

Das Experiment als Methode zur Erkenntnisgewinnung

Hannes Herdits, Daniel Kumpa, Wolfgang Lobisser, Klaus Löcker, Mathias Mehofer und Hans Reschreiter

Die Vorstellung, durch praktische Experimente Einzelheiten über das Leben der Vergangenheit zu erfahren, ist beinahe so alt wie die Archäologie selbst, wenn auch die Anfänge sehr sporadisch verliefen. Die Pioniere dieser Forschungsmethode experimentierten bereits in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts, um Aussagen über die technischen Möglichkeiten von vergangenen Kulturen untermauern zu können.

In unseren Tagen, da die wissenschaftlichen Möglichkeiten der typologischen und auch der chronologischen Methoden nahezu ausgeschöpft sind, da man sich bei Datierungsfragen bereits unter dem Generationenbereich bewegt, beziehen sich die Fragen der Archäologen in zunehmendem Maße auf die Alltagskultur der Menschen, ihre Aktivitäten, Überlebensstrategien und Siedlungsgewohnheiten.

Neben den naturwissenschaftlichen Methoden (z. B. Pollenprofile, Dendrochronologie, Geomagnetik) stützt sich die moderne Forschung bei der Beantwortung dieser Fragen vor allem auf Ergebnisse der Experimentellen Archäologie. Keine andere Methode ist in dem Maße geeignet, unsere Vorstellungen von den technischen Möglichkeiten unserer Vorfahren auf eine lebensnahe Basis zu stellen, unsere Erklärungen und Interpretationen von Grabungsbefunden zu überprüfen.

Wenn die Ergebnisse unserer Versuche letztlich auch keinen endgültigen Beweischarakter haben, geben sie uns doch eine gute Vorstellung vom Alltagsleben der Vergangenheit, mit der wir uns wohl bei vielen Fragen weitgehend an die historische Realität annähern können¹.

Das Experiment setzt dort an, wo die herkömmlichen Methoden der Archäologie nicht mehr greifen und versucht Handwerkspraktiken, technische Einrichtungen, und Arbeitsvorgänge zu überprüfen, zu erklären und so letztlich zu rekonstruieren. Viele Experimente führen zu einer Rekonstruktion, doch beruht nicht jede Rekonstruktion auf einem Experiment.

Die Vorgangsweise bei archäologischen Experimenten orientiert sich vor allem an den Naturwissenschaften, wobei für jedes Experiment eine ausformulierte Forschungsfrage als Ausgangspunkt dienen sollte, die sich meist aus der Interpretation einer aktuellen Ausgrabung, aus einem historischen Text oder einer bildlichen Darstellung ergibt.

Jedes Experiment hat einen klassischen Ablauf, der mit einem ausführlichen Studium der Forschungsgeschichte seinen Anfang nimmt. Bei der Vorbereitung werden auch Vergleiche aus Ethnologie und Ethno - Archäologie eingearbeitet.

Sind alle zur Verfügung stehenden Informationsquellen ausgeschöpft, erfolgt die minutiöse Planung des Versuchs, der streng wissenschaftlich angelegt und genauestens dokumentiert wird, um theoretische Annahmen durch praktische Arbeiten auf ihre Richtigkeit zu testen. Bei der Dokumentation setzt man auf moderne Technik, Meßinstrumente und Videoaufnahmen, genauso wie auf Photographien und schriftliche Aufzeichnungen.

¹ Fansa, Mamoun, Experimentelle Archäologie in Deutschland In: Fansa, Mamoun (Hg.) Experimentelle Archäologie in Deutschland, Archäologische Mitteilungen aus Nordwestdeutschland . Oldenburg 1996. Beiheft 13,S. 11.

Es empfiehlt sich, jedes Experiment mindestens zwei mal vorzunehmen, damit eine gewisse Regelmäßigkeit bei den Ergebnissen nachvollziehbar ist. Die so gewonnenen Ergebnisse werden analysiert und mit dem bisherigen Forschungsstand verglichen, der so entweder bestätigt wird oder bei neuen Erkenntnissen entsprechend korrigiert werden muß. Neue Erkenntnisse führen zu neuen kulturhistorischen Ansätzen und in der Folge meist zu neuen Fragestellungen. Mittelpunkt der Experimentellen Archäologie ist immer der Mensch mit seinen Problemen, seinen Fähigkeiten und seinen Lösungsstrategien.

Eisenverhüttung

1. Theorie Eisenverhüttung

Beim Rennverfahren wird mittels eines pyrotechnischen Prozesses aus Eisenerz Metall gewonnen, die den Verhüttungsprozess bestimmenden thermodynamischen Parameter (Temperatur, CO/ CO₂ – Gasatmosphäre, etc.) können dabei im Reaktionsraum sehr stark differieren und sind von verschiedensten Faktoren abhängig.

Bernd Lychatz² beschreibt als bestimmende Einflüsse:

die Luftzufuhr

- Art der Windbeaufschlagung (kontinuierlich – diskontinuierlich)
- Windmenge pro Zeiteinheit und Düse

die Art der Ofenkonstruktion

- Abmessung des Ofens
- Anordnung und Anzahl der Düsen

die Beschaffenheit des Erzes

- Chemische Zusammensetzung
- Stückgröße
- Reduzierbarkeit
- Erweichungsbeginn und Intervall
- Deskriptionsverhalten
- Zuschlagstoffe

die Art des Brennstoffs

- Holz - Holzkohle
- Stückgröße
- Chemische Zusammensetzung
- Reaktionsvermögen
- Festigkeit
- Dichte

Die Prozessführung

- Mengenverhältnis von Erz zu Brennstoff
- Wärmehaushalt des Ofens
- Verbrannte Brennstoff pro Zeiteinheit
- Verbrannte Brennstoff pro Zeiteinheit und Gestellfläche

² Lychatz, Janke, *Experimentelle Simulation* 291.

1. 1. Die Gebläsetypen

Die Beaufschlagung des Rennofens mit Wind kann einerseits durch die natürliche Kaminwirkung wie auch durch künstliche Gebläse erfolgen. Allerdings setzt der Betrieb ohne Blasebälge einen entsprechend hohen Ofenschacht voraus, um die Kaminwirkung zu nützen.

Die bis jetzt von der Forschung postulierten Schachthöhen für verschiedenen frühgeschichtlichen Öfentypen³ sind im Bereich um 0,8 – 1,2m anzusetzen, sodass damit gerechnet werden kann, dass diese meistens mit künstlichem Gebläse betrieben wurden. Während der Zeit des Frühmittelalters könnten hierfür sowohl Schalen- und Schlauchgebläse⁴ als Spitzblasebälge verwendet worden sein. Das Schalengebläse besteht aus zwei getrennten Schalen aus Stein, Holz, oder Keramik mit je einer Düse pro Schale, durch abwechselndes gegengleiches Hochziehen und Niederdrücken der Schalenbedeckung wird Luft durch ein Ventil eingesaugt und durch die Düse in den Ofen gepresst. Das nur aus Tierhäuten bestehende Schlauchgebläse funktioniert nach demselben Prinzip, nur mit unterschiedlicher Ventilkonstruktion, während die Ventile des Schalengebläses nach dem Rückschlagprinzip arbeiten, ist beim Schlauchgebläse oben eine große Öffnung vorhanden, die mit 2 Stäben geöffnet und geschlossen wird, beim Ansaugen wird der Balg hochgezogen und die Stäbe sind geöffnet, beim Niederdrücken wird die Stäbe gegeneinander gepresst und dadurch das Ventil geschlossen, sodass die Luft durch die Düse in Richtung Ofen gedrückt wird. Der, von Ernst Giese⁵ im Rahmen von Experimenten rekonstruierten Doppelblasebalg orientiert sich an den Darstellungen aus der Wielandsage auf dem Türpfosten von Hyllestad⁶ aus dem 12. Jahrhundert wie auch an Schmiedeszenen auf dem Walbeinkästchen von Auzon, Haute Loire sog. Franks Casket, das um 700 n. Chr. datiert wird. Die darauf dargestellten Blasebälge könnten auch für den Betrieb von Rennöfen verwendet worden sein. Radomir Pleiner beschreibt einen Fund des 10. Jahrhunderts aus Sarkel Belaya Vezha. In der untersuchten Schmiede⁷ wurde ein grob zugearbeitetes dreieckiges Brett gefunden, dass von ihm als Konstruktionselement eines Lederblasbalges angesprochen wird.

Düsen

Die Funktion einer Düse⁸ besteht darin, den vom Blasebalg kommenden Luftstrom das Innere eines Rennofens oder eines Schmiedeofens zu leiten. Gleichzeitig sollen sie den meistens aus organischem Material bestehenden Blasebalg vom heißen Ofenraum trennen und dadurch dessen Beschädigung verhindern. Düsen wurden meistens aus Ton produziert und konnten, nachdem sie abgeschmolzen waren leicht ersetzt werden. Aufgrund der Ofenkonstruktion wurde meistens nur die ofenwärtige Spitze der Düse gebrannt und blieb dadurch erhalten, währenddessen das trichterförmige Ende aufgrund geringerer Brenntemperaturen meistens vergangen war.

³ Pleiner, *European Bloomery Smelters* 173.

⁴ Herdits, *Schmelzversuche* 9.

⁵ Giese, *Blasebalg*, 105 Abb.1; Thomsen, *Essestein und Ausheizschlacken* 100, Abb. 1.

⁶ Müller-Wille, *Der frühmittelalterliche Schmied* 133.

⁷ Pleiner, *European Bloomery Smelters* 214.

⁸ Pleiner, *European Bloomery Smelters* 198.

Das Vorhandensein von Düsen allein bedingt noch nicht automatisch eine künstliche Belüftung eines Rennofens, zusätzlich muss auch der Durchmesser der Düsen in Betracht gezogen werden. Radomir Pleiner⁹ beschreibt, dass Düsen mit einem Durchmesser kleiner als 15– 30mm mit einem Gebläse kombiniert sein müssen, da dieser kleine Querschnitt für Betrieb mit natürlichen Zug zu gering erscheint und nur eine unzureichende Luftmenge in den Ofen leiten würde.

1. 2. Die Ofentypen

Schlackengrubenofen

Das Konstruktionsschema eines kaiserzeitlichen Grubenofens wird von Hans Hingst¹⁰ aufgrund der Befunde vom Kamberg folgendermaßen beschrieben: Über eine runde Grube von ca. 0,4– 0,6m Durchmesser und einer durchschnittlichen Tiefe von 0,4– 0,7m wird ein Ofenschacht in der Höhe von ca. 1,2m errichtet. So wie der aus Scharmbeck¹¹ stammende Ofenschacht einen Durchmesser von 45cm auf. Die Grube wird vor Beginn der Verhüttung mit Reisig¹², Stroh¹³ oder Holz¹⁴ gefüllt.

Das Erz wird abwechselnd mit Holzkohleschichten durch die Gichtöffnung (obere Öffnung des Ofenschachts) gesetzt, die Reduktion erfolgt nach den Prinzipien des oben beschriebenen Rennverfahrens durch CO/ CO₂ Gasgemische. Damit sich das entstehende Eisen von der Schlacke trennen kann, muss diese in die unter dem Düseniveau vorhandene Grube abfließen können. Das darin vorhandene Füllmaterial muss deswegen zum geeigneten Zeitpunkt kontrolliert verbrennen und dadurch entsprechenden Raum freigeben. Allerdings darf dies nicht zu schnell vor sich gehen, da sonst das Erz und das ausreduzierte Eisen mit in die Grube absinken und somit kein zusammenhängender Eisenklotz entstehen kann, da nur im unteren Teil des Ofenschachtes die Eisengewinnung vor sich geht. Der in Abb. 17 dargestellte schematische Ablauf¹⁵ zeigt wie der Verhüttungsvorgang vor sich geht.

Der Grubenofen kann je nach Größe und Durchmesser zwischen 1 und 4 Düsenöffnungen haben. So produzierten laténezeitliche Schlackengrubenöfen Schlackenklötze bis über 100kg produzieren, währenddessen Grubenöfen der römischen Kaiserzeit mit wesentlich geringeren Abmessungen, Düsenanzahl und geringere Schlackenklötze produzierten.

Schlackenabstichofen

Der Schlackenabstichofen weist als wesentlichsten Unterschied zum oben beschriebenen Ofen keine Grube unter der Düsenebene auf. Meistens als freistehende Schachtofen rekonstruiert, wird die während der Verhüttung gebildete Schlacke nicht in die Grube abgeleitet, sondern kontrolliert ein- oder mehrmals abgestochen, bevor die Luppe aus dem Ofengestell entnommen wird.

⁹ Pleiner, *European Bloomery Smelters* 200.

¹⁰ Hingst, *Vor- und frühgeschichtliche Eisengewinnung* 64.

¹¹ Wegewitz, *Rennfeuerofen* 15, Abb. 7; Wegewitz, *Siedlung und der Rennofen von Scharmbeck* 351.

¹² Leineweber und Lychatz verwendeten bei ihren Experimenten mit einem Schlackengrubenofen mit einem Verbindungskanal zur Schlackengrube Reisig als Grubenfüllung: Leineweber, *Eisengewinnung* 103.

¹³ Die Schlacken der kaiserzeitlichen Verhüttungsplätze von Schuby und Süderschmedeby zeigen sowohl Holz-, Reisig- wie auch Strohabdrücke: Jöns, *Schuby und Süderschmedeby* 72; Mikkelson schreibt, dass Schlackenklötze aus Öfen des 2. – 7. Jahrhunderts n. Chr. in Dänemark sehr oft Strohabdrücke zeigen: Mikkelson, *Straw in Slag Pit Furnaces* 63.

¹⁴ Voss, *Jernudvinding i Danmarks Forhithistorisk Tid* 14, Abb. 8; Espelund, *Operation of bloomery furnaces* 174.

¹⁵ Jöns, *Frühe Eisengewinnung in Jodelund* 129, Abb. 79.

Wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens ist einerseits, das durch das Abstechen der Schlacke die Prozessführung kontrolliert und beeinflusst werden kann, andererseits kann der Ofen nach Beendigung der Ofenreise ausgeräumt, ausgebessert und dadurch mehrmals wieder verwendet werden. Wie oft ein solcher Ofen gebraucht werden kann, hängt von der Bauweise (Wandstärke), dem Baumaterial und den im Ofen erreichten Temperaturen zusammen. In der Vorstellung seiner Schmelzexperimente erläutert Peter Crew, dass die Reparatur eines Ofens am Besten noch im heißen Zustand der Ofenwand¹⁶ erfolgte: es wurden mehrere dünne Lagen Lehm oder Ton aufgetragen, die schnell antrockneten. Danach war der Ofen für den nächsten Verhüttungsdurchgang bereit.

Andreas Kronz und Ingo Kessmann¹⁷ beschreiben, dass bei der Verhüttung ein Teil der Ofenwand (Ton) aufschmilzt und somit zur Schlackenbildung beiträgt. Je nach Schmelztemperatur des Baumaterials kann dies die Lebensdauer eines Ofens entscheidend beeinflussen. Da mit jedem Schmelzvorgang etwas Material verloren geht, muss dieses entsprechend ergänzt werden. Dies kann jedoch nicht permanent fortgesetzt werden, da der Ton, aus dem der Ofenschacht konstruiert ist, die starken Temperaturschwankungen, zwischen Stillstand (Umgebungstemperatur) und Vollbetrieb (ca. 1200– max. 1400°C), nicht dauernd kompensieren kann. An der Basis befindet sich eine Öffnung zur Entnahme der Luppe, die vor Beginn der Ofenreise verschlossen werden muss.

Der meistens runde bis ovale Querschnitt eines solchen Ofens betrug um die 50cm. Die Wandstärke der aus Ton aufgebauten Schächte betrug ca. 30cm an der Basis und 10cm bei der Gichtöffnung, deren Durchmesser mit ca. 30cm angegeben werden kann.

1. 3. Die Erzvorbereitung – das Rösten

Als Ausgangsmaterial stehen verschiedene Erze zur Verfügung, die sich jedoch entsprechend ihrer Zusammensetzung unterschiedlich zur Verhüttung eignen. Dies ist abhängig vom Fe– Gehalt, von der begleitenden Gangart und der Reduzierbarkeit¹⁸ des Erzes. Es lässt sich zwischen oxidischen, hydroxidischen, sulfidischen und karbonatischen Erzen unterscheiden. Die beiden letztgenannten, sulfidische und karbonatische Erze, müssen jedoch zuerst durch „Rösten“ in Oxide umgewandelt werden, währenddessen die oxidischen und hydroxidischen direkt dem Verhüttungsprozess unterzogen werden können.

Name	Formel
Wüstit	FeO
Hämatit	Fe ₂ O ₃
Magnetit	Fe ₃ O ₄

¹⁶ Crew, *Experimental production* 24.

¹⁷ Kessmann, Kronz, *Schlacken verschiedener Stufen der Eisentechnologie* 157.

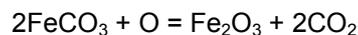
¹⁸ Lychatz, *experimentelle Simulation* 287.

Goethit	α - FeOOH
Limonit	γ - FeOOH
Pyrit	FeS ₂
Markasit	Fe ₁₁ S ₁₂
Siderit	FeCO ₃

Zusammensetzung der eisenhaltigen Minerale.

Das Rösten findet bei Temperaturen von 400– 900°C in einem offenen Feuer (Röstbett) mit großzügigem Sauerstoffzutritt statt. Ziel des Röstens ist es, einerseits nicht oxidische Erze (Sulfide, Carbonate) in Oxide umzuwandeln, andererseits werden die Erzklumpen brüchig und können entsprechend zerkleinert werden. Auch werden in den Erzen vorhandene organische Substanzen verbrannt¹⁹ und die boden- oder luftfeuchten Erze ausreichend getrocknet.

Mehrere Autoren experimentalarchäologischer Versuche geben an, dass in etwa nussgroße Erzstücke ideal für die Verhüttung seien. So beschreibt Radomir Pleiner²⁰ das Rösten von Carbonaten durch folgende Formel:



Durch diese, dem eigentlichen Verhüttungsprozess vorgeschaltete Behandlung des Erzes, kann die Belastung der Ofenatmosphäre verringert werden, da der oben beschriebenen Vorgänge nicht erst im Rennofen während des Absinkens des Erzes im Ofenschacht stattfinden müssen. Weiters wird durch den Röstvorgang das Erz porös und es kann gepocht werden. Dadurch kann das zur Reduktion notwendige Kohlenmonoxid großflächiger angreifen.

1. 4. Der Verhüttungsprozess - Erzreduktion

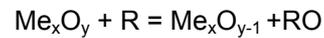
Verschiedene Modelle für die Temperaturverteilung im Rennofen beschreiben, dass sich diese ähnlich dem Aufbau einer Kerzenflamme im Ofengestell strukturiert (Abb. 17). Im Bereich der Düse können Temperaturen um 1400°C erreicht werden. Thorlander und Blomgren beschreiben, dass je nach Windbeaufschlagung und Brennmaterial auch höhere Temperaturen²¹ um ca. 1600°C möglich sind. In nur kurzer Entfernung von der Düsenöffnung fällt diese auf 1200 - 1300°C ab und sinkt weiter auf ca. 350° - 500°C bei der Gichtöffnung ab.

¹⁹ Espelund, *Bog iron* 44.

²⁰ Pleiner, *European Bloomery Smelters* 107.

²¹ Thorlander, Blomgren, *Classification of ancient slags* 417, Fig. 3.

Während der Verhüttung wird nun dem zugegebenen Eisenerz, einem Gemenge aus Eisenoxid und Gangart, durch Kohlenmonoxid aus der Verbrennung von Holzkohle der Sauerstoff²² entzogen. Diese Reduktion erfolgt durch den Abbau des Sauerstoffs eines Oxides durch ein sauerstoffaffineres Reduktionsmittel zur nächst niedrigeren Oxidationsstufe²³ oder zum Element und folgt der Gleichung:



Me_xO_y bezeichnet hierbei das Metalloxid und R das sauerstoffaffinere Element. Die Reduktion kann dabei nur erfolgen, wenn das Sauerstoffpotential des Metalloxides höher ist als das des Reduktionsmittels.

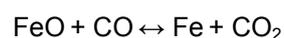
Zuerst wird Hämatit (Fe_2O_3) zu Magnetit Fe_3O_4 nach unten stehender Formel²⁴ reduziert:



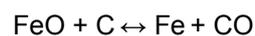
Dies geschieht bereits bei Temperaturen um 570°C . Bei darüberliegenden Temperaturen erfolgt die Reduktion des Magnetits zu Wüstit (FeO) wie folgt:



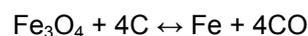
Erst wenn dieser Schritt erfolgt ist, kann mit dem weiteren Entzug des Sauerstoffs das Eisen selbst gewonnen werden:



Diese Reduktion²⁵ des Eisenoxids durch CO im Verbrennungsgas der Holzkohle wird als indirekte Reduktion bezeichnet und ist zwischen 400°C und 1000°C wirksam. Bei darüberliegenden Temperaturen findet die direkte Reduktion durch den Kohlenstoff der glühenden Holzkohle statt, bei der Eisen und CO entstehen:



und



²² Schürmann, *Reduktion des Eisens* 1298.

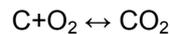
²³ Lychatz, *experimentelle Simulation* 288.

²⁴ Ganzelewski, *Archäometallurgische Untersuchungen* 14.

²⁵ Osann, *Rennverfahren*.

Für den Rennfeuerprozess kann angenommen werden, dass hauptsächlich das indirekte Verfahren wirksam ist, welches allerdings durch höhere Temperaturen²⁶ von 900– 1000°C erheblich begünstigt wird. Sobald metallisches Eisen vorhanden ist, kann dies bei entsprechenden Bedingungen im Ofen bereits aufkohlen. Das in γ - Modifikation vorliegende Eisen beginnt bei Temperaturen um 900°C Kohlenstoff aus dem Gas zu absorbieren, sodass es zur Erhöhung des C- Gehalts kommt. Gleichzeitig setzt ab Temperaturen von 1100- 1200°C das Aufschmelzen der Gangart ein, die zusammen mit bereits ausreduziertem Wüstit²⁷ die Schlackenphase Fayalit (Fe_2SiO_4) und damit die Primärschlacke bildet.

Die Temperatur im Ofen steigt von oben nach unten an und erreicht den höchsten Wert vor und oberhalb der Luftzufuhr (1200- 1400°C). Nach der Darstellung von Ossann sind die Verbrennungsgase im Ofen sehr heterogen zusammengesetzt und verteilt. Der, in der durch die Düse eingeblasenen Luft, vorhandene Sauerstoff verbrennt mit dem Kohlenstoff der Holzkohle zunächst zu Kohlendioxid



Durch die Boudouard – Reaktion²⁸ wird das Kohlendioxid zu Kohlenmonoxid reduziert



Beide Reaktionen brauchen eine gewisse Wegstrecke. Der Sauerstoff ist kurz nach dem Eintritt in den Ofen verbrannt und nach einer weiteren Wegstrecke ist das primär entstandene CO_2 zu CO reduziert.

In schwach mit Wind beaufschlagten Öfen reicht der Existenzbereich von CO_2 nur wenige Zentimeter in den Ofen und wird mit dem Hauptgasstrom kurz hinter den Windöffnungen nach oben umgelenkt. Über dieser Verbrennungszone findet nun im Schacht die indirekte Reduktion der Erze statt, bei der sich aus Kohlenmonoxid und dem Sauerstoff der Eisenoxide ständig CO_2 bildet. Je nach Ofentyp kann der CO- Gehalt des Ofengases selbst in oberen Schachtbereichen noch ausreichend für eine erste Reduktion der Erze sein.

²⁶ Espelund, *Metallurgisk ABC* 51.

²⁷ Pleiner, *European Bloomery Smelters* 135.

²⁸ Die hier beschriebene Reaktionen stellen den idealen Ablauf der Erzreduktion dar, neuere Untersuchungen weisen eindeutig darauf hin, dass diese idealen Boudouard – Bedingungen in einem Rennofen nicht erreicht werden konnten. Vielmehr ist anzunehmen, dass die Reaktion: $\text{FeO} + \text{CO} \leftrightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$ den Ablauf dominiert hat, solange genügend FeO vorhanden war: Kronz, *Ancient Iron production compared to Medieval Techniques* 560.

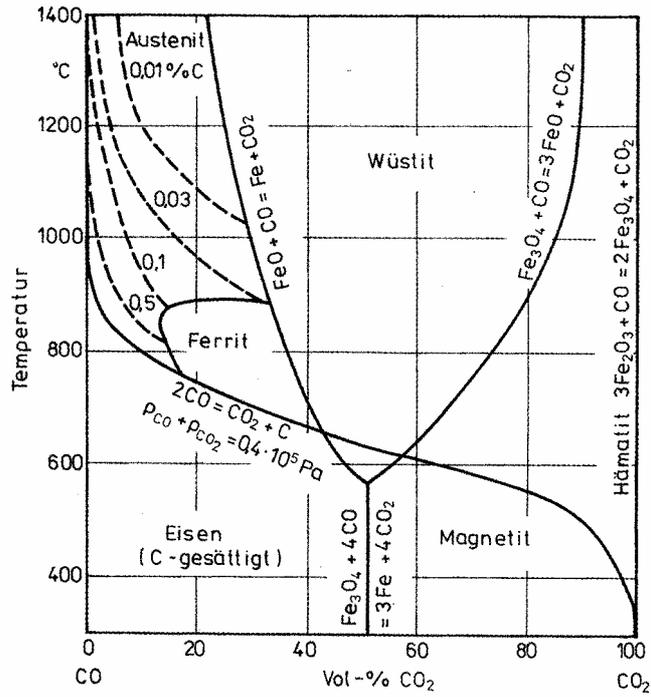


Abb. 16: das Baur – Glässner Diagramm zeigt den Bereich, in dem Eisen aus dem Wüstite reduziert werden konnte, die gestrichelten Linien umfassen die T/ CO/ CO₂ –Zone, die in einem Rennöfen erreicht werden konnte.

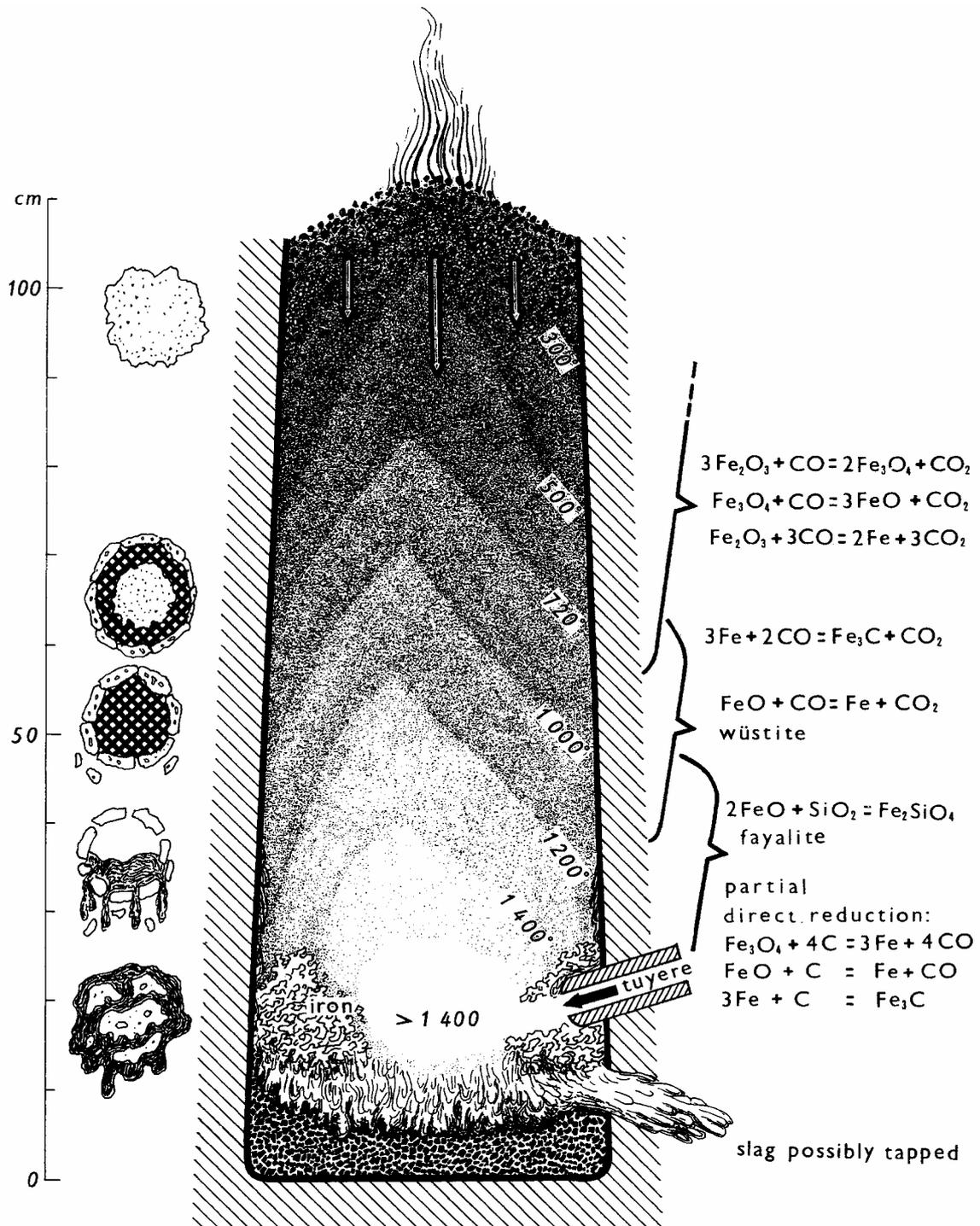


Abb. 17: Schematischer Ablauf der Verhüttungsprozesses, vor der Düse herrscht die höchste Temperatur, in diesem Bereich bildet sich die Luppe. Links wird der Bildungsvorgang der Eisenpartikel dargestellt.

1. 5. Ablauf des Rennprozesses

Vor Beginn des Rennprozesses sollte der Ofen auf Betriebstemperatur gebracht werden, da ansonsten eine einigermaßen berechenbare Ofenreise nur schwer möglich ist.

Abhängig von Baumaterial, Konstruktion und Wärmedämmungseigenschaften der Ofenwand kann dies verschieden lange Zeit in Anspruch nehmen. Ein nicht vorgeheizter Ofen entzieht dem

Brennraum Wärme (= Energie), die wiederum von der verbrennenden Holzkohle geliefert werden muss und somit nicht für die Reduktion der Oxide zur Verfügung steht. Dies führt anfänglich zu einer Senkung der Temperatur im Brennraum und verschlechtert die Effizienz²⁹ der Eisenausbringung.

Nach dem Vorheizen, das auch mit Holz erfolgen kann, wird der Ofen mit Holzkohle bis zur Gichtöffnung gefüllt und nun schichtweise mit Erzstücken in entsprechender Größe und Gewicht beaufschlagt. Es werden immer abwechselnd eine Schicht Holzkohle und eine Schicht Erz gesetzt, wobei die Mengenverhältnisse entsprechend dem Ofentyp sehr unterschiedlich sein können. Aus praktischen Versuchen ist bekannt, dass in etwa ein Verhältnis von 1:1 gute Ergebnisse erbringt, ebenso sollte die Korngröße von Erz und Holzkohle ähnlich sein. Für seine Experimente zur Eisenverhüttung beschreibt Peter Crew³⁰, dass während des Vorheizens bereits Luft in den Ofen eingeblasen wurde. Ab dem Setzen der ersten Charge wurde die Windmenge noch zusätzlich auf 200– 300 Liter pro Minute erhöht. Die Größe der Holzkohlestücke betrug zwischen 10– 50mm.

Die Charge sinkt nun im Ofen nach unten, dabei wird das Erz nach oben beschriebenen Vorgängen schrittweise zu Eisen reduziert. Unterhalb der Düse(n) bilden die Eisenpartikel die Luppe. Dieses schwammige Gebilde stellt ein Gemenge aus Eisen, Schlacke, Holzkohle und Erzresten dar. Die entstehende Schlacke trennt sich je nach Ofentyp (Rennofen mit Abstichöffnung, Schlackenrubenofen) unterschiedlich von der Luppe.

Nachdem die letzte Erzcharge gesetzt wurde muss der Ofen noch eine gewisse Zeit betrieben werden und weiterhin Holzkohle nachgefüllt werden, bis auch dieses Erz im Ofen abgesunken und zu Eisen reduziert wurde. Anschließend kann der Ofen geöffnet und die Luppe entnommen werden. Geschieht dies gleich nach Beendigung der Ofenreise, kann die noch glühende Luppe gleich zu einem kompakteren Eisenklumpen homogenisiert werden.

Dieses Verfahren dient dazu, aus einem Metallstück mit heterogener Verteilung von Schlacken und Legierungselementen durch wiederholtes Ausschmieden zu einem Stab, mehrmaliges Falten und anschließendes Feuerschweißen eine gleichmäßige Verteilung der verschiedenen Legierungselemente zu erreichen und dadurch eine gleichmäßige Verarbeitungs- und Gebrauchsqualität eines Werkstückes zu gewährleisten³¹.

1. 6. Schlackenbildung im Ofen

Die im Rennofen³² eingesetzten Erze bestehen nicht nur aus Eisenoxiden, sondern auch aus der Gangart. Dies sind weitere Bestandteile des Erzes (z. B. anhaftender und eingeschlossener Sand, Lehm etc.). Bei ansteigenden Temperaturen entsteht im Ofen aus Eisenoxiden und der Gangart eine

²⁹ Crew, *Experimental production* 26.

³⁰ Crew, *Experimental production* 22, 26; Crew, Salter, *Comparative Data* 16, 17.

³¹ Herdits, *Schweiß Eisen* 66, Abb. 12.

³² Ganzelewski, *Archäometallurgische Untersuchungen* 15.

flüssige Eisensilikatschlacke, in der auch Bestandteile der Ofenwand³³ miteingehen. Die Schlacke nimmt einen nicht unbeträchtlichen Teil des Eisens aus der Charge auf, der dadurch während des Rennprozesses nicht zu Metall reduziert werden kann. Mittels des durch die Schwerkraft bedingten Abfließens der Schlacke erfolgt die Trennung von Gangart und Eisen, das zur Luppe zusammensintert.

Während der Verhüttung entsteht nun neben der Luppe als Abfallprodukt Schlacke. Dabei handelt es sich um ein Gemisch aus den Eisenoxiden, der Gangart, der aufgeschmolzenen Ofenwand und der Asche der Holzkohle. Einer der Hauptbestandteile der Schlacke stellt neben dem Wüstit (FeO) der Fayalit³⁴ (Fe₂O.SiO₂) dar. Der Schmelzpunkt³⁵ dieser Verbindung liegt mit 1205°C in einem Temperaturbereich, der im Rennofen erreicht werden kann. Dadurch können die ebenfalls aufschmelzenden Begleitstoffe vom Eisen abgetrennt und ausgebracht werden. Ein gravierender Nachteil ist jedoch der hohe Verlust an Eisen in der Schlacke, der ein niedriges Eisenausbringen zur Folge hat.

1. 7. Die Luppe

Nachdem die Ofenreise beendet wurde, kann die Luppe aus dem Ofengestell entnommen werden. Beim Schlacken grubenofen muss hierfür der Ofenschacht zerstört werden, währenddessen beim Schlackenabstichofen die Ofenbrust eine Öffnung aufweist, die separat verschlossen sein kann.

Diese Luppe ist noch immer stark mit Schlacke verunreinigt, ähnlich einem mit Wasser voll gesogenen Schwamm. Würden jetzt bereits Gegenstände daraus geschmiedet, wären diese von geringer Qualität und Haltbarkeit. Bevor die eigentliche Formgebung durch Schmieden erfolgt muss die Luppe den Ausheizprozess durchlaufen.

Durch fortgesetztes Erhitzen und Hämmern bei Temperaturen zwischen 1000 – 1200°C wird die Schlacke aus der Luppe herausgepresst und tropft in die Esse ab. Da dies in einem Temperaturbereich passiert, in dem auch das Feuerschweißen stattfindet, wird gleichzeitig mit dem Verdichten auch eine Verschweißung des Material erreicht und dadurch die Qualität erhöht. Diese Tätigkeit wird als Ausheizvorgang³⁶ bezeichnet. Währenddessen entsteht neben Schlacke auch so genannter Hammerschlag, dieser kann in und um der Esse gefunden werden und kann laut Hauke Jöns³⁷ als „*sicherer Leitfund zur Lokalisierung von Schmiedearbeiten*“ gelten. Die daraus resultierende Schlacke kann der Schmiedeschlacke morphologisch und chemisch sehr ähnlich sein.

1. 8. Ausheiz- / Schmiedesse

In dem Schmiedeherd / esse wird aus den verschiedenen Ausgangsprodukten – Barren, Altmetall -

³³ Kronz, *Ancient Iron production compared to Medieval Techniques* 558.

³⁴ Ylaçin, Hauptmann, *Archäometallurgie des Eisens* 279.

³⁵ Matthes, *Mineralogie* 115, Abb. 53.

³⁶ Leineweber, *Spätromerzeitlicher Verhüttungsplatz* 103; Wollschläger, *Eisenverhüttungsplatz der spätromischen Kaiserzeit* 154.

³⁷ Jöns, *Frühe Eisengewinnung in Jodelund* 133.

das Endprodukt geschmiedet. Die Schmiedeschlacken, die nach Sperl³⁸ einen positiven Abdruck der Esse darstellen, lassen erkennen, dass es sich meistens um eine halb kalttottenförmige Vertiefung handelt. Allgemein wird angenommen, dass die Schmiedeherde in den Boden eingetieft waren und das Schmiedefeuer mittels Blasebalg betrieben wurde. Zum Schutz des Blasebalges vor der in der Esse vorhandenen Hitze konnte diese mit einem Essestein³⁹ ausgestattet sein. Dieser konnte aus den verschiedensten Materialien gefertigt sein – wie Stein, Speckstein, Keramik etc.

1. 9. Die Schlacken - Nebenprodukte der Verhüttung

Die bei hüttentechnischen Prozessen entstehenden Schlacken sind als absichtlich produzierte Nebenprodukte zu verstehen, deren Aufgabe es ist, unerwünschte Begleitelemente des Erzes vom entstehenden Metall zu trennen, sodass diese nicht in dieses eindiffundieren und dessen Materialeigenschaften⁴⁰ negativ beeinflussen können. Da die Schlacke nicht weiter verwendet wurde, blieb sie im Allgemeinen als Überrest in unmittelbarer Nähe des Verhüttungsplatzes zurück. Da es sich beim Hüttenprozess um einen in einem gewissen Rahmen gezielt geführten Prozess handelt, können diese „Abfallprodukte“ zur Klärung und Beschreibung der grundlegenden Prozesstechniken und Prozessparameter verwendet werden.

Das Schlackenmaterial lässt sich grundsätzlich in Fließschlacken und Schmiedeschlacken unterteilen. Als dritte Gruppe tritt hierzu eine Anzahl nicht klassifizierbarer Schlacken, die aufgrund dessen, dass sie in kleine Stücke zerbrochen sind, äußerlich keine Rückschlüsse auf ihre Entstehung im Rennofen oder Schmiedeofen zulassen.

Fließschlacke

Charakteristisch für diesen Schlackentyp ist die äußerlich deutlich erkennbare Fließstruktur⁴¹. Sie kann aus Schmelztropfen oder lagenweise übereinander geflossenen Schmelzen bestehen. Während ihrer Entstehung war die Schlacke flüssig und hatte eine geringe Viskosität. Die verschiedenen Schlackenphasen sind in den meisten Fällen homogen verteilt. In der Bruchfläche lässt sich meistens ein glasartig dichtes Gefüge feststellen, in dem Gasblasen, Holzkohle, Erz oder Gangart eingeschlossen sein kann.

Schmiedeschlacke

Dieser Schlackentyp weist als Besonderheit oft Porenräume, Holzkohleneinschlüsse und Verwitterungserscheinungen⁴² durch sekundär gebildetes Eisenhydroxid an der Oberfläche auf. Sie kann stellenweise auch Fließstrukturen aufweisen. Wesentlicher Unterschied zur oben beschriebenen Fließschlacke ist, dass diese nicht während der Verhüttung entsteht, sondern als Abfallprodukt bei der Weiterverarbeitung der Luppe.

³⁸ Sperl, *Typologie urzeitlicher Schlacken* 15.

³⁹ Thomsen, *Essestein und Ausheizschlacken* 102, Abb. 2, diese Abbildung zeigt den Essestein von Snaptun, Dänemark.

⁴⁰ So führt ein erhöhter Schwefelanteil im Eisen zur Rotbrüchigkeit, dadurch versprödetes es und ist nicht mehr verwendbar.

⁴¹ Jöns, *Frühe Eisengewinnung in Jodelund* 102.

⁴² Ganzelewski, *Archäometallurgische Untersuchungen* 44.

Das als charakteristisch geltende Aussehen der Schmiedeschlacke zeigt in der Aufsicht einen rundlich bis ovalen Schlacken Kuchen und die Seitenansicht lässt einen flach halbkugeligen Querschnitt erkennen. Die Schmiedeschlacke entsteht in der Esse beim Schmieden von Luppen, Barren oder Eisengegenständen. Sie stellt ein Gemenge aus dem beim Schmieden entstehenden Zunder, der Asche der Holzkohle, aus dem Eisen gepresste Verhüttungsschlacke und aufgeschmolzener Ofenwand dar.

2. Schmiedetechnik

Die Härte des Eisens⁴³ wird vor allem durch den Kohlenstoffgehalt beeinflusst. Aus dem erwärmten Metall im Austenitzustand scheidet sich Kohlenstoff bei langsamem Kühlen als Zementit aus (Fe_3C mit 6,67 % C) und zwar in Gestalt feiner Lamellen, die mit Ferrit alternieren. Dieses Gefüge trägt die Bezeichnung Perlit.

Der Begriff Stahl bezieht sich in der heutigen festgesetzten Terminologie auf das gesamte technische Eisen. Bis in die zwanziger Jahre des 20. Jht. verstand man unter dem Wort Stahl härgbares Eisen mit mehr als 0,3- 0,35 % C. Die Kohlenstoffstähle — und nur solche kommen für die Ur- und Frühgeschichte in Frage — werden unterschiedlich unterteilt und klassifiziert.

Stahl ist weniger plastisch als Eisen und das Erwärmen darf in die niedrigere Temperaturzone von etwa 1100- 1270° C knapp über die AC_3 -Kurve geführt werden, sonst könnte man einen Teil des Kohlenstoffes verbrennen, dies würde zur Entkohlung des Materials führen.

Die Verarbeitungsart beeinflusst die Form und das Aussehen des Perlits. Höheres Erwärmen ohne Schmieden produziert grobe Perlitkörner und -lamellen, während einer beschleunigten Luftabkühlung bilden sich feinere Lamellen. Langsames Glühen unter der AC_3 -Kurve (600- 700° C) führt zur Sphäroidisierung von Zementitlamellen und zur Bildung globularen Perlits usw. Bei hohen Temperaturen und ungestörtem Luftzutritt wird der Kohlenstoff oxidiert und der Stahl entkohlt.

2. 1. Die Bearbeitung des kohlenstoffarmen Metalls

Unter kohlenstoffarmem Material versteht man Renneisen mit ferritischem Gefüge, oft mit Perlitspuren unter den Perlitkörnern. Der Kohlenstoffgehalt erreicht höchstens 0,2 - 0,3 %. Dieses Metall ist verhältnismäßig weich, durch Abschrecken praktisch nicht härtbar und die aus diesem Material hergestellten Schneiden sind wenig wirksam und werden rasch stumpf. Der Kohlenstoff, falls anwesend und feststellbar, pflegt regelmäßig, öfters aber unregelmäßig in der ferritischen Matrix verteilt zu sein, was einer heterogenen Aufkohlung unmittelbar im Rennofen zuzuschreiben ist. Die Mikrohärtigkeit des überwiegenden Ferrits beträgt je nach der chemischen Zusammensetzung und mechanischer Bearbeitung 150 - 200 mHV/ 30g. Die Metalleigenschaften entsprechen also denen des Schweißeisens⁴⁴. Die nichtmetallischen Einschlüsse (gewöhnlich Schlacke) sind im Gefüge deutlich sichtbar, sie spiegeln gut die Reinheit des Metalls wieder und ihre Lage verrät manchmal — wenn die mechanische Bearbeitung wenig intensiv war — den Verlauf der Schweißnähte. Das Eisen schmiedet man im erwärmten Zustand oberhalb der sogenannten AC_3 - Kurve, d. h. im Allgemeinen oberhalb der Temperaturen 850—950° C, bei denen sich das Material in der sog. γ - Phase befindet und die plastische Struktur des Austenits aufweist. Aus dem erwärmten Werkstück kann der Schmied dem Erzeugnis durch Schmiedeverfahren wie z. B. Strecken, Breiten, Stauchen

⁴³Pleiner, *Schmiedetechnik auf den keltischen Oppida* 99-108.

⁴⁴ Bei Schweiß Eisen handelt es sich nach heutigem Verständnis um ein Gemenge aus ziemlich reinem Eisen und Schlacken. Es ist sehr duktil und gegen Rost beständig. Des Weiteren lässt es sich ausgezeichnet schmieden und schweißen und wird deshalb hauptsächlich zu Kettengliedern verschmiedet und im Kunstschmiedehandwerk verwendet. In: Schumann, *Metallographie* 427, Bild 4.4.

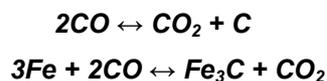
usw. die gewünschte Form verleihen. Je höher die Erwärmung, desto plastischer das Eisen. Es droht hier keine Kohlenstoffverbrennung, weshalb das Eisen auf höhere Temperaturen von ca. 1200—1300° C erwärmt werden kann. Dabei wird die Korngröße ungewünscht grob und das Stück muss wiederholt geschmiedet werden, bis die Temperatur wieder allmählich auf ca. 950° C sinkt. Dann wird das Ferritgefüge nach langsamer Abkühlung feinkörnig und zäh. Wird das Schmieden noch fortgesetzt, so entstehen in den Ferritkörnern parallele Neumannsche Linien. Das Kaltschmieden führt dann bis zur Deformation der Ferritkristallite und die Partie wird brüchig, aber auch härter.

2. 2. Homogenisieren

Diese Verfahren dient dazu, aus einem Metallstück mit heterogener Kohlenstoffverteilung durch wiederholtes Ausschmieden zu einem Stab, mehrmaliges Falten und anschließendes Feuerschweißen eine gleichmäßige Verteilung der verschiedenen Legierungselemente zu erreichen und dadurch eine gleichmäßige Verarbeitungs- und Gebrauchsqualität eines Werkstückes zu gewährleisten⁴⁵.

2. 3. Zementation

Mit Hilfe der Zementation ist es möglich, aus Eisen mit einem Kohlenstoffgehalt unter 0.1% einen Stahl mit höherem Kohlenstoffgehalt herzustellen. Die Aufkohlung besteht in der Sättigung kohlenstoffarmen Eisens in plastischer austenitischer Phase (γ -Eisen, oberhalb der AC_3 - Temperaturen 840—905° C) mit aktivem Kohlenstoff aus der Gasphase CO.



Aus den Gleichungen geht hervor, dass das Kohlenmonoxid das Eindiffundieren des Kohlenstoffes in das erwärmte Eisen ermöglicht, wobei sich eine äußerst harte Eisen-Kohlenstoff-Legierung Fe_3C (Eisenkarbid, Bestandteil des Perlitgefüges) bildet. Der Perlitanteil nimmt zu, die Oberfläche wird verstäht.

Dieser Vorgang ist langdauernd. Es gibt zwar Methoden, die den Prozess beschleunigen, z. B. die Anwendung von stickstoffhaltigen Zusätzen, wie etwa verkohlte Leder- oder Hornteile u. dgl., aber auch dann dauert die Zementation stundenlang, besonders bei massiveren Eisenteilen. Eine Oberflächenschicht von 1 mm Dicke wird bei einer Temperatur um 1000° C während mehr als vier Stunden aufgekohlt.

Bei der Aufkohlung von dünnen Blechen und Metallbändern verläuft der Prozess⁴⁶ etwas schneller. Trotz alledem gilt diese Technik als zeitraubend. Ihr Vorteil besteht darin, dass bei nicht allzu hohen

⁴⁵ Herdits, *Schweiß Eisen* 66, Abb. 12.

⁴⁶ Vgl. Herdits, *Schweiß Eisen* 66; Abb. 15, Abb. 16. Der Autor beschreibt, dass das Aufkohlen eines Schweiß Eisenbandes, welches aus zuvor durchgeführten Experimenten zur Eisenerzverhüttung stammt, zusammengerollt wird und anschließend in einem dicht verschlossenen, mit Holzkohlestaub gefüllten Tongefäß für etwa 2 Stunden bei ca. 800- 900°C im offenen Holzfeuer geglüht wird. Das Stück war nach der Behandlung an den Oberflächen aufgekohlt, im Inneren verblieb ein weicher

Temperaturen der gesättigte Kohlenstoffgehalt von der Oberfläche allmählich abnimmt, sodass eine auf diese Weise hergestellte Klinge gute Verhältnisse von Härte, Brüchigkeit und Zähigkeit des Materials aufweist.

Die Aufkohlung wird durch die chemische Zusammensetzung des Metalls beeinflusst. Mangan und Chrom sind vorteilhaft, dagegen verlangsamen Phosphor und Nickel die Kohlenstoffdiffusion und erfordern höhere Temperaturen.

Bei den in der Ur- und Frühgeschichte verwendeten Kohlenstoffstählen ist die Wirkung der erwähnten Elemente, Phosphor ausgenommen, äußerst gering. Falls gelegentliches Überhitzen des Eisens während der Aufkohlung zur Entwicklung des Grobgefüges führt, kann es durch Glühen bei etwa 650°C wieder beseitigt werden. Das Schmieden der aufgekohlten Stelle verringert den oberflächlichen Kohlenstoffgehalt.

Aus Eisen geschmiedete und danach zementierte Geräte weisen eine spezifische Anordnung des Kohlenstoffes auf, wobei der Gradient der Kohlenstoffkonzentration senkrecht zur Oberfläche des Objekts verläuft. Die Aufkohlung tritt deshalb an Stellen auf, die für die Funktion des Gegenstandes entscheidend sind (Gerätespitze oder Oberfläche, die der Abnutzung unterliegt)⁴⁷.

2. 4. Das Verschweißen aufgekohlter Eisenteile

Das Aufkohlen von dickeren Schichten nimmt viel Zeit in Anspruch und die Verstählung ergreift bloß die Oberfläche. Die Gefahr der Abschleifung droht nach einer kurzen Benutzung. Einige dieser Nachteile können durch Flächenaufkohlung und Zusammenschweißen von dünneren Eisenbändern beseitigt werden. Stahlstrukturen kommen dann auch in der Mitte der Schneide vor.

Unter den archäologischen Eisenfunden gibt es Klingen, deren geätzte Schliffe so ein kompliziertes Bild widerspiegeln. Die kohlenstoffreicheren Gefüge laufen in der Tiefe von einigen Millimetern oder bis in den Klingenrücken hineingreifend ein- oder mehrstreifig die Schliffachse entlang. Man beobachtet den allmählichen Übergang einer Seite dieser Zonen in die ferritisch - perlitische und ferritische Struktur, also ähnlich wie bei oberflächlicher Aufkohlung, die andere Seite pflegt von der kohlenstoffarmen Zone schärfer abgetrennt zu sein. Diese Grenze kann durch auffallende Ketten von Schlackeneinschlüssen deutlicher gemacht werden. In diesem Falle ist kaum eine andere Lösung anzunehmen, als das Verschweißen von den im Voraus aufgekohlten Elementen zu einem Ausgangsstück für das geplante Werkzeug.

Das oben erwähnte Verfahren war bereits ziemlich anspruchsvoll. Der heutigen Praxis gemäß werden die Eisenteile bei höheren Temperaturen von ungefähr 1200—1300°C geschweißt, denn

Kern. Der eindiffundierte Kohlenstoff verteilte sich nicht gleichmäßig, sondern wurde an den Gefügeschichtungen und Schlackeneinschlüssen verschiedenartig gebremst. Durch Verschweißen zweier solcher Bänder wurden Klingenrohlinge hergestellt. Der Anschliff entlang des Klingenrückens erweckte primär den Eindruck, als wären nicht zwei sondern insgesamt fünf Lagen – drei harte und zwei weiche- miteinander verschweißt worden.

⁴⁷ Piaskowski, *Untersuchungen an Eisengegenständen aus dem Gräberfeld von Környe* 118.

unter diesen Bedingungen wird das austenitische Metall genügend plastisch. Die Stähle, bei denen die Entkohlungsfahr unter höheren Temperaturen droht, schweißt man dagegen nur bei etwas niedrigeren Temperaturen, also kaum den kritischen Temperaturbereich überschreitend.

2. 5. Das Härten

Das technologische Verfahren, das durch rasches Abkühlen die Härte des erwärmten Kohlenstoffstahles bedeutend erhöht, wird Härten genannt. Die normale Perlitbildung dauert bei langsamem Abkühlen eine gewisse Zeit. Im Falle, dass dieses γ - Eisen äußerst schnell in kalten Mitteln abgekühlt wird, scheidet sich der Kohlenstoff in Form von Zementit nicht aus. Die Kohlenstoffatome bleiben in dem deformierten Kristallgitter und können nicht ausdiffundieren. Es entstehen winkelig angeordnete, linsenförmige Gebilde mit starken Innenspannungen. Im Anschliff sind Linsen als typische feinere oder gröbere Nadelchen zu beobachten, die den Namen Martensit tragen.

Der erwähnte Prozess tritt bei solchen Stählen ein, die genügend kohlenstoffreich sind. Beim raschen Abkühlen des etwas überhitzten Eisens mit sehr niedrigem Kohlenstoffgehalt scheidet sich Ferrit nicht nur am Rande der Austenitkörner, sondern auch im Korninneren aus. Daraus resultiert die nadelförmige Widmannstättenstruktur von etwas erhöhter Härte. Bei den Stählen von 0,2—0,3 % C entsteht bei gesteigerter Abkühlungsgeschwindigkeit der sogenannte Lattenmartensit, gleichfalls ein nadelförmiges Gebilde mit zwei- oder dreifacher Härteerhöhung, d. h. bis 400 mHV 30 g. Erst ab 0,3—0,35 % C sind die Kohlenstoffstähle wirklich härtbar, die Härte steigt bis um das Vierfache an (450—1000 mHV 30 g).

Wenn man den Stahl vor dem Ablöschen auf hohe Temperaturen über der AC_3 - Kurve des Eisen-Kohlenstoff Schaubildes erwärmt, bekommt man einen grobnadeligen, sehr spröden Martensit. Das Abschrecken von Temperaturen nur leicht über dem genannten Limit führt zur Entwicklung martensitischen Gefüges mit feinen Nadelchen und viel besseren Materialeigenschaften. Die Abkühlung von untereutektoiden Stählen mit weniger als 0,8% C von niedrigeren Temperaturen unter der AC_3 - Kurve hat ein gemischtes ferritisch- martensitisches Gefüge mit ungewünschter Sprödigkeit zur Folge. Der Martensit wird härter, je mehr Kohlenstoff im bearbeiteten Stahl enthalten ist. Falls der Stahl fließend bei richtig gewählten Temperaturen, aber nicht so schnell wie im Wasser abgekühlt wird (Kaltwasser oder Säure warmem oder kaltem Öl gegenübergestellt), kann ein Teil oder der gesamte Kohlenstoff in feiner ferritisch- zementitischer Phase, also als Übergangsgefüge, auftreten. So können z. B. neben Martensit dunkle Flecke überfeinen Perlits beobachtet werden. Bei noch milderem Härten bildet dieses Gefüge eine einzige Struktur.

Hält sich die sinkende Temperatur für eine gewisse Zeit in einem Bereich von etwa 600° C auf, entsteht ein anderes, als Bainit bezeichnetes Gefüge.

2. 6. Anlassen

Das beim Härten entstehende Martensitgefüge ist sehr spröde und damit einhergehend besteht die Gefahr des Bruches. Um diese Gefahr zu mindern, kann man das Werkstück „anlassen“, d. h. auf

Temperaturen zwischen 100°C – max. 723°C erwärmen. Dadurch wird durch Ausdiffundieren von Kohlenstoffatomen die hohe Verspannung des Martensits gemildert, die Sprödigkeit wird verringert ohne dass die Härte sich wesentlich verändert⁴⁸. Das harte martensitische Gefüge mit eingegliedertem Restaustenit ist metastabil, d. h. bei wiederholtem Erwärmen zerfallend. Dabei werden gleichzeitig die Innenspannungen weitgehend beseitigt. Bei einem mäßigen Erwärmen, etwa um 150° C, laufen bereits gewisse Änderungen im Kristallgitter ab. Der tetragonale Martensit wandelt sich in die grobnadelige Struktur des kubischen Martensits um, bei etwa 200° C zerfällt der Restaustenit und bei 300—600° C werden von neuem Übergangsgefüge mit Ferrit und Zementitdispersion gebildet. Die weniger angelassenen Stähle behalten die nadelige Anordnung auch nach dem Zerfall des Martensits, die mehr angelassenen zeichnen sich durch feiner oder gröber sphäroidisierten Zementit aus. Bei hohem Erwärmen auf rund 700° C entsteht schließlich wieder ein stabiles Perlitgefüge. Diesen Prozess begleiten wiederum sinkende Härte und Sprödigkeit. Durch das Erwärmen auf 200—300°C wird die Härte des Kohlenstoffstahles um etwa 10% verringert. Das Anlassen auf 400—600° C bedeutet schon 30—35% Verlust an Härte. In technologischer Praxis werden die so genannten Anlassfarben des erwärmten Metalls ausgenutzt: z. B. auf einem erwärmten Eisenerzeugnis beobachtet man je nach der Temperatur gelbliche, violette bis grünliche dünne Oxidschichten. Der Schmied ist imstande nach der Farbe die gewünschte Anlasstemperatur abzuschätzen⁴⁹. Generell gilt, je höher die Anlasstemperatur und oder je länger die Haltezeit, desto mehr nimmt die Härte des Martensits ab.

2. 7. Nitrieren

Ähnlich dem Zementieren erfolgt beim Nitrieren eine Diffusionssättigung der Randschichten mit Stickstoff um Härte, Verschleißwiderstand und Korrosionsbeständigkeit zu erhöhen. Die Oberfläche des Werkstückes muss vor dem Nitrieren von Zunder und anderen Oxiden gereinigt werden, da diese das Eindiffundieren verhindern können. Anschließend erhitzt man das Werkstück auf ca. 500- 600° C für 30 - 50 h. Durch die Sättigung der Randschichten des Metalls besitzt das Werkstück eine harte⁵⁰ Oberfläche, es muss keine Wärmebehandlung durchgeführt werden. Bei Nitrierung von Weicheisen oder unlegierten Stählen diffundiert der Stickstoff zwar in die Oberfläche ein, es kommt aber nicht zur Ausbildung einer Randschicht mit hoher Härte, da sich im Ferrit grobe Nitridnadeln bilden, die zu keiner genügend hohen Gitterverspannung führen. Die Härte in solchem Gefüge kann bis 160 HV betragen⁵¹.

⁴⁸ Dubbel *Taschenbuch für den Maschinenbau* E 34.

⁴⁹ Pleiner, *Schmiedetechnik auf den keltischen Oppida* 107-108.

⁵⁰ Schumann, *Metallographie* 538.

⁵¹ Schumann, *Metallographie* 539, Bild 4.248.

3. Exkurs: Metallographie

1. Methode

Für die metallographische Interpretation ist es wichtig, daß vor der archäologischen Auswertung das Objekt selbst durch metallographische Parameter charakterisiert und eingestuft wird. Diese von Radomir Pleiner⁵² angeführten Eigenschaften sind:

- *der innere Aufbau des Gegenstandes, darunter versteht man das Erkennen von verschiedenen Metallgefügen, Schweißnähten und nichtmetallischen Partikeln im untersuchten Objekt*
- *Verunreinigungen mit nichtmetallischen Einschlüssen in verschiedenen Zonen*
- *die Härte der einzelnen Metallagen*
- *die chemische Zusammensetzung des Materials*

Solche Angaben erlauben nicht nur, die Konstruktion, also die Herstellungsgeschichte des Stückes mit Wahrscheinlichkeit zu rekonstruieren, sondern auch die Veränderungen nach der Beendigung des Herstellungsvorganges zu erkennen, z. B. Spuren von Abnutzung, Abschleifen, sekundäres Glühen, Entkohlung der Stahlpartien oder Wiederinstandsetzungen.

Zur Unterscheidung zwischen Gegenständen, die aus unterschiedlichen Eisen- und Stahllagen zusammengeschweißt und aufgekohlt sind, und aus ungleichmäßig aufgekohlten Eisen geschmiedeten Objekten können die Proben mit einer Lösung nach Oberhoffer geätzt werden, wodurch man den unterschiedlichen Legierungsgehalt in verschiedenen Eisenlagen erkennen kann. Der Gehalt einer Beimischung wie z. B. Phosphor ist von der vorhandenen Menge in dem zur Verhüttung verwendeten Erz abhängig⁵³.

Von Bedeutung für die metallurgische Interpretation ist des weiteren, daß der unterschiedliche Phosphorgehalt in Eisen- und Stahllagen die Diffusion des Kohlenstoffes von einer kohlenstoffreichen zu einer kohlenstoffarmen Lage in größerem Maße verhindern kann und dadurch Grenzen zwischen einzelnen Lagen⁵⁴ deutlicher erkennbar sind⁵⁵.

⁵² Pleiner, Radomir; Zur Schmiedetechnik im römischen Bayern, Bayrische Vorgeschichtsblätter 35, München 1970. S. 113-142.

⁵³ Piaskowski, Jerzy; Metallkundliche Untersuchungen an Eisengegenständen aus dem Gräberfeld von Környe. In: Bona, I.; Dienes, I.; Gerevich, L.; e.a (Hg.), Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae 26, Budapest 1974. S.118.

⁵⁴ Pleiner, Radomir; Zur Schmiedetechnik des großmährischen Reiches. Acta Archaeologica Carpathica 12, Krakau 1971. S. 120.

⁵⁵ Der Diffusionskoeffizient des Phosphors im Eisen ist ca. hundertmal kleiner als der Diffusionskoeffizient für Kohlenstoff. Somit ist der Phosphor um ein vielfaches statischer, dies ermöglicht den Aufbau eines Objektes aus Metallagen, die aus verschiedenen Lagerstätten stammen, festzustellen.

Bei einer Temperatur von 1000°C beträgt der Diffusionskoeffizient für Phosphor $D_p = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{sek}$ während er für Kohlenstoff $D_c = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{Sek}$ beträgt. In: Piaskowski, Jerzy; Über die Kennzeichen der Zementation und des Schweißens an den frühmittelalterlichen eisernen Gegenständen (Diskussion mit R. Pleiner), Acta Archaeologica Carpathica 12, Krakau 1971. S. 156.

Zur Frage von Phosphoreinlagerungen und den daraus resultierenden Gefügebildern vgl. die verschiedenen Argumentationsweisen von Pleiner und Piaskowski In:

Pleiner, Radomir; Die Technologie des Schmiedes in der Großmährischen Kultur. Slovenska archaeologica 15/ 1, Bratislava 1967. S. 77-188.

Piaskowski, Jerzy; Technologie der Eisenherstellung im großmährischen Reich (Folgerungen aus den Forschungen R. Pleiner). Acta Archaeologica Carpathica 11, Krakau 1970. S. 111- 126.

Pleiner, Radomir; Zur Schmiedetechnik des großmährischen Reiches. Acta Archaeologica Carpathica 12, Krakau 1971. S. 107- 125.

Piaskowski, Jerzy; Über die Kennzeichen der Zementation und des Schweißens an den frühmittelalterlichen eisernen Gegenständen (Diskussion mit R. Pleiner). Acta Archaeologica Carpathica 12, Krakau 1971. S. 127- 159

3. 1. 1. Röntgentechnische Untersuchung

Die röntgentechnische Untersuchung dient als erster Schritt dazu festzustellen, ob und in welchem Ausmaß ein metallischer Kern bei einem Objekt vorhanden ist, da der äußere Zustand eines Fundstückes täuschen kann. Des Weiteren dient diese Methode dazu, Erkenntnisse über den Aufbau eines Objektes zu erhalten. So zeigt Herbert Westphal mittels röntgentechnischer Untersuchung die Möglichkeiten auf, zwischen Torsionsdamast als Furnier und Bahnen aus massivem Torsionsdamast zu unterscheiden⁵⁶.

Auch kann mittels Röntgenbild ein mehrteiliger Aufbau eines Objektes erkennbar und Besonderheiten im Aufbau sichtbar gemacht werden⁵⁷.

Ein Nachteil dieser Methode ist jedoch, daß i. a. nur zweidimensionale Aufnahmen gemacht werden können, so daß z. B. eine Unterscheidung zwischen funiertem Torsionsdamast und massivem Volldamast mit gleicher Torsionsrichtung nur sehr selten möglich ist, da beide Damastarten im Röntgen das gleiche Bild ergeben⁵⁸.

Eine mögliche Alternative hierzu stellt die Computertomographie dar, mit deren Hilfe dreidimensionale Bilder erzeugt werden können⁵⁹, jedoch ist diese Methode noch zu wenig ausgereift, als daß sie die Untersuchung mittels Röntgen ersetzen könnte.

Bei der Betrachtung eines Röntgenbildes ist darauf zu achten, ob das ganze Objekt durchziehende Linien zu erkennen sind, diese können einerseits auf eine Schweißnaht⁶⁰, andererseits aber auch auf während des Homogenisierungsprozesses schlecht miteinander verschweißte Eisenlagen⁶¹ hinweisen. Diese Schweißfehler sind dann, da sie zumeist mit Schlacke gefüllt sind, im Röntgenbild zu erkennen.

Es muß jedoch bei der Interpretation des Röntgenbildes auch immer der allgemeine Erhaltungszustand und die Lage der erkennbaren Linien bedacht werden, da dies ebenfalls zur richtigen Deutung beiträgt.

An Objekten, die gewissen historischen Wert haben, so dass keine Proben für eine metallographische Analyse entnommen werden dürfen, kann neben der Untersuchung mittels Röntgen die Magnetstreufungsprüfung⁶² durchgeführt werden. Bei dieser Untersuchungsmethode, die in der Industrie zur Oberflächenfehlerprüfung an ferromagnetischen Werkstoffen eingesetzt wird, wird das zu

⁵⁶ Westphal, Herbert; Untersuchungen an Saxklingen des sächsischen Stammesgebietes, Schmiedetechnik, Dekoration. Studien zur Sachsenforschung 7, 1991. S. 310, Textfig. 3.

⁵⁷ Westphal, Herbert; Besondere Schweißtechniken an 2 Saxklingen des 7. Jahrhunderts von Lembeck (Stadt Dorsten). Ausgrabungen und Funde in Westphalen- Lippe 2, 1984. S. 283.

⁵⁸ Westphal, Herbert; Untersuchungen an Saxklingen des sächsischen Stammesgebietes, Schmiedetechnik, Dekoration. Studien zur Sachsenforschung 7, 1991. S. 310, Textfig. 3.

⁵⁹ Einen Einblick in die Möglichkeiten der Computertomographie geben:

Beyer, Born, and Weber; Tomographiedaten von tauschierten Eisenfunden. Acta Praehistorica et Archaeologica 30, Berlin 1998. S. 256.

Vigneron, A.; Möglichkeiten der Typologisierung von damastzierten Schwertern mit Hilfe moderner computertomographischer Verfahren. In: Arbeitsgemeinschaft für Restauratoren, RGZM (Hg.) Arbeitsblätter für Restauratoren 32/ 2, 1999. S. 305.

Segebad, C.; Bemerkungen zum europäischen Damaszener Stahl. Arbeitsblätter für Restauratoren 1997. Heft 1, Gr. 19, S. 149-159.

⁶⁰ Gemeint ist hiermit die Berührungsfläche zweier unterschiedliche Eisen oder Stahlstäbe, die mittels Feuerschweißen miteinander verbunden sind.

⁶¹ Beschreibung eines Homogenisierungsprozesses bei: Herdits, Hannes; Technotypologische Betrachtungen und experimentalarchäologische Untersuchungen zu den frühmittelalterlichen Rennöfen von Unterpullendorf. In: Kaus, K. (Hg.), Burgenländische Heimatblätter 60/ 2, Eisenstadt 1998. S. 73- 76. Es wird beschrieben, daß nachdem die Lupe zu einem rechteckigen Quader geschmiedet wurde, diese in diesem Verarbeitungsstadium noch immer schwer schmiedbar ist, da durch grobe Inhomogenitäten in der Kohlenstoffverteilung bei einer Wärmebehandlung (härten, anlassen) immer wieder Risse entstanden. Ebenso führte das Aufplatzen grober Schlackeneinschlüsse zur Zerstörung der Werkstückoberfläche. Erst durch ein weiteres Schmieden der Lupe zu einem Flachstab (vgl. Herdits 1998 S. 74, Abb. 6) und Faltung zu einem Paket sowie der anschließenden Feuerschweißung konnte eine akzeptable Qualität des Schmiedeeisens erzielt werden.

⁶² Thoma, Christian; Zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden In: Pothmann, Alfred (Hg.) Das Zeremonialschwert der Essener Domschatzkammer. Quellen und Studien Veröffentlichungen des Instituts für kirchengeschichtliche Forschung des Bistums Essen 4, Münster 1995. S. 24- 25; S. 69, Abb. 27.

prüfende Werkstück durch Magnete, Spulen oder Stromdurchflutung möglichst gleichmäßig magnetisiert. Im Bereich von Materialtrennungen (z. B. schlecht ausgeführten Schweißnähten, Anm. d. Verfassers) kommt es zur Umlenkung der magnetischen Feldlinien⁶³, die an der Oberfläche austreten. Man kann diesen an der Oberfläche austretenden Streufluß durch magnetisierbares Pulver, das sind Eisenpulver oder Pulver aus Eisenoxiden, sichtbar machen. Das Pulver sammelt sich entlang eines Risses in Raupen an. Zur Erhöhung des Kontrastes benutzt man fluoreszierende Magnetpulver und betrachtet die Oberfläche im ultravioletten Licht.

3. 1. 2. Probenentnahme

Zu Beginn der Arbeit werden sämtliche Objekte, die untersucht werden sollen, geröntgt, um den Erhaltungszustand zu ermitteln⁶⁴ und einen ersten Einblick in den Aufbau des Objektes zu erhalten. Nach diesem ersten Untersuchungsschritt werden die Probenentnahmestellen festgelegt, die für den Aufbau eines Objektes repräsentativ sein sollen⁶⁵; wichtig ist, daß die Schliiffläche parallel oder orthogonal zur Richtung der technologischen Bearbeitung (plastische Verformung, Aufkohlung, Zusammenschweißen von Eisen und Stahl) gelegen ist⁶⁶.

Anschließend werden die Probenentnahmestellen, falls notwendig, mittels Sandstrahlgerät freigestrahlt, um einen Eindruck der Oberfläche, die aus dem Aufbau des Objekts resultiert⁶⁷, zu bekommen.

Die Entnahme der Proben⁶⁸ erfolgt mittels Kappsäge unter ständiger Wasserkühlung mit mehrmaligen Pausen, um die beim Schneiden entstehende Wärme sofort abzuführen und damit Veränderungen im Gefüge, etwa durch ungewolltes Anlassen zu vermeiden⁶⁹.

Die Größe und Lage der Proben werden jeweils so gewählt, daß der Materialzusammenhalt des Fundstückes gewährleistet ist.

Dies geschieht dadurch, daß das Fundstück nicht komplett durchtrennt wird, sondern jeweils nur bis knapp über die gedachte Mitte des Objekts geschnitten wird.

Dabei ist jedoch darauf zu achten, daß, wenn möglich, die Probenentnahmestellen nicht allzu weit auseinander liegen, sodass bei der späteren Auswertung noch ein Zusammenhang zwischen den zusammengehörenden, im metallographischen Anschliff sichtbaren, Stahl- und Eisenlagen hergestellt werden kann.

⁶³ Diese Untersuchung wurde an dem Zeremonialschwert der Essener Domschatzkammer durchgeführt, dadurch konnte der komplizierte Aufbau der Verzierung des Schwertes nachgewiesen werden. Westphal, Herbert; Die Untersuchung und Restaurierung des Essener Schwertes In: Pothmann, Alfred (Hg.), Das Zeremonialschwert der Essener Domschatzkammer, Quellen und Studien Veröffentlichungen des Instituts für kirchengeschichtliche Forschung des Bistums Essen 4, Münster 1995. S. 33-77.

⁶⁴ Objekte, die oberflächlich noch intakt wirken, können bereits völlig durchkorrodiert sein und keine metallischen Bereiche mehr enthalten. Dadurch können keine metallographischen Aussagen bezüglich des Aufbaues gemacht werden.

⁶⁵ Die Auswahl der Probenentnahmestellen erfolgte nach den Regeln der modernen Metallographie; beispielgebend hierzu: Schumann, Hermann; Metallographie, 13. Auflage, Stuttgart 1990, S. 77- 80;

Scott Davis; Metallography, Singapore 1991; Scott B. G.; Early Irish Ironworking, Belfast 1990.

⁶⁶ Piaskowski, J.; Metallkundliche Untersuchungen an Eisengegenständen aus dem Gräberfeld von Környe. In: Bona, I.; Dienes, I.; Gerevich, L.; e.a (Hg.), Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae 26, Budapest 1974. S. 118.

⁶⁷ so wird kohlenstoffhaltiger Stahl und Eisen von der Korrosion verschieden angegriffen; dadurch kann nach Entfernung der Korrosion der mehrlagige Aufbau einer Klinge erkennbar sein In: Westphal, Herbert; Besondere Schweißtechniken an 2 Saxklingen des 7. Jahrhunderts von Lembeck (Stadt Dorsten). Ausgrabungen und Funde in Westphalen- Lippe 2, 1984. S. 283.

⁶⁸ Die Probeentnahme wurde durch

⁶⁹ Dieser Arbeitsschritt dient dazu, um mit Sicherheit gewährleisten zu können, daß sich der Zustand des Gefüges nicht verändert, obwohl Gefügeveränderungen bei den durch die Wasserkühlung sehr niedrigen Temperaturen wohl erst nach Stunden eintreten würden.

Dies soll einerseits durch die bereits während der Probenentnahme durchgeführten Dokumentation und andererseits durch im Anschliff erkennbare Charakteristika gewährleistet werden.

3. 1. 3. Schliffherstellung

Als nächster Schritt werden die Proben in Epoxidharzgießlinge⁷⁰ eingebettet und mittels Schleifpapier der Körnung 180, 600, 1200 geschliffen. Die Feinpolitur erfolgt mit 3 µm Diamantsuspension⁷¹, 1µm Diamantsuspension und 0,3 µm Tonerde.

Beim Schleifen ist es wichtig, eine entsprechende ideale Abstimmung der Körnungen zueinander zu finden, da zu viele Zwischenschritte beim Schleifen und Polieren⁷² zur Reliefbildung am Schliff beitragen; durch die damit einhergehende Bombierung des Schliffes ist eine photographische Aufnahme des Schliffes bei hohen Vergrößerungen (500- 1000 fach) nicht mehr möglich, da das Mikroskop bei diesen Vergrößerungen nur eine sehr geringe Tiefenschärfe hat⁷³.

3. 1. 4. Ätzung

Die Entwicklung des Primärgefüges erfolgt mit einer Lösung nach Oberhoffer⁷⁴, des Sekundärgefüges mit alkoholischer Salpetersäure (Nital) im Tauchätzverfahren. Die Schliffe wurden mit Methylalkohol gespült. Die Ätzung der Schliffe sowohl mit Nital wie auch nach Oberhoffer erfordert einerseits ein gutes Fingerspitzengefühl⁷⁵ bei der Handhabung andererseits ist es für eine perfekte Ätzung auch wichtig, möglichst viel Vorinformationen⁷⁶ in die Wahl des Ätzmittels einfließen zu lassen.

So können z. B. diverse Pestizide, wie sie in der modernen Landwirtschaft verwendet werden, das Verhalten des Metalls beim Ätzen negativ beeinflussen.

⁷⁰ Zwei Komponenten- Harz, Aushärtung innerhalb von 24 h ohne Hitze und Druckentwicklung

⁷¹ Dabei handelt es sich um monokristalline auf Wasserbasis gemischte Suspensionen

⁷² Zur Herstellung von metallographischen Anschliffen. Vgl.: Schumann, Hermann; Metallographie, 13. Auflage, Stuttgart 1990 S. 80-94.

⁷³ So beträgt die Schärfentiefe bei 1000facher Vergrößerung lediglich 0,01 µm. Bargel, Hans Jürgen; Schulze, Günter Werkstoffkunde, 7. Auflage, Berlin 2000, S. 131.

⁷⁴ Zur Zusammensetzung der verschiedenen Ätzmittel. vgl.: Schrader, Angelica; Ätzheft zur Schliffherstellung und Gefügeentwicklung für die Metallographie, 4. Auflage, Berlin 1957, S. 14.

Schrader, Angelica; Rose, A.; Gefüge der Stähle. De Ferri Metallographia II/ Neuaufgabe, Düsseldorf 1989.

⁷⁵ Die Dauer der Ätzung mit Nital kann manchmal nur 1-2 Sekunden betragen, ein längeres Verbleiben des Schliffes in der Flüssigkeit würde zur Überätzung führen. Dadurch könnten keine Aussagen mehr über das Gefüge gemacht werden.

⁷⁶ Gerwin, Werner; Die Korrosion archäologischer Eisenfunde im Boden – Zusammenhänge mit Bodeneigenschaften. Arbeitsblätter für Restauratoren 1/ 99 Gruppe 19, 32. Jahrgang. S.173- 182.

Ebenfalls in Betracht zu ziehen sind diverse Konservierungsmittel und ihre Kompatibilität mit Polier- und Ätzmitteln.

3. 1. 5. Auswertungsverfahren

Die technotypologische Auswertung bedient sich der Methoden der klassischen Metallographie und Erzmikroskopie, erweitert durch die Beschreibung typischer Merkmale der Verarbeitung archäologischer Metalle, wie sie in der modernen Materialkunde nicht vorkommen.

Die Korngrößen wurden nach DIN 50601, die Schlacken nach DIN 50 602 bestimmt.

Die Proben wurden an einem Auflichtmikroskops der Firma Leitz, einem Leitz Metallux 3 (50-, 100-, 200-, 500- und 1000- fache Vergrößerung) im ungeätzten und geätzten Zustand beurteilt und mittels digitalem Bildbearbeitungsprogramm Analysis 3.0 ausgewertet. Der Tafelteil wurde mittels Corel Photo Paint 8.0⁷⁷ und Corel Draw 8.0 erstellt.

3. 1. 5. 1. Gefügeanalyse

Definition der Begriffe:

Ein Korn⁷⁸ ist ein einzelner räumlich ausgedehnter Kristallit innerhalb eines metallischen Werkstoffes mit einheitlich ausgerichtetem Gitter⁷⁹. Körner mit Zwillingsstreifen, Unterstrukturen (Kleinwinkelkorngrenzen), Ausscheidungen oder Einschlüssen werden zum einheitlich ausgerichteten Korn zugehörig betrachtet. Ein Korn besteht aus den Phasen Austenit oder Ferrit. In Stählen mit einer $\gamma - \alpha$ Umwandlung kann die vor der Umwandlung vorhandenen Korngröße des Austenits nur indirekt ermittelt werden.

Beim Perlit wird ein Bereich gleicher Lamellenausrichtung als Kolonie bezeichnet. Eine solche Kolonie kann als ein Korn betrachtet werden, wenn nichts anderes vereinbart wurde.

In der Schnittebene des geätzten metallographischen Schliffes erscheinen die einzelnen Körner als Flächen, die sich durch ausgeprägte Korngrenzen gegen die anders gerichteten Nachbarkörner abheben.

In einem Eisen- und Stahlwerkstoff sind Gestalt und Volumen der Körner nie gleich. Selbst bei Gleichheit erscheint in der Schnittebene ein Gemenge verschieden großer Schnittflächen, weil z. B. bei kugelförmiger Form nur einzelne Körner mittig, andere an anderer Stelle, geschnitten werden.

3. 1. 5. 2. Korngrößenmessung

Korngröße:

Die Korngröße ist ein Kennwert für die Schnittfläche der in der metallographischen Schliffebene geschnittenen Körner. Die Korngröße wird beeinflusst durch Umformungs- und Wärmebehandlungsprozesse. Zur Kennzeichnung ihrer Größe können sie mit einer Serie von

⁷⁷ Die Anschliffe und Überblicksaufnahmen wurden von Marianne Mödinger, Karolin Kastowsy und Mathias Mehofer erstellt, die Tafeln wurden von Mathias Mehofer erstellt.

⁷⁸ Die Definitionen wurden aus DIN 50 601 (ISO 643 – 1983) Metallographische Prüfverfahren Ermittlung der Ferrit- oder Austenitkorngröße von Stahl und Eisenwerkstoffen In: DIN Deutsches Institut für Normung (Hg.) DIN Taschenbuch 218 Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe 2. Auflage Berlin- Köln 1989 entnommen

⁷⁹ Der Verfasser möchte darauf hinweisen, daß diese Definitionen für Eisen und Stahlwerkstoffen gelten, die mittels indirektem Reduktionsverfahren erzeugt wurden, während die hier untersuchten Stählen mittels direktem Erz – Reduktionsverfahren hergestellt wurden; dadurch können einige Definitionen nur eingeschränkt übernommen werden.

Vergleichsbildern verglichen werden oder es wird ihr mittlerer Durchmesser, z. B. nach dem Linienschnitt-Verfahren innerhalb einer Meßstrecke ermittelt.

Verfahrensarten

Für die Ermittlung der Korngröße können die folgenden vier Verfahren⁸⁰ angewandt werden:

Verfahren 1

Bestimmung der Korngrößen-Kennzahl G durch Vergleich mit den Gefügebildern der Bildreihentafel.

Verfahren 2

Bestimmung der Korngröße als mittleres Linienschnittsegment L nach einem Linienschnitt-Verfahren.

Verfahren 3

Angabe der von einer Meßstrecke geschnittenen Anzahl von Körnern nach Snyder und Graff⁸¹.

Verfahren 4

Zählung der Körner in einem Kreis und Angabe der sich aus der mittleren Kornfläche ergebenden Korngrößen-Kennzahl C.

Durchführung

Verfahren 1

Vergleich mit der Bildreihentafel

Es müssen mindestens 20 Blickfelder regelloser Anordnung oder einer in einem Rasternetz liegenden Anordnung der Auswertung zugrunde liegen.

Man vergleicht das Gefüge im Okular, auf der Mattscheibe oder auf einer photographischen Aufnahme mit den Gefügebildern der Bildreihentafel nach Bild 1.

Diese Gefügebilder im Abbildungsmaßstab 100 :1 sind mit(römisch) I bis VIII so nummeriert, daß ihre Nummer gleich der Korngrößen-Kennzahl G (arabisch) 1 bis 8 ist.

Man bestimmt dasjenige Bild der Reihe, dessen Korngröße derjenigen des jeweiligen Blickfeldes am nächsten kommt. Bei Korngrößen größer als Kennziffer 8 muss bei einer Vergrößerung größer als 100: 1 gemessen werden. Es ist darauf zu achten, daß in dem jeweiligen Blickfeld der mittlere Korndurchmesser nicht kleiner erscheint als im Bild VIII dargestellt.

Bei der Bestimmung der Korngrößen-Kennzahl durch Vergleich mit Bildreihen erreicht man selten eine Genauigkeit, die besser ist als ein ganzer Zahlenschritt der Kennzahlenreihe. Die Korngrößen-Kennzahl wird daher als eine ganze Zahl angegeben. Im einzelnen Blickfeld bleiben bis max. 30% Flächenanteil einer vom Mittelwert des Vergleichsbildes abweichenden Korngröße unberücksichtigt.

Wenn jedoch bei mehr als 15 % aller auszuwertenden Blickfelder Anteile mit abweichenden Korngrößen-Kennzahlen vorkommen, werden diese ebenfalls vermerkt. In einem solchen Fall ist die Mindestzahl der auszuwertenden Blickfelder (20) mindestens zu verdoppeln. Mit dieser Grenzregelung

⁸⁰ Bei der Anwendung dieser Verfahren muß man bedenken, daß sie für Stähle entwickelt wurden, die mittels modernen Verhüttungsprozessen gewonnen wurden, d. h. die sich im allgemeinen noch im Ausgangszustand befinden; bei den untersuchten Stählen handelt es sich jedoch einerseits um direkt erzeugtes Eisen und Stahl, das, bis es seinen Endzustand erreicht hat, bereits viele Umformungsvorgänge hinter sich hat.

So kann nach der Entnahme der Luppe aus dem Rennofen unterschiedlich homogenisiert werden. Nur um zwei Möglichkeiten zu nennen: als erste Möglichkeit direktes Dichtschmieden nach der Entnahme aus dem Verhüttungssofen. Als zweite Möglichkeit: die Entnahme aus dem Verhüttungssofen, anschließendes Ausheizen, während dieses Vorganges wird die Luppe im Ausgangszustand nochmals auf ca. 1000°C erhitzt, sodaß die bei dieser Temperatur flüssige Schlacke abfließen kann und anschließendes Dichtschmieden.

Durch diese beiden Verfahren kann der Schlackengehalt und damit die Qualität des Materials beeinflusst werden.

Auch der endgültige Verwendungszweck kann entscheidenden Einfluß auf die Qualität des Werkstückes haben, Ein weiterer ausschlaggebender Faktor ist das Können des Schmiedes und seine Kenntnis über das Materialverhalten bei gewissen Temperaturen.

⁸¹ Die Verfahren 2, 3 und 4 werden der Vollständigkeit halber genannt, sie fanden jedoch bei der vorliegenden Untersuchung keine Anwendung. Eine vollständige Beschreibung befindet sich im Anhang vgl. DIN 50601

für die Vernachlässigung einzeln auftretender Flecken mit abweichenden Korngrößen kann deren Flächeninhalt maximal etwa 5% der gesamten ausgewerteten Fläche erreichen (im Maximalfall $0,3 \times 0,15 = 0,045$ oder 4.5% Flächenanteil)⁸².

3. 1. 5. 3. Härtemessung

Die Härteprüfverfahren, die in der Metallographie angewandt werden, können als Eindringverfahren bezeichnet werden, bei denen der Eindringwiderstand definierter Körper (Kugel, Pyramide, Kegel) in eine Werkstoffoberfläche bestimmt wird. Je nach Prüfverfahren wird der Eindringwiderstand entweder als Verhältnis der Prüfkraft zur Oberfläche des Eindrucks (Brinellhärte, Vickershärte) oder als bleibende Eindringtiefe eines Eindringkörpers bestimmt (Rockwellhärte)⁸³.

Die Härtemessungen wurden an einem Vickers- Kleinkrafthärteprüfer durchgeführt. Als Vergleichsproben dienten Originale und experimentelle Stücke aus der Vergleichssammlung des Vienna Institute for Archaeological Science der Universität Wien.

⁸² Nach dem Linienschnittverfahren würde der Anteil von $\leq 5\%$ das Ergebnis kaum beeinflussen.

⁸³ Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau. 17. Auflage. In: Beitz, Wolfgang; Küttner, Karl- Heinz (Hg.); Berlin 1990, Kapitel E 23. Bei der Härtemessung nach Vickers wird die Härte aus dem Quotienten von Prüfkraft und Oberfläche des bleibenden Pyramideneindrucks errechnet.

3. Begriffsdefinition

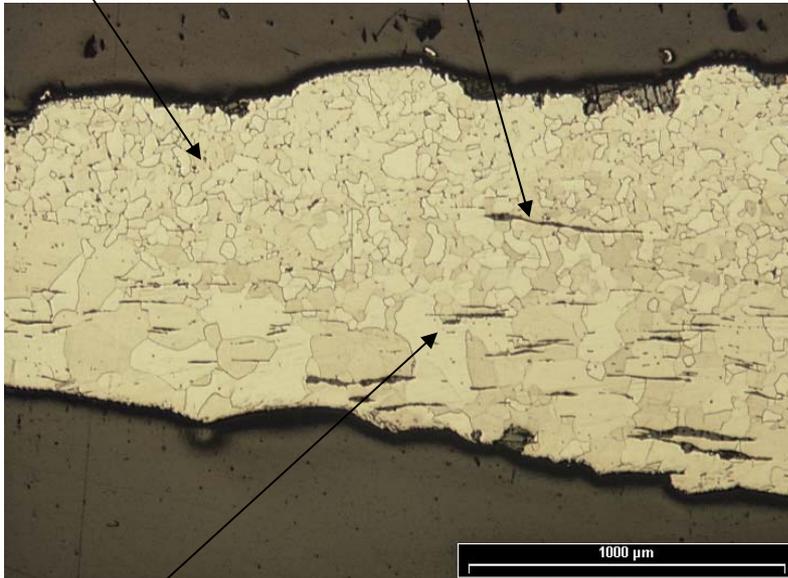
3. 1. Metallographie

Ferrit

Eisen mit einem Kohlenstoffgehalt von max. 0.02 %, α - Eisen (von lat. Ferrum = Eisen).

feinkörniger Ferrit

Schlackenzeile



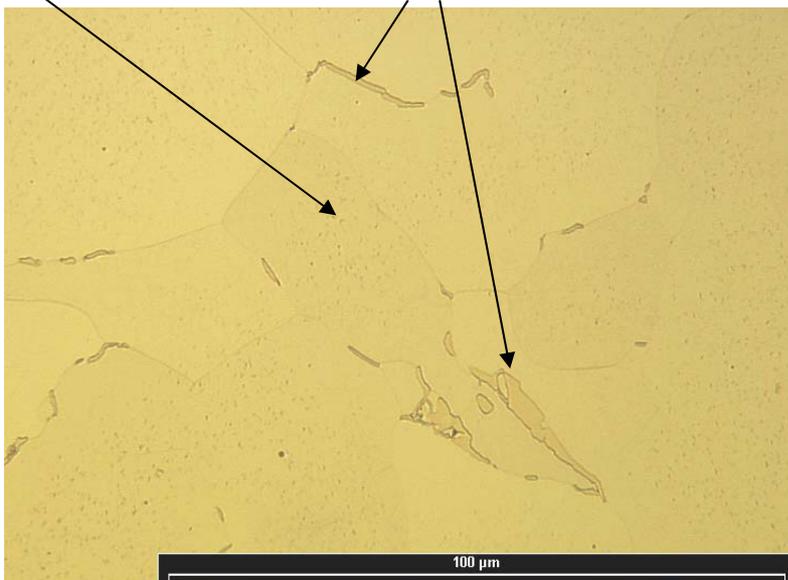
grobkörniger Ferrit

Zementit

Das Eisencarbid Fe_3C enthält 6,67 % Kohlenstoff und wird als Zementit bezeichnet. Der Zementit ist außerordentlich hart (HV= 800) und weist eine geringere Dichte als Eisen auf.

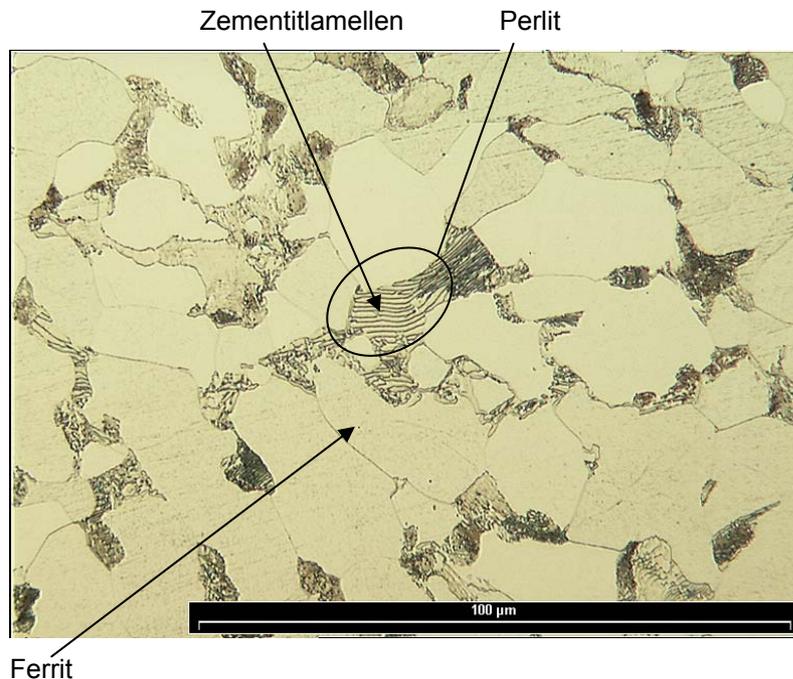
Ferrit

Korngrenzenzementit



Perlit

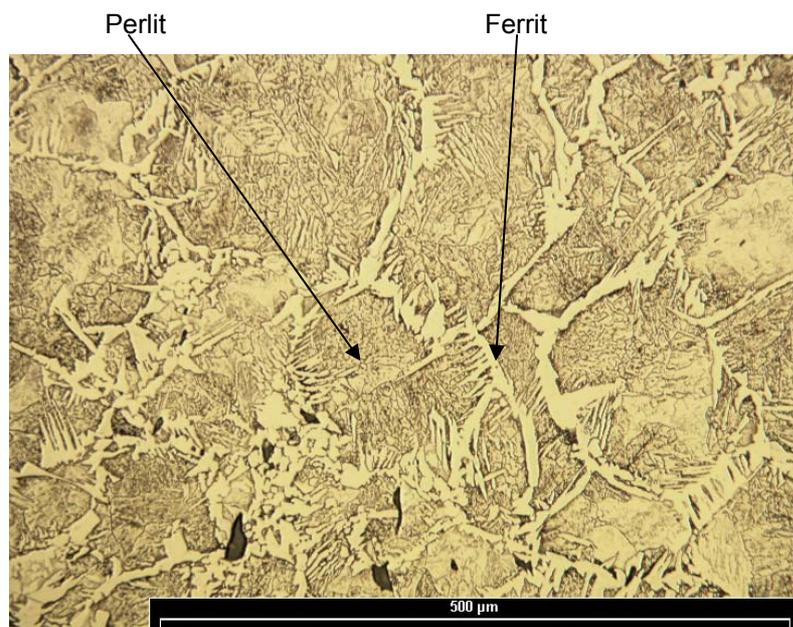
Die von H. C. Sorby (englischer Naturforscher 1826- 1908) eingeführte Bezeichnung Perlit definiert eine lamellare Anordnung von Ferrit und Zementit. Perlit soll an die Streifen der Schale einer Perlmuschel erinnern. Im Perlit sind die beiden Phasen α - Eisens (Ferrit) und Fe_3C (Eisencarbid) in Platten miteinander verwachsen.



Widmannstätten Gefüge

Nach A. Beck von Widmannstätten: Österreich. Naturforscher 1753- 1849.

Kennzeichnend für Ferrit in Widmannstätterscher Anordnung ist perlitisches Gefüge mit Ferrit in fischgrätähnlichen Ausbildungen an einer Austenitkorngrenze sowie die Winkel von 60- 120 Grad zwischen den einzelnen Ferritkörnern, die Nadel- bis Plattenform haben können.



Austenit

Ausgangszustand ist Ferrit, der lediglich einige 1/100 % Kohlenstoff lösen kann und Zementit mit einem Massengehalt von ca. 6,67% C. Der im Eisen enthaltene Zementit geht bei Temperaturen ab 723°C in Lösung und diffundiert in den Austenitkristall ein.

Durch das Austenitisieren wird ein austenitischer Mischkristall angestrebt, aus dem während der anschließenden Abkühlung die gewünschten Gefüge entstehen sollen. Der Temperaturbereich in dem ein austenitischer Mischkristall gebildet wird, ist für jeden Stahl aufgrund seines spezifischen Kohlenstoffgehaltes verschieden. Für einen Stahl mit 0.8 % Kohlenstoff liegt dieser Temperaturbereich zwischen 723°C und 1392°C.

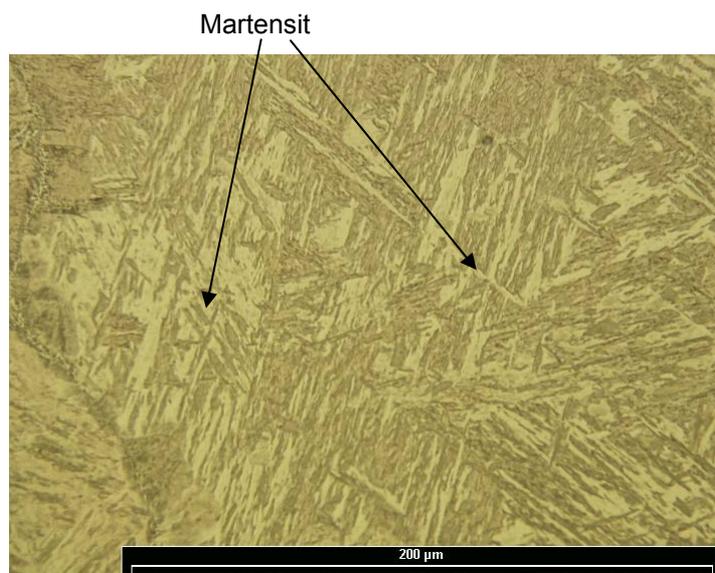
Martensit

Nach A. v. Martens deutscher Werkstoffkundler 1850- 1914.

Während der schnellen Abkühlung eines austenitischen Mischkristalls⁸⁴, z. B. von 1000°C auf Raumtemperatur entsteht Martensit. Das Gefüge ist ein α - Eisen das im Gegensatz zum Ferrit oder Perlit ohne Diffusion des Kohlenstoffs aus dem Austenit entsteht.

Bei der Umwandlung verschieben sich die Atome relativ zueinander um ein wenig mehr als den Gitterabstand. Der gesamte Kohlenstoff bleibt in Lösung. In kohlenstoffarmen Stählen besteht der Martensit als Lanzettmartensit, mit zunehmendem Kohlenstoffgehalt beginnt sich Plattenmartensit auszubilden. Die Endhärte des martensitischen Gefüges ist nur abhängig vom Kohlenstoffgehalt des martensitischen Mischkristalls und damit des Austenites aus dem er entsteht.

Die hohe Härte des Martensits beruht auf der, gegenüber dem γ - Gitter (austenitische Phase) geringen Lösungsfähigkeit des α - Gitters des Eisens für Kohlenstoffatome. Die bei Härtetemperatur gelösten C- Atome können bei schneller Abkühlung nicht aus dem sich umwandelnden γ - Mischkristall ausdiffundieren und führen, da sie zwangsgelöst bleiben, zu einer Verspannung des entstehenden Mischkristalls, die sich in hoher Härte äußert⁸⁵.



⁸⁴ Die Definitionen von Perlit, Bainit und Widmannstättengefüge wurden entnommen:

Hougardy, Hans Paul; Umwandlung und Gefüge unlegierter Stähle, 2. neubearbeitete Auflage, Düsseldorf S. 65.

Die Definitionen von Ferrit, Zementit und Martensit wurden aus Schumann, Hermann; Metallographie, 13. Auflage, Stuttgart 1990. S. 426, 326, 489 entnommen.

⁸⁵Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, 17. Auflage. In: Beitz, Wolfgang; Küttner, Karl- Heinz (Hg.), Berlin 1990 E 32.

Bainit

Bei einer Umwandlung (Abkühlung) im mittleren Temperaturbereich entsteht das Gefüge Bainit (nach E. C. Bain, amerikanischer Werkstoffkundler der dieses, auch Zwischenstufengefüge genannte Gefüge als erster erkannte). Bei seiner Bildung diffundiert zwar noch Kohlenstoff, die Eisenatome sowie die Atome der Legierungselemente jedoch nicht mehr. Die Umwandlung läuft teilweise diffusionslos ab. Bei hohen Temperaturen gebildeter Bainit ähnelt eher dem Perlit, bei niedrigen – Temperaturen eher dem Martensit. Bainit entsteht sowohl durch diffusionsgesteuerte Prozesse als auch durch diffusionslose Vorgänge einer Umwandlung durch Umklappen des Gitters des γ - Eisens in das des α - Eisens.

Primärgefüge

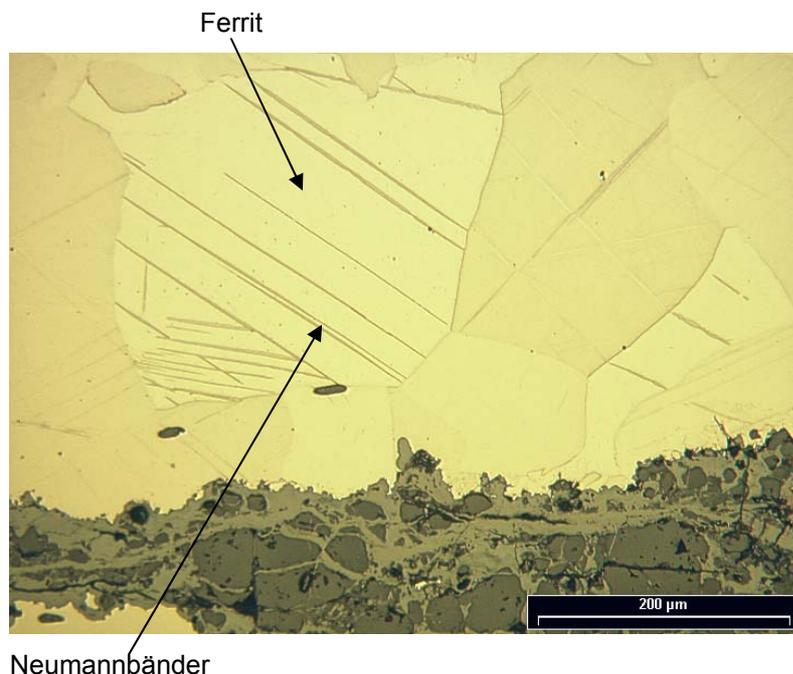
Das Primärgefüge ist gekennzeichnet durch die Phosphorseigerung und ist entwickelbar durch das Ätzmittel nach Oberhoffer⁸⁶.

Sekundärgefüge

Das Sekundärgefüge besteht aus Ferrit, Perlit, Zementit⁸⁷.

Neumannsche Bänder

Sie entstehen in schlagartig bei niederen Temperaturen umgeformtem α - Eisen. Es handelt sich dabei um Zwillingslamellen. Unter der Wirkung von Schubspannungen klappt ein Kristallteil längs einer Zwillingsebene spiegelsymmetrisch zu dem restlichen Kristall um. Dieser umgeklappte Kristallteil wird dann als Zwilling oder Zwillingslamelle bezeichnet.⁸⁸



⁸⁶ Schumann, Hermann; Metallographie, 13. Auflage, Stuttgart 1990, S. 454

⁸⁷ Schumann, Hermann; Metallographie, 13. Auflage, Stuttgart 1990, S. 454

⁸⁸ Schumann, Hermann; Metallographie, 13. Auflage, Stuttgart 1990, S. 390

10. Literatur

Pleiner, *Archaeometallurgy of Iron International Symposium of the Comité pour la sidérurgie del UISPP*

Pleiner, Radomir (Hg.), *Archaeometallurgy of Iron International Symposium of the Comité pour la sidérurgie del UISPP*, Libice 5.- 9. Oktober 1987. Prague 1989.

Balint, *Eperjes*

Balint, Csanád, *Die spätawarenzeitliche Siedlung von Eperjes (Kom. Csongrád)*. Varia Archaeologica Hungarica 4, Budapest 1991.

Bardos, *A zamárdi avar temető leleteinek restaurálási eredményei*

Bardos, Edith, *A zamárdi avar temető leleteinek restaurálási eredményei*. Somogy Megyei Múzeumok Igazgatósága. Múzeumi Tájékoztató 1, 1996, 33 - 35.

Bargel, Schulze, *Werkstoffkunde*

Bargel, Hans Jürgen - Schulze, Günther, *Werkstoffkunde*. 7. Auflage, Berlin 2000.

Bielenin, *Eingetieft Rennöfen der frühgeschichtlichen Eisenverhüttung*

Bielenin, Kazimierz, *Eingetieft Rennöfen der frühgeschichtlichen Eisenverhüttung in Europa*. In: Mitscha - Märheim, Herbert - Friesinger, Herwig - Kerchler, Helga (Hg.), *Festschrift für Richard Pittioni, Industriearchäologie und Metalltechnologie, Römerzeit, Frühgeschichte und Mittelalter II*, Archaeologica Austriaca Beih. 14, Wien 1976, 13 - 27.

Bielenin, *Einige Bemerkungen zu den Rennofenschlacken*

Bielenin, Kazimierz, *Einige Bemerkungen zu den Rennofenschlacken der Schlackengrubenöfen*. Archaeologica Austriaca, Wien 1998-1999, 523 - 528.

Bielenin, *Erkundung archäologischer Objekte*

Bielenin, Kazimierz, *Erkundung archäologischer Objekte mit modernen technischen und naturwissenschaftlichen Methoden*. Bodendenkmalpflege, Berlin 1983, 79 - 97.

Bielenin, *Frühgeschichtliches Eisenhüttenwesen*

Bielenin, Kazimierz, *Frühgeschichtliches Eisenhüttenwesen im Heiligkreuzgebirge*. Materialy archeologiczne XXVI, Krakow 1991, 7 - 15.

Bielenin, *Geordnete Rennofenschlackenfundstellen in Mitteleuropa*

Bielenin, Kazimierz, *Geordnete Rennofenschlackenfundstellen in Mitteleuropa und Nordeuropa ausserhalb des römischen Limes*. In: Mel. C. Domergue (Hg.), *Pallas* 50, 1999, 297 - 312.

Bielenin, *Der Rennfeuerofen mit eingetieftem Herd*

Bielenin, Kazimierz, *Der Rennfeuerofen mit eingetieftem Herd und seine Formen in Polen*. Offa 40, 1983, 47 - 61.

Bielenin, *Rennofen vom Typ Burgenland*

Bielenin, Kazimierz, *Der Rennofen vom Typ Burgenland in der frühgeschichtlichen Eisenverhüttung in Mitteleuropa*. In: Mangin, Michael. La sidérurgie ancienne de l'est de la France dans son contexte européen. Annales littéraires de l'Université de Besançon 36; Paris 1994, 255 – 267.

Bielenin, *Übersicht der Typen von altertümlichen Rennöfen*

Bielenin, Kazimierz, *Übersicht der Typen von altertümlichen Rennöfen auf dem Gebiet Polens*. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland 59, Eisenstadt 1977, 127 - 146.

Bona, *Dunaújváros*.

Bóna, István, *VII. Századi Avar Települések és Árpád - kori magyar Falu Dunaújváros*. Fontes Archaeologici Hungariae, Budapest 1973.

Brathel, Hunger, *Rasterelektronenmikroskopie und Elektronenstrahlmikrosonde*

Brathel, Jochen - Hunger, Hans-Jörg, *Rasterelektronenmikroskopie und Elektronenstrahlmikrosonde*. In: Hunger, Hans-Jörg, Werkstoffanalytische Verfahren - eine Auswahl. Leipzig 1995, 281 - 314.

Caspart, *Das awarische Gräberfeld von Zillingtal im Burgenlande*

Caspart, Julius, *Das awarische Gräberfeld von Zillingtal im Burgenlande*. Mitteilungen der Anthropologischen Gesellschaft 65, Wien 1935, 1 – 38.

Crew, *Experimental production of prehistoric bar iron*

Crew, Peter, *The experimental production of prehistoric bar iron*. The Journal of the Historical Metallurgy Society 25/1, 21- 36.

Crew, Salter, *Comparative Data*

Crew, Peter - Salter, Chris, *Comparative Data from iron smelting and smithing experiments*. In: Radwanski, Kazimierz, From bloom to knife - International Archaeometallurgical Symposium, Materiały archeologiczne XXVI, Kraków 1991, 15 - 22.

Daim, Distelberger, *Gräberfeld und Siedlung Zillingtal FÖ 33*

Daim, Falko - Distelberger, Anton, *Gräberfeld und Siedlung Zillingtal*. In: BDA (Hg.), FÖ 33, Wien 1994, 615.

Daim, *Gräberfeld Zillingtal FÖ 30*

Daim, Falko, *Gräberfeld Zillingtal*. In: BDA (Hg.), FÖ 30, Wien 1991, 321.

Daim, *Gräberfeld Zillingtal FÖ 24/25*

Daim, Falko, *Gräberfeld Zillingtal*. In: BDA (Hg.), FÖ 24/25, Wien 1985/86, 321.

Daim, *Sechs Gräber mit "westlichen" Gegenständen*

Daim, Falko, *Das awarische Gräberfeld von Zillingtal. Sechs Gräber mit "westlichen" Gegenständen*. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland 100, 1998, 102.

Distelberger, *Awarinnen*

Distelberger, Anton, *Awarinnen: Frauen aus Gräbern des 7. - 8. Jh. n. Chr. in Österreich*. Ethnographisch Archäologische Zeitschrift 43, 2002, 47 - 59.

Dörfler, Wiethold, *Holzkohlen aus den Herdgruben von Rennöfen und Siedlungsbefunden*

Dörfler, Walter - Wiethold, Julian, *Holzkohlen aus den Herdgruben von Rennöfen und Siedlungsbefunden des spätkaiserzeitlichen Eisengewinnungs- und Siedlungsplatzes am Kammerberg bei Joldelund, Kr. Nordfriesland*. In: Haffner, Alfred - Jöns, Hauke - Reichstein, Joachim (Hg.), *Frühe Eisengewinnung in Joldelund, Kr. Nordfriesland. Ein Beitrag zur Siedlungs- und Technikgeschichte Schleswig - Holsteins Teil 2: Naturwissenschaftliche Untersuchungen zur Metallurgie- und Vegetationsgeschichte. Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie* 59, Bonn 2000, 217 -262.

Ebner, *Geologische Einheiten Österreichs und ihre Rohstoffe*

Ebner, Fritz, *Die geologischen Einheiten Österreichs und ihre Rohstoffe - Eisenstädter (Mattersburger) Becken*. In: Weber, Leopold, *Archiv für Lagerstättenforschung* 19, Wien 1997, 49 - 229.

Espelund, *Bloomery ironmaking*

Espelund, Arne (Hg.), *Bloomery ironmaking during 2000 years - 3. international Contributions. Smelting and excavation in Budalen [Seminar Budalen 1991]*. Tondheim 1993.

Espelund, *Bog iron*

Espelund, Arne, *Bog iron ore for the bloomery process. Bloomery ironmaking during 2000 years - 1. international Contributions - Smelting and Excavation in Budalen [Seminar Budalen 1991]*. 1993, 36 - 49.

Espelund, *Metallurgisk ABC*

Espelund, Arne, *Metallurgisk ABC for Jernblestring*. In: *Fra Malmimya til Stal i Smia*. Drammen 1985, 47 - 63.

Espelund, *Operation of bloomery furnaces*

Espelund, Arne, *The Operation of bloomery furnaces from 0 - 500 in Mid - Norway*. In: Pleiner,

Radomir (Hg.), *Archaeometallurgy of Iron International Symposium of the Comité pour la sidérurgie del UISPP*, Libice 5.- 9. Oktober 1987, Prague 1989.

Evangelou, *Pyrit Oxidation and its Control*

Evangelou, V. P., *Pyrit Oxidation and its Control*. New York, London, Tokio 1995.

Ganzelewski, *Archäometallurgische Untersuchungen*

Ganzelewski, Michael, *Archäometallurgische Untersuchungen zur frühen Verhüttung von Raseneisernen am Kammburg bei Joldelund, Kreis Nordfriesland*. In: Haffner, Alfred - Jöns, Hauke - Reichstein, Joachim (Hg.), *Frühe Eisengewinnung in Joldelund, Kr. Nordfriesland Ein Beitrag zur Siedlungs- und Technikgeschichte Schleswig - Holsteins Teil 2: Naturwissenschaftliche Untersuchungen zur Metallurgie- und Vegetationsgeschichte*. Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie 59, Bonn 2000, 3 - 101.

Giese, *Blasebalg*

Giese, Ernst, *Ein mittelalterlicher Blasebalg. Rekonstruktion eines nicht erhaltenen Schmiedegeräts*
In: Mamoun Fansa (Hg.) *Experimentelle Archäologie in Deutschland*, Oldenburg 1996, Beiheft 13, 105 - 106.

Gömöri, *A dénesfai vasolvasztó kemence feltárása*

János Gömöri, *A dénesfai vasolvasztó kemence feltárása*. BKL Kohászat 117, 1984, 537-539.

Gömöri, Ágh, *Investigation of Materials*,

József Ágh, *Investigation of Materials from the somogyfajsz Workshop*. *Hagyományok és Újítások a Korai Középkori Vaskohászatban - Traditions and Innovations in the early medieval Iron Production*. Sopron 1999, 192-198.

Gömöri, *Archaeology of Iron at the Austrian - Hungarian border*

Gömöri, János, *Archaeology of Iron at the Austrian - Hungarian border*. PACT 30, Strasbourg 1993, 239-250.

Gömöri, *Archäologische Eisenforschung*

Gömöri, János, *Archäologische Eisenforschung in Westungarn*. In: *Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland* 59, Eisenstadt 1975, 83-99.

Gömöri, *Archäologische Überreste alter Schmiedewerkstätten in Ungarn*

János Gömöri, *Archäologische Überreste alter Schmiedewerkstätten in Ungarn*. In: Benoit, Paul; Fluzin, Phillippe : *Paléometallurgie du fer & Cultures*. *Symposium International du Comité pour la sidérurgie ancienne*. Belfort - Sévenans 1-2-3 novembre 1990. Paris, 1995, 187-201.

Gömöri, *Az Avar kori És X-XI. Századi*

Gömöri, Janos, *Az Avar kori És X-XI Századi Vaskohászat Régészeti. Emlékei Somogy Megyében, Somogyi Múzeumok Közleményei XIV. Kaposvár 2000, 165- 218.*

Gömöri, *Eisenschmelzöfen von Tarjanpuszta und Nemesker*

Gömöri, János, *Frühmittelalterliche Eisenschmelzöfen von Tarjanpuszta und Nemesker. Bona. Istvan; Dienes, I. e.a, Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae 32, Budapest 1980, 317-344.*

Gömöri, *Erforschung der Burg der Gespanschaft von Sopron*

Gömöri, Janos, *Die Erforschung der Burg der Gespanschaft von Sopron und ihrer Umgebung in den Jahren 1971 – 74. Acta Archaeologica Hungaricae Tomus XXVIII, Budapest 1976, 411-424.*

Gömöri, *Faburkolatú utak maradványai Sopronban és Győrött*

János Gömöri, *Faburkolatú utak maradványai Sopronban és Győrött. Arrabona 17, 1975, 91-107.*

Gömöri, *Fundorte des Westungarischen Eisenerzgebietes*

Gömöri, Janos, *Meldung über die Forschungen der Fundorte des Westungarischen Eisenerzgebietes im Komitate Győr – Sopron. Arrabona 19 – 20, Győr 1977-78, 109-158.*

Gömöri, *Hagyományok és Újítások a Korai Középkori Vaskohászatban*

Gömöri, János (Hg.), *Hagyományok és Újítások a Korai Középkori Vaskohászatban - Traditions and Innovations in the early medieval Iron Production. Sopron 1999.*

Gömöri, *iron smelting workshops at Somogyfajsz and Sopron - potzmann site*

Gömöri, János. *Preliminary report on the excavations of 10th century -AD iron smelting workshops at Somogyfajsz and Sopron - potzmann site, Előzetes jelentés a somogyfajszai és soproni X, századi vasolvasztó helyek ásatásáról. Gömöri, Janos (Hg.), Hagyományok és Újítások a Korai Középkori Vaskohászatban - Traditions and Innovations in the early medieval Iron Production, Sopron 1999, 170-191.*

Gömöri, *IX. - X. századi vasolvasztóhelyek Sopron környékén*

János Gömöri, *IX. - X. századi vasolvasztóhelyek Sopron környékén . SSz 30, 1976, 239-255.*

Gömöri, *Karai Császárkori és árpád-kori teletüvés*

János Gömöri, *Karai Császárkori és árpád-kori teletüvés, X Századi vasolvasztó telep Sopronban. Arrabona 73, 1973, 69-123.*

Gömöri, Marton, Hertelendy, Benkő, *Dating of Iron Smelting Furnaces.*

Gömöri, János Marton Peter, Hertelendy, Ede, and Benkő, Lázár, *Dating of Iron Smelting Furnaces Using Physical Methods. Gömöri, Janos. Hagyományok és Újítások a Korai Középkori.*

Vaskohászatban - Traditions and Innovations in the early medieval Iron Production, Sopron 1999, 142-198.

Gömöri, *Nemeskér - type Iron Smelting Workshops*

Gömöri, János, *Nemeskér - type Iron Smelting Workshops from the Time of the Onogur Colonization of Pannonia, Excavations at Zamárdi*. Gömöri, János (Hg.), *Hagyományok és Újítások a Korai Középkori Vaskohászatban - Traditions and Innovations in the early medieval Iron Production*. Sopron 1999, 149-159.

Gömöri, *Nemeskér Type iron smelting workshops*

Gömöri, János, *Nemeskér Type iron smelting workshops from the time of Onogur colonization of Pannonia, Excavations in Zamárdi*. Nemeskéri típusú vasolasztó műhelyek Pannonia onogur kolonizációjának időszakából. a zámardi kohótelep, In: Gömöri, Janos, *Hagyományok és Újítások a Korai Középkori Vaskohászatban - Traditions and Innovations in the early medieval Iron Production*, Sopron 1999, 149-159.

Gömöri, *Some relics of the early Hungarian blacksmith Craft*

János Gömöri, *Some relics of the early Hungarian blacksmith Craft*. CB 1984, 131-147.

Gömöri, *The hungarian Bloomeries*

Gömöri, Janos, *The hungarian Bloomeries*. In: Pleiner, Radomir, *Archaeometallurgy of Iron - international Symposium of the Comité pour l'siderurgie ancienne de l'UISPP, Libice 5.- 9. Oktober 1987*, Prague 1989, 125- 138.

Gömöri, *The Szakony Blommetry workshops Il primo ferro nel Mediteraneo*

János Gömöri, *The Szakony Blommetry workshops Il primo ferro nel Mediteraneo. Atti del Convegno di Popolonia / Piombino 1983*. In: Sperl, Gerhard; PACT, *Journal of the European Study Group on Physical, Chemical, biological and Mathematical Techniques Applied to Archeology*, strasbourg, Council of europe 21, 1988, 101- 110.

Heckenast, Novaki, Vastagh, Zoltay, *A magyarországi vaskohászat története a korai középkorban*

Heckenast, Gusztáv, Novaki, Gyula, Vastagh, Gabor, and Zoltay, Endre. *A magyarországi vaskohászat története a korai középkorban (A honfoglalástól a 13. sz. közepéig)*, Budapest 1968.

Herdits, *Schmelzversuche*

Herdits, Hannes, *Schmelzversuche mit einem rekonstruierten Kaiserzeitlichen Rennofen aus der germanischen Siedlung von Zaingrub*. unpub. Proseminararbeit, Wien 1990.

Herdits, Hannes, Windl, Helmut, and Sadik, Wolfgang, *Schmelzversuch mit einem rekonstruierten kaiserzeitlichen Rennofen aus der germanischen Siedlung von Zaingrub, Niederösterreich*, Jjizersterk Eindhoven 1993, 16-19.

Herdits, *Schweiß Eisen*

Herdits, Hannes; Schweiß Eisen - seine Herstellung, Bearbeitung und Veredelung im archäologischen Experiment In: Friesinger, Herwig; Pieta, K.; Rajtár, J. (Hg.), Metallgewinnung und Verarbeitung in der Antike (Schwerpunkt Eisen). Archaeologica Slovaca Monographiae Tomus III, Nitra 2000, 63- 73.

Herdits, *Technotypologische Betrachtungen*

Herdits, Hannes, *Technotypologische Betrachtungen und experimentalarchäologische Untersuchungen zu den frühmittelalterlichen Rennöfen von Unterpullendorf*. Eisenstadt 1998, 63-76.

Pleiner, *Iron in Archaeology*

Pleiner, Radomir, *Iron in Archaeology - The European Bloomery Smelters*. Praha 2000.

Herold, *Keramik der Randgebiete des awarischen Kaghanats*

Herold, Hajnelka, *Die Keramik der Randgebiete des awarischen Kaghanats Unter besonderer Berücksichtigung der Siedlung und des Gräberfeldes von Zillingtal (Burgenland), unpubl. Dissertation*. Wien 2002.

Hingst, *Vor- und frühgeschichtliche Eisengewinnung*

Hingst, Hans, *Vor- und frühgeschichtliche Eisengewinnung in Schleswig - Holstein*. Deutsches Bergbaumuseum, Eisen und Archäologie Bochum 1978, 62-71.

Hougardy, *Umwandlung und Gefüge unlegierter Stähle*

Hougardy, Hans Paul; *Umwandlung und Gefüge unlegierter Stähle*. 2. neubearbeitete Auflage Düsseldorf.

Jöns, *Frühe Eisengewinnung in Jodelund*

Hauke, Jöns, *Frühe Eisengewinnung in Jodelund*, Kr. Nordfriesland, ein Betrag zur Siedlungs- und Technikgeschichte Schleswig- Holsteins. ; Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie, 40/ 1, Bonn 1997.

Jöns, *Schuby und Süderschmedeby*.

Hauke Jöns, *Schuby und Süderschmedeby. Zwei kaiserzeitliche Eisengewinnungszentren am Heerweg*. Offa 56, 1999, 67-81.

Katzer, *Alte Bergbaue in Niederösterreich (I)*

Katzer, Ernst, *Alte Bergbaue in Niederösterreich (I)*. (Hg.) Pittioni, Richard, ArchA 42, Wien 1967, 80-89.

Katzer, *Alte Bergbaue in Niederösterreich (II)*

Katzer, Ernst, *Alte Bergbaue in Niederösterreich (II)*. (Hg.) Pittioni, Richard, ArchA 43, Wien 1968, 125 -139.

Kisházi, *A nyugatmagyarországi kohóasatásokon*

Kisházi, Peter, *A nyugatmagyarországi kohóasatásokon talált vasérccek ásványközettani vizsgálata* (Mineralogisch- petrographische Untersuchung der Eisenerze, die anlässlich der Hüttengrubungen in Westungarn gefunden wurden). Arrabona 19 – 20, Győr 1977-78, 169-175.

Koch, *Experimentell gestützte Grundwasserbeschaffenheitsprognose*

Koch, Rudolf (Hg.), *Experimentell gestützte Grundwasserbeschaffenheitsprognose zur Untersuchung des Gefährungspotentials von Innenkippen in Tagebauresteseen TP 1: Laborative Parameterermittlung* (BTU Cottbus). Siedlungswirtschaft und Umwelt 5a, Cottbus 2000.

Költő, *Early medieval Furnaces*

Költő, *The early medieval Furnaces of Somogyvámos- Gyümölcsény sites*, In:Gömöri, Janos, *Hagyományok és Újítások a Korai Középkori Vaskohászatban - Traditions and Innovations in the early medieval Iron Production*. Sopron 1999, 199 – 202.

Költő, *Preliminary report about the early medieval furnaces of the Alsóbogát - Csalánosi site*

Költő, László, *Preliminary report about the early medieval furnaces of the Alsóbogát - Csalánosi site*. *Hagyományok és Újítások a Korai Középkori Vaskohászatban - Traditions and Innovations in the early medieval Iron Production*. Sopron 1999, 204-206.

Költő, *The Early Medieval Furnaces of the Somogyvámos - Gyümölcsény sites*.

Költő, László, *The Early Medieval Furnaces of the Somogyvámos - Gyümölcsény sites*. *Hagyományok és Újítások a Korai Középkori Vaskohászatban - Traditions and Innovations in the early medieval Iron Production*. Sopron 1999, 199-201.

Kronz, *Ancient Iron production compared to Medieval Techniques*

Kronz, Andreas, *Ancient Iron production compared to Medieval Techniques in Germany: Fayalitic slag and Elemental Mass Balances*, *Archaeometallurgy in Europe* 24. - 25. – 26, September 2003, *Proceedings Vol. 1*. Mailand: 2003, 555-564.

Kronz, Keesmann, *vornezeitliche Eisentechnologie im Lahn- Dill- Gebiet*

Kronz, Andreas, Keesmann, Ingo, *Die vornezeitliche Eisentechnologie im Lahn- Dill- Gebiet, Deutschland*. Mangin, Michael. *La siderurgie ancienne de l'est de la France dans son contexte européen.*; *Annales littéraires de l'université de Pusancon* 536, Paris 1994, 237- 251.

Küpper, *geologischen Karte Mattersburg-Deutschkreutz*

Küpper, H. (Hrsg.): *Erläuterungen zur geologischen Karte Mattersburg-Deutschkreutz.*- (Geol. B.-A.), Wien 1957, 67-71.

Kurzweil, *Mineralbestand und Genese einiger Eisenerzvorkommen*

Kurzweil, Herbert, *Mineralbestand und Genese einiger Eisenerzvorkommen in den Sedimenten der "Landseer Bucht", Burgenland*, Tschermaks mineralogisch – petrologische Mitteilungen 16, 1971, 268-280.

Landestopographie des Burgenlandes, 1082.

Allgemeine Landestopographie des Burgenlandes. Burgenländische Landesregierung (Hg.), Eisenstadt 1963.

Leineweber, *Eisengewinnung*

Leineweber, Rosemarie, *Eisengewinnung im 4. Jahrhundert n. Chr.* In: Mamoun Fansa (Hg.) *Experimentelle Archäologie in Deutschland*, Oldenburg 1996, Beih. 13, 103 - 105.

Leineweber, *spät Römerzeitlicher Verhüttungsplatz*

Leineweber, Rosemarie, Ein spät Römerzeitlicher Verhüttungsplatz im Bereich eines zeitgleichen Brandgräberfeldes von Zethlingen, Kr. Salzwedel, *Jahresschrift für mitteldeutsche Vorgeschichte* 72. 1989, 97-120.

Linke, *Materialanalytische Untersuchungen*

Linke, Robert, *Materialanalytische Untersuchungen von Bronze-, Silber- und Goldmünzen mittels EDXRF, REM/EDS, XRD, FTIR-Mikroskopie und ICP-MS*. unpubl. Dissertation, Wien 2000.

Linke, *Untersuchungen an mittelalterlichen und antiken Silbermünzen*

Linke, Robert, *Materialanalytische Untersuchungen an mittelalterlichen und antiken Silbermünzen sowie an Orden und Medaillen mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse und Rasterelektronenmikroskopie*. unpubl. Diplomarbeit, Wien 1997.

Lychatz, *experimentelle Simulation*, 288.

Lychatz, Bernd and Janke, Dieter, *Experimentelle Simulation der frühen Eisenverhüttung*. *Arbeits- und Forschungsberichte zur sächsischen Bodendenkmalpflege* 42, 2000. 307-317.

Lyman, *Scanning Electron Microscopy*

Lyman, Charles, et. al., *Scanning Electron Microscopy, X-Ray Microanalysis, and Analytical Electron Microscopy – A Laboratory Workbook*, New York 1990.

Magyar, *A bodrog-alsó Büi nemzeti központ régészeti kutatása*

Magyar, Kalman, *A bodrog-alsó Büi nemzeti központ régészeti kutatása* (1979 - 1999). Somogyi Múzeumok Közleményei 14, Kaposvár 2000, 115-161.

Magyar, *Preliminary Report on the Archaeological Research*

Magyar, Kalman *A Preliminary Report on the Archaeological Research of the 10th Century Iron smelting Site in Bodrog - Bü*. *Hagyományok és Újítások a Korai Középkori Vaskohászatban - Traditions and Innovations in the early medieval Iron Production*. Sopron 1999, 207-211.

Márton, Gömöri, *Application of Archaeomagnetic Directional Results*

Márton, Peter and Gömöri, Janos, *Application of Archaeomagnetic Directional Results for the Dating of Iron smelting Furnaces of Early Medieval Age from W- Hungary*, Actes du Colloque International "Experimentation en Archeologie: Bilan et Perspectives", Tenu a l'Archéodrome de Beane. *Archeologie Experimentale*, tom 1 - Le Foe: métal et céramique, Paris 1991, 133-138.

Matthes, *Mineralogie*

Matthes, Siegfried, *Mineralogie - eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde*. 6. Auflage. Berlin 2001.

Mayerhofer, Hampl, *frühgeschichtliche Bauernrennfeuer*

Mayerhofer, Hampl, *Frühgeschichtliche Bauernrennfeuer in südöstlichen Niederösterreich*. *Archaeologica Austriaca*, Beiheft 2, Wien 1958.

Melichar, Neubauer, *Magnetische Prospektion*

Melichar, Peter; Neubauer, Wolfgang, *Magnetische Prospektion Zillingtal / Bgld*. 1993, Wien 1993, 1-8.

Mikkelsen, *Straw in Slag Pit Furnaces*

Mikkelsen, Peter. *Straw in Slag Pit Furnaces*. Norbach, Lars Chr. *Early Iron and Production - Archaeology, Technology and Experiments*, Technical Report ; Nr. 3, Lejre 1997, 63-71.

Morton, Windgrove, *The charcoal finery and chafery forge*

Morton, G. R., Windgrove, J., *The charcoal finery and chafery forge*, *Journal of the Historical Metallurgical Society* 5:1, 1971, 24- 28.

Müller- Wille, *frühmittelalterliche Schmied*

Müller- Wille, Michael, *Der frühmittelalterliche Schmied im Spiegel skandinavischer Grabfunde* In: Hauck, Karl (Hg.) *Frühmittelalterliche Studien* 11, Berlin 1977. 127 – 201.

Novaki, *Archäologische Denkmäler*

Novaki, Gyula, *Archäologische Denkmäler aus dem X - XII. Jahrhundert*. *Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae* 21, Budapest, 1969, 299-331.

Novaki, *Überreste des Eisenhüttenwesens*

Novaki, Gyula, *Überreste des Eisenhüttenwesens in Westungarn*. Festschrift Alphons A. Barb. In: *Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland* 35, Eisenstadt, 1966, 163-198.

Ohrenberger, Bielenin, *Ur- und frühgeschichtliche Eisenverhüttung auf dem Gebiet Burgenlands*

Ohrenberger, A. J, Bielenin, Kazimierz. *Ur- und frühgeschichtliche Eisenverhüttung auf dem Gebiet Burgenlands*. *Burgenländische Forschungen, Sonderheft II(Kunnert-Festschrift)*, Eisenstadt 1969, 79-95.

Olsen, *Scanning Electron microscopy in Archaeology*

Olsen, Sandra L., *Scanning Electron microscopy in Archaeology*. B.A.R. 452, Oxford 1998.

Osann, *Rennverfahren*

Osann, B., *Rennverfahren und die Anfänge der Roheisenerzeugung. Zur Metallurgie und Wärmetechnik der alten Eisengewinnung. Verein deutscher Eisenhüttenleute. Fachausschussbericht 9001*. Düsseldorf 1975.

Piaskowski, Jerzy, *Metallographische Untersuchungen zur Eisen und Stahltechnologie in Haithabu*

In: Schietzel, Kurt (Hg.) *Berichte über die Ausgrabungen in Haithabu* 18, Neumünster 1983. 45-63.

Piaskowski, *Kennzeichen der Zementation und des Schweißens*

Piaskowski, Jerzy, *Über die Kennzeichen der Zementation und des Schweißens an den frühmittelalterlichen eisernen Gegenständen (Diskussion mit R. Pleiner)*. *Acta Archaeologica Carpathica* 12, Krakau 1971, 127- 159.

Piaskowski, *Metallkundliche Untersuchungen an Eisengegenständen*

Piaskowski, Jerzy, *Metallkundliche Untersuchungen an Eisengegenständen aus dem Gräberfeld von Környe*. In: Bona, I.; Dienes, I.; Gerevich, L.; e.a (Hg.), *Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae* 26, Budapest 1974. 117-134.

Piaskowski, *Technologie der Eisenherstellung im großmährischen Reich*

Piaskowski, Jerzy *Technologie der Eisenherstellung im großmährischen Reich (Folgerungen aus den Forschungen R. Pleiner)*. *Acta Archaeologica Carpathica* 11, Krakau 1970, 111- 126.

Pleiner, *Das Eisen und die Grenze*

Pleiner, Radomir, *Das Eisen und die Grenze*. In: Friesinger, Herwig; Pieta, K.; Rajtar (Hg.), Metallgewinnung und Verarbeitung in der Antike (Schwerpunkt Eisen). Archaeologica Slovaca Monographiae Tomus III, Nitra 2000. 27- 33.

Pleiner, *Die Eisenverhüttung in der "Germania Magna"*

Pleiner, Radomir, *Die Eisenverhüttung in der "Germania Magna" zur römischen Kaiserzeit*, Prague 1965.

Pleiner, *Early Iron metallurgy in europe*

Pleiner, Radomir, *Early Iron metallurgy in europe. The coming of the Age of Iron*. New Haven 1980, 375- 415.

Pleiner, *Eisenschmiede im frühmittelalterlichen Zentraleuropa*

Pleiner, Radomir, *Eisenschmiede im frühmittelalterlichen Zentraleuropa Die Wege zur Erforschung eines Handwerkszweiges*. In: Hauck, Karl (Hg.)Frühmittelalterliche Studien 9, 1975, 79-93.

Pleiner, *Entdeckungen von römerzeitlichen Eisenhütten*

Pleiner, Radomir, *Neue Entdeckungen von römerzeitlichen Eisenhütten in den böhmisch-mährischen Siedlungsräumen* In: Müller- Wille, Michael; Struve, Karl- Wilhelm (Hg.), Festschrift für Hans Hingst. Offa 40, Neumünster 1983, 63.

Pleiner, *Grundlagen der slavischen Eisenindustrie*

Pleiner, Radomir, *Die Grundlagen der slavischen Eisenindustrie in den böhmischen Ländern*. Monumenta Archaeologica 4, Prag 1958.

Pleiner, *Herstellungstechnologie germanischer Eisenwerkzeuge*

Pleiner, Radomir, *Die Herstellungstechnologie germanischer Eisenwerkzeug und Waffen aus den Brandgräberfeldern der Südslowakei*. Slovenska archaeologica 30, Prague 1982, 79-121.

Pleiner, Princ, *Die látenezeitliche Eisenverhüttung*

Pleiner, Radomir and Princ, M., *Die látenezeitliche Eisenverhüttung und die Untersuchung einer Rennschmelze in Msec, Böhmen* In: Poulik, Josef (Hg.)Pamatky Archeolgické 75, 1984, 133-180.

Pleiner, *Schmiedetechnik auf den keltischen Oppida*

Pleiner, Radomir; *Untersuchungen zur Schmiedetechnik auf den keltischen Oppida*. In: Poulik, Josef (Hg.), Pamatky Archeolgické 73, Praha 1982, 99-108.

Pleiner, *späthallstattzeitliche und latènezeitliche Eisenverarbeitung*

Pleiner, Radomir, *Die späthallstattzeitliche und latènezeitliche Eisenverarbeitung in Radovesice*. In:

Waldhauser, Jiri (Hg.), *Die hallstatt und latènezeitliche Siedlung mit Gräberfeld in Radovesice in Böhmen I.+ II.* Praha 1993.

Pleiner, *Staré Evropské Kovárství - Alteuropäisches Schmiedehandwerk*

Pleiner, Radomir, *Staré Evropské Kovárství Alteuropäisches Schmiedehandwerk Stand der metallkundlichen Forschung*, Prague 1962.

Pleiner, *Technologie des Schmiedes*

Pleiner, Radomir, *Die Technologie des Schmiedes in der Großmährischen Kultur*. Slovenska archaeologica 15/ 1, Bratislava 1967, 77-188.

Pleiner, *Zur Schmiedetechnik des großmährischen Reiches*

Pleiner, Radomir; *Zur Schmiedetechnik des großmährischen Reiches*. Acta Archaeologica Carpathica 12, Krakau 1971, 107- 125.

Schermann, *Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe*

Schermann, Otmar, *Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe*. In: Schönlaub, Peter, *Geologie der österreichischen Bundesländer - Burgenland* Wien 2000, 51- 58.

Schmid, *montangeologische Voraussetzungen des ur- und frühgeschichtlichen Eisenhüttenwesens*

Schmid, Hans. *Die montangeologischen Voraussetzungen des ur- und frühgeschichtlichen Eisenhüttenwesens im Gebiet des mittleren Burgenlandes (Becken von Oberpullendorf)*. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland 59, Eisenstadt 1975, 11– 24.

Schmid, *montangeologischen Voraussetzungen*

Schmid, Hans. *Die montangeologischen Voraussetzungen des ur- und frühgeschichtlichen Eisenhüttenwesens im Gebiet des mittleren Burgenlandes (Becken von Oberpullendorf)*. Burgenländische Heimatblätter 35 / 3, Eisenstadt 1973, 97- 109.

Schmidt, *Neue awarische Funde aus den Bezirken Eisenstadt*.

Schmidt, Stefan, *Neue awarische Funde aus den Bezirken Eisenstadt - Umgebung und Wiener Neustadt*. Archaeologica Austriaca 81, Wien 1997, 247- 253.

Schnarr, *atmosphärischer Rasterelektronenmikroskopie*

Schnarr, Holger, *Charakterisierung der Bearbeitung und der Verwendung archäologischer Werkstoffe mittels atmosphärischer Rasterelektronenmikroskopie*. Berliner Beiträge zur Archäometrie 15, Berlin 1998.

Schnarr, Becker, Fütting, *Mikroskopische und mikroanalytische Untersuchungen*

Schnarr, Holger, Becker, Matthias, Fütting, Manfred, *Mikroskopische und mikroanalytische*

Untersuchungen an den Fundstücken aus dem Fürstengrab Gommern, Jahresschrift für mitteldeutsche Vorgeschichte 76, Halle(Saale) 1994, 249.

Schnarr, *Charakterisierung der Bearbeitung und der Verwendung archäologischer Werkstoffe*

Schnarr, Holger, *Charakterisierung der Bearbeitung und der Verwendung archäologischer Werkstoffe mittels atmosphärischer Rasterelektronenmikroskopie*, Berliner Beiträge zur Archäometrie 15, Berlin 1998.

Schnarr, Fütting, Becker, *Environmental Scanning Electron Microscopy and its Application to archaeological Studies*

Schnarr, Holger, Fütting, Manfred, Becker, Matthias, *Environmental Scanning Electron Microscopy and its Application to archaeological Studies*, Naturwissenschaften 81, 1994.

Schnarr, Fütting, Becker, *Konventionelle und atmosphärische Rasterelektronenmikroskopie*

Schnarr, Holger, Fütting, Manfred, and Becker, Matthias, *Konventionelle und atmosphärische Rasterelektronenmikroskopie und archäometrische Anwendungen*, Jahresschrift für mitteldeutsche Vorgeschichte 76, 1994, 231.

Schroll, *Geochemische und geochronologische Daten*

Schroll, Erich, *Geochemische und geochronologische Daten und Erläuterungen* In: Weber, Leopold. Handbuch der Lagerstätten der Erze, Industriemineralien und Energierohstoffe Österreichs, Archiv für Lagerstättenforschung 19, Wien 1997, 395-538.

Schumann, *Metallographie*

Schumann, Hermann; *Metallographie*, 13. Auflage, Stuttgart 1990.

Schürmann, *Reduktion des Eisens*

Schürmann, Ernst, *Die Reduktion des Eisens im Rennfeuer*. Stahl und Eisen 78, 1958, 1297- 1308.

Souchopová, *Ausgrabungen der frühmittelalterlichen Verhüttungsstätten in Westmähren*

Souchopová, V., *Neue Ausgrabungen der frühmittelalterlichen Verhüttungsstätten in Westmähren*. In: Pleiner, Radomir (Hg.) *Archaeometallurgy of Iron International Symposium of the Comite pour la siderurgie del UISPP*, Libice 5.- 9. Oktober 1987 Praque 1989. 333.

Sperl, *Der Eisenprozess der Latènezeit*

Sperl, Gerhard, *Der Eisenprozess der Latènezeit in Mitteleuropa*. In: Friesinger, Herwig; Pieta, K.; Rajtar (Hg.), *Metallgewinnung und Verarbeitung in der Antike (Schwerpunkt Eisen)* . Archaeologica Slovaca Monographiae Tomus III , Nitra 2000, 109-111.

Sperl, *Der Ferrum noricum Prozess*

Sperl, Gerhard, *Der Ferrum noricum Prozess Montangeschichte des Erzberggebietes nach*

archäologischen und schriftlichen Dokumenten. Habilitationsschrift für des Lehrgebiet Geschichte und Archäologie des Montanwesens, Universität Wien 1988, 205-225.

Sperl, *Die Technologie des Ferrum Noricum*

Sperl, Gerhard, *Die Technologie des Ferrum Noricum Lebendige Altertumswissenschaften*. Festgabe zur Vollendung des 70. Lebensjahres von Hermann Vetters, Wien 1985, 410-416.

Sperl, *Norisches Eisen*

Sperl, Gerhard, *Norisches Eisen - Versuche einer Herkunftsdefinition*. Montanhistorische Mitteilungen 127 H. 7, Leoben 1982, 263-265.

Sperl, *Typologie urzeitlicher Schlacken*, 1980

Sperl, Gerhard, *Über die Typologie urzeitlicher, frühgeschichtlicher und mittelalterlicher Eisenhüttenschlacken*. Studien Industrie- Archäologie 7, Wien 1980, 1-68.

Stadler, Peter, *Quantitative Studien*

Stadler, Peter, *Quantitative Studien zur Archäologie der Awaren I*. Band I, Habilitationsschrift, Wien 2004.

Stanek, Sabine, *Archäometrische Untersuchungen an mittelalterlichen Münzen mittels EDXRF und REM/EDS*, unpubl. Diplomarbeit, Wien 2001.

Steiner, *Einfluss des Drucks in der quantitativen Analytik mittels ESEM*

Steiner, Thomas, *Einfluss des Drucks in der quantitativen Analytik mittels ESEM*. unpubl. Diplomarbeit, Wien 2001.

Stummer, *Verbesserung der lokalen Auflösung bei ESMA im ESEM - Mode*

Stummer, Wolfgang, *Verbesserung der lokalen Auflösung bei ESMA im ESEM – Mode*. unpubl. Diplomarbeit, Wien 2001.

Takács, *awarenzeitlichen Siedlungen von Lébény*

Takács, Miklós, *Die awarenzeitlichen Siedlungen von Lébény*. In: Hunnen und Awaren - Reitervölker aus dem Osten, Burgenländische Landesausstellung 1996., Eisenstadt (1996), 379-382.

Thomsen, *Essestein und Ausheizschlacken*

Thomsen, Robert, *Essestein und Ausheizschlacken aus Haithabu - Zur Technik des wikingerzeitlichen Schmiedens*. Schietzel, Kurt, Ausgrabungen in Haithabu 5, Neumünster 1971, 100-109.

Thomsen, *Untersuchungen zur Technologie des Eisens*

Thomsen, Robert, *Untersuchungen zur Technologie des Eisens*. Ausgrabungen in Haithabu 5, Neumünster 1971, 9 – 29.

Thorlander, Blomgren, *Classification of ancient slags*

Thorlander, Jan, Blomgren, Stig, *On the Classification of ancient slags by microstructure Examination*. ISKOS - Suomen Muinaismuistoyhdistys Finska Fornminnesföreningen 5, Helsinki 1985, 415-425.

Tollmann, *Geologie von Österreich - Außerzentralalpiner Anteil*

Tollmann, Alexander, *Geologie von Österreich - Außerzentralalpiner Anteil*. Band II, Wien 1980.

Török, *About the Technical Investigations of Ore, slag und Wall-fragment*

Török, Bela, *About the Technical Investigations of Ore, slag und Wall-fragment Samples found next to the sites of Nemeskér-type Furnaces*. Hagymányok és Újítások a Korai Középkori Vaskohászatban - Traditions and Innovations in the early medieval Iron Production. Sopron, 1999, 160-169.

Vastagh, *Adatok a késő avar kori vaskohászat ismeretéhez*

Vastagh, Gabor, *Adatok a késő avar kori vaskohászat ismeretéhez*, Arrabona 19- 20, Győr 1977-78, 159-162.

Vastagh, *Ausgrabungsfunden der Eisenverhüttung*

Vastagh, Gabor, *Metallurgische Folgerungen aus den Ausgrabungsfunden der Eisenverhüttung des XI.- XII. Jahrhunderts*. Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae 21, Budapest, 1972, 241-260.

Vereinigung des archäologisch-technischen Grabungspersonals, Erze, Schlacken, Eisen.

Einführungskurs zum Studium der frühen Eisenmetallurgie - Sonderheft 1991. 1991.

Voss, *Jernudvinding i Danmarks Forhisthistorisk Tid*

Voss, O., *Jernudvinding i Danmarks Forhisthistorisk Tid - Prehistoric Ironsmelting in Denmark*. Kuml 64, 7-32.

Weber, Weiss, *Bergbaugeschichte und Geologie*

Weber, Leopold; Weiss, Alfred, *Bergbaugeschichte und Geologie der österreichischen Braunkohlevorkommen*. In: Archiv für Lagerstättenforschung der geologischen Bundesanstalt 4, Wien 1983.

Wegewitz, *Rennfeuerofen*

Wegewitz, Willi, *Ein Rennfeuerofen aus einer Siedlung der älteren Römerzeit in Scharmbeck* (Kreis Harburg). Nachrichten aus Niedersachsens Urgeschichte 26, 1957, 3-25.

Wegewitz, *Siedlung und der Rennofen von Scharmbeck*

Wegewitz, Willi, *Die Siedlung und der Rennofen von Scharmbeck, Das Abenteuer der Archäologie*. Veröffentlichungen der urgeschichtlichen Sammlung des Landesmuseums zu Hannover, Oldenburg 1994, 350 – 354.

Wollschläger, *Eisenverhüttungsplatz der spätrömischen Kaiserzeit*

Wollschläger, B., *Ein Eisenverhüttungsplatz der spätrömischen Kaiserzeit und frühen Völkerwanderungszeit bei Göhlen, Kr. Ludwigslust*, Ausgrabungen und Funde 37, 1992, 151-155.

Ylaçin, Hauptmann, *Archäometallurgie des Eisens*

Yalçin, Ünsal, Hauptmann, Andreas, *Archäometallurgie des Eisens auf der Schwäbisch Alb*, Forschungen und Berichte Vor- und Frühgeschichte Baden- Württemberg, Stuttgart 1995, 269-310.