

TECHNIQUE DES FOUILLES GRABUNGSTECHNIK

Minerai, scories, fer
Erze, Schlacken, Eisen

Cours d'initiation à l'étude de la métallurgie du fer ancienne
et à l'identification des déchets de cette industrie
Einführungskurs zum Studium der frühen Eisenmetallurgie
und der Bestimmung der Abfälle dieser Industrie



2e éd. renouvelée / 2. überarbeitete Ausgabe
GSAF/SAGEA
ASTFA/VATG
1997

*Titelbild:
Der römische Schmiedegott Vulcanus (Foto Römermuseum Augst, Aufnahme E.Schulz).
Le dieu romain de forge Volcanus.*

TECHNIQUE DES FOUILLES GRABUNGSTECHNIK

Minerai, scories, fer Erze, Schlacken, Eisen

Cours d'initiation à l'étude de la métallurgie du fer ancienne
et à l'identification des déchets de cette industrie
Einführungskurs zum Studium der frühen Eisenmetallurgie
und der Bestimmung der Abfälle dieser Industrie

2^e ed. renouvelée
2. überarbeitete Ausgabe

GSAF/SAGEA
ASTFA/VATG

1997

Herausgegeben:
Vereinigung des Archäologisch-technischen Grabungspersonals der Schweiz (VATG)
Basel 1997
Gestaltung: Hansjörg Eichin
Bestelladresse: VATG c/o Archäologische Bodenforschung Basel-Stadt
Petersgraben 11, 4051 Basel
Druck: Werner Druck AG Basel

Adresses des auteurs / Autorenadressen

DOSWALD Cornel
Antonigasse 14
5620 Bremgarten
Tel+Fax 056/633 87 57

ESCHENLOHR Ludwig
Jonnières 11
2900 Porrentruy
Tel+Fax 032/466 18 71

SCHALTENBRAND OBRECHT Verena
Kapellenstrasse 3
4402 Frenkendorf
Tel+Fax 061/901 77 76

DUVAUCHELLE Anika
Musée du fer
Grandes-Forges 11
1337 Vallorbe
Tel 021/843 25 83
Fax 021/843 22 62

FASNACHT Walter
SLM Abt. Archäologie
Hardturmstrasse 185
8005 Zürich
Tel 01/218 68 21
Fax 01/272 19 65

SENN-LUDER Marianne
Salstrasse 92
8400 Winterthur
Tel+Fax 052/222 95 35

SERNEELS Vincent
Uni Lausanne
BFSH 2, CAM
1015 Lausanne
Tel 021/692 43 24
Fax 021/692 43 05

VORWORT AVANT-PROPOS

Der Feldarchäologe findet sehr häufig Befunde, Strukturen, Abfälle oder Objekte, welche einen Bezug zur frühen Metallurgie haben. Allzu häufig jedoch verfügen die Forscher nicht über die nötigen technischen Kenntnisse, um über die einfache Feststellung des Vorhandenseins solcher (Be)-funde hinaus zu kommen. Auf der anderen Seite haben die Spezialisten auf diesem Gebiet nicht immer Zugang zu den neuen Funden. Mangels Kontakten bleiben so Ausgrabungen von grossem wissenschaftlichen Interesse im Dunkeln. Zur Entwicklung der Forschung ist es unabdingbar, dass ein Ort des Austausches und der Diskussion zugänglich für jedermann/jedefrau gefunden wird.

Seit etwa zehn Jahren hat sich die Forschung über die frühe Eisenindustrie sehr stark entwickelt. Dies ist sowohl auf Untersuchungen von Spezialisten, als auch auf einen besseren Einbezug der metallurgischen (Be)-funde im Gelände zurückzuführen. Die gemeinsame Anstrengung muss fortgesetzt werden. Diesbezüglich erwiesen sich die Einführungskurse, welche 1991 von SAGEA und VATG (Lausanne und Zürich), sowie 1993 mit den Archäologiestudentenorganisationen (Basel) organisiert worden waren als ein wirksames Hilfsmittel. Aus diesem Grund und um die Forschungsfortschritte zu berücksichtigen, wird auf Wunsch des VATG ein neuer Kurs durchgeführt und gleichzeitig eine völlig überarbeitete Fassung der Broschüre vorgelegt.

Der Kurs findet am 3. und 4. November 1997 auf Deutsch an der Universität Bern (Altes Seminar für Ur- und Frühgeschichte) statt. Die Durchführung wird ermöglicht dank der Unterstützung von Martin Portmann, Archäologischer Dienst des Kantons Bern.

In mehreren Vorträgen wird der allgemeine theoretische Rahmen der frühen Eisenmetallurgie festgelegt. Anschliessend kann in Gruppen anhand von charakteristischen Beispielen diskutiert werden. Die Zielsetzung ist, dass die Teilnehmer mit den Problemstellungen der frühen Metallurgie vertraut werden und die geläufigsten Fundkategorien erkennen können.

Cornel Doswald, Anika Duvauchelle, Ludwig Eschenlohr, Walter Fasnacht, Verena Schaltenbrand Obrecht, Marianne Senn-Luder und Vincent Serneels haben aktiv mitgearbeitet an der Vorbereitung der Kurstage und der begleitenden Broschüre.

Hansjörg Eichin, Präsident des VATG und Redaktor der Hefte GRABUNGSTECHNIK, hat die Veröffentlichung der Texte ermöglicht.

Les vestiges, structures, déchets ou objets, ayant un rapport avec la métallurgie ancienne, sont des découvertes extrêmement fréquentes pour les archéologues de terrain. Trop souvent, malheureusement, pour aller au-delà de la simple constatation de leur présence, les chercheurs ne disposent pas des connaissances techniques nécessaires. A l'opposé, ceux qui se spécialisent dans ce domaine n'ont pas toujours accès aux trouvailles. Faute de contacts, des fouilles d'un grand intérêt scientifique restent ainsi dans l'ombre.

Pour développer la recherche, trouver un lieu d'échange et de discussion ouvert à tous était essentiel.

Depuis une dizaine d'années, les recherches dans le domaine de la sidérurgie ancienne en Suisse ont connu un développement important. On le doit à la fois aux recherches spécialisées et à une meilleure prise en compte des vestiges métallurgiques sur le terrain. Cet effort commun doit être poursuivi. Sur ce plan, les cours d'initiation «MINERAIS, SCORIES, FER» organisés par le GSAF et l'ASTFA en 1991 (Lausanne et Zurich) et avec les associations des étudiants en archéologie 1993 (Bâle) se sont révélés des moyens efficaces. Pour cette raison et pour tenir compte de l'avancement de la recherche, une nouvelle session a été organisée sur demande de l'ASTFA, accompagnée d'une édition révisée de ce fascicule.

Le cours est prévu les 3 et 4 novembre 1997 en Allemand à l'Université de Berne (ancien Séminaire de Pré- et Protohistoire), avec l'aide de Martin Portmann, Service archéologique du Canton de Berne.

Plusieurs interventions orales permettront de fixer le cadre théorique général de la métallurgie du fer ancienne. Elles seront suivies par des séances de discussions autour d'échantillons caractéristiques. Le but est de familiariser les participants à la problématique de la métallurgie ancienne et à la reconnaissance des vestiges les plus fréquents.

Cornel Doswald, Anika Duvauchelle, Ludwig Eschenlohr, Walter Fasnacht, Verena Schaltenbrand Obrecht, Marianne Senn et Vincent Serneels ont tous pris une part active à la préparation du cours et du fascicule qui l'accompagne.

Hansjörg Eichin, président de l'ASTFA et rédacteur des cahiers TECHNIQUE DE FOUILLES a rendu possible l'édition des textes.

INHALTSVERZEICHNIS / TABLE DES MATIERES

Vorwort / Avant-propos
Autorenadressen / Adresses des auteurs

Inhaltsverzeichnis / Table des matières

Einführung : Schweizerische Arbeitsgruppe für Eisenarchäologie (SAGEA) Introduction : Groupe de travail Suisse d'Archéologie du Fer (GSAF)	6
1 Die Prozesskette der frühen Eisenindustrie / La chaîne opératoire de la sidérurgie ancienne V. Serneels, Übersetzung: L. Eschenlohr	9
2 Die Eisenerze / Les minerais de fer V. Serneels, Übersetzung: L. Eschenlohr	13
3 Die direkte Eisenerzverhüttungsmethode im Rennofen / La méthode directe de réduction du minerais de fer au bas fourneau L. Eschenlohr	17
4 Die Weiterverarbeitung des Eisens / Le travail post-réduction du fer M. Senn-Luder, traduction : A. Duvauchelle	29
5 Die geschmiedeten Eisenobjekte – Herstellung, Gebrauch, Einlagerung, Konservierung Les objets en fer forgés – fabrication, utilisation, enfouissement et conservation A. Duvauchelle, V. Schaltenbrand Obrecht	38
6 Räumliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen Fer, Espace, Economie C. Doswald	49
7 Schlacken ausserhalb der Eisenmetallurgie / Scories sans rapport avec la métallurgie du fer W. Fasnacht, traduction : L. Neuffer	58
8 Einführende Bibliographie / Orientations bibliographiques C. Doswald et al.	65
9 Kommentiertes Wörterverzeichnis der frühen Eisenindustrie Vocabulaire raisonné de la sidérurgie ancienne V. Serneels et al., Übersetzung: L. Eschenlohr, M. Senn	69
10 Index zum kommentierten Wörterverzeichnis Index du vocabulaire raisonné	87
11 Abbildungen / Illustrations	92

Einführung:
SCHWEIZERISCHE ARBEITSGRUPPE FÜR EISENARCHÄOLOGIE (SAGEA)
Introduction :
GROUPE DE TRAVAIL SUISSE D'ARCHEOLOGIE DU FER (GSAF)

Das Eisen wurde schon kurze Zeit nach seiner Entdeckung zum wesentlichen Rohstoff für die ur- und frühgeschichtlichen Gesellschaften in unserem Land. Bis zum Aufkommen der Leichtmetalle und synthetischen Werkstoffe blieb es ein bevorzugtes Material, um zu materiellem Wohlstand und militärischer Macht zu gelangen. Die Kontrolle der natürlichen Rohstoffe – Holz und Eisenerz –, das Beherrschen der Produktions- und Verarbeitungstechniken, sowie der Aufbau eines sicheren Verteilungsnetzes stellen die drei Grundpfeiler der Entwicklung der frühen Eisenindustrie dar.

Die Produktion und der Verbrauch des Eisens waren in der Schweiz geographisch immer voneinander getrennt. So mussten die erzlosen Hauptsiedlungsgebiete des Mittellandes von den Randgebieten mit Metall versorgt werden. Je nach Epoche, wurde das benötigte Eisen aus Juraerzen oder alpinen Erzen gewonnen. Eisen, in Form von Barren und fertigen Objekten, aus entfernteren Gebieten wurde durch Fernhandel ebenfalls importiert.

Die Erschliessung und Erschöpfung der Erzlagerstätten sowie die Ausbeutung der Wälder für die Holzkohleherstellung bestimmen während Jahrhunderten den Standort der Eisenproduktionsstätten. Seit dem Hochmittelalter kommt als weiterer Faktor die Verwendung der Wasserkraft dazu. Auf der anderen Seite befinden sich die Schmieden, welche Objekte auf Kundenwunsch herstellen, Reparaturen ausführen sowie Alteisen wiederverwerten, in den Agglomerationsgebieten, im Kontakt mit den Konsumenten. Vom Produzenten zum Konsumenten zirkuliert Eisen als Halbfabrikat in Form von Barren oder Fertigobjekten.

Die Eisenarchäologie umfasst ein breitgefächertes Forschungsgebiet. Es handelt sich um eine Archäologie der Techniken des Eisens, welche das Studium der Strukturen (Minen, Öfen, Schmieden), aber auch der Produkte (Schlacken, Eisenobjekte) beinhaltet. Vor allen Dingen stellt sie aber eine Archäologie der Ökonomie des Eisens dar: die Kenntnis der geographischen Verbreitung der Funde und Befunde und ihrer quantitativen Gewichtung führt zum Verständnis der Handelswege und zum Ermessen der wirtschaftlichen Bedeutung dieser Produktion in einer Gegend während einer bestimmten Epoche. Schliesslich kann es auch eine Archäologie der Gesellschaft des Eisens sein, welche die Organisationsformen der Herstellung, Umwandlung, Verteilung und des Gebrauchs des eisernen Geräteinventars durch die Jahrhunderte durchleuchtet.

Le fer est devenu, peu de temps après sa découverte dans nos régions, une matière première essentielle pour les sociétés anciennes. Il est resté, jusqu'à l'avènement des métaux légers et des matières synthétiques, un moyen privilégié pour accéder au bien-être matériel et au pouvoir militaire. Le contrôle des matières premières naturelles - bois et minerais -, la maîtrise des techniques de production et de transformation ainsi que l'établissement de circuits commerciaux sûrs sont les trois piliers du développement de la sidérurgie ancienne.

En Suisse, la production et la consommation du fer ont toujours été géographiquement séparées. La population, concentrée sur le Plateau où il n'y a aucun minerai de fer, a toujours dû être approvisionnée en métal par les régions périphériques. Selon les époques, le fer nécessaire a été produit avec les minerais du Jura ou des Alpes. Le fer, sous forme de lingots ou d'objets finis, venant de régions plus éloignées, a également alimenté un commerce à longue distance.

La découverte et l'épuisement des gîtes de minerai ainsi que l'exploitation des forêts pour le charbonnage guideront pendant des siècles la localisation des installations de production du fer. Dès le Bas Moyen Age, la possibilité d'utiliser l'énergie hydraulique deviendra aussi un paramètre déterminant. A l'opposé, les forges où sont fabriqués les objets à la demande du client, qui effectuent les réparations et recyclent la ferraille, sont situées dans les agglomérations, au contact avec les consommateurs. Du producteur au consommateur, le fer circule sous forme de produits bruts, de lingots ou d'objets finis.

L'archéologie du fer a devant elle un champ d'investigations très vaste. Il s'agit bien sûr de l'archéologie des techniques du fer qui comporte l'étude des installations (mines, fourneaux, forges) mais aussi des produits (scories, objets en fer). Mais il s'agit surtout d'une archéologie de l'économie du fer : connaître la répartition géographique des vestiges et leur importance quantitative mène à la compréhension des circuits commerciaux et à la mesure de l'impact économique d'une production dans une région et à une époque donnée. Enfin, ce peut être une archéologie de la société du fer qui s'interrogera sur les formes d'organisation qui structurent la sidérurgie au cours des âges (production, transformation, distribution et consommation).

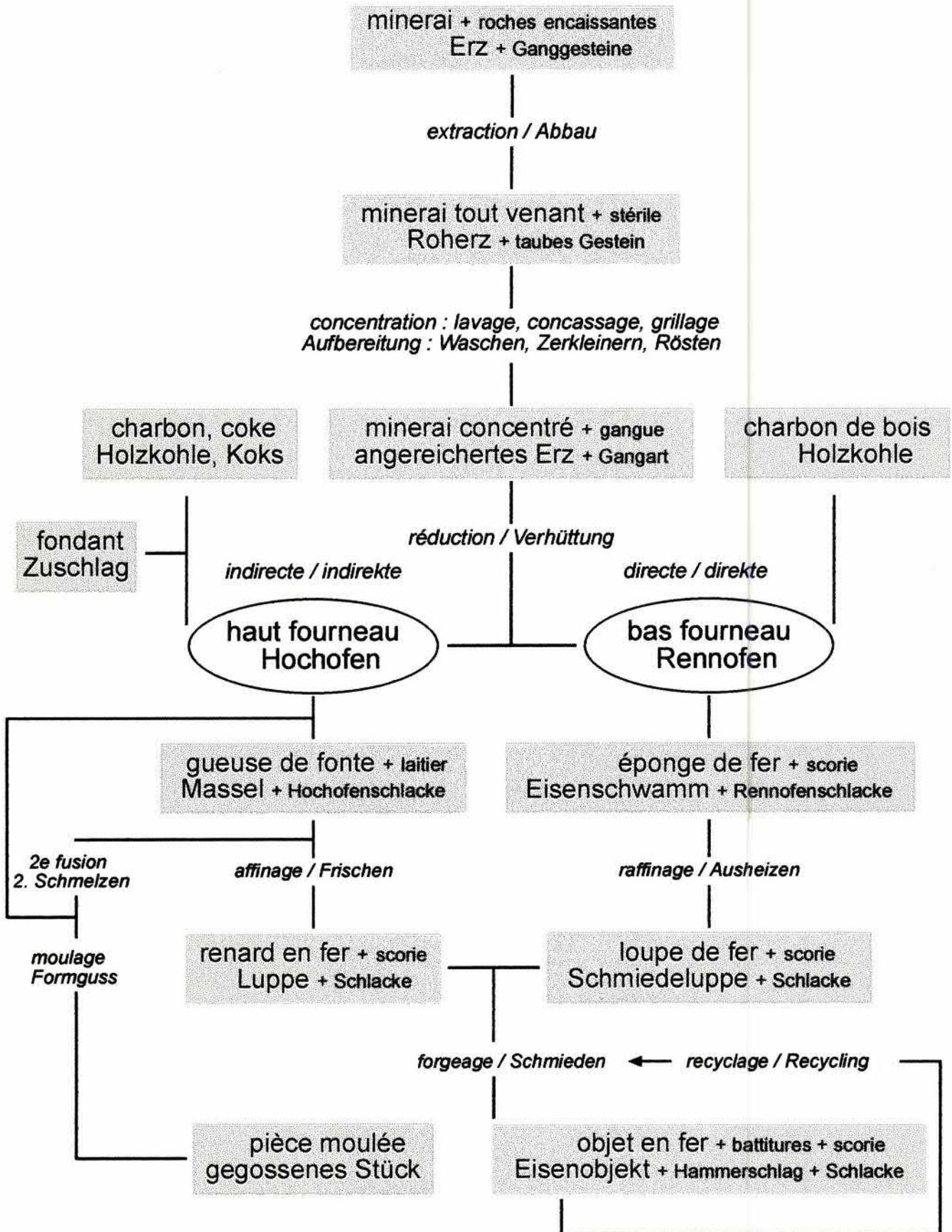
Dieses Programm übersteigt die Möglichkeiten eines einzelnen Forschers, selbst einiger Personen. Es verlangt die Zusammenarbeit von Spezialisten aus allen Fachrichtungen: gefragt sind Archäologen, Historiker, Geologen, Metallurgen, Botaniker und Palynologen. Aber auch andere Forschungsrichtungen und Denkweisen können zu einer Bereicherung der Fragestellungen beitragen.

Um die Kontakte zwischen den verschiedenen Forschern herzustellen, den Informationsaustausch zu erleichtern und die Analyse sowie das Vergleichen der Befunde und Funde zu intensivieren, wurde 1990 die Schweizerische Arbeitsgruppe für Eisenarchäologie gegründet. Ihr erklärtes Ziel ist es, all diejenigen zusammenzuführen, welche auf irgendeine Weise für eine bessere Kenntnis der Geschichte der Eisenmetallurgie zusammenarbeiten möchten. Die Arbeitsgruppe versteht sich als Verbindungsglied zwischen den Mitgliedern, steht aber auch im Dienste der Forschung im Allgemeinen und der grösseren Öffentlichkeit. Im Speziellen sind Archäologen/innen, welche im Gelände direkt mit eisenarchäologischen Funden und Befunden konfrontiert sind, eingeladen, ihre Entdeckung bekannt zu machen. Die Mitglieder der Gruppe sind bereit, ihre Kenntnisse zur Verfügung zu stellen und im Rahmen ihrer Möglichkeiten jederzeit Auskünfte zu erteilen.

Ce programme dépasse la compétence d'un seul ou même de quelques individus. Il requiert la collaboration de spécialistes de tous horizons : archéologues, historiens, géologues, métallurgistes, botanistes et palynologues, bien sûr; mais d'autres modes de pensée, d'autres approches, ne peuvent qu'enrichir cette problématique.

Pour établir ces contacts entre chercheurs, pour faciliter l'échange des informations et intensifier l'analyse et la comparaison des vestiges, le Groupe de travail Suisse d'Archéologie du Fer (GSAF) a été créé en 1990. Il s'est donné pour but de réunir tous ceux qui, à un titre ou à un autre, désirent collaborer à une meilleure connaissance de l'histoire de la métallurgie du fer. Le Groupe fonctionnera comme organe de liaison entre les membres, mais aussi au service des chercheurs en général et du public dans son ensemble. En particulier, les archéologues confrontés directement sur le terrain à des vestiges sidérurgiques sont invités à faire connaître leurs découvertes. Les membres du Groupe sont prêts à partager leurs compétences et se tiennent à disposition pour tous renseignements.

CHAINE OPERATOIRE / PROZESSKETTE



1 Die Prozesskette der frühen Eisenindustrie

1 La chaîne opératoire de la sidérurgie ancienne

Der Begriff Eisenindustrie umschließt die Gesamtheit der technischen Prozesse der Eisenherstellung und -verarbeitung. Er kann als eine Abfolge von Arbeitsvorgängen, welche vom Rohstoff Erz zum Endprodukt Metallobjekt führen, beschrieben werden. Diese Abfolge bezeichnen wir als die Prozess- oder Arbeitskette der Eisenindustrie.

1.1 Der Erzabbau

Als die Verwendung des Eisens allgemein wurde, waren die Abbauverfahren schon weitgehend entwickelt. Da die Eisenerze sehr reichhaltig und meist unmittelbar an der Oberfläche zugänglich sind, ist ihre Ausbeutung einfach: Gruben verschiedenster Art werden direkt oder durch eine dünne, sterile Deckschicht von der Oberfläche her in das anstehende Erz gegraben. Diese Gruben tragen die Bezeichnung Pingen (Erzgruben). Gegebenenfalls kann der Abbau mit Schächten und Stollen weitergeführt werden.

1.2 Die Erzaufbereitung

Das Roherz kann meistens nicht direkt verwendet werden. Zuerst reichert man es deshalb häufig an, wobei die unnützen Bestandteile ausgeschieden werden. Diese Aufbereitung ist entweder mechanischer (auslesen, waschen, zerkleinern) oder thermischer Natur (ausglühen, rösten).

1.3 Die Erzverhüttung

Das Eisen ist im Erz mit anderen Elementen in Mineralien zusammengebaut. Diese kristallinen Strukturen müssen zerstört, die Sauerstoff- und anderen Atome entfernt werden, damit die befreiten Eisenatome ein Metall bilden können. Dazu bedarf es der Energie (Hitze) und eines Reduktionsmittels, das heißt eines chemischen Elementes, welches eine stärkere Tendenz zur Oxydbildung als das betreffende Metall hat. Dieses Element fesselt auf Kosten des Metalles den vorhandenen Sauerstoff an sich. Den chemischen Vorgang bezeichnet man als Reduktion. Der Kohlenstoff übernimmt in der Eisenindustrie die Rolle des Reduktionsmittels. Bei einer Temperatur von 700°C und mehr entreissen der Kohlenstoff C und das Kohlenstoffmonoxyd CO dem Eisenoxyd FeO den Sauerstoff. Daraus ergibt sich Kohlendioxyd CO₂ und metallisches Eisen Fe. Je höher die Temperatur, desto leichter erfolgt diese Reaktion.



Im Renofen wird durch das Verbrennen von Holzkohle einerseits die nötige Hitze und andererseits das Reduktionsmittel CO erzeugt. Das Eisen ist bei einer Temperatur

La sidérurgie recouvre l'ensemble des processus techniques d'élaboration du fer. On peut la décrire comme une suite d'opérations techniques qui mène de la matière première, le minerai, à un produit fini, l'objet métallique. C'est ce que nous appelons la chaîne opératoire de la sidérurgie.

1.1 Extraction du minerai

A l'époque de la généralisation de l'utilisation du fer, les méthodes d'extraction minières sont déjà largement développées. De plus, les minerais de fer sont abondants et le plus souvent directement accessibles depuis la surface. L'exploitation se fera donc de manière simple : des trous, de forme et de taille variable, creusés depuis la surface, soit directement dans le minerai affleurant, soit au travers d'une faible épaisseur de terrains stériles. Le cas échéant, l'exploitation peut se poursuivre en puits et galeries.

1.2 Traitement du minerai

Le minerai tout-venant n'est généralement pas directement utilisable. Un premier traitement a souvent pour but d'augmenter la teneur du minerai en enlevant les substances inutiles encore contenues. Ces traitements préliminaires sont soit mécaniques (tri, lavage, concassage), soit thermiques (calcination, grillage).

1.3 Réduction du minerai

Dans le minerai, le fer est incorporé avec d'autres éléments dans des minéraux. Il faudra donc briser ces structures cristallines et arracher les atomes d'oxygène ou autres, afin que les atomes de fer, libérés, puissent former un métal. Pour cela, il faut de l'énergie (chaleur), et un agent réducteur, c'est-à-dire un élément chimique qui a une plus forte tendance à former des oxydes que le métal considéré et qui va donc se combiner avec les oxygènes disponibles au détriment du métal. Du point de vue chimique, une telle opération s'appelle une réduction.

En sidérurgie, c'est le carbone qui joue ce rôle d'agent réducteur. A partir de 700°C, le carbone, C, et le monoxyde de carbone, CO, sont capables d'arracher l'oxygène de l'oxyde ferreux, FeO. Cette réaction donne du dioxyde de carbone : gaz carbonique, CO₂ et du fer métallique, Fe. Plus la température augmente, plus cette réaction est favorisée.



Pratiquement, en brûlant du charbon dans un fourneau, on dégage d'une part la chaleur nécessaire et d'autre part du monoxyde de carbone réducteur. A

von 700°C noch weit unter seinem Schmelzpunkt. Das Gleiche gilt für die Gangart, sie erreicht ihren Schmelzpunkt um 1100–1200°C, während das metallische Eisen noch fest oder teigig bleibt. Die flüssige Schlacke kann also bei dieser Temperatur abfließen und sich so vom Metall trennen. Dies ist das Grundprinzip des direkten Verfahrens der Eisenerzverhüttung.

Wird dieser Vorgang, unter Erhöhung der Temperatur, fortgesetzt, so breitet sich der Kohlenstoff im Eisen aus. Es entsteht eine Legierung, das Gusseisen, dessen Schmelzpunkt wesentlich tiefer als der des obigen Eisens ist. Im Ofen bilden sich deshalb gleichzeitig zwei flüssige Substanzen. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Dichte lassen sie sich mühelos voneinander trennen, indem man die Flüssigkeiten nach verschiedenen Richtungen abfließen lässt. Dies ist das Grundprinzip der indirekten Verhüttung.

1.4 Das direkte Verhüttungsverfahren

Das direkte Verfahren wurde bis ins 14. Jh. systematisch angewandt, blieb in Europa bis ins 18. Jh. verbreitet und war in Afrika bis 1960 das traditionelle Verfahren.

Die Vorrichtung, in welcher die Verhüttung durchgeführt wird, trägt die Bezeichnung Rennofen. Es gibt ein ganzes Typenspektrum dieser Öfen. Ohne hier auf Klassifizierungsdetails einzugehen, lassen sich zwei Gruppen unterscheiden:

- Rennofen mit Fließschlacken: die Trennung des Metalls und der Schlacke erfolgt, indem die Schlacken aus dem Rennofen herausfließen.
- Rennofen mit gefangener Schlacke: die Trennung erfolgt, indem die Schlacken in eine Grube unter dem Rennofen fließen.

Die flüssige Substanz, welche sich durch das Schmelzen der Gangart bei niedriger Temperatur (ohne Schmelzmittel) bildet, ist reich an Eisenoxiden und wird als Rennofenschlacke bezeichnet. Den heterogenen Metallblock bezeichnen wir mit Eisenschwamm. Er ist das Produkt des Rennofens. Seine Struktur ist uneinheitlich, eine Mischung aus Eisen, Schlacke, Holzkohle und Hohlräumen.

1.5 Das Ausheizen des Eisenschwammes

Der Eisenschwamm kann nicht unmittelbar geschmiedet werden. Nach Entfernung der anhaftenden Schlacke muss er zuerst durch mehrmaliges, abwechselndes Erhitzen in einem Ausheizherd und Ausschmieden auf einem Amboss gereinigt und verdichtet werden. Die noch vorhandene Schlacke wird dadurch aufgeschmolzen und sammelt sich auf dem Herdboden. Das Endprodukt ist eine schmiedbare Eisenluppe.

1.6 Das indirekte Verhüttungsverfahren

Im Laufe der Zeit arbeiten die Handwerker, aus Gründen des quantitativen Umsatzes und angespornt durch die allgemeine Anwendung hydraulischer Maschinen

700°C, le fer est très loin de son point de fusion. Il reste donc solide, de même que les autres constituants du minerai. Vers 1100–1200°C, cette gangue atteint son point de fusion et forme un liquide, alors que le fer métallique reste solide ou pâteux. La scorie liquide peut s'écouler et se séparer du métal. C'est la méthode directe de réduction du fer. Si l'on prolonge l'opération et que l'on augmente encore la température, le carbone va pouvoir diffuser dans le fer et former un alliage, la fonte, dont le point de fusion est beaucoup plus bas que celui du fer évoqué ci-dessus. Deux liquides se forment alors dans le fourneau. La différence de densité permet de les séparer aisément et on peut les laisser s'écouler l'un après l'autre. C'est la méthode indirecte de réduction du fer.

1.4 Méthode directe de réduction

La méthode directe est celle qui fut systématiquement utilisée jusqu'au 14^e siècle. Elle était encore répandue en Europe au 18^e siècle et traditionnellement utilisée en Afrique jusqu'en 1960.

On appelle bas fourneau l'appareil dans lequel s'effectue la réduction. Il existe toute une gamme de ces appareils. Sans entrer dans les détails d'une classification, deux grands ensembles se distinguent :

- Le bas fourneau à scorie coulée où la séparation entre le métal et la scorie se fait par l'évacuation des scories à l'extérieur du bas fourneau.
- Le bas fourneau à scorie piégée où la séparation se fait en laissant la scorie s'évacuer dans une fosse sous le bas fourneau.

La fusion de la gangue se faisant à basse température et sans fondant, le liquide obtenu, riche en oxyde de fer, est appelé scorie. Le produit est un bloc de métal impur, mélangé de scorie et de charbon dont la structure est hétérogène. Il porte le nom d'éponge.

1.5 Raffinage de l'éponge de fer

Cette éponge n'est pas directement forgeable. Elle doit d'abord être purifiée et compactée. Les scories adhérentes sont enlevées, ensuite on procède à ce raffinage en réchauffant l'éponge dans un bas foyer et en la compactant petit à petit par martelages successifs. La scorie encore présente est refondue et vient s'accumuler au fond du bas foyer. Le produit final est une loupe de fer forgeable.

1.6 Méthode indirecte de réduction

Motivés par des soucis de rendement quantitatif et stimulés par la généralisation des machines hydrauliques (soufflerie), les artisans travaillent avec des

(Gebläse), mit immer grösseren Öfen und höheren Temperaturen. Im 12. Jh. kommen deshalb die ersten Hochöfen auf, welche im indirekten Verfahren Guss-eisen herstellen. Diese Produktionsmethode setzt sich aber in Europa erst im 16. Jh. durch. Das Prinzip des Hochofens hat sich bis heute nicht grundlegend verändert, auch wenn eine grosse Anzahl von Verbesserungen vorgenommen wurden.

1.7 Das Frischen des Gusseisens

Nicht so sehr die Herstellung der Legierung Guss-eisen, als vielmehr ihre Verwertung ist von Bedeutung. Das Gusseisen als solches ist nämlich brüchig und kann nicht verschweisst und gehämmert werden. Dafür kann es gegossen werden, was aber keinen Ersatz für die herkömmlichen Anwendungsmöglichkeiten des Eisens darstellt. Die wesentliche Entdeckung ist das Frischen des Gusseisens, welche dessen Umwandlung in Schmiedeeisen erlaubt. Bei diesem Vorgang wird ein Teil des Kohlenstoffes, welcher im Metall enthalten ist, entfernt. Dazu wird das Gusseisen in einer Herdstelle (Frischherd) erhitzt und einem Luftstrom ausgesetzt. Der Sauerstoff der Luft reagiert dabei mit dem Kohlenstoff im Gusseisen und es bildet sich CO_2 . Ein Teil des Eisens wird ebenfalls reoxydiert und geht so verloren, es bildet sich aber ein wesentlich kohlenstoffärmeres Eisen, welches nun schmiedbar ist. Die Verwendung von grossen, hydraulisch betriebenen Hämmern (Hammerwerk) erleichtert die Bearbeitung von grossen Stücken.

1.8 Das Schmieden von Eisen und Stahl

Unabhängig vom angewandten Herstellungsverfahren (direkt/indirekt) erhält man also einen gereinigten, homogenen und zusammengewachsenen Eisenblock. Der Handwerker kann nun mit der eigentlichen Schmiedearbeit, dem Ausformen eines Objektes, beginnen. Bei dieser Arbeit gilt es, zwei Gesichtspunkte zu berücksichtigen: einerseits muss dem Gegenstand eine Form gegeben werden, andererseits sollte das Metall die gewünschten physikalischen Eigenschaften bezüglich seiner Verwendung als Objekt erhalten. Unter physikalischen Eigenschaften versteht man die Härte, die Biegsamkeit, den Widerstand gegen Druck, Verdrehung, Reibung, Korrosion, usw.. Diese Eigenschaften hängen von der chemischen Zusammensetzung und der Metallstruktur ab. Das Vorkommen von Legierungselementen (C, P, Mn, usw.) spielt eine wichtige Rolle. Der Kohlenstoffanteil ist besonders wichtig (grössere Härte, Senkung des Schmelzpunktes). Durch ein reduzierendes oder oxydierendes Umfeld des Werkstücks in der Esse kann insbesondere sein Kohlenstoffgehalt beeinflusst werden (Aufkohlung). Die Struktur des Metalls, insbesondere seine Kornstruktur kann durch Hämmern (Zerdrücken der Kristallkörner), Erhitzen (Wiederherstellen der Körner) und durch die Abkühlgeschwindigkeit verändert werden (das Härten erlaubt z.B. eine bei hoher Temperatur erhaltene Struktur beizubehalten).

fourneaux toujours plus grands et à des températures toujours plus élevées. Au 12e siècle, on voit apparaître les premiers hauts fourneaux fabriquant de la fonte par la méthode indirecte. Cette méthode de production ne se généralise qu'au 16e siècle en Europe. Aujourd'hui, un grand nombre de perfectionnements ont été apportés, mais le principe n'a pas été fondamentalement modifié.

1.7 Affinage de la fonte

Ce n'est pas tant la production de cet alliage qui est importante que la valorisation de ce produit. En effet, la fonte est cassante et impossible à souder. Si elle peut être moulée, elle ne peut pas remplacer le fer dans ses applications. La découverte essentielle est celle de l'affinage de la fonte, procédé qui permet de la transformer en fer. L'affinage consiste à enlever une partie du carbone contenu dans le métal. Cette opération se fait dans un foyer séparé où la fonte est réchauffée et soumise à un courant d'air. L'oxygène de l'air va se combiner avec le carbone et former du CO_2 . Une partie du fer sera également réoxydée et perdue, mais on aura ainsi un métal beaucoup plus pauvre en carbone et donc forgeable. L'utilisation des gros marteaux mis en mouvement par la force hydraulique (martinet) facilitera le travail des grosses pièces.

1.8 Forgeage du fer

Indépendamment de la méthode de fabrication du fer, directe ou indirecte, mise en oeuvre, le résultat des opérations décrites précédemment est un bloc de fer purifié, homogène et cohérent. L'artisan peut donc commencer à façonner l'objet. C'est le travail de forge au sens strict. Ce travail porte sur deux aspects essentiels qui sont intimement liés : il faut d'une part mettre en forme l'objet et d'autre part donner au métal les propriétés physiques souhaitées en fonction de l'utilisation de l'objet. Par propriétés physiques, on entend des caractéristiques telles que la dureté, l'élasticité, la résistance à la compression, à la torsion, aux frottements, à la corrosion, etc. Les propriétés physiques dépendent de la composition chimique et de la structure du métal. La présence d'éléments d'alliage (C, P, Mn, etc.) joue un rôle essentiel. Le contenu en carbone est particulièrement important (augmentation de la dureté, baisse du point de fusion). La quantité de carbone peut être modifiée en plaçant la pièce dans un milieu oxydant ou réducteur (cémentation) à l'intérieur du foyer.

La structure du métal, en particulier, la taille des grains de métal, est modifiée par le martelage (écrasement) et le chauffage (recristallisation). La vitesse de refroidissement est également très importante (conservation de constituants métastables).

Der erfahrene Schmied überprüft diese verschiedenen Aspekte während seiner Arbeit. Nach dem Schmieden wird das Stück in zum Teil langwieriger Arbeit fertiggestellt. Besonders das Polieren stellt häufig eine Etappe der Ausarbeitung eines schönen Gegenstandes dar. Oftmals werden schliesslich die metallischen Bestandteile mit anderen Werkstoffen verbunden. Das Eisenobjekt muss in der Schmiede unterhalten und repariert werden. Alteisen kann wiederverwertet und erneut geschmiedet werden.

Le forgeron expérimenté contrôle ces différents aspects pendant le travail de forgeage. A la suite du forgeage, il peut encore y avoir un long travail de finition de la pièce. Le polissage, en particulier, est une étape fréquente de l'élaboration d'un bel objet. Enfin, les parties métalliques sont généralement assemblées avec d'autres matériaux. Le mobilier en fer doit être entretenu et réparé à la forge. Le vieux fer peut être recyclé et forgé à nouveau.

A = Austenit / austenite

L = Ledeburit / lédéburite

D = δ Mischkristall / solution solide δ

P = Perlit / perlite

F = Ferrit / ferrite

Z = Zementit / cémentite = Fe_3C

G = Graphit / graphite

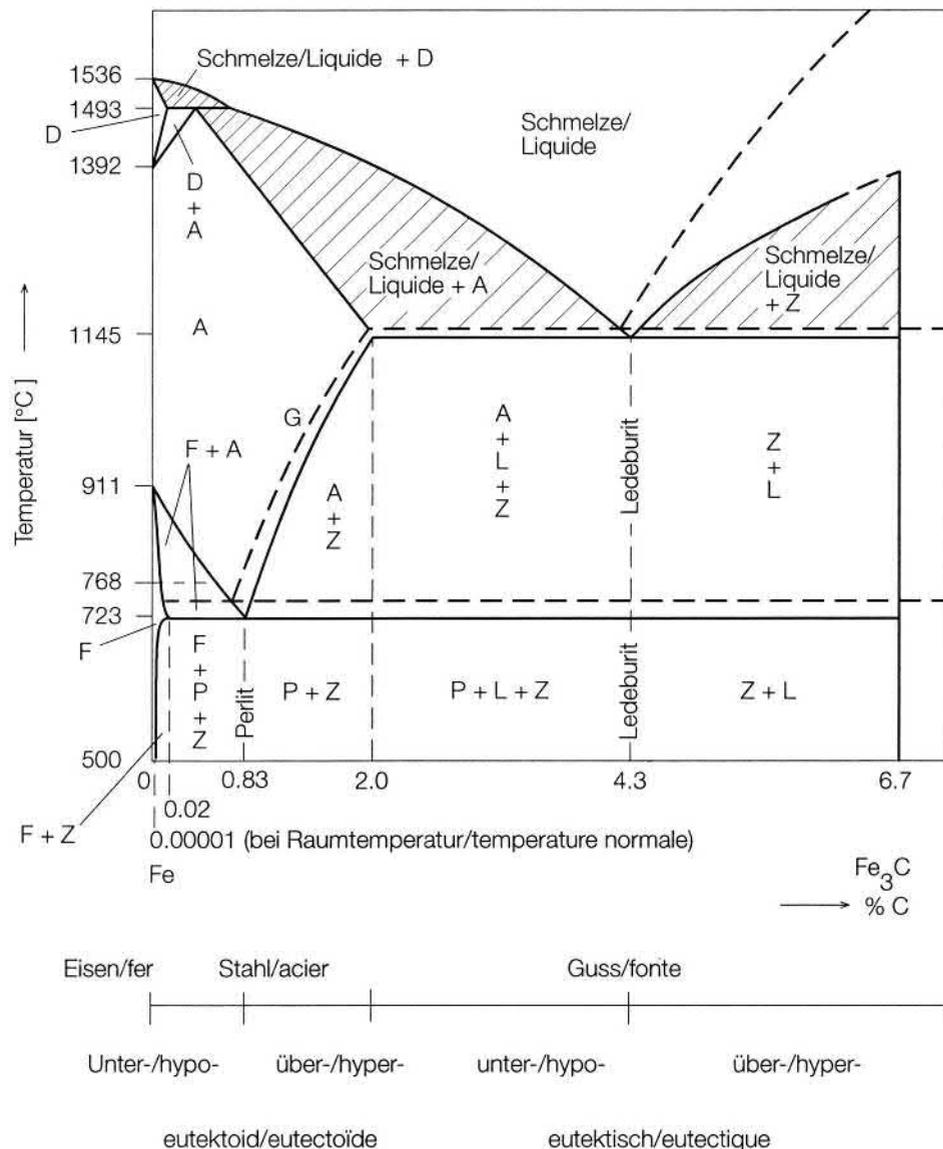


Abb. 1: Eisenkohlenstoffdiagramm.

Fig. 1: Diagramme d'équilibre Fe-C.

2 Die Eisenerze

2. Les minerais de fer

2.1 Eisen, Eisenminerale, Eisenerze

Das chemische Element Eisen ist in der Erdkruste stark vertreten, es bildet ungefähr 7% ihrer Bestandteile und ist ein wesentlicher und allgemeiner Baustein von mineralischen Stoffen.

Reines Eisen ist ein Metall, das heisst ein Element, welches im kristallinen, festen Zustand gewisse charakteristische physikalische Eigenschaften besitzt: ein starkes Rückstrahlvermögen, welches als metallischer Glanz bezeichnet wird, eine gute Wärme- und elektrische Leitfähigkeit, usw.. Vom chemischen Standpunkt aus werden die Atomverbindungen durch die Verlagerung einer Elektronenwolke gewährleistet (metallische Verbindung).

In der Natur trifft man metallisches Eisen äusserst selten an (Meteoriten). Eisenatome sind hingegen in der Struktur sehr vieler Mineralien enthalten. Es handelt sich dabei vor allem um Oxyde (Magnetit und Hämatit), Hydroxyde (Limonit und Goethit) und Karbonate (Siderit).

Ein Gestein wird als Erz bezeichnet, wenn es eine ungewöhnlich grosse Menge von eisenhaltigen Mineralien enthält und das Eisen technisch und wirtschaftlich abbauwürdig ist. Der Erzbegriff ist also eng mit der Technologie und Ökonomie verbunden und verändert sich deshalb im Laufe der Geschichte.

Es gibt zahlreiche und sehr verschiedene Eisenerze. Für eine rentable Verhüttung bedarf es heute eines Eisengehaltes von wenigstens 20%, der Mittelwert der abgebauten Erze bewegt sich jedoch um 45%.

2.2 Die in der Schweiz abgebauten Erze

In der Schweiz (Abb. 2) sind die Erzvorkommen von den grossen geologischen Formationen abhängig. In der Jurakette sind Erzlagerstätten relativ zahlreich. Im Mittelland gibt es fast keine Erzvorkommen und in den Alpen ist ihre Verteilung komplex. Diese Situation kontrastiert stark mit der Bevölkerungsdichte dieser Gebiete.

In der Jurakette finden sich zahlreiche Erzvorkommen sedimentären Ursprungs. Es lassen sich mehrere Formationen unterscheiden. Das Siderolithikum (Sande und Lehme mit eisenhaltigem Bohnerz) bildet stratifizierte Lagerstätten und Verfüllungen auf der Erosionsoberfläche der mesozoischen Kalkgesteine. Die Hauptlagerstätten sind im Delsberger Becken und im Kanton Schaffhausen lokalisiert. Zahlreiche kleinere Vorkommen verteilen sich entlang der ganzen Jurakette. Mehrere mesozoische Schichten schliessen eisenhaltige Oolithe ein. An gewissen Orten sind diese Oolithe aus-

2.1 Le fer, les minéraux du fer, les minerais de fer

Le fer est un élément chimique très abondant dans la croûte terrestre. Il forme environ 7 % des matériaux de l'écorce terrestre. C'est donc un constituant essentiel et commun des matières minérales.

Le fer pur est un métal, c'est-à-dire un corps pur qui, à l'état de solide cristallin, possède certaines propriétés physiques caractéristiques : un fort pouvoir réflecteur de la lumière, qu'on appelle l'éclat métallique, une bonne aptitude à conduire la chaleur et l'électricité, etc. Du point de vue chimique, les liaisons entre atomes sont assurées par le déplacement d'un nuage d'électrons (liaison métallique).

Dans la nature, il est extrêmement rare de rencontrer le fer sous la forme métallique (météorite). Par contre, les atomes de fer entrent dans les structures d'un très grand nombre de minéraux. Dans les minerais, ce sont principalement des oxydes (magnétite et hématite), des hydroxydes (limonite et goethite) et des carbonates (sidérite).

Si une roche contient une quantité anormalement élevée de minéraux riches en fer et que le fer est techniquement et économiquement récupérable, elle est considérée comme un minerai. La notion de minerai est étroitement liée à la technologie et à l'économie et évolue donc au cours de l'histoire.

Les minerais de fer sont très abondants et très variés. La plus faible teneur compatible actuellement avec un traitement rentable est de l'ordre de 20 %, mais la teneur moyenne des minerais exploités est de 45 % environ.

2.2 Les minerais de fer exploités en Suisse

La répartition des minerais de fer en Suisse est subordonnée aux grandes divisions géologiques (fig. 2). Au Nord, dans la chaîne du Jura, les gisements sont relativement abondants. Au centre, sur le Plateau molassique, il n'y en a pratiquement aucun. Dans les Alpes, la répartition des gîtes est complexe. Cette situation générale contraste fortement avec la répartition de la population.

La chaîne du Jura renferme de nombreux gisements de minerais d'origine sédimentaire. On distingue plusieurs formations. Le Sidérolithique (sables et argiles contenant des pisolithes ferrugineux) forme des gisements stratiformes et des remplissages au-dessus de la surface d'érosion des calcaires mésozoïques. Les principaux gisements se trouvent dans la vallée de Delémont et dans le canton de Schaffhouse mais de nombreuses petites poches existent tout au long de la chaîne. Plusieurs couches mésozoïques contiennent

reichend konzentriert um brauchbare Erze zu bilden. Die Hauptlagerstätten finden sich im östlichen Jura (Fricktal, AG und Schaffhausen). Der Limonit des Valanginien wurde in der Umgebung von Vallorbe (VD) abgebaut.

In den Kalkalpen, nördlich des Aaremassivs, finden sich metamorphe Oolithlagerstätten (Chamoson VS, Erzegg BE/OW, Windgälle UR, usw.). Das Erzvorkommen des Gonzens (Sargans SG) wird von einem eisenreichen Hämatit mit stellenweise viel Mangan gebildet. Sein Ursprung ist vulkanischer und sedimentärer Art.

Die südlichen Alpen besitzen vor allem Vorkommen magmatischen Ursprungs: Siderit- und/oder Hämatitadern (Val Ferrera GR, usw.) sowie Magnetitkonzentrationen (Mont Chemin VS, etc.).

2.3 Abbautechniken

Die Rohstoffausbeutung erfolgt seit der Urgeschichte (Silex) und sie intensiviert sich mit der Entdeckung der Metallurgie. Von Anfang an gibt es Untertagebau (Schächte, Stollen, usw.) und Tagebau (Pingen, Gräben).

Die verschiedenen Systeme (Abbau, Ausbau, Transport, Wasserhaltung, Belüftung/-wetterung, Beleuchtung) verfolgen je nach Region eine unterschiedliche Entwicklung. Die Suche nach wertvollen Metallen führt zu den raffiniertesten Abbausystemen (Festgesteine, tiefe Lagerstätten). Die Einführung von Werkzeugen aus Eisen stellt sicher einen Fortschritt dar. Die Mechanisierung der Bergwerke im Lauf der Römerzeit ist wesentlich. Im 16. Jh. können wichtige Entwicklungen mit der Verwendung der Wasserkraft in Verbindung gebracht werden (cf. "De Re Metallica" von Agricola, 1556).

Weil die Eisenerze in grossen Mengen anstehen und häufig einfach abgebaut werden können (Lockergestein, Oberflächenlagerstätten), sind die frühen Gruben meist rudimentär: einfache Löcher (Erzgruben) an der Oberfläche mit unterschiedlicher Ausdehnung und Tiefe. Wenn das Erz in tieferen Schichten ansteht, wird es mit Hilfe von Schächten, welche die ins Erz gegrabenen Abbaukammern mit der Oberfläche verbinden, ausgebeutet. Von solchen Kammern können Stollen weiterführen. Häufig ist es das eindringende Wasser, welches das weitere Vordringen des Bergmannes verhindert.

2.4 Erzaufbereitung

Die Eisenerze sind selten als anstehende Roherze verwendbar. Eine Aufbereitung ist deshalb fast immer nötig, selbst wenn die angewandten Verfahren vom technischen Standpunkt aus sehr einfacher Natur sind. Meistens handelt es sich um eine mechanische Zerkleinerung mit anschliessender Auslese von Hand oder

des oolithen ferrugineuses. Localement, elles sont suffisamment concentrées pour former des minerais acceptables. Les gisements principaux se trouvent dans la partie est de la chaîne (Fricktal AG et Schaffhouse). La limonite du Valanginien a été exploitée dans les environs de Vallorbe VD.

Les Alpes calcaires, au Nord du massif de l'Aar, renferment des gisements de minerai oolithique métamorphique (Chamoson VS, Erzegg BE-OW, Windgälle UR, etc.). Le gisement du Gonzen (Sargans SG) est constitué par un minerai à hématite très riche en fer et, localement, en manganèse. Il a une origine volcano-sédimentaire.

La zone du Sud des Alpes possède principalement des gisements d'origine magmatique: veines à sidérites et/ou à hématite (Val Ferrera GR, etc.) et amas de magnétite (Mont Chemin VS, etc.).

2.3 Techniques minières

L'exploitation minière remonte à la préhistoire (silex) et s'intensifie avec la découverte de la métallurgie. Dès l'origine, des dispositifs d'exploitation souterraine apparaissent (puits, galerie, etc.) à côté des travaux à ciel ouvert (minières, tranchées). Les différentes techniques (abattage, soutènement, transport, ventilation, exhaure et éclairage) connaissent des développements divers selon les régions. C'est la recherche des métaux précieux qui permet les réalisations les plus sophistiquées (roches dures, gisements profonds). L'introduction de l'outillage en fer est certainement un progrès. La mécanisation des mines est importante au cours de l'époque romaine. Au 16^e siècle, des développements importants sont à mettre en rapport avec l'utilisation de la force hydraulique comme en témoigne le «De Re Metallica» d'Agricola (1556).

Les minerais de fer étant abondants et souvent faciles à exploiter (roches meubles, gisements superficiels), les anciennes mines sont souvent rudimentaires: de simples excavations depuis la surface (minières) plus ou moins étendues et profondes. Lorsque le minerai se trouve enfoui plus profondément, on l'exploite à l'aide de puits reliant au jour des chambres d'exploitation taillées dans le minerai. De ces chambres peuvent partir d'éventuelles galeries. C'est souvent l'eau qui arrête la progression du mineur en noyant les chantiers.

2.4 Traitements des minerais

Les minerais de fer sont rarement utilisables tels quels. Les traitements préliminaires sont presque systématiquement nécessaires, mais ils sont généralement élémentaires d'un point de vue technique. Ils se limitent bien souvent à un concassage puis à un tri, manuel ou bien par lavage à l'eau, suivi d'un chauffage préli-

- Jura tubulaire
- Tafeljura
- Jura plissé
- Faltenjura
- Bassin molassique
- Molassebecken
- Alpes calcaires
- Kalkalpen
- Massifs externes
- Zentralsmassive
- Nappes penniques et australpines
- Pennisches und osialpisches Deckengebirge
- Alpes méridionales
- Südalpen

- ohne / sans
- mit / avec
- ▽ abbau / exploitation
- Minerais pisolitiques tertiaires (altération, = sidérolithique)
- Tertiaire Bohnerz (Verwitterungslagerstätten)
- ▽ Calcaires ferrugineux (sédimentaires)
- ▽ Eisenschüssige Kalk (Sedimente)
- Minerais oolithiques du Doggers (Sédimentaires marins)
- Oolith des Doggers (Marme Sédiments)
- ▲ Hématites, Magnétites (généralment magnétiques)
- ▲ Hämatit, Magnetit (meist magnatische Lagerstätten)
- △ Sidérite et autres minerais de fer (généralment magnétiques)
- △ Sidert u.a. Fe-Erze (meist magnatische Lagerstätten)
- △ Chapeaux de fer sur grès (altération)
- △ Eisener Hut von Südrädigern (Verwitterungslagerstätten)
- + Mine de fer sitésidé uniquement par les textes
- + Urkundlich belegt Eisenergrube
- * Minerais de manganèse (généralment radiolites)
- * Manganerz (meist Radioliterze)
- ▼ Usines sidérurgiques (du moyen-âge jusqu'à 1850) avec nom de lieu
- ▼ Hüttenbetrieb (Mittelalter bis 1850) mit Ortsname

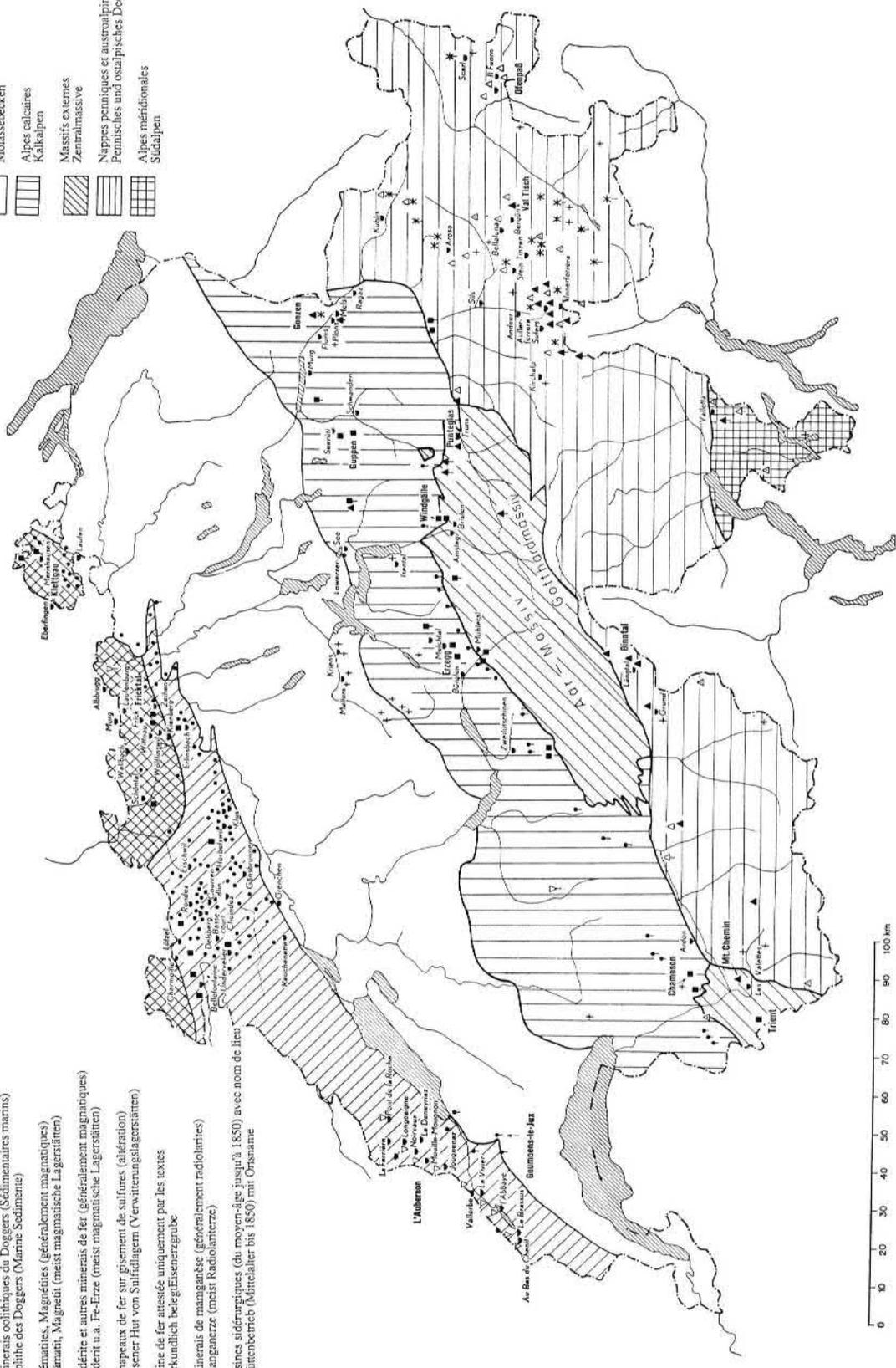


Abb. 2: Die Schweizerischen Eisen- und Manganerzvorkommen und ihre Verhüttungsorte, nach EPPRECHT 1957.
 Fig. 2: Les gisements suisses de minerais de fer et de manganèse et les usines sidérurgiques, d'après EPPRECHT 1957.

durch Auswaschen, gefolgt von einem Vorheizen, um dem Erz Wasser zu entziehen. Die Einrichtungen, welche dafür benötigt wurden, sind kaum bekannt und hinterlassen nur spärliche archäologische Spuren.

2.5 Die Bergbauspuren

Bergbaureviere können die Geländetopographie nachhaltig verändern, teilweise über grosse Flächen (in der Grössenordnung von km²). Charakteristisch sind Vertiefungen, welche teilweise verfüllt sind, (Pingen, usw.) und Anhäufungen von mehr oder weniger taubem Gestein (Halden, usw.). Häufig findet man auch ein Transportnetz (Wege, Rutschflächen, usw.) und Wasserab- oder -zuleitungssysteme (Kanäle, Schleusen, Dämme, usw.). Naturgemäss verlagert und entwickelt sich der Bergbau im Lauf der Zeit. Jüngere Arbeiten lassen ältere Spuren verschwinden. In gewissen Fällen finden sich zusätzliche Einrichtungen in Zusammenhang mit dem Bergbau (Werkstätten, insbesondere Schmieden, Lagerräume, Waschanlagen, usw.).

Die archäologische Datierung von Bergbaubefunden an der Oberfläche ist in der Regel ohne sehr aufwendige Mittel schwierig. Genaue topographische Aufzeichnungen können zur Erstellung einer Relativchronologie der sichtbaren Befunde beitragen. Unterirdische Befunde sind diesbezüglich vorteilhafter, besonders wegen der guten Erhaltung von Holz (dendrochronologische Datierung von Holzausbau).

minaire destiné à déshydrater le minéral. Les installations nécessaires à ces opérations sont peu connues et laissent sans doute peu de traces archéologiques.

2.5 Les vestiges miniers

Les exploitations minières peuvent contribuer à perturber de manière importante la topographie, parfois sur des étendues considérables (de l'ordre du km²). Elles sont caractérisées par des creux partiellement comblés (minières, etc.) et des amas de déblais plus ou moins stériles (haldes, etc.). Généralement, il y a aussi des dispositifs de circulation (chemins, plans inclinés, etc.) et des systèmes d'évacuation des eaux ou d'utilisation de la force hydraulique (canaux, écluses, digues, etc.). Par nature, l'exploitation minière se déplace et évolue dans le temps. Les travaux les plus récents oblitèrent souvent les plus anciens. Dans certains cas, des installations annexes sont associées aux mines (atelier, en particulier de forge, hangars de stockage, laverie, etc.).

La datation archéologique des vestiges miniers de surface pose généralement des problèmes difficiles à résoudre sans moyens d'investigation lourds. Les relevés topographiques précis peuvent contribuer à établir une chronologie relative des structures minières visibles. Les vestiges souterrains peuvent être plus favorables à ce point de vue, en particulier à cause de la bonne conservation des bois en milieu souterrain (datation dendrochronologique des boisages).

Erztyp Type de minéral	Lokalisierung Localité	Chemische Zusammensetzung (Mittelwert in %) Composition chimique moyenne (%)										Volumen (Tonnen) Volume (tonnes)		
		Fe	Mn	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P	S	PAF	exploité abgebaut	réserve Reserve		
SIDEROLITHIQUE														
Jura	Schaffhouse	SH	43,0	0,3	11,4	12,6	0,1	0,1	0,03	0,07	12,8	172'000	160'000	
	Dünnerthal	SO	44,0		11,8	7,9	0,1	0,1	0,06		11,0	100'000	2'000'000	
	Delémont	JU	44,0	0,3	11,5	11,0	0,1	0,1	0,02	0,10	13,5	1'530'000	2'500'000	
	Goumoëns-le-Jux	VD	12,5	0,3	50,0	18,7	0,4	0,1	0,04	0,30	8,0			
	Mormont	VD	41,0	0,2	21,5	10,5	1,6	0,3	0,30	0,25				
Alpes	Dents du Midi	VS	30,0	0,1	36,0	15,5	0,1	1,2	0,06	0,50	5,0			
OOLITHES FERRUGINEUSES														
Jura	Schaffhouse	SH	20,0	0,1	20,0	8,0	15,0	3,0	0,40	0,20	20,0		1'500'000	
	Fricktal	AG	28,0	0,3	15,0	6,5	11,6	1,9	0,50	0,16	18,5	1'350'000	70'000'000	
	Erlinsbach	AG-BE	25,0	0,3	14,0	11,0	15,0	1,0	0,30	0,20	21,0		875'000	
	Scheulte	SO	25,0	0,2	10,6	3,6	25,9		0,39	0,11	25,0			
Alpes	Erzegg	BE	38,0	0,1	14,0	10,0	4,0	2,0	0,70	0,90	11,0	150'000	1'300'000	
	Chamoson	VS	31,0	0,3	16,4	12,0	5,8	1,8	0,40	0,30	14,0	40'000	500'000	
LIMONITE DU VALANGINIEN														
Jura	Auberson	VD	19,0		4,6	16,8	28,8	2,2	0,20	0,10	10,0			
MAGNETITES														
Alpes	Mont Chemin	VS	30,0		17,0	2,0	5,0	12,5	0,10	0,30		67'000	7'000	
HEMATITES ET SIDERITES														
Alpes	Gonzen	SG	50,0	0,8	5,3	0,6	7,5	0,9	0,05	0,60	5,6	1'650'000	1'000'000	
	Val Tisch	GR	51,5	1,3	12,7	3,7	3,6	0,6	0,02	1,20	2,0	2'200	1'500	
	Val Ferrera	GR	30,0	21,0	12,0	0,2	6,2	1,5	0,10	0,20				

Abb. 3: Durchschnittliche Zusammensetzung der wichtigsten schweizerischen Eisenerze.

Fig. 3: Composition chimique moyenne des principaux minerais de fer suisses.

3 Das direkte Verfahren der Eisenerzverhüttung im Rennofen

3 La méthode directe de réduction du minerai de fer au bas fourneau

3.1 Einleitung

Die Reduktionsphase ist der wesentliche Moment im Prozessablauf: ein Teil der im Erz vorhandenen Eisenoxide wechseln in den metallischen Zustand. Wenn diese Reaktion im festen Zustand erfolgt – das heisst, das Eisen wird nicht flüssig –, handelt es sich um einen Verhüttungsvorgang im direkten Verfahren (Kap. 1.3 und 1.4). Die Trennung von Schlacke und Eisen beginnt, sobald der Schmelzpunkt der Schlacke erreicht ist. Stellt man flüssiges Gusseisen her, handelt es sich um das indirekte Verfahren der Eisenerzverhüttung (Kap. 1.6).

Im folgenden wird vor allem das direkte Verfahren abgehandelt. In der Schweiz ist es von der Eisenzeit bis ins Mittelalter das einzige archäologisch gesicherte Verfahren.

3.2 Der Rennofen (Abb. 4)

Im Rennofen muss die Reduktion der Eisenoxide und, wenn möglich, die Trennung der flüssigen Schlacke von der metallischen Masse erfolgen. Diese technische Zielsetzung lässt jedoch einen weiten Spielraum zur Entstehung einer grossen Formvielfalt mit verschiedenen technologischen Entwicklungsstadien, sowie für Anpassungen an spezifisch ortsgebundene Gegebenheiten (Erzart, Baustoffe, usw.): solche Spezialisi-

3.1 Introduction

La réduction est la phase essentielle du processus de la sidérurgie au cours de laquelle une partie des oxydes de fer contenus dans le minerai passe à l'état métallique. Au cas où cette réaction a lieu à l'état solide – le fer n'est donc pas en fusion –, il s'agit d'une réduction par la méthode directe (chap. 1.3 et 1.4). La séparation de la scorie et du métal intervient à partir du moment où le point de fusion de la scorie est atteint. Si l'on produit de la fonte à l'état liquide, il s'agit d'une réduction par la méthode indirecte (chap. 1.6). Par la suite, il sera avant tout question de la réduction par la méthode directe. C'est en effet le seul procédé attesté par l'archéologie, de l'âge du Fer jusqu'à la fin du Moyen Age en Suisse.

3.2 Le bas fourneau (fig. 4)

Le bas fourneau doit permettre la réduction des oxydes de fer et, si possible, la séparation de la masse métallique et de la scorie en fusion. Cet objectif technologique est peu contraignant et n'empêche pas le développement d'une grande diversité de ce type d'appareil aux différents stades de l'évolution technique, ainsi que des adaptations à des conditions locales spécifiques (type de minerai, matériaux de cons-

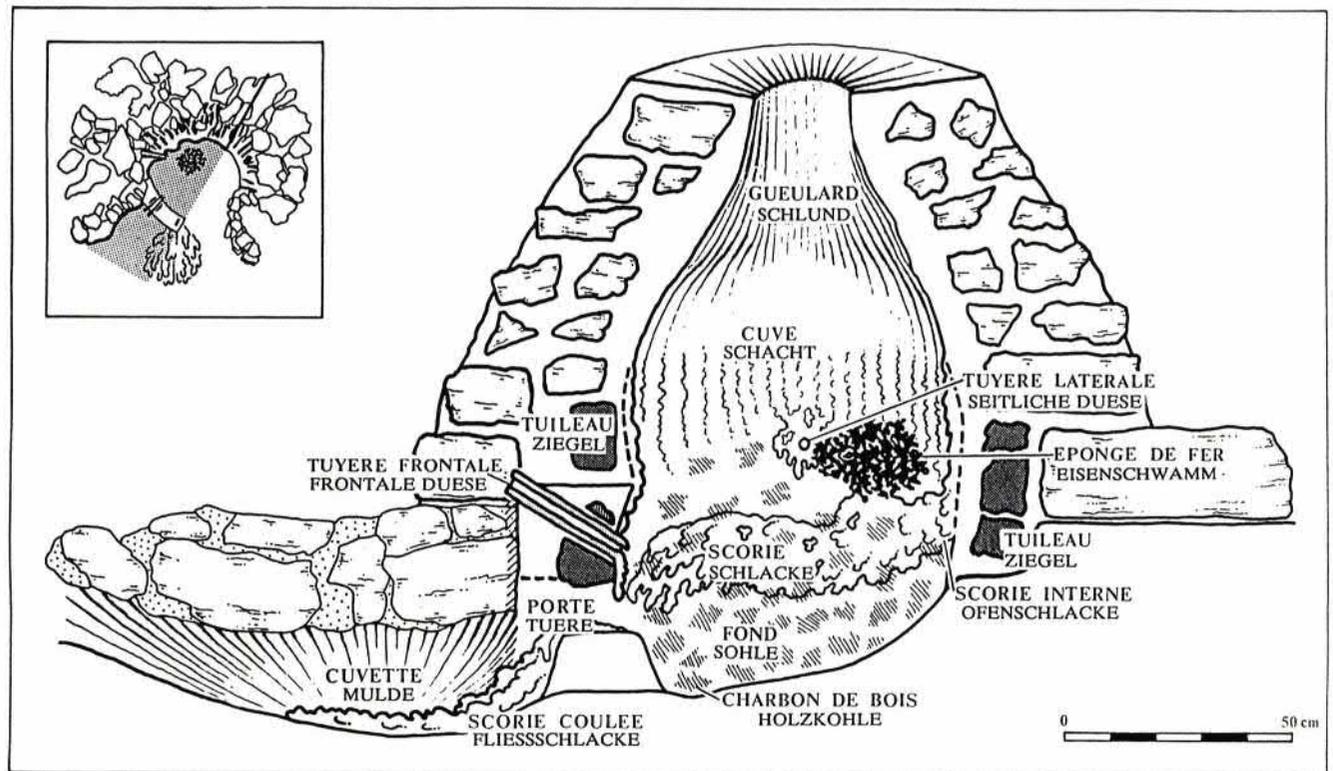


Abb. 4: Schema des Rennofens 1 von Boécourt (JU).

Fig. 4: Schéma du bas-fourneau 1 de Boécourt (JU).

sierungen können ihrerseits im Laufe der Zeit eine unabhängige Entwicklung durchlaufen (Tradition). Der Ofen wird durch eine obere Öffnung im Schacht, den Schlund, mit Erz und Brennstoff (v.a. Holzkohle) beschickt. Die Verbrennung wird durch eine oder mehrere Öffnungen aktiviert, welche eine künstliche Luftzufuhr mittels Düsen erlauben, oder durch die Ausrichtung und Höhe des Ofens, welche auf den optimalen natürlichen Zug abzielen (Kamineffekt). Eine gute Wärmeisolation erlaubt es, die Innentemperatur so zu steigern (Ofenwand, eingetiefter Ofenboden), dass Eisenoxide und reduzierende Gase in der fortlaufend sinkenden Charge vom Schacht zum Ofenbauch miteinander reagieren können. Zur Ausbildung der metallischen Masse und gegebenenfalls zur Trennung der Schlacke von derselben ist ein genügend grosses Innenvolumen nötig.

3.3 Klassifizierungskriterien

3.3.1 Trennung von Schlacke und Metall (Gefangene Schlacke oder Fliessschlacke)

Das Ausmass der Trennung von Schlacke und Metall ist ein wichtiger Parameter. Bei einer vollständigen Trennung wird das metallische Produkt rein und dicht. Bei schlechter Trennung müssen die Schlackeneinschlüsse durch ein geeignetes Verfahren entfernt werden.

Die Verhüttung in einer Grube, oder in einem Ofen mit tiefliegendem Gebläse, verunmöglicht die Abtrennung der Schlacke. Metall und Schlacke häufen sich zu einem Klumpen an.

Technisch entwickeltere Öfen weisen entweder eine Öffnung auf, durch welche die Schlacke nach aussen entfernt wird (Rennofen mit Fliessschlacken, tapped slag furnace), oder eine Grube, in welcher sich die Schlacken unter dem Schacht anhäufen (Rennofen mit gefangener Schlacke, slag pit furnace).

Fliessschlacken kommen in der Regel zusammen mit Ofenschlacken, welche im Ofeninnern erkalten, vor. Letztere können sehr verschiedenartig sein (unterschiedlich grosse Brocken oder Bruchstücke). Sie können an verschiedenen Orten im Ofen abgelagert werden.

Die Trennung der Schlacke im Ofeninnern und die Trennung durch Abfliessen nach aussen dürften zu gleichwertigen Resultaten in Bezug auf die Produktivität führen. In beiden Fällen muss der Ofengang gestoppt werden, bevor man das metallische Produkt aus dem Ofen holt.

3.3.2 Natürlicher Luftzug oder künstliches Gebläse (Abb 9)

Der Luftzug kann durch einen vom Ofenbau bewirkten Kamineffekt natürlich sein. Künstlich wird er durch ein

struction, etc.): ces adaptations peuvent d'ailleurs elles-mêmes évoluer de façon indépendante au cours du temps (tradition locale).

Le minerai et le combustible (essentiellement le charbon de bois) sont introduits par une ouverture sommitale, le gueulard. La combustion est activée soit par une ou plusieurs ouvertures permettant une ventilation artificielle à l'aide d'une soufflerie à travers la ou les tuyères, soit par l'orientation et la hauteur du fourneau favorisant un bon tirage naturel (cheminée). L'isolation thermique permet d'atteindre la température interne nécessaire (paroi, fond enterré), afin que les réactions entre oxydes de fer et gaz réducteurs puissent avoir lieu, au fur et à mesure que la charge descend dans la cheminée, puis dans la cuve.

La cuve doit offrir un volume interne suffisant pour permettre la formation d'une masse de métal et, le cas échéant, la séparation de la scorie.

3.3 Critères de classification

3.3.1 Séparation de la scorie et du métal (scorie interne ou scorie coulée)

Le degré de séparation entre la scorie et le métal est un paramètre essentiel. Si cette séparation est totale, le produit métallique sera pur et compact. Dans le cas contraire, il faudra procéder à un traitement approprié pour le débarrasser des inclusions de scorie.

La réduction en fosse – ou dans un fourneau dont l'aération est placée sur le fond – ne permet pas la séparation de la scorie. Métal et scorie s'agglomèrent en une seule masse.

Les fourneaux plus évolués techniquement prévoient soit un orifice à la base de la cuve permettant l'évacuation vers l'extérieur des scories (bas fourneau à scorie coulée, tapped slag furnace), soit une fosse permettant l'accumulation de la scorie sous la cuve (bas fourneau à scorie piégée, slag pit furnace).

Les scories coulées sont généralement accompagnées d'une certaine proportion de scories refroidies à l'intérieur du fourneau (scories internes). Celles-ci peuvent avoir des aspects variés: en blocs de taille variable ou fragmentées; elles peuvent provenir de différents endroits dans le fourneau.

En terme de productivité, la séparation interne des scories et la séparation par évacuation externe des scories semblent assez équivalentes. Dans les deux cas, il faut arrêter l'opération avant de procéder à l'extraction du produit.

3.3.2 Tirage naturel ou ventilation artificielle (fig. 9)

Le tirage peut être naturel par effet de cheminée, lequel dépend de la construction du fourneau. La ventilation

oder mehrere Blasebälge erzeugt, die Luft niedrig oder hoch einblasen.

Der Luftzug fördert die Verbrennung durch Sauerstoffzufuhr, was von entscheidender Bedeutung für das Gelingen des Verhüttungsprozesses ist. Im 19. Jh. wurde von A. Quiquerez aufgrund seiner Forschungen im Jura die Hypothese aufgestellt, dass natürlicher Zug gleichbedeutend mit archaischer Eisenindustrie sei. Dies führte zuerst zu heftigen Kontroversen, wurde sodann jedoch allgemein anerkannt. Heute wissen wir, dass der natürlichen Zug über mehrere Jahrhunderte hinweg neben künstlichen Gebläsen verwendet wird. Ein Ofen mit natürlichem Zug (durch eine oder mehrere Öffnungen in der Wand und/oder in der Ofenbrust) scheint höher zu sein als ein mit Blasebälgen betriebener Ofen. Da in ihrer ganzen Höhe erhaltene Öfen selten sind, muss diese Aussage als Arbeitshypothese betrachtet werden, deren Bestätigung anhand archäologischer Befunde noch zu erbringen ist.

Das Gebläse besteht aus einem oder mehreren Blasebälgen, welche man in eine Wandöffnung oder eine darin eingesetzte Düse einführt, entweder seitlich oder in die Ofenbrust. Ein Rennofen kann eine oder mehrere Düsen aufweisen. Im Laufe der Jahrhunderte scheinen sich die Düsen zu entwickeln. Aus Lehm hergestellt weisen sie in Länge, Breite und Höhe eine grosse Variationsbreite auf. Das Düsenloch wird im Laufe der Zeit scheinbar kleiner und erreicht höchstens noch 2,5 bis 3 cm Durchmesser am Ende der Römerzeit und im Frühmittelalter. Auf mittelalterlichen Fundplätzen werden dann aber erneut Düsenstücke mit grösseren Durchmessern gefunden. Die heute noch geringe Anzahl von publizierten Fundstellen mit genügend Düsenmaterial mahnt jedoch zur Vorsicht bei Schlussfolgerungen.

Der Bezug zwischen den beiden Gebläsesystemen sowie den beiden grossen Ofentypen (mit Fliessschlacken oder mit gefangenen Schlacken) ist nicht immer offensichtlich. Es gibt Rennöfen mit Fliessschlacken, welche mit künstlichem Gebläse funktionieren, sowie vermutlich solche, die mit natürlichem Luftzug betrieben werden. Bis heute ist unbekannt, ob diese Systemkombinationen eine räumliche oder zeitliche Entwicklung erfahren. Die Frage ist ebenso offen, was Öfen mit gefangenen Schlacken betrifft: es scheint, dass sie mit beiden Gebläsesystemen betrieben wurden. Die archäologische Datenbasis ist jedoch noch ungenügend. Es gilt anzufügen, dass das Fehlen von Düsenfragmenten nicht genügt um einen Betrieb durch natürlichen Zug zu postulieren.

3.3.3 Andere Klassifizierungskriterien

Die Baumaterialien sind den örtlichen und regionalen Vorkommen angepasst (Gesteine, Lehm, Sand, usw.). Es können auch Materialien wiederverwendet werden (römische Ziegel, Kalotten-, Fliessschlacken, usw.).

artificielle est produite par soufflerie, avec arrivée d'air basse ou haute, simple ou complexe.

Le tirage, dont le but est d'activer la combustion par apport d'oxygène, est déterminant pour le déroulement de la réduction. Au 19^e siècle, A. Quiquerez avança, sur la base de ses recherches, que le tirage naturel était synonyme d'industrie archaïque de production de fer, ce qui souleva beaucoup de polémiques, mais par la suite, ne fut plus remis en question. Aujourd'hui, l'on sait que le tirage naturel existe et perdure pendant plusieurs siècles à côté du tirage artificiel. Un fourneau à tirage naturel (par un ou plusieurs orifices latéraux et/ou par une ou plusieurs ouvertures dans la porte) semble être d'une hauteur accrue par rapport à un fourneau fonctionnant à l'aide de souffleries. Les fourneaux dont la hauteur intégrale est conservée étant très rares, cette affirmation est à considérer comme une hypothèse de travail qu'il reste à démontrer par des vestiges archéologiques.

La ventilation artificielle est constituée d'un ou de plusieurs soufflets qu'on introduit dans un orifice situé dans la paroi ou dans une pièce amovible percée (tuyère) placée soit dans le pourtour de la paroi, soit dans la partie frontale, dans les deux cas avec des variations de hauteur. On peut trouver par fourneau un ou plusieurs exemplaires. À travers les siècles, la taille des tuyères évolue: confectionnées en argile, elles sont d'une très grande diversité de longueur, de hauteur et de largeur. L'orifice du tuyau semble peu à peu diminuer de diamètre: il atteint 2,5 à 3 cm max. à la fin de l'époque romaine et au Haut Moyen Age. Par la suite, cependant, dans des fourneaux médiévaux, des pièces comportant un plus grand diamètre ont été retrouvées. Ces données sont à considérer avec prudence, vu le nombre encore restreint d'échantillons.

Le fonctionnement des deux types de ventilation dans les deux grandes familles de fourneaux (celle à scories coulées et celle à scories piégées) n'est pas toujours évident. Il existe des fourneaux à scories coulées avec soufflerie et, vraisemblablement aussi, sans soufflerie, c'est-à-dire à tirage naturel, sans que l'on puisse dire s'il s'agit d'un phénomène qui évolue dans le temps et dans l'espace. Quant aux fourneaux à scories piégées, le débat n'est pas non plus clos: les deux formes de ventilation semblent exister, mais les données archéologiques sont encore difficile à interpréter. Il convient de préciser que l'absence de tuyères sur un site ne suffit pas pour postuler d'emblée un tirage naturel.

3.3.3 Autres critères de classification

Les matériaux de construction d'un bas fourneau varient selon les ressources locales ou régionales (roches, argiles, sables etc.). Il peut s'agir aussi en partie de matériaux de récupération (tuiles romaines, scories en

Der Wandverputz im Ofeninnern wird meist sehr sorgfältig ausgeführt.

Die Ofenform scheint entscheidender für den Verhüttungsprozessablauf zu sein als die eigentlichen Baumaterialien. Es besteht wiederum eine grosse Formenvielfalt. Es gilt jedoch zu beachten, dass der meist schlechte Erhaltungszustand der aufgehenden Ofenteile die Ofenrekonstruktion erschwert und in Gegenden mit zahlreichen gut erhaltenen Befunden (z. B. der zentrale Schweizer Jura) bisher nur wenige Fundplätze untersucht wurden.

Die Grundrisse von Rennöfen weisen ebensoviele symmetrische wie asymmetrische Formen auf, deren Interpretation nicht einfach ist.

Im Allgemeinen werden Rennöfen mit Fliessschlacken mehrmals verwendet (mehrere Verputzschichten, sowie eine kleine Anzahl von Öfen im Verhältnis zu imposanten Abfallmengen). Bei den Öfen mit gefangenen Schlacken handelt es sich in der Regel um nicht wiederverwendbare Installationen. Ethnographische Modelle zeigen jedoch, dass der aufgehende Schacht beweglich sein kann (das heisst über einer neuen Ofengrube wiederverwendet werden kann).

In Schweizer Jura sind bis heute drei Ofentypen bekannt :

- Rennofen mit Gebläse und Fliessschlacken (Bellaires VD, Boécourt JU, Clérimois (F), etc.)
- Rennofen mit natürlichem Zug und Fliessschlacken (Monible BE, Lajoux JU, etc.)
- Rennofen mit Gebläse oder natürlichem Zug und Schlackenklötzen, sowie Fliessschlacken (Lajoux JU, Châtelat BE, etc.)

In Europa sind noch viele andere Ofentypen bekannt :

- Katalanischer Rennherd (Nordwestlicher Mittelmeerraum)
- Rennofen vom Typ Evenstad (Norwegen und Schweden)
- Ofen mit Gebläse und gefangener Schlacke : „slag pit furnaces“ (Nord- und Osteuropa)

Diese Aufzählung muss durch nur ausserhalb Europas bekannte Ofentypen ergänzt werden (Afrikanische, Srilankische Öfen, usw., Fig. 5).

3.4 Der Verhüttungsplatz

Der Rennofen ist nur ein Bestandteil des Verhüttungsplatzes. Der Betrieb eines solchen Werkplatzes bedingt die räumliche Organisation von verschiedenen Arbeitszonen. Häufig finden sich Erz- und Brennstofflager sowie Anlagen für ihre Aufbereitung in der Nähe des Rennofens. Hangabwärts oder einfach um den Ofen herum dehnen sich im Allgemeinen die Abfallhalden aus. Der Verhüttungsplatz liegt nicht immer fern ab von jeder Siedlung, er kann sogar Bestandteil einer Agglomeration oder eines Dorfes sein. In diesem Fall ist eine räumliche Vergesellschaftung mit anderen

forme de calotte, scories coulées etc.). Le revêtement interne de la cuve est souvent soigneusement appliqué.

L'architecture des fourneaux semble être plus déterminante pour le processus de réduction que les matériaux proprement dits. Là encore, il faut relever la grande variété morphologique existante. Notons toutefois que le mauvais état de conservation des parties supérieures des fourneaux rend en général une reconstitution délicate et que, dans des régions comptant beaucoup de vestiges intacts (p. ex. Jura), peu de sites ont été fouillés jusqu'à ce jour.

Les plans de bas fourneaux montrent autant de formes symétriques que asymétriques dont l'interprétation fonctionnelle n'est pas toujours aisée.

De façon générale, les fourneaux à scories coulées sont réutilisés à plusieurs reprises (traces de réfection sur la paroi et petit nombre de fourneaux par rapport au volume considérable des déchets).

Dans le cas des fourneaux à scories piégées, il s'agit de fourneaux en principe non-réutilisables. Des modèles ethnographiques montrent toutefois que la cheminée peut être amovible.

Actuellement, l'on connaît en Suisse, dans l'arc jurassien, trois types de bas fourneaux :

- bas fourneau avec soufflerie à scories coulées (Bellaires VD, Boécourt JU, Clérimois (F), etc.)
- bas fourneau avec tirage naturel à scories coulées (Monible BE, Lajoux JU, etc.)
- bas fourneau avec soufflerie ou tirage naturel à scories internes en bloc et scories coulées (Lajoux JU, Châtelat BE, etc.)

En Europe, bien d'autres fourneaux sont encore connus :

- bas fourneau de type catalan (Nord-ouest de la Méditerranée)
- bas fourneau de type Evenstad (Norvège et Suède)
- bas fourneau avec soufflerie à scories internes en bloc : „slag pit furnaces“ (Nord et Est de l'Europe)

Cette énumération doit être complétée par les fourneaux connus uniquement hors Europe (fourneaux africains, sri-lankais, etc., cf. Fig. 5).

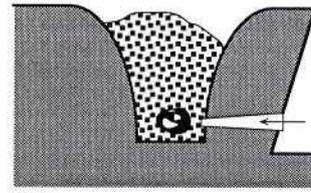
3.4 L'atelier de réduction

Le bas fourneau ne représente qu'une partie de l'atelier de réduction. Le fonctionnement de cet atelier implique une organisation spatiale de diverses aires annexes. On observe fréquemment des zones de stockage et de conditionnement du minerai et du combustible à proximité du fourneau. En aval ou simplement aux alentours de l'appareil s'étendent généralement des zones de déchets. L'atelier de réduction n'est pas nécessairement localisé loin de toute habitation. Il peut même faire partie d'une agglomération ou d'un village. Dans ce cas, d'autres activités métallurgiques (forge,

Groupe 1 / Gruppe 1
 Fourneaux sans séparation de la scorie
 Öfen ohne Abtrennung der Schlacke

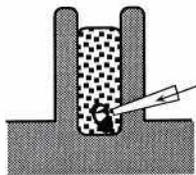


1.1

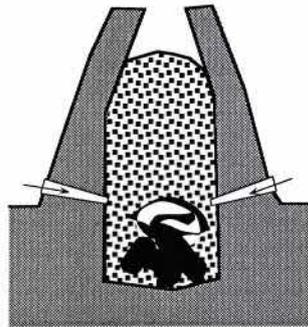


1.2

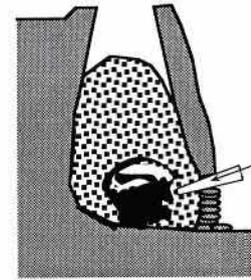
Groupe 2 / Gruppe 2
 Fourneaux avec séparation verticale de la scorie
 Öfen mit vertikaler Abtrennung der Schlacke



2.1

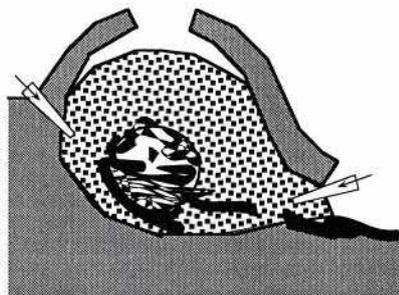


2.2

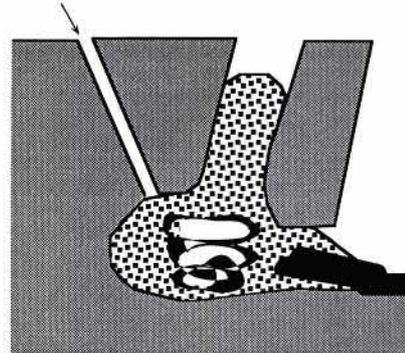


2.3

Groupe 3 / Gruppe 3
 Fourneaux avec séparation et écoulement externe de la scorie
 Öfen mit externer Abtrennung und Schlackenabstich



3.1



3.2



env. 1 m

Abb. 5: Vereinfachte Klassierung der Rennöfen.

Es gibt eine grosse Vielfalt von aus Archäologie und Ethnologie bekannten Rennöfen, aber bis jetzt keine systematische Klassierung, die verfügbar wäre. Die vorliegende Klassierung beruht auf dem Kriterium der Trennung Schlacke - Eisen. Einige Fälle sind durch schematische Schnitte dargestellt. Weitere Ordnungsmerkmale wurden nicht berücksichtigt (natürliche / künstliche Windzufuhr, Anzahl und Anordnung der Düsen usw.).

Die schematischen Darstellungen orientieren sich an folgenden Beispielen: 1.1 Rennherd, Buta, Burundi, zeitgenössisch; 1.2 Rennöfen Typ "Evenstad", Schweden, neuzeitlich; 2.1 Kleiner Rennofen mit gefangener Schlacke, Crawcwellt, Wales, späteisenzeitlich; 2.2 Grosser Rennofen mit Schlackenklötz, Scharmbeck, Deutschland und Heiligkreuzgebirge, Polen, eisenzeitlich und römisch; 2.3 Rennofen mit gefangener Schlacke und frontaler Ofenbrust, Oreh, Tschechei, römisch; 3.1 Rennofen mit Fließschlacke, Boécourt, Schweiz, frühmittelalterlich; 3.2 Rennofen mit Fließschlacke und asymmetrischem Schacht, Zelekovice, Tschechei, mittelalterlich.

Fig. 5: Classification simplifiée des bas fourneaux.

Il existe une très grande variété de bas fourneaux connus par l'archéologie et l'ethnographie mais aucune classification systématique n'est actuellement disponible. La classification présente est basée sur le critère de la séparation fer - scorie et quelques cas sont illustrés par des coupes schématiques. Les autres critères de classification ne sont pas pris en compte (ventilation naturelle / artificielle; nombre et position des tuyères, etc.).

Les schémas sont inspirés des exemples suivants: 1.1 Fosse, Buta, Burundi, actuel; 1.2 Fourneau type "Evenstad", Suède, époque moderne; 2.1 Petit fourneau à scorie piégée, Crawcwellt, Pays de Galles, fin de l'âge du Fer; 2.2 Grand fourneau à scorie piégée, Scharmbeck, Allemagne et Montagne Ste Croix, Pologne, La Tène et époque romaine; 2.3 Fourneau à scorie piégée et porte frontale, Oreh, Tchèquie, époque romaine; 3.1 Fourneau à scorie coulée, Boécourt, Suisse, Haut Moyen Age; 3.2 Fourneau à scorie coulée et cuve asymétrique, Zelekovice, Tchèquie, Moyen Age.

metallurgischen (Schmiede, usw.), handwerklichen oder häuslichen Aktivitäten möglich.

Für den Archäologen birgt die Untersuchung der Fundverbreitung eines solchen Werkplatzes zahlreiche Informationen. Die Gewichtserfassung und Lokalisierung der Abfälle ist sehr wichtig, vor allem was die bedeutungsvollen Elemente betrifft (Düsen, Fließschlacken vor dem Ofen, usw.). Um eine gute Repräsentativität der Beprobung sicherzustellen, sind Zufallsproben von allen Fundkategorien (Schlacken, Holzkohle, Erz, Sedimente) unabdingbar.

Der Verhüttungsplatz kann auf einer ebenen Fläche liegen; häufiger werden jedoch Geländeunebenheiten ausgenutzt. Dies erleichtert die Beseitigung der Produktionsabfälle und der Ofenfragmente in Richtung Abhang. Gleichzeitig kann der Ofenstandort auf die vorteilhafteste Windrichtung ausgerichtet sein, welche, auch bei künstlichem Gebläse, den natürlichen Zug beeinflusst. Nicht zuletzt erleichtert der Einbau des Ofens in eine Hangneigung die Beschickung mit Kohle und Erz durch den Ofenschlund.

Die Grösse eines Verhüttungsplatzes kann stark variieren, je nach Benutzungsdauer, Anzahl Rennöfen – gleichzeitig oder nacheinander in Betrieb –, kurz je nach dem Produktionsvolumen. Die kleinsten Plätze weisen einige Kubikmeter Abfall auf, die grössten einige tausend, bis Millionen Kubikmeter. Es versteht sich von selbst, dass ein Fundplatz je nach Grösse ganz anders angegangen werden muss. In der Schweiz erreichen nur wenige Fundplätze ein Volumen von tausend Kubikmetern, die Mehrheit umfasst einige Kubikmeter.

3.5 Die Abfälle der frühen Eisenerzverhüttung (Abb. 6)

Mehrere grosse Gruppen von Rennöfen lassen sich unterscheiden. Die Architektur des Ofens und die Durchführung des Verhüttungsvorganges haben einen entscheidenden Einfluss auf die Form und Beschaffenheit der anfallenden Schlacken. Die Forschung in diesem Bereich ist noch lange nicht abgeschlossen und bis heute können weder allgemeingültige Beschreibungen noch eine umfassende Liste der verschiedenen Schlackentypen vorgeschlagen werden. Unsere Bearbeitung des Themas beschränkt sich deshalb willentlich auf den bestbekanntesten Rennofentyp in der Schweiz und bezieht sich besonders, aber nicht ausschliesslich auf das archäologische Material der Fundstelle von Boécourt, Les Boulies (JU).

Schlacken finden sich an Erzverhüttungsplätzen in sehr grossen Mengen. Die Hügel, welche sie bilden, haben immer 1 Tonne oder mehr Gewicht (ohne menschliche Eingriffe). Auf den ersten Blick scheinen die Schlack-

etc.), artisanales ou domestiques, peuvent se dérouler dans les environs.

Du point de vue archéologique, l'étude de la répartition spatiale des vestiges liés à un atelier de réduction apporte donc de nombreux renseignements. La quantification et la localisation des déchets sont essentielles, en particulier en ce qui concerne les éléments significatifs (tuyères, scories coulées devant le fourneau etc.). Afin d'assurer une représentativité des échantillons, des prélèvements en vrac de tous les types de vestiges mobiliers (scories, charbons, minerai, sédiments) s'imposent.

Un atelier de réduction peut être installé sur une surface plane; on utilise toutefois volontiers des irrégularités du relief, afin de favoriser l'évacuation des résidus de production et des débris de construction de fourneau dans le sens de la pente. La localisation du fourneau dans un relief accidenté permet également le choix d'une exposition favorable aux vents, lesquels peuvent influencer le tirage, même s'il est essentiellement artificiel. Enfin, en encastrant un fourneau dans une pente, on facilite l'accès au gueulard pour l'introduction des charges (minerai, charbon, etc.).

La taille d'un atelier de réduction varie fortement selon sa durée d'utilisation, selon le nombre de fourneaux – successifs ou contemporains – en activité, bref, selon le volume de production. Les plus petits sites comptent quelques mètres cubes de déchets, les plus grands quelques milliers, voire millions de mètres cubes. Il va de soi que l'approche pratique d'un site varie en fonction de ce paramètre. En Suisse, le volume des sites connus n'atteint qu'exceptionnellement mille mètres cubes, la majorité ne comptant que quelques mètres cubes.

3.5 Les déchets de la réduction par la méthode directe (fig. 6)

Plusieurs grandes familles de bas fourneaux sont connues. L'architecture de l'appareil et la conduite de l'opération de réduction influencent de façon déterminante la forme et l'aspect des scories qui en résultent. Les études menées en ce domaine sont loin d'être terminées et il est impossible, dans l'état actuel de nos connaissances, de proposer des descriptions valables, ainsi qu'une liste exhaustive des différents types de scories. Notre examen se limite donc volontairement au type de bas fourneau le mieux connu en Suisse et se réfère explicitement, mais pas exclusivement, au matériel exhumé pendant les fouilles des bas fourneaux mérovingiens des Boulies, à Boécourt (JU).

Présentes en grande quantité sur les sites de réduction, – les amas qu'elles forment sont (à l'état intact) toujours supérieurs à la tonne –, les scories sont à première vue informes de par leur fort taux de fracturation, donc difficilement déterminables en caté-

Matériaux associés à la réduction du minerai de fer Zusammensetzung der Funde zur Eisenverhüttung		Fig. Abb.
Matières premières / Rohstoffe	minerai, minerai grillé, résidus de lavage / Erz, geröstetes Erz, Waschrückstände	–
	charbon de bois / Holzkohle	–
		–
Matériaux de construction des fourneaux / Ofenbaustoffe	argile, pierre, briques, etc. / Lehm, Sand, Steine, Ziegel, etc.	8
	idem ± transformés par la chaleur / idem ± durch Hitze beeinflusst	8
		8
	tuyères / Düsen	9
Déchets / Abfälle	scories coulées / Fliessschlacken	7
	scories internes / Ofenschlacken	–
	scories informes / unförmige Schlacken	–
Produits / Produkte	éponges / Eisenschwämme	–

Abb. 6: Zusammensetzung der Verhüttungsfunde.

Fig. 6: Matériaux associés à la réduction.

ken wegen ihrer starken Fragmentierung unförmig und schwer klassifizierbar zu sein. Dieser Fundkategorie wird seit kurzem immer mehr Aufmerksamkeit geschenkt. Im besonderen haben die Ausgrabungen der beiden merowingerzeitlichen Rennöfen von Boécourt im Kanton Jura gezeigt, dass eine Mengenbestimmung dieser Funde die Schätzung der Anzahl der Verhüttungsvorgänge erlaubt, ja sogar der hergestellten Eisenmengen.

Zusätzlich ermöglicht das Aussehen der Schlacken eine Unterscheidung in mehrere Typen, wie z.B. bei den Fliessschlacken, welche sich mit makroskopischen und analytischen Kriterien in mehrere Untertypen einteilen lassen (Serneels 1993, 198).

In einem Rennofen mit Fliessschlacken bilden sich vor allem Fliessschlacken, aber auch Ofenschlacken, geschmolzene Ofenwandfragmente, sowie ein Eisenschwamm, als Produkt der Erzverhüttung.

Begriffsdefinition von „Schlacke“ :

1. Fester Abfall vom Schmelzen der Erze oder von anderen metallurgischen Prozessen.
2. Fester Körper, mit gleichem Aussehen wie unter Punkt 1, der durch natürliche (Vulkanismus, Feuerbrünste) oder menschliche Aktivitäten (Abfall vom Schmelzen oder Verbrennen anderer Werkstoffen wie Steinkohle, Lehm, usw.) geschaffen wird.

Der Begriff „Schlacke“ umfasst sehr verschiedene Aspekte, deshalb ist es nicht möglich seine Anwendung auf das eine oder andere Material zu beschränken. Er muss so immer durch eine nähere Bezeichnung ergänzt werden: Eisenschlacke, Schlacke der Eisenerzverhüttung, Schmiedeschlacke, usw..

Im Rennofen werden Temperaturen zwischen 1000 und 1300°C erreicht. Metallisches Eisen ist unter diesen Bedingungen noch fest (teigig), aber ein Gemisch

gories. Depuis quelque temps, on accorde davantage d'attention à cette catégorie de trouvailles. La fouille des deux bas fourneaux mérovingiens de Boécourt (JU) a démontré qu'une quantification de ce matériel permet d'évaluer le nombre d'opérations qui ont eu lieu dans le fourneau, voire la quantité de fer produite. Par ailleurs, l'examen de l'aspect morphologique des scories permet de distinguer plusieurs types, dont les scories coulées – lesquelles se subdivisent, selon des critères macroscopiques et analytiques, en plusieurs sous-types (Serneels 1993, p. 198).

Dans un bas fourneau à scories coulées se forment principalement des scories coulées, des scories internes – en quantité moindre –, de la paroi fondue et une éponge de fer, produit de la réduction du minerai.

Définitions du terme „scorie“ :

1. Résidu solide de la fusion des minerais ou d'autres processus métallurgiques.
2. Corps solide présentant le même aspect que 1. (scories volcaniques, résidus de la fusion ou de la combustion d'autres matériaux tels que la houille, l'argile, etc.).

Le terme de «scorie» recouvre un ensemble de réalités très variées et il n'est pas envisageable de restreindre son utilisation à tel ou tel matériau précis. Il faut donc toujours l'accompagner de qualificatifs tels que : scorie de fer, scorie de réduction du fer, scorie de forge, etc.

Dans le bas fourneau, les températures atteintes sont de l'ordre de 1000 à 1300°C. Dans ces conditions, le fer métallique est solide (pâteux), mais le mélange en proportions variées d'oxydes de fer (FeO), de silice (SiO₂), d'alumine (Al₂O₃), de chaux (CaO) et d'autres composants chimiques qui constituent la gangue du minerai, est plus ou moins fusible : ce mélange forme un bain liquide qui, en se solidifiant, donne de la scorie.

mit unterschiedlichen Anteilen von Eisenoxiden (FeO), Silizium (SiO₂), Aluminium (Al₂O₃), Kalk (CaO) und anderen chemischen Bestandteilen, die aus der Gangart des Erzes stammen, ist schon mehr oder weniger geschmolzen. Diese flüssige Masse ergibt bei ihrer Verfestigung die Schlacke.

Die chemische Zusammensetzung dieser Schlacke hängt von der Chemie des Erzes, dem Beitrag der teilweise schmelzenden Ofenwand und der Holzkohlenasche ab. Sie wird ebenfalls durch die Ofentemperatur und den Teildruck des Kohlenmonoxyds (CO) (reduzierende oder oxydierende Atmosphäre im Ofenschacht) beeinflusst.

3.5.1 Fliessschlacken (Abb. 7)

Der grösste Teil der Schmelze, welche sich im Ofeninnern ansammelt, wird während des Verhüttungsvorganges durch die Ofentüre beseitigt, indem sie abfließt. Das wesentliche, morphologische Charakteristikum weist auf zähflüssiges Fließen hin: Formen, wie einzelne oder sich überlagernde Wülste, Schlangen oder Platten. Die Oberseite zeigt deutliche Fließstrukturen, wogegen die Unterseite die Unebenheiten der Unterlage widerspiegelt: Holzkohle, kleine Steine, Kiesel, usw.. Solche Schlacken sind immer stark fragmentiert.

Das unterschiedliche Aussehen der Oberfläche ist im wesentlichen bedingt durch die Viskosität (Zähflüssigkeit) der Schmelze im Moment des Fließens und durch den Fließwinkel. Die Viskosität hängt sowohl von der chemischen Zusammensetzung als auch von der Temperatur ab. Das Vorhandensein von Blasen, ihre Grösse und ihre Position werden durch die in der Schmelze gelöste Gasmenge, die Viskosität und die Abkühlgeschwindigkeit bedingt.

3.5.2 Ofenschlacken (ohne Abbildung)

Ein kleiner Teil der Schmelze bleibt im Rennofen. Sie verfestigt sich in der Masse der verbrannten Holzkohle beim Abkühlen des Ofens, oder wenn sie in den unteren Bereich des Ofenschachtes gelangt, wo die Temperatur niedrig ist. Ofenschlacken haben keine bestimmte Form. Sie schmiegen sich an die Holzkohle, dies gibt ihnen ein durchlöcherteres, ausgezacktes Aussehen.

Die betreffenden Stücke können recht massig sein (> 10 cm Kantenlänge), insbesondere wenn sie sich im Kontakt mit der Ofenwand bilden. In diesem Falle weisen sie häufig Abrisssspuren auf.

Kleinere Stücke (1 bis 5 cm Kantenlänge) „schwimmen“ in der Schachtmitte in der Holzkohle. Die Trennung von Eisen und Schlacke vollzieht sich häufig ziemlich schlecht (unvollständiger Arbeitsablauf). Das in der Schlacke zurückgebliebene Eisen oxydiert im Laufe der Zeit (Rostbildung an der Oberfläche), was den ausgezackten Charakter dieser Ofenschlacken noch unterstreicht. Im weiteren sind sie häufig noch stark magnetisch. Es kann sich dabei in gewissen Fällen um kleine Eisenschwammfragmente handeln.

La composition chimique de cette scorie dépend de la chimie du minerai, de l'apport de la paroi du fourneau qui fond partiellement, de l'apport des cendres de charbon de bois et d'un éventuel adjuvant. En outre, elle est influencée par la température du fourneau et par la pression partielle de monoxyde de carbone (CO) (atmosphère réductrice ou oxydante à l'intérieur de la cuve).

3.5.1 Scories coulées (Fig. 7)

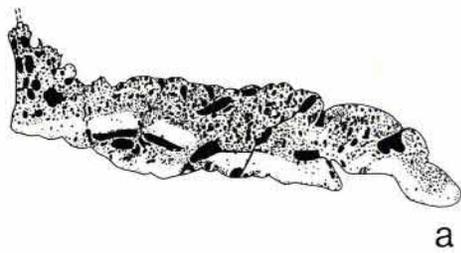
La plus grande partie du liquide formé à l'intérieur du bas fourneau est évacuée par la porte en cours d'opération. Ce liquide s'écoule et le caractère morphologique essentiel est l'expression de ce flux visqueux : formes en cordons ou en amas de cordons superposés, en tuyaux ou en plaques. La surface supérieure montre clairement ces structures de flux alors que la surface inférieure moule les irrégularités du substrat: charbon de bois, petits cailloux, graviers, etc. Ce matériel est toujours très fragmenté. Les différences de forme et d'aspect de surface sont essentiellement fonction de la viscosité du liquide au moment où on le fait couler, ainsi que de la pente de l'écoulement. Cette viscosité dépend à la fois de la composition chimique et de la température. La présence, la taille et la position des bulles dépendent de la quantité de gaz dissous dans le liquide, de la viscosité du liquide et de la vitesse de refroidissement.

3.5.2 Scories internes (sans illustration)

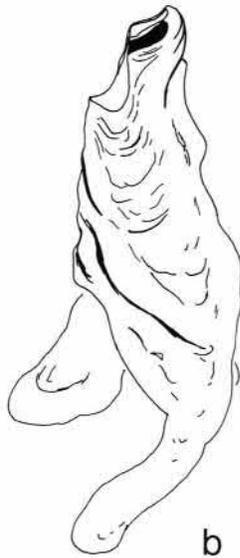
Une petite partie du liquide reste néanmoins dans le bas fourneau. Elle se solidifie lors du refroidissement final au sein de la masse de charbons de bois brûlés ou lorsque elle atteint la partie inférieure de la cuve où la température est trop faible. Les pièces solidifiées dans ces conditions n'ont donc pas de forme bien définie mais moulent parfois les charbons, ce qui peut leur donner un aspect vacuolaire et déchiqueté. Il peut s'agir de pièces assez volumineuses (plus de 10 cm d'arête), en particulier lorsqu'elles se forment au contact des parois. Elles présentent alors fréquemment des traces d'arrachement.

Des pièces plus petites (1 à 5 cm d'arête) «flottent» dans les charbons au milieu de la cuve. Souvent, la séparation fer/scorie est assez mauvaise (opération incomplète). Le métal résiduel s'oxyde au cours du temps, ce qui s'exprime par le développement de rouille en surface, accentuant encore l'aspect déchiqueté des pièces. Elles sont souvent encore fortement magnétiques. Dans certains cas, il peut s'agir de petits fragments de l'éponge de fer.

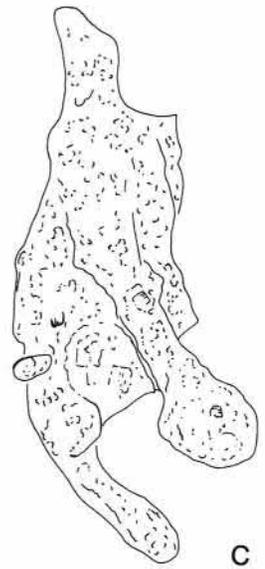
7.1



a

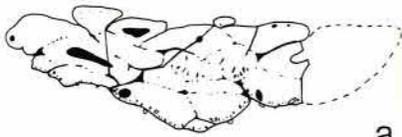


b

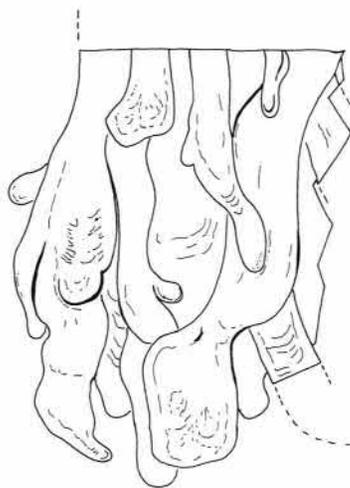


c

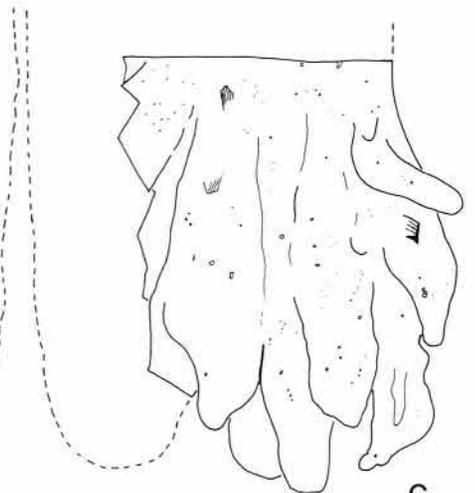
7.2



a



b



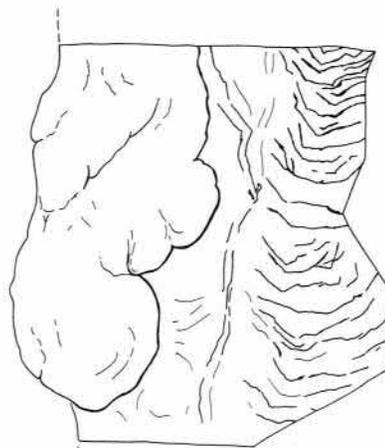
c

7.3

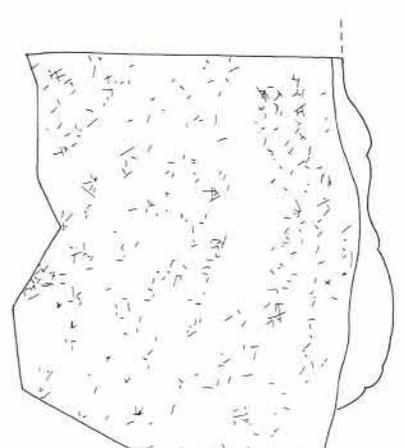


a

5 cm



b



c

Abb. 7: Fliessschlacken (Massstab 1:3).

Fig. 7: Scories de réduction coulées (échelle 1:3).

7.1 röhrenförmige Fliessschlacke /

Scorie coulée en tuyau,

Boécourt (JU), Les Boulies, n° BOE 426.

7.2 Fliessschlacke mit mehreren Strängen /

Scorie coulée en amas de cordons.

Montcherand (VD), La Léchère, n° MON 67.

7.3 Plattige Fliessschlacke /

Scorie coulée en plaque.

Les Clérimois (Yonne-F), n° CLY 1.

a: Schnitt / coupe

b: Oberseite / surface supérieure

c: Unterseite / surface inférieure

3.5.3 Ofenwandfragmente (Abb. 8)

Die Wände des Rennofens sind der Hitze einwirkung ausgesetzt. In der grössten Hitzezone, um die Düsenöffnung, schmilzt und fliesst die Wand teilweise. Man kann alle Arten von Ofenwandfragmenten finden: kaum erhitzt, gebrannt oder geschmolzen. Ihr Aussehen ändert sich ebenfalls je nach den Baumaterialien der Schachtwand (Lehm, Sand, Stein, u.a.m.). Eine Wandfragmentoberfläche ist immer der Hitze zugewandt (Verschlackung), die andere ist wesentlich weniger hitzebeeinträchtigt. Dieses Temperaturgefälle, sowie allfällige Überlagerungen mehrerer Betriebsvorgänge (aufeinanderfolgende Wanderneuerungen) können im Querschnitt beobachtet werden.

3.5.4 Eisenschwämme und Eisenschwammfragmente (ohne Abbildung)

Der Eisenschwamm bildet sich in der Holzkohlenmasse (reduzierendes Umfeld), im heissen Teil des Ofens (nahe der Düse). Aus begreiflichen Gründen ist er archäologisch schlecht bekannt: da er als Produkt des Prozesses weiterverwertet wird, findet man ihn fast nie bei Ausgrabungen. Die experimentelle Herstellung, sowie ethnographische Daten erlauben es, sich ein Bild von ihm zu machen. Es handelt sich demnach um einen inhomogenen Block, der aus verschiedenen Materialien (Metall, Schlacke, Holzkohle, Löcher), aus verschiedenen Metallen (Eisen, Stahl, phosphorreiche Zone, usw.) und aus verschiedenartig charakterisierten, oft strukturierten Zonen (kompaktes Metall, verstreutes Metall) besteht.

Das Volumen (Gewicht und Masse) eines Eisenschwammes hängt vom Ofentyp und von der Erzart ab. Das Gewicht schwankt zwischen einigen hundert Gramm und einigen zehn Kilogramm, sogar bis hundert Kilogramm in entwickelteren Öfen.

3.6 Die Dynamik des Verhüttungsvorganges : das experimentelle Vorgehen, Fragestellungen

Die archäologischen (Be)funde lassen viele Fragen unbeantwortet. Die experimentelle Rekonstruktion bildet eine gute Alternative. Sie allein ermöglicht es, verschiedene Aspekte im Zusammenhang mit der Dynamik des Ofenganges zu untersuchen und bestimmte Fragen zu beantworten :

- Beschickung : welche Grösse haben Erz und Brennstoff ? In welchem Verhältnis werden sie gemischt ?
- Gebläse : wie lange und mit welcher Kadenz arbeiten die Blasebälge ? Wozu dient das künstliche Gebläse, wenn es mit natürlichem Zug auch geht ?
- Flussmittel (Kalk, Sand, Asche, usw.) : ein Flussmittel erhöht den Ertrag; warum findet man nur selten Hinweise in archäologischen Zusammenhängen ?
- Entleerung : gewisse Experimentatoren entnehmen den Eisenschwamm im heissen Zustand, andere

3.5.3 Parois de bas fourneau (Fig. 8)

Les parois du bas fourneau subissent l'action de la chaleur. Dans la zone où celle-ci est la plus élevée, près de la tuyère, les parois fondent en partie et fluent vers le bas. On trouve toutes sortes de fragments du revêtement interne, à peine chauffés, cuits ou franchement fondus. Leur aspect varie aussi en fonction des matériaux qui constituent la cuve (argile, sable, pierre ou autres). Systématiquement, une surface a subi l'impact de la chaleur (scorification), alors que le revers est beaucoup moins attaqué. La coupe permet d'observer ce gradient de température et, éventuellement, la superposition de plusieurs fonctionnements (recharges successifs).

3.5.4 Eponges et fragments d'éponge (sans illustration)

L'éponge se forme au sein de la masse de charbon de bois (milieu réducteur), dans une partie chaude (proche de la tuyère). Fort logiquement, l'éponge ancienne est très mal connue : étant utilisée, elle n'est presque jamais retrouvée dans les fouilles et toujours difficile à identifier. Les reconstitutions expérimentales et les données ethnographiques disponibles permettent de s'en faire une idée. Il s'agit d'un bloc hétérogène comportant différents matériaux (métal, scorie, charbon, trou), différents métaux (fer, acier, zone riche en phosphore, etc.) et des zones à caractères différents (métal compact, métal disséminé); ces dernières sont souvent ordonnées.

Le volume (poids et forme) de l'éponge dépend du type de fourneau et de la nature du minerai; le poids varie entre quelques centaines de grammes et quelques dizaines de kilogrammes, voire jusqu'à une centaine de kilogrammes dans les fourneaux plus évolués.

3.6 La dynamique du processus de réduction : la voie expérimentale, les questions

Les vestiges archéologiques laissent dans l'ombre bien des questions. La voie expérimentale offre une alternative. Elle seule permet en particulier d'étudier divers aspects liés à la dynamique de l'opération et de résoudre des questions précises :

- mode de chargement : quelles tailles ont le minerai et le combustible ? En quelle proportion sont-ils utilisés conjointement ?
- gestion de la soufflerie : durant combien de temps et à quel rythme souffle-t-on ? A quoi sert la soufflerie artificielle, si le tirage naturel fonctionne aussi ?
- ajout de fondant (calcaire, sable, cendres, etc.) : en sachant que le fondant améliore le rendement, pourquoi n'est-il que rarement attesté en contexte archéologique ?

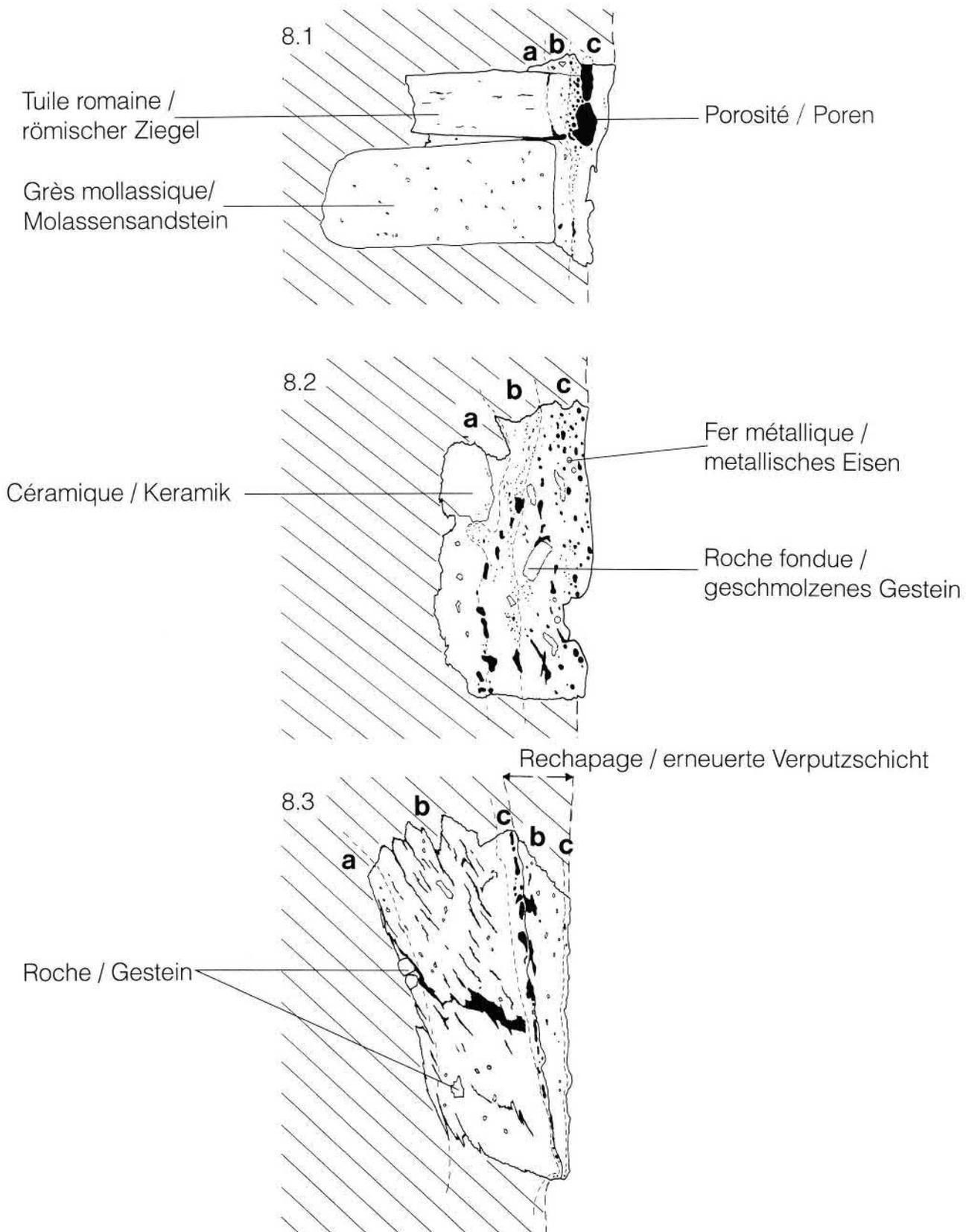


Abb. 8: Rennofenwandfragmente, Schnitt (Massstab 1:3).

Fig. 8: Parois de bas fourneau, coupe (échelle 1:3).

8.1 Ofenwand aus römischen Ziegeln, Molassensandstein und Lehmverputz / Paroi en tuiles romaines, grès molassique et chapage argileux. Ferréres (VD).

8.2 Ofenwand aus Lehm / Paroi en argile. Mont Salève (Haute Savoie-F), La Thuile 1.

8.3 sandige Ofenwand, erneuert / Paroi en sable avec rechapage. Boécourt (JU), Les Boulies.

a: gebrannt / cuit
 b: geschmolzen / fondu
 c: verschlackt / scorifié

- lassen den Ofen abkühlen, indem sie sich jeweils auf gegensätzliche Argumente abstützen; wie sah es in Wirklichkeit aus ?
- Geometrie im Ofeninnern : wie zirkulieren die Gase, wo lag der Eisenschwamm ?

- défournement : parmi les expérimentateurs, certains optent pour un défournement à chaud; d'autres, pour un défournement à froid, avec des arguments contradictoires; qu'en était-il dans la réalité ?
- géométrie interne du fourneau : où passent les courants de gaz, où était l'emplacement de l'éponge ?

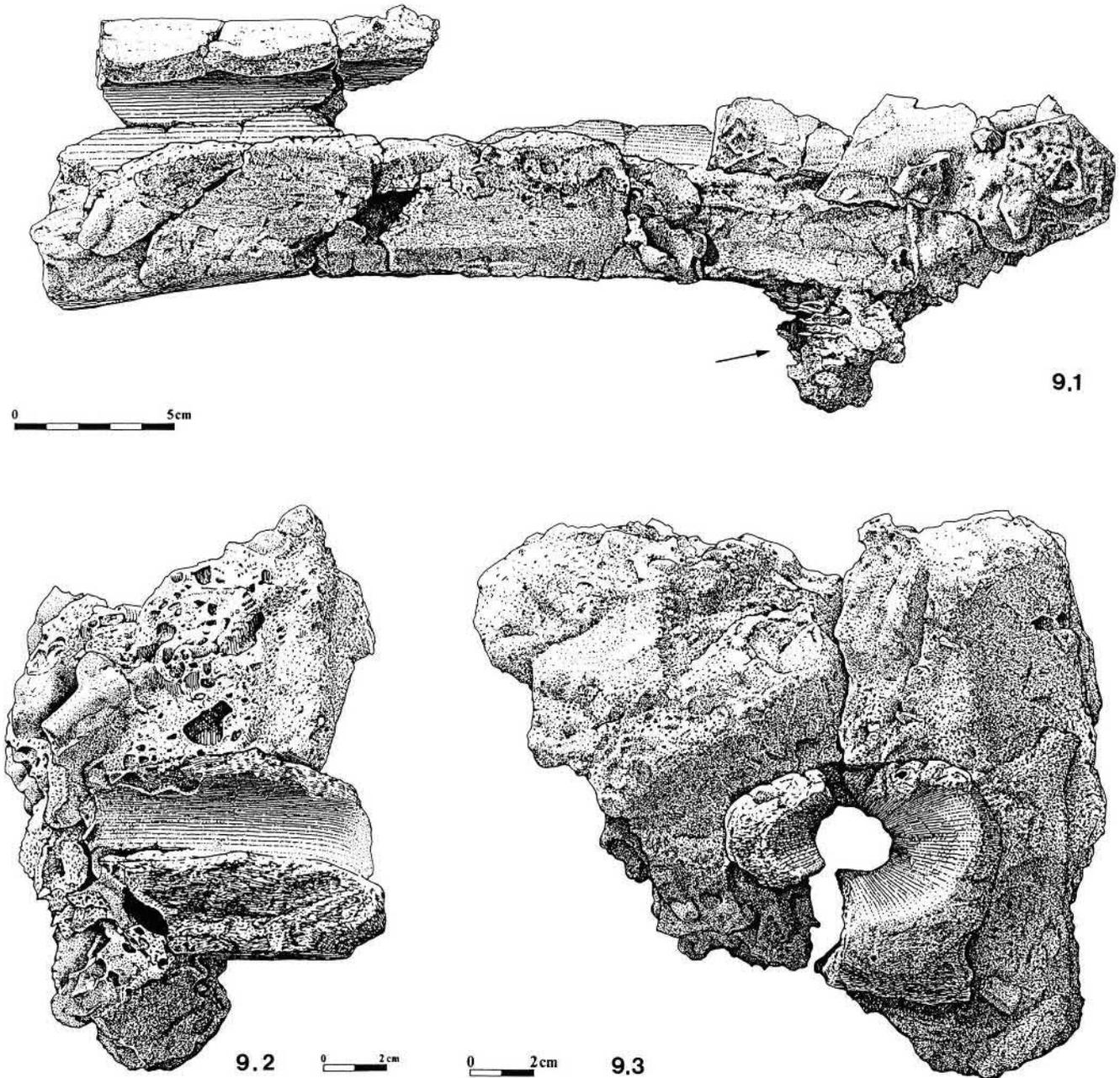


Fig. 9 : Gebläsedüsen aus Lehm

Abb. 9 : Tuyères en argile

9.1 Frontale Düse, Seitenansicht / Tuyère frontale, vue latérale. Boécourt (JU), Les Boulies, n°1.

9.2 Seitliche Düse mit verschlackter, sandiger Wand. Aufsicht / Tuyère latérale prise dans la paroi sableuse

scorifiée. Vue de profil. Boécourt (JU), Les Boulies, n°28 .

9.3 Seitliche Düse in gebrannter Ofenwand. Aussenansicht / Tuyère latérale prise dans la paroi sableuse cuite. Vue de l'extérieur. Boécourt (JU), Les Boulies, n°28 .

4 Die Weiterverarbeitung des Eisens

4 Le travail post-réduction du fer

Das Produkt der Eisenverhüttung ist im direkten Verfahren der schlackenreiche Eisenschwamm, im indirekten eine Eisenmassel. Beide sind zum Schmieden von Objekten ungeeignet, der Eisenschwamm wegen seiner Inhomogenität und des Schlackenreichtums, der Massel wegen seines übermässigen Kohlenstoffgehalts. Deshalb besteht die Weiterverarbeitung aus zwei Arbeitsschritten. Sie gehören – bis zur Einführung des Windfrischens – beide in den Arbeitsbereich des Schmiedens, denn sie benötigen verwandte Arbeitstechniken.

4.1 Ausheizen oder Frischen

Der Eisenschwamm wird nach dem Verhütten gereinigt bzw. ausgeheizt. Zu diesem Zweck wird er – ganz oder zerlegt – erhitzt und gehämmert. Dies ermöglicht es, die Schlacken – soweit vorhanden – auszutreiben und das löchrige Eisen zu kompaktieren. Aus archäologischen und ethnographischen Quellen sind verschiedene Vorgehensweisen bekannt. Der Eisenschwamm kann direkt nach dem Verhütten noch heiss weiterverarbeitet werden. Er kann aber auch zuerst abgekühlt werden. Dann kann er als Ganzes wiedererhitzt und kompaktiert oder in grosse Stücke zerlegt, erhitzt und kompaktiert werden. Er kann auch in kleine Stücke zerlegt werden, die dann unter Luftabschluss erhitzt und zusammengeschweisst werden.

In diesem Arbeitsschritt wird die Eisenqualität festgestellt und mechanisch beeinflusst. Eisen unterscheidet sich hauptsächlich in seinem Kohlenstoff- und Phosphorgehalt sowie im Gehalt an Verunreinigungen (Schlacke). Kohlenstofffreies Eisen heisst Eisen, Eisen mit Kohlenstoff ist Stahl, Eisen mit mehr als 2 % Kohlenstoff ist Roheisen. Der Kohlenstoff verleiht dem Eisen Härte und senkt seine Schmelztemperatur. Der Phosphor verursacht auch eine, wenn auch geringere, Härtesteigerung, macht jedoch das Eisen verschweissfreudig und korrosionsbeständiger. Phosphorreiches Eisen ist aber gleichzeitig kaltbrüchig, eine Eigenschaft, die es minderwertig macht. Das Eisen im Eisenschwamm ist oft inhomogen, d.h. dass Kohlenstoff oder Phosphor wie auch Schlacken sich unregelmässig verteilen, wenn auch bestimmte Materialeigenschaften vorwiegen. Je nach Grösse und Kompaktheit des Eisenschwammes wird deshalb verschieden vorgegangen.

Das getrennte und kompaktierte Eisen wird zu Halbfabrikaten ausgeschmiedet, die in Form von Barren (Spitz-, Schwertbarren, Stäbe und Stangen, usw.) in den Handel kommen oder weiterverarbeitet werden. Der geübte Schmied kann die Materialeigenschaften der Halbfabrikate durch Schlag- und Bruchtests sowie anhand der Farbe des Eisens ermitteln.

Le produit de la réduction directe du minerai de fer est une éponge de fer riche en scories, tandis que la gueuse de fonte est le résultat d'une réduction indirecte. Ces deux produits ne peuvent être directement utilisés pour forger des objets, l'éponge à cause de son hétérogénéité et des trop nombreuses scories encore présentes, la gueuse en raison de sa teneur trop élevée en carbone. Afin de rendre ces différents produits forgeables, on met en oeuvre des techniques distinctes, respectivement le raffinage et l'affinage, qui sont toutes deux considérées – jusqu'à l'introduction de l'affinage avec fusion – comme un travail de forge.

4.1 Raffinage ou affinage

Après la réduction, l'éponge de fer est épurée ou plus exactement raffinée. Dans ce but, elle est chauffée et martelée, soit en un seul bloc soit divisée en plusieurs morceaux. Cette opération permet d'évacuer les scories encore présentes et de compacter la masse de fer dans laquelle subsistent de nombreuses alvéoles. Les sources archéologiques et ethnographiques attestent l'emploi de divers procédés. Ainsi l'éponge peut-elle être cinglée à chaud directement à la sortie du bas fourneau ou être préalablement refroidie. En outre, le forgeron peut chauffer et compacter l'éponge en un seul bloc, scindée en plusieurs gros morceaux ou encore éclatée en de nombreux fragments qui seront ensuite soudés.

La qualité du fer, influencée par le martelage, sera déterminée par cette étape du travail. En fait, cette qualité est principalement définie par la teneur en carbone et en phosphore ainsi que par la proportion des inclusions. Le fer sans carbone est simplement appelé fer; s'il contient moins de 2 % de carbone, on parle d'acier, alors que si ce pourcentage est supérieur, il s'agit de fonte. Le carbone rend le fer plus dur tout en baissant son point de fusion. Le phosphore durcit aussi le fer, bien que de manière infime, mais surtout il facilite la soudure et protège de la corrosion. Néanmoins, le fer ne doit pas être trop riche en phosphore car celui-ci le rend cassant, ce qui en diminue la valeur. Bien que les propriétés du métal soient en grande partie déjà définies, le fer d'une éponge contient du carbone, du phosphore et des scories répartis de manière fort inégale. Tout l'art du forgeron réside dans le choix de la technique de raffinage qui lui permettra d'en tirer le meilleur parti.

Le fer raffiné est forgé en produits semi-finis ou lingots (lingots bipyramidaux, en épée, en barre aplatie, etc.); ceux-ci seront commercialisés et employés pour la suite du travail, à savoir le forgeage des objets finis. Le forgeron expérimenté déterminera alors les propriétés du fer en lingot aussi bien par sa couleur que par quelques tests rapides (frappe, rupture).

Die Roheisenmassel wird nach dem Verhütten erneut unter sauerstoffreichen Bedingungen geschmolzen. Sauerstoff ist notwendig, um der aus Roheisen bestehenden Massel Kohlenstoff zu entziehen und sie so in schmiedbares Eisen oder Stahl umzuwandeln. Dies nennt man Frischen. Man unterscheidet im Laufe der Zeit zwischen Herdfrischen, Puddeln und Windfrischen. Beim Herdfrischen (ab dem 12. Jh. n. Chr.) wird die Massel in einem Herd mit Holzkohlefeuerung und starkem Gebläse geschmolzen. Ein Teil des Eisens oxidiert dabei, der Kohlenstoff verbrennt teilweise. Es entsteht ein teigiger Klumpen, die Luppe. Diese wird zu einem handelbaren Halbprodukt (Stangen) ausgeschmiedet. Das Puddeln (1784 patentiert) der Massel erfolgt mit Steinkohlefeuerung im indirekt erhitzten Puddelofen. Das Eisen muss dabei umgerührt werden. Es bildet sich Schlacke, die ständig entfernt werden muss. Gegen Schluss des Verfahrens erstarrt das Eisen, da sein Schmelzpunkt mit abnehmendem Kohlenstoffgehalt steigt. Das Verfahren wird ein bis zweimal wiederholt. Die entstandenen Luppen werden im glühenden Zustand zerschnitten und unter dem Dampfhammer ausgeschmiedet. Dadurch wird das Eisen verschweisst und von Schlacken befreit. Das entstandene Eisen nennt sich Schweisseisen.

Beim 1856 patentierten Windfrischen wird in einem Ofen Sauerstoff direkt in das flüssige Metall geblasen. Das so gewonnene, schmiedbare Eisen nennt man Flusseisen.

Obwohl all diese Verfahren, die dazu dienen, aus einem Rohprodukt ein Halbprodukt herzustellen, ein zeitliches Nacheinander beinhalten, gilt es zu bedenken, dass sie bis ins 20. Jh. auch nebeneinander ausgeführt wurden.

4.2 Schmieden: Formgebung, Fertigstellung und Verzierungstechniken. Reparieren und Recyclieren

Aus dem Halbprodukt (Barren, Stange) fertigt der Schmied ein Eisenobjekt. Zuerst erfolgt die Formgebung, bei der der Schmied das Werkstück kalt und/oder warm bearbeitet und es dadurch physikalisch und mechanisch verändert (vgl. Abb. 15 und Kap. 5.1.). Durch das Schweißen verbindet er verschiedene oder gleiche Materialien miteinander. Dabei wird oftmals ein Schweißmittel (Antioxidans) benutzt, um den Abbrand zu minimieren. Er kann die Materialeigenschaften so verändern, dass sie optimal der Funktion des Endprodukts entsprechen, wenn es nötig oder gewünscht ist. Dies geschieht mechanisch durch einfaches Hämmern und thermisch durch verschiedene Wärmebehandlungen (Aufkohlen, Anlassen, Abschrecken, Glühen, Härten). Ist die Formgebung abgeschlossen und sind die gewünschten Materialeigenschaften erzielt, so folgt die Fertigstellung. Zu ihr gehören auch Ziertechniken wie das Punzen, Gravieren, Ätzen und Tauschieren, bei denen das Werkstück nicht mehr erhitzt wird. Dann folgt das Schleifen und Polieren der Werkoberfläche, das je nach Objekt äusserst aufwendig sein kann. Dazu werden Feilen, Schleifstein und Po-

L'affinage de la gueuse de fonte nécessite une atmosphère oxydante, indispensable pour réduire le taux de carbone et ainsi transformer la fonte en acier ou fer forgeable. Au cours des siècles, on différencie l'affinage sans fusion, le puddlage et l'affinage avec fusion. Lors de l'affinage sans fusion, pratiquée dès le 12^e siècle, la gueuse est liquéfiée dans un foyer d'affinage fonctionnant au charbon de bois et disposant d'une forte ventilation. Le fer s'oxyde et le carbone se consume en parallèle. On obtient alors un bloc pâteux, nommé le renard, qui sera forgé en produit semi-fini commercialisable (lingots en barre aplatie).

Le puddlage de la gueuse de fonte se pratique dès la fin du 18^e siècle, dans un four spécial dit à puddlage qui fonctionne au charbon de terre (houille). Cette technique d'affinage consiste à brasser le fer continuellement afin que les scories qui se forment s'éloignent et soient éliminées. Cette opération sera répétée deux ou trois fois, jusqu'à ce que le fer se solidifie dans le four : le point de fusion du fer augmentant avec la diminution de son taux de carbone, ce seul atteste de la transformation effectuée. Les renards ainsi obtenus sont découpés à chaud et forgés au marteau-pilon. Ce travail permet d'évacuer les dernières scories et de corroyer l'acier. Cette technique d'affinage produit un fer appelé acier puddlé.

Lors de l'affinage avec fusion, pratiquée depuis le milieu du 19^e siècle dans un four, l'oxygène est envoyé directement dans le métal liquide. Le fer forgeable ainsi obtenu est nommé acier à l'oxygène.

Tous ces procédés, qui transforment une matière première en un produit semi-fini, se succèdent chronologiquement. Néanmoins jusqu'au 20^e siècle, ils ont souvent été utilisés parallèlement.

4.2 La forge : Elaboration, finition et techniques de décoration. Réparations et recyclage.

A partir du produit semi-fini (lingot ou barre), le forgeron façonne un objet en fer. En premier lieu, il effectue une mise en forme à l'aide de différentes techniques de forge (cf. chap. 5.1 et fig. 15). Par la soudure, il assemble deux matières métalliques semblables ou différentes. Lors de cette opération et dans le but de réduire les effets de l'oxydation, le forgeron emploie souvent un décapant. Il peut également modifier les propriétés du fer afin qu'il corresponde de façon optimale à la fonction de l'objet fini, quand cela est nécessaire ou souhaité. Les techniques employées sont manuelles (simple martelage) ou thermiques (cémentation, revenu, recuit, trempe).

Une fois la mise en forme terminée et les propriétés mécaniques désirées obtenues, le forgeron effectue les travaux de finition. Ceux-ci comprennent les techniques de décoration, tels que le poinçonnage, la gravure au burin ou à l'acide et le damasquinage, techniques qui ne nécessitent pas le chauffage des pièces. L'aiguillage et le polissage de la surface de l'objet constituent le dernier travail qui peut s'avérer extrêmement long et coûteux. Pour cela on emploie des limes, des

liermittel verwendet. Nun erst kann das Objekt seinen Zweck erfüllen. Seine Benutzungszeit ist jedoch begrenzt, denn es ist durch Abnutzung, Bruch und Korrosion in seiner Existenz bedroht. Deshalb muss es immer wieder repariert werden. Lohnt eine Reparatur nicht mehr, kann es erneut als Rohstoff recyclet werden. Heute geschieht das durch erneutes Aufschmelzen. Früher wurden oftmals kleine Eisenstücke oder Bleche erneut zu Stangen und dann wieder zu Objekten ausgearbeitet. Diese mechanische Recyclierung lässt sich aber nur begrenzt durchführen, da die Qualität des Eisens darunter stark leidet.

4.3 Werkstattanlage und Arbeitsorganisation

Die minimale Werkstatteinrichtung eines Schmiedes richtet sich nach der Arbeit, die er ausführt. Häufige Elemente sind die Esse, das Tauchbecken, das Gebläse, der Amboss und die Werkzeuge, zu denen auch Schleifsteine gehören (vgl. Abb. 16 und Kap. 5.1). Größere oder arbeitsteilige Werkstätten können auch mehrere Essen oder Werkstätten nebeneinander umfassen.

Die Esse kann als Grube (Abb. 10), ebenerdiger Herd oder Hochesse in verschiedenen Materialien (Lehm, Stein, Metall) ausgeführt sein. Sie liegt bevorzugt im Dunkeln d.h. unter Dach, was die Beobachtung der Farben des Eisens während der verschiedenen Wärmebehandlungen erleichtert. Je nach ausgeführter Arbeit unterscheidet sie sich auch in Grösse und Form. Moderne Essen verfügen über ein Vertikalgebläse, das die Luft von unten in die Esse bläst. Bis ins Spätmittelalter waren Horizontalgebläse üblich, die die Luft

pierres et des meules à aiguiser ainsi que des matières organiques.

Maintenant l'objet est prêt à remplir sa fonction. Son temps d'utilisation sera cependant limité dans le temps, car il s'use, se casse fréquemment et se corrode toujours. C'est pourquoi, les objets en fer doivent être régulièrement réparés, voire recyclés comme matière première si une réparation n'est plus possible. Aujourd'hui le recyclage passe par une nouvelle fusion du métal, mais autrefois, l'on forgeait de nouvelles barres à partir de différents morceaux de fer. Cette technique présente néanmoins un désavantage important, à savoir la dégradation de la qualité du fer.

4.3 Aménagement de l'atelier et organisation du travail.

Le forgeron agence son atelier en fonction du travail qu'il doit exécuter. Les aménagements les plus fréquents sont le bas foyer, le bassin pour la trempe et la ventilation, accompagnés de l'enclume et des différents outils parmi lesquels les pierres à aiguiser (cf. chap. 5.1 et fig. 16). Certains ateliers de grande dimension ou aménagés pour que différents travaux puissent y être pratiqués, disposent de plusieurs bas foyers voire de plusieurs pièces (ou ateliers) juxtaposées. Le bas foyer peut être une fosse (fig. 10), un foyer aménagé au niveau du sol ou un foyer surélevé. Il est construit avec différents matériaux, tel que l'argile, la pierre ou le métal. Sa taille et sa forme varient également en fonction du travail du forgeron. Il est généralement abrité sous un toit, car l'ombre facilite l'observation des couleurs que prend le fer durant les différents traitements thermiques qui peuvent lui être appliqués. Les bas foyers modernes disposent d'une ventilation verticale, qui

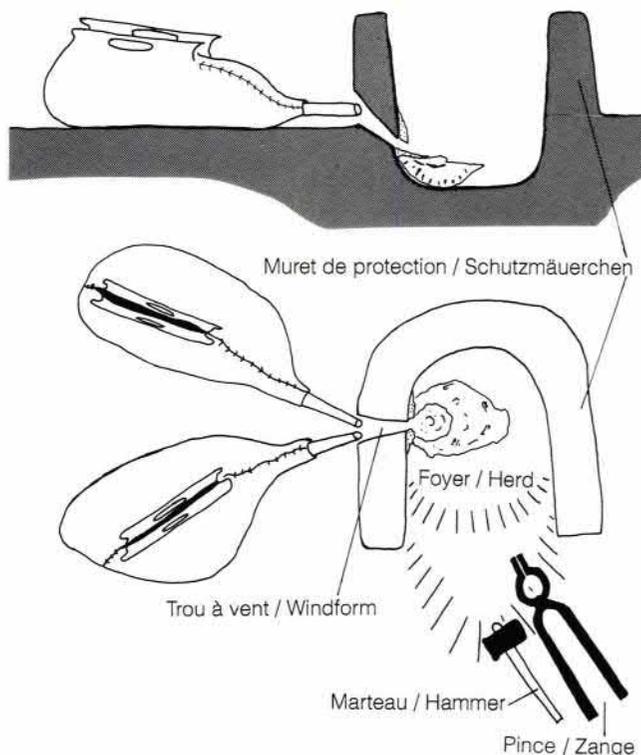


Abb. 10: Schema eines Ausheizherdes und / oder einer Schmiedeeesse.

Fig. 10: Schéma d'un bas foyer pour le raffinage et / ou le forgeage du fer.

von der Seite in die Esse bringen. Im Zusammenhang mit Lehmesen sind hauptsächlich Windformen als Luftenlass in die Esse belegt, aber auch Düsenziegel, Düsen und Essesteine. Moderne Schmiedeanweisungen legen es nahe, dass der Durchmesser der Windform je nach Grösse der üblicherweise bearbeiteten Gegenstände variiert (2-6 cm). Zum Blasen wurden ein oder zwei Blasebälge benutzt. Die Mechanisierung des Blasebalgs neben der des Hammers im Laufe des Mittelalters führte zu einer grossen Produktionssteigerung in der Schmiede. Die Installationen geben zumeist keine Auskunft darüber, ob in einer Esse geschmiedet oder ausgeheizt wurde, denn sie eignen sich für beide Arbeitsvorgänge. Neuzeitliche Frischanlagen unterscheiden sich jedoch deutlich von Schmieden.

Der Amboss kann aus Metall, Stein oder Holz bestehen. Sein Standort sollte mehr Licht aufweisen als die Esse, auch wenn direktes Sonnenlicht nicht immer erwünscht ist.

Die Arbeitsorganisation der beiden Schritte der Weiterverarbeitung (Ausheizen bzw. Frischen und Schmieden) ist unterschiedlich. Das Ausheizen und Frischen kann sowohl am Verhüttungsplatz als auch andernorts geschehen. Als Handelsgut ist der Eisenschwamm jedoch wenig bekannt, vielmehr werden Gebiete ohne eigene Verhüttungstätigkeit häufig durch Barren mit Eisen versorgt. In Gebieten mit eigener Verhüttung ist aber die Weiterverarbeitung von Eisenschwämmen in der Schmiede durchaus sinnvoll. Der Massel eignet

souffle l'air depuis le bas directement dans le foyer. Jusqu'au Bas Moyen Age, ils disposaient au contraire d'une ventilation horizontale, qui amène l'air dans le foyer par le côté. Dans les foyers en argile, les arrivées d'air attestées sont principalement des trous à vent, mais également des tuyères, des briques et des pierres faisant office de tuyère. Les forgerons modernes recommandent de varier le diamètre du trou à vent (2-6 cm) en fonction de la taille des objets habituellement forgés. Pour ventiler, un ou deux soufflets sont nécessaires. Au cours du Moyen Age, la mécanisation du soufflet, en même temps que celle du marteau, conduit à une importante augmentation de la production. Les foyers peuvent être employés aussi bien pour la forge que pour le raffinage. Actuellement, la distinction est très nette ; cependant la plupart du temps, les fouilles archéologiques ne livrent aucun renseignement sur la fonction précise des foyers découverts.

L'enclume peut être en métal, en pierre ou en bois. Son emplacement devrait être mieux éclairé que le bas foyer, néanmoins la lumière directe du soleil est aussi à éviter.

L'organisation du travail qui suit la réduction, à savoir le raffinage (ou l'affinage) et le forgeage, diffère. Ainsi le raffinage et l'affinage peuvent être effectués aussi bien sur le lieu de réduction que sur un autre site. Le commerce du fer s'effectue essentiellement sous forme de lingot (l'éponge semble être un produit commercial très peu courant), aussi bien dans les régions productrices que non productrices de fer. Par sa for-

Matériaux associés au travail du fer Materialien zur Eisenverarbeitung		Fig. Abb.
Matières premières / Rohstoffe	éponges, loupes, barres, vieux fer / Eisenschwämme, -luppen, -barren, Alteisen	–
	charbon de bois / Holzkohle	–
	sable, argile, etc. / Sand, Lehm, usw.	–
Matériaux de construction des foyers / Feuerstellenbaustoffe	argile, pierre, briques, mortier, métal, etc. / Lehm, Sand, Ziegel, Mörtel, Metall, usw.	–
	idem ± transformés par la chaleur / idem ± durch Hitze beeinflusst	–
	tuyères, trous à vent / Düsen, Windformen	13
Déchets / Abfälle	scories en forme de calotte / Kalottenschlacken	12
	scories informes / unförmige Schlacken	–
	scories argilo-sableuses, souvent en goutte lehmig-sandige Schlacken, häufig tropfenförmig	–
	petites coulures de scorie / kleine Schlackenflüsse	–
	battitures lamellaires et globulaires / kugeliger und schuppiger Hammerschlag	14
	ébauches, ratés, chutes	14
	Halb-, Fehlfabrikate, Abfallstücke	14
Produits / Produkte	loupes, barres, lopins / Luppen, Barren, usw.	29
	objets / Objekte	17

Abb. 11: Zusammensetzung der Ausheiz- und Schmiedeabfälle.

Fig. 11: Matériaux associés à la forge et le raffinage.

sich schon von der Form her zum verhandeln, es wurden jedoch hauptsächlich Halbfabrikate gehandelt. Oftmals trifft man in Schmieden aber auch Spuren anderer Handwerke an, etwa der Buntmetall-, Leder-, Bein- oder Holzverarbeitung. Da viele Eisengegenstände nicht nur aus Eisen bestehen, sondern Bestandteile (Griffe) aus andern Materialien aufweisen, sollte dies nicht ausser acht gelassen werden.

4.4 Der Umgang mit Schmiedefunden und -befunden; ihre Aussagemöglichkeiten

Wie die obigen Ausführungen zu zeigen versuchen, ist die Einordnung der Betriebe der Eisenverarbeitung komplex. Ihre Definition hängt sowohl vom globalen Stand der Technik, als auch von regionalen Gepflogenheiten ab. Markt, Sozialstatus und Kapital beeinflussen Ausführung und Zweck. Der Archäologe steht Ruinen und Abfällen gegenüber, die nur dann ein Maximum an Informationen preisgeben werden, wenn er sie in ihrer Gesamtheit betrachten kann. Die Befunde zu den Schmieden sind in der Regel spärlich. Zumeist bestehen sie nur aus einer Feuerstelle, im Glücksfall einem Amboss oder einem Tauchbecken. Um so wichtiger sind deshalb die damit kombinierten Abfälle. In den Werkstätten finden sich geringe Mengen von grossen Abfällen, dafür Holzkohle, Hammerschlag, Schrott und kleine Schlackenstücke neben Werkzeugen und Barrenfragmenten. Grosse Mengen von Schlacken finden sich in Deponien ausserhalb der Werkstätten. Kalottenschlacken sind die Leitform der Schmiedeabfälle, neben Tropfenschlacken und – je nach Baumaterial der Esse – Herdwandbestandteilen aus Lehm. Die Zusammensetzung und der Umfang dieser Abfälle, sowie die makroskopischen, mikroskopischen und chemischen Eigenschaften der Einzelstücke tragen entscheidend dazu bei, die Art des weiterverarbeitenden Schmiedebetriebs näher definieren zu können.

4.5 Schmiedeabfälle

Manchmal finden sich an Plätzen mit Eisenverarbeitung bis 100 kg Schmiedeschlacken. Ausnahmsweise können es aber auch einige Tonnen sein. Die Kalottenschlacken stellen den gewichtsmässig grössten Teil der Schmiedeabfälle dar. Nur sie haben innerhalb der Schmiedeabfälle eine bestimmte Form. Unter den Abfalltypen gibt es verschiedene Mischformen, die sich keinem Typ zuordnen lassen. Viele Schlacken werden zerschlagen gefunden, so dass sie nur mit etwas Erfahrung dem einen oder andern Typ zugeordnet werden können (die möglichen Abfallformen sind in Abb. 11 aufgeführt).

me la gueuse de fonte s'adapterait déjà mieux à une commercialisation, pourtant la vente portait essentiellement sur des produits semi-finis.

Souvent on rencontre dans les forges des traces d'autres activités artisanales, tel que le travail des alliages cuivreux, du cuir, de l'os ou du bois. Ceci paraît normal lorsque l'on sait que de nombreux objets ne sont pas constitués uniquement de fer, mais également d'autres matériaux (pour les manches ou les étuis p. ex.). C'est pourquoi les archéologues devraient être attentifs à cette pluralité lors de la fouille d'une forge.

4.4 Les découvertes de forge et les analyses des résultats : hypothèses.

Comme les éléments exposés ci-dessus tentent de le démontrer, l'organisation des ateliers qui s'occupent du travail post-réduction est complexe. Celle-ci dépend aussi bien des connaissances techniques générales que des habitudes régionales. Le marché économique, le statut social du forgeron et les fonds qu'il a investis influencent le but recherché et la réalisation effectuée. L'archéologue met au jour des structures à l'état de ruine et des déchets ; pour tirer un maximum d'informations de ces vestiges, il convient de les observer dans leur globalité. Les structures de forge sont généralement peu abondantes : le plus souvent on ne retrouve que le foyer, parfois une enclume et un bassin pour la trempe. C'est pourquoi les déchets découverts en association se révèlent particulièrement importants. A l'intérieur de l'atelier, on ne met au jour, mis à part des outils et des fragments de lingot, que de petites quantités de déchets, tel que du charbon de bois, des battitures, des scories ou des morceaux de fer à récupérer. Les scories, dans leur immense majorité, ont été déposées à l'extérieur de l'atelier, dans des dépotoirs. Les déchets de forge sont parfois très caractéristiques, telles les scories en calotte, les scories en forme de goutte et – selon le matériau de construction du foyer – les fragments de paroi de foyer en argile cuite. Néanmoins, la composition et le volume de ces déchets, ainsi que leurs propriétés macroscopiques, microscopiques et chimiques apportent une contribution décisive lors de la détermination de la méthode de travail post-réduction utilisée.

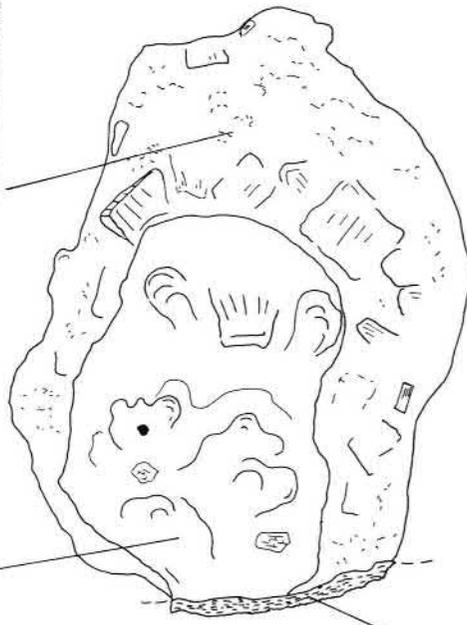
4.5 Les déchets de forge

Le poids des scories de forge mises au jour peut varier fortement, de quelque kilogrammes à, exceptionnellement, quelques tonnes.

De nombreuses scories de forge sont retrouvées cassées, si bien que leur classification typologique demande souvent une certaine expérience. De plus, certains déchets ne peuvent être classés car ils présentent une forme mixte et possèdent des caractéristiques de différents types. Les scories les plus importantes, tant par leur volume que par leur poids, sont celles qui présentent une forme de calotte (pour la composition des déchets de forge, voir fig. 11).

12.1 Bourrelet siliceux vitreux / verglaster siliziumhaltiger Wulst

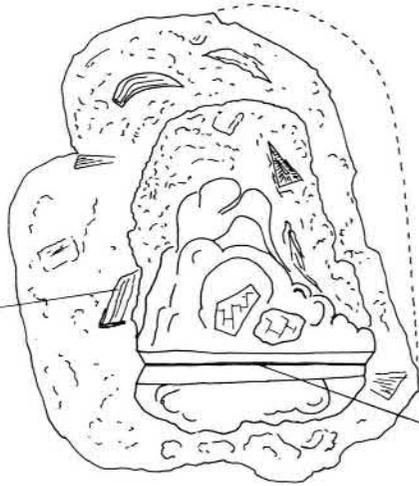
Surface rouillée déchiquetée / rostige Oberfläche



Bord du bas-foyer / Rand des Ausheizherdes

12.2

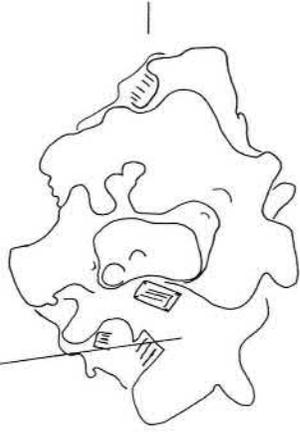
Empreinte de charbon de bois / Holzkohleabdruck



Trace d'outil / Werkzeugabdruck

12.3

Surface vitreuse / glazige Oberfläche



Matrice claire (verre siliceux) / helle Grundmasse (siliziumhaltiges Glas)

Roche / Gestein



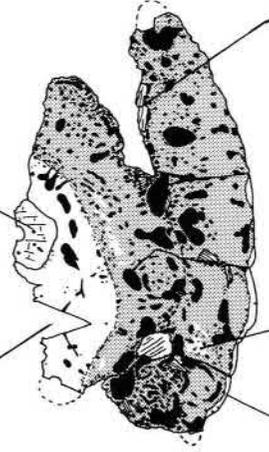
Fer métallique / metallisches Eisen

Porosité radiaire / radiale Poren

Matrice grise (Fayalite) / graue Grundmasse (Fayalit)

Niveau sableux / Sandband

Roche / Gestein



Charbon de bois / Holzkohle

Fer métallique / metallisches Eisen

Matrice gris-jaune (Fayalite) / graugelbe Grundmasse (Fayalit)

Roche partiellement fondue / teilweise geschmolzenes Gestein



Abb. 12: Kallotenschlacken, Aufsicht und Schnitt (Massstab 1:3).

Fig. 12: Scorries en forme de calotte, sur face supérieure et coupe (échelle 1:3).

12.1 Ausheizen / raffinage. Boécourt (JU), Les Boulies, n° 515.

12.2 Ausheizen, Doppelkalotte / raffinage, calotte double. Baulmes (VD), Forel / St.André, n° BAU 2.

12.3 Schmieden / forge. Marsens (FR), n° MRS 32.

4.5.1 Kalottenschlacken (Abb. 12)

Die typischen Merkmale einer Kalottenschlacke sind ihre ovale Form, eine flache bis eingedellte Oberfläche, die einen verglasten Wulst aufweisen kann und eine gewölbte Unterseite. Deshalb wird sie vereinfachend konvex-konkav genannt. Oftmals rostet sie. Das Gewicht variiert zwischen 50 g und 5 kg. Einem Teil der Kalotten haften noch Essereste aus Lehm an, die sich hauptsächlich an der Seite, jedoch auch auf der ganzen Unterseite finden können. Andere sind bucklig ausgeformt, da sie sich frei in der Holzkohle der Esse gebildet haben.

Im Innern können die Schmiedeschlacken dicht oder blasig sein, einförmig oder geschichtet. Die Luftblasen sind zur Oberseite ausgerichtet. Grössere und kleinere Metalleinschlüsse sind häufig. Chemisch handelt es sich um Eisensilikatschlacken, d.h. dass Eisen und Silizium ihre Hauptbestandteile sind. Der Eisenanteil liegt zwischen 50-90 %. Die Unterscheidung zwischen Schmiede- und Ausheizschlacken erfolgt chemisch und wird an Hand der für das verhüttete Erz typischen Spurenelemente in den Kalottenschlacke festgestellt.

Die Kalottenschlacken bilden sich aus der Oxydationsschicht (Abbrand) des in Bearbeitung stehenden Eisenwerkstücks, der Holzkohle und den durch die Hitze überbeanspruchten Herdinstallationen (Lehm, Sandstein, Erde) sowie den Antioxydantien (Lehm, Sand, Kalk, Eisenspäne, Asche und Gemische dieser Materialien, heute Borax), die der Schmied benutzt, um den Abbrand zu minimieren. Beim Ausheizen kommt dazu noch Verhüttungsschlacke aus dem Eisenschwamm. Je nach ausgeführter Schmiedearbeit ist der entstehende Schlackenanteil grösser oder kleiner. Bei der Herstellung kleiner, einfacher Gegenstände (Nägel, Fibeln) entsteht wenig Schlacke, da der Abbrand gering ist. Die Herstellung grosser, komplexer Gegenstände (damaszierte Schwerter) führt hingegen zu enormen Materialverlusten (in diesem Fall wird die Ausgangsmenge Eisen von einem Schwertschmied als 3 mal höher eingeschätzt als das Gewicht des Endprodukts).

Eine Schlacke wird solange in der Esse belassen, als sie die Arbeit nicht stört. Die Herstellung eines Objekts kann also – wie bei der Schwertproduktion – mehrere Schlacken erzeugen, oder – wie bei der Nagelherstellung – ein Teil einer Schlacke sein.

4.5.2 Tropfenschlacken

Sie sind unförmig und haben ein glasiges Äusseres. Ihr Inneres ist porös. Sie rosten nicht. Sie zerbrechen leicht und konzentrieren sich oftmals im Umkreis der Esse. Sie entstehen zur Hauptsache aus geschmolzenen Essebestandteilen, aber auch aus geschmolzenen Antioxydantien.

4.5.1 Les scories en forme de calotte (fig. 12)

Une scorie en calotte, également qualifiée de convexe-concave, se reconnaît à sa forme ovale, à sa surface plate ou concave, parfois agrémentée d'un bourrelet vitrifié, et finalement à sa face inférieure bombée. D'un poids variant entre 50 g et 5 kg, elle se corrode car elle contient souvent des inclusions de fer de taille variable. Un placage argileux, provenant des parois du foyer, adhère parfois à la calotte, généralement sur la face latérale, plus rarement sur toute la face inférieure. D'autres scories au contraire présentent des faces bosselées, attestant de leur formation au centre du charbon de bois du foyer. L'intérieur de ces scories de forge peut être stratifié ou non, dense ou poreux ; les pores s'orientent alors vers la surface. De plus ou moins grandes inclusions de métal sont fréquentes. L'analyse chimique révèle qu'il s'agit de scories de silicate de fer, c'est-à-dire que les principaux constituants sont du fer (50 à 90 %) et de la silice. La présence dans les scories en calotte d'éléments traces typiques du minerai réduit permet de différencier les scories de forge de celles de raffinage.

Les scories en calotte sont formées de différents éléments présents dans le foyer de forge : la couche d'oxydation perdue par l'objet en fer au cours des chauffes successives, le charbon de bois, l'argile, le grès ou la terre employée pour la construction du foyer et que la chaleur soumet à des efforts excessifs, ainsi que les antioxydants que le forgeron utilise afin de minimiser l'oxydation (argile, sable, calcaire, limaille de fer, cendre et mélange de ces matériaux, aujourd'hui borax). Dans les scories de raffinage, en plus de tous les éléments que l'on vient d'évoquer, on trouve également des éléments de scories de réduction provenant de l'éponge de fer.

La quantité de scories produites dépend des objets forgés. Ainsi, lors de la fabrication de petits objets (clous, fibules, etc.), l'oxydation est faible et donc les scories peu nombreuses. Au contraire, le forgeage d'objets complexes et de grande dimension provoque d'importantes pertes de matériau : on estime qu'au cours de la fabrication d'une épée damassée, la quantité de fer perdue équivaut à trois fois le poids du produit fini. Les scories sont laissées dans le bas foyer aussi longtemps qu'elles ne dérangent pas le travail. Un objet de grande taille, une épée par exemple, peut produire de nombreuses scories, tandis qu'il faudra forger plusieurs clous pour ne produire qu'une seule scorie.

4.5.2 Les scories en forme de goutte

Elles sont informes et présentent une surface extérieure vitrifiée. Leur intérieur est poreux. Elles ne rouillent pas. Elles se cassent facilement et se concentrent souvent sur le pourtour du foyer. Elles sont constituées principalement de fragments de paroi de foyer fondus, mais également d'antioxydants fondus.

4.5.3 Herd-/Essewand (Abb. 13)

Der Lehmverstrich der Essenmulde – soweit vorhanden – und vorallem des Hitzeschilds vor dem Blasbalg wird Herdwand genannt. Vor dem Blasbalg sind es oftmals Platten, die teilweise aufgewölbt sind, mit kreisrunden Löchern, deren Durchmesser zwischen 2–4 cm variiert. Diese Löcher, durch die die Luft des Blasbalgs in einem gerichteten Strahl in das Feuer gelangt, nennt man Windform. Daneben gibt es in Essesteine eingesetzte, kreisrunde Lehmplatten mit Loch. Denselben Zweck erfüllen in der Eisenzeit und in römischer Zeit auch Düsenziegel.

4.5.4 Hammerschlag und Metallfragmente (Abb. 14)

Beim Glühen in der Esse oxydiert das Eisen, es bildet sich abfallender Hammerschlag (Zunder). Der Materialverlust, den das Eisen durch das Abspringen des Hammerschlags erleidet, heisst Abbrand. Der Grossteil des Hammerschlags findet sich jedoch nicht in der Esse, sondern rund um den Amboss. Während des Hämmerns des heissen Eisens springen immer wieder kleine Metallplättchen weg, deshalb der Name Hammerschlag. Weiterer Hammerschlag entsteht dadurch, dass der Schmied das Werkstück am Amboss oder Esserand abschlägt (abzundern), um die Ober-

4.5.3 Les parois de foyer (fig. 13)

Par paroi de foyer, on entend le revêtement argileux du bas foyer et du mur protégeant le soufflet. Ce dernier est souvent constitué de plaques partiellement bombées, percées d'un trou circulaire dont le diamètre varie entre 2 et 4 cm. Ces trous, au travers desquels l'air du soufflet est dirigé dans le feu, sont appelés trous à vent. Parallèlement on trouve dans les creusets de foyer une plaque circulaire percée d'un trou. Les tuyères en briques remplissaient la même fonction à l'âge du Fer et à l'époque romaine.

4.5.4 Les battitures et les petits morceaux de ferraille (fig. 14)

Pendant les différentes chauffes, le fer s'oxyde dans le foyer ; il se forme alors de la calamine qui tombe sous les coups du marteau (les battitures). Ce qu'on appelle la perte au feu, c'est justement la quantité de fer perdue au travers de ces battitures. La majeure partie d'entre elles ne se retrouve pas dans le bas foyer, mais sur le sol de la forge, autour de l'enclume. En effet, pendant le martelage du fer chaud, de petites plaques de fer «sautent» toujours, d'où d'ailleurs leur nom allemand de «Hammerschlag». D'autres battitures voient le jour

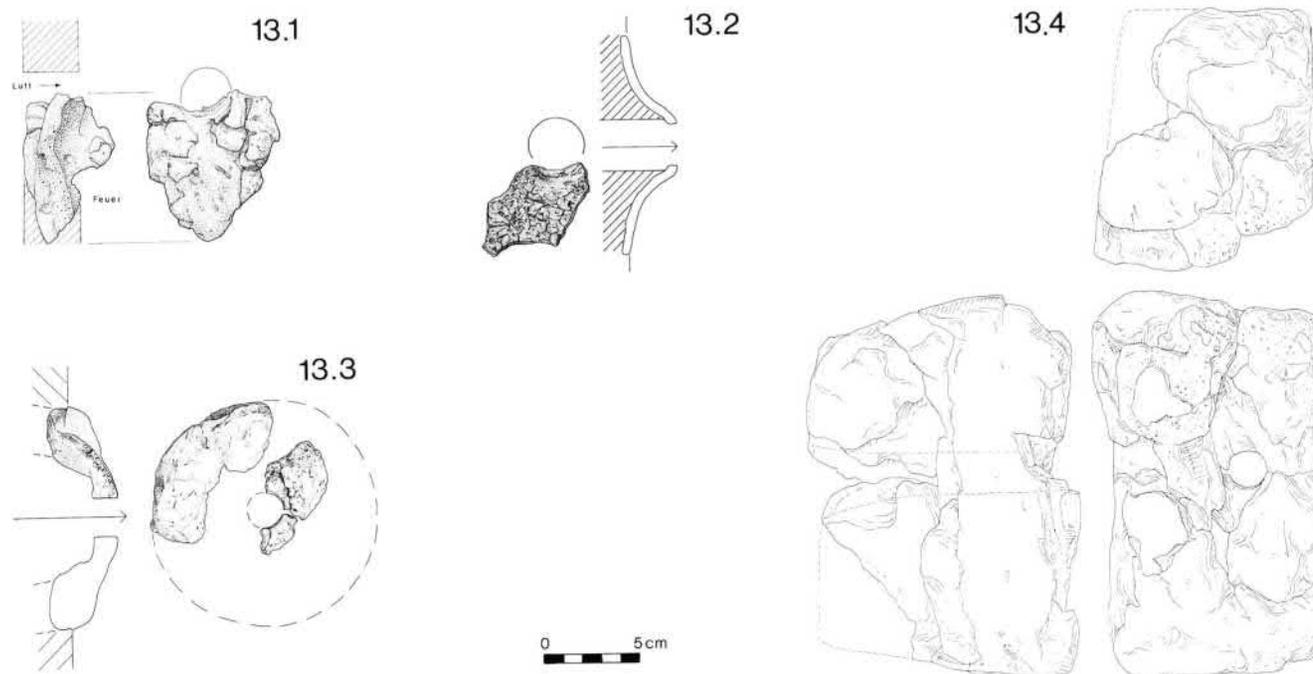


Abb. 13: Gebläseformen von Essen und/oder Ausheizherden.

Fig. 13: Orifices de ventilation de foyer de forge et/ou raffinage.

13. 1-3 Windformen aus Lehm / Trous à vent en argile:

13. 1 flache Platte / plaque plate. Dietikon (ZH), römischer Gutshof / villa romaine, FK 246.

13. 2 Platte mit Aufwölbung / plaque à bec. Cham (ZG), Hagendorn, römische Mühle / moulin romain.

13. 3 eingesetzt / amovible. Zug (ZG), Untergasse 18/20, spätmittelalterliche Schmiede / forge du bas moyen âge, FN 179.

13. 4 Düsenziegel aus Lehm / Tuyère en forme de brique en argile. Rheinau (ZH), Austrasse, Grabung 1994, späteisenzeitliches Oppidum / oppidum de Latène finale.

fläche von Oxyden zu befreien. Hammerschlag wird in schuppiger und kugeliger Form gefunden. Der kugelige Hammerschlag entsteht beim Schweissen, bei dem das Eisen bis zum teigigen Zustand erhitzt wird, und Schlacke aus der Schweissstelle ausgetrieben werden muss. Der schuppige Hammerschlag hat je nach Arbeit, die ausgeführt wird und nach Werkstück, das bearbeitet wird, unterschiedliche Grösse. Weitere, grössere Eisenabfälle entstehen durch das Abschroten von überflüssigem Material am Werkstück. Auch vom Halbfabrikat (Barren), bleiben kleine Stücke liegen. Deshalb finden sich in eisenzeitlichen und römischen Schmieden oftmals kurze Stab- und Stangenfragmente, aber auch unförmige Metallstücke. Selten finden sich auch unfertige oder missratene Eisenobjekte.

4.5.5 Frischschlacken

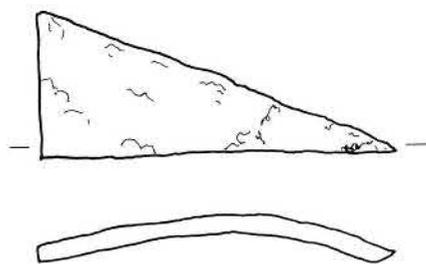
Zu dieser Schlackengruppe existieren erst wenige Untersuchungen. Sie werden als rostend und porös, teilweise kalottenförmig, aber auch mit Fliessspuren, wie sie im teigigen Zustand entstehen, beschrieben. Sie sind sehr eisenoxidreich.

lorsque le forgeron frappe l'objet sur l'enclume ou sur le bord du foyer pour faire partir le fer oxydé et ainsi libérer la surface des oxydes.

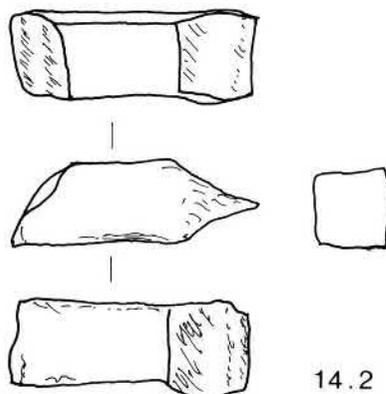
Les battitures peuvent être lamellaires ou globulaires. Ces dernières apparaissent lors du soudage au cours duquel le fer est chauffé jusqu'à un état pâteux et les scories évacuées de l'emplacement de la soudure. Les battitures lamellaires atteignent des tailles fort variables, selon le type de travail exécuté et l'objet forgé. On retrouve aussi d'autres déchets de fer. Plus grands, ils sont produits au cours du forgeage des objets, lors de l'élimination du fer superflu. On peut encore retrouver des petits morceaux de produits semi-finis (lingots). C'est pourquoi, dans les fouilles de forges celtiques ou romaines, les archéologues mettent au jour de nombreux fragments de barres et de lingots, ainsi que beaucoup de petits morceaux informes. Par contre, ils découvrent plus rarement des ébauches ou des objets ratés.

4.5.5 Les scories d'affinage

Il n'existe que peu de recherches sur ce type de scories. Elles sont décrites comme poreuses et sujettes à la corrosion. Elles ont partiellement la forme d'une calotte, mais présentent également des traces de coulure, ce qui atteste qu'elles se sont formées à l'état pâteux. Elles sont très riches en oxydes de fer.



14.1



14.2



14.3

Abb. 14: Schmiedeabfälle aus (oxidiertem) Metall.

Fig. 14: Déchets de forge en métal (oxydé).

14.1 Blech mit Schrotspuren / tôle avec trace de couper. Oberwinterthur (ZH), römischer Vicus / vicus romain, FK 4892.

14.2 Stab mit Schrotspuren / barre avec trace de couper. Oberwinterthur (ZH), römischer Vicus / vicus romain, FK 7495.

14.3 schuppiger und kugeliger Hammerschlag / battitures lamellaires et globulaires. Rheinau (ZH), Austrasse, Grabung 1994, späteisenzeitliches Oppidum / oppidum de Latène finale.

5 Die geschmiedeten Eisenobjekte – Herstellung, Gebrauch, Einlagerung, Konservierung

5 Les objets en fer forgés – fabrication, utilisation, enfouissement et conservation

5.1 Schmiedetechniken und ihre Spuren; zeitgenössische Masseinheiten (Abb. 15 und 16)

Bis ins Spätmittelalter wurden eiserne Geräte ausschliesslich durch Schmieden hergestellt; erst etwa seit dem 15. Jahrhundert wird Eisen in Europa auch gegossen.

Schmieden bedeutet eine Verformung, ein „Kneten“ und Verdichten des Metalles. Das Werkstück wird auf dem Amboss oder im Gesenk bearbeitet. Dabei kommen immer nacheinander verschiedene Verfahren zur Anwendung; zudem muss das Eisen meist mehrmals erhitzt werden, bis die angestrebte Form vollständig erreicht ist. Zu den gebräuchlichen Schmiedeverfahren gehören u.a. Strecken, Breiten, Spitzen, Stauchen, Biegen, Absetzen, Spalten, Lochen, Schlichten, Tordieren, Abschroten, Feuerschweissen, Abschrecken und Anlassen (Abb. 15). Manche Schmiedeverfahren können im kalten, andere nur im erwärmten Zustand durchgeführt werden.

Der Schmied braucht zum Arbeiten folgende Grundwerkzeuge (vgl. dazu Abb. 16, aus: Der Grosse Duden, Bildwörterbuch der deutschen Sprache. Hrsg. O. Basler. Leipzig 1935, Taf. 115A und S. 208):

14. *Amboss*: er ist die Unterlage für alle Schmiedearbeiten und besteht heute üblicherweise aus dem Horn (14a) und der Bahn (14b). Die Löcher in der Bahn (14c) dienen zum Lochen oder als Fixierung für verschiedene Ambosseinsätze (5 Ambosshorn, 6 Abschrot, 7 Gesenk, etc.).

1.–4. *Schmiedezangen*: Beschreibung: „Eben darum hat der Schmidt Zangen, damit er nicht mit den Händen müsse ins Feuer greifen.“ (Zitat nach Grimm, Deutsches Wörterbuch 15, 217). Zangen bestehen aus dem Maul mit zwei Backen (3a), die je nach Verwendungszweck recht vielfältige Formen zeigen können, dem Gelenk und den beiden Schenkeln (3b).

13a. *Schmiedehammer*: er wird mit einer Hand geführt und ist bis zu 2.5 kg schwer. Er besteht aus Bahn (23a) und Finne (23b).

11a. *Vorschlaghammer*: er wird zweihändig geführt und hat ein Gewicht von bis zu 15 kg. Auch er besteht aus Bahn und Finne. Der Meister (13) führt - z.B. beim Spalten - den Meissel direkt auf dem Metall, während der Gehilfe bzw. Zuschläger (11) mit dem Vorschlaghammer auf den Meissel schlägt.

Verschiedene Meissel (mit Spitze oder Schneide)
Schleifstein

Verschiedene Spuren der Bearbeitungstechniken verschwinden während des Arbeitsprozesses, andere wiederum sind am fertigen Objekt noch erkennbar (vgl. Abb. 15). So sind bei archäologischen Funden

5.1 Les techniques de forge et leurs traces; les unités de mensuration (fig. 15 et 16).

Jusqu'à la fin du Moyen Age, les objets en fer étaient exclusivement forgés ; à partir du 15^e siècle environ, le fer fut également coulé.

Le forgeage implique une mise en forme, un «pétrissage» et une compression du métal. L'objet est forgé sur une enclume ou mis en forme par étampage. Généralement le fer doit être chauffé et travaillé plusieurs fois avant que la forme voulue soit complètement atteinte. Cependant pour arriver à un résultat donné, il existe toujours différentes techniques possibles. Parmi celles-ci, nous mentionnerons la possibilité d'étirer une barre de fer, de l'élargir, de l'épointer, de la refouler, de la plier, de lui forger un décrochement, de la fendre, de la percer, de la planer, de la torsader, de la couper, de la souder au feu, de la tremper ou de lui appliquer un revenu (fig. 15). Plusieurs de ces techniques peuvent être pratiquées à froid, d'autres nécessitent de chauffer la pièce.

Pour travailler, le forgeron a besoin de quelques outils essentiels (fig. 16; tirée de : Der Grosse Duden, Bildwörterbuch der deutschen Sprache, Éd. O. Basler, Leipzig 1935, fig. 115A et p. 208) :

14. *l'enclume* : elle représente la principale surface de frappe pour tous les travaux de forge. Aujourd'hui, elle est principalement constituée d'une table (14b) et d'une bigorne (14a). Les trous dans la table, appelés oeillets (14c), sont employés lors du percement d'un objet ou pour fixer différents accessoires d'enclumes (5 cône , 6 tranche , 7 étampe , etc.).

1.–4. *Les pinces de forgeron* : le forgeron a besoin de pinces car il ne peut rien saisir avec ses mains directement dans le feu (commentaire tiré de Grimm, Deutsches Wörterbuch 15, p. 217). Les pinces sont constituées de deux branches (3b) et d'une gueule dotée de deux mâchoires (3a) ; selon leur fonction, ces dernières peuvent prendre des formes très variables.

13a. *le marteau de forgeron* : il est manié d'une main et son poids peut atteindre 2.5 kg. Il est constitué d'une table (23a) et d'une panne (23b).

11a. *la masse* : elle est maniée à deux mains et peut peser jusqu'à 15 kg. Elle est aussi constituée d'une table et d'une panne. Elle permet d'exécuter différents travaux : pour fendre une barre de fer par exemple, le maître de forge (13) dirige le ciseau sur le métal, pendant que l'aide ou le frappeur (11) frappe à l'aide de la masse sur la tête du ciseau.

les différents ciseaux : ciseaux pointus ou droits, c'est-à-dire dotés d'un tranchant.

la pierre à aiguiser

das Absetzen und Lochen, seltener auch das Strecken und Breiten oft von blossen Auge zu sehen. Das Lochen von Hufeisen beispielsweise bewirkt eine deutliche Materialverdrängung, welche sich im typischen gewellten Rutenrand zeigt. Diese Wellung ist bei früheren Typen nicht überarbeitet worden und wirkt daher heute - neben weiteren Merkmalen - auch datierend. Andere Schmiedetechniken hingegen können nur durch eine spezielle Behandlung nachgewiesen werden: die Damaszierung einer Klinge z.B. zeigt sich erst beim Restaurieren. Wie stark, wo und ob eine Schneide überhaupt gehärtet ist, muss von Fachleuten mit Hilfe von metallographischen Untersuchungen festgestellt werden. Durch eine sorgfältige Formuntersuchung der archäologischen Eisenfunde ist es somit oft möglich, den ehemaligen Arbeitsvorgang anhand der rekonstruierten Reihenfolge der Schmiedeverfahren zu beschreiben.

Masseinheiten: Nicht vergessen darf man, dass die von uns allgemein verwendete „Metermasseinheit“ erst 1875 festgelegt und für gültig erklärt wurden ist. Zuvor galten ganz unterschiedliche Masseinheiten. So lässt sich z.B. in römischer Zeit der *digitus* = 1,85 cm (= 1 Fingerbreite; 4 *digiti* = 1 *palmus* bzw. Handrückenbreite; 4 *palmi* = 1 *pes* bzw. Fuss) als Grundeinheit an verschiedenen eisernen Objekten ablesen (Bsp. Nägel, Winkelbänder).

5.2 Funktionsbestimmung der Eisenobjekte (Abb. 17)

Um die ehemalige Funktion eines eisernen Gegenstandes bestimmen zu können, müssen verschiedene Anhaltspunkte berücksichtigt werden, dies sind die Form, die Masse, allfällige Abnutzungsspuren und Bruchstellen, der Fundzusammenhang und die mitgefundenen Objekte.

Dabei ergibt sich eine breite Palette von Anwendungsgebieten für dieses vielseitig verwendbare Metall (vgl. Abb. 17). Zu beachten ist, dass der Verwendungszweck dabei oftmals sehr breit gefasst werden muss. Zur Erläuterung ein Beispiel: *Stili* (Schreibgriffel) wurden zum Beschriften von Wachstäfelchen benutzt. Doch ebensogut können sie auch als Töpferwerkzeug gedient haben. Aufschluss über weitere Anwendungsbereiche können uns daher auch die Fundumstände, die Fundvergesellschaftung, Abnutzungsspuren und ethnographische Vergleiche geben.

5.3 „Zweites Leben“ – Wiederverwendung

Gebrauchte, evtl. beschädigte eiserne Gegenstände wurden früher nicht – so wie bei uns heute meist üblich – weggeworfen, sondern vielfach wiederverwendet. Dies geschah entweder in Form von Altmetallverwertung oder aber, indem die Objekte je nach Bedarf ausgebessert und umgeformt wurden. Ausgezogene Nä-

Les différentes techniques de travail employées pour forger un objet laissent des traces : certaines disparaissent pendant le processus, d'autres au contraire sont encore reconnaissables sur l'objet fini (fig. 15). Ainsi le forgeage d'un décrochement, le perçage, plus rarement l'étirage et le refoulement sont des techniques visibles à l'œil nu. Etamper un fer à cheval par exemple provoque le net déplacement du métal qui se manifeste par une ondulation typique du bord. Celle-ci n'est pas martelée et aplanie sur les exemplaires primitifs et constitue de ce fait un indice chronologique. Certaines techniques de forge ne peuvent être révélées que par un traitement idoine : ainsi le damaschage d'une lame n'apparaît que lors de sa restauration. Par contre, la trempe d'un tranchant, son emplacement et sa dureté ne peuvent être attestés que par une recherche métallographique. Ces études apportent des informations précieuses ; néanmoins, une étude morphologique attentive de l'objet permet souvent de reconstituer la succession des différentes techniques de forge employées par le forgeron.

L'unité de mesure actuelle, le mètre, si couramment employée de nos jours, n'a en fait été instaurée qu'en 1875. Auparavant, les unités de mesure en valeur différaient complètement. L'unité de base des Romains était le «*digitus*», soit 1,848 cm (= 1 largeur de doigt; 5 *digiti* = 1 *palmus*, resp. une largeur de main; 4 *palmi* = 1 *pes* resp un pied) celle-ci se retrouve sur différents objets en fer de cette époque, tels des clous ou des ferrures d'angle.

5.2 Détermination de la fonction des objets en fer (fig. 17)

Différents indices peuvent être pris en considération pour déterminer la fonction originale d'un objet en fer : il s'agit de la forme, des dimensions, des éventuelles traces d'utilisation, des points de rupture, du contexte de découverte et des objets découverts en association.

Le fer est un métal utilisé dans des domaines aussi nombreux que variés (fig. 17). Un même objet peut d'ailleurs entrer dans plusieurs domaines d'utilisation. Ainsi les stylets étaient-ils principalement utilisés pour écrire sur des tablettes de cire; pourtant ils ont également été employés comme outils de potier. Le contexte de découverte, l'association des trouvailles, les traces d'utilisation et les comparaisons ethnographiques nous fournissent des renseignements sur ce domaine d'utilisation.

5.3 «Seconde vie» – réemploi

Autrefois et contrairement à aujourd'hui, les objets en fer usés voire endommagés n'étaient pas jetés. Ils pouvaient être récupérés pour la matière première qu'ils représentaient, mais également réparés ou selon les besoins, transformés en un nouvel objet. Ainsi des clous arrachés étaient martelés pour les rendre à nou-

gel wurden wieder gerade gehämmert, Sensenblätter z.B. als Türscharniere verwendet. Somit gilt: für die Deutung des zugehörigen Grabungsbefundes ist immer die letzte definierbare Funktion eines wiederverwendeten Objektes ausschlaggebend.

veau droits ou des lames de faux transformées en charnière de porte. Il faut cependant garder en mémoire que le contexte de découverte nous fournit des renseignements sur la dernière fonction de l'objet réemployés.

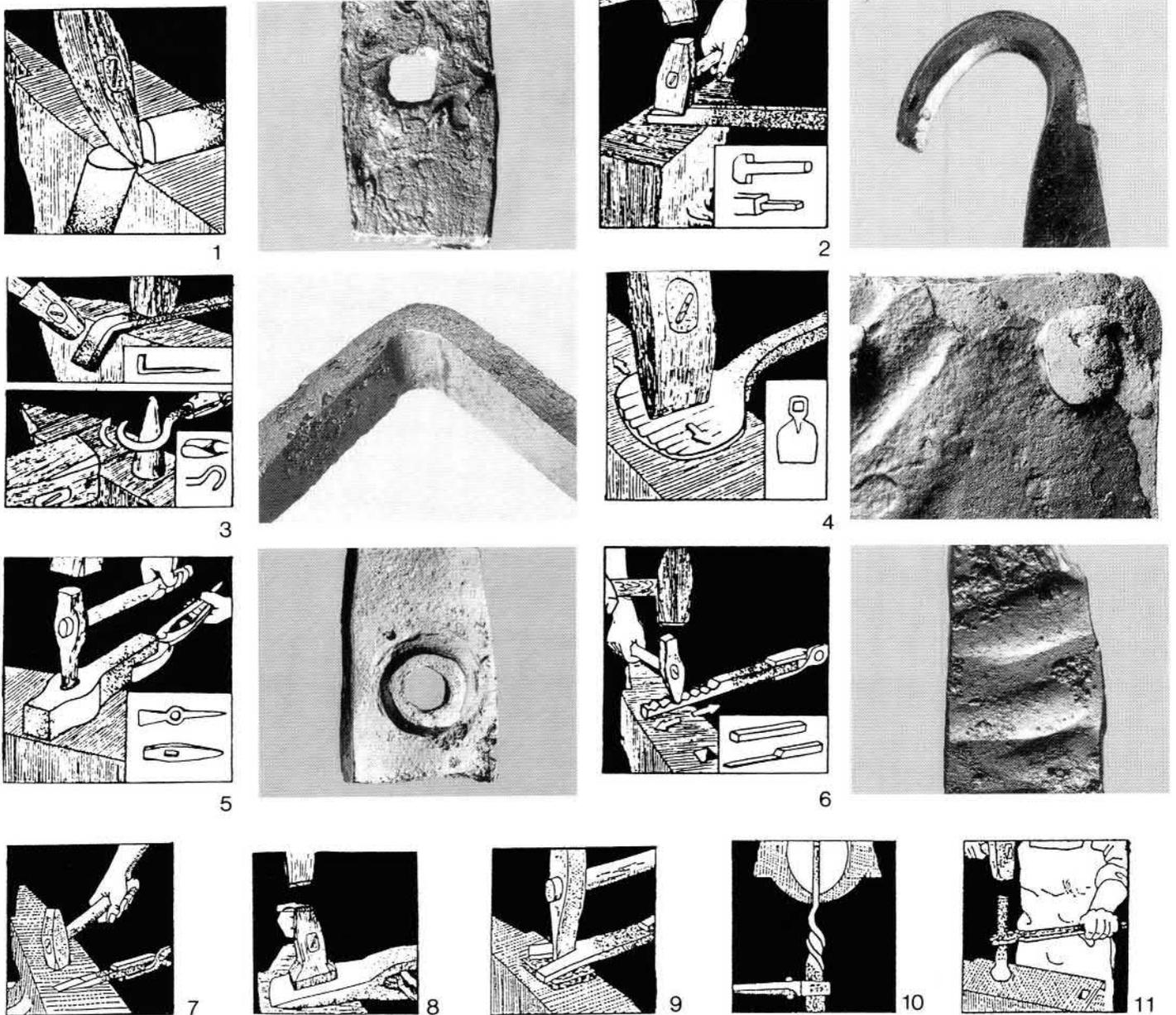


Abb. 15: Verschiedene Schmiedetechniken. (Photos M 1:1, Aufnahme U. Schild, Römermuseum Augst / BL; Zeichnungen abgewandelt nach R. Pleiner, Alteuropäisches Schmiedehandwerk. Stand der metallkundlichen Forschung. Prag 1962, u.a. 31 Abb. 4).

1. Abschroten (Bandhaken-Ende): Das Trennen von Eisen im kalten oder warmen Zustand wird Abschroten genannt. Es geschieht bei kleineren Stücken mit dem Schrotmeissel genau über der Ambosskante, bei grösseren mit Hilfe des in den Amboss eingesteckten Abschrotes. Das Resultat ist ein glatte Fläche mit einer leichten Braue an der Unterkante. (Kaltschrotmeissel: grosser Keilwinkel; Warmschrotmeissel: kleiner Keilwinkel).

Fig. 15: Différentes techniques de forge. (Photos M 1:1, Aufnahme U. Schild, Römermuseum Augst / BL; dessins d'après R. Pleiner, Alteuropäisches Schmiedehandwerk. Stand der metallkundlichen Forschung. Prag 1962, entre autres. p. 31 fig. 4).

1. Couper (extrémité d'une patte de fixation): cette opération s'effectue sur le métal froid ou préalablement chauffé (à froid ou à chaud). Pour les petites pièces, le forgeron utilise un ciseau droit et positionne l'objet sur le bord de l'enclume; pour les grosses pièces, il emploie une tranche fichée dans l'oeillet de l'enclume. Les traces visibles sont une surface lisse bordée d'un léger „sourcil“ à l'extrémité inférieure (le tranchant des

2. Absetzen (Bandhaken-Schulter): Innerhalb eines Werkstückes wird ein Teil gegenüber dem Rest in Höhe oder Breite abgesetzt. Der erste Schlag ergibt eine Kerbe, die anschliessend vertieft und erweitert wird, bis die gewünschten Abmessungen erreicht sind.

3. Biegen (Klammer): Rundungen werden im heissen Zustand durch das Biegen um das Rundhorn des Ambosses oder um ein eingestecktes konisches Horn erzielt. Bei winkligen Biegungen wird die Biegestelle mit einem Meisselhieb markiert; anschliessend wird das freie Ende über die Ambosskante nach unten geschlagen. (Heute biegt man die Stücke auch festgeklemmt im Schraubstock.)

4. Breiten (Winkelband-Ende): Um das Ausgangsmaterial in eine dünnere und gleichzeitig breitere Form zu bringen, wird mit der Hammerfinne das erwärmte Stabende so lange wie nötig nach beiden Seiten gebreitet.

5. Lochen (Bandhaken-Nagelloch): Gelocht wird dünnes Material im kalten, dickeres im warmen Zustand mit Hilfe eines Durchschlages oder Lochdornes. Bei sehr massiven, dicken Objekten (z.B. Hammer) muss vorgemeisselt, d.h. mit dem Warmmeissel aufgeschrotet werden. Ist der Dorn nur noch knapp von der Unterseite entfernt, verschiebt der Schmied das Arbeitsstück über das Ambossloch, damit der Dorn frei durchschlagen kann.

6. Strecken (Bandhaken-Band): Wie das Breiten entspricht das Strecken einer Verringerung der Querschnittsdicke, d.h. einer Verbreiterung oder Verlängerung des Werkstückes. Gestreckt wird mit der Finne des Hammers. Anschliessend werden die starken Hammerspuren durch das Schlichten (= Glätten) mit dem Setzhammer wieder beseitigt.

7. Schärften: Geschärft wird die Schneide zunächst mit dem Hammer auf der Ambossbahn und daraufhin mit dem Schleifstein geschliffen.

8. Schlichten: Die durch die Bearbeitung mit deutlichen Hammerspuren bedeckten Oberflächen werden bei Bedarf zum Schluss mit Hilfe des Schlichthammers (grosser Hammer mit quadratischer Bahn, auf welchen der Zuschläger mit dem Vorschlaghammer schlägt) geglättet.

9. Spalten: Mit dem Meissel wird im kalten Zustand vorgeätzt. Anschliessend erhitzt man das Stück, setzt den Meissel in die vorgezeichnete Rinne, und trennt das Stück endgültig durch Schläge mit dem Vorschlaghammer.

10. Tordieren: Verdrehen eines Stabes im kalten oder warmen Zustand. Warmes Verdrehen ergibt eine enge, unregelmässige Torsion, kaltes Verdrehen eine weitere, regelmässige Torsion. Nötig sind eine Zange und eine Einspannvorrichtung.

11. Stauchen: Der erhitzte Stab wird auf dem Amboss mit dem Hammer senkrecht von oben zusammengestaucht.

ciseaux à froid présente un grand angle, celui des ciseaux à chaud un petit angle).

2. Effectuer un décrochement (épaule d'une patte de fixation): le forgeron réduit la hauteur ou la largeur d'une section. Il commence par marquer l'emplacement, puis il frappe pour créer le décrochement.

3. Plier (crochet): arrondir à chaud une barre de fer en la pliant autour de la bigorne ronde de l'enclume ou du cône à queue. Pour former un angle, le forgeron commence par marquer l'emplacement de la pliure à l'aide d'un ciseau droit; puis il place la barre sur le bord de l'enclume et la plie en la frappant vers le bas. Aujourd'hui, il peut également bloquer la barre dans un étai.

4. Elargir (extrémité d'une ferrure d'angle): afin d'amincir l'extrémité d'une barre tout en l'élargissant, le forgeron la martèle à chaud avec la panne de son marteau.

5. Percer (trou de fixation): les tôles de fer sont percées à froid, mais si l'épaisseur devient trop importante, le forgeron doit préalablement chauffer sa pièce et la percer à l'aide d'un poinçon ou d'un emporte-pièce. Si l'objet forgé est très épais, tel un marteau, il est nécessaire de percer à chaud en plusieurs étapes. Afin de ne pas abîmer la pointe du poinçon lorsqu'il traverse le fer, le forgeron positionne sa pièce au-dessus de l'oeillet de l'enclume.

6. Etirer (patte de fixation): cette opération destinée à allonger une barre, provoque également un léger élargissement et une réduction de l'épaisseur. Pour cela, le forgeron emploie la panne de son marteau. Ensuite, il plane les traces visible à l'aide d'une chasse.

7. Aiguiser: le tranchant est affiné au marteau sur la table de l'enclume, puis aiguisé et poli à la meule.

8. Planer: lorsque les traces de forgeage sont considérées comme trop importantes, le forgeron peut les atténuer à l'aide d'un marteau à planer (gros marteau doté d'une table carrée, posé sur la pièce forgée et frappé à l'aide d'une masse).

9. Fendre: avec un ciseau droit, le forgeron commence par marquer à chaud l'emplacement de la découpe. Puis il positionne le ciseau dans la rainure ainsi créée et frappe sur sa tête à l'aide d'une masse.

10. Torsader: tordre une barre à froid ou à chaud. Le travail à chaud provoque une torsion serrée et irrégulière, tandis que le travail à froid se traduit par une torsion plus lâche et régulière. Pour cette opération, le forgeron a besoin d'une pince et d'un dispositif de serrage.

11. Refouler: la barre chauffée est placée perpendiculairement sur la surface de frappe et frappée depuis le haut avec un marteau.

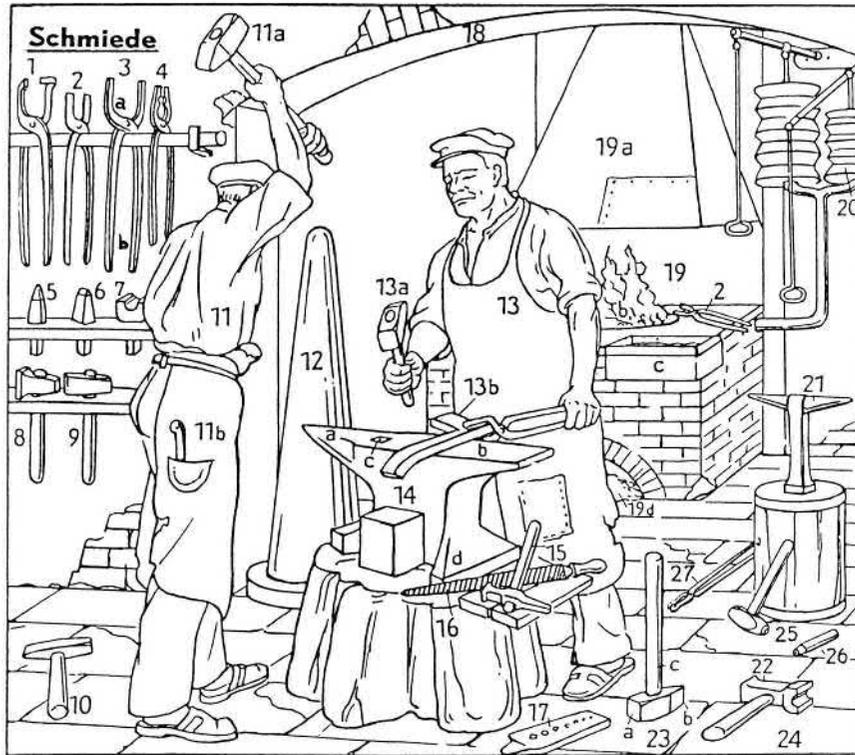


Abb. 16: Die Schmiede.

1–4 Schmiedezangen: **1** Hakenzange, **2** Stockzange (Feuerzange), **3** Zufassung: **a** Backen, **b** Schenkel, **4** Wolfsmaulzange. **5–7** Ambosseinsätze: **5** Hörnchen (Spitzstöckel), **6** Abschröter, **7** Untergesenk (Senkeisen). **8, 9, 15, 22** Setzhämmer (Setzeisen): **8** Schlichthammer (breiter Setzhämmer), **9** Ballhammer (Kerbeisen) zum Absetzen (Übergehen auf andere Dicke), **10** Setzmeißel (Schrotmeißel, Schrotbeil; Kalt- oder Warmmeißel: zum Abschlagen, Schroten); ähnlich: der Nietquetscher (zum Abschlagen von Nietköpfen), **11** Zuschläger (Schmiedegeselle): **a** Vorschlaghammer (Zuschlag-, Vorhammer), **b** Schurzfell (Leder-schurz, Schurz), **12** Ringhorn (zum Richten grösserer Ringe), **13** Schmiedemeister (ein Grobschmied): **a** Schmiedehammer (Fausthammer zum Bezeichnen der mit dem Vorschlaghammer zu treffenden Stelle), **b** (heisses) Schmiedestück (Werkstück), **14** Amboss: **a** Horn (zum Richten von kleineren Ringen), **b** Bahn (gehärtet), **c** Loch (für die Ambosseinsätze 5-7), **d** Ambossfuss, **15** Lochhammer (Stieldurchschlag), **16** Strohfeile (Pack-, Schrupp-, Armfeile; mit grobem Hieb), **17** Loch Eisen (Nageleisen), **18** Gewölbe, **19** Schmiede-esse (Esse, Schmiedeherd, -feuer, Feuerstelle): **a** Rauch-abzug (Rauchfang, -haube), **b** Feuerschüssel, **c** Was-serbecken (-kasten), **d** Aschenloch, **20** Blasebalg (Blaskopf; Gebläse), **21** Sperrhorn, **22** Obergesenk (zum Formgeben.), **23** Hammer (Kreuzschlaghammer): **a** Bahn, **b** Pinne (Finne), **c** Stiel (Holm), **24** Fussboden-platte (sie bilden zusammen den Plattenbelag). **25–27** Nietwerkzeuge: **25** Döpfer (Nietenkopfsetzer, Nietensetzer, -köpfer), **26** Nietenzieher, **27** Nietzange.

Fig. 16: La forge

1–4 les pinces de forgeron: **1** les pinces à crochets, **2** les pinces à feu, **3** les pinces à empoigner: **a** les mâchoires, **b** les branches, **4** les pinces à gueule de loup. **5–7** accessoires d'enclume: **5** le cône à queue, **6** la tranche à queue, **7** l'étampe inférieure. **8, 9, 15, 22** chasses: **8** marteau à planer (la large chasse), **9** marteau pour faire un retrait (passer à une autre épaisseur), **10** tranche (ébarboir, marteau à ébarber; un ciseau à froid ou à chaud; pour trancher, couper), semblable: étampe/marteau pour rivets (pour trancher/abattre les têtes de rivet), **11** le frappeur (un compagnon/ouvrier du forgeron): **a** la masse (marteau à devant), **b** le tablier de cuir, **12** le cône (pour ajuster les plus grands anneaux), **13** le maître de forge: **a** le marteau de forgeron (marteau de poing pour indiquer l'emplacement à frapper avec la masse), **b** la pièce à forger, **14** l'enclume: **a** la bigorne (pour ajuster de petits anneaux), **b** la table (durcie), **c** l'oeillet porte-outil (pour les acces-soires d'enclume 5-7), **d** le pied, **15** le marteau à percer (poinçon à manche), **16** lime (riflard; avec une grosse taille), **17** la cloutière, **18** la voûte, **19** le foyer de forge (feu): **a** la hotte, **b** le creuset, **c** le baquet de trempe, **d** le trou pour les cendres, **20** le soufflet, **21** la bigorne, **22** l'étampe supérieure, **23** le marteau: **a** la table, **b** la panne, **c** le manche, **24** les carreaux de sol. **25–27** les outils à riveter: **25** la bouterolle, **26** outil pour tirer les rivets, **27** les pinces à riveter;

5.4 Der „Tod“ der Eisenobjekte

Obwohl bis heute Altmetall wiederverwendet und gesammelt wird, entdecken Archäologen bei Ausgrabungen oft zahlreiche Eisenobjekte. Diese Funde sind zur Zeit der Verwendung entweder verloren gegangen oder aber absichtlich deponiert worden.

Ein verlorengegangenes Objekt, das heisst eines, das zufällig zu Boden gefallen ist, ist üblicherweise noch brauchbar: an unzugänglichen Stellen, wie etwa in einem Kanal, können auch grössere Objekte liegen bleiben; meistens sind es jedoch kleine Gegenstände - ein Nagel oder ein Stilus beispielsweise. Ein verlorengegangenes Objekt, häufig auch von grösserem Ausmass, kann jedoch an einer bestimmten Stelle vergessen worden sein. Dies trifft wahrscheinlich für einen in Orbe VD in einer Zerstörungsschicht entdeckten „Sack“ zu, welcher zur Wiederverwendung gesammelte Nägel und T-förmige Befestigungshaken enthielt.

Das Objekt kann auf dem Platz zurückgelassen worden sein. Wenn ein Haus oder ein Wohnplatz verlassen werden soll, entfernen die Bewohner alle Gegenstände, die noch brauchbar sind. Abgesehen von denjenigen Dingen, die sie vergessen, lassen sie nur zerbrochene oder nicht mehr brauchbare - kleine - Gegenstände zurück.

Falls jedoch im Gegensatz dazu ein Wohnplatz sehr rasch verlassen werden muss, bedingt durch einen Überfall oder eine Feuersbrunst etwa, nehmen die Bewohner und Bewohnerinnen nur gerade das Allernötigste mit und lassen noch brauchbare aber sperrige bzw. nicht zum Überleben notwendige Gegenstände zurück.

Ein Objekt kann ausserdem absichtlich an einem Ort verwahrt worden sein, an welchem es der Archäologe später findet. Zwei verschiedene Beispiele sollen dies verdeutlichen: Zum einen gibt es Weihegeschenke, die einer Gottheit oder einem Verstorbenen gemacht werden. Und zum anderen gibt es Depotfunde, die seinerzeit als Provisorien dienten, wie etwa das Versteck eines Schmiedes mit Werkzeugen und / oder Gegenständen, die für die Wiederverwertung („das zweite Leben“) bestimmt waren.

5.5 Die Einlagerungsbedingungen der Eisenobjekte

Die Einlagerungsbedingungen sind bei Eisenobjekten entscheidend für den Erhaltungszustand. Man weiss beispielsweise, dass Eisen in alkalischem Milieu oder zusammen mit Tannin gut erhalten bleibt, ganz im Gegensatz zu einer Einlagerung in salzigem oder saurem Milieu. Das Studium der Formveränderungen eines korrodierten Objektes ist sehr wichtig, denn Formveränderungen können ein beträchtliches Ausmass erreichen. Dazu gehören u.a. ein sich Heben und Abplatzen der Oberfläche, ein beträchtlicher Zuwachs des Gesamtvolumens (bis 10 mal), die vollkommene Korrosion des metallischen Kerns, etc.

Diese starke Korrosion bildet aber auch eine schwache Schutzschicht um das Objekt; sie enthält verschiedene

5.4 La «mort» des objets en fer – l'abandon

Malgré le phénomène fréquent jusqu'à nos jours, de récupération et de remploi du métal, les archéologues découvrent lors de leurs fouilles de nombreux objets en fer. Ceux-ci ont été perdus, abandonnés ou déposés délibérément.

L'objet perdu, celui qu'on laisse tomber accidentellement, est généralement encore utilisable par son propriétaire : dans un endroit inaccessible, tel un canal, il peut être de grande taille, mais le plus souvent, il est de petite dimension, un clou ou un stylet par exemple. L'objet perdu peut également être celui, souvent plus volumineux, qu'on oublie sur place. C'est vraisemblablement le cas de ce „sac“ découvert à Orbe dans une couche de démolition et contenant des clous et des pattes de fixation en T a priori récupérés pour emploi.

L'objet peut être abandonné sur le site. Si la désaffectation d'un immeuble ou d'une localité est prévue, les habitants emportent tout ce qui peut encore être utile. Outre bien entendu ce qu'ils vont oublier, ils ne laissent sur place que des objets cassés et non récupérables, donc généralement de petite dimension.

Si au contraire, un site doit être abandonné très rapidement, pour cause d'invasion ou d'incendie par exemple, les habitants ne vont emporter que le strict nécessaire et laisseront sur place des objets encore utiles mais encombrants ou non indispensables.

L'objet peut être déposé délibérément dans le lieu où l'archéologue le découvrira. Deux cas de figure illustrent cette catégorie : les offrandes, faites à une divinité ou à un défunt par exemple, et les dépôts considérés à l'époque comme provisoires, telle une cachette de forgeron contenant des outils et/ou des objets auxquels donner une „seconde vie“.

5.5 L'enfouissement des objets en fer

Les conditions d'enfouissement d'un objet en fer sont primordiales pour sa conservation. On sait par exemple que le fer se conserve relativement bien en milieu alcalin ou en présence de tannins, contrairement à un milieu salin ou acide. Or les déformations d'un objet en fer sous l'effet de la corrosion sont très importantes et peuvent complètement le défigurer : soulèvement et éclatement de la surface, augmentation considérable de son volume (jusqu'à dix fois), disparition complète du noyau métallique, etc.

Cette corrosion si active contribue à la formation d'une gangue autour de l'objet, qui tout en le protégeant un minimum, emprisonne divers matériaux adjacents, tels

anhaftende Materialien wie etwa Steinchen oder Erde, aber auch Gewebe, Leder oder mineralisiertes Holz.

5.6 Die archäologische Entdeckung der Fundobjekte

Wegen der sie umgebenden, wichtigen Korrosionsschicht sind eiserne Objekte meistens schwer zu bestimmen. Trotzdem ist es ausserordentlich wichtig, dass die Ausgräberinnen und Ausgräber der Lust widerstehen, an dieser unförmigen Masse, welche sie in der Hand halten, herumzukratzen, um das darinsteckende Objekt freizulegen. Durch dieses Kratzen und Schaben riskiert man einerseits Informationen zu zerstören, welche am Objekt anhaften und gleichzeitig wird auch die gegen starke Korrosion wirksame Schutzschicht des Objektes noch weiter beschädigt.

Die Bergung eines Eisenobjektes ist sehr oft entscheidend für seinen weiteren Fortbestand, denn wenn es aus der schützenden Erde an die Luft gelangt, verstärkt sich die Wirkung der eingelagerten Salze und es rostet deutlich schneller. Um irreversiblen Schäden vorzubeugen, müssen deshalb eiserne Objekte sehr rasch behandelt werden. Falls das Objekt nicht sofort entsalzt und restauriert werden kann, ist es wichtig, mit einem Restaurator zusammen die bestmöglichen Aufbewahrungsbedingungen zu schaffen.

Das Restaurieren von Eisenobjekten ist eine langwierige Aufgabe (vollkommene Entsalzung, Freilegen und / oder Wiederherstellung der ursprünglichen Oberfläche), weshalb üblicherweise nicht alle eisernen Fundgegenstände restauriert werden. Eine Fachperson (Archäologe/In oder mit Eisenobjekten erfahrener Restaurator/In) muss aus diesem Grund das Material sorgfältig untersuchen und aussortieren. Für die Erfüllung dieser Aufgabe sind gute Röntgenaufnahmen oft nicht nur wünschenswert, sondern unabdingbar: sie ermöglichen es, die ursprüngliche Form des Gegenstandes, seinen derzeitigen Zustand (Brüche, gesunder Metallkern, etc.), verschiedene Herstellungsarten wie zum Beispiel gravierte oder damaszinierte Dekors festzustellen.

Die Auswahl der zu restaurierenden Objekte hängt selbstverständlich von den Gegenständen selbst ab, doch auch die Begleitumstände der Entdeckung (geschlossenes Ensemble, Art und Wichtigkeit der Fundstelle: man wird das Inventar eines Grabes, eines Tempels oder einer Werkstatt nicht gleich behandeln wie Funde einer Prospektion oder einer römischen Kolonie) und die zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel spielen eine Rolle.

Es gilt zu beachten, dass verschiedene Eisen-Konservierungsmethoden die Struktur der Objekte verändern könnten. So zum Beispiel die sogenannte „Plasmamethode“, bei welcher die Objekte etwas erhitzt werden. Will man im Anschluss an diese Konservierungsart wissen, welche thermischen Behandlungen (z.B. Erhitzen, Abschrecken, Anlassen) der Schmied ursprünglich angewandt hat, können die metallographischen Untersuchungsergebnisse unter Umständen ein verfälschtes Bild zeigen.

que cailloux ou terre, mais également tissu, cuir ou bois minéralisé.

5.6 La découverte archéologique des objets

A cause de cette importante couche de corrosion, les objets en fer sont le plus souvent très difficiles à identifier. Néanmoins, le fouilleur doit résister à l'envie de gratter la masse informe qu'il tient dans ses mains pour découvrir l'objet qui s'y cache. En effet, par cette action, on risque d'une part de perdre les informations contenues dans la gangue et d'autre part de supprimer la seule protection dont dispose l'objet contre une corrosion trop active.

La découverte d'un objet en fer est souvent des plus préjudiciable pour lui. En effet, l'apport massif d'oxygène qui l'accompagne va accélérer l'action des sels de corrosion. C'est pourquoi, cet objet doit être traité rapidement, avant que des pertes irréparables ne soient à déplorer. Si l'objet ne peut être envoyé de suite en laboratoire, il convient de voir avec le restaurateur comment le conditionner afin qu'il se détériore le moins possible.

Le traitement des objets en fer (élimination maximale des sels de corrosion, dégagement et/ou reconstitution) est un travail de longue haleine. C'est pourquoi habituellement, tous ne sont pas restaurés. Un tri pertinent doit alors être effectué par une personne compétente (archéologue ou restaurateur connaissant bien le mobilier en fer). Pour ce travail, les radiographies sont un outil non seulement utile mais bien souvent indispensable : elles permettent en effet de révéler la forme de l'objet, son état de conservation (fractures, noyau métallique sain, etc.), certains modes de fabrication voire la présence d'un décor gravé ou damasquiné.

Le tri des objets à restaurer dépend bien évidemment des objets eux-mêmes, mais le contexte de découverte intervient également (ensemble clos, nature et importance du site : on ne traitera pas de la même manière le mobilier d'une tombe, d'un temple ou d'un atelier, ni celui d'une campagne de prospektion ou d'une colonie romaine), ainsi que des moyens financiers à disposition.

Attention, certaines méthodes de conservation des objets en fer sont susceptibles de modifier légèrement leur structure. Ainsi la méthode dite du plasma nécessite de chauffer la pièce, opération qui peut gêner voire empêcher par la suite l'analyse des différents traitements thermiques qu'elle a subi lors de sa fabrication.

Dernière recommandation, si tous les objets en fer ne peuvent pas être restaurés, il est important de les quantifier (poids, volume). En effet, ces données sont d'une part périssables à cause de l'action de la corrosion, d'autre part indispensables pour essayer d'évaluer la quantité de fer produite et utilisée à l'époque.

Eine letzte Empfehlung: Wenn nicht alle Eisenobjekte restauriert werden können, ist es wichtig sie wenigstens zu quantifizieren, das heisst ihr Gewicht und ihre Anzahl festzuhalten. Es ist klar, dass diese Angaben mit Vorsicht zu geniessen sind wegen der Wirkung des Rostes, aber sie sind eine unerlässliche Voraussetzung, will man herausfinden wie gross die in einer Epoche produzierte und verwendete Eisenmenge war.

1 Waffen / Armes

Angriffswaffen / armes d'attaque:
 Geschosspitzen / pointes de projectile
 Lanzenspitzen / pointes de lance
 Pilumbestandteile / éléments de pilum
 Hieb- und Stichwaffen / armes tranchantes et armes d'estoc

Verteidigungswaffen / armes défensives:
 Schidbestandteile / éléments de bouclier
 Panzerbestandteile / éléments de cuirasse
 Fussangeln / chausse-trappes

**2 Pferd- und Reiterausrüstung /
Equipement du cheval et du cavalier**

Hufschuh, Hufeisen / hipposandale, fer à cheval
 Zaumzeug / brides
 Sporen / éperons

3 Wagenbestandteile / Eléments de char

Achsnagel / clavettes d'essieu
 Deichselverstärkungsband / frettes
 Radreifen / cerclage de roue
 Reibnagel

**4 Landwirtschaftliche Geräte /
Objets concernant l'économie rurale**

Gertel / serpettes
 Karst- und Rechenzinken / dents de houe et de rateaux
 Hacken / pioches
 Pflugbestandteile (z.B. Sech) / éléments aratoires (p.ex. le coutre)
 Schellen und Schellenklöppel / clochettes et battant de clochettes
 Striegel / étrilles

5 Werkzeuge / Outils

Materialgruppen / matériaux:

Metall / pour le métal
 Holz / pour le bois
 Stein / pour la pierre
 Leder / pour le cuir
 Textil / pour les textiles
 Landbau / pour l'agriculture
 Schrift / pour l'écriture

Typen / types:
 Äxte, Beile, Dechsel / haches, herminettes
 Feilen / limes
 Haareisen
 Hämmer / marteaux
 Hobeisen, Hobelsohlen / fers à rabot, semelles de rabot
 Keile / coins
 Kellen / truelles
 Ledermesser / couteaux pour le cuir
 Locheisen / emporte-pièce
 Meissel (Spitz-, Breit-, Beitel, Ahlen etc.) / ciseaux (pointus, droits, bédanes, alènes etc.)
 Nagelzieher / arrache-clous
 Nähadeln / aiguilles à coudre
 Sägen / scies
 Schaufelbeschläge / ferrures de biches
 Scheren / forces
 Spachtel / spatules
 Zangen / pincés

6 Musikinstrumente / Instruments de musique

Maultrommeln / guimbardes

7 Schreibzeug / Nécessaire pour écrire

Stili / stylets

8 Schlüssel und Schloss / Clés et serrures

verschiedene Schlüsseltypen / différents types de clés
 Schlossbestandteile wie Riegel, Schlossfedern,
 Schlossbleche, Schlossschlempen /
 éléments de serrure (pênes, ressorts, plaques, morillons)
 Vorhängeschlösser / cadenas

9 Küchengerätschaften / Accessoires de cuisine

Bratrostbestandteile / éléments de barbecues
 Bratspiesse / broches
 Dreibeine für Pfannen / trépieds pour poêles
 Eimer- und Kesselbestandteile /
 éléments de seau et de chaudrons
 Feuerstähle / briquets
 Kellen und Schöpflöffel / louches et cuillères à pot
 Kasserollen / casseroles
 Kesselfleischhaken / crochets à viande

Hauptgruppe / Groupes principaux	Untergruppe / groupes secondaires
10 Messer / Couteaux	mit Griffangel / à soie pointue mit Griffzunge / à soie plate Hackmesser / hachoirs
11 Waagen und Gewichte / Balances et poids	Schnellwaagen / balances romaines Gleicharmige Waagen / balances à bras égaux Gewichtsteine / poids en métal Aufhängewichte / poids à suspendre
12 Beleuchtung / Eclairage	Talglämpchen / lampes à suif Lampenbestandteile / éléments de lampes
13 Schmuck / Bijoux	Arm- und Fingerringe / bracelets et bagues
14 Trachtbestandteile / Habillement	Fibeln / fibules Gürtelbestandteile / éléments de ceinture
15 Toilettgeräte, Arztinstrumente / Objets de toilette, instruments médicaux	Rasiermesser / rasoirs Skalpelle / scalpels
16 Beschläge / Ferrures	Bänder / bandes Scharniere / charnières Ösenstifte / tiges à oeillets Haken / crochets Verschlusshaken / crochets de fermeture Griffe (z.B. an Möbeln) / poignées (p.ex. sur un meuble) Kettenkeile / maillons de chaîne
17 Baueisen / Ferrures de construction	Bandhaken / crochet en bandes Fenstergitter / grilles de fenêtre Kloben / gonds Krampen / crampons Splinte / goupilles
18 Nägel / Clous	Nägel mit verschiedensten Köpfen wie etwa Scheiben-, Pilz-, Würfel-, Zylinder- und Plattköpfen, T-förmigen, halbkugeligen und schmaldreieckigen Köpfen etc / clous avec différents têtes (tête discoïdale, en forme de champignon, cubique, cylindrique, plate, en T, demi-sphérique, triangulaire, etc.) Schuhnägel / clous de soulier Hufnägel / clous de fer à cheval Drahtstifte (modern) / pointes de Paris (moderne) Niete / rivets
19 Ketten, Ringe, Zwingen / Chaînes, anneaux, viroles	Ketten / chaînes Ringe / anneaux Zwingen / viroles Teuchelband
20 Fragmente / Fragments	Stäbe / tiges Drähte / fils Bandförmige Stücke / fragments en forme de bandes Platten / plaques Bleche / tôles Röhren / tubes Tüllen / douilles
21 Werkabfälle / Déchets de travail	Barrenfragmente / fragments de lingots Schmiedeabfälle / déchets de forge Halbfabrikate / ébauches

Abb. 17: Übersicht über die unterschiedlichen aus Eisen bestehenden Objektgruppen (erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit).

Fig. 17: Aperçu des différents groupes d'objets en fer (sans aucune prétention d'exhaustivité).

**LES „PHASES DE LA VIE“ D'UN OBJET EN FER
DIE „LEBENSPHASEN“ EINES EISENOBJEKTES**

		<i>Surface de l'objet Oberfläche</i>
PHASE DE CONCEPTION ET DE RÉALISATION PHASE DER ENTWICKLUNG UND UMSETZUNG	Fabrication (mise en forme, assemblage) Herstellung (Formgebung, Verbindungen) <i>procédés de décoration et/ou de traitement de surface</i> Verzierung und Oberflächenbehandlung Finition et/ou décoration: Fertigstellung und/oder Verzierung: (Ciselage / Ziselierung; polissage / Polierung; patinage / Patinieren; niellage / Niello; étamage / Verzinnung; damasquinage / Damaszierung; émaillage / Emaillierung)	
Objet fini Fertiges Objekt		<i>surface et forme originelles</i> Ursprüngliche Oberfläche und Form
PHASE D'UTILISATION GEBRAUCHSPHASE	Mise en service: in Betriebnahme: (Distribution / Verteilung; entretien / Unterhalt; usure / Abnutzung; cassure / Bruch) Transformations dues à l'usage: Veränderungen durch Gebrauch: (Réparation / Reparatur; emploi / Wiederverwendung; recyclage / Recycling)	
Abandon, perte Aufgabe, Verlust		<i>surface et forme à l'abandon</i> Oberfläche und Form bei der Aufgabe des Objektes
PHASE D'ABANDON ET D'ENFOUISSEMENT PHASE DER AUFGABE, DER EINLAGERUNG IM BODEN	<i>contexte d'abandon</i> Begleitumstände der Aufgabe <i>transformations dues au contexte sédimentaire</i> Veränderungen durch die Einlagerung im Boden <i>contexte archéologique d'enfouissement</i> archäologische Begleitumstände der Einlagerung	
Découverte (mise au jour) Entdeckung (Ausgrabung)		<i>surface et forme lors de la découverte</i> Oberfläche und Form zur Zeit der Auffindung
PHASE DE POST-DÉCOUVERTE PHASE NACH DER AUFFINDUNG	<i>étude des objets</i> Untersuchung der Objekte Etude / analyse; conservation / restauration; présentation / diffusion Wissenschaftliche Bearbeitung; Konservierung / Restaurierung; Materialvorlage / Publikation	<i>surface et forme actuelle</i> heutige Oberfläche und Form

Abb. 18: Die „Lebensphasen“ eines Eisenobjektes.

Fig. 18: Les „phases de la vie“ d'un objet en fer.

6 Räumliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen

6 Fer, Espace, Economies

Die Prozesskette ist eine abstrakte, technologische Darstellung. Das Modell der Eisenproduktion, das sie enthält, wird viele wesentliche Fragen nicht beantworten, wie zum Beispiel:

- Welches sind die Kommunikationsbeziehungen zwischen den Etappen des Prozesses, sozusagen die unsichtbaren Glieder der Kette ?
- Wer verfügt über die Rohstoffe und wer nimmt die Produkte in Besitz ?
- Wer führt die Arbeiten aus ?
- Wo werden die Arbeiten ausgeführt ?

Wenn wir die Einrichtungen, Verfahren und Arbeitstechniken des Eisengewerbes untersuchen, müssen wir versuchen, die Eisenproduktion in ihren historischen, d.h. geographischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Rahmen zu stellen. Denn jede technische Prozesskette wird in einer bestimmten räumlichen Anordnung und mit bestimmten gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Vorgaben durchgeführt. Wir müssen versuchen, diesen Kontext für den konkreten Einzelfall zu rekonstruieren.

6.1 Offenkundige Paradoxien

Im Vergleich mit den anderen Erzen sind die Lagerstätten des Eisens sowohl am häufigsten vorhanden als auch am gleichmässigsten verbreitet. Auf den ersten Blick müsste man daher erwarten, dass die Standorte der primären Produktion (Bergbau und Verhüttung) geographisch deutlich verteilt auftreten – so wie gemäss unseren Kenntnissen die Standorte der Verarbeitung des Eisens zu Halbfabrikaten und Endprodukten (Ausheizen und Schmieden) und vor allem die Standorte des Verbrauchs in jeder Kultur, die Eisen verwendet, räumlich stark gestreut sind, um auf die Nachfrage an den verschiedensten Orten antworten zu können.

Die Wirklichkeit sieht anders aus (vgl. die Diskussion bei ROSTOKER & BRONSON, 53–55, 177–186). Neben kleineren, verstreuten Produktionseinheiten treten in der Mehrzahl der bekannten Fälle Zentren und Reviere auf, die auf Überschussproduktion ausgerichtet sind (vgl. z.B. Abb. 20).

Paradox erscheint auch, dass nicht unbedingt die reichsten und grössten Erzlagerstätten die Herstellungszentren angezogen haben – zumindest nicht, wenn wir mit modernen Massstäben messen. Gemessen an den Bedürfnissen vorindustrieller Gesellschaften, die nur vergleichsweise geringe Mengen von Eisen benutzten, konnte jede Lagerstätte von mehr als lokaler Bedeutung die Versorgung eines Zentrums der Überschussproduktion sicherstellen.

Und schliesslich erhielten nur wenige wichtige Zentren und Reviere ihre Bedeutung über mehrere Epochen hinweg aufrecht. Auf Phasen intensiver Aktivität folgten innerhalb weniger Jahrzehnte einschneidende Be-

La chaîne opératoire n'est qu'une vision technologique abstraite. Le modèle de la production du fer qu'elle fournit n'essaye pas de répondre à beaucoup de questions essentielles, par exemple:

Quels sont les liens de communication entre les étapes du procédé, c'est-à-dire les maillons invisibles de la chaîne ?

Qui dispose des matières premières et qui prend possession des produits ?

Qui exécute les travaux ?

Où sont exécutés ces travaux ?

En étudiant les installations, les procédés et les gestes techniques de la sidérurgie, il faut essayer de replacer cette industrie dans son contexte historique, c'est-à-dire géographique, économique et social. Car chaque chaîne opératoire technologique est réalisée dans des dispositions spatiales et des encadrements sociaux et économiques spécifiques. Pour chaque cas réel, il faut essayer de reconstituer ce contexte.

6.1 Des paradoxes évidents

Par rapport aux autres minerais, les gisements de fer sont les plus abondants et les plus uniformément répartis. Par conséquent, il faudrait s'attendre à première vue à une répartition géographique équilibrée des sites de production primaire (extraction et réduction) – comme, à notre connaissance, les sites de transformation du fer en produits intermédiaires et en objets finis (raffinage et forgeage) et les sites de consommation sont très dispersés dans chaque culture qui utilise le fer, de manière à satisfaire une demande très dispersée.

La réalité est différente (cf. la discussion de ROSTOKER & BRONSON, 53–55, 177–186). A côté d'unités de production mineures dispersées, il existe dans la plupart des cultures connues des centres et des districts qui ont été consacrés à une production excédentaire (cf. p. ex. fig. 20).

Encore paradoxalement, ce ne sont pas forcément les minerais les plus riches et les plus abondants qui ont attirés les grands centres d'exploitation – au moins dans une perspective contemporaine. Au regard des besoins des sociétés préindustrielles, qui n'ont utilisé que des quantités de fer relativement faibles, tout gisement d'importance autre que locale pouvait servir au ravitaillement d'un centre de production excédentaire.

Et finalement, peu de centres et de districts importants ont su conserver leur importance pendant plusieurs époques. A des phases d'activités intenses ont pu succéder de véritables déclin en quelques décennies. On connaît même des centres qui ne furent florissant qu'à une seule époque.

deutungsverluste. Man kennt sogar Zentren, die nur während einer einzigen historischen Epoche aufblühten.

Der Schweizer Jura zum Beispiel kannte während der jüngeren Eisenzeit und der römischen Epoche nur einige kleinere Ausbeutungen. Im Lauf des frühen Mittelalters beobachten wir dagegen eine beachtliche Blüte der Produktion in mehreren Regionen (Waadtländer Jura, Delsberger Becken); dort wurden hauptsächlich die siderolithischen Bohnerze verhüttet. Gleichzeitig haben wir erste Zeugnisse für die Eisengewinnung aus den oolithischen Doggererzen des nordöstlichen Juras (Baselland, Fricktal, Schaffhausen).

Während des Mittelalters nimmt der Umfang der Produktion im Allgemeinen zu; sie dehnt sich auf weitere Gebiete aus. Im Waadtländer Jura setzt sich die frühe Eisengewinnung in den Aktivitäten einer Kleinindustrie fort, die sich hartnäckig über die Jahrhunderte hinweg hält; in der Gegend von Vallorbe setzt in dieser Zeit die Ausbeutung der Limoniterze des Valanginien ein. Im Nordjura erfährt die Eisenindustrie, die hier weiterhin auf der Ausbeutung der Bohnerze beruht, während des Spätmittelalters einen bedeutenden Aufschwung; während der Frühindustrialisierung wird der Produktionsumfang weiter gesteigert, während als Folge der Einführung des Hochofens die Zahl der Eisenhütten abnimmt (Mitteilung L. Eschenlohr). Die Ausbeutung des oolithischen Doggererzes des Aargauer Juras (Fricktal) erhält im Spätmittelalter eine überregionale Stellung, die sie bis um 1700 bewahrt. Dagegen sind die Bohnerze des Aargauer Juras anscheinend erst während des 18. Jahrhunderts zur Versorgung der ersten Hochöfen am Hochrhein intensiv ausgebeutet worden, obwohl sie leicht zu gewinnen sind. Die Ausbeutung der Eisenerze des Kantons Schaffhausen ist nach heutigem Wissen seit dem frühen Mittelalter nachgewiesen. Der erste Hochofen der Eisenhütte von Laufen am Rheinfall ist kurz nach 1630 erbaut worden; das Werk arbeitete mit Unterbrüchen bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts. Sein Ausstoss war grösser als jener der lokalen Rennöfen der vorangehenden Epochen. Aber die Eisenwerke von Schaffhausen, die im frühen 19. Jahrhundert gegründet worden sind, waren nur teilweise von seinen Rohprodukten abhängig und versorgten sich zunehmend auf dem internationalen Markt. 1850 sind Erzbergbau und Eisenverhüttung im Kanton eingestellt worden, während die eisenverarbeitende Industrie bis ins 20. Jahrhundert weiterproduziert hat.

In den Alpen scheint die Eisenproduktion bis ins Spätmittelalter unbedeutend gewesen zu sein. Erst in dieser Epoche entwickelten sich zahlreiche Eisenwerke in den erzeicheren Tälern; die meisten dieser Betriebe verschwanden aber während der Industriellen Revolution. Ein einziges frühmittelalterliches Verhüttungszentrum ist wahrscheinlich vor kurzem auf dem Mont Chemin im Unterwallis identifiziert worden; es erlebte eine unbedeutende Wiederaufnahme der Produktion während der Frühindustrialisierung (vgl. Abb. 19).

Par exemple, le Jura Suisse n'a connu que quelques exploitations mineures pendant le 2^e âge du fer et l'époque gallo-romaine. Au cours du Haut Moyen Age, on assiste à un épanouissement considérable de la production dans plusieurs régions (Jura Vaudois, Bassin de Delémont); ce sont principalement les minerais siderolithiques qui ont été exploités. En même temps, les premières exploitations du minerai oolithique du Dogger sont attestées dans le nord-est du Jura (Bâle-Campagne, Fricktal AG, Schaffhouse).

Au Moyen Age, de manière générale, la production continue à croître en volume et à gagner de nouvelles régions. Dans le Jura Vaudois, le développement de la sidérurgie s'est prolongé au travers d'une petite industrie sidérurgique très persévérante; dans les environs de Vallorbe, l'extraction de la limonite du Valanginien a débuté. Dans le Nord du Jura, l'industrie du fer, toujours basée sur l'exploitation du Siderolithique, a connu un important essor durant le Bas Moyen Age; à l'époque protoindustrielle, on augmentera encore la production, pendant que, à la suite de l'introduction du haut fourneau, le nombre d'implantations diminue (communication orale L. Eschenlohr). L'exploitation du minerai oolithique du Dogger du Jura argovien (Fricktal) a gagné une importance suprarégionale au Bas Moyen Age, qu'elle a su conserver jusque vers 1700. Par contre, les minerais pisolithiques du Jura argovien, bien que facilement exploitables, n'ont été mis en valeur intensivement, à nos connaissances, que pendant le 18^e siècle pour ravitailler les premiers hauts fourneaux du Rhin supérieur.

L'exploitation des gisements de fer du Canton de Schaffhouse est à présent attestée depuis le Haut Moyen Age. Le premier haut fourneau de la forge de Laufon (près des chutes du Rhin) a été construit peu après 1630; l'usine a fonctionné, avec des interruptions, jusqu'au milieu du 19^e siècle. Sa production a été plus importante que celle des bas fourneaux locaux des époques antérieures. Mais les implantations sidérurgiques de Schaffhouse, qui ont été fondées au début du 19^e siècle ne dépendaient que partiellement de la production locale et s'approvisionnaient de plus en plus sur le marché international. En 1850, l'extraction et la réduction du fer dans le canton ont été arrêtées, pendant que les activités de transformation se sont prolongées jusqu'au 20^e siècle.

Dans les Alpes, la production du fer aux périodes anciennes est très mal connue. Elle semble avoir été peu importante jusqu'au Bas Moyen Age. Un seul site de réduction du Haut Moyen Age a été daté récemment sur le Mont Chemin en Bas Valais; il est accompagné de plusieurs autres sites, qui ne sont pas encore datés. Au Bas Moyen Age, de nombreuses implantations sidérurgiques se sont développées dans les vallées ferrifères, à proximité de gisements d'importance et composition diverses; la plupart de ces exploitations disparaîtront pendant la révolution industrielle (cf. fig. 19).

Jusqu'à présent, nous devons nous borner à constater ces faits. Nous ne disposons pas encore de modèles

Bis heute müssen wir uns darauf beschränken, diese Tatsachen zu beschreiben. Wir verfügen über keine wirtschaftsgeschichtlichen Modelle, die sie erklären könnten. Aber wir können versuchen, einige einfache wirtschaftliche Kategorien auf die Fakten anzuwenden, um die Fragen zu beantworten, die wir oben aufgeworfen haben.

6.2 Die Standortbedingungen

Zunächst haben verschiedene Standortbedingungen Einfluss auf die Entwicklung von Eisenwerken.

Die Standorte der primären Produktion unterliegen (vor der „Transportrevolution“, die während der Industriellen Revolution einsetzte) starken Einflüssen der natürlichen Bedingungen.

Vor allem benötigt man ein nahegelegenes Erzvorkommen, das genügend reichhaltig und - in der Mehrzahl der Fälle vor der Industriellen Revolution - auch leicht auszubeuten ist. Ausserdem braucht man (gemessen an der Menge des produzierten Eisens) grosse

économiques qui pourraient les expliquer. Mais nous pouvons essayer d'appliquer quelques catégories économiques simples aux faits connus, afin de répondre aux questions soulevées initialement.

6.2 Les conditions de l'implantation

Au départ, plusieurs conditions d'implantation ont de l'influence sur le développement des implantations sidérurgiques.

Les implantations de production primaire dépendent (avant la „révolution des transports“ pendant la révolution industrielle) fortement des conditions naturelles.

On a tout d'abord besoin de minerai proche, suffisamment abondant et - dans la plupart des cas avant la révolution industrielle - facilement exploitable. On a en outre besoin de grandes quantités de charbon de

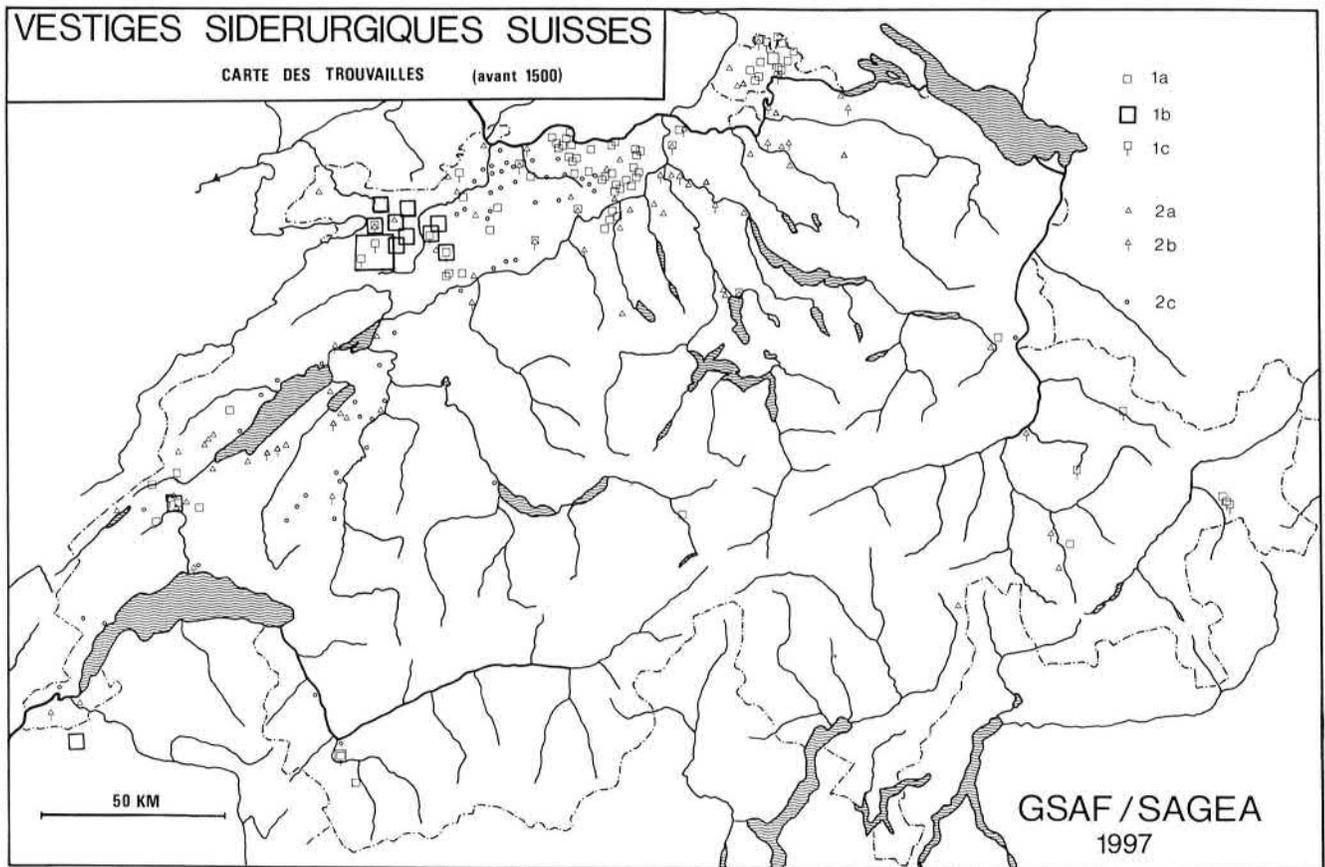


Abb. 19: Verbreitung von Funden und Befunden zur Eisenherstellung - und - verarbeitung in der Schweiz (direktes Verfahren).

Fig. 19: Carte des vestiges sidérurgiques en Suisse (réduction directe).

- 1a Schlackenhalde / Amas de scories
- 1b > 10 Schlackenhalden / > 10 amas de scories
- 1c ausgegrabener Werkplatz / atelier fouillé
- 2a Schlacken (Kalotten) / scories (calottes)
- 2b ausgegrabener Werkplatz / atelier fouillé
- 3 Schlacken erwähnt / mention de scorie

Mengen Holzkohle. Man muss daher grosse Waldflächen abholzen, ihre natürliche Wiederbewaldung abwarten oder sie aufforsten können. (Aufforstungen kamen nach unseren Kenntnissen kaum vor.) Manchmal (nicht in der Schweiz) hat man auch Steinkohle eingesetzt, aber vor der Erfindung des Kokes ist sie selten benutzt worden.

Von geringerer Bedeutung sind die Baustoffe für den Ofenbau, doch muss man immerhin wissen, wie die am Ort verfügbaren Baustoffe zu verwenden sind. Und schliesslich braucht man Wasser, um verschiedene Erze zu waschen, um den Lehm für den Ofenbau zuzubereiten und um den eigenen Durst zu löschen.

Nach der Ausbreitung des Wasserradantriebs im Mittelalter benötigten die meisten, wenn nicht sogar alle Eisenhütten auch die Antriebskraft von Wasserläufen. Das alles sind notwendige, aber offensichtlich noch nicht ausreichende Vorbedingungen für die Einrichtung von Eisenhütten. Dagegen hängen die verarbeitenden Betriebe weit weniger von den natürlichen Bedingungen ab, welche die Anlage der Hüttenwerke begünstigen. Die Schmiedewerkstätten richten sich in erster Linie auf die Konsumenten aus. Jene Werkstätten, in denen die Eisenschwämme (das Produkt des direkten Verfahrens) ausgeheizt werden, können sowohl an den Verhüttungsplätzen als auch in den Schmiedewerkstätten eingerichtet werden. Nach der Einführung des indirekten Verfahrens der Eisenherstellung sind die Frischfeuer in den meisten Fällen an die Hochofenwerke gekoppelt.

Im weiteren Sinn hängt der Standort jedes Produktions- oder Verarbeitungsbetriebs von der Besiedlung und der Gesellschaftsorganisation seines Einzugsgebietes ab. Die Bevölkerung des Einzugsgebietes sichert seine Versorgung mit den lebensnotwendigen Gütern, garantiert seinen Schutz, errichtet seine Verbindungs- und Verkehrswege, erwirbt seine Produkte und regelt deren Verteilung.

6.3 Die Arbeitsteilung

Die Standortbedingungen werden ergänzt durch eine mehr oder weniger stark differenzierte Arbeitsteilung. Die gesellschaftliche Organisation der Produktion und Verarbeitung von Eisen kann dabei sehr unterschiedlich ausgestaltet sein, je nach Region und Epoche.

Im engeren Sinn beschreiben wir beim Eisengewerbe verschiedene Arten einer „inneren“ Arbeitsteilung. Die verschiedenen technischen Aufgaben, aus denen sich die Prozesskette zusammensetzt (Bergbau, Verhüttung, Ausheizen/Frischen, Schmieden) können auf verschiedene Weise aufgeteilt werden, nämlich:

- im geographischen Raum, in dem sie ausgeführt werden;
- auf die verschiedenen Jahreszeiten;
- und entsprechend dem Wohnort, der handwerklichen Qualifikation, der Spezialisierung und dem sozialen Stand der Arbeiter.

Verschiedene Handwerker können die Arbeiten unter sich aufteilen, und zwar sowohl innerhalb einer Werk-

bois (relativement à la quantité de fer produit). Il faut donc déboiser de grandes surfaces de forêt, lui permettre de repousser ou la cultiver même (pratique peu fréquente, à notre connaissance). Parfois, la houille a pu fournir une alternative (pas en Suisse), mais elle n'a été utilisée que rarement avant l'invention du coke.

D'importance mineure sont les matériaux de construction pour bâtir les fourneaux, mais on doit cependant savoir utiliser les matériaux disponibles sur place. Et, finalement, on a besoin de l'eau pour le lavage de beaucoup de minerais, pour confectionner les argiles réfractaires et pour étancher sa soif.

Après la diffusion de la roue hydraulique pendant le Moyen Age, la plupart sinon tous les sites de production dépendent aussi de la force motrice de l'eau. Ce sont des conditions préalables nécessaires, mais pas suffisantes, pour l'implantation de tout établissement de production sidérurgique. Par contre, les ateliers de transformation dépendent beaucoup moins de ces conditions qui favorisent l'implantation des sites de production. Les forges sont surtout orientées vers les consommateurs, pendant que les ateliers de raffinage (procédé direct) peuvent s'intégrer soit dans les sites de réduction, soit dans les forges. Après l'introduction du procédé indirect, on observe dans la plupart des cas un rattachement des ateliers d'affinage aux hauts fourneaux.

En général, toute implantation, soit de production soit de transformation, dépend de l'habitat et du mode d'organisation sociale de sa zone attenante. La population des zones attenantes lui fournit son ravitaillement, garantit sa protection, définit ses voies de communication et de circulation, assure ses débouchés et règle la distribution de ses produits.

6.3 La division du travail

Les conditions d'implantation sont complétées par une division du travail plus ou moins différenciée. L'organisation sociale de la production du fer et de sa transformation en objets finis peut être très variable, d'une région à l'autre et d'une époque à l'autre.

Dans le sens restreint, il existe différents modes de division „interne“ du travail du fer. Au sein de l'industrie du fer, les tâches techniques diverses qui composent la chaîne opératoire (extraction, réduction, raffinage, forgeage), peuvent être réparties:

- dans l'espace géographique où elles sont exécutées;
- sur les différentes saisons de l'année;
- et selon l'habitat, la qualification, la spécialisation et l'état social des travailleurs.

Des artisans divers peuvent distribuer les travaux entre eux, tant au sein d'un atelier que dans un district de production étendu et sa zone attenante. Les différentes tâches techniques peuvent être menées ou par

statt als auch innerhalb eines Reviers und seines Einzugsgebiets. Die verschiedenen Aufgaben können von einer einzigen Gruppe von Arbeitern oder von mehreren Gruppen übernommen werden. Diese Arbeiter können Fachleute sein, die nur im Eisengewerbe arbeiten und unter Umständen hoch spezialisiert sind. In anderen Fällen kann es sich beim Eisengewerbe aber auch um eine Teilzeitbeschäftigung handeln, die oft nur zu bestimmten Jahreszeiten ausgeführt wird.

Die geographische Lage der Werkstätten, die an die Standortbedingungen gebunden ist, muss ebenfalls berücksichtigt werden. Die verschiedenen Tätigkeiten in der Herstellung und Weiterverarbeitung von Eisen können am selben Ort, aber auch an verschiedenen Orten durchgeführt werden. Die räumliche Arbeitsteilung kann sich innerhalb einer Werkstatt, in einer eng begrenzten Region oder auch im Rahmen eines ausgedehnten Reviers abspielen. In einigen Fällen kennen wir sogar weiträumige Verbindungen zwischen Bergbaurevieren und Werkstätten, in denen Eisenfabrikate hergestellt werden.

Einige Beispiele: In der Eisenindustrie des Fricktals wurde das Erz von Bauern abgebaut und transportiert, welche diese Arbeiten auf ihre landwirtschaftlichen Tätigkeiten abstimmen mussten und sie daher vor allem im Winterhalbjahr ausführten. Die Standorte der Schmelzöfen entfernten sich im späten Mittelalter vom Bergwerk, denn die Eisenhütten waren abhängig von der Holzkohle des Schwarzwaldes, die von professionellen Köhlern hergestellt und von bäuerlichen Fuhrleuten angeliefert wurde. Die Eigentümer der Öfen waren die „Grossschmiede“, die das ganze Jahr über ihre Hammerschienen betrieben und daneben „Schmelzer“ beschäftigten, die im Akkord an den Öfen arbeiteten. Die Öfen, die im direkten Reduktionsverfahren produzierten, wurden normalerweise im gleichen Gebäude wie die Hammerschmiede erbaut, und eine Schmiede hatte nur einen Ofen. Es sind aber auch Fälle bekannt, in denen ein Schmied zwei Öfen besass. Ausserdem erlaubte es der Einsatz selbständig arbeitender Schmelzer, abseits der Schmieden einzelnstehende Öfen zu errichten. Die Schmiede führten das Ausheizen der „Masseln“ durch; sie stellten Fertigfabrikate wie Sensen und Pflugscharen her, verkauften aber auch Halbfabrikate, wahrscheinlich in Form von Eisenstangen. Diese wurden an vielen Orten des schweizerischen Mittellandes, wo man kein Eisen herstellte, von anderen Schmieden zu Fertigfabrikaten verarbeitet.

Im weiteren Sinn sind Eisenproduktion und Eisenverarbeitung, ebenso wie die Verteilung ihrer Produkte, Bestandteile der allgemeinen Arbeitsteilung einer Gesellschaft. Denn das Eisengewerbe ist nur ein Element eines Wirtschaftssystems, das aus vielen spezialisierten und voneinander abhängigen Tätigkeiten besteht. Jede Form der gesellschaftlichen Arbeitsteilung kann daher die Tätigkeit des Eisengewerbes beeinflussen - und damit sogar seine „innere“ Arbeitsteilung.

In dieser Hinsicht müssen viele Faktoren berücksichtigt werden, die auf die Ausgestaltung des Eisengewerbes Einfluss haben:

un seul groupe, ou par plusieurs groupes d'individus. Ceux-ci peuvent être des spécialistes, parfois hautement qualifiés, travaillant à plein temps. Dans d'autres cas, il peut s'agir même d'une activité complémentaire, parfois saisonnière.

La localisation géographique des ateliers, qui est liée aux conditions d'implantation, doit être prise en compte également. Les activités de production et de transformation peuvent prendre place en un même lieu ou au contraire dans des endroits différents. Cette division spatiale peut se marquer au sein de l'atelier lui-même, à une échelle micro-régionale ou même au niveau d'un district. Dans certains cas, des relations à très longues distances existent entre régions minières et sites de fabrication d'objets.

Pour en donner quelques exemples: Dans l'industrie sidérurgique du Fricktal en Argovie, le minerai était exploité et transporté aux fourneaux par des paysans, qui se consacraient à ces travaux selon les exigences du travail agricole, donc surtout pendant la saison morte. Les emplacements des fourneaux s'éloignèrent de la mine pendant le Bas Moyen Age, car les ateliers dépendaient du charbon de bois de la Forêt-Noire. Le charbon leur était fourni par des charbonniers professionnels et des paysans-charroyeurs du Nord du Rhin supérieur. Les propriétaires des fourneaux s'appelaient les „Grands-Forgerons“. Ils travaillaient pendant toute l'année aux marteaux hydrauliques, mais ils occupaient aussi des „fondeurs“, qui travaillaient à la pièce aux fourneaux. Les fourneaux, qui fonctionnaient en réduction directe, étaient normalement construits dans le bâtiment de la forge hydraulique. Normalement, une forge n'employait qu'un seul fourneau. Mais on connaît aussi des cas où un forgeron possédait deux fourneaux. En outre, l'emploi de fondeurs qui travaillaient indépendamment permettait aussi de construire des fourneaux isolés. Les forgerons effectuaient le raffinage des „masses“ de fer; ils fabriquaient des objets finis comme des faux et des socs de charrue, mais ils vendaient aussi des produits semi-finis, probablement sous forme de barres de fer. Ceux-ci étaient transformés dans d'autres objets finis par des forgerons dans de nombreux endroits éloignés, surtout sur le plateau Suisse, où l'on ne pratiquait pas la production du fer.

Dans le sens large, les travaux du fer et les moyens de distribution de leurs produits font partie de la division du travail générale d'une société. Car la sidérurgie n'est qu'un élément d'une économie qui dépend de beaucoup d'activités spécialisées et interdépendantes. Toute division sociale du travail peut par conséquent influencer les activités sidérurgiques, même la division technique „interne“ du travail du fer.

A cet égard, beaucoup d'éléments sont à prendre en considération:

- l'importance des activités de subsistance (agriculture et élevage);
- le standard général de la différenciation des techniques et de la spécialisation de l'artisanat;
- la mesure de l'urbanisation;

- die Bedeutung der lebensnotwendigen landwirtschaftlichen Tätigkeiten;
- der allgemeine Stand der Ausdifferenzierung von Techniken und der Spezialisierung von Gewerbezweigen;
- die Intensität der Urbanisierung;
- die gesellschaftliche und räumliche Verteilung der Macht und ihre Aufrechterhaltung;
- die Organisation der Güterverteilung und des Handels;
- die Verkehrsströme;
- die qualitativen und quantitativen Bedürfnisse der Konsumenten.

6.4 Die Bedeutung der Techniken der Herstellung und Verarbeitung

Das technologische Modell der Prozesskette betont notwendigerweise den technischen Aspekt der Ökonomie des Eisens. Andererseits enthüllen die Grenzen des Modells, also die Fragen, auf die es nicht antworten kann, die beschränkte Bedeutung des technischen Aspekts.

Zwischen der „inneren“ Arbeitsteilung, aber auch den Anforderungen der allgemeinen, gesellschaftlichen Arbeitsteilung, und den Techniken der Herstellung und Verarbeitung bestehen sehr komplizierte und manchmal rätselhafte Beziehungen. Man wird daher die Auflösung der oben beschriebenen Paradoxien nicht einfach in der Entwicklung der Techniken suchen dürfen. Trotzdem muss zuallererst die Tatsache unterstrichen werden, dass jedes produktive Eisengewerbe eine komplexe und zweckmässige Tätigkeit ist, die auf der Grundlage grosser beruflicher Erfahrung ausgeführt wird, welche nicht leicht nachzuvollziehen ist (auch dann nicht, wenn unsere Befunde eine „primitive“, wenig entwickelte Tätigkeit zu bezeugen scheinen). Vor allem diese berufliche Erfahrung der Handwerker entscheidet über die Qualität des verfügbaren Eisens.

In archäologischen Zusammenhängen erlauben es Berechnungen manchmal, den Umfang der Produktion eines Verhüttungsplatzes und den Anteil des Eisens, der aus dem Erz gewonnen werden kann, mit einer gewissen Zuverlässigkeit festzustellen (z.B. ESCHENLOHR & SERNEELS 1991: 99–106). Die Qualität und die Vervollkommnung der Fabrikate sind dank vieler metallkundlicher Untersuchungen wenigstens teilweise bekannt. Durch Auswertung der Eisensfunde aus Siedlungsgrabungen lässt sich im allgemeinen (unter Vorbehalt) feststellen, in welchem Mass die Eisentechnik die Bedürfnisse einer Kultur befriedigen konnte. Aber es ist nie einfach, die Kosten und die Wirtschaftlichkeit der Betriebe und der Arbeiter oder die technologischen Alternativen zu beurteilen, die einer Kultur zur Verfügung standen.

Auch widersprüchliche Situationen sind zu beobachten. Manchmal lässt sich eine Weiterentwicklung und sogar eine allmähliche Vervollkommnung von Verhüttungsöfen feststellen (PELET 1993: 110ff., 125f.). Manchmal

- la distribution sociale et géographique du pouvoir et son maintien;
- les agents et courants de distribution et de commercialisation;
- les besoins qualitatifs et quantitatifs des consommateurs.

6.4 L'importance des techniques de production et de transformation

Le modèle technologique de la chaîne opératoire favorise par nécessité la prépondérance de l'aspect technique de l'économie du fer; par contre, les limites de ce modèle, les questions auxquelles il ne répond pas, relèvent l'importance limitée de cet aspect.

La division „interne“ du travail du fer, mais aussi les exigences de la division générale du travail entretiennent des liens très complexes et parfois mystérieux avec les techniques de production et de transformation. On ne cherchera donc pas facilement la solution des paradoxes mentionnés ci-dessus simplement dans le développement de la technologie.

Mais il faut avant tout souligner le fait que, tant qu'il y a travail du fer productif (même si les documents semblent témoigner d'une technique „primitive“, peu élaborée), il s'agit d'une activité complexe, fonctionnelle et maîtrisée à l'aide d'un savoir-faire professionnel qui n'est pas facile à reconstituer. C'est surtout l'expertise des artisans qui décide de la qualité du fer disponible. Dans des contextes archéologiques, des calculs fournissent parfois, avec une certaine précision, des informations sur le rendement des fourneaux et sur le volume de la production (p. ex. ESCHENLOHR & SERNEELS 1991: 99–106). La qualité et le perfectionnement des produits sont partiellement connus grâce à de nombreuses analyses métallographiques. Par les dépouillements des corpus d'objets en fer, on peut au moins constater en général, avec quelques réserves, dans quelle mesure la technologie du fer suffisait aux besoins d'une culture. Mais il n'est jamais facile de juger du coût et du rendement économique des installations et de la main d'oeuvre, ni des alternatives technologiques dont on pouvait disposer.

On observe des situations contradictoires. Parfois, une évolution, voire un perfectionnement lent des fourneaux sont constatés (PELET 1993: pp. 110, pp. 125). Parfois, une innovation inattendue se révèle (p. ex. la soufflerie de Biberist; SCHUCANY 1986), mais elle apparaît isolée dans le contexte général – car beaucoup de technologies qui sont liées à une culture ou une époque spécifique semblent plutôt immobiles jusqu'à leur disparition.

stösst man auf eine unerwartete Erfindung (z.B. das Gebläse von Biberist: SCHUCANY 1986), aber diese erscheint isoliert von ihrem allgemeinen Umfeld - denn viele Technologien, die mit einer bestimmten Kultur oder Epoche verbunden sind, scheinen bis zu ihrem Verschwinden eher zu verharren, ohne dass sich Neuerungen verbreiten.

Es scheint auf jeden Fall, dass bis ins Mittelalter eine angepasste, gleichsam optimierte Technik zur Befriedigung der Bedürfnisse einer bestimmten Kultur oder Epoche genügte. Bis dahin war die dominierende Technik der Eisenherstellung das direkte Reduktionsverfahren (mit einer Unmenge verschiedenartiger Schmelzöfen). Gleichzeitig wurden die grundlegenden Techniken des Schmiedens (Schweissen, Wärmebehandlungen) entwickelt.

Im Lauf des Mittelalters revolutionierten zwei Neuerungen, in Verbindung mit der Anwendung der Wasserkraft, die Herstellung und die Verarbeitung des Eisens. Die Einführung und Ausbreitung des indirekten Reduktionsverfahrens veränderte die Herstellung des Eisens grundlegend und teilweise - durch die Erfindung des Frischens - auch seine Weiterverarbeitung. Die Einführung des Hammerwerks, das von einem Wasserrad angetrieben wird, erlaubte es den Schmieden, mit zunehmender Leichtigkeit grössere Gegenstände herzustellen, und erleichterte auch die Serienfertigung von Gebrauchsgegenständen.

Nach der Innovationsphase des Mittelalters und während der Frühindustrialisierung erfolgten zahlreiche einzelne Verbesserungen. Aber erst während der Industriellen Revolution, Ende des 18. Jahrhunderts, sollte das Puddeln als neues Verfahren das Frischen ersetzen. Schliesslich, um die Mitte des 19. Jahrhunderts, erlaubte der Konverter die Massenproduktion von billigem Qualitätsstahl. In der gleichen Zeit blieben aber alte, gut beherrschte Techniken erhalten, wenn sie sich als wirtschaftlich konkurrenzfähig erwiesen, oft deshalb, weil sie auf die Herstellung bestimmter Produkte oder Werkstoffqualitäten spezialisiert waren.

6.5 Die Verteilung der Produkte und die Regelung der Produktion

In allen diesen Fällen haben die räumlichen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen die technischen Leistungen, die Regelung der Produktion und die Verteilung der Produkte stark beeinflusst (wobei wir für frühgeschichtliche Gesellschaften fast nichts wissen).

In diesem Umfeld, das die Rahmenbedingungen herstellt, wird aufgrund der Anforderungen der lebensnotwendigen landwirtschaftlichen Produktion über die Menge des produzierten Eisens entschieden. (Und während der Lebensunterhalt der Eisenproduzenten durch Bauern sichergestellt wird, beeinflussen sie durch die Menge und Qualität der hergestellten Werkzeuge die Leistungsfähigkeit der Landwirtschaft.) Es entwickeln sich Konjunkturen und Brüche, die sich im Aufblühen und Verschwinden der Stätten der Eisenpro-

Il semble en tout cas que jusqu'au Moyen Age une technique adaptée, optimisée dans un certain sens, était suffisante pour les besoins d'une culture ou d'une époque spécifique. Jusqu'au Moyen Age, la technique dominante de production du fer sera la méthode directe de réduction (qui connaît une énorme diversité de fourneaux). En même temps, les techniques fondamentales du traitement du fer par forgeage (soudure, traitements thermiques) se sont développées.

Au cours du Moyen Age, deux innovations - liées à l'utilisation de la force hydraulique - bouleversent la production et la transformation du fer. L'introduction puis la généralisation de la méthode indirecte de réduction changent profondément la production et partiellement - par l'invention de l'affinage - la transformation. L'introduction du marteau hydraulique dans la forge permet de produire facilement des objets plus grands et facilite la production en série d'objets communs.

Après la phase innovatrice du Moyen Age et pendant l'époque de la protoindustrialisation, de nombreux perfectionnements interviennent. Mais il faut attendre la Révolution industrielle, vers la fin du 18e siècle, pour que le puddlage bouleverse l'affinage. Finalement, au milieu du 19e siècle, le convertisseur permettra la production massive d'acier de qualité à bon marché. En même temps, des techniques anciennes bien maîtrisées sont conservées, quand elles s'avèrent économiquement concurrentielles, dans beaucoup de cas parce qu'elles sont spécialisées dans la production de certains produits ou qualités de matériel.

6.5 La distribution des produits et la régulation de la production

Dans tous ces cas, le contexte géographique, économique et social a fortement influencé les standards techniques, la régulation de la production et la distribution des produits (dont nous ne savons que peu de choses pour les sociétés anciennes).

C'est dans cette sphère que l'on décide, selon les exigences de la production de subsistance (agriculture et élevage), de la quantité de fer produit. Mais pendant que la subsistance doit être garantie aux métallurgistes par les paysans, le travail du fer exerce, par la quantité et la qualité des instruments agricoles disponibles, une influence propre sur les moyens d'autosubsistance. C'est dans cette sphère que se développent les conjonctures et les ruptures qui s'expriment dans l'épanouissement et le déclin des sites de production du fer et de sa transformation en objets finis. C'est dans cette sphère

duktion und -verarbeitung ausdrücken. Es wirken politische und wirtschaftliche Mächte, in deren Verfügungsgewalt sich die Erze, die Wälder, die Produkte der Verhüttung und Verarbeitung, die Mittel zu ihrer Verteilung und Kommerzialisierung, und oft genug auch die Arbeiter selbst befinden. Dieses Umfeld stellt schliesslich auch die Transportwege und Absatzkanäle her.

Wir dürfen dabei nicht vergessen, dass die methodischen Grenzen von Archäologie und Archäometrie uns nicht erlauben, alle Fragen zu beantworten, welche die Beziehungen zwischen dem Eisengewerbe und seinem sozioökonomischen Umfeld stellen. Die Erfahrungen der Ethnographie, die Modelle der Wirtschaftsanthropologie und die Resultate der historischen Wissenschaften sind auf alle Fälle mit zu berücksichtigen.

que se situent les pouvoirs politiques et économiques qui disposent des droits de propriété des minerais, des forêts, des produits, de leurs modes de distribution et de commercialisation, et souvent même des travailleurs du fer. Et c'est cette sphère qui assure les liens de communication et les voies de distribution.

Mais n'oublions pas que les limites méthodologiques des apports de l'archéologie et de l'archéométrie ne nous permettent pas de répondre à toutes les questions qui sont soulevées par les relations entre la sidérurgie et son contexte socio-économique. Les expériences de l'ethnographie, les modèles de l'anthropologie économique et les résultats des sciences historiques sont à prendre en considération aussi.

No	Dénomination / Name	Région / Region	Périodes / Zeitstellung			
			AdF	GR	HMA	MA
Districts majeurs / Grosse Bezirke						
1	Montagne Noire	Aude		XXX		
2	Chateaubraint	Pays de Loire		X	X	X
3	Puissaye	Bourgogne	?	X	?	X
4	Entre-Sambre-et-Meuse	Belgique		X		X
Districts moyens / Mittlere Bezirke						
5	Bretagne centrale	Bretagne	?	X		X
6	Bocage normand	Normandie				X
7	Perche et Pays d'Ouche	Normandie		X	X	X
8	Périgord	Dordogne / Charente				
9	Haut Poitou méridional	Poitou		X		X
10	Argenton-sur-Creuse	Centre		XXX		X
11	Nord Indre	Centre		X		
12	Forêt d'Allogny	Centre / Bourges		XXX		X
13	Gâtinais	Bourgogne		X		
14	Pays d'Othe	Bourgogne / Champagne	X	X		X
15	Vézelay	Bourgogne		X		
16	Morvan-Auxois	Bourgogne	-	XXX		X
17	Jura Suisse	Suisse		X	X	X
Zones mineurs / Kleine Bezirke						
18	Le Mans	Pays de Loire		?	X	
19	Sologne	Centre				
20	Forêt de Soignes	Belgique			X	
21	Pays Haut	Lorraine		X	X	XXX
22	Plateau de Haye	Lorraine		X	X	XXX
23	Ahrweiler Wald	Rheinland-Pfalz		X		
24	Eisenberg	Rheinland-Pfalz		X		
25	Mâconnais	Bourgogne		X		
26	Mont Salève	Alpes				
27	Jura vaudois	Suisse	X	X	XXX	
28	Berthelange	Jura français		?	X	
29	Haute Ariège	Pyrénées		X		X
30	Canigou	Pyrénées		X		
31	Pic du Kaymar	Aveyron				

- AdF Age du fer /
Eisenzeit
- GR Gallo-romain /
gallorömisch
- HMA Haut Moyen Age /
Frühmittelalter
- MA Moyen Age /
Mittelalter
- sans information /
keine Angaben
- absent /
nicht vorhanden
- ? probable /
wahrscheinlich
- X attesté /
belegt
- XXX prédominant /
vorwiegend

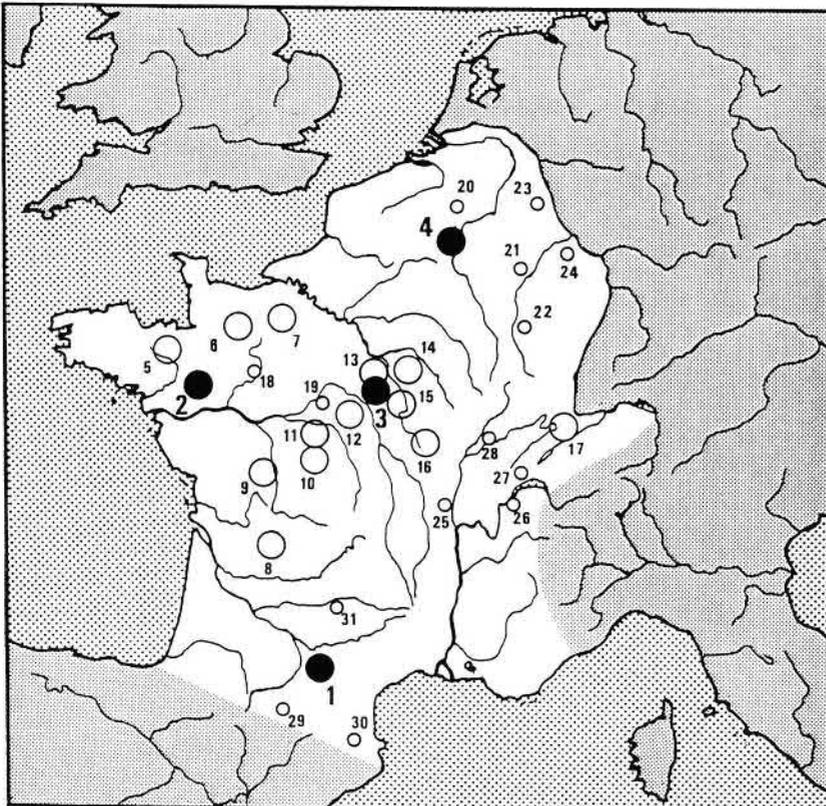


Abb. 20: Verhüttungsdistrikte des direkten Verfahrens in Gallien im Laufe der Zeit.

Fig. 20: Districts sidérurgiques de la réduction directe en Gaule du cours du temps.

7 Schlacken ausserhalb der Eisenmetallurgie

7 Scories sans rapport avec la métallurgie du fer

7.1 Einleitung

Verschlackte Materialien aller Art gehören zum täglichen Fundgut einer archäologischen Ausgrabung, unabhängig von deren Zeitstellung. Bei der Fundverwaltung, Auswertung und Publikation dieser oft nicht näher identifizierbaren, verbrannten, versinterten, verkrusteten, verschlackten oder verglasten Überreste sind die ArchäologInnen vielfach verunsichert. Als Abfall- und Nebenprodukte der verschiedensten Tätigkeiten rund um das Feuer sind Schlacken ja nicht in strengen Sinne beabsichtigte Artefakte; sie können sogar gänzlich unbeabsichtigt entstehen, z.B. bei einer Feuersbrunst.

Da so unterschiedliche Rohstoffe wie Erze, Tone, Sand, Kalk, Glas und Metalle bei pyrotechnischen Aktivitäten zwischen 800 und 1300 Grad Celsius ähnliche physikalisch-chemische Prozesse durchlaufen, sind die anfallenden Produkte in ihrem Erscheinungsbild sehr ähnlich. Selbst Schlackenspezialisten können deshalb vielfach Schlackenfunde ohne Zuhilfenahme der modernen Analytik nicht abschliessend beurteilen. Die meist nur fragmentarisch erhaltenen Zeugen pyrotechnischer Aktivitäten jedoch bereits auf der Grabung richtig zu interpretieren, ist für die Qualität der Ausgrabung und deren Dokumentation von zentraler Bedeutung. Dies gilt vor allem für die Befunde, seien es Ofenreste oder Feuerstellen, da diese meist vollständig abgebaut, zerfallen oder zerstört sind. Kleinfunde finden heutzutage glücklicherweise vermehrt den Weg in ein Untersuchungslabor. Aber auch Schlacken müssen als Vollmitglied in die Gilde der archäologischen Informationsträger aufgenommen werden.

Meist geschieht die metallurgische Analytik erst lange nach Abschluss der Grabung. Die Resultate bleiben so den publizierenden ArchäologInnen vorbehalten; das Grabungspersonal profitiert davon nichts. Diesem mangelnden Informationsfluss entgegenzuwirken, d.h. die naturwissenschaftliche Arbeit hinter der Bühne an die Front zurückzumelden, ist eine der vordringlichsten Aufgaben der Archhämometallurgie.

Wie zeitgemäss der Umgang mit Schlacken nicht nur zurück in die Vergangenheit sondern auch in Richtung Zukunft sein kann, zeigen einige Titel von Publikationen der Eidg. Anstalt für Wasserversorgung, Abwasserreinigung und Gewässerschutz EAWAG:

- „Kehrichtschlacken als anthropogene Sedimente“
- „Das Langzeitverhalten anorganischer Stoffe in Depositionen: Erkenntnisse aus der Archäologie.“
- „Untersuchung anthropogener Ablagerungen: Zeithorizont Urgeschichte.“

Könnte es sein, dass sich die Archäologie im nächsten Jahrtausend neue chronologische und terminologische Schwerpunkte setzen müssen? Werden StudentInnen bald einmal die Daten der Kupferschlacken-

7.1 Introduction

Des scories de tout genre font partie des trouvailles quotidiennes d'une fouille archéologique, et cela' indépendamment de l'époque. Les archéologues sont confrontés à nombre de problèmes en ce qui concerne la gestion des trouvailles, l'interprétation et la publication de ces restes, dont l'identification précise est souvent difficile, que l'on retrouve carbonisés, concrétionnés, incrustés, scorifiés ou vitrifiés. En tant que déchets et éléments résiduels produits par les différentes activités autour du feu, les scories ne peuvent pas être considérées comme des artefacts au sens strict du terme; elles peuvent même se former tout à fait spontanément, par exemple lorsque un feu se déclare.

Comme des matières premières aussi différentes que les minerais, l'argile, le sable, la chaux, le verre ou les métaux développent des processus physico-chimiques analogues lorsqu'elles sont chauffées à des températures allant de 800 à 1300 ° C, les produits qui en résultent ont un aspect tout à fait semblable. C'est pour cette raison que même les spécialistes en matière de scories ne parviennent pas à en déterminer précisément le genre sans recourir à des analyses modernes. L'interprétation correcte, déjà sur la fouille, des restes produits par les activités liées à l'utilisation du feu, la plupart du temps fragmentaires, est d'une importance fondamentale pour assurer la qualité de documentation. Cela vaut surtout pour les structures, qu'il s'agisse de restes de fours ou de foyers, car ces derniers sont en général complètement détériorés, désagrégés ou détruits. Heureusement, les objets finissent la plupart du temps dans des laboratoires d'analyses. Mais les scories doivent aussi être intégrées à part entière dans les sources d'informations archéologiques.

Le plus souvent, les analyses métallurgiques ne sont effectuées que longtemps après la fin d'une fouille. Les résultats restent ainsi réservés aux archéologues qui vont les publier, alors que le personnel de fouille n'en bénéficie pas. Résoudre ce problème d'informations lacunaires, en rendant le travail scientifique qui se fait derrière les coulisses, accessible est l'une des tâches absolument prioritaires de l'archéométallurgie.

Un certain nombre de publications de l'Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux montre bien à quel point l'étude des scories est d'actualité, non seulement si on la réfère au passé, mais également dans une optique future. Voici quelques titres publiés par cet institut:

- «Kehrichtschlacken als anthropogene Sedimente»
- «Das Langzeitverhalten anorganischer Stoffe in Depositionen: Erkenntnisse aus der Archäologie.»

zeit, Eisenschlackenzeit, Oelfeuerungsschlackenzeit und Dioxinschlackenzeit als Eckpfeiler ihres Studiums auswendig lernen ?

In der Zwischenzeit werden wir uns in der Ausbildung zur richtigen Ansprache von Schlacken an die wichtigsten Gattungen von verschlackten Materialien auf schweizerischen Fundstellen halten. Allen voran ist hier nach der Eisenmetallurgie die Kupfer-, Bronze- und Messingmetallurgie zu nennen. Selbstverständlich sind aus Grabungen in unserem Land Schlacken aus der Herstellung und Verarbeitung von Blei, Silber, Glas, usw. bekannt. Auch Kalkbrennöfen hinterlassen massive verschlackte Überreste.

7.2 Die Kupfermetallurgiekette

7.2.1 Verhüttung

Eine auch nur annähernd vollständige urgeschichtliche Produktionskette der Kupferverhüttung fehlt in der Schweiz. Es finden sich im Oberhalbstein Tausende von Tonnen prähistorischer Kupferschlacke (Abb. 21), jedoch ist keine sicher datierte prähistorische Mine bekannt, kein Kupferverhüttungssofen, welcher als solcher erkannt und ausgegraben wurde, und ausser Holzkohle und ein paar in Schlackenhalde, verstreuten Düsen- oder Gebläsefragmenten keine archäologischen Funde, welche die Entstehung der Schlackenhalde zeitlich eingrenzen könnten. Aus einigen Schlackenhalde existieren Radiokarbonaten, welche die Verhüttungstätigkeit ab der späten Bronzezeit bis in die römische Zeit datieren. Genaue Angaben über die Ausmasse der einzelnen Halde fehlen uns weitgehend; es handelt sich jedoch immer um Schlackensammlungen im Bereich von mehreren Tonnen. Es wird



Abb. 21: Sogn Martegn, Savognin, Oberhalbstein (GR). Im Hang links der Kirche mehrere Schlackenhalde der Kupferverhüttung.

Fig. 21: Sogn Martegn, Savognin, Oberhalbstein (GR). Lieu de trouvaille de plusieurs amas de scories (réduction du cuivre), sur le versant situé à gauche de l'église.

«Untersuchung anthropogener Ablagerungen: Zeit-horizont Urgeschichte.»

Se pourrait-il qu'il faille, au prochain millénaire, établir pour l'archéologie de nouvelles références du point de vue de la chronologie et de la terminologie? Les étudiants et étudiantes devront-ils bientôt apprendre par coeur les dates en relation avec la production de scories de cuivre, de fer, de dioxine ou du chauffage au mazout?

En attendant, nous chercherons à nous en tenir, dans le cadre d'une définition correcte de scories, aux principales familles de matériaux scorifiés retrouvés dans les sites archéologiques suisses. Mentionnons notamment, après la métallurgie du fer, celle du cuivre, du bronze et du laiton. Bien entendu, les fouilles effectuées dans notre pays ont livré des scories provenant de la production et du travail du plomb, de l'argent, du verre, etc. Par ailleurs, les fours à chaux produisent également des quantités considérables de résidus scorifiés.

7.2 La chaîne opératoire de la métallurgie du cuivre

7.2.1 La réduction

En Suisse, en ce qui concerne la réduction du cuivre, nous ne connaissons pas de chaîne de production préhistorique, ne serait ce que partiellement. La région de l'Oberhalbstein a certes livré des milliers de tonnes de scories de cuivre préhistoriques, mais nous ne connaissons aucune mine de cette époque qui soit datée avec exactitude, aucun four pour la réduction du cuivre fouillé et identifié comme tel, aucune trouvaille archéologique permettant d'établir la date à laquelle les amas de scories se sont constitués, à part de charbon de bois et de quelques fragments de tuyères ou de soufflets éparpillés dans des dépotoirs de scories. Il faut compter une proportion de 10:1 entre les scories et le métal au cours de la réduction du minerai, ce qui correspond à une production de plusieurs centaines de tonnes de métal de cuivre. Des datations au radiocarbone réalisées sur quelques-uns de ces amas ont

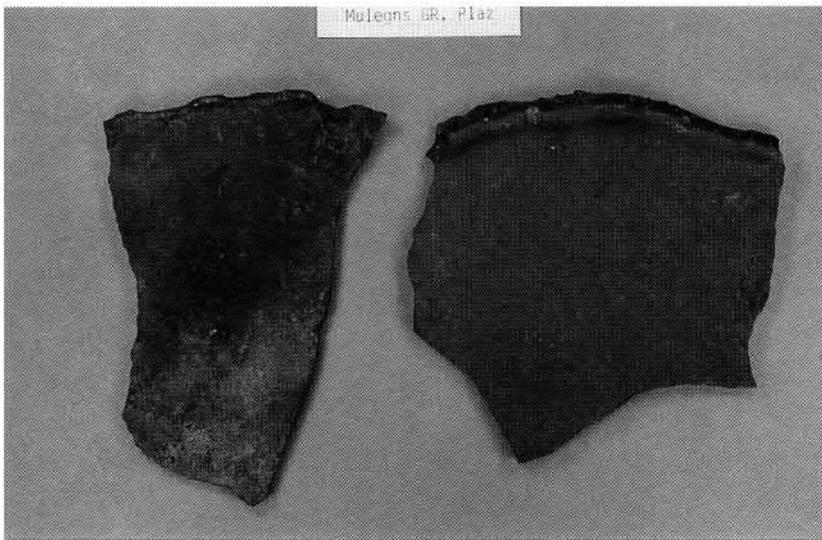


Abb. 22: Dünne Plattenschlacken mit Rand, Kupferverhüttung. Oberhalbstein (GR).

Fig. 22: Minces plaques de scorie munies d'un bord, réduction du cuivre, Oberhalbstein (GR).

mit einer Ausbeute im Verhältnis 10:1 von Schlacke zu Metall gerechnet, was einer Produktion von einigen Hundert Tonnen Kupfermetall allein im Oberhalbstein entspricht. Die Halden sind zusammengesetzt aus Fragmenten von kalottenförmigen Schlackenkuchen von bis zu 40 cm Durchmesser und dünnen Plattenschlacken von unter 1 cm Dicke (Abb. 22). Untersuchungen zur Stratigraphie, d.h. zur zeitlichen Abfolge der Produktion innerhalb derselben Halde stehen noch aus.

Aus Funden in Italien und Österreich wissen wir, dass die prähistorischen Kupferschmelzöfen meist in Paaren bzw. Batterien auftreten (Abb. 23). Dies lässt den Schluss zu, dass der Verhüttungsprozess mehrstufig verlief. Experimente mit der Verhüttung von Kupferkies (CuFeS_2) haben gezeigt, dass in einem ersten Schritt aus geröstetem Kupfererz ein sogenannter Kupferstein, ein mit Kupfer angereichertes Konzentrat mit Restschwefel und Eisenoxid erschmolzen werden kann. Dieser Kupferstein, auch Matte genannt, wird in einem zweiten Schritt zu metallischem Kupfer reduziert. Die Öfen waren aus lokalen Steinen aufgebaut und innen mit Lehm ausgekleidet; sie sind schachtförmig und wurden von oben beschickt. Ohne Zufuhr von künstlicher Luft konnten die erforderlichen Temperaturen von 1200–1300 Grad zur Schlackenbildung nicht erreicht werden. Über die Gebläse können wir nur spekulieren, belegt sind einzig die fest im Ofen eingelassenen Tondüsen. Auch sie werden jedoch kaum je in Originallage gefunden, denn die Ofenbrust wurde zur Entnahme des Kupfers oder des Kupfersteins abgebaut. Das Produkt dieser Verhüttung war ein immer noch stark mit Eisen und Schwefel verunreinigtes aber metallisches Schwarzkupfer. In einem stark oxidierenden Feuer konnten diese Verunreinigungen aus der flüssigen Kupferschmelze herausgebrannt werden. Das Endprodukt, ein raffiniertes Kupfer mit wenigen Prozenten Gesamtverunreinigungen findet sich erfahrungsgemäss kaum auf einem Verhüttungsplatz. Es war zu kostbar und wurde minutiös eingesammelt. Das Abfallprodukt der Verhüttung hingegen, die Schlacke,

permiss de situer l'activité de réduction sur une période allant de l'âge du Bronze final à l'époque romaine. Des indications précises sur les dimensions de chaque amas font amplement défaut; mais n'oublions pas qu'il s'agit de dépôts de scories de l'ordre de plusieurs tonnes chacun. Les amas sont constitués de fragments de «gâteaux» de scories en forme de calottes, d'un diamètre pouvant atteindre 40 cm, et de minces plaques de scories d'une épaisseur inférieure à 1 cm (fig. 22). L'analyse de la stratigraphie, c'est-à-dire de la succession chronologique de la production dans un même amas, fait encore défaut.

A partir de trouvailles provenant d'Italie et d'Autriche, nous savons que la plupart des fours pour la fusion du cuivre se présentaient par paires ou batteries, d'où la déduction que le processus de fusion se faisait par étapes. Certaines expériences de fusion de chalcoppyrite (CuFeS_2) ont montré que, dans une première phase, on peut obtenir à partir du minerai de cuivre grillé une masse cuivreuse concentrée, contenant du soufre résiduel et de l'oxyde de fer. Ce produit intermédiaire, connu également sous le nom de matte, est réduit dans une deuxième phase en cuivre métallique. Les fours étaient construits en pierres d'origine locale et revêtus d'argile à l'intérieur; en forme de puits, ces fours étaient alimentés par le haut. Sans l'apport d'air artificiel, on ne pouvait atteindre les températures de 1200–1300 degrés nécessaires à la formation de scories. Nous ne pouvons que formuler des hypothèses sur l'existence de soufflets, les fours ayant livré uniquement des tuyères en argile. Même ces dernières ne sont presque jamais retrouvées dans leur position d'origine, car la paroi du four était abattue au moment de retirer le cuivre. Le produit de cette fonte était un cuivre noir métallique contenant encore d'importantes quantités de fer et de soufre. Dans un feu à pouvoir fortement oxydant, on pouvait brûler ces impuretés contenues dans le cuivre liquéfié. L'expérience nous a appris qu'il est fort improbable de retrouver le produit fini, un cuivre raffiné à teneur réduite en impuretés, à

wurde auf Halde geworfen. Die so entstandenen Schlackenhalde sind heute noch kaum überwachsen und als schwarze, schotterartige Fremdkörper im Gebirge sichtbar. Erztyp, Muttergestein, geologische Herkunft, Schmelztemperaturen und -bedingungen, Ofentyp, Produktionsmenge, Energieverbrauch, alle diese Informationen können einem Stück Schlacke entlockt werden - mit dem entsprechenden analytischen Aufwand.

7.2.2 Guss

Schlacken der Kupferverhüttung sind nur vereinzelt innerhalb einer prähistorischen Siedlung zu finden, da der Prozess in unmittelbarer Nähe der anstehenden Erze stattfand. Alle weiteren Schritte des Legierens und Giessens hinterlassen jedoch auch verschlacktes Material und dies vorwiegend im Siedlungsbereich. Ab dem Neolithikum, d.h. mit dem Auftreten der ersten lokalen Kupferverarbeitung an unseren Mittellandseen um 3700 BC, finden wir demnach verschlackte Gussabfälle und vor allem verschlackte Keramikfragmente. Diese fallen meist in wenigen Stücken als amorphe

l'emplacement où s'est déroulé le processus de fonte. En revanche, les déchets produits par cette fusion, c'est-à-dire les scories, forment des dépotoirs que l'on retrouve aujourd'hui dans les régions montagneuses sous forme de pierres concassées de couleur noire. Par des analyses adéquates, on peut déterminer à partir d'une scorie le type de minerai, le rocher minéralisé, l'origine géologique, les températures et conditions de fusion, le type de four, les quantités produites ou encore la consommation énergétique.

7.2.2 La fonte

Les habitats préhistoriques ne livrent que rarement des scories résultant de la réduction du cuivre, du fait que ce processus se déroulait à proximité immédiate du minerai extrait. Toutefois, toutes les autres phases de l'alliage et de la fonte produisent également des scories, et ce principalement en contexte d'habitat. Dès le Néolithique, c'est-à-dire à l'époque où font leur apparition – vers 3700 av. J.-C. – les premiers ateliers locaux de travail du cuivre dans la région des lacs du Plateau suisse, nous retrouvons des scories produites par la fonte de métal et surtout des fragments céramiques



Abb. 23: Rekonstruktionszeichnung der prähistorischen Kupferverhüttung. Erzabbau und Röstbett im Hintergrund, Verhüttungsöfen vorne rechts, vorne links Schlackenhalde.

Fig. 23: Dessin illustrant la réduction préhistorique du cuivre. "Extraction du minerai" et lit de minerais grillé à l'arrière-plan, fourneau de réduction devant à droite, à gauche amas de scorie.

Klumpen an. Ob diese verschlackten Abfälle auch wirklich in einem funktionalen Zusammenhang mit der Kupfer- und Bronzemetallurgie standen, bringt erst die Materialanalyse an den Tag.

Der grösste Teil des schweizerischen Neolithikums wird begleitet von Kupferobjekten. Die einzigen Zeugen der lokalen Metallverarbeitung sind Gusstropfen und Schmelztiegel. Allein aus den Zürcher Seen liegen Dutzende von Tiegeln aus der ersten Hälfte des 4. Jt. v. Chr. vor. Es fehlen jedoch die Werkplätze, die Öfen, die Blasvorrichtungen und die Gussformen. Gemäss den Brandspuren sind die Gusstiegel immer von oben, direkt auf das darinliegende Metall erhitzt worden. Es kann davon ausgegangen werden, dass in der Kupferzeit wie erwiesenermassen in der Frühbronzezeit die Luft mittels Blasrohren auf den Tiegel gerichtet wurde (Abb. 24). Auch in der Spätbronzezeit wurde das Metall im offenen Tiegel aufgeschmolzen. Die Luftzufuhr erfolgte weiterhin von oben, jetzt aber mittels Blasebälgen durch grössere Düsen (Abb. 25).

Erst mit dem Beginn der Eisenzeit tritt der einschneidendste Wandel der Aufschmelztechnik von Kupferlegierungen ein. Die Gusstiegel wurden ab dem 7. Jahrhundert v. Chr. – und werden es auch heute noch – von aussen her aufgeheizt. Viele eisenzeitliche Tiegel sind mit einem Tondeckel versehen, welcher eine Verunreinigung des Schmelzgutes verhindert. Diese neue Technik bedingt entweder die Verwendung eines feuerfesten Tones oder eine sehr genaue Kontrolle der

scorifiés. Ces derniers apparaissent la plupart du temps en petites quantités et sous forme de fragments amorphes. C'est uniquement l'analyse du matériel qui permet d'établir si ces déchets scorifiés avaient réellement une fonction dans la métallurgie du cuivre et du bronze.

En Suisse, le Néolithique a livré très souvent des objets en cuivre. Les seuls témoins de la transformation du métal dans des ateliers locaux sont représentés par des gouttes de coulée et par des creusets utilisés pour la fonte du métal. Les sites lacustres de la région zurichoise ont livré des douzaines de creusets datés de la première moitié du 4^e millénaire av. J.-C., mais pas d'ateliers de fonte, de fours, de soufflets ni de moules. Néanmoins, les traces de feu permettent d'établir que le creuset était toujours chauffé du haut, directement sur le métal qu'il contenait. On peut en déduire qu'à l'âge du Cuivre – tout comme cela a été prouvé pour l'âge du Bronze ancien – on dirigeait l'air sur le creuset au moyen de chalumeaux. A l'âge du Bronze final également, le métal était coulé dans un creuset ouvert, l'air était toujours dirigé du haut, mais à l'aide de soufflets.

Ce n'est qu'au début de l'âge du Fer qu'intervient un changement décisif dans la technique de fonte des alliages en cuivre. Dès le 7^e siècle av. J.-C. – comme c'est d'ailleurs encore le cas aujourd'hui – on chauffe les creusets de l'extérieur. Bon nombre de creusets de



Abb. 24: Kupferschmelzversuch mittels sechs Blasrohren mit aufgesetzten Tondüsen. Rekonstruktion nach frühbronzezeitlichen Funden.

Fig. 24: Experiment de fonte de cuivre, effectuée à l'aide de six chalumeaux munis de tuyères en argile. Reconstitution d'après des trouvailles datées de l'âge de Bronze ancien.

Temperatur, z.B. anhand der Farbe des glühenden Tiegels. Der meiste im schweizerischen Mittelland anstehende Ton beginnt sich zwischen 1100 und 1150 Grad zu erweichen. Bei Schmelztemperaturen der eisenzeitlichen Bronzelegierungen mit viel Zinn und Blei von unter 900 Grad ist deren Aufschmelzen in solchen Tonen möglich. Die durchgehende Verwendung dieser niedrigschmelzenden Legierungen ihrerseits ist erst möglich, wenn der Werkstoff Bronze vom Druck des Hochleistungsproduktes befreit ist, d.h. wenn Eisen die Funktion des strategischen Metalls übernimmt. Nicht geändert hat sich in der Eisenzeit die Gusstechnik für Bronze, da Eisen als Material für Gussformen nicht zur Verfügung stand; es wurde weiterhin in Ton und Steinformen gegossen. Bevor der neue Werkstoff Eisen selbst gegossen wurde und anderen Metallen zur Formgebung dienen konnte, musste er noch fast zweitausend Jahre Entwicklung durchlaufen. Erst im fortgeschrittenen Mittelalter konnte Eisen in Europa gegossen werden. Dieser interessante Aspekt eines „technischen Rückschrittes“ in den nichtflüssigen Zustand bei der Herstellung eines neuen, überlegenen Werkstoffes nach einer jahrtausende alten Tradition des Schmelzens von Metallen verdient eine eingehende kulturhistorische Untersuchung.

cette époque sont munis d'un couvercle en argile empêchant les impuretés de se déposer sur la masse en fusion. Cette nouvelle technique suppose soit l'utilisation d'une argile réfractaire, soit un contrôle très précis de la température de fusion (par exemple d'après la couleur du creuset incandescent). L'argile que l'on trouve sur le Plateau suisse commence à se ramollir à une température située entre 1100 et 1150 °C. Il est donc possible de fondre dans des creusets faits de ce type d'argile des alliages de bronze produits à l'âge du Fer, qui présentent une teneur élevée en étain et en plomb et se liquéfient à moins de 900 °C. Par ailleurs, l'utilisation généralisée de ces alliages ayant un point de fusion bas ne sera possible que lorsque le bronze, n'étant plus considéré le métal de référence, sera remplacé par le fer. Durant l'âge du Fer, la technique de coulée du bronze n'a pas changé du fait que le fer n'était pas disponible comme matériau pour fabriquer les moules; on continuait en effet à couler le métal dans des moules en argile et en pierre. Il a encore fallu attendre presque deux mille ans pour que le fer pur soit fondu et utilisé en tant que tel pour fabriquer de nouveaux objets. En Europe, ce n'est que durant le Bas Moyen Age qu'on a commencé à couler le fer. Cet aspect intéressant d'une «régression technique» à l'état non-liquide pour la production d'une nouvelle matière de qualité supérieure, après une tradition de la fonte des métaux vieille de plus de trois mille ans, méritait une analyse historique plus approfondie.



Abb. 25: Rekonstruktion der spätbronzezeitlichen Bronzegusstechnik: Eine knieförmig gebogene Tondüse wird auf einen Gussherd aufgesetzt. Der Gusstiegel wird genau unter die Düse geschoben und das Ganze mit Holzkohle zugedeckt. Anschliessend wird mittels Blasebälgen solange Luft in den glühenden Holzkohlestoss gepumpt, bis das Metall im Tiegel aufgeschmolzen ist.

Fig. 25: Reconstitution de la technique de fonte du bronze à l'âge du Bronze final: une tuyère courbée en forme de genou est introduite dans un foyer pour la fonte. Le creuset est glissé sous la tuyère et le tout recouvert de charbon de bois. Ensuite, au moyen de soufflets, on dirige de l'air sur le tas de charbon de bois incandescent jusqu'à ce que le métal se soit liquéfié dans le creuset.

7.3 Edelmetalle

Ebenso interessant sind technikgeschichtliche Vergleiche mit den Edelmetallen. Gold musste nie verhüttet werden, es lag immer schon als Metall vor. Sei es als Flussgold, welches aus Fluss- oder Bachkies gewaschen wurde, oder als Berggold, welches aus dem Fels gehauen werden musste, immer stand dieses wertvolle Gut als glänzendes und als solches sichtbare Metall zur Verfügung. Es musste nur noch angehäuft, zusammengeschmolzen und allenfalls raffiniert werden. Weshalb Goldfunde in der Schweiz bis zur keltischen Zeit so selten sind, wird wohl eher gesellschaftliche als technologische Gründe haben. Mangel an Goldvorkommen konnte es nicht gewesen sein, wurde in unseren Flüssen doch noch in der Neuzeit kiloweise Gold gewaschen, wie historische Dokumente aus dem Napfgebiet belegen. Ganz anders verhält es sich mit der Produktion von Silber. Gediegen Silber findet sich zwar sporadisch, wie auch gediegen Kupfer. Der grosse Bedarf an Silber, vor allem für Münzen, musste jedoch mit der Verhüttung von silberhaltigen Bleierzen gedeckt werden. Bei der Herstellung musste Silber einen komplizierten Reinigungsprozess durchlaufen. Dabei fallen „schmutzige“ Bleioxidschlacken an, und erst ganz am Schluss des Prozesses liegt das Silber als „sauberes“ Metall vor. Wie Goldfunde treten Silberobjekte erst in der Eisenzeit gehäuft auf, in Form von Fibeln und Ringschmuck. Die schweizerische Montangeschichte ist noch bis ins letzte Jahrhundert geprägt von wenig erfolgreichen Investitionen in den Silberbergbau.

Die unterschiedlichen technischen Anforderungen an die Ausbeute von Erzen und Metallen haben selbstverständlich einen direkten Einfluss auf die Organisation deren Gewinnung. Welche Schritte der Produktion der verschiedenen Metalle mussten von absoluten Spezialisten ausgeführt und was konnte von unausgebildeten Hilfsarbeitern erledigt werden? Wie reagierten die prähistorischen Produktionsketten auf Innovationschübe? Gab es bereits in der Urgeschichte plötzlich arbeitslose Kupfer- oder Eisenmetallurgen? Diese Fragen sollen andeuten, wie präzise technikgeschichtliche Fragen angegangen werden müssen, damit ihre Beantwortung sich auch wirklich in den Dienst der Archäologie, in die Erforschung der kulturgeschichtlichen Entwicklung der Menschheit stellt.

7.3 Métaux précieux

Les métaux précieux offrent également des éléments de comparaison intéressants du point de vue technique. L'or n'a jamais dû être réduit, car il a toujours été disponible en tant que métal; que ce soit sous forme d'or alluvional prélevé des rivières selon la technique de l'orpaillage ou d'or filonien extrait de la roche, ce noble et brillant métal a toujours été bien reconnaissable comme tel. Il n'a fallu que l'accumuler, le couler et, le cas échéant, le raffiner. Les raisons pour lesquelles les trouvailles en or sont si rares en Suisse jusqu'à l'époque celtique sont d'ordre social plutôt que technologique. On ne pourrait pas plus envisager une pénurie en or, car nos rivières ont livré des kilos d'or encore aux époques modernes, comme l'attestent des documents historiques provenant de la région de la Napf. La situation est complètement différente pour ce qui concerne la production d'argent. Certes on retrouve sporadiquement de l'argent à l'état métallique, tout comme du cuivre natif; cependant, il fallait répondre à la forte demande en argent, destiné surtout à la fabrication de monnaies, en fondant les minerais de plomb contenant de l'argent. Lors de sa production, ce métal devait subir un procédé de purification compliqué. On obtenait d'abord des scories d'oxyde de plomb «impures», et ce n'est qu'à la fin de l'opération que l'argent était «pur». Tout comme les objets en or, ceux en argent n'apparaissent en quantités considérables qu'à l'âge du Fer, sous la forme de fibules et de bagues. L'histoire suisse de l'extraction minière est marquée, encore jusqu'au siècle dernier, par des investissements peu rentables dans l'industrie de l'extraction de l'argent.

Il va de soi que les différentes exigences techniques liées à l'extraction des minerais et des métaux influencent directement l'organisation de leur exploitation. Quand faut-il recourir aux spécialistes pour assurer le déroulement correct des phases de production des divers métaux, et quand l'intervention d'ouvriers non qualifiés est-elle suffisante? Comment les chaînes de production préhistoriques ont-elles réagi aux innovations techniques? Les artisans préhistoriques du cuivre et du fer connaissaient-ils déjà le chômage? Toutes ces questions sont censées nous indiquer la façon précise dont il faut aborder des problèmes techniques pour que les réponses à ces questions puissent réellement être utiles à l'archéologie et à l'histoire culturelle de nos sociétés.

8 Einführende Bibliographie / Orientation Bibliographiques

8.1 Bibliographien / Bibliographies

MANGIN, M., PAQUIER, M. et collaborateurs, *Bibliographie Mines et Métallurgie anciennes: Le fer*. Besançon: Laboratoire d'Archéologie classique et DBMIST, 1992, 138p. (nouvelle édition augmentée à paraître / erweiterte Neuauflage in Vorbereitung)

Laufende Bibliographien in: / Bulletins bibliographiques dans: *Archeologické Rozhledy*, Praha; *Historical Metallurgy*, London.

Fachbibliothek / Bibliothèque spécialisée:
Eisenbibliothek, Klostergut Paradies, CH-8246 Langwiesen.

8.2 Internationale Kolloquien / Colloques internationaux

PLEINER, R. (Bearb.), *Frühes Eisen in Europa*, Festschrift W.U. Guyan, Symposium Schaffhausen, Zürich 24.-26.10. 1979. Schaffhausen 1981.

SCOTT, B.G., CLEERE, H. (eds.), *The Craft of the Blacksmith*, Symposium Belfast 16.-21.9. 1984. Belfast 1986.

Medieval Iron in Society, Symposium Norberg 1985. Stockholm: Jernkontorets Forskning H34 (1985) et H39 (1986).

DOMERGUE, C. (coord.), *Minería y metalurgia en las antiguas civilizaciones mediterraneas y europeas*, Coloquio Madrid 24.-28.10. 1985, 2 vol. Madrid 1989.

Symposium Archäometallurgie von Kupfer und Eisen in Westeuropa, Mainz 12.-15.9. 1986. *Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz* 35 (1988).

PLEINER, R. (ed.), *Archaeometallurgy of Iron 1964 – 1987*, Symposium Liblice 5.-9.10. 1987. Prague 1989.

International Symposium „From Bloom to Knife“, Ameliowka 18.-22.9. 1989. Kraków: *Materialy Archeologiczne* 26 (1991).

BENOIT, P., FLUZIN, P. (eds.), *Paléoméallurgie du fer et cultures*, Symposium Belfort-Sévenans 1.-3.11. 1990. Belfort 1995.

STEUER, H., ZIMMERMANN, U. (Hrsg.), *Montanarchäologie in Europa*, Kolloquium Freiburg im Breisgau 4.-7.10. 1990. *Archäologie und Geschichte* 4. Sigmaringen 1993.

ESPELUND, A. (ed.), *Bloomery Ironmaking during 2000 years*, Seminar in Budalen 26.-30.8. 1991, 3 vol. Trondheim 1991, 1992, 1993.

MANGIN, M. (ed.) 1994, *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen*, Colloque Besançon 10.-13.11. 1993. *Annales littéraires de l'Université de Besançon* 536. Paris 1994.

MAGNUSSON, G. (ed.), *The importance of Ironmaking, Technical Innovation and Social Change*, Conference Norberg 8.-13.5. 1995. Stockholm: *Jernkontorets Berg-historiska Utskott* H58 (1995), H62 (1996).

TOMAS I MORERA, E. (ed.), *La farga catalana en el marc de l'arqueologia siderurgica*, Simposi Ripoll, 13.-17.9. 1993. Andorra 1995.

8.3 Historische Quellen / Sources Historiques

PROJEKTGRUPPE PLINIUS (Hrsg.), *Plinius der Ältere über das Eisen*. *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 51 (1980) N° 12.

PROJEKTGRUPPE PLINIUS (Hrsg.), *Plinius der Ältere über Kupfer und Kupferlegierungen*. Düsseldorf 1985.

PROJEKTGRUPPE PLINIUS (Hrsg.), *Plinius der Ältere über Blei und Zinn*. Tübingen 1989.

HALLEUX, R., *Le problème des métaux dans la science antique*. Paris 1974.

GEORG AGRICOLA, *12 Bücher vom Berg- und Hüttenwesen*. München: dtv 1977. (Erstmals lat. 1556 u.d.T. „De re metallica libri XII“, erstmals dt. 1557 u.d.T. „Vom Bergkwerck“, traduction française par A. FRANCE-LANORD, Thionville 1987)

DENIS DIDEROT, JEAN LE ROND D'ALEMBERT (eds.), *Encyclopédie ou Dictionnaire Raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers*. Paris 1751 – 1780.

8.4 Allgemeines / Généralités

CRADDOCK, P.T., *Early Metal Mining and Production*. Edinburgh University Press 1995.

MOESTA, H.M., *Erze und Metalle. Ihre Kulturgeschichte im Experiment*. Berlin, Heidelberg, New York 1986.

STEUER, H., ZIMMERMANN, U. (Hrsg.), *Alter Bergbau in Deutschland*. Stuttgart 1993.

TYLECOTE, R.F., *The Prehistory of Metallurgy in the British Isles*. London 1986.

TYLECOTE, R.F., *The Early History of Metallurgy in Europe*. London, New York 1987.

8.5 Metallurgie des Eisens / Métallurgie du fer

Beiträge zur Eisenverhüttung auf der Schwäbischen Alb. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 55. Stuttgart 1995.

CREW, P., The Experimental Production of Prehistoric Bar Iron. *Historical Metallurgy* 25/1 (1991): 21–34.

FLUZIN, P., Notions élémentaires de sidérurgie, in: ECHARD, N. (ed.), *Métallurgies Africaines, Nouvelles Contributions. Mémoires de la Société des Africanistes* 9: 13–44. Paris 1983.

LEROY, M. et PLOQUIN, A., Approche archéométrique de la proto-industrie du fer: les conditions de réduction des minerais de fer de Lorraine et la chaîne opératoire dans la sidérurgie antérieure à l'apparition du haut fourneau. *Revue d'Archéométrie* 18 (1994): 53–64.

MANGIN, M. et alii, Mines et métallurgie chez les Eduens, Le district sidérurgique antique et médiéval du Morvan-Auxois. *Annales littéraires de l'Université de Besançon* 456. Paris 1992.

Objets en fer et savoir-faire, Rencontres archéologiques de Guiry-en-Vexin, Actes des journées „Autour du Fer“, 9.–11.4. 1992 et 2.–3.4. 1993. Guiry-en-Vexin (F) 1995.

PLEINER, R., Die Eisenerzverhüttung in der „Germania Magna“ zur römischen Kaiserzeit. 45. Bericht der Römisch-Germanischen Kommission 1964. Berlin 1965.

ROSTOKER, W., BRONSON, B., Pre-industrial Iron, its Technology and Ethnology. *Archaeomaterials Monograph* 1. Philadelphia 1990.

SCHAABER, O., Beiträge zur Frage des norischen Eisens, Metallkundliche Grundlagen und Untersuchungen an Funden vom Magdalensberg, in: EGGER, R., *Die Ausgrabungen auf dem Magdalensberg 1960 und 1961 (SA. Carinthia I, 153)*. Klagenfurt 1963.

SERNEELS, V., Archéométrie des scories de fer, Recherches récentes sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale. *Cahiers d'Archéologie Romande* 61. Lausanne 1993.

SPRANDEL, R., *Das Eisengewerbe im Mittelalter*. Stuttgart 1968.

WERTIME, T.A., MUHLY, J.D. (eds.), *The Coming of the Age of Iron*. New Haven, London 1980.

8.6 Ergänzende Hinweise / Références supplémentaires

8.6.1 Bergbau / Mines

WEISGERBER, G., Montanarchäologie - Grundzüge einer systematischen Bergbaukunde für Vor- und Frühgeschichte und Antike. *Der Anschnitt* 41 (1989) Nr. 6, 42 (1990) Nr. 1.

FORD, T.D., WILLIES, L. (eds.), *Mining before Powder, Conference Ambleside 25.–27.3. 1994*. Historical Metallurgy Society Special Publication, 1994.

8.6.2 Ausheizen & Schmieden / Raffinage & Forge

HAUPTMANN, A., MAI, P., Chemische und mineralogische Untersuchungen an Schlacken aus der Colonia Ulpia Traiana, in: *Spurenlese, Beiträge zur Geschichte des Xantener Raumes*: 93–104. Köln 1989.

HENNING, J., Schmiedegräber nördlich der Alpen. *Saalburg-Jahrbuch* 46 (1991): 65–82.

KEESMANN, I., HILGART, T., Chemische und mineralogische Untersuchung der Schlacken von Manching, in: *Manching* 15: 341–413. Wiesbaden 1992.

McDONNELL, G., A Model for the Formation of Smithing Slags, in: *International Symposium „From Bloom to Knife“*: 23–26.

METZGER, M., *Die Kunstschlosserei. Lehr-, Hand- und Nachschlagebuch*. Nachdruck Hannover 1986.

MUTZ, A., *Römisches Schmiedehandwerk*. Augst 1976.

WEISGERBER, G., RODEN, C., Römische Schmiedeszenen und ihre Gebläse. *Der Anschnitt* 37 (1985) Nr. 1.

WEISGERBER, G., RODEN, C., Griechische Metallhandwerker und ihre Gebläse. *Der Anschnitt* 38 (1986) Nr. 1.

8.6.3 Eisenbarren / Lingots de fer

CREW, P., Currency Bars in Great Britain: Typology and Function, in: MANGIN, M. (ed.) 1994: 345–350.

DOSWALD, C., Les lingots de fer protohistoriques en Europe occidentale: Problématique générale, in: MANGIN, M. (ed.) 1994: 333–343.

8.7 Andere Metallurgien / Autres Métallurgies

MOHEN, J.-P., *Métallurgie préhistorique, Introduction à la paléoméallurgie*. Paris 1990.

OTTAWAY, B.S., *Prähistorische Archäometallurgie*. Espekamp 1994.

8.8 Archäologie des Eisens in der Schweiz / Archéologie du fer en Suisse

ABETEL, E., 1992, L'établissement sidérurgique de Montcherand. Cahiers d'Archéologie romande 54. Lausanne 1992.

AMSLER, A., Die alten Eisenindustrien des Fricktales, bei Erlinsbach und in benachbarten Gebieten des östlichen Juras im Licht der Flurnamen. Argovia 47 (1935).

BIRCHMEIER, C., Bohnerzbergbau im Südranden. Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Schaffhausen 38 (1986).

DUVAUCHELLE, A., Les outils en fer du Musée Romain d'Avenches. Bulletin de l'Association Pro Aventico 32. Avenches 1990.

EBNÖTHER, C., Der römische Gutshof in Dietikon. Monographien der Kantonsarchäologie Zürich 25. Zürich 1995. (mit Beiträgen von M. Senn-Luder)

EPPRECHT, W., Unbekannte Schweizerische Eisenerzgruben sowie Inventar und Karte aller Eisenerz- und Manganerz-Vorkommen der Schweiz. Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen 37 (1957) H. 2.

EPPRECHT, W., SCHALLER, E., Eisen und Stahl aus Vindonissa. Gesellschaft Pro Vindonissa, Jahresbericht 1981. Brugg 1992.

ESCHENLOHR, L., SERNEELS, V., Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt, Les Boulies (JU). Cahiers d'Archéologie Jurassienne 3. Porrentruy 1991.

FEHLMANN, H., DE QUERVAIN, F., Eisenerze und Eisenerzeugung der Schweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, XIII Lfg., 8 Bd. Bern 1952.

HÄNGGI, R., DOSWALD, C., ROTH-RUBI, K., Die frühen römischen Kastelle und der Kastell-Vicus von Tenedo-Zurzach. Veröffentlichungen der Gesellschaft Pro Vindonissa XI, 2 vol. Brugg 1994.

HOCHULI-GYSEL, A., SIEGFRIED-WEISS, A., RUOFF, E., SCHALTENBRAND OBRECHT, V., Chur in römischer Zeit, 2 Bde. Basel 1986, 1991.

HUGGER P. (mit einem Beitrag von Epprecht, W.), Der Gonzen, 2000 Jahre Bergbau. Sargans 1991.

KOLLER, H., DOSWALD, C., Aquae Helveticae - Baden: Die Grabungen Baden Du Parc 1987/88 und ABB 1988. Veröffentlichungen der Gesellschaft Pro Vindonissa XIII. Brugg 1996.

Minaria Helvetica 12a (1992). Themenheft: „Eisenarchäologie in der Schweiz“.

PELET, P.L., Une industrie reconnue: Fer, Charbon, Acier dans le Pays de Vaud (2^{ème} ed.). Cahiers d'Archéologie Romande 60. Lausanne 1993.

PELET, P.L., Une industrie méconnue: Fer, Charbon, Acier dans le Pays de Vaud, vol 2: La lente victoire du haut-fourneau, BHV 59. Lausanne 1978; vol.3: Du mineur à l'horloger, BHV 74. Lausanne 1983.

RAGETH, J., Die römischen Schmiedegruben von Riom GR. Archäologie der Schweiz 5 (1982) Nr. 4.

RIPPMANN, D., Basel-Barfüsserkerche, Grabungen 1975–1977. Olten 1987.

SCHALTENBRAND OBRECHT, V., Die Eisenfunde, in: Vitudurum 7, Ausgrabungen am Unteren Bühl. Monographien der Kantonsarchäologie Zürich 27. Zürich, Egg 1996.

SCHLÄPFER, D., Der Bergbau am Ofenpass. Liestal 1960.

SCHUCANY, C., Der römische Gutshof von Biberist-Spitalhof, ein Vorbericht. Jahrbuch der Schweizerischen Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte 69 (1986).

SENN-LUDER, M., SERNEELS, V. et SAGEA/GSAF, Die Eisenverarbeitung in der Schweiz vor dem Hochofenverfahren: Karte der Eisenindustriellen Funde. Minaria Helvetica 13b (1993): 84–90.

SERNEELS, V., Du minerai à l'objet: un village de sidérurgistes du VIII^e au XII^e siècle à Liestal-Röserntal (BL/Switzerland), in: SCHMAEDECKE, M. (Bearb.): Ländliche Siedlungen zwischen Spätantike und Mittelalter, Kolloquium Liestal 13–15.4. 1995. Archäologie und Museum 33: 35–44. Liestal 1995.

8.9 Eisenfunde / Objets en Fer

HALBOUT, P., PILET, C., VAUDOUR, C. (eds.), Corpus des objets domestiques et des armes en fer de Normandie. Cahiers des Annales de Normandie, 20. Caën 1987.

JACOBI, G., Werkzeug und Gerät aus dem Oppidum von Manching. Die Ausgrabungen in Manching, 5. Wiesbaden 1974.

KOCH, U., Die Metallfunde der frühgeschichtlichen Perioden aus den Plangrabungen 1967–1981. Der Runde Berg bei Urach, 5. Heidelberg 1984.

LITHBERG, N., Schloss Hallwil, 3: Die Fundgegenstände. Stockholm 1932.

MANNING, W.H., Catalogue of the Romano-British Iron Tools, Fittings and Weapons in the British Museum. London 1985.

NOTHDURFTER, J., Die Eisenfunde von Sanzeno im Nonsberg. Römisch-Germanische Forschungen, 38. Mainz 1979.

9. Kommentiertes Wörterverzeichnis der frühen Eisenindustrie

9. Vocabulaire raisonné de la sidérurgie ancienne

Vorbemerkung

Die Wörter, welche zur Beschreibung der verschiedenen Aspekte der frühen Eisenindustrie benutzt werden, sind oft nicht Bestandteil des herkömmlichen Vokabulars. Deshalb ist eine Liste dieser Ausdrücke und ihrer Definitionen unabdingbar. Dabei stösst man jedoch auf zahlreiche Schwierigkeiten.

Die vorliegenden Vorschläge versuchen zumindest die Terminologie, welche die Mitglieder der SAGEA im Rahmen ihrer Publikationen verwenden, zu erklären. Leider gibt es heute bereits unzählige Widersprüche in der Literatur.

Die einfachsten Wörter sind häufig am schwersten zu definieren. Der Begriff „Schmiede“ beispielsweise kann sowohl die Arbeit, die Feuerstelle, den Arbeitsplatz, die ganze Fundstelle oder irgendeine mit der Eisenindustrie verbundene Einrichtung bezeichnen. Es war deshalb mehrmals notwendig, den Sinn gewisser Wörter einzugrenzen und die Zahl der Synonyme zu beschränken. So werden zum Beispiel die Begriffe „Eisenschwamm“ und „Luppe“ in einem technisch genauen und etwas abstrakten Sinn verwendet. Diese willkürliche Wahl trägt jedoch zur Klärung des Wörterverzeichnisses bei.

1 Eisen, Stahl und Gusseisen (Abb. 1)

1.1 Metallurgie : Wissenschaft von den Metallen, Gesamtheit der Industrien und technischen Verfahren zu ihrer Herstellung.

1.2 Eisenindustrie : Eisenmetallurgie

1.3. Metallographie : Untersuchung der Metallstrukturen und -eigenschaften

1.4 Eisen (chemisches Element) : Fe, Atommasse: 56, Dichte: ungefähr 7,8. Vierthäufigstes Element in der Erdkruste (5%). Ist in der chemischen Zusammensetzung sehr vieler Mineralien und Gesteine enthalten. Findet sich in der Natur selten in metallischem Zustand.

1.5 Metall : Bezeichnung für einfache Körper (ein einziger chemischer Bestandteil) mit gemeinsamen Eigenschaften: metallischer Glanz (hohe Lichtreflexion), gute elektrische und thermische Leitfähigkeit. Im Festzustand werden die Atomverbindungen durch eine Elektronenwolke gewährleistet (metallische Bindung). Andere bemerkenswerte Eigenschaften, die von Metall zu Metall sehr unterschiedlich sind: Dehnbarkeit, Härte, Schmelzbarkeit, Schmiedbarkeit, Zähigkeit, usw.

1.6 Legierung : Metallisches Produkt, beinhaltet ein Metall sowie ein (binär) oder mehrere (ternär, usw.)

Remarque préliminaire

Les mots utilisés pour décrire les divers aspects de la sidérurgie ancienne ne font souvent pas partie du vocabulaire commun. Il a donc semblé indispensable de fournir une liste et des définitions. Cette entreprise se heurte cependant à d'innombrables difficultés.

La proposition qui est faite ici vise au moins à expliquer la terminologie utilisée dans le cadre des publications des membres du GSAF. Malheureusement, de nombreuses contradictions existent déjà dans la littérature.

Les mots les plus simples sont souvent les plus ardues à définir. Le terme „forge“, par exemple, peut désigner le travail, le foyer, l'atelier ou le site en général ou même une installation sidérurgique quelconque. Il a semblé nécessaire à plusieurs reprises de restreindre le sens de certains mots et de limiter les synonymes. Les termes „éponge“ et „loupe“, par exemple, sont utilisés dans un sens technique précis et un peu abstrait. Ce choix est quelque peu arbitraire mais il est nécessaire pour clarifier le vocabulaire.

1 Le fer, l'acier, la fonte (Fig. 1)

1.1 Métallurgie : Science des métaux. Ensemble des industries et des processus techniques d'élaboration des métaux.

1.2 Sidérurgie : Métallurgie du fer.

1.3 Métallographie : Etude des structures et des propriétés des métaux.

1.4 Fer (élément chimique) : Symbole chimique : Fe; masse atomique : 56; densité : 7,8 environ. Par son abondance (7%), c'est le quatrième élément constitutif de la croûte terrestre. Il entre dans la composition chimique d'un très grand nombre de minéraux et de roches. Dans la nature, il n'existe pratiquement pas à l'état métallique.

1.5 Métal : Nom générique désignant des corps simples (un seul constituant chimique) possédant des propriétés communes : éclat métallique (forte réflexion de la lumière), bonne conductibilité électrique et thermique. A l'état solide, les liaisons entre les atomes sont assurées par le déplacement d'un nuage d'électrons (liaison métallique). Les métaux ont d'autres propriétés remarquables mais très variables de l'un à l'autre : ductilité, dureté, fusibilité, malléabilité, ténacité, etc.

1.6 Alliage : Produit métallique obtenu en incorporant à un métal, un (binaire) ou plusieurs (ternaire, etc.)

nicht-/metallischen Elemente. Legierungen haben ähnliche physikalische Eigenschaften wie die Metalle.

1.7 Eisen (Metall): graubläuliches Metall, schmiedbar, dehnbar und sehr zäh; hellglänzend, wenn poliert. Hat einen sehr hohen Schmelzpunkt (1536°C), wird bei wesentlich tieferen Temperaturen weich, kann mit sich selbst verarbeitet und verschweisst werden. Es ist magnetisch und oxydiert leicht (Rost). Kann je nach Temperatur auf verschiedene Art und Weise auskristallisieren.

1.8 Stahl : Eisen-Kohlenstofflegierung mit 0.02 bis 2 % Kohlenstoff. Beim Schmieden schwieriger zu bearbeiten und zu schweißen als das Eisen, erhält aber durch plötzliches Abkühlen (Härten) eine viel grössere Härte. Er eignet sich zur Werkzeugherstellung. Seine Qualität wird stark beeinflusst durch den Kohlenstoffanteil, geringe Mengen von Zusätzen (Mangan, Chrom, Nickel, usw.) sowie die Kristallisationsbedingungen. Eutektoider Stahl enthält 0.7 bis 0.8 % C (was reinem Perlit entspricht). Untereutektoider Stahl enthält weniger Kohlenstoff (Perlit und Ferrit), übereutektoider Stahl enthält mehr Kohlenstoff (Perlit und Zementit).

1.9 Gusseisen : Eisen-Kohlenstofflegierung, immer mit Zementit (1.7 bis 6.67% Kohlenstoff) oder Graphitgehalt. Harter und brüchiger Werkstoff, der nicht gehämmert oder geschweisst werden kann. Dafür mit sehr tiefem Schmelzpunkt (Min.: 1146°C) und ideal für den Formguss. Die Qualität wird stark durch den Kohlenstoff- und den Fremdkörpergehalt (Silizium, Phosphor und vor allem Schwefel) beeinflusst. Gusseisen mit 4.3 % C-Gehalt wird eutektisch genannt, was der Zusammensetzung mit dem tiefsten Schmelzpunkt entspricht (untereutektisch : 2 bis 4.3 % C; übereutektisch : 4.3 bis 6.7 % C).

1.10 Ferrit : Alpha-Mischkristall (< 0.02 % C).

1.11 Austenit : Gamma-Mischkristall (< 2 % C).

1.12 Perlit : Eutektoides Gemenge zwischen Ferrit und Zementit (0.8 % C).

1.13 Zementit : Eisenkarbid, Fe₃C (6.67 % C).

1.14 Martensit : Metastabiler Zustand von sehr schnell abgekühltem Stahl (cf. Härten, 9.5.3), grosse Härte.

1.15 Troostit : Metastabiler Zustand von mittelschnell abgekühltem Stahl

1.16 Bainit : Metastabiler Zustand von schnell abgekühltem Stahl.

autres éléments métalliques ou non. Les alliages ont des propriétés physiques comparables à celles des métaux.

1.7 Fer métal : Métal gris bleuâtre, malléable, ductile et très tenace; poli, il possède beaucoup d'éclat. Son point de fusion est très élevé (1536°C), mais il se ramollit à des températures bien moindres, se laisse travailler et souder à lui-même. Il est magnétique et s'oxyde facilement (rouille). Il peut cristalliser de plusieurs manières en fonction de la température.

1.8 Acier : Alliage de fer et de carbone contenant de 0.02 à 2 % de carbone. A la forge, il se laisse travailler et souder plus difficilement que le fer pur mais il acquiert, par refroidissement brusque (trempe), une dureté bien supérieure. L'acier convient particulièrement à la fabrication des outils. Le pourcentage de carbone, la présence d'impuretés (Manganèse, Chrome, Nickel, etc.) et les conditions de cristallisation, influent beaucoup sur la qualité de l'acier. L'acier est dit eutectoïde lorsqu'il contient 0.7 à 0.8 % C (équivalent à de la perlite pure). L'acier hypoeutectoïde contient moins de carbone (perlite + ferrite). L'acier hypereutectoïde contient plus de carbone (perlite + cémentite).

1.9 Fonte : Alliage de fer et de carbone laissant toujours apparaître de la cémentite (1.7 à 6.67 % de carbone dans le fer). C'est un matériau très dur et très cassant, impossible à marteler ou à souder. Par contre le point de fusion est très bas (minimum : 1146°C) et la fonte convient parfaitement au moulage. Le pourcentage de carbone et la présence d'impuretés (Silicium, Phosphore et Soufre surtout) influent beaucoup sur la qualité de la fonte. La fonte est dite eutectique lorsqu'elle contient 4,3 % de C, ce qui correspond à la composition ayant le plus bas point de fusion (hypoeutectique : 2 à 4.3 % C; hypereutectique : 4.3 à 6.7 % C).

1.10 Ferrite : Fer alpha contenant du carbone en solution solide (<0.02 % C).

1.11 Austénite : Fer gamma contenant du carbone en solution solide (< 2 % C).

1.12 Perlite : Structure en agrégat eutectoïde de ferrite et de cémentite (0.8 % C).

1.13 Cémentite : Carbure de fer, Fe₃C (6.67 % C).

1.14 Martensite : Constituant hors d'équilibre de l'acier refroidi à vitesse très rapide (trempe). Dureté élevée.

1.15 Troostite : Constituant hors d'équilibre de l'acier refroidi à vitesse moyenne.

1.16 Bainite : Constituant hors d'équilibre de l'acier refroidi à vitesse rapide.

2 Die Eisenerze

2.1 Mineral(ien) : mineralische Gattung: Natürlicher Stoff mit definierter chemischer Zusammensetzung und Atomstruktur.

2.2 Eisenminerale : (vgl. 1.4.) Wichtige Eisenerzbestandteile.

2.2.1 Oxyde (Sauerstoff-Metallverbindung) : Magnetit (Fe_3O_4 , 72.4%), Ilmenit (FeTiO_3 , 36.8%), Hämatit (Fe_2O_3 , 69.9%), usw.

2.2.2 Hydroxyde (Sauerstoff-Metall-Wasser-Verbindung) : Goethit bzw. Nadeleisenerz (FeO.OH , 62.9%), Lepidokrokit bzw. Rubinglimmer (FeO.OH , 62.9%), Limonit bzw. Brauneisenerz ($\text{FeO.OH.H}_2\text{O}$, 50%) usw.

2.2.3 Karbonate (Sauerstoff-Kohlenstoff-Metallverbindung) : Siderit (FeCO_3 , 48.3%), Ankerit ($\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$, 25.9%), usw.

2.2.4 Andere : Gediegenes Eisen (Meteorit) enthält häufig Nickel. Sulfide, wie Pyrit (FeS_2 , 46.6%), und gewisse Eisensilikate (Chamosit) wurden anscheinend im Laufe der frühen Perioden nicht verwendet.

2.3 Gestein : Natürliche Verbindung von mehreren Mineralien.

2.4 Erz : Gestein, welches eine aussergewöhnlich hohe Konzentration von verwertbaren Mineralien enthält (nutzbare Substanz) und wirtschaftlich abbaubar sowie technisch abbaubar ist.

2.5 Eisenerz : Es gibt sehr viele und verschiedenartige Eisenerze. Der Wert eines Erzes hängt von seinem Eisengehalt (mindestens 20%, im Mittel 45%), aber auch von der Art und Menge der Begleitelemente ab. Die metallurgische Klassifizierung der Eisenerze basiert auf ihrem Verhalten während der metallurgischen Verarbeitung. Die metallgenetische Klassifizierung basiert auf der Bildungsweise des Erzes (Sediment, magmatischer Ursprung, usw.). Die vorwiegenden Mineralien dienen im folgenden als Klassifizierungsbasis :

2.5.1 In den Hämatiten erscheint das Erz in Form von eisenhaltigen Oxyden (Fe_2O_3). In den roten Hämatiten ist der Hämatit das wesentliche Mineral des Erzes. In den braunen Hämatiten ist es der Limonit.

2.5.2 Im Magnetit dominiert der Magnetit.

2.5.3 Im Spateisenstein liegt das Eisen in Form von Karbonatverbindungen (FeCO_3) vor.

2.5.4. Verschiedenes : Eisenhaltigen Abfälle (Rennofenschlacken und solche eines zweiten Schmelzens, Konverterauswürfe, Alteisen, usw.) wurden seit jeher

2 Les minerais de fer

2.1 Minéral : Espèce minérale; corps naturel de composition chimique et de structure atomique définie.

2.2 Minéraux du fer : Le fer entre dans la composition chimique d'un très grand nombre de minéraux. Quelques-uns sont des constituants importants des minerais de fer.

2.2.1 Oxydes (combinaison oxygène + métal) : magnétite (Fe_3O_4 , 72.4%), ilménite (FeTiO_3 , 36.8%), hématite (Fe_2O_3 , 69.9%); etc.

2.2.2 Hydroxydes (combinaison oxygène + métal + eau) : goéthite (FeO.OH , 62.9%), lépidocrosite (FeO.OH , 62.9%), limonite ($\text{FeO.OH.H}_2\text{O}$, environ 50%); etc.

2.2.3 Carbonates (combinaison oxygène + carbone + métal) : sidérite (FeCO_3 , 48.3%), ankérite ($\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$, 25.9%), etc.

2.2.4 Autres : le Fer natif (météorites), contenant souvent du nickel; les sulfures tels que la pyrite (FeS_2 , 46.6%) et certains silicates de fer (chamosite).

2.3 Roche : Association naturelle de plusieurs minéraux.

2.4 Minerai : Roche présentant une concentration anormalement élevée en minéraux utiles (contenant une substance utile) économiquement et techniquement exploitable.

2.5 Minerais de fer : Les minerais de fer sont très abondants et très variés. La valeur d'un minerai dépend de sa teneur en fer (minimum 20%, moyenne 45%) mais également de la nature et de la concentration des éléments qui l'accompagnent. La classification métallurgique des minerais de fer est basée sur le comportement des minerais pendant le traitement métallurgique. La classification métallogénique est basée sur le mode de formation du minerai (sédimentaire, magmatique, etc.). On classe également les minerais en fonction des principaux minéraux présents :

2.5.1 Dans les hématites le fer apparaît sous forme d'oxyde ferrique (Fe_2O_3). Les hématites rouges sont les minerais où le minéral essentiel est l'hématite. On dénomme hématites brunes les minerais dont le minéral principal est la limonite.

2.5.2 Dans les magnétites, c'est le minéral magnétite qui domine.

2.5.3 Dans les minerais de fer spathiques, le fer se trouve combiné à l'état de carbonate (FeCO_3).

2.5.4 Divers : Les déchets ferreux (scories de bas fourneau et de seconde fusion, projections de convertisseur, ferraille récupérée, etc.) ont de tout temps

wiederverwertet. Recycling spielt in der modernen Industrie eine immer wichtigere Rolle.

2.6 Die hauptsächlichlichen Eisenerze der Schweiz (Abb. 2).

2.6.1 Siderolithisches Erz : Geologische Formation des Eozäns, welche der Umlagerung einer lateritisch-ferrallitischen Kruste (Verwitterung der Kontinentaloberfläche unter tropischem Klima) an Ort oder in einem Karst entspricht. Diese Kruste enthält Formationen unterschiedlicher Beschaffenheit, darunter Erze bestehend aus eisenhaltigen Bohnerzen (kugelartige Verhärtung von 2 mm bis 10 cm Durchmesser, mit konzentrischem Aufbau) vermischt mit eisenreichen Lehmen (Bolus). Der Eisengehalt hängt vom Bohnerzanteil ab (gewaschen: 40% Fe). Diese Schichten sind entlang der ganzen Jurakette (vorallem im vallée de Delémont) stark entwickelt, in den Alpen existieren einige Ablagerungen.

2.6.2 Eisenhaltige Oolithe des Doggers : Meeressedimente der mittleren Juraschicht (Callovien, Aalénien, Toarcien), in geringer Tiefe gebildet, hauptsächlich aus Oolithen bestehend (kugelförmige Verhärtung von 0.5 bis 2 mm Durchmesser, mit konzentrischem Aufbau um Trümmerstücke) mit lehmigem oder kalkhaltigem Begleitmaterial. Der Gehalt an Fe variiert zwischen 20 und 30 %. Phosphor kommt häufig vor (± 0.5 % P). Diese Schichten sind im östlichen Teil des Juras (vorallem Fricktal AG) sehr stark entwickelt. In den Alpen sind die Vorkommen von mittelmässiger Bedeutung.

2.6.3 Limonit des Valanginien (oder von Métabief) : Meeresstrandsedimente der unteren Kreideschicht (Valanginien). Diese Kalkgesteine enthalten Limonitkörner (oolithartig). Solche Lagerstätten finden sich in der Gegend von Vallorbe (VD).

2.6.4 Hämatit und Siderit : In den Alpen sind Hämatit- und Sideritadern bekannt; meist handelt es sich um metamorphes Gestein (Gonzen SG, Val Ferrara TI). Die Bildung dieser Erzkörper ist häufig mit hydrothermalen Phänomenen und vulkanischen Ablagerungen verbunden.

2.6.5 Magnetit : In den Alpen gibt es vereinzelte Magnetitlinsen (z.B. Mont Chemin VS), deren Ursprung metamorphisch, magmatisch oder hydrothermal ist.

2.7 Andere Eisenerze

2.7.1 Sumpferze (Raseneisenerz) : Sumpferze bilden sich durch das Ausfällen von Eisenhydroxyden. Dies wird durch den pH-Wechsel oder durch Sauerstoffzufuhr, im Moment in dem unterirdische Wasser angereichert mit eisenhaltigen Ionen (Fe^{++}) an die Oberfläche kommen, ausgelöst. Es handelt sich dabei um eine typische Ausbildung in periglazialen Zonen (Sümpfe, Seen, Moore), welche in der Schweiz unbekannt ist.

été recyclés. Le recyclage joue un rôle de plus en plus important dans l'industrie moderne.

2.6 Principaux minerais de fer suisses (Fig. 2)

2.6.1 Minerai sidérolithique: Formation d'âge Eocène, correspondant au remaniement, sur place ou dans un karst, d'une croûte latéritique ferrallitique (altération de surface continentale en climat tropical). Elle comporte des terrains de nature variable dont des minerais de fer composés de pisolithes (concrétion subsphérique, diamètre de 2 mm à 10 cm, à structure concentrique) ferrugineuses mélangées à des argiles riches en fer (bolus). Les teneurs varient en fonction de l'abondance des pisolithes (pisolithes lavées : 40% Fe). Ces terrains sont bien développés tout au long de la chaîne du Jura (vallée de Delémont JU) et il existe quelques affleurements métamorphiques dans les Alpes.

2.6.2 Oolithes ferrugineuses du Dogger : Formations d'âge Jurassique moyen (Callovien, Aalénien, Toarcien), correspondant à des sédiments marins de faible profondeur composés essentiellement d'oolithes (concrétion sphérique, diamètre de 0.5 à 2 mm, à structure concentrique centrée sur un débris) dans une matrice argileuse ou calcaire. Les teneurs varient de 20 à 30 % Fe et le phosphore est souvent présent (env. 0.5 % P). Ces couches sont bien développées dans la partie Est du Jura suisse (Fricktal AG). Dans les Alpes, elles forment des gîtes d'importance moyenne.

2.6.3 Limonite du Valanginien (ou de Métabief) : Formation d'âge Crétacé inférieur (Valanginien) correspondant à une sédimentation marine littorale. Ces calcaires contiennent des grains de limonite (suboolithes) probablement hérités. Ces gisements se rencontrent dans la région de Vallorbe (VD).

2.6.4 Hématite et Sidérite : Des veines d'hématite et de sidérite, généralement affectées par le métamorphisme, sont connues dans les Alpes (Gonzen SG, Val Ferrara TI). La formation de ces gîtes est souvent liée à des phénomènes hydrothermaux ou volcano-sédimentaires plus ou moins oblitérés par le métamorphisme alpin.

2.6.5 Magnétite : Il existe quelques lentilles de magnétite dans les Alpes (Mont Chemin VS). Leur origine peut être métamorphique, magmatique ou hydrothermale.

2.7 Autres minerais de fer

2.7.1 Fer des marais : Le minerai de fer des marais se forme par précipitation d'hydroxydes de fer provoquée par un changement de pH ou un apport d'oxygène au moment où des eaux souterraines chargées en ions ferreux (Fe^{++}) arrivent à la surface. C'est une formation typique des zones périglaciaires (marais, lacs, tourbières). Ce type de formation n'est pas connu en Suisse.

2.7.2 Eiserner Hut : Die starke Oberflächenverwitterung von Sulfiden (Pyrit, usw.) kann zur Bildung von meterstarken Eisenhydroxydanhäufungen führen. Die Beschaffenheit des Ursprunggesteins, das Klima und die Verwitterungsdauer sind die Hauptfaktoren, welche dieses Phänomen beeinflussen. Wegen der Gletschererosion sind diese Formationen in der Schweiz von geringer Bedeutung.

3 Der Erzabbau

3.1.1 Gangart : Erzbegleitmineral oder -gestein ohne Abbauwert.

3.1.2 Taubes Gestein : Sein Anteil an nutzbaren Substanzen ist zu gering. Man lässt es an Ort und Stelle oder wirft es nach der Gewinnung fort.

3.1.3 Roherz : Erz im abbaufrischen Zustand; Mischung aus Erz im strengen Sinn des Wortes und Materialien, die nicht abgetrennt werden konnten.

3.2.1 Erzkörper : Natürliche Erzvorkommen.

3.2.2 Lagerstätte : Erzkörper oder Teil davon, der den Abbau lohnt. Enthält in der Regel vererzte und taube Zonen.

3.3 Lagerstättentypen

3.3.1 Schichtförmige Lagerstätte : Erzkörper mit einer schwachen Ausdehnung in Bezug auf die beiden anderen und einer Mittelebene in Einklang mit der Schichtung.

3.3.2 Schicht : schichtförmiger Erzkörper mit sedimentärem Ursprung.

3.3.3 Gang : Erzkörper mit einer kleineren Ausdehnung in Bezug auf die beiden anderen und mit Überschneidung des umgebenden Gesteines.

3.3.4 Ader, Flöz : Allgemeine Bezeichnung für Schicht oder Gang mit oder ohne Vererzung.

3.3.5 Erzmasse, Stock : Erzkörper von beliebiger Form, mit ähnlicher Ausdehnung in alle drei Richtungen.

3.3.6 Linse : Abgeflachte Erzmasse.

3.3.7 Kluft- / Spaltenlagerstätte : Lagerstätte gebildet aus einer Anhäufung von vererzten Spalten.

3.3.8 Imprägnationslagerstätte : Das Erz ist mehr oder weniger gleichförmig verteilt und im Gestein verstreut.

3.4.1 Steinbruch : Tagebau von mineralischen Substanzen. Allgemein gebräuchlich für den Abbau von Baumaterialien (Steine, Kies, usw.) und von nichtmetallischen Mineralien (Kaolin, Huppererde, usw.).

2.7.2 Chapeau de fer : En surface, les sulfures (pyrite, etc.) subissent une forte altération qui peut mener à la formation d'accumulations d'hydroxydes de fer de plusieurs mètres d'épaisseur. La nature de la roche initiale, le climat et la durée de l'altération sont les principaux paramètres qui contrôlent le phénomène. En Suisse, ces formations sont peu importantes en raison de l'érosion récente et des glaciers.

3 La mine et l'exploitation minière

3.1.1 Gangue : Minéral ou roche sans valeur associée au minéral.

3.1.2 Stérile : Roche dont les concentrations en substances utiles sont jugées non valorisables. Le stérile est laissé en place ou rejeté immédiatement après abattage.

3.1.3 Minerai tout-venant : Minerai tel qu'il est extrait de la mine, mélange de minéral au sens strict et de matériaux qui n'ont pas pu être séparés lors de l'exploitation.

3.2.1 Gîte : Concentration naturelle de minéral.

3.2.2 Gisement : Gîte ou partie de gîte valorisable par une exploitation. Elle comporte généralement des zones minéralisées et des zones stériles.

3.3 Modes de gisement

3.3.1 Gisement stratiforme : Gîte dont l'une des dimensions est faible par rapport au deux autres et dont le plan moyen est conforme à la stratification.

3.3.2 Couche : Gîte stratiforme d'origine sédimentaire.

3.3.3 Filon : Gîte dont l'une des dimensions est plus faible que les deux autres et qui recoupe les terrains encaissants.

3.3.4 Veine : Terme général pour filon ou couche. Une veine peut être minéralisée ou non.

3.3.5 Amas : Gîte de forme quelconque dont toutes les dimensions sont du même ordre de grandeur.

3.3.6 Lentille : Amas aplati.

3.3.7 Gisement fissural : Gisement composé d'une concentration de fissures minéralisées.

3.3.8 Gisement disséminé : Gisement dans lequel le minéral est réparti de manière plus ou moins uniforme et diffuse dans la roche.

3.4.1 Carrière : Exploitation à ciel ouvert de substances minérales. L'usage réserve souvent ce terme aux exploitations de matériaux de construction (pierres, gra-

3.4.2 Bergwerk : Untertagebau von mineralischen Substanzen. Allgemein gebräuchlich für den Abbau von metallischen Erzen.

3.4.3 Pinge (Erzgrube) : Tagebau in Vertiefung, von beschränkter Ausdehnung, meist kreisförmig. Der Begriff wird häufig für frühe Erzabbaustrukturen verwendet.

3.4.4 Halde : Schutthalde, in unmittelbarer Nähe zur Förderungszone.

3.5 Abbau : Gesamtheit der Arbeitsvorgänge, welche die Gewinnung und Förderung des Erzes sicherstellen.

3.5.1 Gewinnung : Arbeitsgang, bei welchem die Gesteinsblöcke vom Gebirge gelöst werden, entweder mit Werkzeugen von Hand (Hammer und Spitzisen, Pickel, Presslufthammer), mechanisch oder durch Sprengmittel usw..

3.5.2 Ausbau : Vorrichtung zur Stützung der Wände; Arbeitsgang zum Einbau derselben.

3.5.3 Verspriessung : Ausbau der Wände mit einer Holzvorrichtung.

3.5.4 Sumpfen : Abführen des durch verschiedene Bergwerksarbeiten eindringenden Wassers.

3.5.5 Bewetterung / Belüftung : Mit natürlichen (Schächte, doppelte Decken) oder künstlichen (Ventilator) Mitteln Luft durch die Strecken und Abbauorte fließen lassen.

4 Erzaufbereitung

4.1 Anreicherung : Gesamtheit der Arbeitsgänge zur Trennung der nutzbaren Substanzen und der Gangart, um das Produkt anzureichern.

4.1.1 Angereichertes Erz : Ergebnis der Anreicherung des Roherzes.

4.2 Schroten / Mahlen und Pochen : Handlung, um einen Werkstoff zu fragmentieren oder die Fragmentgrösse zu verkleinern.

4.2.1 Mühle, Stössel, Mörser : Mahlgeräte.

4.2.2 Pochwerk : Maschine zum Mahlen des Erzes. Eine im allgemeinen wasserkraftbetriebene Nockenwelle hebt und senkt abwechselungsweise mehrere Stössel, welche das Erz verkleinern.

4.3 Kalibrierung : Auslesen von Stücken, die eine bestimmte Grösse nicht überschreiten

viers, etc.) et de minerais non métalliques (kaolin, sable vitrifiable, etc.).

3.4.2 Mine : Exploitation souterraine de substances minérales. L'usage réserve souvent ce terme aux exploitations de minerais métalliques.

3.4.3 Minière : Excavation à ciel ouvert, d'extension et de profondeur limitée, de forme généralement subcirculaire. Ce terme est souvent utilisé pour désigner les anciennes exploitations de minerais de fer.

3.4.4 Halde : Amas de déblais accumulés à proximité immédiate de la zone d'extraction.

3.5 Exploitation : Ensemble des opérations qui assurent l'abattage et l'évacuation du minerai ainsi que tous les services annexes d'une mine.

3.5.1 Abattage : Opération par laquelle des blocs de roches sont détachés du massif, soit au moyen d'outils à main (marteau et pointerolle, pic, marteau piqueur), soit mécaniquement, soit par l'action d'explosif, etc.

3.5.2 Soutènement : Dispositif de soutien des parois ou opération de mise en place de ceux-ci.

3.5.3 Boisage : Soutènement des parois par la mise en place de bois.

3.5.4 Exhaure : Evacuation des eaux drainées par les divers travaux de la mine.

3.5.5 Aérage, Ventilation : Action de faire circuler l'air dans les galeries et chantiers par des moyens naturels (puits, faux plafonds) ou artificiels (ventilateurs).

4 La préparation du minerai

4.1 Concentration : Ensemble des opérations de séparation des substances utiles et de la gangue dans le but d'enrichir le produit.

4.1.1 Concentré, minerai concentré : Résultat de la concentration du minerai tout-venant.

4.2 Broyage et concassage : Action de réduire une matière en fragments ou de réduire la taille de ces fragments.

4.2.1 Meule, pilon, mortier : Appareils de broyage.

4.2.2 Bocard: Machine pour le broyage des minerais. Un arbre à cames, entraîné généralement par la force hydraulique, fait monter et descendre alternativement plusieurs pilons qui écrasent le minerai.

4.3 Calibrage : Action de sélectionner des morceaux ne dépassant pas une taille donnée.

4.3.1 Sieb, Siebwerk, Gitter : Kalibrierungsgeräte.

4.3.2 Radwäscherei : Erzaschanlage. Senkrecht zu einer im allgemeinen wasserkraftbetriebenen Nockenwelle stehende Arme bewegen das in einem mit Wasser gefüllten Behälter liegende Erz.

4.4 Waschen : Erzanreicherungsvorgang mit Hilfe des Wassers. Die leichten Teile werden weggeschwemmt, die schweren setzen sich ab.

4.5 Ausglühen : Arbeitsgang zur Veränderung der Struktur eines Körpers, indem man ihn einer hohen Temperatur aussetzt. Im besonderen zur Spaltung von Karbonaten angewendet (z.B.: Siderit: $\text{FeCO}_3 \rightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$).

4.6 Rösten : Das Erz wird bei hoher Temperatur der oxydierenden Wirkung der Luft ausgesetzt. Im besonderen für Sulfide gebräuchlich (z.B.: Pyrit: $2 \text{FeS}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{FeO} + 4 \text{S}$). Im weiteren Sinne bezeichnet dieser Begriff häufig irgendeine thermische Vorbehandlung des Erzes.

4.6.1 Röstofen(/-stadel), Röstherd : Ausgearbeitete oder rudimentäre Konstruktion, Grube oder offene Stelle, wo das Rösten (im weiteren Sinne des Wortes) durchgeführt wird.

4.7 Flottation / Schwimmaufbereitung : Modernes Verfahren zur Erzanreicherung, welches ein Schaummittel mit ähnlichen Eigenschaften wie die nützliche Substanz, die in der Lösung aufschwimmt, verwendet. Zu unterscheiden vom einfachen Waschen.

5 Eisenerzverhüttung

5.1 Redoxreaktion : Chemischer Vorgang mit Elektronenübertragung. Das Atom oder Ion, welches ein Elektron gewinnt, wird reduziert (Reduktion), dasjenige, welches eines verliert, wird oxydiert (Oxydation). Bei Anwesenheit von Sauerstoff drückt sich der Elektronengewinn durch eine Sauerstoffbeseitigung aus.

Beispiel : $\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$
von links nach rechts: Oxydation des CO zu CO_2 und Reduktion des FeO zu Fe
von rechts nach links: Oxydation des Fe zu FeO und Reduktion des CO_2 zu CO

In diesem Fall wird das Gleichgewicht des Vorganges von der einen Seite auf die andere verschoben, in Abhängigkeit von der Temperatur. Je mehr diese steigt, um so mehr lässt sich FeO reduzieren und um so mehr lässt sich CO oxydieren.

5.2 Ofen : Geschlossene Feuerstelle; gemauerter Bau oder Grube, in dessen Inneren man ein Feuer unterhält, um verschiedene Materialien mit speziellen Verfahren, welche eine hohe Temperatur verlangen, zu behandeln. Verschiedenste Künste und Gewerbe ver-

4.3.1 Tamis, crible, grille : Appareils de calibrage.

4.3.2 Patouillet : Machine pour le lavage des minerais. Des bras, fixés perpendiculairement à un arbre à cames entraîné généralement par la force hydraulique, remuent le minerai placé dans un bac rempli d'eau.

4.4 Lavage : Procédé de concentration du minerai à l'aide d'eau. Les particules légères sont entraînées par le courant alors que les particules lourdes s'accumulent.

4.5 Calcination : Opération par laquelle on modifie la structure d'un corps en le soumettant à une haute température. En particulier: dissociation des carbonates (ex: sidérite: $\text{FeCO}_3 \rightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$).

4.6 Grillage : Opération pendant laquelle on soumet un minerai à l'action oxydante de l'air à haute température. En particulier pour les sulfures (ex : Pyrite : $2 \text{FeS}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{FeO} + 4 \text{S}$). Par extension, ce terme désigne souvent n'importe quel traitement thermique préliminaire d'un minerai.

4.6.1 Fourneau (foyer) de grillage : Construction élaborée ou rudimentaire, fosse ou même simple aire aménagée (meule), où s'effectue l'opération de grillage au sens large.

4.7 Flottation : Procédé moderne de concentration des minerais, utilisant un agent moussant ayant des affinités avec les particules de substance utile en suspension dans une solution. A distinguer du simple lavage.

5 La réduction du minerai

5.1 Oxydoréduction : Réaction chimique avec transfert d'électrons. L'atome ou l'ion qui gagne un électron est réduit (subi une réduction), celui qui en perd un est oxydé (subi une oxydation). En présence d'oxygène, le gain d'un électron se traduit par l'élimination d'un oxygène.

exemple : $\text{FeO} + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$
gauche -> droite : oxydation du CO en CO_2 et réduction du FeO en Fe
droite -> gauche : oxydation du Fe en FeO et réduction du CO_2 en CO

Dans ce cas, l'équilibre de la réaction sera déplacé d'un côté ou de l'autre en fonction de la température. En effet, plus celle-ci augmente, plus FeO se laisse réduire et plus CO se laisse oxyder.

5.2 Four : Appareil, construction maçonnée ou fosse, à l'intérieur duquel on entretient un feu, pour faire subir à des matériaux divers des traitements spéciaux nécessitant une haute température. Toutes sortes d'arts et d'industries utilisent des fours, parmi eux, la métallurgie. Les fours métallurgiques

wenden Öfen, unter anderen die Metallurgie. Deren Öfen werden gegliedert nach den verwendeten Energieformen, dem bearbeiteten Metall und dem Verarbeitungstyp.

5.2.1 Die Unterscheidung zwischen four und fourneau im Französischen kann im Deutschen nicht nachvollzogen werden.

5.2.2 Herd : Offene Feuerstelle mit allzeit einfachem Zugang für den Arbeiter.

5.3 Brennstoff : Körper, der in Gegenwart eines Zündstoffes die Eigenschaft hat zu brennen (z.B.: Kohle + Luft).

5.3.1 Holzkohle : Überrest der Verkohlung von Holz unter Luftabschluss. Seine Qualität (hart oder weich) hängt von der Beschaffenheit des Holzes (Laub-, Nadelbaum) und des Bodens, vom Alter des Baumes, der Stückgröße, usw. ab.

5.3.2 Steinkohle (mineralische Kohle) : Natürliche, fossile Kohle. Die Steinkohle ist wegen des Schwefelgehalts und anderen Unreinheiten nicht geeignet für das indirekte Verfahren der Eisenerzverhüttung.

5.3.3 Koks : Produkt der Destillierung unter Luftabschluss bei hoher Temperatur (1000°C) gewisser Steinkohlen (A. Darby, um 1695). Koks ist der vorrangige Brennstoff der modernen Eisenindustrie.

5.4.1 Natürlicher Zug : Erfolgt in einem Ofen oder Herd, wo der Zündstoff Luft auf natürliche Art eintritt, ohne Hilfe eines Gebläses. Der natürliche Zug nutzt den natürlichen Luftzug (dominierender Wind) oder den Luftzug, der durch die Ofenform (Kamineffekt) hervorgerufen wird.

5.4.2 Gebläse : Vorrichtung, die den Sauerstoff in den Ofen bringt, zur Anregung der Verbrennung: Blasrohr, Blasebalg, Kolben. Die verwendete Energie war zuerst menschlich oder tierisch (Blasrohr, Blasebalg), dann hydraulisch (Schaufelrad + Nockenwelle + Blasebalg; Wassertrommelgebläse im 14. Jh.) und schliesslich thermisch (Kolben + Dampfmaschine, Newcomen 1712; Turbine).

5.4.3 Wassertrommelgebläse : Vorrichtung, welche den Luftzug, der durch einen Wassersturz entsteht, nutzt.

5.4.4 Windform : Öffnung in der Ofenwand, welche den Eintritt der Luft in die Verbrennungszone des Apparates erlaubt.

5.4.5 Düse : Feuerfestes, gelochtes Objekt, welches, in die Ofenwand /-türe eingesetzt und verbunden mit einem Gebläse, ermöglicht, die Luft in die Verbrennungszone einzuführen.

sont classés en fonction de la forme d'énergie utilisée, du métal traité et du type de traitement.

5.2.1 Fourneau : Four fermé, c'est-à-dire dont la zone de combustion est peu accessible pour l'ouvrier.

5.2.2 Foyer : Four ouvert, c'est-à-dire dont la zone de combustion est facilement accessible pour l'ouvrier à tout moment.

5.3 Combustible : corps qui a la propriété de brûler en présence d'un comburant (ex : charbon + air).

5.3.1 Charbon de bois : Résidu de la méthode de carbonisation du bois à l'abri de l'air. Sa qualité (dur ou tendre) dépend de la nature du bois (feuillu, résineux), de l'âge des arbres, de la nature du sol, de la taille des morceaux, etc.

5.3.2 Charbon de terre (houille, charbon minéral): Charbon naturel fossile. La présence de soufre et d'autres impuretés rend la houille impropre à la réduction du minerai de fer par la méthode indirecte.

5.3.3 Coke : Produit de la distillation à l'abri de l'air et à haute température (1000°C) de certaines houilles (A. Darby, vers 1695). Le coke est le combustible par excellence de la sidérurgie moderne.

5.4.1 Tirage naturel : Se dit d'un fourneau ou d'un foyer où le comburant (air) pénètre naturellement, sans l'aide d'aucune soufflerie. Ce tirage naturel profite d'un courant d'air naturel (vent dominant) ou d'un courant d'air induit par la forme du fourneau (effet de cheminée).

5.4.2 Soufflerie : Dispositif destiné à forcer le comburant (air) à pénétrer dans le fourneau pour activer la combustion : sarbacane, soufflet, piston. L'énergie utilisée fut d'abord humaine ou animale (sarbacane; soufflet), puis hydraulique (roue à aube + arbre à cames + soufflet; trompe à eau; 14e siècle) et enfin thermique (piston + machine à vapeur; Newcomen 1712; turbine).

5.4.3 Trompe à eau : dispositif de soufflerie utilisant l'air entraîné par une chute d'eau.

5.4.4 Trou à vent : Trou percé dans la paroi du four permettant d'introduire l'air dans la zone de combustion de l'appareil.

5.4.5 Tuyère : pièce réfractaire percée d'un trou, placée dans la paroi du four et raccordée à la soufflerie qui permet d'introduire l'air dans la zone de combustion à l'intérieur de l'appareil.

5.5 Fondant : Substance que l'on ajoute au minerai pour faciliter l'élimination de la gangue en abaissant le point de fusion du mélange. La nature du fondant (calcaire, alumineux ou siliceux) est choisie en fonction de la nature du minerai. L'ajout se fait de manière à s'approcher d'un mélange ayant un point de fusion minimum.

5.5 Zuschlag : Stoff, der dem Erz beigefügt wird, um den Schmelzpunkt des Gemisches zu senken und dadurch die Beseitigung der Gangart zu erleichtern. Die Beschaffenheit des Zuschlages (kalk-, aluminium- oder kieselhaltig) wird je nach der Erzart gewählt. Der Zusatz erfolgt so, dass sich der Schmelzpunkt einem Minimum nähert.

5.5.1 Kalkzuschlag : für silizium- oder aluminiumhaltige Erze (Kalziumkarbonat, CaCO_3)

5.5.2 Dolomitzuschlag : kalk- und magnesiumhaltig (Kalziumkarbonat und Magnesium, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), natürlich oder sehr häufig künstlich hergestellt, wird in der modernen Eisenindustrie verwendet

5.5.3 Tonerdezuschlag : aluminiumhaltig (Lehm), für kalkhaltige Erze.

5.5.4 Selbstgängiges Erz : Die chemische Zusammensetzung der Gangart dieses Erzes erlaubt es ohne Zuschlag zu arbeiten.

5.5.6 Schüreisen, -haken : Eisenwerkzeug, mit länglicher Stangenform; dient zu verschiedensten Arbeiten bei der Eisenherstellung.

6 Das direkte Verfahren der Eisenerzverhüttung (Kapitel 3)

6.1 Das direkte Verfahren der Eisenerzverhüttung, Eisenherstellungsverfahren : Das Erz, hauptsächlich in Form von Eisenoxiden, wird im Rennofen mit Hilfe der Holzkohle reduziert und teilweise in metallisches Eisen und/oder in Stahl umgewandelt. Dieser Vorgang produziert einen Eisenschwamm, ein Gemisch von Metall und Abfällen, welches durch Erhitzen und Aushämmern gereinigt und verdichtet (Ausheizen) werden muss.

6.2 Rennofen : Eisenerzverhüttungssofen des direkten Verfahrens, in welchem ein Eisen- oder Stahlschwamm hergestellt wird. Es existieren zahlreiche Ausführungen dieses Ofentyps, welche sich in der Bauart (Konstruktion, Dimensionen, Materialien), als Ausdruck von örtlichen Sitten und/oder kulturellen Voraussetzungen, unterscheiden. Einige grosse Gruppen können anhand des verschiedenartigen Ablaufs des Verhüttungsvorganges unterschieden werden.

Bemerkung: der Begriff Rennofen wird auch mit anderer Bedeutung verwendet, besonders im Bereich anderer Metallurgien (Buntmetalle).

6.2.1 Rennofen mit Fliessschlacke (Abb. 4) : Die Trennung von Metall und Schlacke erfolgt, indem man die Schlacken durch eine Öffnung aus dem Ofen ausfliessen lässt. Es gibt zahlreiche Typen. Es scheint sich, bis zur allgemeinen Verwendung des Hochofens, um die vorherrschende Technologie im westlichen Europa zu handeln.

5.5.1 Castine : Fondant calcaire (carbonate de calcium, CaCO_3) pour minerais siliceux et/ou alumineux.

5.5.2 Dolomie : Fondant calco-magnésien (carbonate de calcium et de magnésium, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) naturel ou plus souvent artificiel, utilisé en sidérurgie moderne.

5.5.3 Erbue : Fondant alumineux (argile) pour minerais calcaires.

5.5.4 Minerai autofondant : Minerai dont la composition chimique de la gangue permet de se passer de l'addition de fondant.

5.6 Ringard : Outil en fer, en forme de barre allongée servant à toutes sortes de travaux en rapport avec la fabrication du fer.

6 La méthode directe de réduction du minerai de fer (chap. 3)

6.1 Méthode directe de réduction du minerai de fer : méthode de fabrication du fer : Le minerai, généralement sous forme d'oxydes de fer, est réduit à l'aide de charbon et transformé partiellement en fer métallique et/ou en acier dans un bas fourneau. Cette opération produit une éponge, mélange de métal et de déchets, qui doit être purifiée et compactée (raffinage) par chauffage et martelage.

6.2 Bas fourneau : Fourneau de réduction du minerai de fer par la méthode directe, produisant un bloc de fer et/ou d'acier. De nombreux modèles existent et sont plus ou moins connus : ils diffèrent par leur architecture (construction, dimensions, matériaux) expression des conditions matérielles et/ou culturelles locales. Quelques grands groupes se laissent distinguer sur la base de différences dans la conduite de l'opération de réduction.

Remarque : le terme de bas fourneau possède d'autres sens, en particulier dans le domaine des autres métallurgies (métaux non-ferreux).

6.2.1 Bas fourneau à scorie coulée (Fig. 4,5) : Bas fourneau où la séparation métal/scories se fait en laissant s'écouler les scories vers l'extérieur par une ouverture prévue à cet effet. De nombreux modèles existent. Il semble que ce fut la technologie dominante en Europe Occidentale jusqu'à la généralisation du haut fourneau.

6.2.2 Rennofen mit gefangener Schlacke (Abb.5): Die Trennung von Metall und Schlacke erfolgt, indem man letztere in eine unter dem Rennofen liegende Grube fließen lässt. Es scheint sich dabei, bis zum Aufkommen des Hochofens, um die vorherrschende Technologie im östlichen Europa zu handeln.

6.2.3 Katalanisches Verfahren : Direktes Eisenerzreduktionsverfahren. Wird in einem tiefen und grossen Ofen (katalanischer (Renn)ofen) mit hydraulischem Gebläse durchgeführt. Das Erz und die Kohle werden in zwei getrennten Säulen eingeführt. Durch Verschliessen des Oberteils der Kohlsäule, werden die reduzierenden Gase gezwungen, in die Erzsäule einzudringen. Die Schlacken werden durch eine tiefliegende, seitliche Öffnung abgelassen, das Eisenstück durch die obere Öffnung entnommen. Dieses Verfahren wurde bis ins 19. Jh. im südlichen Europa angewandt. Die zeitgenössischen Metallurgen haben den Vorgang beschrieben. Bemerkung: der Begriff katalanisches Verfahren (katalanischer Ofen) wird oft missbräuchlich als Synonym für das direkte Verfahren (Rennofen) verwendet.

6.2.4 Stückofen : Mittelalterlicher Rennofen mit grossen Ausmassen (mehr als 3 m hoch). Seine Bauart stellt eine Vorform des Hochofens dar. Er wird mit hydraulischem Gebläse betrieben. Als Produkt bildet sich eine Masse / Massel aus Eisen und / oder Stahl. Er wird bereits in den ersten metallurgischen Abhandlungen (16.Jh.) erwähnt.

Einige Öfen konnten je nach Produktionsart (Gemisch Kohle/Erz, Temperatur, Dauer) entweder einen festen Eisenklotz oder flüssiges Gusseisen produzieren.

6.3 Eisenschwamm : Produkt der Eisenerzreduktion im Rennofen. Es handelt sich um einen Metallklumpen aus Eisen und/oder Stahl, vermischt mit Abfällen (Holzkohlestücke, Asche, Schlacke), mit schwammartiger Struktur. Er muss vor dem Schmieden ausgeheizt werden.

6.4 Verhüttungsschlacken (Kap. 3.5) : Überreste des Schmelzens der Erzgangart beim Verhüttungsvorgang im Rennofen.

6.5 Ausheizen des Eisen- oder Stahlschwammes : Vorgang bei welchem der Eisenschwamm gereinigt wird, um einen schmiedbaren Eisenklumpen (Schmiedeluppe) herzustellen. Im wesentlichen werden die im Eisenschwamm enthaltenen Abfälle (Kohle, Schlacke) mechanisch (Hämmern, Auslese) oder durch Schmelzen (Erhitzen) beseitigt. Das Metall muss verdichtet und mit sich selber verschweisst werden. Das Ausheizen besteht aus einem mehrmaligen Erhitzen im Ausheizherd, gefolgt von einem zunehmend intensiveren Hämmern.

6.6 Ausheizherd (Abb. 10) : Verbrennungsvorrichtung, bestimmt für die Reinigungsarbeiten des Eisenschwammes. Meist handelt es sich um eine einfache, kreisfö-

6.2.2 Bas fourneau à scorie piégée (Fig. 5): Bas fourneau où la séparation métal/scories se fait en laissant s'écouler les scories dans une fosse prévue à cet effet sous le bas fourneau. Il semble que ce fut la technologie dominante en Europe de l'Est et du Nord jusqu'à la généralisation du haut fourneau.

6.2.3 Méthode catalane : Méthode directe de réduction du minerai de fer. Elle se pratique dans un foyer profond et de grandes dimensions (fourneau catalan) muni d'une soufflerie hydraulique. On charge le minerai et le charbon en deux colonnes séparées. En bouchant la partie supérieure de la colonne de charbon, on force les gaz réducteurs à pénétrer dans la colonne de minerai. Les scories sont évacuées par une ouverture basse latérale et la pièce de métal par l'ouverture supérieure. Cette méthode était encore pratiquée au 19e siècle en Europe du Sud. Les métallurgistes de cette époque nous ont laissé des descriptions.

Remarque : le terme de méthode catalane (fourneau catalan) est souvent utilisé abusivement en synonyme de méthode directe (bas fourneau).

6.2.4 Four à masse : Ce terme désigne les bas fourneaux de grandes dimensions (plus de 3 m de haut) du Moyen Age. La forme du bâti préfigure celle du haut fourneau. La soufflerie est actionnée par la force hydraulique. Le produit est un bloc de fer et/ou d'acier solide (masse). Les premiers traités de métallurgie (16e) nous ont laissé des descriptions.

Certains appareils pouvaient produire soit une masse de fer solide, soit de la fonte liquide en fonction de la conduite de l'opération de réduction (rapport charbon/minerai, température, durée).

6.3 Eponge : Produit de la réduction du minerai de fer dans le bas fourneau. Il s'agit d'un bloc de métal, fer et/ou acier, mélangé à des déchets (morceaux de charbon, cendres, scories) de texture spongieuse. Il doit être raffiné avant d'être forgé.

6.4 Scories de réduction (chap. 3.5): Résidus de la fusion de la gangue du minerai lors de la réduction dans le bas fourneau.

6.5 Raffinage de l'éponge de fer ou d'acier : Opération au cours de laquelle on raffine l'éponge de fer pour fabriquer un bloc de fer forgeable (loupe). Elle consiste essentiellement à chasser les déchets (charbons, scories) encore contenus dans l'éponge, mécaniquement (martelage, tri) ou par fusion (chauffage). Il faut également compacter le métal et le souder à lui-même. Le raffinage consiste en une série de chauffages au bas foyer suivi de martelages de plus en plus intensifs.

6.6 Bas foyer (Fig. 10) : Appareil de combustion destiné à exécuter le travail de raffinage de l'éponge. Le plus souvent, il s'agit d'une simple fosse circulaire, ovale ou quadrangulaire dont la plus grande dimension ne dépasse pas un mètre. Elle est peu profonde (20 à 40

mige, ovale oder viereckige Grube, welche nicht länger als 1 m ist. Der Herd ist nicht sehr tief (20 bis 40 cm) mit flachem oder konkavem Boden. Er kann auf einer oder mehreren Seiten von kleinen Mauerchen umgeben sein und verfügt über mehrere Blasebälge. Ausserhalb des mediterranen Raumes wurde in früherer Zeit die Schmiedearbeit in einem gleichartigen Herd durchgeführt.

6.7 Schmiedeluppe : Produkt der Reinigung des Eisenschwammes im Ausheizherd. Es handelt sich um einen gereinigten Metallblock (Eisen oder Stahl). Da sie schon stark ausgehämmert wurde, kann die Schmiedeluppe, zur Erleichterung der Arbeit, schon eine bestimmte Form aufweisen (Stange usw.).

6.8 Ausheizschlacken (Kap. 4.4) : Abfälle der Reinigung des Eisen- oder Stahlschwammes im Ausheizherd.

7 Das indirekte Verfahren der Eisenerzverhüttung

7.1 Indirektes Verfahren der Eisenerzverhüttung: Eisenerzherstellungsverfahren : Das Erz, vorwiegend Eisenoxide, wird im Hochofen mit Hilfe der Kohle reduziert und fast vollständig in Gusseisen umgewandelt. Die Gusseisenmassen werden danach entkohlt (Frischen) und in Eisen oder Stahl umgewandelt. Das Metallstück, das während des Frischens produziert wird, muss durch wiederholtes Erhitzen und Hämmern gereinigt und verdichtet werden.

7.2 Hochofen (Abb. 26) : Erzverhüttungssofen, in welchem Gusseisen hergestellt wird. Kommt in Europa im 12. Jh. auf; seither fortlaufend verbessert bis heute. Im 14. Jh. erreicht er seine klassische Form. Von Anfang an arbeitet der Hochofen mit hydraulisch betriebenen Gebläse, Holzkohle ist der wesentliche Brennstoff. In der Mitte des 18. Jh. liefert die Dampfmaschine eine neue Energiequelle und die Erfindung des Koks ermöglicht die Verwendung der Steinkohle für die Eisenerzverhüttung.

7.3 Roheisen : Produkt des Hochofens mit Gusseisenqualität.

7.3.1 Massel : Beim Austritt aus dem Hochofen in eine Form gegossener Barren.

7.4 Hochofenschlacken : Abfälle der geschmolzenen Erzgangart und Zuschläge bei der Verhüttung im Hochofen.

7.5 Frischen des Roheisens : Verfahren zur Umwandlung des Roheisens in Stahl oder Eisen. Im wesentlichen handelt es sich um eine Entkohlung: man entfernt den im Metall gelösten Kohlenstoff, indem man ihn oxydiert (Bildung von CO und CO₂ Gasen, welche entweichen). Die Entkohlung kann durch den Kontakt mit dem Sauerstoff der Luft bei hoher Temperatur ausgelöst werden. In diesem Fall wird aber ein Teil des Ei-

cm environ) et le fond est plat ou concave. Elle peut être entourée sur un ou plusieurs côtés par de petits murs. Elle est munie d'un soufflet. Dans les périodes anciennes en Europe non-méditerranéenne, le travail de forge se fait dans le même appareil.

Remarque : le terme de bas foyer est fréquemment utilisé comme synonyme de bas fourneau.

6.7 Loupe : Produit du raffinage de l'éponge dans le bas foyer. Il s'agit d'un bloc de métal, fer ou acier, purifié. La loupe ayant subi un martelage important, elle peut avoir déjà acquis une forme destinée à faciliter le travail (barre de section quadrangulaire, etc.).

6.8. Scories de raffinage (chap. 4.4): Résidus du raffinage de l'éponge de fer ou d'acier dans un bas foyer.

7 La méthode indirecte de réduction du minerai de fer

7.1 Méthode indirecte de réduction du minerai de fer : Méthode de fabrication du fer : Le minerai, généralement sous forme d'oxydes de fer, est réduit à l'aide de charbon et transformé presque complètement en fonte dans un haut fourneau. Les lingots de fonte sont ensuite décarburés (affinage) et transformés en fer ou en acier. Le bloc de métal produit lors de l'affinage, doit être purifié et compacté par chauffages et martelages successifs.

7.2 Haut fourneau (Fig. 26) : Fourneau de réduction du minerai de fer produisant de la fonte. Il apparaît en Europe au 12^e siècle et n'a cessé de se perfectionner jusqu'à nos jours. Dès le 15^e siècle, le haut fourneau trouve sa forme classique. Dès l'origine, il travaille avec des soufflets actionnés par l'énergie hydraulique. Le charbon de bois sera le combustible essentiel. Au milieu du 18^e siècle, la machine à vapeur fournira une énergie nouvelle et l'invention du coke rendra possible l'utilisation du charbon minéral pour la réduction du minerai de fer.

7.3 Fonte brute : Produit normal du haut fourneau

7.3.1 Gueuse : Lingot en forme de barre en fonte moulé à la sortie du haut fourneau.

7.4 Laitier : Résidu de la fusion de la gangue du minerai et des fondants lors de la réduction dans le haut fourneau.

7.5 Affinage de la fonte : Procédé de transformation de la fonte en acier ou en fer. Il s'agit pour l'essentiel d'une décarburation : on enlève la carbone dissout dans le métal en l'oxydant (formation de gaz CO et CO₂ qui s'échappent). Cette décarburation peut être provoquée par le contact avec l'oxygène de l'air à haute température mais dans ce cas, une partie du fer est réoxydée et perdue. On peut également utiliser

sens reoxydiert und geht verloren. Man kann auch eisenoxydreiche Abfälle verwenden (Hammerschlag, Eisenstücke, Frischschlacken eines vorhergehenden Prozesses), um die Kohlenstoffoxydation zu verursachen und den Eisenverlust zu beschränken.

7.5.1 Frischherd / Stahlwerk: Werkstatt und Nebengebäude, in welchen das Frischen des Roheisens durchgeführt wird.

7.6 Herdfrischen : Entkohlung des teigigen Roheisens in einer offenen Feuerstelle. Die Massel wird in den Herd eingeführt um das Endstück zu erhitzen und erweichen. Der Arbeiter löst Stücke ab, welche beim Abfallen in der Feuerstelle den Luftstrom des Blasebalges kreuzen und teilweise oxydiert werden. Am Herdboden kommt das Metall in Berührung mit einer eisenoxydreichen Schlacke, was ebenfalls zu einer Entkohlung führt. Die metallische Masse, die Luppe, wird in der Feuerstelle regelmässig verschoben. Die wallonische, comtoise und nivernaise Methode sind Varianten, welche auf dieser Technik basieren.

7.6.1 Frischherd (Abb. 27): Herd, in welchem das Frischen des Roheisens erfolgt.

7.6.2 Luppe : Eisen- oder Stahlstück; Ergebnis des Frischens des Roheisens. Es handelt sich dabei um einen unreinen Klumpen (Eisen oder Stahl + Schlacke) mit schwammiger Struktur.

7.6.3 Ausschmieden der Luppe : Unmittelbar nach dem Frischen wird die heisse Luppe mit dem Schlägel ausgehämmt, um sie zu verdichten. Dabei fliesst die flüssige Schlacke aus der Luppe.

7.6.4 Heizherd (Heizraum) : Herd, in welchem die Luppe aufgeheizt wird, um sie heiss bearbeiten zu können.

7.6.5 Ausschmieden der Luppe : Die Luppe wird mit Hilfe eines mächtigen hydraulischen Hammers ausgehämmt. Je homogener das Objekt wird, desto schneller und kräftiger wird das Hämmern; dabei erhält das Eisenstück allmählich eine Stangenform mit rechteckigem Querschnitt.

7.6.6 Der Begriff „pièce“ kennt im Deutschen keine Entsprechung. Auf Französisch bezeichnet er ein Eisen- oder Stahlstück mit quadratischem Querschnitt, als Ergebnis des Hämmerns der Luppe. Dieses Stück wird danach in der Hammerschmiede weiter und genauer ausgeformt. Zahlreiche Begriffe erlauben es, das Produkt der verschiedenen Bearbeitungsstufen zu benennen.

7.6.7 Frischschlacken : Abfälle des Frischens des Roheisens im Frischherd. Diese Schlacken sind sehr reich an Eisenoxiden und werden deshalb meist in einen

des déchets riches en oxydes de fer (battitures, chutes de martelage, scories formées lors d'une précédente opération d'affinage) pour provoquer l'oxydation du carbone, ce qui permet de limiter la perte en fer.

7.5.1 Affinerie : Atelier où se pratique l'affinage de la fonte et ses dépendances.

7.6 Affinage au foyer : Décarburation de la fonte à l'état pâteux dans un foyer. La gueuse est introduite dans le foyer et son extrémité réchauffée et ramollie. L'ouvrier détache des fragments qui, en tombant dans le foyer passent devant le jet d'air du soufflet et subissent une oxydation partielle. Dans le fond du foyer le métal est en contact avec une scorie riche en oxydes de fer ce qui provoque également une décarburation. La masse métallique, le renard, est régulièrement déplacée dans le foyer. Les méthodes wallonne, comtoise, nivernaise, etc. sont des variantes basées sur cette même technique.

7.6.1 Foyer d'affinage, affinerie : (Fig. 27) : Foyer où se pratique l'affinage de la fonte.

7.6.2 Renard : Pièce de fer ou d'acier, résultat de l'affinage de la fonte. C'est un bloc impur (fer ou acier + scorie) de texture spongieuse.

7.6.3 Refoulage du renard: Immédiatement après l'affinage, le renard chaud est martelé à la masse pour le compacter. Pendant cette opération, la scorie fluide s'écoule du renard.

7.6.4 Foyer de chaufferie, chaufferie : Foyer où l'on réchauffe le renard pour pouvoir le travailler à chaud.

7.6.5 Cinglage du renard : Le renard est martelé à l'aide d'un martinet hydraulique puissant. Au fur et à mesure qu'il acquiert une certaine homogénéité, le martelage devient plus rapide et plus violent. On lui donne petit à petit la forme d'une barre de section quadrangulaire.

Remarque : Ce terme est souvent employé pour désigner tout martelage violent.

7.6.6 Pièce : Pièce de fer ou d'acier en forme de barre de section quadrangulaire, résultat du cinglage du renard. La pièce sera ensuite forgée au martinet pour lui donner une forme plus précise. De nombreuses dénominations existent pour décrire les différents stades de cette élaboration (Encrénée, Maquette, Barreau, Bande, Masseau, Masse, Massoque, Massoquette, etc.).

7.6.7 Scories d'affinage : Résidus de l'affinage de la fonte dans le foyer d'affinage. Ces scories, très riches en oxydes de fer, sont généralement recyclées d'une manière ou d'une autre au cours du processus sidérurgique.

oder anderen Arbeitsgang der Eisenindustrie wiederverwertet.

7.7 Puddeln : Entkohlung des Roheisens in einem Ofen durch Umrühren auf einem Bett von eisonoxydreichen Schlacken. Die Erhitzung des Ofens erfolgt in einem getrennten Herd (Verwendung von Steinkohle) und den Rückstrahlungseffekt eines gedrückten Gewölbes (Reflektorofen). Das Umrühren erfolgt mittels Eisenstangen durch seitliche Löcher im Ofen. Diese Methode entwickelte sich im 18. Jh. in England.

7.7.1 Puddelofen : Ofen in welchem Roheisen durch Puddeln in Stahl umgewandelt wird.

7.7.2 Schweisseisen, -stahl : Eisen oder Stahl, welches durch Puddeln von Roheisen hergestellt wird. Es enthält immer sehr viele Schlackeneinschlüsse.

7.8 Windfrischen : Entkohlung des flüssigen Roheisens durch Einspritzung von Luft oder Sauerstoff. Das Roheisen wird aus dem Hochofen in einen Konverter geleitet. Die Luft wird eingespritzt, das Roheisen in Stahl umgewandelt und in Barren gegossen. Der Stahl bleibt flüssig wegen der durch die Kohlenstoffoxydationsreaktion freigesetzten Energie. Die Entkohlung wird durch die eingespritzte Luftmenge reguliert. Das Verfahren entwickelte sich im Laufe der zweiten Hälfte des 19. Jh. (Bessemer 1856).

7.8.1 Konverter : Gerät zum Windfrischen von Roheisen. Enthält grosse Stahltasche, welche im Inneren eine Verkleidung aus stark hitzebeständigem Material trägt. Ein Gebläse ermöglicht die Lufteinspritzung. Zum Leeren der Tasche wird ein Auswurf benutzt.

7.8.2 Flusseisen, Flussstahl : Stahl, welcher mittels Windfrischen produziert wird.

8 Die Stahlherstellung

Stahl kann auf verschiedene Art hergestellt werden :

8.1 Natürlicher Stahl : Hergestellt beim direkten Verfahren der Eisenerzverhüttung im Rennofen (s.6.1).

8.2: durch teilweises Frischen des Roheisens (s.7.6, 7.7 et 7.8).

8.3 durch Aufkohlung des Eisens: Wenn Eisen bei hoher Temperatur mit Kohlenstoff in Kontakt gebracht wird, dringt Kohlenstoff ins Metall ein. Die Eindringtiefe hängt von der Reaktionszeit und der Temperatur ab (3 bis 5 mm in 10 Stunden bei 1000° C). Die Aufkohlung kann in der Esse, in einem Tiegel oder einem speziellen Ofen durchgeführt werden.

8.3.1 Zementierofen: Das aufzukohlende Schmiedeeisen wird in mit Kohle oder einem anderen kohlenstoffreichen Material (Horn) gefüllte Behälter gelegt und

7.7 Puddlage : Décarburation de la fonte dans un fourneau par brassage sur un lit de scories riches en oxydes de fer. Le chauffage du fourneau est assuré par un foyer séparé (utilisation de houille) et l'effet de réverbération d'une voûte surbaissée (four réverbère). Le brassage est assuré à l'aide de barres de fer par des ouvriers à travers des orifices latéraux. Cette méthode se développe d'abord en Angleterre au XVIIIe siècle.

7.7.1 Four à puddler : Four destiné à la transformation de la fonte en acier par puddlage.

7.7.2 Fer puddlé, acier puddlé : Fer ou acier produit par puddlage de la fonte. Ce métal est toujours très riche en inclusions de scorie.

7.8 Convertissage : Décarburation de la fonte liquide par injection dans la masse d'air ou d'oxygène. La fonte, à la sortie du haut fourneau est recueillie dans un convertisseur. L'air est injecté et la fonte convertie en acier qui est ensuite moulé en lingots. L'acier est maintenu à l'état liquide par l'énergie dégagée par la réaction d'oxydation du carbone. En ajustant la quantité d'air insufflée, on contrôle la décarburation. Ce procédé se développe au cours de la seconde moitié du XIXe siècle (Bessemer en 1856).

7.8.1 Convertisseur : Appareil destiné au convertissage de la fonte. Grande poche en acier dont le revêtement interne est constitué par un matériau très réfractaire. Un dispositif de soufflerie permet d'injecter de l'air. Un dispositif de basculement permet de vider la poche.

7.8.2 Acier à l'oxygène, acier converti : Acier produit par convertissage de la fonte

8 La fabrication de l'acier

L'acier peut être fabriqué de diverses manières :

8.1 par la méthode directe de réduction : acier «naturel» voir 6.1.

8.2 par affinage partiel de la fonte. voir 7.6, 7.7 et 7.8.

8.3 par cémentation du fer. Lorsque le fer est mis en contact avec du carbone à haute température, le carbone diffuse dans le métal. La profondeur de pénétration est fonction du temps de réaction et de la température (3 à 5 mm / 10 heures / 1000 °c). La cémentation peut être menée à bien dans le foyer de forge, dans un creuset ou dans un fourneau.

8.3.1 Fourneau de cémentation : Les fers forgés à cémenter sont placés dans des bacs remplis de charbon ou d'une autre matière riche en carbone (corne) et scellés. Ces bacs sont ensuite placés dans le four-

verschlossen. Diese Behälter werden nun während einiger Stunden bei hoher Temperatur in einem Ofen belassen. Der Kohlenstoff dringt ins Metall ein und wandelt es in Stahl um.

8.4 durch Aufschmelzen von Eisen und Gusseisen in einem Tiegel (s.8.6.1).

8.5.1 Kohlenstoffstahl : Stahl, der Kohlenstoff enthält.

8.5.2 Legierter Stahl : Stahl, der Kohlenstoff und mehr als 5 % andere Legierungselemente (Silizium, Mangan, Chrom, Nickel, Vanadium, Molybdän, Wolfram, usw.) enthält. Zum Beispiel : rostfreier Stahl (stainless steel) : 12 % Cr und 0.32 % C.

8.6 Damast, Damaststahl, Damasenerstahl: Kompositwerkstoff, bestehend aus Metallen auf Eisenbasis, deren Struktur auf Millimeterebene wegen der variablen Verteilung von Kohlenstoff und anderer Verunreinigungen (Phosphor, Nickel, usw.) heterogen ist. Durch Polieren und gegebenenfalls durch Ätzen können diese Variationen sichtbar werden. Die Kunst des Schmiedes besteht darin, einen speziellen ästhetischen Effekt zu erzielen. Die Verflechtung kohlenstoffreicher und -armer Zonen verleiht dem Endprodukt sich ergänzende Qualitäten bezüglich Härte und Dehnbarkeit.

8.6.1 Schmelzdamast : Das gleichzeitige Aufschmelzen von Eisen und Gusseisen bzw. das Schmelzen von Eisen zusammen mit kohlenstoffreichen Materialien (grüne Blätter, Rinde, Holzkohle) in einem Tiegel kann einen heterogenen Stahl ergeben. Trennungseffekte während der Abkühlphase könnten für diese Struktur verantwortlich sein. Die Herstellungsmethode wurde in Indien im Mittelalter entwickelt und bis ins 19. Jh. angewandt. Der Vorgang wird als Wootzverfahren bezeichnet. Der so hergestellte Stahl wurde in den Vorderen Orient exportiert, im besonderen nach Damaskus, zur Herstellung der berühmten Klingen und anderen Waffen.

8.6.2 Schweissdamast : Metalle verschiedener Zusammensetzung können mittels Paketschweißen zu einem heterogenen Produkt verbunden werden. Wenn mit einer unförmigen Masse von unterschiedlicher Zusammensetzung (Eisenschwamm, Recycling von Alteisen) gearbeitet wird, erhält man eine ungleichmäßige Verteilung, allerdings vorwiegend in der Richtung der Hauptlängung des Stücks gestreckt. Mehrere gebündelte Metallstäbe können kalt verbunden und danach heiss verschweisst werden. Durch Falten und/oder Drehen eines Bündels von 2, 3 oder 4 Stäben erhält man ein regelmässiges Wellenmuster. Die so erhaltenen Muster können sehr gleichmässig und komplex sein. Schweissdamast wurde teilweise bereits von den Kelten und Römern hergestellt. Während der Merowingerzeit wurde er systematisch für Messer- und Schwertklingen verwendet. Der Schweissdamast kam ab dem 17. Jh.

neu und gelassen einige Stunden bei hoher Temperatur. Der Kohlenstoff diffundiert in das Metall und verwandelt es in Stahl.

8.4 durch gleichzeitige Schmelzung von Eisen und Gusseisen in einem Tiegel. siehe 8.6.1

8.5.1 Stahl mit Kohlenstoff : Stahl mit Kohlenstoff

8.5.2 Legierter Stahl : Stahl mit Kohlenstoff und mehr als 5 % anderen Legierungselementen (Silizium, Mangan, Chrom, Nickel, Vanadium, Molybdän, Wolfram, usw.). Zum Beispiel : rostfreier Stahl (Stainless steel) : 12 % Cr, 0.32 % C.

8.6 Damast, Stahl damast, Stahl damast : Materialkompositum, bestehend aus Metallen auf Eisenbasis, deren Struktur auf Millimeterebene wegen der variablen Verteilung von Kohlenstoff und anderer Verunreinigungen (Phosphor, Nickel, usw.) heterogen ist. Durch Polieren und gegebenenfalls durch Ätzen können diese Variationen sichtbar werden. Die Kunst des Schmiedes besteht darin, einen speziellen ästhetischen Effekt zu erzielen. Die Verflechtung kohlenstoffreicher und -armer Zonen verleiht dem Endprodukt sich ergänzende Qualitäten bezüglich Härte und Dehnbarkeit.

8.6.1 Damast durch Schmelzen : Die gleichzeitige Schmelzung von Eisen und Gusseisen bzw. das Schmelzen von Eisen zusammen mit kohlenstoffreichen Materialien (grüne Blätter, Rinde, Holzkohle) in einem Tiegel kann einen heterogenen Stahl ergeben. Trennungseffekte während der Abkühlphase könnten für diese Struktur verantwortlich sein. Die Herstellungsmethode wurde in Indien im Mittelalter entwickelt und bis ins 19. Jh. angewandt. Der Vorgang wird als Wootzverfahren bezeichnet. Der so hergestellte Stahl wurde in den Vorderen Orient exportiert, im besonderen nach Damaskus, zur Herstellung der berühmten Klingen und anderen Waffen.

8.6.2 Schweissdamast : Metalle verschiedener Zusammensetzung können mittels Paketschweißen zu einem heterogenen Produkt verbunden werden. Wenn mit einer unförmigen Masse von unterschiedlicher Zusammensetzung (Eisenschwamm, Recycling von Alteisen) gearbeitet wird, erhält man eine ungleichmäßige Verteilung, allerdings vorwiegend in der Richtung der Hauptlängung des Stücks gestreckt. Mehrere gebündelte Metallstäbe können kalt verbunden und danach heiss verschweisst werden. Durch Falten und/oder Drehen eines Bündels von 2, 3 oder 4 Stäben erhält man ein regelmässiges Wellenmuster. Die so erhaltenen Muster können sehr gleichmässig und komplex sein. Schweissdamast wurde teilweise bereits von den Kelten und Römern hergestellt. Während der Merowingerzeit wurde er systematisch für Messer- und Schwertklingen verwendet. Der Schweissdamast kam ab dem 17. Jh.

bei der Fabrikation von Gewehrläufen zu neuen Ehren (zum Beispiel in Lüttich, Belgien).

9 Die Schmiedewerkstatt

9.1 Schmiede : Werkstatt und Nebengebäude, in welchen Eisen verarbeitet wird, im weiteren Sinn auch generell für einen Werkplatz mit Metallverarbeitung verwendet.

9.1.1 Schmiedeesse : Offene Feuerstelle, in welcher der Schmied das Metall bearbeitet. Sie kann aus Lehm, Sand, Stein oder Metall bestehen. Das Gebläse ist seitlich (bis ins 19. Jh.) oder senkrecht von unten (in der modernen Schmiede) angebracht. Frühe Schmiedeesen sind meistens in einer kleinen, runden, ovalen oder länglichen Grube angelegt, welche in den Boden der Werkstatt gegraben wird. Es gibt auch flache, auf dem Boden liegende Essen. Ab dem Mittelalter wird die Esse auf einem Tisch auf Mannshöhe eingerichtet.

9.1 Tauchbecken : Holz-, Keramik- oder Metallbehälter, welcher mit einer Flüssigkeit (Wasser, Öl oder Gemisch) gefüllt ist und der schnellen Abkühlung von Eisen dient (Härten). In der Regel steht dieses Becken nahe bei der Schmiedeesse.

9.2 Schmiedewerkzeuge : vgl. Kap. 5, Abb. 16.

9.3 Schmieden : Eisenbe-/verarbeitung in der Schmiede. Sensu strictu sollte dieses Wort nur für die mechanische Formgebung an Eisenobjekten und die Strukturveränderungen, welche diese und Wärmebehandlungen im Eisen hervorrufen, verwendet werden.

9.4. Mechanische Formgebung in der Schmiede : vgl. Kap. 5, Abb. 15.

9.5 Wärmebehandlung in der Schmiede

9.5.1 Aufkohlung : Eindringen von Kohlenstoff in die Oberfläche eines Eisenobjektes. Dieses wird in rotglühendem Zustand, in einem Teil der Esse mit reduzierendem Umfeld, in Kontakt mit der Kohle gebracht. Dieses Verfahren erhöht die Härte des Objektes.

9.5.2 Stickstoffhärtung : Eindringen von Stickstoff (aus organischen Stoffen: Horn usw.) in die Oberfläche eines glühenden Eisenobjektes; erhöht gleichfalls die Härte des Metalles.

9.5.3 Härten : Härten von Stahl durch die Umwandlung eines Teiles des Austenits in Martensit. Nach dem Erhitzen und Halten einer hohen Temperatur wird das Objekt in einer Flüssigkeit abgeschreckt (Wasser, Öl, usw.). Je härter das Stück wird, desto zerbrechlicher wird es.

9.5.4 Glühen: Bezweckt die Rückführung des Stahls in ein Gleichgewichtsgefüge (Erhitzen bei mittlerer Temperatur und langsames Abkühlen an der Luft).

fabrication des canons de fusils à partir du XVIIe siècle, par exemple à Liège en Belgique.

9 La forge

9.1 Forge : Foyer dans lequel on travaille le fer. Par extension, ce terme désigne également l'atelier et ses dépendances, voire un atelier où se travaille un métal en général.

9.1.1 Foyer de forge : Foyer dans lequel le forgeron travaille le métal. Le revêtement peut être en argile, en sable, en pierre ou en métal. La soufflerie peut être disposée latéralement (jusqu'au XIXe s.) ou verticalement (dans la forge moderne). Les foyers de forge anciens sont le plus souvent installés dans de petites fosses circulaires, ovales ou allongées creusées dans le sol de l'atelier. Il existe aussi des foyers plats au sol. A partir du Moyen Age, le foyer est disposé sur une table à hauteur d'homme.

9.1.2 Baquet de trempe : Récipient en bois, métal ou céramique contenant un liquide (eau, huile ou mixture complexe) destiné à refroidir rapidement le fer (trempe). Il est généralement disposé à proximité du foyer de forge.

9.2 Outils de forge : cf. chap. 5, fig. 16.

9.3 Forgeage : Travail du fer à la forge. Au sens strict, il convient de limiter l'emploi de ce terme aux traitements mécaniques de mise en forme des objets en fer et aux traitements mécaniques et thermiques qui modifient la structure du fer exécutés à la forge.

9.4 Traitements mécaniques : cf. chap. 5, fig. 15.

9.5 Traitements thermiques à la forge

9.5.1 Cémentation à la forge : Diffusion du carbone à chaud à la surface d'un objet en fer. La pièce est maintenue au rouge et placée dans une partie du foyer fortement réductrice et au contact du charbon. Ce traitement augmente la dureté.

9.5.2 Nitruration : Diffusion de l'azote (provenant de matières organiques : corne, etc.) à chaud à la surface d'un objet en fer. Ce traitement augmente la dureté.

9.5.3 Trempe : Durcissement d'un acier par transformation d'une partie de l'austénite en martensite. Le traitement comporte un chauffage, un maintien à cette température élevée et un refroidissement brusque dans un liquide (eau, huile, etc.). L'augmentation de la dureté va de pair avec celle de la fragilité.

9.5.4 Recuit : Traitement thermique destiné à ramener un acier à une structure cristalline d'équilibre (chauffage à une température moyenne et refroidissement lent à l'air).

9.5.5 Anlassen : Wird nach dem Härten angewendet, um die Härte und vor allem die Sprödigkeit des Stahles zu verringern (Erhitzen auf mittlere Temperatur, Halten und langsames Abkühlen).

9.6 Verbindungstechniken

9.6.1 Schweißen : Engstes Verbinden von zwei Metallstücken, durch Hämmern in heissem Zustand.

9.6.2 Schweißmittel, Antioxydans : Substanz (Lehm, Sand, Borax), mit welcher man die Schweißstelle zudeckt, um die Eisenoxyde von der Oberfläche wegzuzätzen und das heisse Metall von der Luft zu isolieren (verhindern einer Reoxydation).

9.6.3 Paketschweißen : Zusammenfügen mittels Schweißen und Hämmern, von verschiedenen Metallstücken (häufig Rückgewinnung), um ein brauchbares Stück herzustellen.

9.6.4 Löten : Verbinden von zwei Stücken mit Hilfe eines anderen Metalles.

9.6.5 (Ver-)Nietung : Verbindung von metallischen und/oder nichtmetallischen Stücken durch eine Niete. Ein Stift wird durch Löcher in den zu verbindenden Stücken geführt. Die beiden Stiftenden werden darauf verformt, so dass die Stücke zusammenhalten.

9.7 Verzierungs- und Fertigstellungstechniken : Zahlreiche, geläufige Techniken eignen sich zur Verzierung von Eisen : Gravieren, Ziselieren, Treiben, usw.

9.7.1 Polieren, Schleifen : Entfernung durch Abtragen der Unregelmässigkeiten an der Metalloberfläche. Eine glatte Oberfläche glänzt und reflektiert das Licht. Die Schleifqualität hängt von der Feinheit ab. Ein grober Schliff entsteht, in dem das Eisen mit Steinen mit immer feinerem Korn gerieben wird. Ein feiner Schliff erfolgt mit organischen Materialien (Holz, Leder, Stoffe).

9.7.2 Schärfen : Herstellung durch Abtragen entlang einer Klingenschneide. Im allgemeinen werden Steine, manchmal Schleifsteine verwendet.

9.7.3 Ätzen : Das Ätzen eines Metalles mit Hilfe schwacher Säuren (Zitronensäure, Essig) ermöglicht es, seine Struktur hervorzuheben. Diese Technik unterstreicht vorteilhaft Damaststähle.

9.7.4 Tauschierung : Einlegen von Metalldrähten in die Oberfläche eines anderen Metalles. Zahlreiche Eisenobjekte tragen tauschiert Verzierungen aus Gold-, Silber-, Bronze-, Kupfer- oder Messingdrähten.

9.8 Rückgewinnung von Alteisen : Eisen ist ein auf einfache Art wiederverwertbares Metall, in der Schmiede oder im Laufe einer der vorgehenden Etappen des Eisenherstellungsprozesses. In der Vergangenheit wur-

9.5.5 Revenu : Traitement thermique (chauffage moyen, maintien à cette température et refroidissement lent) appliqué après la trempe afin de diminuer la dureté et surtout la fragilité de l'acier.

9.6 Techniques d'assemblage

9.6.1 Soudure : Réunion intime de deux pièces métalliques, à chaud par martelage.

9.6.2 Décapant, fondant de soudure, antioxydant : Substance (argile, sable, borax) avec laquelle on recouvre l'emplacement d'une soudure pour décaper les oxydes de fer formés en surface et isoler le métal chaud de l'air (éviter une réoxydation).

9.6.3 Corroyage : Assemblage, par soudure et martelage, de différentes pièces de métal (souvent de récupération) afin de fabriquer une pièce utilisable.

9.6.4 Brasage : Réunion de deux pièces à l'aide d'un autre métal.

9.6.5 Rivetage : Assemblage de pièces métalliques ou non au moyen d'un rivet. Une tige est introduite au travers de trous dans les pièces à assembler. Les deux extrémités de la tige sont ensuite déformées de manière à maintenir les pièces en place.

9.7 Techniques de décoration et de finition : De nombreuses techniques largement répandues permettent de décorer le fer : gravure, ciselure, repoussé, etc.

9.7.1 Polissage : Enlèvement, par abrasion, des aspérités à la surface du métal. Une surface lisse brille en renvoyant la lumière. La qualité du polissage dépend de sa finesse. Le polissage grossier est obtenu en frottant le métal avec des pierres dont le grain est de plus en plus fin. Le polissage fin est fait avec des matières organiques (bois, cuirs, tissus).

9.7.2 Aiguisage, affûtage : Obtention ou rectification, par abrasion, d'un tranchant le long d'une lame. Généralement, on utilise des pierres, parfois des meules.

9.7.3 Attaque acide : L'attaque à l'aide de certains acides faibles (acide citrique, vinaigre) permet de faire apparaître la structure du métal. Cette technique met en relief les aciers damassés.

9.7.4 Damasquinage : Incrustation de fils d'un métal dans une surface d'un autre métal. De nombreux objets en fer portent des décors damasquinés en fils d'or, d'argent, de bronze, de cuivre ou de laiton.

9.8 Récupération de la ferraille : Le fer est un métal facile à recycler à la forge comme au cours des étapes précédentes du processus sidérurgique. Par le passé, il n'est pas douteux que cette pratique était très intense. Aujourd'hui, la ferraille de récupération

de häufig durch Schmieden recycelt. Heute stellt der wiederverwertete Schrott eine Hauptversorgungsquelle der Industrie dar.

9.8.1 Der Begriff „lopin“ kennt im Deutschen keine Entsprechung. Auf Französisch bezeichnet er ein Eisenstück, welches aus mehreren, meist wiederverwerteten Teilen durch Zusammenschweißen hergestellt wurde.

9.9 Schmiedeschlacken (Kap. 4.5) : Abfälle des Schmiedens. Es gibt ein breites Spektrum von anfallenden Resten, die entweder in der Esse (kalottenförmige Schlacken, Tropfenschlacken, usw.) oder durch das Hämmern auf dem Amboss (Hammerschlag, Eisenflitter) oder beim Schrotten (Metallabfall) entstehen.

9.9.1 Halbfabrikat : Metallstück, dessen Ausarbeitung begonnen, aber nicht abgeschlossen wurde.

9.9.2 Fehlfabrikat : Metallstück, dessen Ausarbeitung begonnen, aus technischen Gründen aber nicht abgeschlossen wurde (Bruch, usw.).

9.9.3 Abfallstück : Metallstück ohne Funktion, welches von einem Objekt während der Herstellung abgeschrotet (abgetrennt) wurde.

9.10 Mechanisierung der Eisenver-/bearbeitung

9.10.1 Hammerwerk, Dampfhammer, hydraulischer Hammer (Abb. 28) : Kräftiger, mechanischer Hammer, betrieben mit Wasserkraft (Schaufelrad + Nockenwelle) oder einer anderen Energie (Dampf, elektrischer Strom). Seine Kraft hängt vom Gewicht (alleine der Kopf kann mehrere hundert Kilogramm wiegen), der Stiellänge und der Bewegungsgröße ab. Die Schlaggeschwindigkeit ist ein wichtiger Faktor (mehrere Dutzend bis mehrere hundert Schläge pro Minute). Es besteht eine grosse Variationsbreite dieser Geräte, welche bei allen Arbeiten des Hämmerns von Eisen sowie anderer Metalle verwendet werden. Im weiteren Sinne meint die Bezeichnung auch die Werkstatt, in der ein Hammer arbeitet, sowie seine Nebengebäude oder sogar andere Einrichtungen der Eisenindustrie (Ofen, usw.).

9.10.2 Blechhammerschmiede: Auf die Herstellung von flachen Produkten spezialisierter Betrieb mit einem hydraulischen Hammer.

9.10.3 Walzwerk : Auf die Herstellung von flachen Produkten durch Auswalzen spezialisierter Betrieb. Die heisse Eisenstange wird zwischen zwei sich drehende Zylinder, deren Abstand etwas kleiner als der Stangenquerschnitt ist, eingeführt. Nachfolgende Zylinderpaare mit immer kleiner werdendem Abstand ermöglichen es, Bleche von gleichmässiger Dicke herzustellen.

9.10.4 Spaltwerk, Eisenspalterei : Auf die Herstellung von gelängten Produkten mit schwachem Durchmes-

est une source majeure d'approvisionnement de l'industrie.

9.8.1. Lopin : Pièce de fer formée de plusieurs morceaux, souvent de récupération, assemblés par martelage.

9.9 Scories de forge (chap. 4.5) : Résidus du travail à la forge. Il y a une gamme très étendue de déchets qui se forment soit dans le foyer (scorie en forme de calotte, scories en goutte, etc.) soit par martelage sur l'enclume (battitures, particules métalliques) ou comme résultat de découpage (chutes métalliques).

9.9.1 Ebauche : Pièce métallique dont la mise en forme a été commencée mais n'a pas été terminée.

9.9.2 Raté de fabrication : Pièce métallique dont la mise en forme a été commencée mais n'a pas été terminée pour des raisons techniques (cassure, etc.).

9.9.3 Chute : Pièce métallique non fonctionnelle détachée d'un objet au cours de la fabrication de celui-ci.

9.10 Mécanisation du travail du fer

9.10.1 Martinet, marteau-pilon, marteau hydraulique : (Fig. 28) : Puissant marteau mécanique à soulèvement mu par la force hydraulique (roue à aube + arbre à cames) ou une autre énergie (vapeur, électricité). Sa puissance dépend du poids (la tête seule peut peser plusieurs centaines de kilos), de la longueur du manche et de l'amplitude du mouvement. La vitesse de frappe est un paramètre essentiel (plusieurs dizaines à plusieurs centaines de coups par minute). Il existe une grande variété d'appareils qui sont utilisés dans tous les travaux de martelage pour le fer comme pour d'autres métaux. Par extension, ce terme désigne aussi l'atelier où se trouvent l'appareil et ses dépendances ou bien encore d'autres installations sidérurgiques (fourneau, etc.).

9.10.2 Platinerie : Usine spécialisée dans la fabrication de produits plats au martinet hydraulique.

9.10.3 Laminoir : Usine spécialisée dans la fabrication de produits plats par laminage. La barre de fer chaude est introduite entre deux cylindres tournants dont l'écartement est un peu inférieur à la section de la barre. En passant dans des paires de cylindres successives dont l'écartement diminue, on produit des tôles d'épaisseur régulière.

9.10.4 Fenderie : Usine spécialisée dans la production de produits allongés de faible section. La barre de fer chaude est introduite entre deux cylindres cannelés tournants. Elle est découpée par les cannelures en autant de verges.

ser spezialisierter Betrieb. Die heisse Eisenstange wird zwischen zwei sich drehenden, kannelierten Zylindern eingeführt. Durch die Kanneluren wird sie in ebensoviele Stangen zerkleinert.

9.10.5 Der Begriff „moulin à fer“ (Eisenmühle) kennt im Deutschen keine Entsprechung. Er bezeichnet auf Französisch einen mechanisierten Betrieb in Beziehung mit der Eisenindustrie. Die genaue Bedeutung variiert je nach Region. In gewissen Fällen rührt diese Bezeichnung von einem grossen senkrechten, wasserkraftbetriebenen Mühlstein, welcher in solchen Betrieben zum Schleifen von Klingen diente, her.

10 Die Verteilungsformen von Eisen

10.1 Barren (Abb. 29) : Metallstück bestimmt zur Lagerung, zum Transport oder Handel. Im weiteren Sinne alle metallischen oder nicht metallischen, gegossenen oder nicht gegossenen Produkte mit gleicher Funktion. Zum Teil mit Währungsfunktion. Gelegentlich missbräuchlich als Massel bezeichnet. In verschiedenen geographischen Räumen und zu verschiedenen Zeitstufen sind zahlreiche Barrentypen bekannt.

10.1.1 Spitzbarren (Abb. 29) : Geschmiedete Eisenstücke in der Form einer doppelten Pyramide mit quadratischer Basis von 20 bis 40 cm Länge und etwa 4 bis 8 kg Gewicht. Die wenigen typologischen Merkmale sind nicht datierbar. Man findet Spitzbarren vorwiegend in nordalpinen Regionen: schweizerisches Mittelland, Saôneetal, Rheintal, Süddeutschland. Die gesicherten Datierungen reichen von der Hallstattzeit bis ins Hochmittelalter.

10.1.2 Stabbarren (Abb. 29) : Geschmiedete Flacheisenstäbe mit rechteckigem Querschnitt von 10 bis 100 cm Länge und einigen 100 g bis wenigen kg Gewicht. Ein Ende ist häufig zu einer grifförmigen Angel oder Tülle ausgeschmiedet, die gelegentlich hakenförmig umgebogen ist, oder es handelt sich um zwei fächerförmig flachgehämmerte Enden. Man kennt sie im ganzen nordalpinen Europa. Die gesicherten Datierungen reichen von der Latène- bis in die Römerzeit. Vor allem nördlich der Alpen, im schweizerischen Mittelland, in Zentral- und Ostfrankreich, Belgien und Deutschland sind verschiedene Varianten bekannt. Sie sind sehr zahlreich auf den britischen Inseln („currency bars“).

10.1.3 Stangenbarren : Verschiedene geschmiedete Eisenstangen ohne besondere Merkmale, wurden in Europa von der Latènezeit bis heute verwendet. Mit Ausnahme der Fundzusammenhänge gibt es sehr wenige Hinweise, welche es erlauben, sie als Barren einzuordnen und einem bestimmten Kulturkreis zuzuordnen. Es besteht eine grosse Vielfalt von Modellen (einige hundert Gramm bis einige Kilogramm; massig oder länglich; mit quadratischem, rechteckigem oder unregelmässigem Querschnitt).

9.10.5 Moulin à fer : Ce terme fréquent dans les sources écrites de certaines régions désigne une installation sidérurgique mécanisée. Le sens varie en fonction des régions. Dans certains cas, le moulin à fer tire son nom de la présence d'une grande meule verticale mue par l'énergie hydraulique et destinée à l'aiguisage des lames

10 Les formes de distribution du fer

10.1 Lingot (Fig. 29) : Pièce de métal moulé destinée au stockage, au transport ou au commerce. Par extension, tout produit, métallique ou non, moulé ou non, ayant les mêmes fonctions. Dans certains cas, ils ont pu avoir une fonction monétaire. De nombreux types de lingots de fer sont connus dans les différentes aires géographiques et aux différentes époques.

10.1.1 Lingots de fer bipyramidaux (Fig. 29) : Pièces de fer martelées en forme de double pyramide à base carrée de 20 à 40 cm de long et de 4 à 8 kg en moyenne, sans différence typologique datable. On les trouve dans les régions au Nord des Alpes : Plateau suisse, vallée de la Saône, vallée du Rhin, Allemagne du Sud. Les datations proposées vont du premier Age du Fer jusqu'au Haut Moyen Age.

10.1.2 Lingots de fer en barre aplatie (Fig. 29) : Pièces de fer martelées en forme de barre à section rectangulaire de 10 à 100 cm de long et de quelques centaines de grammes à quelques kilos. Une des extrémités est souvent étirée en forme de manche, parfois repliée sur elle-même en forme de crochet ou refoulée en éventail. Elles sont connues dans toute l'Europe au Nord des Alpes. Les datations proposées vont du second âge du Fer jusqu'à l'époque romaine. Diverses variantes sont connues principalement au Nord des Alpes, Plateau suisse, Centre et Est de la France, Belgique, Allemagne. Elles sont très fréquentes en Grande Bretagne («currency bars»).

10.1.3 Lingots de fer en barre carrée : Différents modèles de barres de section quadrangulaire mais ne présentant pas de particularité ont été utilisés en Europe entre l'Age du Fer et nos jours. Mis à part les contextes de découvertes, très peu d'indices permettent de les attribuer à une culture particulière. Il existe une grande variété de modules (quelques centaines de grammes à quelques kilogrammes; massifs, trapus ou allongés; à section carrée, rectangulaire ou irrégulière).

10 Index zum kommentierten Wörterverzeichnis 10 Index du vocabulaire raisonné

A

3.5 Abbau
9.9.3 Abfallstück
3.3.4 Ader
4.1.1 Angereichertes Erz
9.5.5 Anlassen
4.1 Anreicherung
9.6.2 Antioxydants
9.7.3 Aetzen
9.5.1 Aufkohlung (Schmiede)
8.3 Aufkohlung (Stahl)
3.5.2 Ausbau
4.5 Ausglühen
6.5 Ausheizen
6.6 Ausheizherd
6.8 Ausheizschlacken
7.6.3 Ausschmieden
7.6.5 Ausschmieden
1.11 Austenit

B

1.16 Bainit
10.1 Barren
3.5.5 Belüftung
3.4.2 Bergwerk
3.5.5 Bewetterung
9.10.2 Blechhammerschmiede
5.3 Brennstoff

D

8.6 Damast, -stahl
9.10.1 Dampfhammer
5.5.2 Dolomitzuschlag
5.4.5 Düse

E

1.4 Eisen (chem. Element)
1.7 Eisen (Metall)
2.5 Eisenerz
2 Eisenerze
2.7 Eisenerze, andere
2.6 Eisenerze (Schweiz)
5 Eisenerzverhüttung
6.1 Eisenerzverhüttung (direktes Verfahren)
7.1 Eisenerzverhüttung (indirektes Verfahren)
1.2 Eisenindustrie
2.2 Eisenminerale
2.2.4 Eisenminerale, andere
6.3 Eisenschwamm
2.7.2 Eiserner Hut
2.4 Erz
3 Erzabbau
4 Erzaufbereitung
3.4.3 Erzgrube
3.2.1 Erzkörper
3.3.5 Erzmasse

A

3.5.1 Abattage
9.7.3 Acide
1.8 Acier
8 Acier (Fabrication)
8.5.2 Acier allié
8.5.1 Acier au carbone
7.8.2 Acier converti
8.6 Acier damassé
7.8.2 Acier à l'oxygène
7.7.2 Acier puddlé
3.5.5 Aérage
9.7.2 Affûtage
7.5 Affinage
7.5.1 Affinerie
7.6 Affinage au foyer
9.7.2 Aiguillage
1.6 Alliage
3.3.5 Amas
2.2.3 Ankérite
1.11 Austénite

B

1.16 Bainite
9.1.2 Baquet de trempe
6.2 Bas fourneau
6.6 Bas foyer
9.9 Battitures
9.2 Bigorne
9.2 Billot
4.2.2 Boccard
2.6.1 Bohnerz
3.5.3 Boisage
9.6.4 Brasage
4.2 Broyage

C

4.5 Calcination
4.3 Calibrage
2.2.3 Carbonates
3.4.1 Carrière
5.5.1 Castine
8.3 Cémentation du fer
1.13 Cémentite
2.2.4 Chamosite
2.7.2 Chapeau de fer
5.3.1 Charbon de bois
5.3.2 Charbon de terre
7.6.4 Chaufferie
9.9.3 Chute
7.6.5 Cinglage
9.7 Ciselure
5.3.3 Coke
5.3 Combustible
4.2 Concassage
4.1 Concentration

F
 9.9.2 Fehlfabrikat
 1.10 Ferrit
 9.7 Fertigstellungstechniken
 6.2.1 Fließschlacke
 4.7 Flottation
 3.3.4 Flöz
 7.8.2 Flusseisen, -stahl
 7.5 Frischen
 7.6.1 Frischherd
 7.6.7 Frischschlacken

G
 3.3.3 Gang
 3.1.1 Gangart
 5.4.2 Gebläse
 6.2.2 Gefangene Schlacke
 2.3 Gestein
 3.5.1 Gewinnung
 4.3.1 Gitter
 9.5.4 Glühen
 1.9 Gusseisen

H
 9.9.1 Halbfabrikat
 3.4.4 Halde
 2.6.4 Hämatit (Erz)
 2.5.1 Hämatit (Mineral)
 9.10.1 Hammerwerk
 9.5.3 Härten
 7.6.4 Heizherd
 5.2.2 Herd
 7.6 Herdfrischen
 7.2 Hochofen
 7.4 Hochofenschlacken
 5.3.1 Holzkohle
 9.10.1 Hydraulischer Hammer
 2.2.2 Hydroxyde

I
 3.3.8 Imprägnationslagerstätte

K
 4.3 Kalibrierung
 5.5.1 Kalkzuschlag
 2.2.3 Karbonate
 6.2.3 Katalanisches Verfahren
 3.3.7 Kluftlagerstätte
 8.5.1 Kohlenstoffstahl
 5.3.3 Koks
 7.8.1 Konverter

L
 3.2.2 Lagerstätte
 3.3 Lagerstättentypen
 8.5.2 Legierter Stahl
 1.6 Legierung
 2.6.3 Limonit
 3.3.6 Linse
 9.8.1 „Lopin“

4.1.1 Concentré
 7.8 Convertissage
 7.8.1 Convertisseur
 9.6.3 Corroyage
 3.3.2 Couche
 4.3.1 Crible

D
 8.6 Damas
 8.6.1 Damas de fusion
 8.6.2 Damas de corroyage
 9.7.4 Damasquinage
 9.6.2 Décapant
 2.5.4 Déchets ferreux
 9.7 Décoration
 2.6.2 Dogger
 5.5.2 Dolomie

E
 9.9.1 Ebauche
 9.4 Emboutissage
 9.2 Enclume
 9.4 Epaulement
 6.3 Eponge
 5.5.3 Erbue
 9.2 Etaut
 9.4.2 Etirage
 3.5.4 Exhaure
 3.5 Exploitation

F
 9.10.4 Fenderie
 1.4 Fer (élément)
 1.7 Fer (métal)
 2.7.1 Fer des marais
 2.5.3 Fer spathique
 7.7.2 Fer puddlé
 1.10 Ferrite
 3.3.3 Filon
 9.7 Finition
 4.7 Flottation
 5.5 Fondant
 9.6.2 Fondant de soudure
 1.9 Fonte
 9.1 Forge
 9.3 Forgeage
 5.2 Four
 6.2.4 Four à masse
 7.7.1 Four à puddler
 5.2.1 Fourneau
 6.2.3 Fourneau catalan
 8.3.1 Fourneau de cémentation
 4.6.1 Fourneau de grillage
 5.2.2 Foyer
 7.6.1 Foyer d'affinage
 9.1.1 Foyer de forge
 6.6 Foyer de raffinage

G
 3.1.1 Gangue

9.6.4 Lötten
7.6.2 Luppe

M

2.6.5 Magnetit (Erz)
2.5.2 Magnetit (Mineral)
4.2 Mahlen
1.14 Martensit
7.3.1 Massel
9.10 Mechanisierung (Verarbeitung)
9.4 Mechanische Formgebung
1.5 Metall
1.3 Metallographie
1.1 Metallurgie
2.1 Mineral(ien)
4.2.1 Mörser
9.10.5 „Moulin à fer“
4.2.1 Mühle

N

8.1 Natürlicher Stahl
5.4 Natürlicher Zug
9.6.5 (Ver-)Nietung

O

5.2 Ofen
2.6.2 Oolith
2.2.1 Oxyde

P

9.6.3 Paketschweissen
1.12 Perlit
7.6.6 “Pièce”
3.4.3 Pinge
4.2 Pochen
4.2.2 Pochwerk
9.7.1 Polieren
7.7 Puddeln
7.7.1 Puddelofen

R

4.3.2 Radwäscherei
2.7.1 Raseneisenerz
5.1 Redoxreaktion
6.2 Rennofen
7.3 Roheisen
3.1.3 Roherz
4.6 Rösten
4.6.1 Röstherd
4.6.1 Röstofen
4.6.1 Röststadel
9.8 Rückgewinnung (Alteisen)

S

9.7.2 Schärfen
3.3.2 Schicht
3.3.1 Schichtförmige Lagerstätte
9.7.1 Schleifen
8.6.1 Schmelzdamast
9.1 Schmiede

3.2.2 Gisement
3.3.8 Gisement disséminé
3.3.7 Gisement fissural
3.3 Gisement (modes)
3.3.1 Gisement stratiforme
3.2.1 Gîte
2.2.2 Goethite
9.7 Gravure
4.6 Grillage
7.3.1 Gueuse

H

3.4.4 Halde
7.2 Haut fourneau
2.5.1 Hématite (mineral)
2.2.1 Hématite (minéral)
5.3.2 Houille
2.2.2 Hydroxydes

I

2.2.1 Ilménite

L

9.10.3 Laminoir
7.4 Laitier
4.4 Lavage
3.3.6 Lentille
2.2.2 Lépidocrosite
9.2.5 Limes
2.2.2 Limonite
10.1 Lingot
10.1.1 Lingot bipyramidal
10.1.2 Lingot en barre
9.8.1 Lopin
6.7 Loupe

M

9.2 Maillet
2.5.2 Magnétite (mineral)
2.2.1 Magnétite (minéral)
9.2 Mandrin
9.4 Mandrinage
9.2 Marteau
9.4 Martelage
1.14 Martensite
9.10.1 Martinet
9.2 Masse
9.4 Matriçage
9.2 Matrice
1.5 Métal
1.3 Metallographie
1.1 Métallurgie
2.2.4 Météorite
6.2.3 Méthode catalane
6.1 Méthode directe
7.1 Méthode indirecte
7.6 Méthode wallonne
4.2.1 Meule à mineral
9.2 Meule à polir
3.4.2 Mine

9.1.1	Schmiedeesse	2.4	Minerai
6.7	Schmiedeluppe	5.5.4	Minerai autofondant
9.3	Schmieden	2.5	Minerais de fer
9.9	Schmiedeschlacken	3.1.3	Minerai tout-venant
9	Schmiedewerkstatt	2.6	Minerai (Suisse)
9.2	Schmiedewerkzeuge	2.1	Minéral
4.2	Schroten	2.2	Minéraux du fer
5.5.6	Schüreisen	3.4.3	Minière
5.5.6	Schürhaken	4.2.1	Mortier
8.6.2	Schweissdamast	9.10.5	Moulin à fer
7.7.2	Schweisseisen, -stahl		
9.6.1	Schweissen	N	
9.6.2	Schweissmittel	9.5.2	Nitruration
4.7	Schwimmaufbereitung		
5.5.4	Selbstgängiges Erz	O	
2.6.4	Siderit	2.6.2	Oolithes
2.6.1	Siderolithisches Erz	9.2	Outils de forge
4.3.1	Sieb	2.2.1	Oxydes
4.3.1	Siebwerk	5.1	Oxydoréduction
3.3.7	Spaltenlagerstätte		
9.10.4	Spaltwerk	P	
2.5.3	Spateisenstein	4.3.2	Patouillet
10.1.1	Spitzbarren	1.12	Perlite
10.1.2	Stabbarren	7.6.6	Pièce
1.8	Stahl	4.2.1	Pilon
8	Stahlherstellung	9.2	Pinces
7.5.1	Stahlwerk	2.6.1	Pisolithes
10.1.3	Stangenbarren	9.2	Plane
3.4.1	Steinbruch	9.4	Planage
5.3.2	Steinkohle	9.4	Platinage
9.5.2	Stickstoffhärtung	9.10.2	Platinerie
3.3.5	Stock	9.2	Poinçon
4.2.1	Stössel	9.4	Poinçonnement
6.2.4	Stückofen	3.5.1	Pointerolle
2.7.1	Sumpferze	9.7.1	Polissage
3.5.4	Sümpfen	9.2	Polissoir
		7.7	Puddlage
T		2.2.4	Pyrite
3.1.2	Taubes Gestein		
9.1	Tauchbecken	R	
9.7.4	Tauschierung	6.5	Raffinage
5.5.3	Tonerdezuschlag	9.9.2	Raté de fabrication
1.15	Troostit	9.5.4	Recuit
		9.8	Recyclage
V		9.4.3	Refouillage
9.6	Verbindungstechniken	7.6.2	Renard
6.4	Verhüttungsschlacken	9.7	Repoussé
3.5.3	Verspriessung	9.5.5	Revenu
2.5.4	Verschiedenes	5.6	Ringard
10	Verteilungsformen	9.6.5	Rivetage
9.7	Verzierungstechniken	2.3	Roche
W		S	
9.10.3	Walzwerk	7.6.7	Scorie d'affinage
9.5	Wärmebehandlung	9.9	Scorie en calotte
4.4	Waschen	6.2.1	Scorie coulée
5.4.3	Wassertrommelgebläse	9.9	Scorie de forge
5.4.4	Windform	6.2.2	Scorie piégée
7.8	Windfrischen	6.8	Scorie de raffinage
		6.4	Scorie de réduction

Z

- 8.3.1 Zementierofen
- 1.13 Zementit
- 5.5 Zuschlag

- 2.2.3 Sidérite
- 2.6.1 Sidérolithique
- 1.2 Sidérurgie
- 3.1.2 Stérile
- 9.6.1 Soudure
- 5.4.2 Soufflerie
- 3.5.2 Soutènement
- 2.2.4 Sulfure

T

- 4.3.1 Tamis
- 9.2 Tas
- 9.2 Tenailles
- 5.4.1 Tirage naturel
- 9.4 Torsion
- 9.2 Tranche
- 9.5.3 Trempe
- 5.4.3 Trompe à eau
- 1.15 Troostite
- 5.4.4 Trou à vent
- 5.4.5 Tuyère

U

- 9.4 Usinage

V

- 2.6.3 Valanginien
- 3.3.4 Veine

W

- 8.6.1 Wootz

11 Illustration / Abbildungen

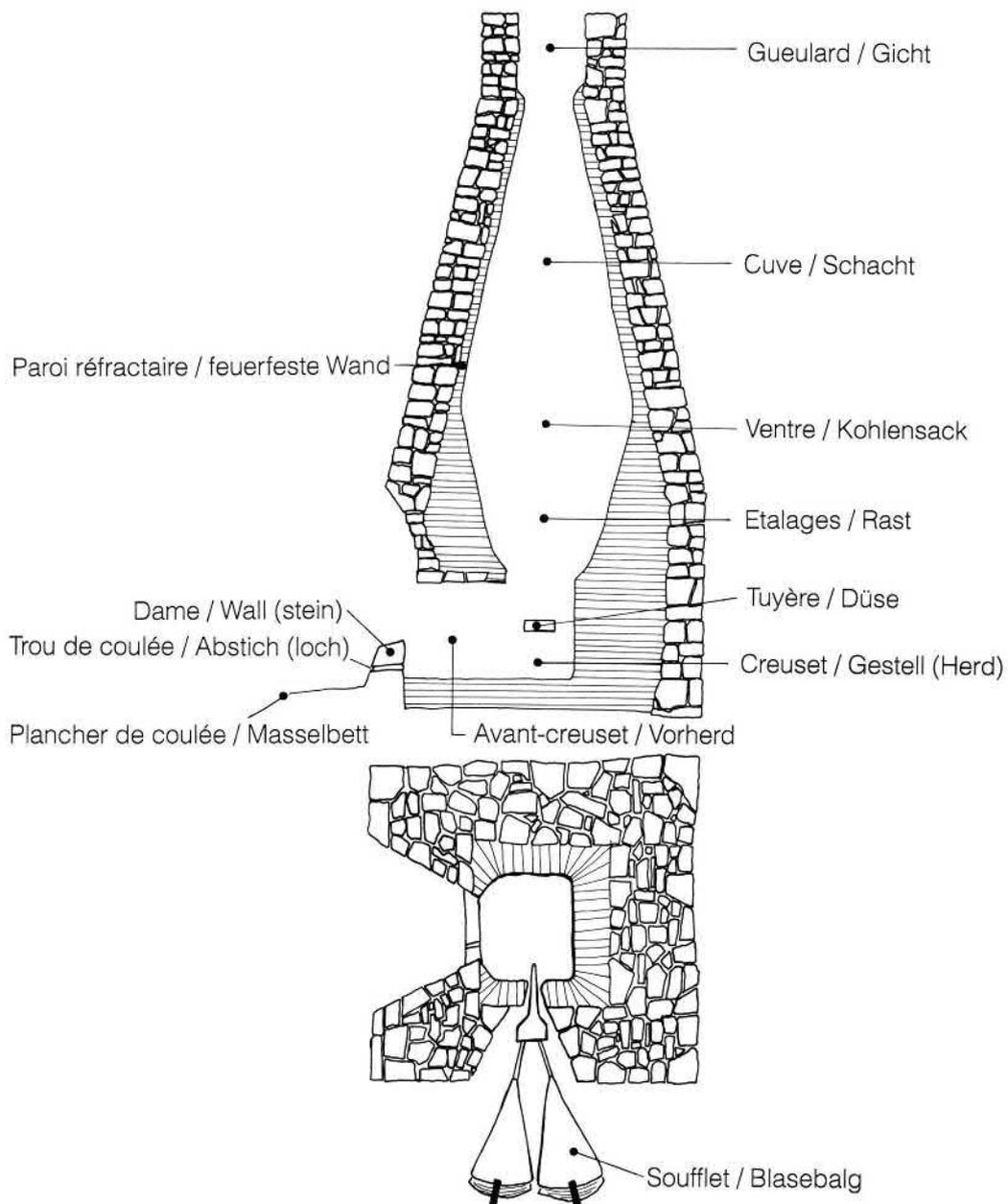


Abb. 26: Schema eines Hochofens mit Holzkohlebefeuerung (17./18. Jh.).
Fig. 26: Schéma d'un haut fourneau au charbon de bois (17e/18e siècles).

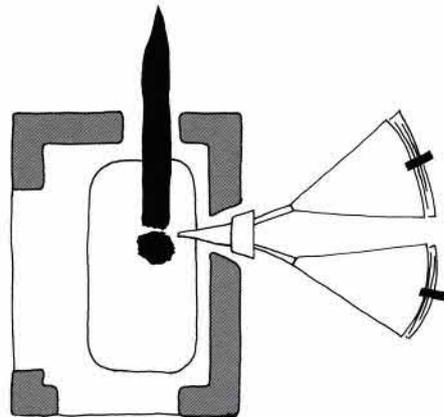
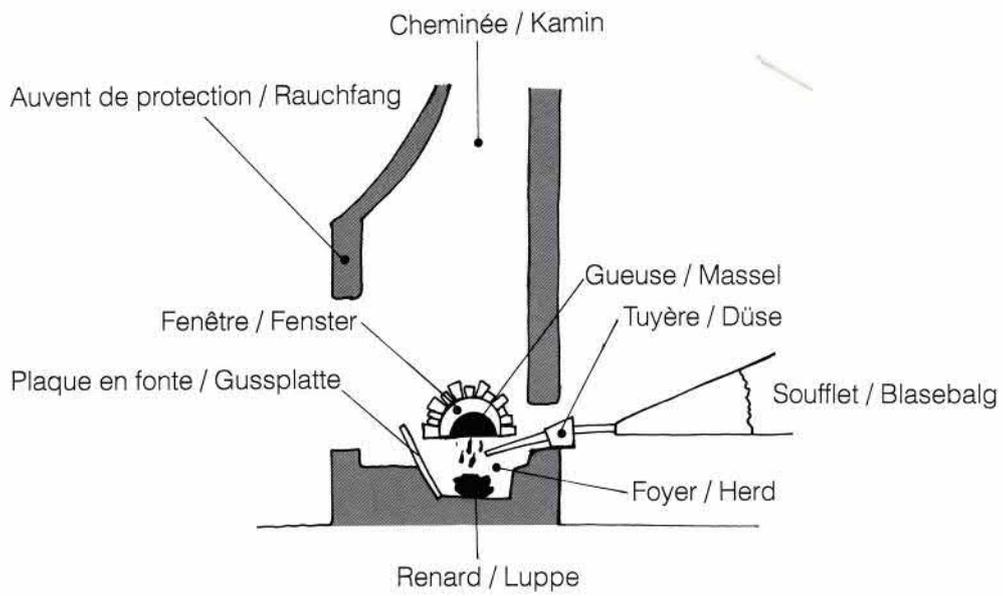


Abb. 27: Schema eines wallonischen Frischherdes (17.Jh.).

Fig. 27: Schéma d'un foyer d'affinage par la méthode wallone (17e siècle).

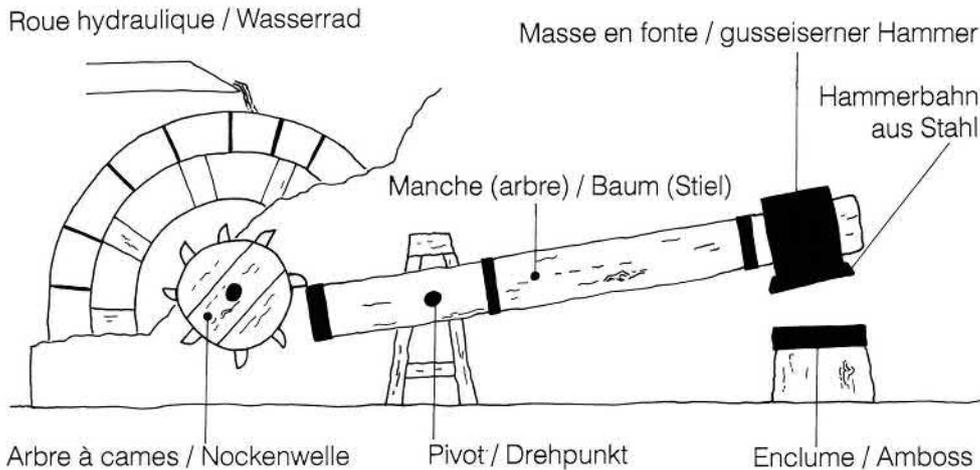


Abb. 28: Schema eines Hammerwerks.

Fig. 28: Schéma d'un martinet.

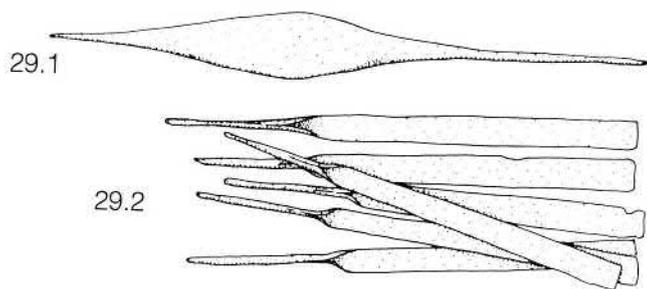


Abb. 29: Eisenbarren, eisenzeitlich. Zürich (ZH), Limmat (nach UfAS IV, 106, Abb. 1).

Fig. 29: Lingots de fer, latène. Zurich (ZH), Limmat (d'après UfAS IV, 106, fig. 1).

29.1 Spitzbarren / Lingots de fer bipyramidaux.

29.2 Stabbarren / Lingots de fer en forme de barre aplatie.

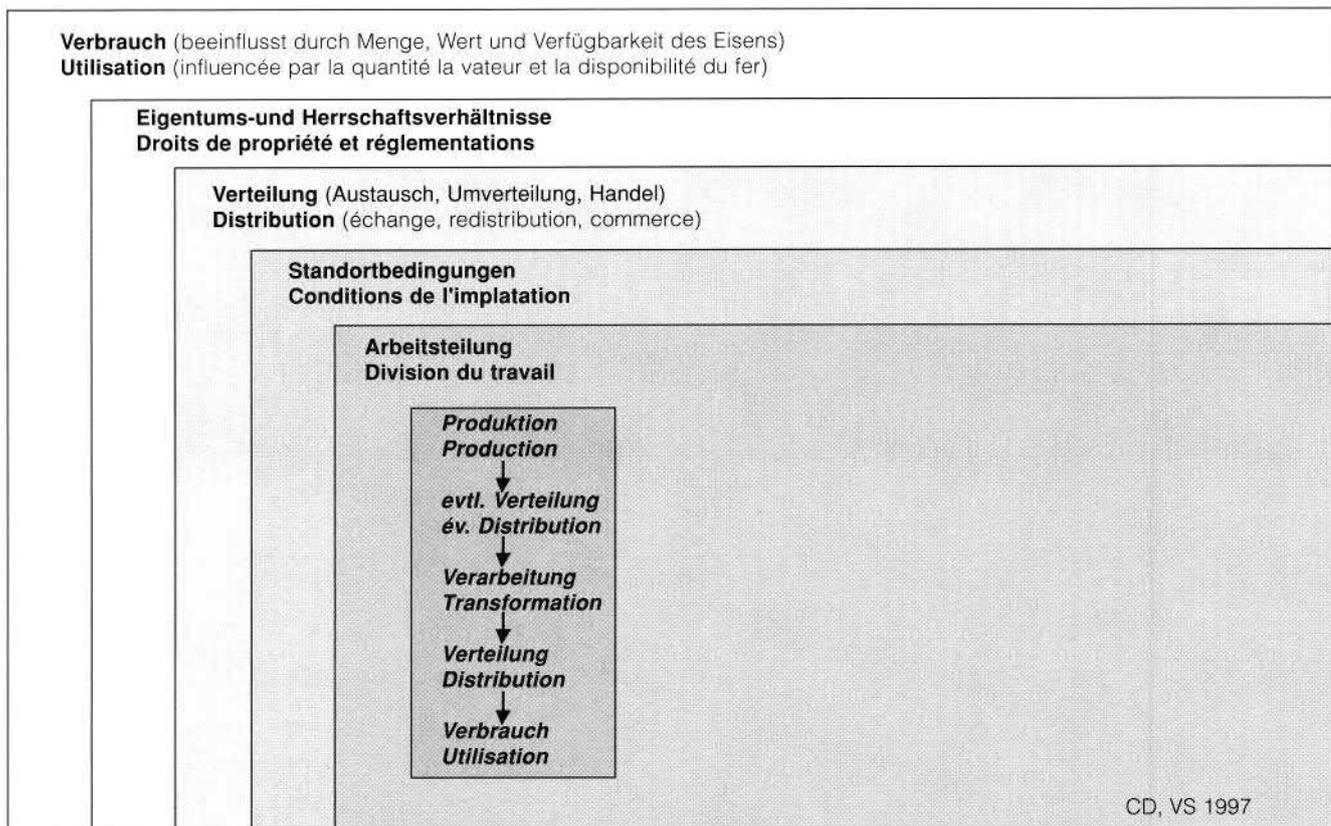
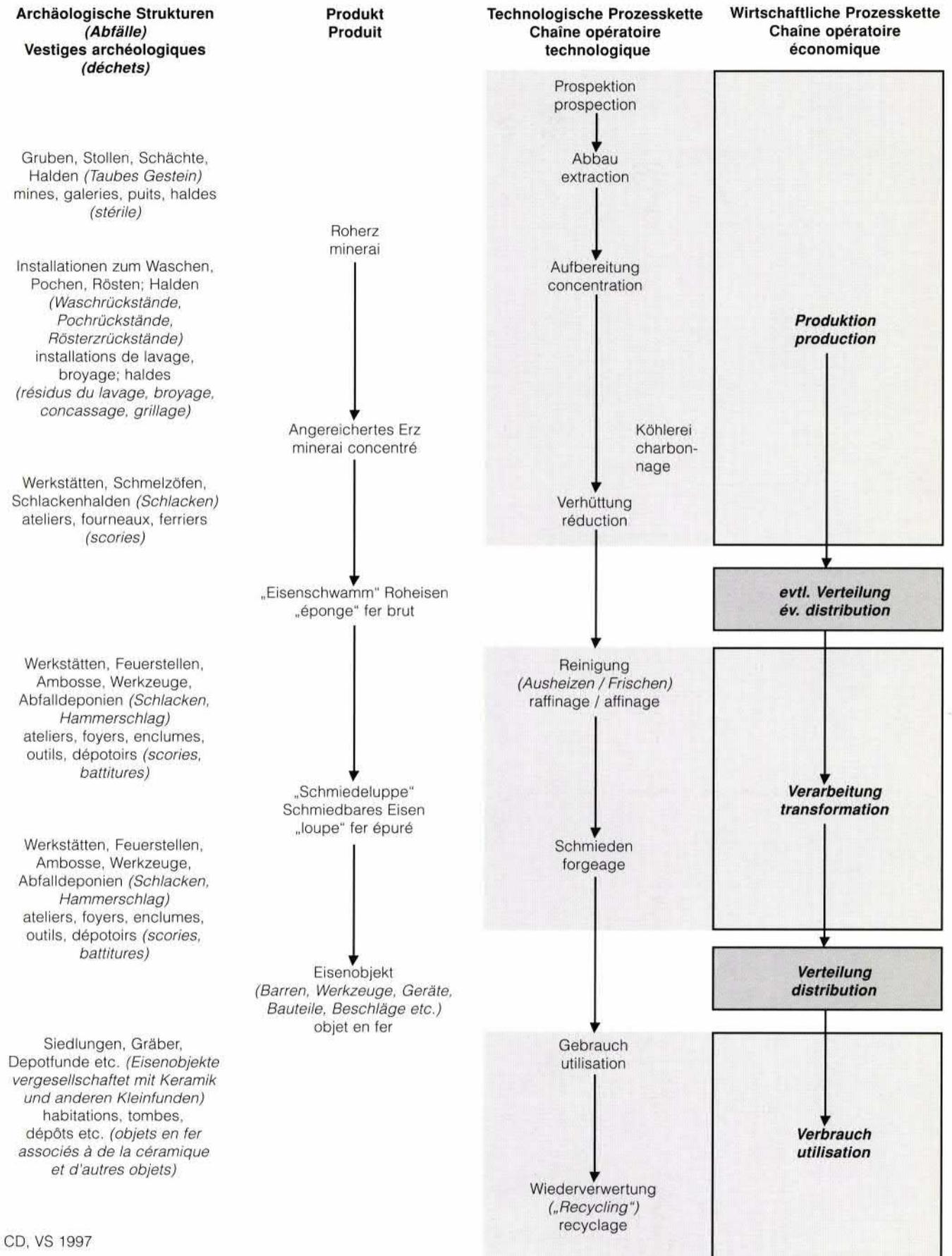


Abb. 30: Die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen der wirtschaftlichen Prozesskette der Eisenmetallurgie.

Fig. 30: Les encadrements sociaux et économiques de la chaîne opératoire économique de la métallurgie du fer.



CD, VS 1997

Abb. 31: Die Entsprechung von archäologischen Befunden, technologischer Prozesskette und wirtschaftlichen Vorgängen.

Fig. 31: La correspondance entre structures archéologiques, chaîne opératoire technologique et activités économiques.