   | 202 | 1 031 | 154 | 131 | 3 350 | 50  | <20 | 1 530 |

Tabelle 1. AAS-Analysen von Bohrproben an drei verschiedenen Stellen eines Eisenträgers von der Saalburg; Angaben in ppm. Cr in allen Proben unter 30 ppm, V unter 20 ppm.

Abb. 3 zeigt eine Luppengrenze im Mikrobereich. Die rechte Luppe ist sehr feinkörnig, dabei reich an Schlackeneinschlüssen, die linke Luppe ist wesentlich grobkörniger und besitzt nur wenige, aber große Einschlüsse. Beide Bereiche wurden mit der Mikrosonde (REM/WDX) auf Fe, Ni und P analysiert<sup>2)</sup>. Die linke, grobkörnige Luppe zeigt deutlich meßbare Gehalte an Ni und P, während die rechte Luppe beide Elemente nur unterhalb der Nachweisgrenze führt (Tabelle 2).

<sup>2)</sup> Die Nachweisgrenze dieser Analysemethode liegt bei etwa 200 ppm = 0,02 %, so daß Cu, Co und As in den durch AAS-Analyse bestimmten Mengen nicht erfaßbar sind. Si wurde gesucht, aber nicht gefunden; die hohen Si-Gehalte der AAS-Analysen entstammen also sicher den Schlackeneinschlüssen.

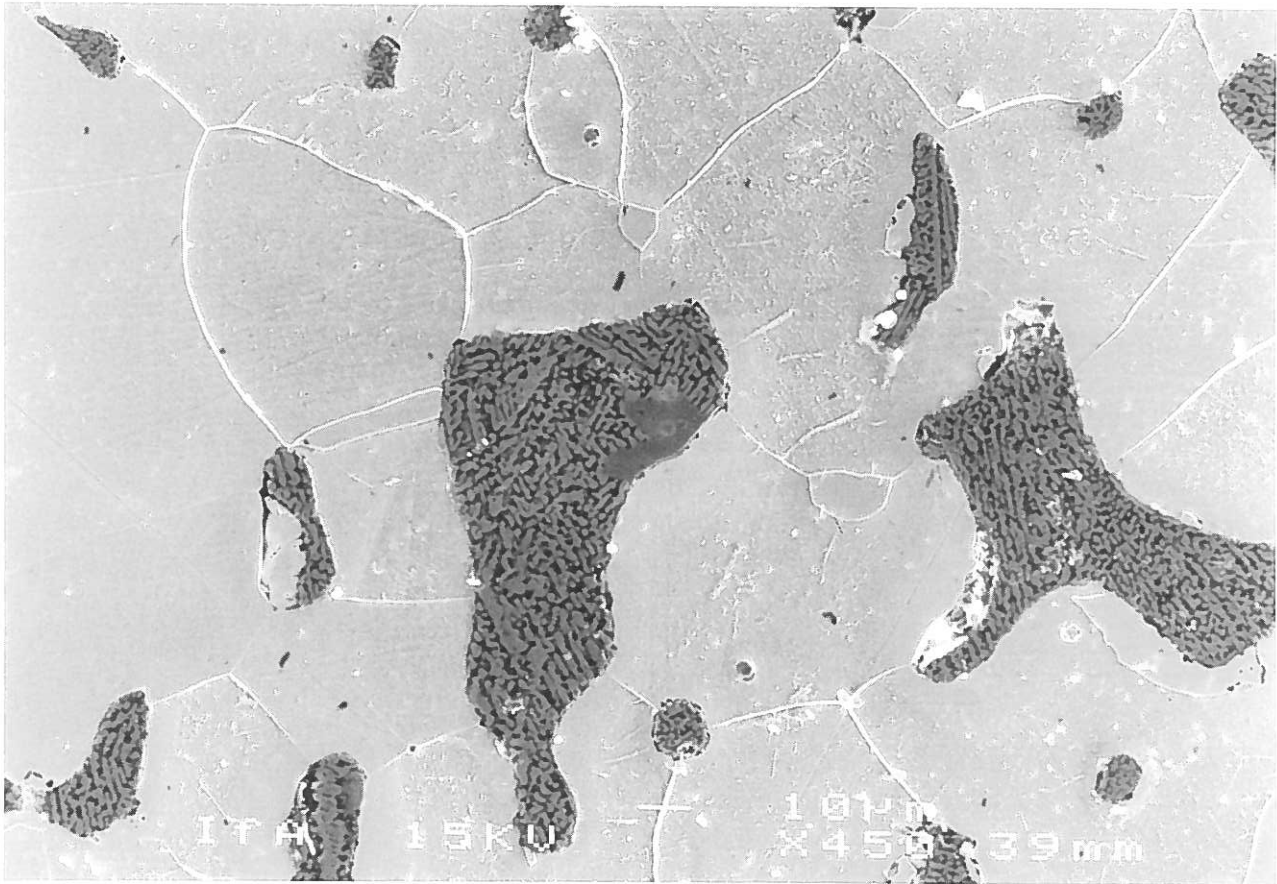


Abb. 5. Saalburg, Eisenblock S 1113. Detail aus Abb. 3 (rechte Lupe). Die Schlackeneinschlüsse sind an Korngrenzen gebunden und zeigen keine ausgeprägte Orientierung. Sie bestehen aus Fayalit in einer K- und P-reichen Grundmasse. Vereinzelt tritt Hercynit auf (Bildmitte, grau). Das Eisen ist ferritisch mit Zementit auf Korngrenzen und Zwickeln. REM-Bild, Sekundärelektronen. Maßstabslänge 0,01 mm.

| (Meß-)Punkt Nr. | Fe     | Ni   | P    |
|-----------------|--------|------|------|
| 13              | 100,04 | 0,00 | 0,21 |
| 14              | 99,91  | 0,14 | 0,43 |
| 15              | 98,39  | 0,17 | 0,29 |
| 16              | 101,35 | 0,04 | 0,00 |
| 17              | 100,05 | 0,00 | 0,00 |
| 18              | 102,06 | 0,00 | 0,00 |

Tabelle 2. WDS-Analysen in ferritischem Eisen an der Luppengrenze Abb. 3 a, b: 13–15 in der grobkörnigen, linken Lupe, 16–18 in der feinkörnigen, rechten Lupe. Angaben in %; Cu, Co und As unter der Nachweisgrenze, Mn und Si nicht gefunden.

Die Beobachtung von gefügekundlichen und chemischen Unterschieden zwischen verschweißten Luppen erklärt sich aus der natürlichen Streubreite dieser Parameter bei der Herstellung von Luppen. Selbst Luppen von ein und demselben Schmelzplatz können durch Schwankungen der Ofenparameter oder unterschiedliche Nachbehandlung in der Schmiede unterschiedlich zusammengesetzt sein; verstärkt gilt dies für Luppen aus räumlich getrennten und in ihrer Erzbasis voneinander abweichenden Hüttenplätzen.

In einem unberuhigten Guß, wie er von Krapp (1987) vorgeschlagen wird, sind zwar auch Inhomogenitäten innerhalb des Werkstückes zu erwarten, sie sollten dann jedoch als Schlieren ausgebildet sein und nicht als klar umrissene Bereiche.

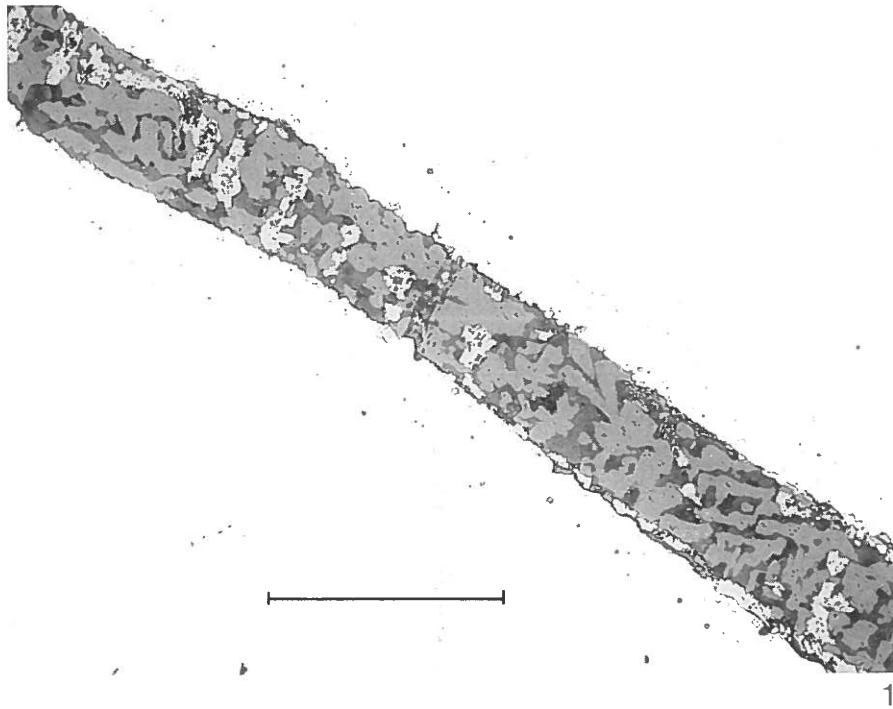
## Das Makrogefüge

Ein wichtiges Argument für den Guß stellen die vor allem im Mittelbereich der Stücke verbreiteten Hohlräume dar; Krapp (1987) erklärt sie als Lunker infolge der Volumenverminderung bei der Erstarrung der Schmelze. Unser Vorschlag zur Erklärung dieses Phänomens geht dahin, daß bei der Herstellung der Träger aus einzelnen Luppen bewußt auf eine Verdichtung des zentralen Teils der Träger verzichtet wurde. Sorgfältig ausgeschmiedetes und damit sehr dichtes Eisen wurde lediglich für den äußeren Teil benötigt, um eine tragende Säule mit geschlossener Oberfläche zu erhalten. Diese Vorgehensweise hatte für den römischen Schmied mehrere wesentliche Vorteile:

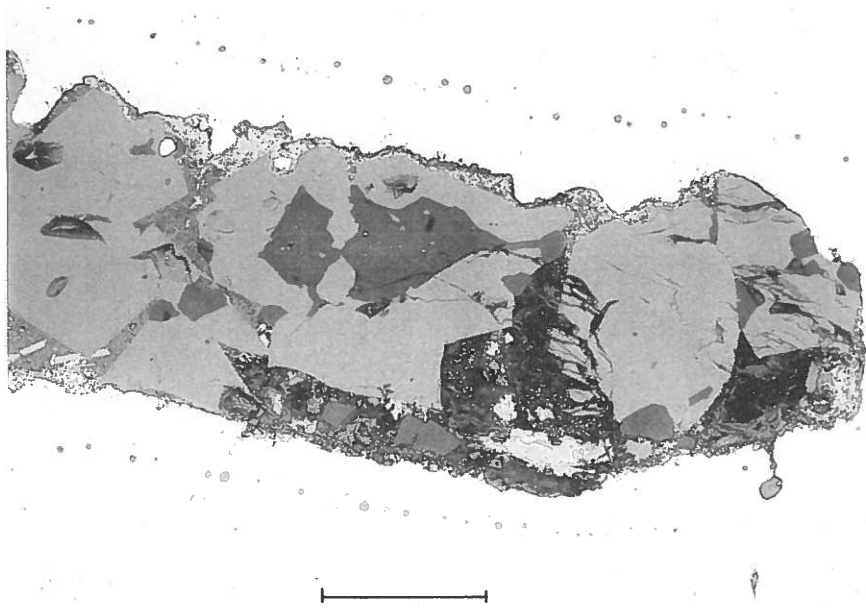
Das fertige Werkstück wurde bei gleicher Festigkeit deutlich leichter als bei einer durchgehend „massiven“ Bauweise.

Der Materialverlust, der beim Dichtschmieden einer Lupe auftritt und der bis zur Hälfte des ursprünglich vorhandenen Metalls betragen kann, wird deutlich verringert, und die damit verbundenen Kosten und Mühen werden gespart.

Die in der Mitte verwendeten Luppen sind deutlich größer, da sie zum einen mehr Metall und zum anderen zusätzlich Schlacken und Hohlräume enthalten; dadurch müssen weniger Werkstücke miteinander verschweißt werden, was wiederum weniger Arbeit verursacht.



1



2

Abb. 6. Saalburg, Eisenblock S 1113. Großer, langgestreckter Schlackeneinschluß mit Eisenoxid (hellgrau), Fayalit (grau) und Phosphaten (dunkelgrau) in ferritischem Eisen (weiß). Die Kette aus feinsten Tropfen rings um den Einschluß besteht aus Eisenphosphat. REM-Bild, Rückstreuelektronen. 1 und 2 Maßstabslänge jeweils 0,1 mm.

Diese Hypothese erklärt zwanglos die von Krapp (1987) beobachteten Makrogefüge (s. o.) und korrespondiert gut mit dem Feldbefund zur Herstellung einer solchen Säule, wie er von Tylecote (1962) dokumentiert ist.

### Die Theorie

Aus theoretischen Überlegungen ergeben sich drei Phänomene, die bei einem Guß zu beobachten sein müßten, aber in keinem der untersuchten Stücke gefunden wurden:

1. Bei einem Guß hoch kohlenstoffhaltigen Eisens mit anschließender Entkohlung der Schmelze durch eingeschlossene Erz- oder Oxidpartikel ist zumindest in den Rändern eine Konservierung des Gußeisengefüges zu erwarten, da dort wegen der schlagartigen Erstarrung der Schmelze im Kontakt mit der kälteren Gußform die autogene Entkohlung der Schmelze nicht stattfinden kann.

2. Die Erniedrigung des Kohlenstoffgehalts des Eisens geht einher mit einer Erhöhung des Schmelzpunktes weit über die seinerzeit erreichbaren Temperaturen hinaus; dazu tritt die Abkühlung durch Strahlungsverluste nach dem Guß. Die exotherme Reaktion von FeO und C kann dies nicht ausgleichen, so daß mit einem Einfrieren des halb entkohlten Metalls und einem dabei konservierten C- und gasreichen Gefüge zu rechnen wäre.

3. Die Schlacke in einem Rennofen besteht, vor allem unter den stark reduzierenden Bedingungen der Roheisenproduktion, fast ausschließlich aus Silikaten; Eisenoxid tritt demgegenüber sehr zurück bzw. fehlt bei der Roheisenproduktion ganz. Die Entkohlung des flüssigen Gußeisens könnte also nur durch Eisensilikat erfolgen, wobei entweder freies SiO<sub>2</sub> in der Schlacke oder metallisches Si im Eisen übrigbleibt; keines von beiden aber ist aus einem römischen Objekt bekannt und auch in den Blöcken von der Saalburg nicht zu finden.

Schließlich gibt es trotz zahlreicher Ausgrabungen römischer Werkstattbereiche und Verhüttungszentren gerade auch aus der römischen Kaiserzeit bislang keinen einzigen Feldbefund, der auf die Gewinnung von flüssigem Eisen hinweist.

Abschließend sei noch bemerkt, daß, wenn das von Krapp (1987) vorgeschlagene Verfahren funktionieren würde, viele Jahrhunderte lang völlig unnötig die verlustreiche und harte Arbeit des Frischens und Puddelns von Roh- oder Gußeisen durchgeführt worden wäre: ein schlechtes Zeugnis für die ansonsten immer wieder erstaunlichen Leistungen der frühen Hüttenleute!

## DANKSAGUNG

Wir danken Prof. D. Baatz für die freundliche Überlassung der römischen Eisenblöcke für unsere Untersuchung sowie Prof. R. Maddin, Dr. Ü. Yalçin und Herrn M. Ganzelewski für zahlreiche

hilfreiche Diskussionen und Hinweise. Die Durchführung der Arbeiten wurde durch die Förderung der Volkswagen-Stiftung zur Einrichtung des Institutes für Archäometallurgie am Deutschen Bergbau-Museum ermöglicht.

## Nachtrag

Erst nach Abschluß des Manuskripts wurde uns der Beitrag von Wright (1972) bekannt, der für einen rund 130 kg wiegenden römischen Balken von Catterick mit vergleichbaren Methoden zu dem gleichen Ergebnis kam. Im Längsschnitt unterscheidet er 17 Luppen auf einer Fläche von 80 mal 13 cm.

## Literatur

- Baatz, D. (1991) Die schweren Eisenträger von der Saalburg. Saalburg-Jahrbuch 46, 24–38.
- Bachmann, H. G. (1982) The Identification of Slags from Archaeological Sites. Institute of Archaeology Occas. Publ. 6, 1–37.
- Becker, G. & Dick, W. (1965) Metallkundliche Untersuchung einiger am Niederrhein gefundener Eisenblöcke aus der Römerzeit. Archiv Eisenhüttenwesen 36, 537–542.
- Hauptmann, A. & Maddin, R. (1991) Interim report on section of beam S 1112 from Limeskastell Saalburg. Saalburg-Jahrbuch 46, 38–40.
- Krapp, H. (1987) Metallurgisches zu zwei Eisenblöcken römischen Ursprungs. Radex-Rundschau 315–330.
- Osann, B. (1971) Rennverfahren und Anfänge der Roheisenerzeugung. Zur Metallurgie und Wärmetechnik der alten Eisengewinnung. Fachausschußbericht 9.001 der VDEh Düsseldorf.
- Piaskowski, J. (1992) Distinguishing between Directly and Indirectly Smelted Iron and Steel. Archeomaterials 6, 169–173.
- Rostoker, W. & Dvorak, J. (1990) Wrought Irons: Distinguishing Between Processes. Archeomaterials 4, 153–166.
- Tylecote, R. F. (1962) Metallurgy in Archaeology. Arnold, London.
- Wright, J. H. (1972) Metallurgical examination of a Roman iron beam from Catterick Bridge, Yorkshire. Journal Historical Metallurgy Society 6, 24–27.
- Yalçin, Ü. (1992) Vom Schmiedeeisen zum Roheisen – Frühes Eisen auf der Schwäbischen Alb. Giesserei 79, 1029–1033.