



KUML

1963

KUML

ÅRBOG FOR JYSK ARKÆOLOGISK SELSKAB

1963

With Summaries in English

UNIVERSITETSFORLAGET I ÅRHUS

1964

Omslag:
MOESGÅRD
F. RICHARDT del.

Redaktion:
OLE KLINDT-JENSEN OG POUL KJÆRUM

Copyright 1964
by
Jysk Arkæologisk Selskab

Printed in Denmark
by
Aarhus Stiftsbogtrykkerie A/S

INDHOLD

Moesgård	7
<i>Ebbe Lomborg</i> : Gravfund fra Stubberup, Lolland	14
Menneskeofringer og kannibalisme i bronzealderen.	
<i>Oscar Marseen</i> : Lundegårde-gravpladsen fra yngre jernalder	33
<i>Erik Moltke</i> : Runeindskriften på rosetfibulen fra Nøvling	37
<i>Palle Friis</i> : Jernaldergrave ved Gjurup med teltformede dødehuse	42
<i>Robert Thomsen</i> : Forsøg på rekonstruktion af en fortidig jernudvindings- proces	60
<i>Ole Klindt-Jensen</i> og <i>Hellmuth Andersen</i> : Det ældste Århus	75
<i>Margrethe Hald</i> : Vævning over gruber	88
<i>Klaus Ferdinand</i> : Nomadisme	108
Jysk Arkæologisk Selskab	148

CONTENTS

Moesgård	13
<i>Ebbe Lomborg</i> : A grave from Stubberup on Lolland—Human sacrifice and cannibalism in the Bronze Age	29
<i>Oscar Marseen</i> : The Lundegårde cemetery from the Late Roman Iron Age..	36
<i>Erik Moltke</i> : The runic inscription on the rosette fibula from Nøvling	40
<i>Palle Friis</i> : Iron Age graves at Gjurup with tent-shaped grave-houses	57
<i>Robert Thomsen</i> : Trial reconstruction of an early process of iron extraction	70
<i>Ole Klindt-Jensen</i> og <i>Hellmuth Andersen</i> : Oldest Århus	85
<i>Margrethe Hald</i> : Pits, looms and loompits	104
<i>Klaus Ferdinand</i> : Nomads	140

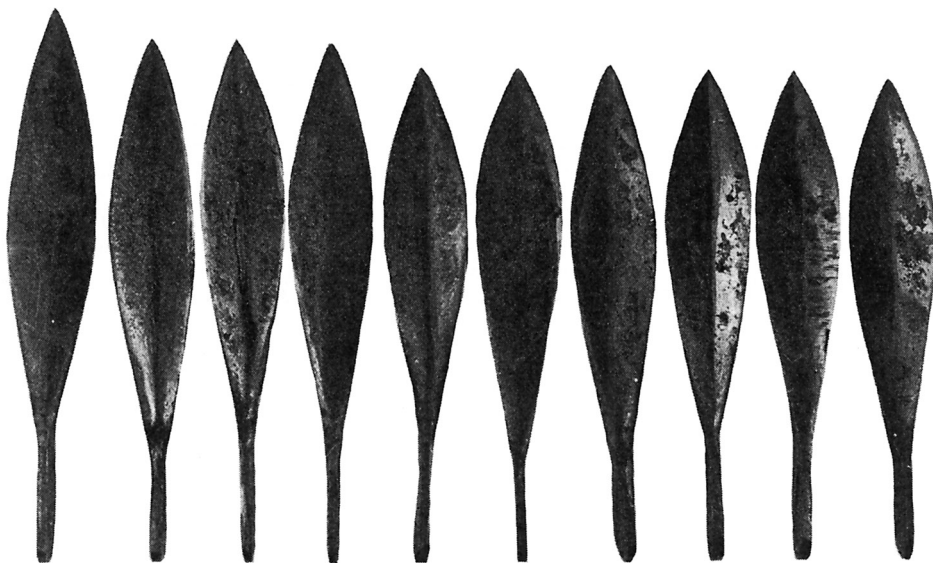


Fig. 1. En del af de pilespidser, der blev smedet af jernet fra den første forsøgsovn.
A number of the arrowheads, forged from the iron from the first experimental furnace.

FORSØG PÅ REKONSTRUKTION AF EN FORTIDIG JERNUDVINDINGSPROCES

AF ROBERT THOMSEN

Iron seemth a simple metal,
but in its nature are many mysteries,
and men who bend to them their minds
shall in arriving days gather therefrom great profit
not to themselves alone, but to all mankind.

(Joseph Glanwill - 1650).

I KUML 1962 er der forelagt resultater af nogle nye undersøgelser af forhistoriske jernudvindingsanlæg¹), som har givet mulighed for fremsættelse af et nyt forslag til rekonstruktion af de anlæg, der har været brugt til jernudvinding i Jylland i århundrederne efter Kristi fødsel. Desværre har ikke alle detaljer i den foreslåede rekonstruktion kunnet dokumenteres gennem udgravningerne. Dette gælder således skaktens (overbygningen) højde samt detaljer i udformningen af forbindelsen mellem skakten og slaggegruben.

Alle de hidtil undersøgte anlæg har været mere eller mindre ændrede af selve jernudvindingsprocessen, og vi savner derfor også oplysninger om anlæggenes udseende ved processens begyndelse. Kun meget heldige fund vil være i stand til at give os disse oplysninger, men det skulle være muligt at få en vis viden om

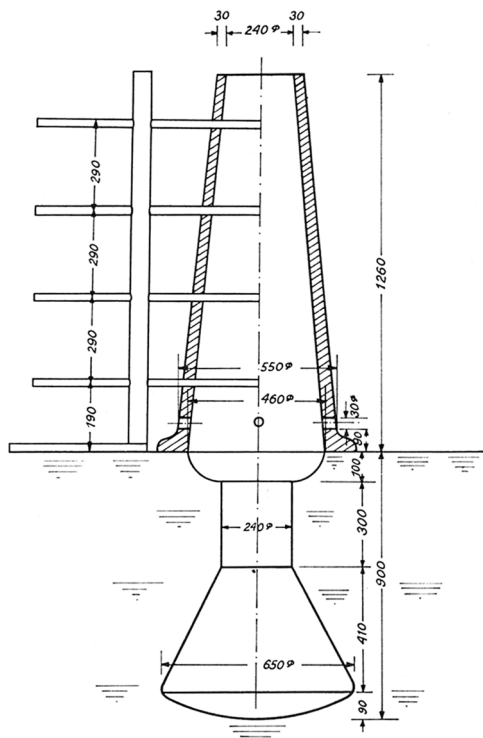


Fig. 2. Termoelementernes placering.
The placing of the thermocouples.

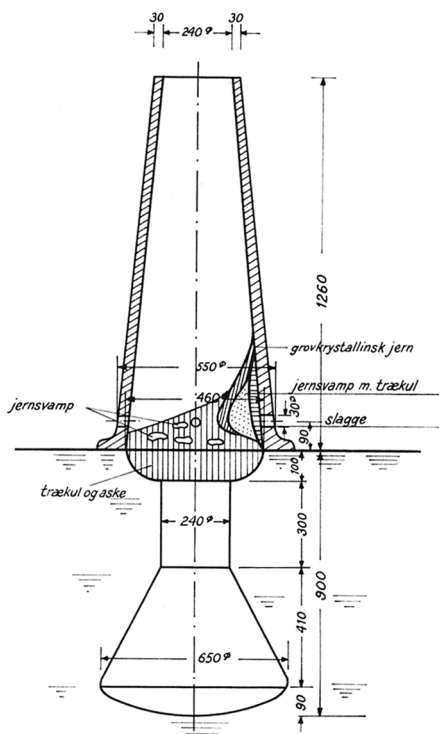


Fig. 3. Jernets og slaggens placering i ovnen.
The position of the iron and the slag in the furnace.

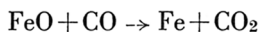
disse forhold, hvis det kunne lykkes at efterligne jernudvindingsprocessen i en rekonstrueret ovn. Størst betydning ville vellykkede forsøg dog kunne få ved at give et sikkert grundlag for produktions- og forbrugsberegninger.

Jernudvindingsforsøg blev påbegyndt i efteråret 1963 i Drengsted af Institutet for forhistorisk arkæologi og etnografi ved Aarhus Universitet og senere videreført på A/S Varde Staalværk. I det følgende skal gives en redegørelse for forsøgene sidstnævnte sted.

Overvejelser før forsøgets start.

At omdanne jernmalm til jern er en ganske let opgave. Der kræves blot en passende temperatur og et passende reduktionsmiddel, d. v. s. et stof, der er i stand til at fjerne den oxygen (ilt), der er kemisk forbundet til malmens jern. Et sådant reduktionsmiddel er luftarten kuloxid (kulilte).

Den kemiske proces ved jernmalms reduktion kan i forenklet form skrives:



Processen begynder at forløbe ved ca. 650° C og foregår hurtigere ved højere temperaturer. Nu er det så heldigt, at man ved forbrænding af trækul kan opnå

høje temperaturer samtidig med, at man i røgen får et passende indhold af kuloxid. Der vil også være kvælstof, kuldioxid (kultveilde) og muligvis oxygen i røgen. Kvælstoffet deltager ikke i den kemiske proces. Kuldioxid og oxygen virker skadeligt på processen, idet disse luftarter ikke kan fjerne oxygen fra malmen, men tværtimod kan forbrænde allerede dannet jern.

Den mængde kuloxid, man vil få dannet ved forbrændingen, afhænger blandt andet af lufthastigheden gennem ovnen, kullagets højde samt kulstykkernes størrelse.

Man kan regne med en god reduktion, såfremt der er fire gange så meget kuloxid som kuldioxid i røgen, og hele processens forløb afhænger af, om man er i stand til at kontrollere og regulere gassens sammensætning. Vi har kontrolleret røggassen ved at foretage gasanalyser, men der er næppe tvivl om, at man med nogen erfaring kan danne sig et skøn over dens sammensætning ved at betragte flammen fra ovnens top.

Man kunne godt stille sig tilfreds med at udføre denne første og vigtigste del af processen. De klumper af slaggeholdigt svampet jern, der er resultatet af reduktionsprocessen, lader sig smede med forsigtighed. Herved bankes en del af urenhederne ud af jernet, og de små jernstykker kan herefter smedes sammen (esse-svejses) til større stykker.

Anden del af processen består i, at de små jernstykker kitter sig sammen, og at slaggen smeltes fra.

For at slaggen skal kunne skilles fra jernet, må den være smeltet og letflydende. Forsøg med jernalderslagge fra Drengsted²⁾ viser, at slaggen først bliver tilstrækkelig letflydende ved 1200–1300° C. I reducerende atmosfære, hvilket vil sige en atmosfære, der indeholder tilstrækkeligt kuloxid, er slaggen letflydende ved 1100–1200° C.

Da jernets vægtfylde er næsten dobbelt så stor som slaggens, måtte man vente, at jernet sank til bunds og lagde sig under slaggeklumpen. Der findes imidlertid ikke jern under de slaggeklumper, man har udgravet¹⁾, jernet må have sat sig fast et eller andet sted i ovnen, og slaggen er dryppet fra på samme måde, som vand vil dryppe fra en svamp ophængt i en snor.

Disse foreløbige overvejelser kan resumeres i, at følgende forsøgsbetingelser må tilfredsstilles:

I ovnens øvre del må der være en temperatur på mere end 650° C og et kuloxidindhold, der er fire gange så højt som kuldioxidindholdet.

I ovnens nedre del skal temperaturen være 1100–1200° C. Også her må man stile efter det højst mulige indhold af kuloxid; ikke alene fordi slaggen er mere letflydende i reducerende atmosfære, men også på grund af risikoen for at forbrænde allerede dannet jern, hvis kuloxidindholdet bliver for lavt.

Forsøgenes gennemførelse.

Der blev i efteråret 1963 udført tre forsøg, hvert med to ovne af nøjagtig samme konstruktion som de ovne, der blev anvendt ved forsøgene i Drengsted³⁾. Den ene ovn var forsynet med fire termoelementer til temperaturmåling samt fire udtag for gasanalyser. Den anden ovn var uden instrumenter, men blev behandlet nøjagtig som den første. Fig. 2 viser termoelementernes placering. Prøver af røg-

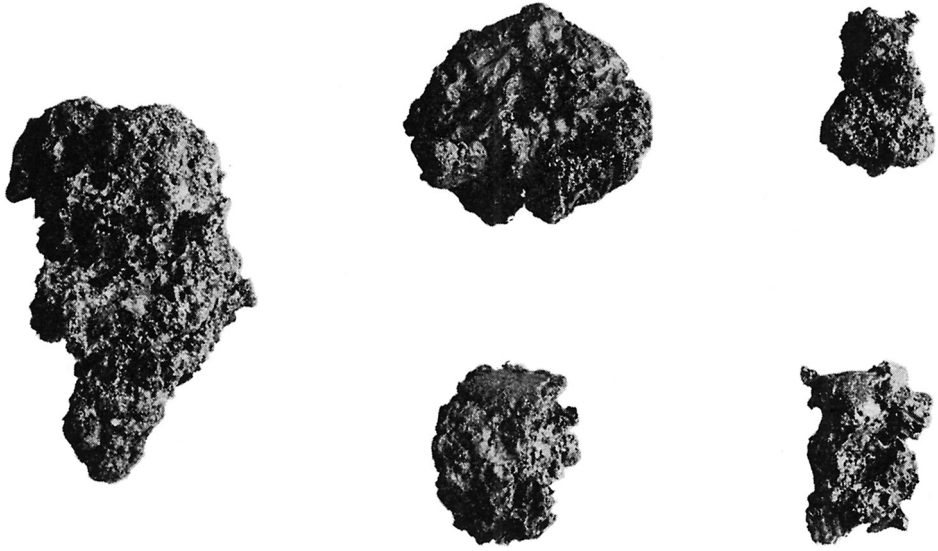


Fig. 4. Klumper af jernsvamp.
Lumps of sponge iron.



Fig. 5. Jern, der sad fastsmeltet på ovnvæggen.
The iron which was smelted fast to the furnace wall.

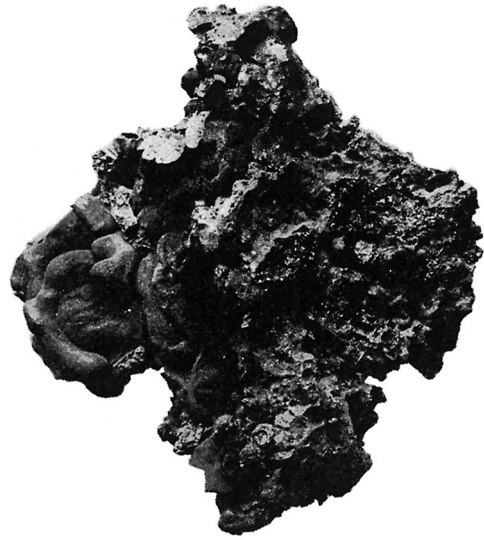


Fig. 6. Slaggeklump.
Lump of slag.

gassen blev udtaget ved siden af de fire målesteder for temperaturer. Gasanalysen er meget let at udføre. Man afmåler 100 cm³ røggas i en pipette. Derefter leder man gassen gennem en vædske, der kan absorbere kuldioxid. Gassen, der nu er befriet for kuldioxiden, føres tilbage og måles. Er der 97 cm³ gas tilbage, har der været 3 % kuldioxid. Disse 97 cm³ gas ledes derefter igennem andre opløsninger, der kan absorbere oxygen og kuloxid, og indholdet af disse luftarter bestemmes på samme måde som kuldioxiden.

I første forsøgsrække anvendtes trækul af fyr. Den højeste målte temperatur var ca. 1000° C. I det andet forsøg søgtes temperaturen hævet ved anvendelse af løvkul. Der målt op til 1160° C.

I det tredje forsøg blev der ligeledes anvendt løvkul. Temperaturen hævedes yderligere ved en forøgelse af lufttilførslen. Lufttilførslen reguleres lettest ved ændring af ovnsens fyldningsgrad. I det sidste forsøg blev den øverste trediedel af ovnen holdt fri for trækul og malm. Herved blev luftmodstanden mindre og denne frie del af ovnen virkede som skorsten. Der målt op til 1330° C; men denne temperatur blev opnået på bekostning af kuloxidindholdet i røggassen. Det viste sig da også, at en væsentlig del af jernet var forbrændt.

Eftersom de ændringer, der blev foretaget med henblik på at hæve temperaturen ved forsøg nr. 2 og nr. 3, ikke resulterede i et væsentligt ændret resultat, vil det være tilstrækkeligt at beskrive forsøg nr. 1.

Der blev fyret med trækul indtil temperaturen i løbet af 24 timer var nået op på 860° C i ovnsens nederste halvdel. Der blev herefter tilsat malm og trækul i forholdet 1/2 kg malm til 1 kg trækul. Malmen var i forvejen glødet for at få fjernet vand og organiske bestanddele. Den indeholdt 21 % vand og 13 % organiske bestanddele. Den glødede malm indeholdt 50 % jern, 22 % SiO₂ (sand), 0,5 % mangan og 1,3 % fosfor.

3 1/2 time efter den første malmtilsætning var temperaturen nået over 1000° C. Slaggen begyndte at løbe ud af lufthullerne. Røggassens sammensætning var tilfredsstillende med 7–9 gange så meget kuloxid som kuldioxid. Efter 8 timers forløb var der tilført hver ovn 20 kg myremalm. Forholdet mellem malm og trækul i indsætningen blev ændret til 1 kg malm til 1 kg trækul.

Forsøget blev afsluttet 15 timer efter, at den første malm var tilsat. På dette tidspunkt var det ikke længere muligt at holde lufthullerne fri for slagge. Der var da i alt tilført hver ovn 50 kg malm.

Ved nedbrydningen af ovnene fandtes i bunden et lag aske og uforbrændt trækul. Herimellem var der en del jernsvamp-klumper af samme form og størrelse som myremalmen. Man kan gå ud fra, at de stammer fra den sidst tilsatte malm. Disse malmstykker er blevet reduceret i den øverste del af ovnen; men temperaturen i den nedre del har været for lav til, at klumperne kunne svejses sammen.

Halmproppen⁴), der skulle dække slaggegruben i forsøgets begyndelse, var næsten ubeskadiget til trods for den høje temperatur, og der var altså ingen slagge i slaggegruben. Derimod var der over slaggegruben en knytnevæstor slaggeklump med samme overflade- og brududseende som jernalderslaggerne. Den sad indvendig på ovnvæggen tæt ved lufthullerne. Tæt ved denne klump fandtes fastsmeltet på ovnsens underside en klump, der ind mod ovnvæggen bestod af slagge, derefter fulgte et lag jernsvamp iblandet trækul. Klumpens overflade ind mod ovnmidten

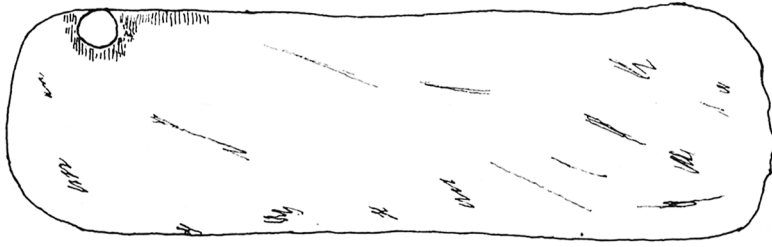


Fig. 7. Snitflade gennem jernbarre fra Hedeby. Forstørret ca. 5 gange.
Cross-section surface through iron bar from Hedeby. Enlarged about 5 times.

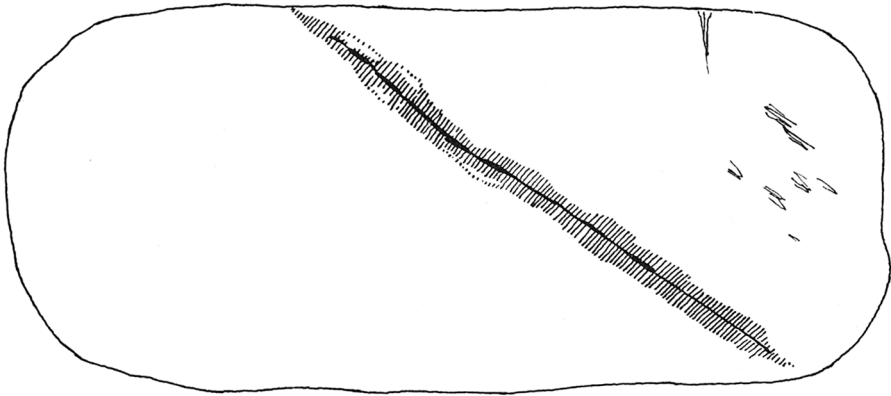


Fig. 9. Snitflade gennem jernbarre fra Hedeby. Forstørret ca. 5 gange.
Cross-section surface through iron bar from Hedeby. Enlarged about 5 times.

bestod af kompakt, grovkrystallinsk jern. Mængden af jern kan skønsmæssigt anslås til 1,5–2 kg for hver ovn. Fig. 3 viser jernets placering i ovnen. Fig. 4, 5 og 6 er henholdsvis løse klumper af jernsvamp, den jernklump, der sad fast på ovnvæggen, og slaggeklumpen.

Alle tre former for jern, enkeltstykker af jernsvamp, større sammenkittede jernsvampklumper og grovkrystallinsk jern, lader sig smede. I begyndelsen må man holde en meget høj temperatur under smedningen, indtil en væsentlig del af slaggen er banket ud. Hvis man hamrer på det gul- eller rødvarme jern, revner det. Når det først har været smedet nogle gange, kan man behandle det som almindeligt jern, og det er endog lettere at smede end moderne handelsjern.

Jern med et lavt kulstofindhold er meget blødt og egner sig kun til fremstilling af søm og mindre vigtige redskaber. At man også i jernalderen har forstået at fremstille hårdt stål, hvilket vil sige jern med et relativt højt kulstofindhold, ser man af de kemiske analyser, der er foretaget på blandt andet våbenfund. Som eksempel kan angives, at tre sværd fundet ved Nydam indeholdt henholdsvis 0,52 %, 0,42 % og 0,52 % kulstof⁵).

Disse høje kulstofindhold kan næppe være opnået i en ovn af den her omtalte type, men er snarere fremkaldt under den påfølgende udsmedning. Her kan man til gengæld forestille sig flere forskellige fremgangsmåder. For at studere

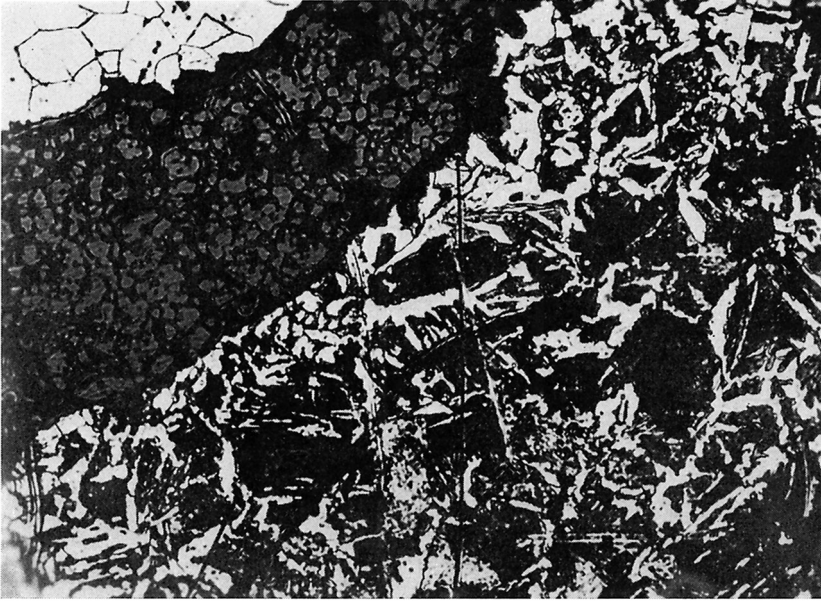


Fig. 8. Mikrofotografi af hård stålperle i jernbarre fra Hedeby. Forstørret 200 gange.
Microphotograph of the hard-steel fragment in the Hedeby iron bar. Enlarged 200 times.

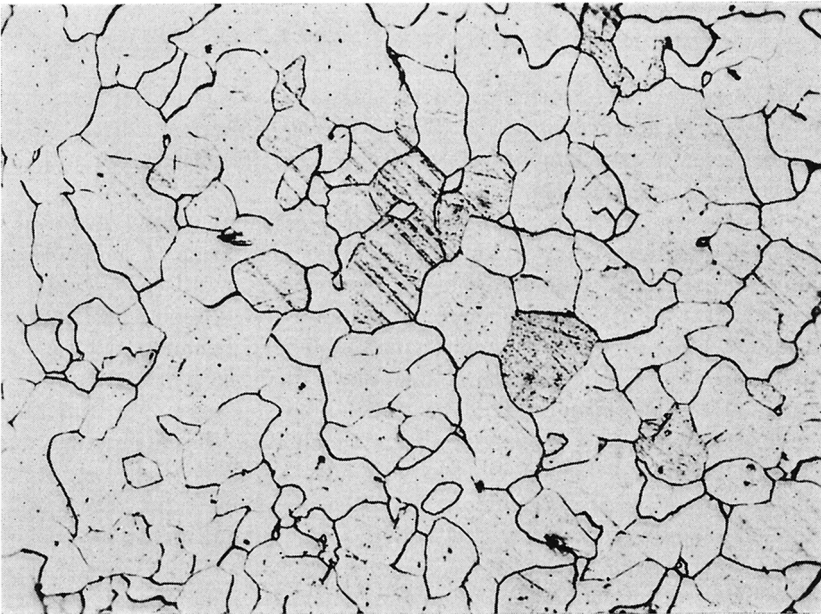


Fig. 10. Zone med kulstoffrit jern fra Hedeby.
Zone with carbon-free iron from Hedeby.

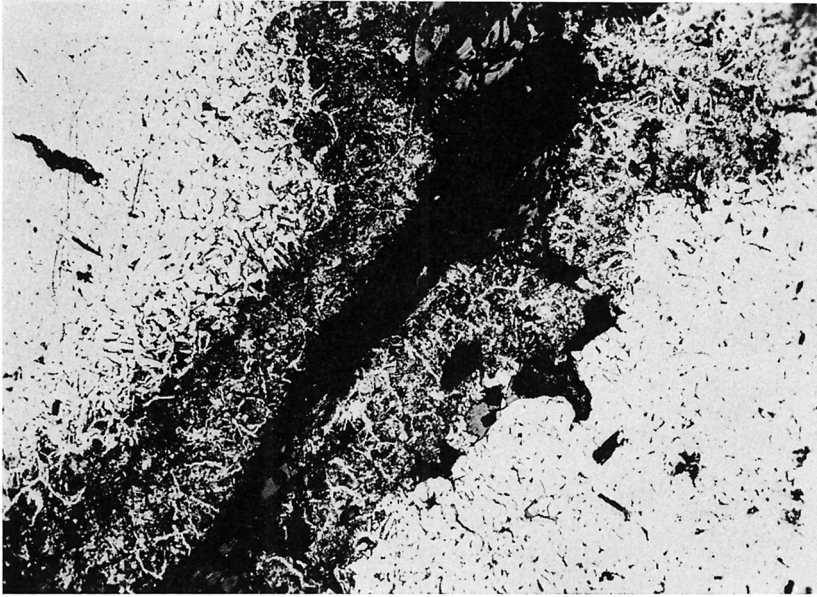


Fig. 11. Mikrobillede af revnen på fig. 9. Forstørret 60 gange.
Microphotograph of the crack on Fig. 9. Enlarged 60 times.



Fig. 12. Som fig. 11. Forstørret 200 gange.
As Fig. 11. Enlarged 200 times.

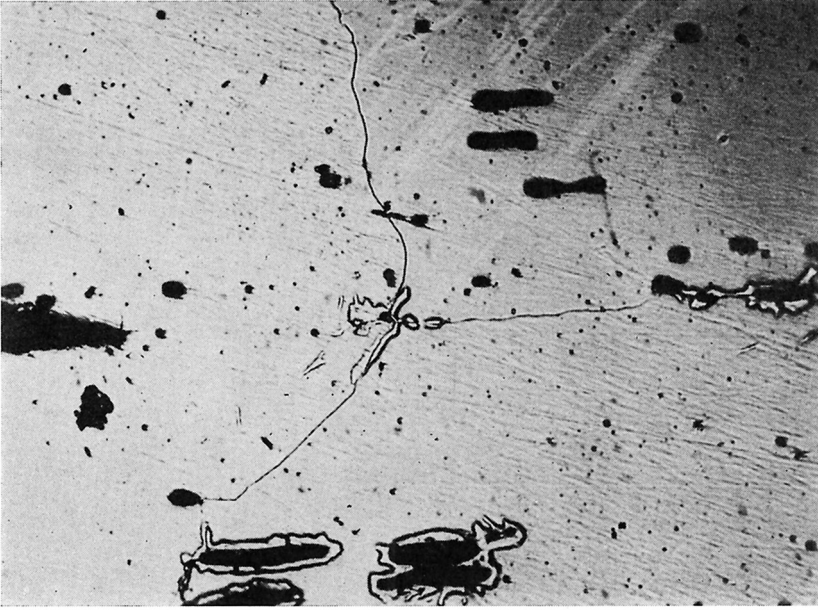


Fig. 13. Kulstoffrit jern. Varde Staalværk.
Carbon-free iron. Varde Steelworks.

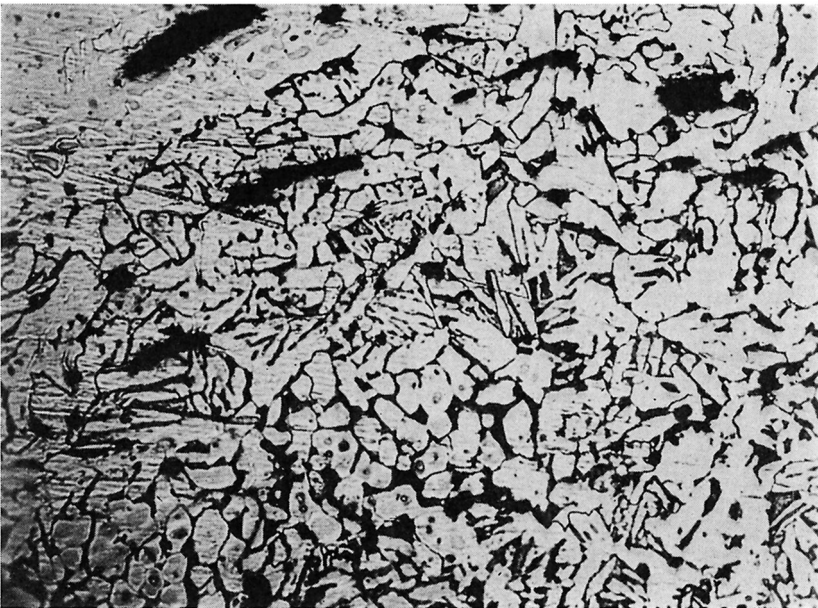


Fig. 14. Parti opkullet ved svejseforsøg.
A portion carburised in a forging attempt.

disse metoder nøjere, vil det være nødvendigt at foretage metallografiske undersøgelser af jerngenstandens hele tværsnit, og dette kræver, at genstanden saves igennem. Vanskelighederne ved en sådan undersøgelse ligger i, at museerne ikke vil synes om at få deres jernalderfund savet igennem.

Vi har været så heldige at komme i besiddelse af to stykker fortidsjern, hvis mikrostruktur giver meget interessante oplysninger om opkulingsprocessen.

Stykkerne stammer fra et parti på ca. 20 jernbarrer, der blev fundet ved Hedeby i februar 1964. Jernstykkerne blev tilsendt os af Dr. H. Hingst fra Landesamt für Vor- und Frühgeschichte von Schleswig-Holstein for at vi ved kemisk og mikroskopisk undersøgelse kunne konstatere, om der var tale om forhistorisk jern, hvilket undersøgelserne bekræftede. Kulstofindholdet i de to prøver var 0,15 % og 0,19 %; men størstedelen af tværsnittet bestod af helt kulstofrit jern med en struktur og en slaggetype, der ganske svarer til det jern, vi har fremstillet i vore forsøgsovne. På overfladen af det ene stykke fandtes områder af hårdt stål, medens det indre bestod udelukkende af kulstoffrit blødt jern. På den polerede og ætsede snitflade ser man tydeligt en ca. 2 mm stor partikel af hårdt stål (fig 7). Mikrobilledet (fig. 8) viser samme partikel i 200 gange forstørrelse. I øverste venstre hjørne ses et hvidt område af rent jern, dernæst et slaggeagtigt lag, der sikkert er glødeskal og endelig partiklen af hårdt stål.

Man må forestille sig, at opkulingsprocessen er foretaget på den måde, at en stang af blødt jern er opvarmet til svejsevarme sammen med partikler af hårdt stål. Derefter er disse partikler smedet fast på overfladen. På nuværende tidspunkt, er det ikke muligt at give en mere indgående beskrivelse af processen, ligesom man kun kan gætte på, hvorfra de hårde stålpartikler stammer.

Det andet stykke har sit kulstofindhold i en stribe tværs over snitfladen. Fig. 9-12. Midt i denne stribe er der en tynd revne. Dette jernstykke må være fremstillet ved sammensvejsning af to stykker.

Her vil det være på sin plads at beskrive essesvejsningen, der nu er afløst af forskellige former for smeltesvejsning, men som har været anvendt i stor udstrækning for blot 25 år siden. To stykker jern, der skal svejses sammen varmes i essen til ca. 1100° C. Temperaturen bedømmes dels ved jernets farve, dels ved at der begynder at vise sig små gnister som fra en stjerneaster. De to stykker hamres derefter sammen på ambolten med små hurtige slag. En korrekt udført essesvejsning står i kvalitet ikke tilbage for moderne svejsemetoder.

Før stykkerne svejses sammen må man fjerne glødeskallen. Det har man i vore dage gjort ved at kaste lerblandet sand ind på svejsegodset. Sandet danner sammen med glødeskallen en letflydende slagge, der falder af, når de to jernstykker slås mod ambolten. Man vil kunne forhindre glødeskalsdannelsen ved at anbringe et lag trækul mellem jernstykkerne, og det er sandsynligvis det, jernaldersmeden har villet opnå. I tilgift har han fået sit jern omdannet til stål og har konstateret, at man ved sammensvejsning af to stykker jern får et hårdt materiale. Vi har forsøgt at rekonstruere denne metode ved at essesvejsning af to stykker af det jern, vi udvandt fra vore første »jernalderovne«, med et lag trækul imellem. Metoden er let at gennemføre. Det kulstofindhold, vi opnåede (fig. 14), var lavere end Hedebyjernets; men man vil kunne opnå højere kulstofindhold ved at anbringe et tykkere lag trækul mellem jernstykkerne.

Der blev smedet 15–16 pilespidser af materialet fra det første forsøg. De er nøjagtige kopier af pilespidser fra det tredje århundrede fundet ved Ejsbøl.

Jernets kemiske sammensætning afviger fra moderne stål ved sin totale mangel på kulstof (fig. 13) samt ved et fosforindhold, der er 25 gange så højt. Dets sammensætning minder derimod meget om jernalderjernets.

	Fremstillet på V. S.	Fundet ved Jevenstedt ⁵⁾	Moderne stål
C	mindre end 0,01 %	0,02 %	0,15 %
Si	0,76 %	0,045 %	0,3 %
Mn	0,04 %	0,07 %	0,7 %
P	0,67 %	0,81 %	0,03 %
S	0,03 %	0,05 %	0,03 %

Her må tilføjes, at det relativt høje Si-indhold i vort jern stammer fra slaggeindeslutninger.

Det er ikke lykkedes at frembringe slaggeklumper af udseende som dem, man finder ved udgravningerne. Da en sådan slaggeklump jo vil være det sikreste tegn på, at den ovenfor beskrevne metode er den, der har været anvendt i jernalderen, vil der blive udført endnu en række forsøg.

Trial reconstruction of an early process of iron extraction

In KUML 1962 were presented the results of certain new investigations of prehistoric iron extraction plants⁴⁾ which have made it possible to put forward a new basis for reconstruction of the plants which were used for iron smelting in the first centuries A. D. It has unfortunately not been possible to demonstrate by excavation every detail in the proposed reconstruction, as, for example the height of the shaft and details in the construction of the connection between the shaft and the slagpit.

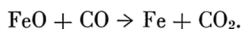
All the remains of furnaces hitherto investigated have been more or less altered by the actual process of the smelting, and we are therefore without evidence of the appearance of the furnace at the start of the process. Only a fortunate combination of circumstances could allow us to discover such evidence, but it should be possible to gain a degree of knowledge if the smelting process could be successfully imitated in a reconstructed furnace. The chief importance of such successful experiments would, however, be to provide a reliable basis for calculations of production and consumption.

Experiments in smelting were begun at Drengsted in the autumn of 1963 by the Aarhus University Institute of Prehistoric Archeology and Ethnography and were later carried further at the Varde Steelworks Limited. The following is an account of the experiments at the latter place.

Considerations before the start of the experiments

To convert iron ore into iron is a very easy task. All that is needed is a suitable temperature and a suitable reducing agent, that is, a substance which is able to remove the oxygen which is in chemical combination with the iron of the ore. One of these reducing agents is the gas carbon monoxide.

The chemical process in the reduction of iron ore may in simplified form be written



The reaction begins to take place at about 650° C, and speeds up at higher temperatures.

Now, as luck will have it, burning charcoal produces high temperatures at the same time as the smoke from the charcoal has a suitable carbon monoxide content. There will also be nitrogen, carbon dioxide and perhaps oxygen in the smoke. Nitrogen takes no part in the chemical reaction, but carbon dioxide and oxygen hinder the process, as these gases cannot remove oxygen from the ore, but on the contrary can oxidize already smelted iron.

The quantity of carbon monoxide which will be produced in the course of combustion depends on many factors, including the speed of the draught through the furnace, the height of the charcoal layer and the size of the pieces of charcoal.

A good reduction may be expected if there is four times as much carbon monoxide as carbon dioxide in the smoke, and the whole course of the smelting depends upon whether it is possible to check and to regulate the mixture of gases. We have checked the composition of the smoke gas by taking analyses, but there is little doubt that with some experience it would be possible to estimate its composition by watching the flame at the top of the furnace.

One might very well feel content with having carried out this first and most important part of the process. The lumps of slaggy spongy iron which are the result of the reduction process can with care be forged. In the process a lot of the impurities are hammered out of the iron, and the resultant small pieces of iron can thereafter be forged together into larger pieces.

The second part of the process consists of the small pieces of iron sintering together and of the slag being melted out.

For the slag to separate out from the iron it must be melted to a liquid state. Experiments with the Iron-Age slag from Drenghsted²) show that the slag first became sufficiently liquid at 1200–1300° C. In a reducing atmosphere, i. e. an atmosphere containing sufficient carbon monoxide, the slag becomes liquid at 1100–1200° C.

As the specific gravity of iron is almost double that of the slag it could be expected that the iron sank to the bottom and collected below the lump of slag. No iron, however, was found under the lumps of slag which have been excavated¹), and the iron must have collected somewhere else in the furnace, the slag then dripping from it, just as water will drip from a sponge hung up on a string.

These preliminary considerations can be summarized into the following experimental conditions.

In the upper part of the furnace there must be a temperature of above 650° C and an atmosphere containing four times as much carbon monoxide as carbon dioxide.

In the lower part of the furnace the temperature must be 1100–1200° C. Here too the highest possible carbon monoxide content must be aimed at; not only because the slag is more liquid in a reducing atmosphere, but also on account of the risk of oxidizing iron already formed if the carbon monoxide content is too low.

The conduct of the experiments

In the autumn of 1963 three experiments were carried out, each with two furnaces of exactly the same construction as those used in the experiments in Drenghsted³). The one furnace was equipped with four thermocouples for measurement of temperature, and with four vents for gas sampling for analysis. The other furnace had no instruments but was treated exactly the same as the first. Fig. 2 shows the placing of the thermocouples. Samples of the smoke gas were drawn off besides the four measuring points for temperature. Analysis of the gas is very easy to carry out. 100 cu.cms. of the smoke gas is measured off in a pipette. The gas is then passed through a liquid which can absorb carbon dioxide. The gas, now free of carbon dioxide, is led back and measured. If 97 cu.cms. of the gas remains, then there has been 3% carbon dioxide. These 97 cu.cms. of gas are thereafter passed through other solutions which can absorb respectively oxygen and carbon monoxide, and the percentage content of these gases is determined in the same way as with the carbon dioxide.

In the first series of experiments charcoal of pinewood was used, and the highest temperature measured was about 1000° C. In the second experiment an attempt was made to raise the temperature by using charcoal of hardwood, and temperatures up to 1160° C were measured.

In the third experiment hardwood charcoal was also used, and the temperature was further raised by increasing the draught. The draught is most easily regulated by a change in the

degree of filling the furnace. In the last experiment the upper third of the furnace was kept free of charcoal and ore. As a result of this the air resistance was less, and the empty portion of the furnace acted as a chimney. Temperatures up to 1330° C were measured; but this temperature was reached at the expense of the carbon monoxide content of the smoke gas. And the final result showed that a considerable part of the iron was in fact burnt away.

As only minor alterations were made in the carrying out of the last two experiments it will be sufficient to describe the first of these.

The furnace was stoked with charcoal until, in the course of 24 hours, the temperature had reached 860° C in the lower half of the furnace. Ore and charcoal were then added in the proportion of ½ kilo ore to 1 kilo charcoal. The ore had been heated red-hot first in order to remove water and organic impurities, which had comprised 21 % water and 13 % organic matter. After heating the ore contained 50 % iron, 22 % SiO₂ (sand), 0.5 % manganese and 1.3 % phosphorus.

3½ hours after the first charge of ore the temperature had risen over 1000° C, and the slag began to run out of the air holes. The composition of the smoke gases was satisfactory, with 7-9 times as much carbon monoxide as carbon dioxide. After 8 hours each furnace had been charged with a total of 20 kilograms bog ore. The proportion of ore to charcoal in the charge was changed to 1 kilo ore to 1 kilo charcoal.

The experiment was terminated 15 hours after the first ore was inserted, at which time it was no longer possible to keep the air holes free of slag. Each furnace had by then been charged with a total of 50 kilos of ore.

On dismantling the furnaces there was found in the bottom a layer of ash and of unconsumed charcoal. Among this there was a number of lumps of sponge-iron of the same shape and size as the bog ore. It can be assumed that they come from the ore last added; they had been reduced in the upper part of the furnace, but the temperature in the lower part has not been high enough to cause the lumps to sinter together.

The straw plug⁴), which was to block the hole to the slag pit at the beginning of the experiment, was almost undamaged despite the high temperature, and there was accordingly no slag in the slag pit. On the other hand, just above the slag pit there was a lump of slag, as large as a clenched fist, with the same surface and cleavage appearance as the Iron-Age slags. It was found on the inner surface of the furnace wall close to the air holes. Close to this lump, smelted fast to the underside of the furnace, there was another lump consisting, closest to the furnace wall, of slag, followed by a layer of sponge-iron mixed with charcoal. The surface of the lump closest to the centre of the furnace consisted of compact coarse-crystalline iron. The amount of iron can be roughly estimated as 1.5-2.0 kilograms for each furnace. Fig. 3 shows the position of the iron in the furnace. Figs. 4, 5 and 6 are, respectively, loose lumps of sponge-iron, the lump of iron which was attached to the furnace wall, and the lump of slag.

All three forms of iron, the individual pieces of sponge-iron, the larger fused lumps of sponge-iron, and the coarse-crystalline iron, are capable of being forged. To begin with it is necessary to maintain a very high temperature during the forging, until a considerable proportion of the slag is hammered away. If the iron is hammered while it is only red-hot or at yellow heat it will split. However, after it has been swaged several times it can be treated as normal iron, and is even easier to forge than modern commercial iron.

Iron with a carbon content as low as this is very soft, and is only suitable for the production of nails and less important implements. That even Iron-Age man understood how to produce hard steel, i. e. iron with a relatively high carbon content, can be seen from the chemical analyses made of prehistoric implements, including objects from weapon hoards. As an example can be quoted three swords found at Nydam, which contained respectively 0.52 %, 0.42 % and 0.52 % carbon.

Such high carbon content can hardly have been achieved in a furnace of the type described here, but has more probably been produced in the course of the subsequent swaging. Here, on the other hand, several different methods can be envisaged. To study these methods in greater detail it would be necessary to carry out metallographic examinations of the whole cross-section of the iron object, which requires the object to be sawn across. The snag with such an investigation lies in an unwillingness on the part of museums to have their Iron-Age specimens sawn in two.

We have, however, been fortunate enough to acquire two specimens of prehistoric iron, the microstructure of which gives very interesting information concerning the carburising process.

The specimens are derived from a hoard of about 20 iron bars, which were found at Hedeby in February 1964. The specimens of iron were sent to us by Dr. H. Hingst of the Landesamt für Vor- und Frühgeschichte von Schleswig-Holstein, in order that we might determine by chemical and microscopic examination whether the iron was of prehistoric date, which our investigations confirmed. The carbon content in the two specimens was 0.15 % and 0.19 %; but the greater part of the cross-section consisted of completely carbon-free iron with a structure and a slag-type exactly corresponding to the iron which we had produced in our experimental furnaces. On the surface of one of the specimens areas of hard steel were to be found, while the inner core consisted entirely of soft carbon-free iron. On the polished and etched cross-section surface a particle of hard steel about 2 mms. in size can be clearly seen (Fig. 7). The microphotograph (Fig. 8) shows the same particle enlarged 200 times. In the upper left hand corner a white area can be seen, consisting of pure iron, thereafter a slaglike layer which is certainly an oxide scale, and finally the particle of hard steel.

It is necessary to envisage the carburisation process carried out by heating a bar of soft iron to welding temperature together with the particle of hard steel. These particles are then forge-welded onto the surface of the iron. At the present moment it is impossible to give a more detailed description of the process, while the origin of the particles of hard steel is a matter of pure guesswork.

The carbon content of the other specimen lay in a strip across the section surface (Figs. 9-12). In the centre of this strip there is a thin crack. This piece of iron must have been produced by welding two pieces together.

This would be an appropriate place to describe forge welding, which has now been superseded by various forms of fusion welding, but which was very widely used even up to 25 years ago. Two pieces of iron which are to be welded together are heated in the forge to about 1100° C. The temperature is estimated, partly by the colour of the iron, partly by the fact that it begins at that temperature to throw off small sparks like a "sparkler". The two pieces are then hammered together on the anvil with quick light strokes. A correctly carried out forge welding is in no way inferior in quality to the welding achieved by modern methods.

Before the two pieces are welded together it is necessary to remove the oxide scale. In recent times this was achieved by sprinkling the objects to be welded with sand mixed with clay. The sand combined with the oxide scale to form a liquid slag which falls off when the two pieces of iron are struck against the anvil. It would be possible to prevent the formation of oxide scale by introducing a layer of charcoal between the pieces of iron, and that is probably what the Iron-Age smith wished to achieve by adding carbon. In addition he found that his iron had been converted to steel, and could not fail to note that by welding two pieces of iron together he obtained a harder material. We have tried to reproduce this method by forge-welding two pieces of the iron we won from our first "Iron-Age furnace" with a layer of charcoal between. The method is easy to carry out. The carbon content which we reached (Fig. 14) was smaller than that of the Hedeby iron; but a higher carbon content could have been achieved by introducing a thicker layer of charcoal between the pieces of iron.

15-16 arrowheads were forged from the material from the first experiment. They are exact copies of arrowheads from the Third Century A. D. found at Ejsbøl.

The iron differs in composition from modern steel in its total freedom from carbon (Fig. 13), and in its phosphorus content, which is 25 times as high as in the modern product. On the other hand its composition resembles closely that of Iron-Age iron.

	Produced at Varde Steelworks	Found at Jevanstedt ⁵⁾	Modern steel
C	less than 0.01 %	0.02 %	0.15 %
Si	0.76 %	0.045 %	0.3 %
Mn	0.04 %	0.07 %	0.7 %
P	0.67 %	0.81 %	0.03 %
S	0.03 %	0.05 %	0.03 %

It should be remarked that the relatively high Si content in our iron is accounted for by slag in the mixture.

We were not successful in producing lumps of slag of an appearance similar to those found in the excavations. As the formation of such a lump of slag would be the surest sign that the method described above is the actual method which was in use in the Iron Age, it is our intention to carry out a further series of experiments.

Robert Thomsen,
Varde Staalværk,
Varde.

NOTER

¹) Olfert Voss: Jernudvinding i Danmark i forhistorisk tid. KUML 1962. ²) Fra slaggegrube BV, afl. KUML 1962, p. 10 ff., fig. 4-6. ³) KUML 1962, p. 7. ⁴) Om de påviste spor efter en sådan halmprop, se KUML 1962, p. 14. ⁵) E. Schürmann: Die Reduktion des Eisens im Rennfeuer. Stahl und Eisen 78 (1958) 1299.