

Die Entwicklung der Eisenmetallurgie von römischer Zeit bis ins Mittelalter

VON GERHARD SPERL

1. Vorgeschichte

Die Eisenmetallurgie entwickelte sich in der Bronzezeit Mitteleuropas um 1000 v. Chr. vor dem Hintergrund einer ausgereiften bodenständigen Kupfermetallurgie, wie sie die Grabungsergebnisse in der Steiermark, Salzburg, Tirol und Südtirol erkennen lassen (Sperl 1989a). Nachdem sich die ursprüngliche Datierung des Ofens von Tillmitsch bei Leibnitz (südlich Graz) und seine Funktion als Schmelzplatz für die Erze des nahegelegenen Sausal als fraglich erwiesen haben (Sperl 1983), ist der wohl älteste Eisenhüttenplatz des Alpenraumes jener von Waschenberg bei Lambach in Oberösterreich¹. Während die hallstattzeitliche Eisenmetallurgie durch Ofenfunde archäologisch sonst wenig belegt ist, finden

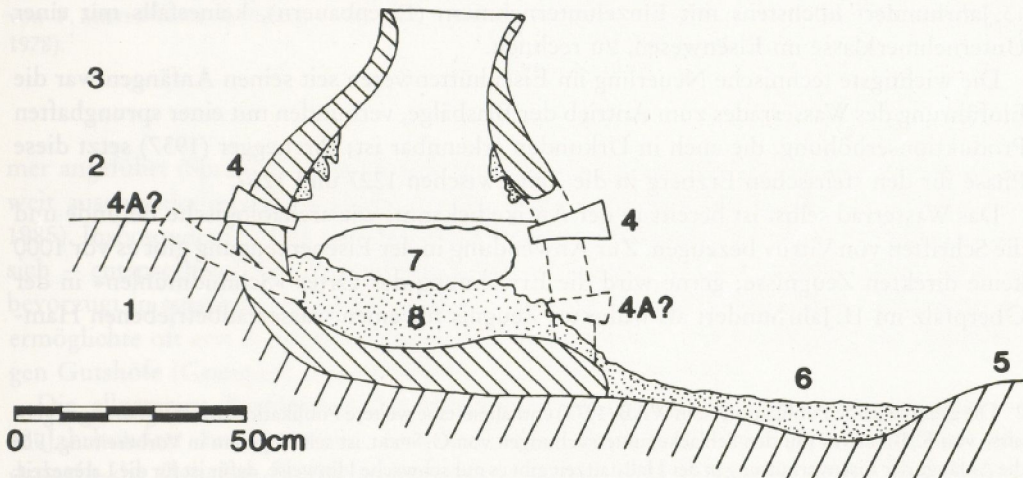


Abb.1 Eisenzeitlicher Schmelzofen vom Typ »Burgenland«, rekonstruiert nach dem archäologischen Befund für den Schmelzofen Loitzendorf (NÖ): 1 eingetiefter Teil, 2 Kuppel, 3 Gicht, 4 Düsenöffnung, (4A? anzunehmen), 5 Arbeitsgrube, 6 Fließschlacke, 7 Luppe, 8 Ofenschlacke; (SPERL 1988a).

1 Die Verarbeitungsspuren für Eisen in Tillmitsch bei Leibnitz (südlich von Graz) wurden ursprünglich als urnenfelderzeitlich eingestuft, wären also die frühesten Spuren der Eisengewinnung für Europa überhaupt gewesen; dies läßt sich nun nicht mehr aufrechterhalten (SPERL 1983); es ist latènezeitliche Eisenverarbeitung anzunehmen. Eine erste Veröffentlichung über die Ausgrabungen der hallstattzeitlichen Siedlung Waschenberg erfolgte durch den Ausgräber PERTLWIESER (1970), eine metallurgische Bewertung durch SPERL (1988 b); obwohl die gefundenen Schlacken eindeutig der Eisenverarbeitung zuzuordnen sind, ist die Deutung als Schmelzplatz nur wahrscheinlich, aber noch nicht sicher.

sich für die Latène-Periode die großen Ofenfelder im Burgenland², im angrenzenden Ungarn, auch in Kehlheim (Donau) in Bayern, sowie der Ofen von Loitzendorf nahe der Wachau³ (Abb. 1), neuerdings ergänzt durch Ofenfunde in Kärnten⁴, im Bereich des Hüttenberger Erzberges; es handelt sich um den ersten direkten Nachweis einer spätlatènezeitlichen Eisenproduktion für das »Ferrum Noricum« in diesem Raum.

Die Eisenmetallurgie der Römerzeit ist wiederum im Burgenland und angrenzenden Ungarn, vor allem aber im freien Germanien, in der heutigen Tschechoslowakei und in Südpolen besser dokumentiert als im Bereich des römischen Imperiums südlich der Donau. Im schweizerischen Waadtland, um Vallorbe, gibt es gut untersuchte Ofenfunde dieser Zeit⁵. In der Völkerwanderungszeit, aus der uns wenige Eisenerzeugungsstätten belegt sind, ist die Eisenerzeugung der Germanen auch im Alpenvorland, in Niederösterreich, durch einen Ofenfund nachweisbar⁶; aber auch aus der Schweiz und aus Westungarn gibt es Belege für eine Kontinuität der bodenständigen Eisenproduktion.

2. Entwicklung der Eisenherstellung im Mittelalter

Ausgrabungsbefunde aus dem südlichen Niederösterreich (Mayerhofer, Hampl 1958) zeigen bis ins Mittelalter die bäuerlich ausgeprägte Struktur des Eisenwesens. Auch am Hüttenberger Erzberg (Lölling) und am Steirischen Erzberg (Feistawiese) (Schmid 1932), wo sich solide, aus Bruchsteinen mit Lehm gemauerte Öfen fanden (Abb. 2), ist noch im 13. Jahrhundert höchstens mit Einzelunternehmern (Eisenbauern), keinesfalls mit einer Unternehmerklasse im Eisenwesen, zu rechnen.

Die wichtigste technische Neuerung im Eisenhüttenwesen seit seinen Anfängen war die Einführung des Wasserrades zum Antrieb der Blasbälge, verbunden mit einer sprunghaften Produktionserhöhung, die auch in Urkunden erkennbar ist; Pirchegger (1937) setzt diese Phase für den steirischen Erzberg in die Zeit zwischen 1227 und 1267.

Das Wasserrad selbst ist bereits in der Antike bekannt, wie archäologische Befunde und die Schriften von Vitruv bezeugen. Zur Anwendung in der Eisenerzeugung gibt es vor 1000 keine direkten Zeugnisse; gerne wird die Erwähnung des Ortes »Schmidmühlen« in der Oberpfalz im 11. Jahrhundert als frühestes Zeugnis für einen wasserradbetriebenen Ham-

2 Die grundlegende Publikation ist in WAB (1977) enthalten; eine weitere Publikation der Ausgrabungsergebnisse von K. BIELENIN mit den Schlackenuntersuchungen von G. SPERL ist seit längerem in Vorbereitung. Für die Anfänge der Eisenverhüttung in der Hallstattzeit gibt es nur schwache Hinweise, dafür ist für die Latènezeit, die römische Kaiserzeit und für die Arpadzeit (Hochmittelalter) Eisenproduktion eindeutig belegt.

3 Für das Gebiet Waldviertel-Kamptal, nördlich der Donau, wurde von Friesinger 1986 das Projekt »Kamptal« initiiert (FRIESINGER 1986), das alle archäologisch faßbaren kulturellen Spuren des Raumes zusammenzufassen sucht; die Gesamtpublikation dazu ist in Vorbereitung (SPERL 1991a).

4 Im Bereich des Hüttenberger Erzberges wurden 1987/88 im Möselgut bei Kanalarbeiten mehrere Kuppelöfen zur Eisenerzeugung angeschnitten, z. T. nur dokumentiert, aber auch einer ins Museum Brückl übertragen. Nach Aussage der Kärntner Archäologen sind sie als spätlatènezeitlich einzustufen; nach den verfügbaren Fotos sind sie vom gleichzeitigen Typ »Burgenland« (nach BIELENIN 1977). Eine genauere metallurgische Beurteilung steht noch aus.

5 Die Ausgrabungen um Vallorbe erbrachten nicht nur Befunde zur latènezeitlichen Eisenmetallurgie, sondern auch, wie im Burgenland, wiederholte Neuansätze in der kaiserzeitlichen und mittelalterlichen Periode (PELET 1973, 1978, 1983).

6 Im Bereiche des Kamptales, in Zaingrub, wurden von F. Daim Schlacken der Eisenerzeugung aus der frühen Völkerwanderungszeit gefunden; auch für die slawische Periode des Kamptales konnte in Thunau zumindest Eisenverarbeitung nachgewiesen werden (SPERL 1991a).

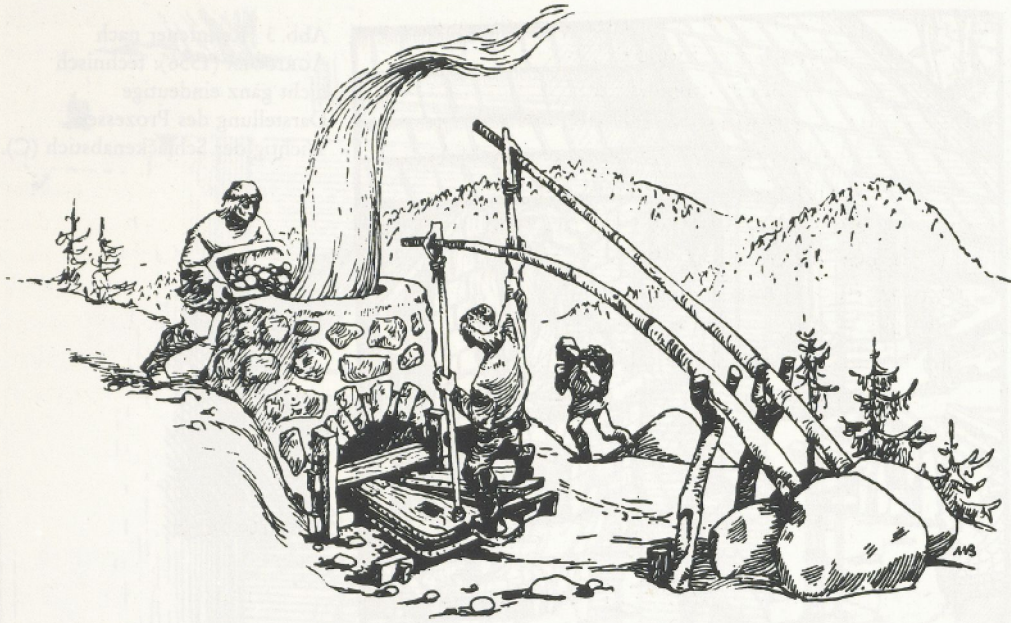


Abb. 2 Mittelalterlicher Rennofen: Die von W. SCHMID und W. SCHUSTER auf der Kreuztratte in Lölling am Hüttenberger Erzberg bzw. auf der Feistawiese 1929 am Steirischen Erzberg ausgegrabenen, mit Bruchsteinen und Lehm gemauerten mittelalterlichen Schachtöfen (SCHMID 1932, s. a. SPERL 1983) wurden von F. MAYER-BECK in Kombination mit Darstellungen des 16. Jahrhunderts rekonstruiert (SCHUSTER 1978).

mer angeführt (Sprandel 1968, 66 und 221–226). Für diese Zeit gibt es aber auch andere, weit auseinanderliegende ähnliche Erwähnungen (*molinum fornacinum* etc.) (Reynolds 1985). Insbesondere ist hier auch die Pionierrolle des Zisterzienserordens zu erwähnen, der sich – entsprechend den Vorstellungen des Hl. Bernhard von Clairvaux (gest. 1153) – bevorzugt in einsamen, zu kultivierenden Gegenden ansiedelte. Diese Lage erforderte, ja ermöglichte oft erst die eigene Eisenproduktion, bald auch zur Versorgung der zugehörigen Gutshöfe (Grangien) (Sprandel 1968, 43–52, Karlsson 1985)⁷.

Die allgemeine Einführung des Wasserrades zur Erzeugung des Gebläsewindes im 13. Jahrhundert brachte einen entscheidenden Fortschritt im Eisenhüttenwesen, da dadurch die täglichen Produktionsmengen je Ofen, anfänglich ohne große Änderungen gegenüber dem Rennofen, gesteigert werden konnten, bis schließlich am Ende des Mittelalters sich das indirekte Verfahren mit der kontinuierlichen Erzeugung von Roheisen im »Hochofen« zur Stahlherstellung im Frischherd durchsetzte (Sperl 1984a und b). Die Anfänge dieser Herstellungsmethode, Erz – Roheisen – Stahl/Weicheisen, liegen vielleicht schon in der Eisenzeit, wofür allerdings bisher jeder direkte Beweis fehlt.

⁷ Eine Beschreibung des Eisenwesens Europas im Mittelalter kann auf die umfangreiche Zusammenstellung und fachliche Sichtung in der Arbeit von R. SPRANDEL (1968) nicht verzichten. In der Zwischenzeit sind freilich in den verschiedenen Eisenzonen selbst, aber auch ausgehend von Forschungsinstituten in Europa und Übersee, Einzelberichte veröffentlicht worden, die diese Arbeit ebenso erweitern wie die Ergebnisse der in letzter Zeit zunehmenden Ausgrabungen an frühen Verhüttungsplätzen. Bezüglich der Rolle der Zisterzienser für die Eisengewinnung (die Sprandel behandelt), sind z.B. die Arbeiten von P. BENOIT (1985), BENOIT et al. (1986) und KARLSSON (1985), hervorzuheben.



Der Herd A. Der Befickungshaufen B. Der Schlackenabfluß C. Der Eisenklumpen (Maffel) D. Die Holzhämmer E. Der große eiserne Hammer F. Der Amboß G.

Abb. 3 Rennfeuer nach AGRICOLA (1556): technisch nicht ganz eindeutige Darstellung des Prozesses. Wichtig der Schlackenabstich (C).

Die schon im Mittelalter übliche Technik der Eisenherstellung im Rennfeuer einer Schmiede, wie sie auch Agricola (1556) zeigt (Abb. 3)⁸, wurde oft durch die kontinuierliche Windzufuhr durch Bottichgebläse (Trombe) ergänzt (Abb. 4). Das Bottichgebläse besteht aus einem Fallrohr, beim Wassereintritt meist trompetenförmig (Trombe!), in dem oben Lufteintrittslöcher angebracht sind; die dort eingesaugte Luft wird unten im »Bottich« beim Aufprall des Wasserstrahles auf einen Stein wieder abgetrennt.

⁸ Wenn auch in der Abbildung eine Vermischung mit dem »welschen« Frischfeuer (Walloon Forge) erfolgte (Frischen von Roheisen-Stangen), zeigt doch der Text das direkte Verfahren an: Aus Erz und Holzkohle wurden täglich mehrere Luppen erzeugt, die im hellglühenden Zustand mittels eines Holzschlägels auf einen Klumpen bereits vorher erzeugter Luppen geschweißt (gelaucht) werden; dieser Klumpen wird dann nochmals hoch erhitzt (ausgeheizt), wobei überschüssige Schlacke ausrinnt und das Metall unter dem (Aufwerf-)Hammer verdichtet und zu Stangen gestreckt wird.



Abb.4 Catalanfeuer nach DELLA FRATTA (1678): Die im Italien des 17. Jahrhunderts übliche Konstruktion des Catalanfeuers wurde von DELLA FRATTA frei nach den Bräuchen seiner Heimat gegenüber AGRICOLA (Abb.3) umgestaltet. Die Esse mit dem Schlackenabstich ist gleichartig, die Windzufuhr hier mit dem Bottichgebläse (Tromba idroeolica) dargestellt. Statt des Aufwerfhammers ist ein Schwanzhammer abgebildet.

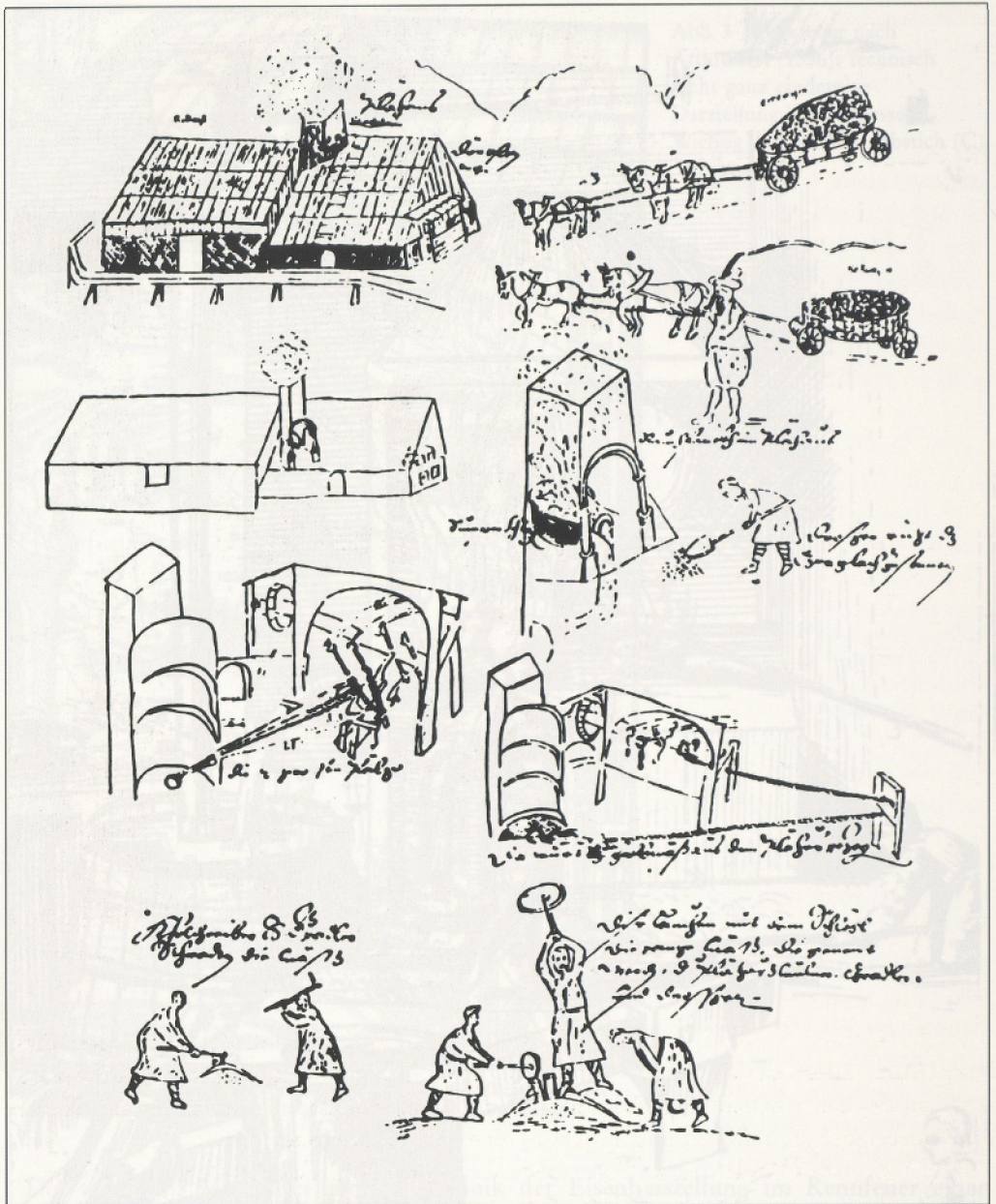
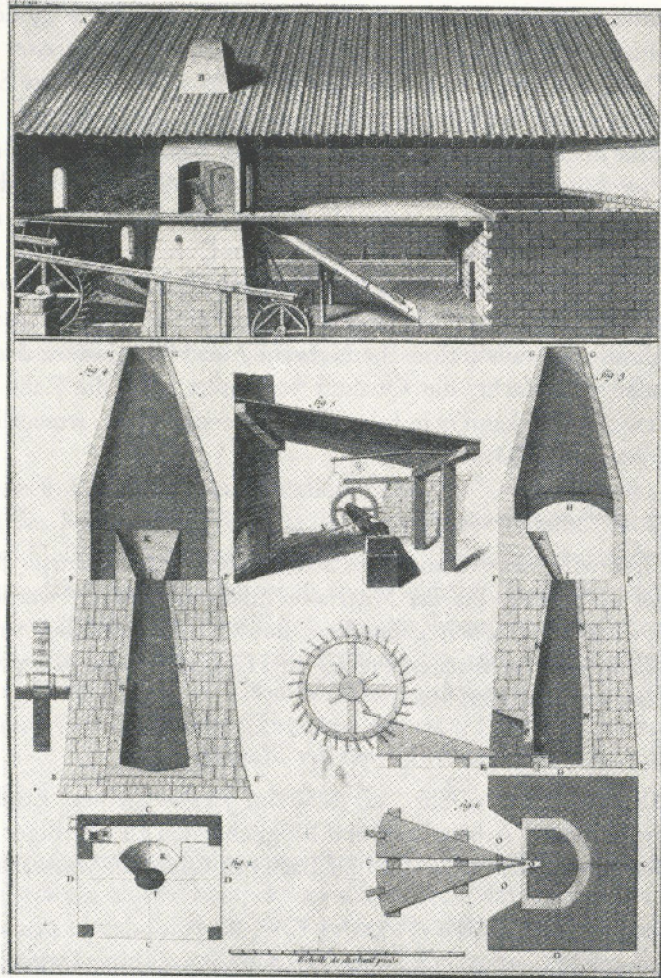


Abb. 5 Eisenerzeugung 1613, Originalzeichnung im Oberösterreichischen Landesarchiv., nach KURZEL-RUNTSCHNEINER (1949); der Text der Aufschriften lautet: Mittig, rechts oben: »Rauchfanckh im Plähaus«, »Sumperschlag«, »Der Drosger richt das Graglach zusammen«. Zeigt die von Säulen getragene Rauchhaube, den aus Lehm (Sumper) gebildeten Ofenkranz und das Zusammenrichten des wieder aufgegebenen Graglachs. Mittig, links: »Die zwei großen Pälge«. Mittig, rechts unten: »Da würt die Maß aus dem Plähaus gezogen«. Sollte besser heißen »aus dem Ofen«. Unten links: »Kholschreiber und Gradler schraden die Maß«. Unten rechts: »Diese lauchen mit dem Schlögl die ganze Maß, so da heißen der Plähausmüllner, Gradler und Drosger«.

Abb. 6 Vordernberger Stuckhütte, nach Hüttenmeister ANTHES vom 10. 4. 1719; (nach SCHUSTER 1978): In Ergänzung zu Abb. 5 ist der sich nach unten erweiternde Ofenschacht mit ovalem Querschnitt zu beachten.



Solche Gebläse wurden auch für die Steiermark des 18. Jahrhunderts für Hochöfen beschrieben. Das Catalan-Verfahren⁹ erlebte, wohl infolge der niedrigen Investitionskosten und der Betriebssicherheit des Gebläses, im 18. Jahrhundert besonders im nördlichen Mittelmeerraum (Katalonien und Ligurien) eine späte Blüte (Sperl 1990).

Eine bedeutende Änderung im Eisenwesen der frühen Neuzeit erbrachte die Einführung des indirekten Eisenhüttenprozesses. War schon in eisenzeitlichen Rennöfen manchmal hochgekohltes, nicht schmiedbares Roheisen hergestellt worden, dessen Weiterverarbeitung zu Stahl man vielleicht schon verstand, wie die Darstellung des Plinius (34. Buch, vgl. Vettters 1967) erwarten läßt, so wurde im Alpenraum doch erst 1541 (Dinklage 1954) der erste »Flossofen« errichtet, der ausschließlich Roheisen erzeugen sollte. Dieses wurde dann in den Frischfeuern verarbeitet, die für die Verarbeitung des »Graglach« (unbeabsichtigt

9 Unter Catalanfeuer verstand man in der späten Phase (um 1800) einen unter einer Esse angeordneten Herd, der vor allem durch die die Winddüse enthaltende Wand und durch eine Seitenbegrenzung zu charakterisieren ist; wie beim Frischfeuer (DEN OUDEN 1981) gab es für die Wände spezielle Namen und von Ort zu Ort variierende Anordnungen und Arbeitsabläufe. Im wesentlichen handelt es sich um ein Rennfeuer, bei dem die Lupe über die Gichtöffnung entnommen wurde. Nicht immer sind Schlackenabstiche vorgesehen (Abb. 3: AGRICOLA 1556).

entstandenes Roheisen) zu Weicheisen schon vorher eingerichtet waren, nun aber vermehrt entstanden. Noch im Jahr 1760 (Dinklage 1981) streitet man sich in Kärnten um die Qualität dieses Eisens, und erst um 1775 stellt der letzte Stuckofen seine Produktion ein (Münichsdorfer 1873). Die schwedischen Ausgrabungen in Lapphyttan (Magnusson 1988; siehe auch in diesem Band 477f.) zeigen Anordnung und Bauart einer solchen integrierten Eisenhütte mit Hochofen, Frischhütte und Schmiede für das 12./14. Jahrhundert.

3. Bemerkungen zu technischen Neuerungen im Eisenhüttenwesen

Nimmt man als technische Neuerung im Hüttenwesen das an, was den Prozeß verbilligt oder vereinfacht, die Qualität verbessert oder die Zahl der verfügbaren Einsatzstoffe erweitert, so kann man folgende Liste erstellen (im wesentlichen Daten aus Tylecote 1976, Johanssen 1953) (Abb. 7):

A. Ausgangssituation¹⁰

Eisen wird von Anfang an in Schachtöfen verschiedenster Bauart (Sperl 1988a) hergestellt, die im Prinzip bis ins Mittelalter nicht modifiziert werden, wenn auch lokale und an gewisse Traditionen gebundene Bauweisen bemerkbar sind. Anzumerken sei, daß der Nachweis von Eisenerzeugung in Herdgruben für Kärnten (Münichsdorfer 1873) nicht gesichert ist (Sperl 1983).

B. 1. Wasserrad zum Antrieb der Blasbälge

Ab etwa 1000 n. Chr., ab 1250 im Erzberggebiet. Ergibt mehr Unabhängigkeit von menschlicher Arbeitskraft und Möglichkeiten zu beliebiger Produktionssteigerung; Erfordernis von Kapitaleinsatz und Lage des Ofens an Wasserläufen mit mehr als 300 l/sec.

B. 2. Wasserrad zum Antrieb der Hämmer

Ermöglicht die Verarbeitung der größer gewordenen Luppen; Sonstiges wie unter B. 1. Datum der Einführung unbekannt (auch um 1000?). Seit dem 16. Jahrhundert war es auch

¹⁰ Bezüglich der Ofenkonstruktion und dem Holzkohledurchsatz ist die frühe Eisenerzeugung kaum von der des Kupfers zu unterscheiden, wohl aber im Prozeßablauf: Nach einer Anheizperiode folgt das Erzsetzen und schließlich das Nachheizen, um eine gute Trennung von Schlacke und Eisenluppe zu erreichen; schließlich wird die feste Eisenluppe mit Temperaturen um 1200°C gezogen und oft sofort ohne Zwischenerhitzung (Ausheizen) weiter durch Hammerschläge (lauchen) verdichtet. Bezüglich der Ofenkennzahlen sei darauf verwiesen, daß moderne Umschmelzöfen – ohne Nutzung der Verbrennungswärme im Abgas – für Produkttemperaturen um 1300°C mit Kohlesätzen von 20 Gew.-Prozent des Erz- oder Metalleinsatzes auskommen. Für die Reduktion des Eisens ist das Verhältnis Erz/Holzkohle um 1 einzustellen. Fast unabhängig von der Dimension des Ofenraumes ist die Zone, in der die Bedingungen für die Reduktion des Eisens vorliegen, vom Kohlesatz und der Eintrittsgeschwindigkeit der Luft abhängig (SPERL 1988b). Für die Blasbalgtechnik der Urzeit mag folgende Tabelle gelten:

- a. Fellbälge mit 10 l/Hub und 1 Hub/sec (zwei Bälge) ergeben 36 cbm Luft/h, die etwa 4 kg Holzkohle/ Stunde verbrennen.
- b. Für max. 100 kg C/h. qm Gestellbelastung zur Reduktion ergeben sich für einen Doppelblasbalg Ofenquerschnitte um $4/100 = 1/25$ qm entsprechend einem Ofeninnenmaß von 20 cm, für vier Blasbalg-Paare entsprechend 40 cm. Ofeninnenmaße mit mehr als 50 cm sind daher für diese Periode sinnlos. Wie Versuche zeigten (SPERL 1988a), ergibt sich dabei nicht eine zusammenhängende Luppe, sondern vor jeder Winddüse bildet sich ein Eisenklumpen entsprechend dem Windeinsatz.

üblich, die Luppe mit einer Kette, angetrieben durch ein Wasserrad, aus dem Ofen zu ziehen (Abb. 5 und 6).

C. Roheisenfrischen

Verarbeitung des ursprünglich unbeabsichtigt im Schachtofenprozeß anfallenden Roheisens (meist um 3 Prozent C) zu Weicheisen (unter 0,1 Prozent C) oder Stahl (0,2–0,8 Prozent C). Wahrscheinlich schon antik. Im Mittelalter mit »Zerrennen« (Hart-Weich-Zerrennen), dann mit »Frischen« (17./19. Jh) (den Ouden 1981) und »Puddeln« (18./20. Jh.) bezeichnet; ab 1856 bis etwa 1960 das Wind-Frischen (Bessemer-, Thomas-Verfahren) wichtig; heute ist das Sauerstoff-Frischen (LD-Verfahren, s. u.) vorherrschend. Im Alpenraum zuerst wohl nur Nebenzweig des Schmiedewesens (Provianteisen der Eisenwurzten).

D. Hochofenprozeß

Durch technische Änderungen, z.B. Verengung des Gestellquerschnittes¹¹ oder Modifikation der Düsenanordnung und des Kohlensatzes, konnte der wasserradbetriebene Stuckofen, engl. high bloomery, zum »Floßofen« umgebaut werden. Man konnte nun durch den Wegfall des Luppenziehens ununterbrochen schmelzen, auch ärmere Erze, wie den Spateisenstein des Erzberges¹², verarbeiten und bezüglich des erzeugten Eisengewichtes Kohle sparen. Im nachfolgenden Frischprozeß waren die Kohlensätze allerdings wesentlich höher (um 300 Prozent). Im übrigen wird Roheisen in China seit etwa 600 v. Chr., in Europa erst seit dem 14. Jahrhundert als Gußmetall (Schmelzpunkt etwa 1200° C) verwendet (Needham 1980).

E. Steinkohlenkoks

Durch die Steigerung der Eisenproduktion als Folge einer Bevölkerungszunahme und der beginnenden Industrialisierung trat ein akuter Mangel und damit auch eine Verteuerung der aus Holz im Meiler hergestellten Holzkohlen auf. 1709 gelang es A. Darby im heutigen Ironbridge-Coalbrookdale, Roheisen mit Hilfe von Koks (Coake) herzustellen, der aus der örtlichen Steinkohle in einem dem Meilerprozeß ähnlichen Verkokungsverfahren erzeugt worden war. Dieser billige und dort reichlich verfügbare Brennstoff trat nun, zuerst wohl nur für das Gußmetall (Iron-Bridge ab 1777, Dampfmaschinen des J. Watt) seinen Siegeszug um die Welt an. Auf dem Kontinent wurde erst ab der Mitte des 19. Jahrhunderts Koks (zur Stahlroheisen-Herstellung) eingesetzt (Johannsen 1925). Erfolgte die Koksherstellung

11 Wenn es auch frühere Zeugnisse gibt (z.B. Lapphyttan, s. MAGNUSSON 1988 und in diesem Band), begann man diese Umstellung doch erst um die Mitte des 15. Jahrhunderts, ausgehend von dem Eisenhüttengebiet zwischen Como- und Gardasee, bewußt durchzuführen; dabei haben sich dort angelernte Hochöfner gleich familienweise in den anderen Ländern Italiens, aber auch in ganz Mitteleuropa anwerben lassen, um ihre Öfen »alla bresciana« zu errichten (BARALDI, CALEGARI 1989). Im Alpenraum läuft die Umstellung zum Floßofen zwischen 1541 (Kremsbrücke) und 1775 (Lölling), später zum Hochofen (ab 1800) ab.

12 Die meisten Vorkommen von Spateisensteinen sind relativ arm an Eisen (30–45 Prozent Fe), enthalten aber wenig Phosphor und etwa 5 Prozent Mangan, berechnet auf den Eisengehalt; die unverwitterten Zonen am steirischen Erzberg, dort mit Pflinz bezeichnet, wurden anfänglich nicht, in der Spätzeit des Stuckofens aber in zunehmendem Anteil verhüttet. Erzbasis des Mittelalters waren hier wie in Kärnten die Verwitterungszonen, wo der Kalk ausgewaschen (Eisenblüte!) und damit der Quarz angereichert war. Das heute verhüttete sideritische Erzbergerz enthält 32 Prozent Eisen, was nach der Röstung etwa 47 Prozent Fe ergibt.

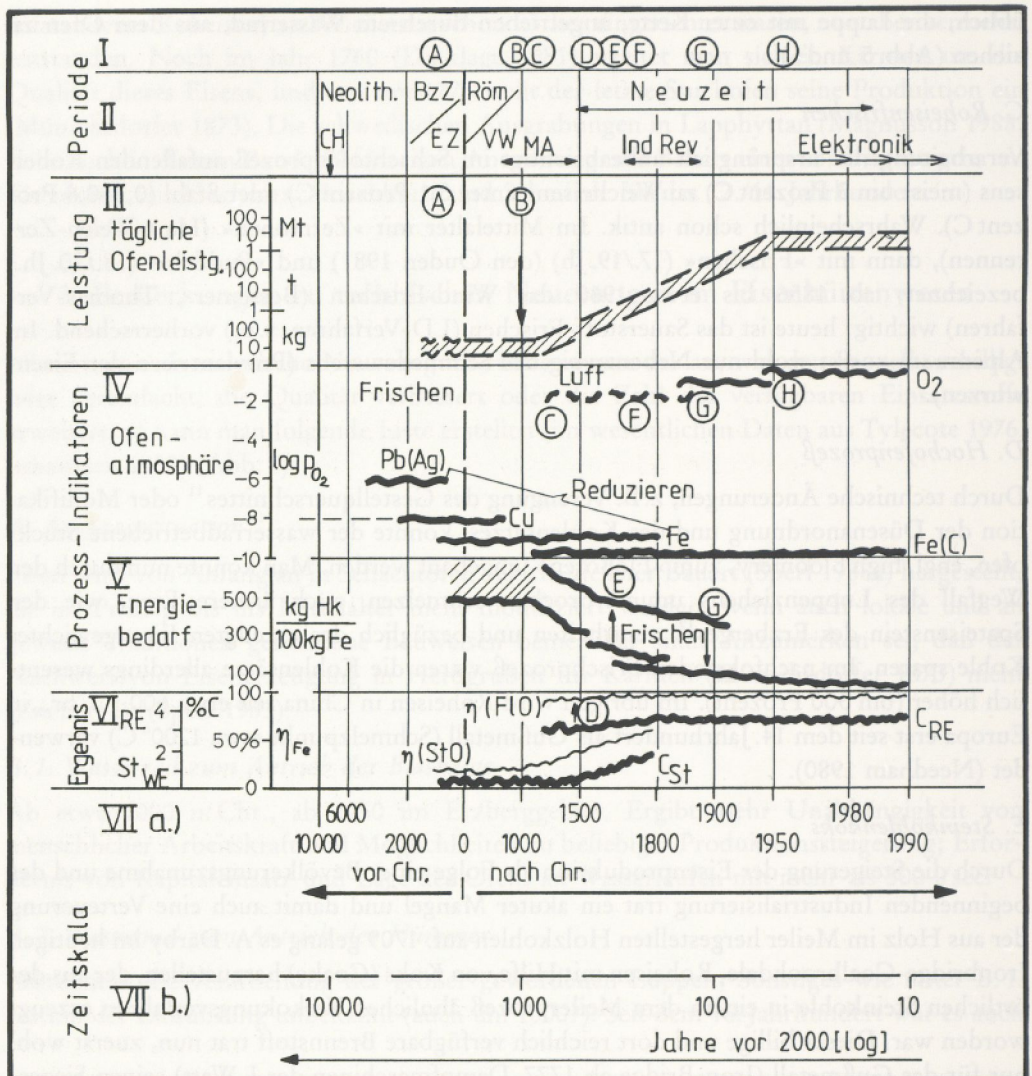


Abb. 7 Kennzahlen der Eisentechnologie im Verlauf der Geschichte des Eisens (logarithmische Maßstäbe):

- (I) Kennzeichnung der Entwicklungsstufen: (A-H) im Eisenwesen
- (II) Historische und technologische Perioden
- (III) Tägliche Ofenleistung: kg-t-Mt/Tag
- (IV) Ofenatmosphäre: Sauerstoffpotentiale im Reduktions- und Frischprozeß
- (V) Energiebedarf: kg Holzkohle je 100 kg Eisenprodukt
- (VI) Ergebnis: dessen Effekte im Eisenwesen: Eisenausbeute (η -%) und daraus resultierende Kohlenstoffgehalte im (% C) Produkt
- (VIIa) Zeitskala absolut
- (VIIb) Grundskala: Jahre vor 2000 n. Chr., logarithmisch

(trockene Destillation) der Steinkohle anfänglich wie jene der Holzkohle, so entwickelte sie sich von der kohleverbrauchenden Meilerproduktion zu den heutigen Kammerverfahren, die mit dem eigenen Destillationsgas beheizt werden.

F./G. Flußstahl

Um 1860 erlangte das Windfrischen im sauer zugestellten Konverter (Bessemer – Verfahren 1856) Betriebsreife (G.). Die Verbrennung von Kohlenstoff und anderen Roheisenbegleitern (z. B. Si, Mn, P) wurde durch Durchblasen von Luft (21 Prozent Sauerstoff) durch das Roheisenbad erreicht. Der Prozeß verkürzte die Frischzeit erheblich und erzeugte flüssigen Stahl (Flußstahl), der sich vor allem durch seine Schlackenfreiheit und Gleichmäßigkeit, aber auch durch die Möglichkeit gezielter Legierung und Kohlenstoffeinstellung, vom »Schweißisen« der früheren Verfahren unterschied¹³. Flußstahl hatte es als Tiegelstahl allerdings schon vorher gegeben: er wurde durch Einschmelzen von Schweißisen und Aufkohlung seit etwa 1765 (Huntsmann) in Tiegelöfen, die die Schmelztemperatur des Stahles (1530° C) überschreiten konnten, hergestellt (F.).

H. Sauerstoff-Frischen

Schon Bessemer wußte, daß man mit reinem Sauerstoff schneller als mit Luft (21 Prozent Sauerstoff) den Frischprozeß durchführen könnte. Erst mit der Einführung des Linde-Verfahrens zur Verflüssigung der Luft (bei etwa – 190° C) konnte reiner Sauerstoff in industriell interessanten Mengen hergestellt werden (um 1928). Hervorgegangen aus einer deutsch-österreichisch-schweizerischen Arbeitsgruppe entwickelten die Österreicher (Trenkler, Kühnelt, Rösner u. a.) 1949 das Sauerstoff-Aufblasverfahren in der heute die Weltproduktion für Stahl beherrschenden Form. Die ersten Werke wurden in Linz (1952) und Donawitz (bei Leoben, 1953) in Betrieb genommen (LD-Verfahren). Der Stahl wurde noch reiner (ohne Stickstoffversprödung durch Luft!), der Prozeß übersichtlicher, damit schneller, die Tiegelstandzeit länger. Es konnte wieder Schrott eingesetzt werden, was die Kosten zusätzlich senkte.

Neuerungen haben auch im Eisenwesen immer eine Kenntnisbasis, die oft lang vorher begründet wurde (Bogdandy, Krieger 1987); auch genügt nicht die Erfindung und ihre Vorteile, es vergehen oft Jahrhunderte, bis sich scheinbar Selbstverständliches durchgesetzt hat. Daher sind die Daten für die Einführung meist nur ungenau anzugeben, auch gibt es immer starke regionale Unterschiede, die nicht nur durch Rückständigkeit und dergleichen erklärbar sind. Jedenfalls kann das Eisenwesen über die Jahrtausende als besonders einprägsames Beispiel für eine technische Entwicklungsfolge dienen. Es zeigt sich auch, daß im Mittelalter bereits alle für die künftige Entwicklung des Eisenwesens wichtigen Grunderfahrungen gemacht wurden: Die Mechanisierung der maschinellen Abläufe, die Erzeugung von flüssigem Roheisen, der Frischprozeß im Zerrennfeuer, damit auch, in nucleo, die Erzeugung von Flußeisen. Damit reiht sich auch die Eisentechnologie in die geistige Aufbruchbewegung ein, die vom Mittelalter bis in die Renaissance das Gesicht Europas verändert.

13 Im metallographischen Schliff lassen sich nur die Schweißeisensorten, vor allem anhand der Schlackeneinschlüsse, vom Flußeisen unterscheiden. Nicht befriedigend gelöst ist die Unterscheidung von Schweißisen aus dem direkten (Stuckofen-Catalan) und indirekten Prozeß (Hochofen und Frischen). Der Versuch von PIASKOWSKI (1989) zu einer Charakterisierung von Zerrennfeueisen ist wohl nicht glaubhaft gelungen. Erforderlich ist der quantitative Nachweis einiger Elemente (Si, Mn), deren Anteil dann aber meist um 0,3 Prozent in der Eisenmatrix liegen dürfte, mit der Mikrosonde; die Durchschnittsanalyse von Schweißisen ist dafür unbrauchbar.

4. Die Techniken in der mittelalterlichen Schmiede

Beim direkten und indirekten Eisenhüttenprozeß wird bei Temperaturen um 1200° C eine feste, inhomogene Luppe aus »Schweißisen« gewonnen, die erst nach einem Ausheizprozeß zu Zwischenprodukten weiterverarbeitet wurde.

Interessant ist, daß im Gebiet des Steirischen Erzberges, dem seit dem 13. Jahrhundert sicher wichtigsten Eisenerzeugungsgebiet Europas, gesichert durch Privilegien des 14. Jahrhunderts, die Handelsform für den südlichen Bereich mit dem Stapelplatz Leoben das »Rauheisen« in Form der Halbmaß aus Rauheisen war, während der nördliche Bereich mit dem Zentrum Steyr mit »geschlagenem Zeug«, also Halb- und Fertigprodukten, handelte. Die Teilung der Zonen war wohl durch die Verfügbarkeit der Wasserkraft und die Lage zu Handelsstraßen bedingt: Der vom Erzberg nach Leoben führende Vordernbergerbach wies unterhalb Vordernbergs kaum Gefälle für Wasserräder auf, die dann aber im Mur- und Mürztal reichlich vorhanden waren. Leoben lag damit an der Nahtstelle vom Rauheisen- zum Hammerbezirk, zudem an der vielbegangenen Mur-Mürzfurche, die von Wien nach Venedig führte; Steyr dagegen lag näher der Donau und an dazu parallelen Handelsstraßen, aber unterhalb des Hammerbezirkes, der »Eisenwurz«.

Leoben erhielt sein Eisenprivileg 1314 und verdrängte damit sowohl das näher dem Erz liegende Trofaiach als auch die italienwärts liegende Handelsstadt Judenburg. Steyr (Oberösterreich) kämpfte darum lange mit der Stadt Waidhofen (Niederösterreich), die auch Rauheisen direkt aus Eisenerz im Austausch gegen Nahrungsmittel (Proviand) bezog. Das Privileg für Steyr aus dem Jahr 1389 konnte auch hier keine endgültige Entscheidung erreichen, der Streit ging bis ans Ende des Mittelalters (Pirchegger 1937).

Mit der Einführung der Wasserkraft im Eisenwesen, damit auch mit der Vergrößerung der Rauheisenmaße und der Hämmer, wurde die Trennung von Produktion mit Stuckofen¹⁴ und Hammer unumgänglich; auch die Techniken des Schmiedes trennten sich von der Urproduktion. Der Zeugschmied verarbeitete dann das angelieferte »geschlagene Zeug«, meist Weicheisen, oft auch härtbaren Stahl, zu Beschlägen, Nägeln, Werkzeugen, auch Waffen. Für Spezialprodukte wurden eigene Vorformen geliefert: die »Zaine« für die Drahtzieher¹⁵, flache Streifen für die Blechherstellung, »Platinen« für die Plattner¹⁶.

In den Zeugschmieden wurden verschiedene Techniken eingesetzt; für einfache Beschläge genügte das Formen durch Schmieden auf dem Amboß oder in Gesenken. Komplizierte Teile wurden durch Feuerschweißen unter Verwendung gewisser Schweißpulver hergestellt. Das Härten von naturhartem Stahl oder das Aufkohlen an der Oberflä-

14 Die wasserradbetriebenen Eisenhütten wurden bald Stucköfen genannt (SPERL 1984b); ein alter Ausdruck ist Blahofen (von blähen, blasen) daraus bildete sich das Wort Blauofen, auch Blahütte etc. (engl. blastfurnace). Im Erzberggebiet ist die Bezeichnung Radwerk für die Eisenhüttenbetriebe eingebürgert, wurde aber auch, seltener, für manche Hammerwerke verwendet.

15 Drahtzug: Obwohl das Ziehen von Draht bei Edelmetallen weit in die Antike zurückreicht, ist es für Eisen erst im 14./15. Jahrhundert allgemein üblich; der hohe Verformungswiderstand, wohl auch die gegenüber den gegossenen Metallen ungleichmäßigere Härte, behinderten diese Art der Metallverarbeitung. Ursprünglich wurden drahtförmige Stücke durch Abmeißeln von Streifen aus Blechen hergestellt, oft auch durch Verdrillen weiterbearbeitet. Römerzeitliche »Zieheisen« aus Südtirol (San Zeno) oder vom Magdalensberg (Kärnten) werden eher als Nageleisen zu deuten sein.

16 Die Kunst der Harnischmacher, die Plattnerkunst, erreichte am Ende des Mittelalters, als sie sich fast überlebt hatte, im Alpenraum eine besondere Blüte. Dabei war das steirische Eisen besonders begehrt; die Innsbrucker Plattner z. B. bevorzugten das Vordernberger Eisen, obwohl sie im Zillertal eine Eisenhütte mit einer guten Erzbasis vor der Haustür hatten.

che (Einsatzhärten, »Stählen«) erforderte einen anderen Arbeitszyklus. So mußte der Bergschmied vor allem das »Stählen« der abgenutzten Bergeisen durch Schmieden und Härten beherrschen (Sperl 1989, Pleiner 1958).

Die Technik der im deutschen Sprachgebrauch¹⁷ mit »Damaszieren« bezeichneten Verarbeitungstechnik gehört untrennbar zur Eisenverarbeitung. Die durch den Reduktionsprozeß im Rennofen vorgegebene Inhomogenität des wichtigsten Legierungselementes im Stahl, des Kohlenstoffs, wurde dabei für dekorative aber auch für funktionale Verbesserungen ausgenutzt. Die Anwendung unterlag aber auch der Mode; so sind die Höhepunkte dieser Technik in der Latènezeit aber auch im frühen und hohen Mittelalter zu finden (VDEh 1983). Die aus mittelalterlichen Sagen (Siegfried, Roland, Beowulf etc.) bekannten, oft mit Namen benannten Schwerter finden ihre Entsprechung in Funden von Eisenwaffen des Mittelalters, die, in Damaszieretechnik hergestellt, durch metallographische Untersuchungen die Kunstfertigkeit der mittelalterlichen Eisenschmiede beweisen.

5. Zusammenfassung

Eisenerze sind sehr weit verbreitet; sie finden sich fast überall in Mengen und Qualitäten, die im Rennfeuer sinnvoll verhüttbar waren. Trotzdem gibt es nur wenige wirkliche Eisenzentren in der Geschichte Mitteleuropas, so die Oberpfalz (»Ruhrgbiet des Mittelalters«), die nördliche Lombardei zwischen Como- und Gardasee (»Bresciani«), die Kärntner Eisenzone um Hüttenberg und, als Wichtigstes, das Gebiet um den Steirischen Erzberg mit dem nördlichen Verarbeitungsgebiet der »Eisenwurz« und der Mur-Mürzfurche im Süden¹⁸.

Wenn man auch schon vor dem Hintergrund einer entwickelten Kupfermetallurgie der späten Bronzezeit für Mitteleuropa Eisenerzeugung annehmen kann, so ist erst mit der Hallstattzeit (8./5. Jahrhundert v. Chr.) eine merkbare Verwendung des Eisens festzustellen. Die örtliche Verschiedenheit der Ofenkonstruktionen zur Eisengewinnung, die schon Plinius der Ältere konstatiert, bleibt bis zur Einführung des Wasserrades im Alpenraum erhalten. Erst im 13. Jahrhundert werden soziale und ökonomische Strukturen im Eisenwesen Mitteleuropas erkennbar, da die Öfen auch mehr Investition vor allem für die

17 Im Englischen unterscheidet man zwischen »damascening« und »pattern welding« (TYLECOTE 1976, 66f.); letzteres entspricht dem Deutschen »Damaszieren« als Verzierungsstechnik durch wechselweise Verwendung von hoch- und niedriggekohlten Eisenstäben, die miteinander im Feuer verschweißt, mehrmals gefaltet oder verdreht werden. Dabei wird oft darauf geachtet, daß – etwa durch Einsatz eines härteren Materials für die Klinge – auch ein funktioneller Vorteil entsteht (VDEh 1983). Das englische »damascening« entspricht der bewußten Verwendung des in sich durch Entmischung im Tiegel entstandenen Musters des »Wootzstahles«, wodurch sich eigentümliche gestreifte Muster auf Klingen aus dem Mittleren und Fernen Osten (z. B. Indien und Indonesien) ergeben. Dieser wird gerne als Gußdamast im Gegensatz zum »Schweißdamast« bezeichnet.

18 Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Entwicklung des Eisenwesens sollen in einer »Europäischen Eisenstrasse« (European Iron Trail) präsentiert werden. Eine entsprechende Initiative zur Gestaltung eines solchen Kulturweges ist angelaufen, erste Publikationen dazu erschienen (SPERL 1988c, 1989b, 1991b). Auf dem Terrain Mitteleuropas sind Zentren wie Valle Camonica (Bresciani), Hüttenberg/Magdalensberg (Ferrum Noricum), Steirischer Erzberg (steirisch- ober-/niederösterreichische Eisenstrasse) und die Bayerische Eisenstrasse (Regensburg – Amberg – Pegnitz) einbezogen wie auch die schweizer und burgenländischen antiken Eisenbezirke. Die Reise zur Geschichte des Eisenwesens kann von Katalonien (Spanien) oder Kampanien (Italien) über Mitteleuropa nach Ironbridge (England) oder Trondheim (Norwegen) führen.

Wasserräder und für die umgebenden Gebäude benötigen. Bald wurde auch der schwere Wasserhammer vom Stuckofen getrennt errichtet.

Die Anfänge des indirekten Verfahrens (vom Erz über Roheisen zu Stahl/Weicheisen) liegen vielleicht schon am Beginn der Eisenerzeugung in der Antike. Technisch wird diese Prozeßfolge in den Zerreifen für das Roheisen (Graglach) am Ende des Mittelalters bereits beherrscht. Der Hochofenprozeß im modernen Sinn, in dem ununterbrochen über Monate (heute: Jahre) in einem Ofen hochgekohltes Eisen mit fast 100 Prozent Ausbeute erzeugt wird, beginnt in Norditalien im 15. Jahrhundert, im Alpenraum erst ab 1541, mit einer Übergangszeit bis ca. 1775. In kleinem Maßstab wird Eisen weiter in kleinen Rennfeuern, wie im Katalanfeuer (mit Bottichgebläse), der Korsikaschmiede oder ähnlichem, für den lokalen Bedarf hergestellt.

6. Literatur

- Age of Iron 1980 = *The Coming of the Age of Iron*. Eds. T. A. WERTIME, J. MUHLY (New Haven, London).
- AGRICOLA 1556 = G. AGRICOLA, *De Re Metallica Libri XII*; Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen. Übers. von C. SCHIFFNER. Faksimiledruck der Ausg. von 1953 (Düsseldorf 1978).
- BARALDI, CALEGARI 1989 = E. BARALDI, M. CALEGARI, »Fornaderi« bresciani (XV–XVII sèc.). In: BASSOFUOCO 1989, 127–152.
- BASSOFUOCO 1989 = *Dal Bassofuoco all'Altoforno: Atti del 1. Simposio Valle Camonica 1988: La Siderurgia nell'antichità*, Comunità Montana di Valle Camonica, Comune di Bienno. Sibirium Vol. 20.
- BENOIT 1985 = P. BENOIT, *Un site industriel médiéval: L'Abbaye de Fontenay*. *Memoires de la commission des Antiquités du departement de la Cote-d'Or* Nr. 36.
- BENOIT et al. 1988 = P. BENOIT, I. GUILLOT, A. PLOQUIN, P. FLUZIN, *Archéologie et Paléoméallurgie des Sites de Minot et Fontenay en Bourgogne*. In: I. KEESMANN (Hrsg.), *Archäometallurgie von Kupfer und Eisen in Westeuropa*. Symposium Mainz, Sept. 1986. *Jahrb. RGZM* 35, 1988 (1991), 620–638.
- BIELININ 1977 = K. BIELININ, *Einige Bemerkungen über das altertümliche Eisenhüttenwesen im Burgenland*. In: WAB 1977, 49–63; s. a. DERS., *Übersicht der Typen von altertümlichen Rennöfen auf dem Gebiet Polens*. In: WAB 1977, 127–147.
- BIRINGUCCIO 1540 = V. BIRINGUCCIO, *De la Pirotechnia*. *Biringuccios Pirotechnia*. Übers. O. JOHANNSEN (Braunschweig 1925).
- BOGDANDY, KRIEGER 1987 = L. VON BOGDANDY, W. KRIEGER, *35 Jahre LD Entwicklungen, Ergebnisse und Zukunftsaspekte der Sauerstoffblasstahlerzeugung*. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 132, H. 11, 483–493.
- DELLA FRATTA 1678 = M. A. DELLA FRATTA, *Pratica Minerale trattato del March.*, Bologna (Nachdruck Firenze 1985).
- DEN OUDEN 1981 = A. DEN OUDEN, *The production of wrought iron in finery hearths*. *Journal of the Historical Metallurgical Society*, H. 2, 63–87.
- DINKLAGE 1954 = K. DINKLAGE, *Geschichtliche Entwicklung des Eisenhüttenwesens in Kärnten*. *Radex-Rundschau*, H. 7/8, 256–291.
- DINKLAGE 1981 = K. DINKLAGE, *Quellenzeugnisse des 18. Jahrhunderts über die damaligen Eisenverhüttungsmethoden*. *Leobener Grüne Hefte N.F.* 2, 100–110.
- ERZBERGGBIET 1979 = *Montangeschichte des Erzberggebietes*. *Tagungsband, Vordernberg 1978* (Leoben 1979).
- ERZ UND EISEN 1984 = *Erz und Eisen in der Grünen Mark. Beiträge zum Steirischen Eisenwesen*. Beitragsband zur Landesausstellung 1984 in Eisenerz (Graz).
- FIRST IRON 1988 = *The First Iron in the mediterranean – Il primo ferro nel Mediterraneo*. *Proceedings of the Populonia/Piombino Symposium 1983*. Ed. G. SPERL. PACT 21 (Strasbourg).
- FRIESINGER 1986 = I. FRIESINGER, *Internationales Forschungsprogramm in Niederösterreich*. *Österreichischer Kalender für Berg, Hütte, Energie 1987* (1986), 114–117.
- JOHANNSEN 1953 = O. JOHANNSEN, *Geschichte des Eisens* (Düsseldorf 1953, 3. Aufl.).
- KARLSSON 1985 = L. KARLSSON, *Cistercian iron production*. In: *MEDIAEVAL IRON 1985*, 341–355.
- MAGNUSSON, 1988 = G. MAGNUSSON, *Lapphyttan*. In: *FIRST IRON 1988*, 176–195.

- MAYERHOFER, HAMPL 1958 = R.J. MAYERHOFER, R. HAMPL, Frühgeschichtliche Bauernrennfeuer im südöstlichen Niederösterreich. *Archaeologia Austriaca*, Beiheft 2.
- MEDIEVAL IRON 1985 = Medieval Iron in Society. Papers presented at the symposium in Norberg, May 6–10, 1985. *Jernkontoret and Risanantikvarie ämbetet, Jernkontorets Forskning* H. 34.
- MÜNICHSDORFER 1873 = F. MÜNICHSDORFER, Geschichtliche Entwicklung der Roheisenproduktion in Kärnten (Klagenfurt).
- NEEDHAM 1980 = J. NEEDHAM, The Evolution of Iron and Steel Technology in East and Southeast Asia. In: *AGE OF IRON* 1980, 507–541.
- PELET 1973 = P.-L. PELET, Une industrie meconnue – fer-charbonacier – dans le Pays de Vaud. *Bibliothèque Historique Vaudoise* 49.
- PELET 1978 = P.-L. PELET, Fer-Charbon-Acier dans le Pays de Vaud. Tome 2: La lente victoire du haut fourneau. *Bibliothèque Historique Vaudoise* 59.
- PELET 1983 = P.-L. PELET, Fer-Charbon-Acier dans le Pays de Vaud. Tome 3: Du Mineur a l'Horloger. *Bibliothèque Historique Vaudoise* 74.
- PERTLWIESER 1970 = M. PERTLWIESER, Die hallstattzeitliche Höhensiedlung auf dem Waschenberg bei Bad Wimsbach/Neydharting, Bez. Wels, Oberösterreich, Teil II: Hütten, Werkstätten, Metallanalysen. *Jahrbuch des oberösterreichischen Musealvereines* 115, No. 1, 37–70.
- PIASKOWSKI 1989 = J. PIASKOWSKI, The metallography of the first indirectly smelted iron in Poland. In: *BASSOFUOCO* 1989, 191–200.
- PIRCHEGGER 1937 = H. PIRCHEGGER, Das Steirische Eisenwesen bis 1564. Mit einem Überblick über das Kärntner Eisenwesen (Graz).
- PLEINER 1958 = R. PLEINER, Základy Slovanského Zelezárského Hutnictví v Českých Zemích. Die Grundlagen der slavischen Eisenindustrie in den böhmischen Ländern (Praha).
- PLEINER 1980 = R. PLEINER, Early Iron Metallurgy in Europe. In: *AGE OF IRON* 1980, 375–417.
- PLEINER 1989 = R. PLEINER, The Technology of Medieval Blacksmiths in Prague. In: *BASSOFUOCO* 1989, 77–82.
- REYNOLDS 1985 = T.S. REYNOLDS, Iron and water: Technological context and the origins of the water-powered iron mill. In: *MEDIEVAL IRON* 1985, 61–80.
- SCHMID 1932 = W. SCHMID, Norisches Eisen. Beiträge zur Geschichte des österreichischen Eisenwesens (Wien, Berlin, Düsseldorf).
- SCHUSTER 1978 = W. SCHUSTER, Vordernberg und seine technischen Denkmale. *Leobener Grüne Hefte* N.F. 37.
- SPEL 1983 = G. SPEL, Corrigenda zum frühen Eisen in Österreich I. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 128, 181–184.
- SPEL 1984 = G. SPEL, Corrigenda zum frühen Eisen in Österreich II. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 129, 168–170.
- SPEL 1984a = G. SPEL, Die Entwicklung des steirischen Eisenhüttenwesens vor der Einführung des Hochofens. In: *ERZ UND EISEN* 1984, 83–94.
- SPEL 1984b = G. SPEL, Die Technologie der direkten Eisenherstellung. In: *ERZ UND EISEN* 1984, 94–108.
- SPEL 1985 = G. SPEL, Die Technologie der direkten Eisenherstellung im Alpenraum (der Stuckofenprozeß). In: *MEDIEVAL IRON* 1985, 174–183.
- SPEL 1988a = G. SPEL, Metallurgische Beurteilung der Schlackenfunde aus der Eisenverhüttungsanlage Loitzendorf. *Archaeologia Austriaca* 72, 153–157.
- SPEL 1988b = G. SPEL, Montangeschichte des Erzberggebietes nach archäologischen und schriftlichen Dokumenten ergänzt durch praktische Versuche. *Habilitation Wien*.
- SPEL 1988c = G. SPEL, Kulturgeschichte des Eisens. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 134, 28–30.
- SPEL 1989a = G. SPEL, Metallurgie des urgeschichtlichen Kupferwesens im Alpenraum. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 133, 495–498.
- SPEL 1989b = G. SPEL, Il sentiero europeo del ferro. In: *BASSOFUOCO* 1989, 17–22.
- SPEL 1990 = G. SPEL, La Metallurgia nella Ferriera di Amalfi. *Rassegna del Centro di Cultura e Storia Amalfitana* 9, No. 17, 129–135.
- SPEL 1991a = G. SPEL, Vergleichende Untersuchung der Schlacken aus dem Waldviertel. In *Vorbereitung*.
- SPEL 1991b = G. SPEL, Gedanken zu einer Europäischen Eisenstraße. *Res montanarum* 2, 18–23.
- SPRANDEL 1968 = G. SPRANDEL, Das Eisengewerbe im Mittelalter (Stuttgart).

STRAUBE et al. 1964 = H. STRAUBE, B. TARMANN, , E. PLÖCKINGER, Erzreduktionsversuche in Rennöfen norischer Bauart. Kärntner Museumsschriften 35.

TYLECOTE 1976 = R.F. TYLECOTE, A History of Metallurgy (London).

VDEh 1983 = Damaszenerstahl. Vorträge Mönchengladbach Oktober 1979, Fachausschußbericht des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute No. 9.008.

VETTERS 1967 = H. VETTERS, Ferrum Noricum. Anzeiger der phil.-hist. Klasse der Österr. Akademie der Wissenschaften, No. 103, 167-185.

WAB 1977 = Archäologische Eisenforschung in Europa. Symposion Eisenstadt 1975. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland 59.