

# Zur Metallurgie und Herstellungstechnik von römischen Flachshecheln

Autor(en): **Epprecht, Willfried**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Jahresberichte aus Augst und Kaiseraugst**

Band (Jahr): **1 (1980)**

PDF erstellt am: **16.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-395402>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Zur Metallurgie und Herstellungstechnik von römischen Flachshecheln

von Willfried Epprecht\*

## 1. Einleitung

Im Laufe der Zeit sind mindestens fünf römische, zweiseitige eiserne Kämmen in Augst und weitere in Vindonissa gefunden worden, welche sehr wahrscheinlich als Flachshechel gebraucht worden waren. Ihr Erhaltungszustand ist sehr verschieden. Einer der besterhaltenen wurde von A. Mutz beschrieben, der darauf hinwies, dass die Herstellungstechnik erstaunlich präzise war und noch nicht einwandfrei erklärbar ist<sup>1</sup>. Sehr ähnliche – von den Römern als *ferreus hamus* bezeichnete – Eisenkämmen sind auch in Frankreich und Deutschland gefunden und durch J. L. Soubrier untersucht worden, und zwar sechs ebenfalls zweiseitige und ein einseitiger Kamm mit Griff<sup>2</sup>. W. H. Manning beschrieb ferner vier einseitige und drei zweiseitige eiserne «woolcombs» aus SE-England und erwähnt, dass ihm noch zwei Reste solcher Kämmen bekannt seien<sup>3</sup>. Weitere Exemplare sind nach J. P. Wild in Raetien und Noricum gefunden worden<sup>4</sup>. Alle diese Kämmen weisen 5–8 mm breite Randzinken und 20–52 Normalzinken auf, die bis 170 mm lang sein können. Die zwischen den Zinken liegenden Spalten sind – bei gutem Erhaltungszustand – erstaunlich gerade, von sehr gleichmässiger Breite, und zwar jeweils auf einer Kammseite stets durchwegs gleich breit (0,64–1,5 mm) bei sehr konstantem Abstand. Der Zinkenquerschnitt ist nahezu rechteckig und für alle Normalzinken einer Kammseite gleich, entweder etwa 6 (oder 5) × 1 mm oder 5 × 2 mm. Es gibt Kämmen mit zwei gleichen Seiten, solche mit einer feineren und einer gröberen Seite und einseitige Kämmen mit einem zentralen oder zwei seitlichen breiten «Griffen» gegenüber den Zinken.

Die oben zitierten Publikationen sowie eigene Untersuchungen zeigen, dass zweierlei Arten der Kammherstellung angewandt worden sind. Bei der ersten Art (I) sind die Normal- und Randzinken fest mit dem Mittelblech verbunden und gemäss Röntgen-Durchstrahlungsbild aus einem Blech herausgearbeitet worden. Der auf Abb. 1 sichtbare, von uns untersuchte Kamm besitzt nur solche Zinken. Andererseits gibt es unter den oben genannten Kämmen auch solche mit Normalzinken, die in einen ins Mittelblech 8–10 mm tief eingesägten Schlitz eingefügt und Randzinken, die mittels eines seitlichen Querstückes in eine entsprechend ausgesägte Nut des Mittelbleches eingesetzt worden sind (Herstellungsart II)<sup>2, 3</sup>. Es gibt ferner Kämmen, bei denen die Zinken der einen Seite fest mit dem Mittelblech zusammenhängen (Art I), währenddem die der andern Seite alle (ausser den Randzinken) eingesetzt sind (Art II)<sup>1</sup>. Und schliesslich sind mehrere Kämmen mit grösstenteils fest verbundenen Zinken bekannt, zwischen denen einzelne in Schlitze eingesetzte «Reparatur»-Zinken stehen.

Das Mittelblech besteht stets aus massivem, 5 oder 6 mm dickem Eisenblech, das im Röntgenbild – soweit solche vorliegen – keinerlei Anzeichen eines Lamellenbaues parallel zu den Zinken aufweist. Äusserlich sehen alle Kämmen so aus, als ob sie aus einem massiven Blech gleichmässiger Dicke durch Einsägen der Zinkenzwischenräume hergestellt wor-

\* Institut für Metallforschung, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.

<sup>1</sup> A. Mutz, Römische Eisenwerkzeuge aus Augst. *Provincialia*. Festschr. R. Laur-Belart (1968) 151–169.

<sup>2</sup> J.-L. Soubrier, Découverte d'un peigne en fer à Martizay. *Rev. Arch. Centre* 27, 1968, 195–200.

<sup>3</sup> W. H. Manning, Caistor-by-Norwich and Notitia Dignitatum. *Antiquity* 40, 1966, 60–62. Ders., The Method of manufacture of Romano-British woolcombs. *Antiquity* 46, 1972, 333–335.

<sup>4</sup> J. P. Wild, Textile Manufacture in the northern Roman provinces (1970), 25 f. 123 u. Taf. 1.2.

den wären. In Anbetracht dessen, dass es auch mit heutigen Sägen kaum gelingen wird, von Hand bis zu 53 parallele Schlitzte mit Tiefen von bis zu 170 mm in so hoher Regelmäßigkeit herzustellen, stellt sich die Frage nach der Herstellung nach wie vor. Insbesondere fragt es sich, ob eine Herausarbeitung aus einem Blech nachweisbar ist.

## 2. Aus einem Blech hergestellter Kamm

Wir untersuchten daher auf Anregung von Dr. h.c. A. Mutz, Basel, einen *Kamm der ersten Art* mit nur fest mit dem Mittelblech verbundenen Zinken aus Augst (Inv. 1966.12067), der von der Ausgrabung im Autobahnabschnitt (Fundkomplex 5547, Schnitt H. 121) stammt. Keramik-Mitfunde (Inv. 66.12057-63) erlauben eine Datierung ins 2. Jh. n. Chr.

Der untersuchte Kamm (Abb. 1) muss, wie unten dargelegt wird, tatsächlich aus einem massiven, mindestens 205 mm langen und 102 mm breiten Eisenblech von etwa 6 mm Dicke hergestellt worden sein. Anhand der längsten Zinken kann geschlossen werden, dass die Zinken der einen Hälfte mindestens 90 mm, die andern mindestens 75 mm lang waren. Durch Verrosten – und vermutlich schon durch den Gebrauch – wurden zahlreiche Zinken verkürzt; auch sind einige davon verbogen oder verdreht. Die Dicke des Bleches und damit die Zinkenhöhe ist infolge Korrosion stellenweise stark reduziert. Auf beiden Kammseiten sind je 5 mm breite Randzinken vorhanden; die inneren (je 50) Normalzinken sind alle etwa 1,0 mm dick, so dass ihr Querschnitt im frischen Zustand  $1 \times 6$  mm betrug.

Die zwischen den Zinken liegenden Schlitzte müssen nach Ausweis der am besten erhaltenen Teile sehr gerade und von einer sehr gleichmässigen Breite von etwa 0,8 mm gewesen sein. Sie enden gegen das Mittelstück nicht alle genau gleich tief unten, sondern bilden mit ihren Enden eine leicht gewellte Linie, wie dies auf Abb. 1 deutlich erkennbar ist. Die gegen die Schlitzte stossenden Seitenflächen der Zinken (im folgenden als «Flanken» bezeichnet) sind stellenweise recht glatt, oft jedoch rauh angefressen. Nicht selten sind an den Flanken in der Längsrichtung eine oder mehrere ungefähr parallele, rillenförmige Korrosionsvertiefungen zu sehen, die an beiden Flanken ähnlich liegen, so dass am Zinkenende oft ein lamellenförmiger Bau sichtbar wird. Auf Abb. 2 ist eine solche Flanke sichtbar, die infolge des Lamellenbaues ein ausgefranztes Ende besitzt. Diese Korrosionsphänomene deuten auf eine Schichtung des Gesamtbleches parallel zur Hauptfläche.

Weder von blossem Auge noch bei mikroskopischer Betrachtung sind auf den Flanken Bearbeitungsspuren erkennbar, welche quer zu den beschriebenen Korrosionsriefen verlaufen. Solche Spuren wären zu erwarten, wenn man von Hand tiefe Schlitzte in ein Blech sägte. Es wäre wahrscheinlich, dass derartige Spuren insbesondere im untersten Schlitzteil am deutlichsten sind, da dort die Spuren durch das Sägeblatt und den Gebrauch am wenigsten verwischt worden wären. Leider sind jedoch gegen den Schlitzgrund fast keine Flanken frei sichtbar, da die Schlitzte dort meist mit Rost und anderem fest haftendem Material gefüllt sind.

Der Mittelteil des Kammes erscheint äusserlich als wellig angefressenes, aber massives Blech ohne irgendwelche Herstellungsspuren. Die Zinken setzen am untern Ende der Schlitzte ab, und es ist keinerlei Fortsetzung derselben ins Mittelstück zu erkennen. Eine Röntgen-Durchstrahlungsaufnahme bestätigte die Homogenität dieses Bleches.

Die obige Beschreibung legt den Schluss nahe, dass der vorliegende Kamm aus einem Eisenblech angefertigt worden ist, und zwar durch Einsägen der Schlitzte. Derart präzise, parallele Sägeschnitte müssen aber bei unserer heutigen Kenntnis über den Stand der Werkzeugtechnik der Römer im 2. Jh. in höchstem Masse erstaunen. Sägeblätter, mit denen eine solche Arbeit durchgeführt worden sein könnte, sind unseres Wissens nirgends gefunden worden. Die glatten Flankenflächen ohne jegliche Sägespuren geben ein weiteres

Rätsel auf. Aus diesem Grunde entschlossen wir uns, der Frage nach der Herstellung des Kammes vermittlems einer eingehenden metallkundlichen Untersuchung nachzugehen.

Zunächst wurde in der Eidg. Materialprüfungsanstalt, Dübendorf, eine nasschemische *Analyse* ausgeführt. Sie ergab, dass recht reines Eisen mit folgenden Legierungselementen vorliegt: 0,09% C, 0,14% P, 0,014% Si und 0,02% Mn; Rest, d. h. ca. 99,7% Fe.

Andere Elemente wurden – da nicht zu erwarten – nicht bestimmt. Die geringen Kohlenstoff- und Siliziumgehalte zeigen, dass es sich um ein gut schmiebares, nicht härtbares Eisen handelt. Die von uns bestimmte, relativ geringe Härte ( $HV = 123 \text{ kp/mm}^2$  [Mittelwert], bestimmt als Mikrohärtigkeit mit 200 p Gewicht) bestätigt den chemischen Befund: Es handelt sich um ein hochqualifiziertes *Schmiedeeisen*, das – wie der Name sagt – in genügend heissem Zustand für die Herstellung von handgeschmiedetem Blech gut geeignet ist. Seine Weichheit lässt aber auch spanende Bearbeitung bei Zimmertemperatur gut zu, also z. B. Sägen oder Schleifen. Wegen der hohen Schmelztemperatur (ca.  $1530^\circ\text{C}$ ) von solchem Eisen konnte es in römischer Zeit nicht in Formen gegossen, sondern musste aus den bei der Verhüttung im Rennofen entstehenden Luppen geschmiedet werden. Die in Luppen stets vorhandenen, ursprünglich meist rundlichen Schlackeneinschlüsse wurden mitgeschmiedet und bei der Blechherstellung zu flachlinsigen bis fadenförmigen Gebilden verformt, die ungefähr parallel zur Hauptebene des Bleches in der Eisengrundmasse liegen.

Von unserem Kamm wurde zur *metallographischen Untersuchung* das in Abb. 1 markierte Stück herausgesägt. Das obere Ende der breiten Randzinke wurde zur chemischen Analyse verwendet, vom Rest wurden Schlitze angefertigt, deren Lage aus Abb. 3 hervorgeht. Da durch Sägen das Gefüge des schnittnahen Metalles stark gestört werden kann, wurde eine niedertourige Diamant-Schneidscheibe verwendet, die erfahrungsgemäss nur eine sehr dünne veränderte Schnittzone erzeugt. Die Schnittflächen wurden nach den üblichen metallographischen Methoden geschliffen, mit Diamant poliert und mit Nital zur Sichtbarmachung der Korngrenzen geätzt.

Abb. 4 stellt einen Ausschnitt des Querschliffes 3 durch das Mittelblech dar (vgl. auch Abb. 8). Unten liegt die Oberfläche, die obere, gerade Grenzfläche ist die Kante gegen Schliff 2. Es ist etwas mehr als die halbe Dicke des Bleches durch dieses Bild erfasst. Man erkennt einen schichtigen Aufbau aus einer grobkörnigen (Korngrösse ca. 0,2 bis 1 mm) und einer feinkristallineren Zone (Korndurchmesser  $\frac{1}{10}$ – $\frac{1}{20}$  mm). Die (im Bild hell erscheinenden) Körner bestehen aus Ferrit ( $\alpha$ -Eisen), wobei alle Körner mehr oder weniger isometrische Formen besitzen und durch glatte, leicht gerundete Grenzen ausgezeichnet sind. In der Ferritgrundmasse liegen parallel zur Blechoberfläche längliche Einschlüsse (dunkel) aus Schlacke. Sie bilden bis mehrere Millimeter lange «Perlschnüre» und greifen oft durch mehrere Ferritkörner hindurch. Der gesamte Querschliff 3 zeigt dasselbe Gefüge wie der abgebildete Ausschnitt, was auf Abb. 8 schematisch angedeutet ist. Gegen den seitlichen Blechrand hin verbreitert sich die Feinkornzone und biegt – wie auch die Einschlussreihen – etwas gegen die Blechoberfläche hin um.

Abb. 5 zeigt einen Querschnitt durch die ganze Blechdicke, und zwar ist ein Ausschnitt des Schliffes 1 abgebildet, der in der vierten Normalzinke in der Längsrichtung verläuft. Abb. 4 und 5 stehen somit beide quer zur Haupt-Blechebene, jedoch in einem rechten Winkel zueinander (vgl. Abb. 8). Auch aus Abb. 5 geht eindeutig der Schichtbau (grobkörnig/feinkörnig/grobkörnig/mittelkörnig) hervor. Wiederum sind flachgedrückte Einschlüsse zeilenförmig parallel zur Schichtung und damit zur Blech-Hauptfläche gestellt; die Betrachtung des ganzen Schliffes (Abb. 8) ergab, dass dieser Gefügebau parallel zur Blechoberfläche durch die ganze Zinke hindurchzieht.

Die Schlitze 1 und 3 beweisen, dass der Kamm aus einem *geschmiedeten Blech* angefertigt wurde. Beim Handschmieden entsteht senkrecht zur Schlagrichtung eine schichtige Struktur. Die unterschiedlichen Korngrössen und variablen Einschlusspartikel-Gehalte



der Schichten lassen sich ohne weiteres aus den Inhomogenitäten der Ausgangsluppe ableiten. Parallel zur Blechfläche entsteht beim Handschmieden ein ungerichtetes Gefüge, wie dies durch Abb. 6 bestätigt wird, die einen Ausschnitt des Schliffes 2 zeigt. Die Schlackeneinschlüsse sind rundlich und ungeordnet in die Ferrit-Grundmasse eingelagert. Die Eisenkristalle sehen gleich isometrisch aus wie in den Querschliffen. Dies bedeutet, dass das Blech nach dem Schmieden rekristallisierte, d. h. die beim Schmieden verformten Eisenkristalle wurden anschliessend vermittels Weichglühen durch sich neu bildende, unverformte Kristalle ersetzt. Bei diesem Vorgang blieb die Form der Einschlüsse erhalten, so dass sie als einzige noch die ehemalige Verformungsstruktur abbilden. Eine solche Rekristallisation spielt sich bei Schmiedeeisen vom vorliegenden Typus unterhalb der Rotglut-Temperatur von selbst ab, und zwar auch bei langsamer Abkühlung nach dem Schmieden. Vermutlich hat also der Schmied das Blech nach der Formgebung an der Luft liegen gelassen, bis es kalt war.

Die Beantwortung der Frage nach der *Herstellung der Kammschlitze* kann davon ausgehen, dass das Röntgendurchstrahlungsbild im Mittelteil des Kammes keine Inhomogenitäten und keine Reparaturzinken erkennen lässt. Ferner beweist Abb. 6, dass das Mikrogefüge der drei abgebildeten Zinken störungsfrei in dasjenige des Mittelbleches übergeht. Im Grund der Schlitze sind keinerlei abnormale Inhomogenitäten erkennbar. Die Durchmusterung des ganzen Schliffes 2 (Abb. 8) zeigt, dass sich das Gefüge des Mittelbleches störungsfrei in die Zinken fortsetzt, Zinken und Mittelblech somit aus einem Stück bestehen. Der Schluss liegt daher nahe, dass die Römer die Kammschlitze durch einen «Säge»prozess erzeugt haben.

Aufgrund der geschilderten Mikrostruktur und der chemischen Zusammensetzung des Bleches darf eine Herstellung durch Giessen sicher ausgeschlossen werden. Die Römer kannten zwar z. T. «leicht schmelzbares» Eisen, doch unterscheidet sich dieses in Analyse und Gefügeeigenschaften stark vom vorliegenden Eisen<sup>5</sup>. Zudem ist ein Schichtbau mit gerichtet eingelagerten, flachen Schlackeneinschlüssen durch Giessen niemals herstellbar.

Auch eine Herstellung durch Zusammenschmieden aus vorgefabrizierten Lamellen muss ausgeschlossen werden. Bei einer solchen Technik müssten kurze und lange Lamellen so zusammenschmiedet werden, dass die kurzen im Mittelblech mit den langen (Zinken) alternieren würden. In diesem Falle wären jedoch Schmiedestrukturen *quer* und nicht parallel zur Blechoberfläche auf Schliff 3 erkennbar. Das Mittelblech müsste in den Schliffen 2 und 3 (Abb. 8) zahlreiche Verschweissungsstellen aufweisen, die quer durch den Schliff verlaufen würden, also z. B. auf Abb. 4 von oben nach unten. Im Schliff 2, d. h. parallel zur Blechfläche, müssten vor allem am Schlitzgrund (Abb. 6) von allen Zinkenflanken aus linienartige, parallel zu den Schlitzverläufen verlaufende Gefügediskontinuitäten ins Mittelblech hineingehen, was nirgends der Fall ist. Zudem müssten die – z. B. durch Ausschmieden von Drähten erhaltenen – Lamellen innerlich eine Schichtung aufweisen, welche *parallel* zu den Zinkenflanken steht. Wie anhand der Korrosionsspuren (Abb. 2) und des Längsschliffes durch eine Zinke (Abb. 5) beschrieben wurde, steht die Schichtung jedoch eindeutig *senkrecht* auf den Flanken. Im übrigen zeigen die beiden Schliffe 4 und 5, welche parallel zu Schliff 3 (im Mittelblech) quer durch die Randzinke und drei Normalzinken hindurchlaufen, dass die flachgedrückten Einschlüsse quer durch die Zinken über die Schlitze hinweg laufen, die Schlitze somit aus dem Schmiedebloch herausgearbeitet worden sind (Abb. 7). Die Normalzinke 1 ist schon äusserlich im Bereich der Schliffe 4 und 5 verkrümmt, so dass die Schlackeneinschlussreihen dort sekundär schief gestellt sind, wie dies auf Abb. 8 angedeutet ist; letztere gibt übrigens in schematischer Weise die relative Lage aller Schliffe mit den auf ihnen sichtbaren Gefügeeigenschaften wieder.

<sup>5</sup> G. Becker, Niedrig schmelzende Eisen-Arsen-Legierungen als Hilfsmittel für den Verbund römischer Schwertklingen. Archiv f. d. Eisenhüttenwesen 32, 1961, 661–665.

Das Mikrogefüge beweist somit, dass die Schlitze im Blech durch Herausarbeiten hergestellt worden sind, und zwar kommt nur ein *sägeartiger Prozess* in Frage. Wie dieser im Detail ausgeführt worden ist, kann leider aufgrund des Gefüges nicht beantwortet werden. Wir konnten lediglich noch einige Besonderheiten feststellen, die vielleicht später einmal mithelfen, die Technik der Schlitzherstellung abzuklären:

Erstens konnte die Form des Schlitzendes gegen das Mittelblech zwischen der dritten und vierten Dünnzinke betrachtet werden. Der Schlitzgrund ist beidseitig etwa 45° schief angeschrägt, d. h. es steht im Spaltgrund in der Blechmitte eine dachförmige Erhebung, und zwar so, wie wenn man mit einer schief stehenden Säge einmal von der einen Seite, dann von der andern her eingeschnitten hätte. Es ist indessen nicht ganz auszuschließen, dass solche Abschrägungen durch Korrosionsangriff entstanden sein könnten.

Zweitens wurde mit Hilfe von Röntgenfeinstruktur-Aufnahmen (Beugung von Röntgenstrahlen am Material) nach der Rückstrahltechnik der Kristallzustand der Zinken geprüft. Mit dieser Methode kann man feststellen, ob nach der Rekristallisation (s. o.) eine Bearbeitung erfolgt ist, was das Mikrogefüge oft nicht entscheiden lässt. Ohne auf Details einzugehen, kann das Resultat wie folgt zusammengefasst werden: Gut erhaltene Zinkenflanken sind auf eine Tiefe von mindestens  $\frac{1}{10}$  mm stark innerlich verformt, d. h. kalt bearbeitet worden. Demgegenüber ist das Innere der Zinken rekristallisiert. Dies bedeutet, dass im Gebrauchszustand oberflächlich bearbeitete Zinkenflanken vorlagen. Diese Bearbeitung kann von der Herstellung der Schlitze herrühren; aber auch ein Glattschleifen der Zinkenflanken nach der Herstellung der Schlitze kann solche Bearbeitungsspuren hinterlassen. Weitere Anhaltspunkte für die Schlitzherstellungstechnik konnten nicht gefunden werden.

Nach unserer Ansicht kommen hier vor allem zwei Sägemethoden in Frage: Entweder wurden die Schlitze tatsächlich mit Sägeblättern hergestellt, vielleicht sogar mit einem Bündel von 51 parallelgestellten und gegeneinander fixierten Sägeblättern. Römische Sägen sind bekannt, und schriftliche Überlieferungen (Plutarch, Polybius) deuten darauf hin, dass die Römer schon in vorchristlicher Zeit harten Stahl z. B. für Schwertklingen kannten. Nach C. Böhne ist schon aus der LaTènezeit ein Schwert bekannt, das eine Mittelamelle aus gehärtetem Stahl (0,8% Kohlenstoff, Martensitgefüge [abgeschreckt]) und zwei oberflächliche Schmiedeeisen-Lamellen (0,5% C, rekristallisiertes ferritisches Eisen mit flachgeschmiedeten Schlackeneinschlüssen) aufweist<sup>6</sup>. G. Becker wies ferner anhand eines römischen Schwertes nach, dass man es zur Zeit Diokletians durch Zulegieren von 7% Arsen verstand, harten Stahl zu erzeugen<sup>5</sup>. Es bestanden somit in römischer Zeit mindestens zwei metallurgische Methoden Hartstahl herzustellen. Somit ist nicht ausgeschlossen, dass genügend harte Stahlsägen für die Kammherstellung aus Schmiedeeisen erzeugt werden konnten.

Die sehr regelmässigen, tiefen und geraden 51 Parallelschlitze können nicht von Hand einer nach dem anderen eingesägt worden sein. Es musste eine Vorrichtung verwendet worden sein, welche die Säge geführt, und die einen konstanten Vorschub von Schlitz zu Schlitz gewährleistet hätte. Wahrscheinlicher scheint uns eine Herstellung mittels eines geführten Sägeblatt-Bündels.

Eine zweite in Betracht zu ziehende Sägetechnik ist die schon im Altertum praktizierte Methode, aus Steinblöcken parallelförmige Platten herauszuschneiden. Ein Draht, anfänglich wohl eine Schnur, wird auf der Oberfläche des einzuschneidenden Blockes hin- und hergezogen, währenddem man dauernd Sand und Wasser darüber gibt. Der harte Quarzsand ritzt den Stein, und es bildet sich ein immer tiefer werdender Schlitz. Zwei oder mehr Parallelschlitze können erzeugt werden, wenn man über einen Rahmen gespannte, parallele Drähte hin- und herbewegt, wobei der Rahmen durch eine geeignete Führung so

<sup>6</sup> C. Böhne, Vom Damaststahl zum Scharsachstahl. Archiv f. d. Eisenhüttenwesen 40, 1969, 661-665.

gehalten werden muss, dass die Schlitze senkrecht in das Material eindringen. Diese Technik wäre auch für das Schneiden von Schmiedeeisen geeignet, da Quarz erheblich härter ist. Zudem kann man durch Hämmern die rundlichen Sandkörnchen leicht in scharfkantige Splitter brechen, welche eine gut spanabhebende Wirkung besitzen. Mit einer hölzernen Einrichtung war es bestimmt möglich, 51 parallel aufgespannte Drähte über einem entsprechend fixierten Blech geführt hin und her zu bewegen, vielleicht sogar über einem Blechpaket, so dass gleichzeitig mehrere Kämmen entstanden. Nach vollendeter Schlitzbildung konnten durch Kippen des Bleches die im Grunde vorhandenen Anstragungen hergestellt werden. Die allenfalls etwas riefigen Flanken konnten schliesslich durch Polieren geglättet werden, z. B. vermittels in einem Staub/Wasser-Gemisch getränkten Tüchern, welche man durch die Schlitze zog. Derartige Einrichtungen können den Archäologen bisher leicht entgangen sein, da sie leicht verderblich sind.

### 3. Kamm mit lauter Einsatz-Zinken

Zum Vergleich mit dem beschriebenen, aus einem einzigen Stück herausgearbeiteten, wurde ein *Kamm des Types II* aus Augst untersucht, der eindeutig durch Einsetzen aller Normalzinken hergestellt worden ist. Abb. 9 zeigt die Röntgenaufnahme des Fundstückes (Inv. 67.26056), aus der hervorgeht, dass in das Mittelblech Schlitze eingetieft worden waren, in denen die (heute durchwegs abgebrochenen) Zinken eingesetzt worden sind. Nur die breiten Randzinken hängen massiv mit dem Mittelblech zusammen.

Die Tiefen und Breiten der Schlitze, in welchen die Normalzinken stecken, sind nicht genau gleich, und insbesondere sind sie nicht so streng parallel wie beim oben beschriebenen Kamm des Types I. Die Schlitze beim zweiten Stück könnten daher durchaus von freier Hand hergestellt worden sein.

Es stellt sich nun die Frage nach der Herstellungsweise der dünnen, in die Schliffe eingefügten Zinken. Einen Querschliff durch eine solche zeigt Abb. 10 (zur Lage des Schliffes vgl. Abb. 9). Das Mikrogefüge besitzt den für ein dünn geschmiedetes Eisenblech typischen Charakter: flachgedrückte Eisenkristalle (hell) und in die Länge gezogene Schlackeneinschlüsse (dunkel). Die Verformungsfläche liegt parallel zu den Zinkenflanken, also gerade quer zu derjenigen des vorher behandelten Kammes. Die Abb. 7 und 10 liegen in den beiden Kämmen analog (Zinkenquerschnitte) und erhellen die grundsätzlich verschiedene Lage der Schmiedefläche. Man kann eindeutig sagen, dass im zweiten Kamm vorfabrizierte, dünnausgeschmiedete Lamellen so in die Mittelblechschlitze eingesetzt wurden, dass die Schmiedeflächen zu Zinkenflanken wurden.

### 4. Kamm mit Reparatur-Zinken

Schliesslich wurde ein dritter Kamm (aus Vindonissa) untersucht. Er lag in sehr stark verrostetem Zustand vor, doch zeigte die Röntgenaufnahme (Abb. 11), dass ein Exemplar des Types I mit einigen Reparaturzinken vorliegt. Letztere sind in unterschiedlich tiefe Schlitze ins Hauptblech eingesetzt, die nicht genau parallel zu den Normalschlitzten stehen. Ein Schliff (Abb. 12) parallel zur Blechebene im Gebiet A der Abb. 11 zeigt drei nebeneinanderliegende Reparaturschlitze mit eingesetzten Zinken (2, 3 und 4) sowie die Reste von zwei Normalzinken (1 und 5). Wie beim erstbeschriebenen Kamm (vgl. Abb. 6) setzt sich das Gefüge des Mittelbleches unverändert in die Normalzinken 1 und 5 fort, was bedeutet, dass diese aus dem Blech herausgearbeitet worden sind. Die Einsatzzinken 2–4 weisen auf demselben Schliff ein Lineargefüge mit parallel zu den Flanken stark abgeplatteten Eisenkörnchen auf, was besonders gut bei stärkerer Vergrößerung erkennbar ist (Abb. 13, links). Die Einsatzzinken sind somit flachgeschmiedete Streifen, welche in die Schlitze eingefügt worden sind, und zwar sind sie bei der Bearbeitung noch stärker deformiert worden als die



analog hergestellten des zweiten Kammes (vgl. Abb. 10). Eine an einer solchen Lamelle gewonnene Röntgenfeinstruktur-Rückstrahlaufnahme liess eindeutig nachweisen, dass die Herstellung zumindest in der Schlussphase durch Kalthämmern erfolgt ist. Die Eisenkristalle sind nämlich nicht nur flachgedrückt, sondern auch innerlich sehr stark gestört, was nur nach Kaltbearbeitung der Fall ist. Dies steht im Gegensatz zum Herstellungsprozess des Hauptbleches, das, wie das Gefüge zeigt (Abb. 13, rechts) warm geschmiedet worden ist und anschliessend rekristallisierte.

Die Schliifuntersuchungen ergaben ferner, dass das Gefüge des Hauptbleches gegen die Reparaturschlitz Bearbeitungsspuren aufweist (Pfeile auf Abb. 13). Wir vermuteten, dass es sich dabei um Querschnitte von beim Sägen entstandenen Riefen handeln könnte. Dieselben Erscheinungen ergaben sich auch bei einem von uns ins gleiche Blech eingesägten Versuchsschlitz. In der Folge wurde der Reparaturschlitz «R» (Abb. 11) von hinten her sorgfältig angeschnitten, so dass er sich ohne Störung von selbst öffnete und der Lamellenrest herausfiel. Die so freigelegten Schnittflanken wurden bei schwacher Vergrösserung im Raster-Elektronenmikroskop betrachtet, was erfahrungsgemäss ausserordentlich gute Reliefabbildungen erlaubt. Abb. 14a und b zeigen die beiden Seiten des Reparaturschlitzes, wobei trotz schwacher Rostbildung einwandfrei die gegen 2000 Jahre alten Sägespuren erkennbar sind. Aus dem Abstand der Riefen kann sogar festgestellt werden, dass der alte Römer pro Sägestoss 0,09–0,14 mm tief ins Blech eindrang. Mit einer für heutige Begriffe schlechten Säge erzielten wir am gleichen Blech eine Hubhöhe von durchschnittlich 0,14 mm. Die auf Abb. 14 ebenfalls erkennbare – 0,03 mm Hubhöhe aufweisende – Schnittfläche «S» entstand bei unserem Anschneiden des Reparaturschlitzes von hinten mittels einer feinen Diamant-Schneidscheibe.

## 5. Zusammenfassung

Drei römische Eisenkämme (Flachshechel) wurden metallkundlich untersucht. Alle drei sind aus Schmiedeeisen gefertigt worden. Der erste (aus Augst, Abb. 1–8) besteht aus einem geschmiedeten Blech, in welches beidseitig durch einen erstaunlich präzisen Arbeitsprozess je 51 parallele Schlitz hineingeschnitten worden sind. Eine Herstellung durch Giessen oder Zusammenschmieden von vorgefertigten Lamellen kann mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Der Herstellungsprozess der Schlitz selbst bleibt nach wie vor unbekannt, doch werden zwei mögliche Sägetechniken diskutiert.

Ein ähnlicher Kamm aus Vindonissa (Abb. 11–14) besteht aus dem gleichen Material und ist von der gleichen Machart wie der erstgenannte, doch weist er einige Reparatur-Zinken auf. Die Flickarbeit erfolgte von Hand durch Einsägen kurzer Schlitz ins Mittelblech im Bereich der Wurzel abgebrochener Zinken. Die Sägeriefen konnten in einem Schlitz eindeutig nachgewiesen werden. Die Einsatzzinken bestehen aus kaltgehämmerten Eisenbändchen, das grosse Blech ist jedoch warmgeschmiedet.

Vom dritten untersuchten Hechel (aus Augst, Abb. 9 und 10) ist nur das Mittelblech mit kurzen Zinkenstummeln erhalten geblieben. Alle Zinken sind dabei in kurze, handgesägte Schlitz des Mittelblechstückes eingesetzt, die viel unregelmässiger herausgearbeitet worden sind als die tiefen Schlitz der beiden vorgenannten Kämme. Das Mittelblech besteht wie die ersten beiden Kämme aus warmgeschmiedetem Eisenblech, die Zinken aus dünn geschmiedeten Bändchen.

Die beiden erstgenannten Kämme sind mit einer viel fortgeschritteneren, präziseren Technik hergestellt worden als der letztgenannte, wobei offenbleibt, ob letzterer tatsächlich älter ist oder nur aus einer weniger gut eingerichteten Werkstatt stammt. Zur Reparatur der mittels der höheren Technik gefertigten Kämme wurde auf die primitivere Arbeitsweise zurückgegriffen, indem eigens angefertigte Blechstreifen als Ersatzzinken in handgesägte Schlitz eingefügt worden sind.



Herrn Dr. h. c. A. Mutz danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit und die Beschaffung der beiden im Römer-Museum Augst aufbewahrten Kämmen. Herrn Dr. Ch. Unz, seinerzeit am Vindonissa-Museum Brugg, verdanke ich die Überlassung des Kammes aus Vindonissa. Herr T. Reich, Dipl. Werkstoffing. ETH, hat in einer Semesterarbeit eine Voruntersuchung des zuerst beschriebenen Kammes aus Augst ausgeführt, und Herr E. Schaller führte die weiteren Schliffuntersuchungen und die photographischen Arbeiten aus. Beiden möchte ich für ihre wertvollen Beiträge bestens danken.

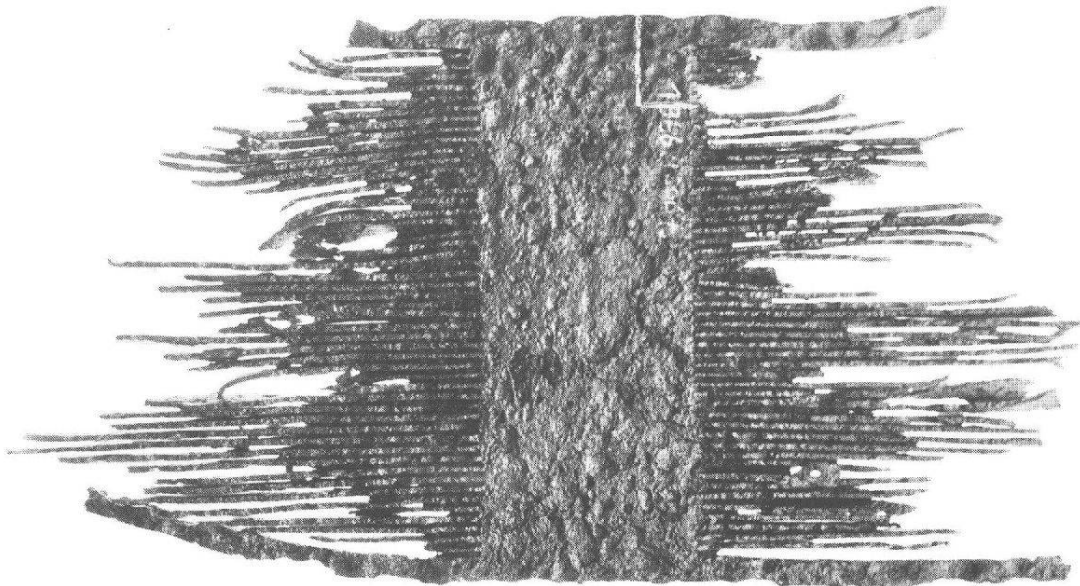
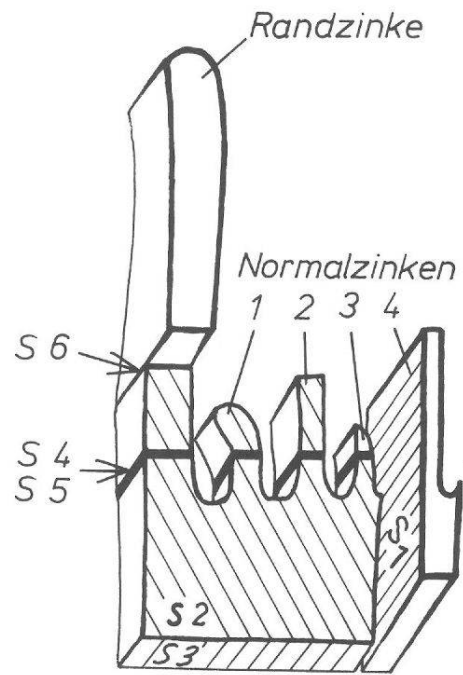
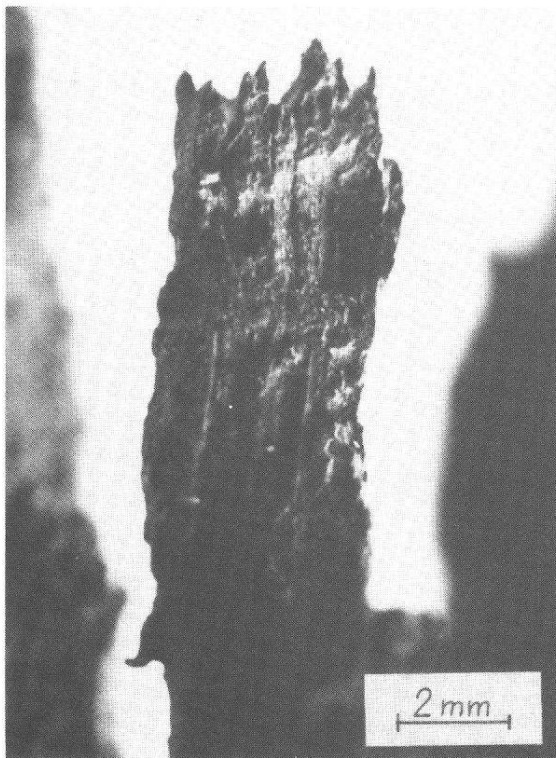


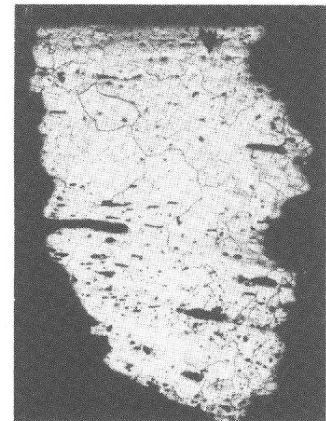
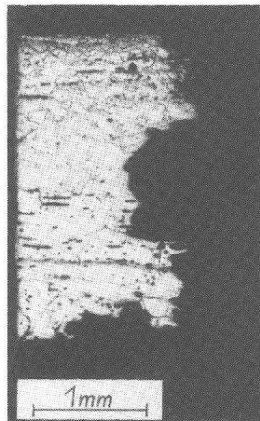
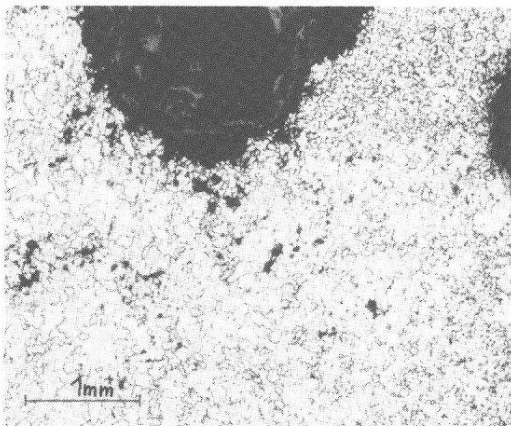
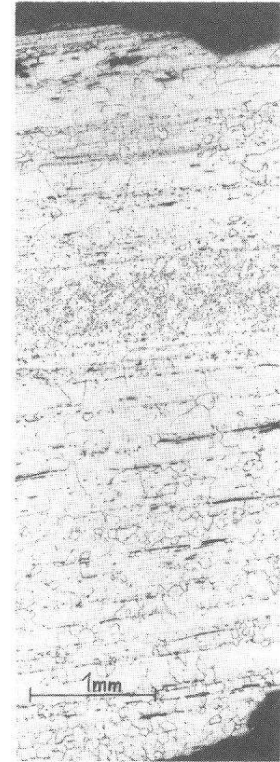
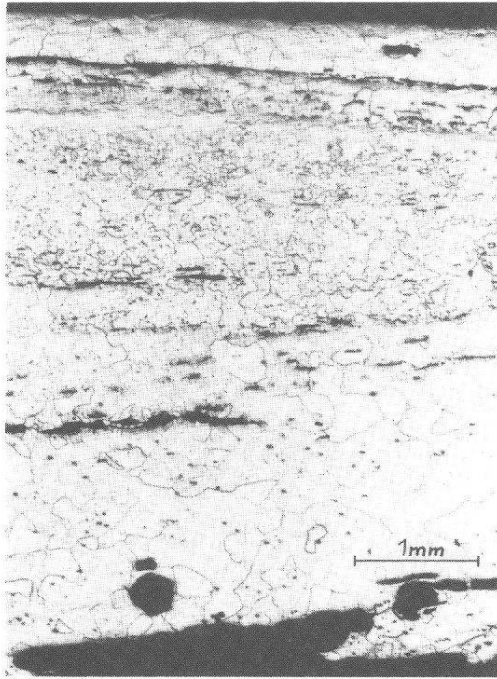
Abb. 1 Augst. Eisenkamm, aus einem Stück hergestellt; oben rechts untersuchtes Stück (vgl. Abb. 8). M. 2:3.



S = Schliff

Abb. 2 (links). Seitenansicht (Flanke) einer Normalzinke des Kammes Abb. 1. Durch die Korrosion ist der schichtförmige Aufbau deutlich geworden.

Abb. 3 (rechts). Schema der Schiffe am untersuchten Stück des Kammes Abb. 1. S = Schiffe Nrn. 1-6 (vgl. Abb. 8).



- Abb. 4 (oben links).* Ausschnitt aus Schliff 3: Querschnitt durch das Mittelblech (vgl. Abb. 8). Obere Schliffkante = Grenze gegen Schliff 2. Untere Grenze = korrodierte Fläche des Mittelbleches. Schlacken- und Oxideinschlüsse schwarz, zeilenförmig angeordnet. Eisen (Ferrit) hell, lagenweise verschieden grob rekristallisiert.
- Abb. 5 (oben rechts).* Ausschnitt aus Schliff 1, parallel zur Flankenfläche einer Normalzinke (Lage vgl. Abb. 8). Schliff quer durch die ganze Blechdicke, quer zur Schmiedeebene. Langgestreckte Schlacken- und Oxideinschlüsse sowie rekristallisiertes Eisen (weiss).
- Abb. 6 (unten links).* Ausschnitt aus Schliff 2, parallel zur Blechoberfläche (Lage vgl. Abb. 8). Oben: unterster Teil der Normalzinken 2 und 3. Unten: Mittelblech. Richtungsloses Gefüge, das sich aus dem Mittelblech gleichmässig in die Zinken fortsetzt.
- Abb. 7 (unten rechts).* Ausschnitt aus Schliff 5: Querschnitt durch die Normalzinken 2 (rechts) und 3. Oberer Rand = Grenze gegen Schliff 2 (vgl. Abb. 8). Die Schmiedestructur verläuft quer durch die Zinken über den dazwischen liegenden Schlitz hinweg und liegt parallel zur Gesamtblech-Fläche.

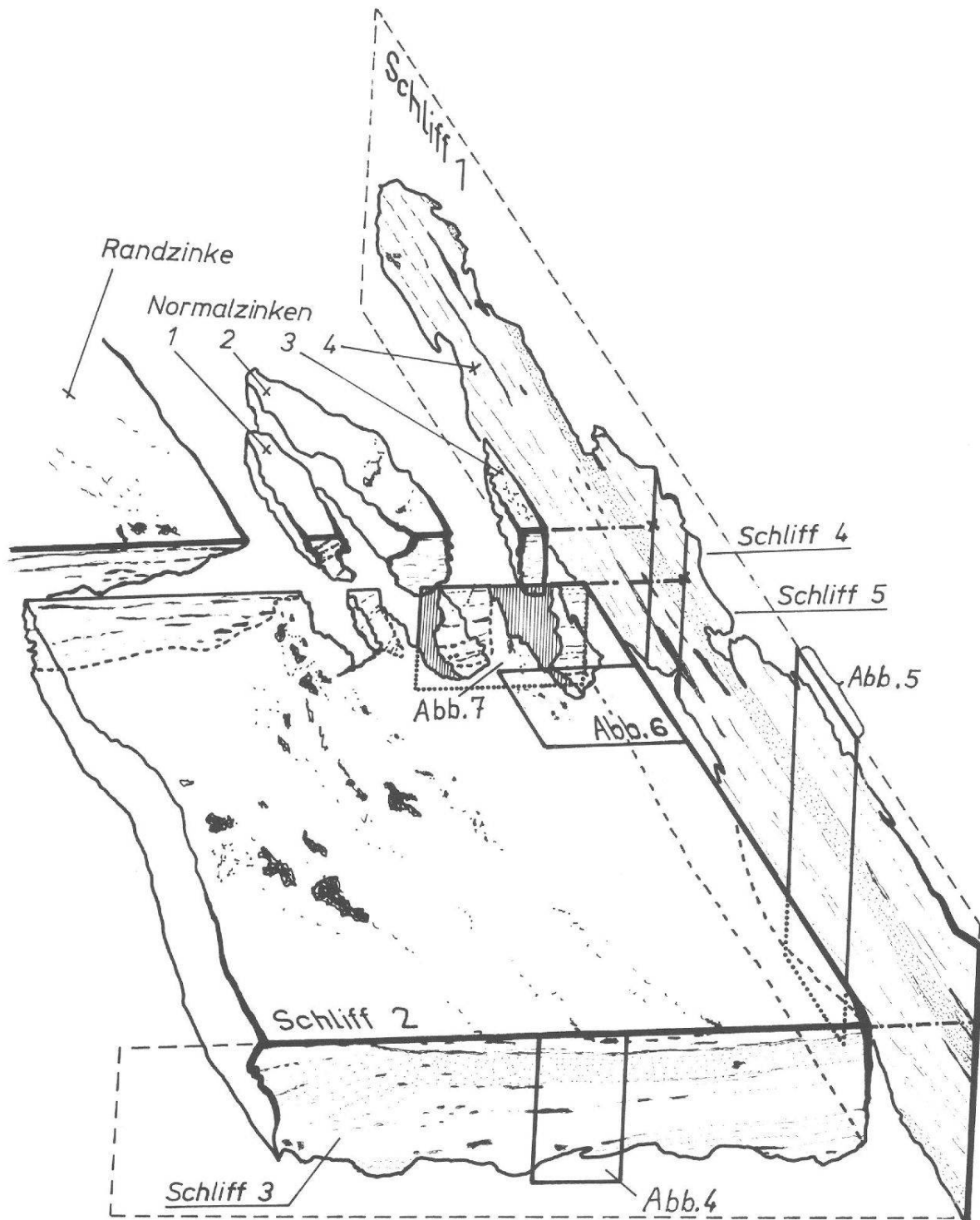


Abb. 8 Parallelprojektion des untersuchten Stückes aus Kamm Abb. 1 mit Angabe der Zinken, Schliffe und Abbildungen.



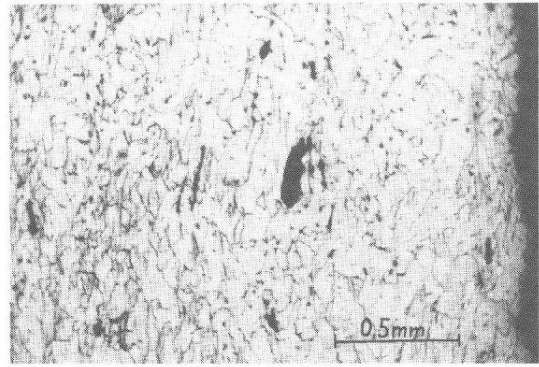
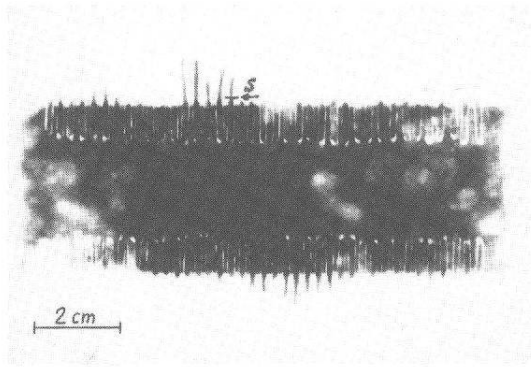


Abb. 9 (links). Röntgenaufnahme eines zweiten Eisenkammes aus Augst: Mittelblech mit abgebrochenen, in Schlitz eingesetzten Zinken. Nur die Randzinkenstummel sind Teile des festen Bleches. Die in Abb. 10 gezeigte Zinke ist mit S markiert.

Abb. 10 (rechts). Querschliff durch Zinke S des Kammes Abb. 9. Rechts Kante gegen die Zinkenflanke. Gleiche Schlifflage wie bei Abb. 7. Die Ferritkörner sind *parallel* zur Flanke flachgedrückt, ebenso die Oxid- bzw. Schlackeneinschlüsse. Die Schmiedefläche entspricht den Zinkenflanken.

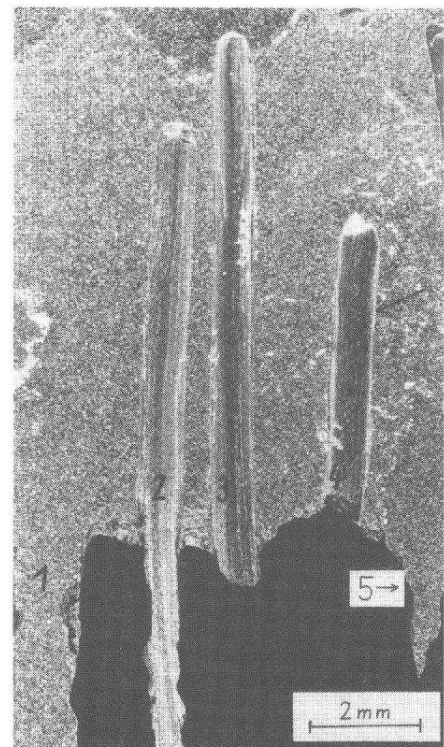
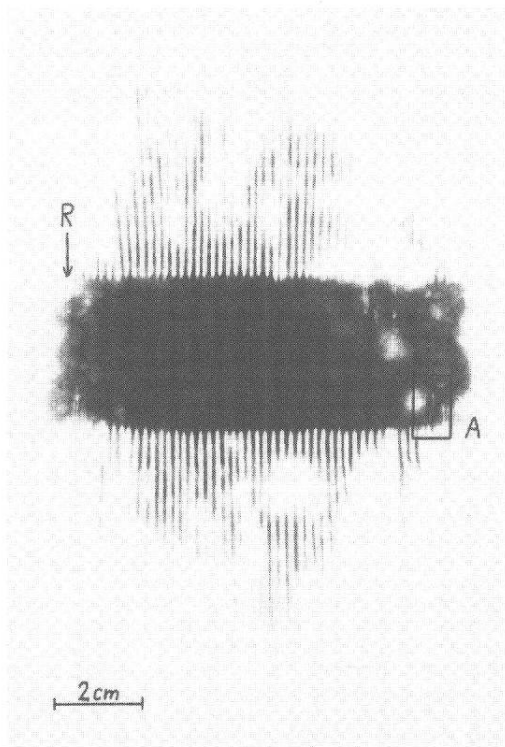
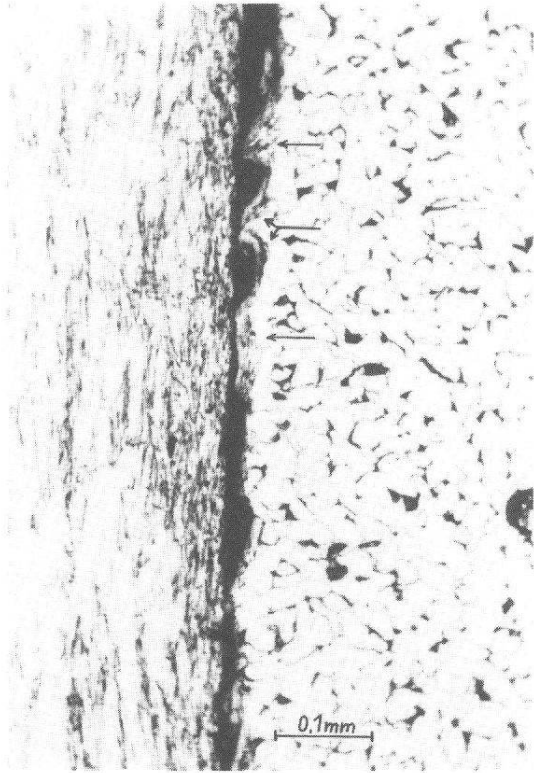
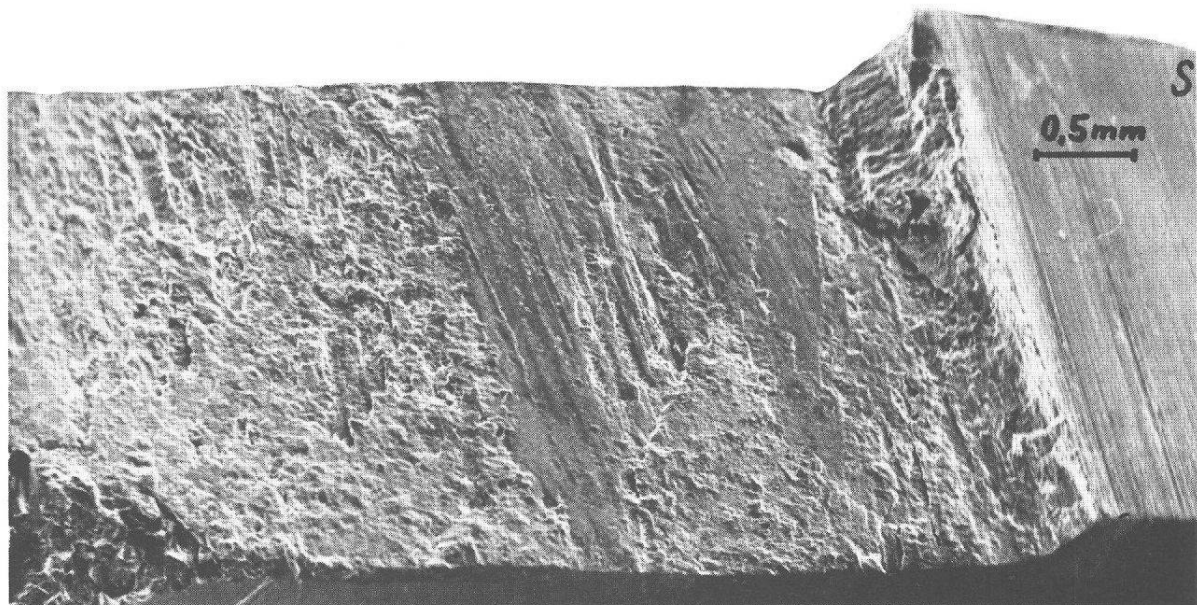


Abb. 11 (links). Röntgenaufnahme des aus einem Stück hergestellten Kammes mit Reparaturzinken von Vindonissa.

Abb. 12 (rechts). Schliff parallel zur Blechebene von Kamm Abb. 11 an der Stelle A. Die Reste der Normalzinken 1 und 5 gehen kontinuierlich ins Mittelblech über. Die in Sägeschlitze eingesetzten Reparaturzinken 2, 3 und 4 besitzen eine durch Kalthämmern erzeugte Linearstruktur.



*Abb. 13* Stark vergrößerte Partie der Abb. 12 (dortige Lage beim Pfeil, Einsatzzinke 4). Rechts Gefüge des Mittelbleches mit Verformungsstellen (Pfeile) am Sägeschnitt. Links Lineargefüge einer Reparaturzinke.



*Abb. 14* In römischer Zeit gesägte Reparaturschlitzflanken von der Stelle «R» der Abb. 11. Raster-Elektronenmikroskop-Aufnahme. Die Flächen «S» zeigen die für die Untersuchung von hinten her mittels Diamantscheibe hergestellten Schnittflächen; die Teilfiguren lagen im Kamm auf den beiden Seiten desselben Schlitzes.