

Zeitschrift: Jahresbericht / Gesellschaft Pro Vindonissa
Herausgeber: Gesellschaft Pro Vindonissa
Band: - (1985)

Artikel: Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen von römischen Schwertern aus dem Vindonissa-Museum Brugg und dem Römermuseum Augst
Autor: Biborski, M. / Kaczanowski, P. / Kdizierski, Z.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-278898>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 24.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen von römischen Schwertern aus dem Vindonissa-Museum Brugg und dem Römermuseum Augst

M. Biborski, P. Kaczanowski, Z. Kędzierski, J. Stępiński

Neben den typologisch-chronologischen Studien gewinnen bei den die Periode vom 1. bis zum 5. Jh. n. Chr. betreffenden Forschungen auf dem Gebiet der Waffenkunde die metallographischen Untersuchungen immer mehr an Bedeutung. Dies trifft in erster Linie auf die Schwerter zu. Durch die metallographischen Analysen wird es möglich, die Herstellungsverfahren zu rekonstruieren und damit den technologischen Wandel bei der Herstellung der Schwerter zur Zeit des Römischen Reiches zu verfolgen. Es gibt aber auch einen anderen Grund, weshalb den metallographischen Untersuchungen so viel Bedeutung zugemessen wird. Die Bestimmung des Herstellungsverfahrens ist nämlich ein äusserst wichtiges Kriterium für die Identifizierung der römischen Schwertimporte unter den Funden des europäischen Barbaricums¹.

Dank der Gefälligkeit der Direktionen des Römermuseums in Augst und des Vindonissa-Museums in Brugg wurden uns Proben von drei Schwertern für die metallographischen Analysen zur Verfügung gestellt. Diese Exemplare haben für die Erschliessung der Herstellungsverfahren dieser Waffenart eine besondere Bedeutung. Im Gegensatz zu den meisten Schwertern aus der Periode des 1. und 5. Jh. n. Chr., die in Brandgräbern des mittel- und nordeuropäischen Raumes entdeckt wurden, waren die nachfolgend dargestellten Exemplare nicht den bei der Totenverbrennung auf dem Scheiterhaufen herrschenden hohen Temperaturen ausgesetzt, und ihre metallographischen Strukturen sind ungestört erhalten geblieben.

Das erste der untersuchten Schwerter, welches im Legionslager von Vindonissa (Schutthügel-West, Vindonissa-Museum Brugg, Inventarnr. 1938) gefunden wurde, gehört zu den Exemplaren vom Gladius-Typ². Es besitzt eine kurze, sich nur wenig zur Spitze hin verjüngende Klinge von rhombischem Querschnitt, die mit einer kurzen, dreieckig geformten Spitze von charakteristischem, sich einem Quadrat annäherndem Querschnitt abschliesst. Die Griffangel ist sehr lang und schmal und geht rechtwinklig in die Klinge über. Die Masse des Schwertes sind folgende: Gesamtlänge 64 cm, Griffangellänge 19,8 cm, Klingebreite am Griffangelansatz 3,9 cm und 3,8 cm an der Übergangsstelle zur Spitze. Die Spitzenlänge beträgt 6,3 cm, die maximale Klingendicke 1 cm und die maximale Griffangeldicke 0,6 cm.

Die beiden anderen Schwerter wurden in der römischen Stadt Augusta Raurica entdeckt. Das eine von ihnen (Römermuseum Augst, Inventarnr. 1961.4401) hat eine

¹ M. Biborski, P. Kaczanowski, Z. Kędzierski, J. Stępiński, Metallographische Untersuchungen als Kriterium einer Identifikation römischer Schwerter, *Archaeologia Interregionalis, Ancient Iron Manufacture Centres in Northern Central Europe*, Fasc. 3, 1982, S. 65–95.

² Ch. Simonett, Grabungen der Gesellschaft Pro Vindonissa, *Zeitschrift für schweizerische Archäologie und Kunstgeschichte*, Band 2, 1940, S. 1–2, Abb. 1; Th. Eckinger, Die Kleinfunde (in:) Grabungen der Gesellschaft Pro Vindonissa im Jahre 1931, *Anzeiger für schweizerische Altertumskunde*, Bd. XXXIV, H. 2, 1932, S. 105, Abb. 17a.

schmale, sich allmählich verjüngende Klinge mittlerer Länge und erheblich korrodierte Schneideflächen, weswegen eine sichere Bestimmung des Querschnitts unmöglich ist³. In Anbetracht des jetzigen Erhaltungszustandes kann man feststellen, dass sich dieses Schwert in seinem Querschnitt einem Rhombus annähert; nicht ausgeschlossen ist hier aber auch ein achteckiger Querschnitt. Die Spitze ist kurz, spitzbogenförmig und durch die Korrosion stark beschädigt. Das Schwert hat folgende Masse: erhaltene Länge 76,3 cm, davon entfallen 15 cm auf die Griffangel, Klingebreite am Griffangelansatz 4,3 cm und 2,8 cm an der Übergangsstelle zur Spitze, erhaltene Spitzenlänge 4,2 cm, maximale Klingendicke 0,7 cm und maximale Griffangeldicke 1 cm.

Das zweite Schwert (Römermuseum Augst, Inventarnr. 1961.1568) ist nur ein kleines Stück einer schmalen, sich wahrscheinlich verjüngenden, langen Klinge von linsenförmigem Querschnitt mit vollständig und gut erhaltener Griffangel, die am Ansatz rechtwinklig abgesondert ist⁴. Die Gesamtlänge des Bruchstückes beträgt 25,4 cm, davon entfallen 16,3 cm auf die Griffangel. Die maximale Klingebreite beträgt 4,1 cm, die Klingendicke dagegen 0,55 cm.

Das Schwert aus Vindonissa gehört zu der charakteristischen Variante der Kurzschwerter, die in der archäologischen Literatur als Typ Pompeji bezeichnet wird⁵. Aus dem Gebiet des Römischen Reiches sind uns bisher mehr als zehn Exemplare bekannt, die durch fast identische Form und Masse gekennzeichnet sind. Ihre kurzen Klingen mit einer Länge von 44–50 cm und einer Breite von ca. 4–5 cm weisen fast keine Verjüngung zu den scharfkantigen, dreieckigen Spitzen auf. Die Griffangelänge ist unterschiedlich. Sie variiert von 13–20 cm. Derartige Exemplare wurden u.a. in Pompeji⁶, Newstead⁷, Oosterboeck⁸, Zbijega⁹, Klein-Winternheim¹⁰, sowie im Rheinbett bei Mainz¹¹ entdeckt. Besonders die beiden letztgenannten Funde knüpfen wegen ihres viereckigen Querschnittes an den Spitzenenden, die wie eine Art Verdickung aussehen, an unser untersuchtes Exemplar am engsten an.

In Anlehnung an die bisherigen Forschungsergebnisse ist dieser Schwerttypus für das 1. Jh. n. Chr., insbesondere für dessen 2. Hälfte, charakteristisch¹². In den Grab-

³ Langschwert, Länge 76 cm, gefunden in Augst, Insula 31, Fundkomplex 216, Inv. Nr. Römermuseum Augst 1961.4401 (R. Steiger et al., Augst, Insula 31. Ausgrabungen und Funde 1960/61, Forschungen in Augst 1, 1977, S. 223, Abb. 96,1. S. Martin-Kilcher, Ein silbernes Schwertortband mit Niellodekor und weitere Militärfunde des 3. Jahrhunderts aus Augst, Jahresberichte aus Augst und Kaiseraugst 5, 1985, S. 190 und Abb. 25,4).

⁴ Fragment (Griffangel und Teil der Klinge) eines Langschwertes, erhaltene Länge 24 cm (nach Probenentnahme), gefunden in Augst, Insula 31, Fundkomplex 136, Inv. Nr. Römermuseum Augst 1961.1568 (S. Martin-Kilcher a. a. O. S. 190 und Abb. 25,5).

⁵ G. Ulbert, Gladii aus Pompeji, *Germania* 47, 1969, S. 97–128.

⁶ Dazu Ulbert a. a. O. 97–99, Taf. 17.1–3.

⁷ J. Curle, *A Roman Frontier post and its People*, Glasgow, 1911, S. 182–183, Taf. XXXIV, Abb. 11.

⁸ W. C. Braat, *Römische Schwerter und Doiche im Rijksmuseum van Oudheden*, *Oudheidkundige Mededelingen XLVIII*, 1967, S. 58–59, Taf. III. 3.

⁹ V. Hoffiller, *Oprema rimskoga vojnika u prvo doba carstva*, *Vjesnik Hrvatskoga Arheoloskoga Drustva, Nove Serije Sveska XII*, 1912, S. 101–104, Abb. 36.1.

¹⁰ K. Schumacher, *Votivfunde aus einer römischen Tempelanlage bei Klein-Winternheim (Rheinhessen)*, *Die Altertümer unserer heidnischen Vorzeit* 5, 1911, S. 108–113, Taf. 21,363.

¹¹ H. Schoppa, *Ein Gladius vom Typus Pompeji*, *Germania* 52, 1974, S. 102–108, Taf. 24.1.

¹² Dazu Ulbert a. a. O. 118.

inventaren des Mittel- und Nordbarbaricums, die zeitlich in den Phasen B₁ und B₂ der frühromischen Kaiserzeit, also im chronologischen Abschnitt von den ersten Jahrzehnten des 1. Jh. bis zum Anfang der 2. Hälfte des 2. Jh. angesetzt werden, sind die an den Pompeji-Typus anknüpfenden Schwerter oft vertreten¹³. Es kommen unter ihnen auch Exemplare vor, die als fast treue Entsprechungen der Schwerter aus den oben genannten Fundstellen angesehen werden können. Als Beispiel sei hier u.a. ein Exemplar von Svanninge Mark auf Fünen¹⁴ angeführt, das sich nur durch seine etwas breitere Klinge unterscheidet. Die Liste der dem Typ Pompeji in morphologischer Hinsicht angenäherten Schwerter könnte fortgesetzt werden, aber in Anbetracht des Erhaltungszustandes, d. h. des Korrosionsgrades, sind wir nicht imstande, die Form und die Abmessung der Klingen dieser Schwerter genau zu bestimmen. Diese Gruppe von Schwertern ist zweifellos ein Zeugnis für sehr deutliche Einflüsse der römischen Bewaffnung auf die ausserhalb der römischen Reichsgrenzen gebräuchlichen Waffen. Wegen des Erhaltungszustandes dieser Schwerter, der fehlenden typischen Stempelmarken und Inkrustationen mit römischer Ikonographie, sowie wegen des Umstandes, dass diese Schwerter nicht mit metallenen Scheideteilen, die als zweifellos römisch angesehen werden könnten, vergesellschaftet waren, ist es schwer, unter ihnen diejenigen Exemplare auszusondern, die man mit grösster Wahrscheinlichkeit als Erzeugnisse römischer Schmiedewerkstätten ansehen könnte. Eine Ausnahme bilden hier nur zwei stark zerstörte, wohl den Typ Pompeji repräsentierende Exemplare, die in Lansen, Kr. Waren¹⁵, und in Egge, Trondheim¹⁶ gefunden wurden.

Das zweite vollständig erhaltene Schwert, das Exemplar aus Augst (Inventarnr. 1961.4401), knüpft in morphologischer Hinsicht an die jüngeren, als «Spatha» bezeichneten Formen an. Es ist mit dem von G. Ulbert¹⁷ ausgesonderten Schwerttypus in Verbindung zu setzen, welcher für die späte Limeszeit charakteristisch ist und als Straubing-Nydam-Typus bezeichnet wird. Es handelt sich hier um Exemplare, deren Klingenlänge, -breite und -querschnitt stark variieren. Das Augster Schwert ist der Variante zuzuordnen, die durch eine schmale und lange, sich zur kurzen, bogenförmigen Spitze hin verjüngenden Klinge gekennzeichnet ist. Die meisten Exemplare dieses Typus haben Klingen mit achteckigem, seltener rhombischem oder linsenförmigem Querschnitt. Ziemlich oft weisen solche Schwerter fazettierte Klingen (von hexagonalem Querschnitt) auf. Innerhalb dieser Gruppe gehört das Schwert von Augst zu den etwas kürzeren Formen, deren Gesamtlänge bis zu 80 cm betragen kann. An ähnlichen Funden aus dem Gebiet des Römischen Reiches sind hier u.a. ein anderes, in der Taberne von Insula 5 gefundenes Schwert aus Augst¹⁸ und ein aus dem

¹³ M. Biborski, *Miecze z okresu wpływów rzymskich na obszarze kultury przeworskiej*, *Materiały Archeologiczne XVIII*, 1978, S. 100.

¹⁴ E. Albrechtsen, *Fynske jernaldergrave II*, København 1956, S. 81, Abb. 44b.

¹⁵ R. Laser, *Der römische Gladius von Lansen, Kr. Waren (Müritz)*, *Archäologie als Geschichtswissenschaft, Schriften zur Ur- und Frühgeschichte*, Bd. 30, 1977, S. 299–307, Abb. 2.

¹⁶ H. G. Resi, *Palmekvist og laurbaerkrans? Nyoppdagete figurer paa romertids vaapen*, *Universitetets Oldsaksamlings Skrifter, Ny rekke 3*, 1980, S. 53–57, Abb. 2.1.

¹⁷ G. Ulbert, *Straubing und Nydam, Studien zur vor- und frühgeschichtlichen Archäologie*, *Festschrift für Joachim Werner*, München 1974, S. 207–211.

¹⁸ L. Berger, *Ausgewählte Neueingänge des Römermuseums in Augst, Römerhaus und Museum Augst*, *Jahresbericht 1966*, S. 18, Abb. 14b.

Rheinbett in Mainz geborgenes Exemplar¹⁹ zu nennen. Nur wenige Schwerter des fraglichen Typus wurden im europäischen Barbaricum gefunden. Gemeint sind dabei Exemplare, die in Form und Abmessung dem dargestellten Schwert von Augst genau entsprechen. Zahlreich vertreten sind dagegen auf diesem Gebiet etwas längere Schwerter, die in ihren Proportionen und auch in der Form ihres Klängenquerschnittes dem durch das Exemplar von Augst repräsentierten Typus allgemein entsprechen. Relativ zahlreich sind unter ihnen die Schwerter zweifellos römischer Herkunft, was durch ihre Stempelmarken, Inschriften in Punctim-Technik und Inkrustationen bezeugt wird (z.B. Lachmirowice, Woiw. Bydgoszcz, Grab 9²⁰, Gać, Woiw. Przemyśl²¹, Schmorkau, Kr. Oschatz²², Nydam²³, Vimose²⁴).

Im Gebiet des Barbaricums sind die beschriebenen Schwertformen mit einer Gesamtlänge von über 75 cm aus den in die Phase C₁, also in den Zeitabschnitt von der Mitte des 2. Jh. bis zum 3. Viertel des 3. Jh. n. Chr. datierten Grabkomplexen bekannt. Exemplare mit grösseren Gesamtlängen (bis zu 90 cm) waren dagegen länger in Gebrauch, d.h. bis zur Mitte des 4. Jh. n. Chr. (vgl. z.B. Grabfund von Mainz-Bretzenheim²⁵).

Ergebnisse der metallographischen Analyse

Die metallographischen Untersuchungen der Schwerter umfassten die Beobachtung des Makro- und Mikrogefüges, die Bestimmung der Härte und Mikrohärtigkeit, die Analyse der chemischen Zusammensetzung sowie die Analyse der Morphologie und der Zusammensetzung der Schlackeneinschlüsse. Die Probenentnahmestellen für die metallographischen Untersuchungen zeigt *Abb. 1*. Die Schliff-Flächen liegen vertikal zur Schwertlängsachse. Zur Beobachtung des Makrogefüges wurden die geschliffenen Prüfkörper mit 4% Nital geätzt. Die metallographische Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes wurde an Proben im lösungsgeglühten Zustand vorgenommen. Der besseren Übersichtlichkeit halber sind die Untersuchungsergebnisse für die jeweiligen Schwerter in Tabelle I zusammengestellt. Die Ergebnisse der quantitativen chemischen Analyse gehen aus Tabelle II hervor. In *Abb. 2* sind die in schematischen Darstellungen der Strukturen der Schwerter (*Abb. 3, 7, 12*) gebrauchten Bezeichnungen erklärt.

¹⁹ H. Biehn, Jahresbericht des Altertums-Museums der Stadt Mainz, Mainzer Zeitschrift XXXII, 1937, S. 136–143, Abb. 2.

²⁰ Biborski, Kaczanowski, Kędzierski, Stępiński, Metallographische Untersuchungen als Kriterium a. a. O. S. 72, Abb. 1e.

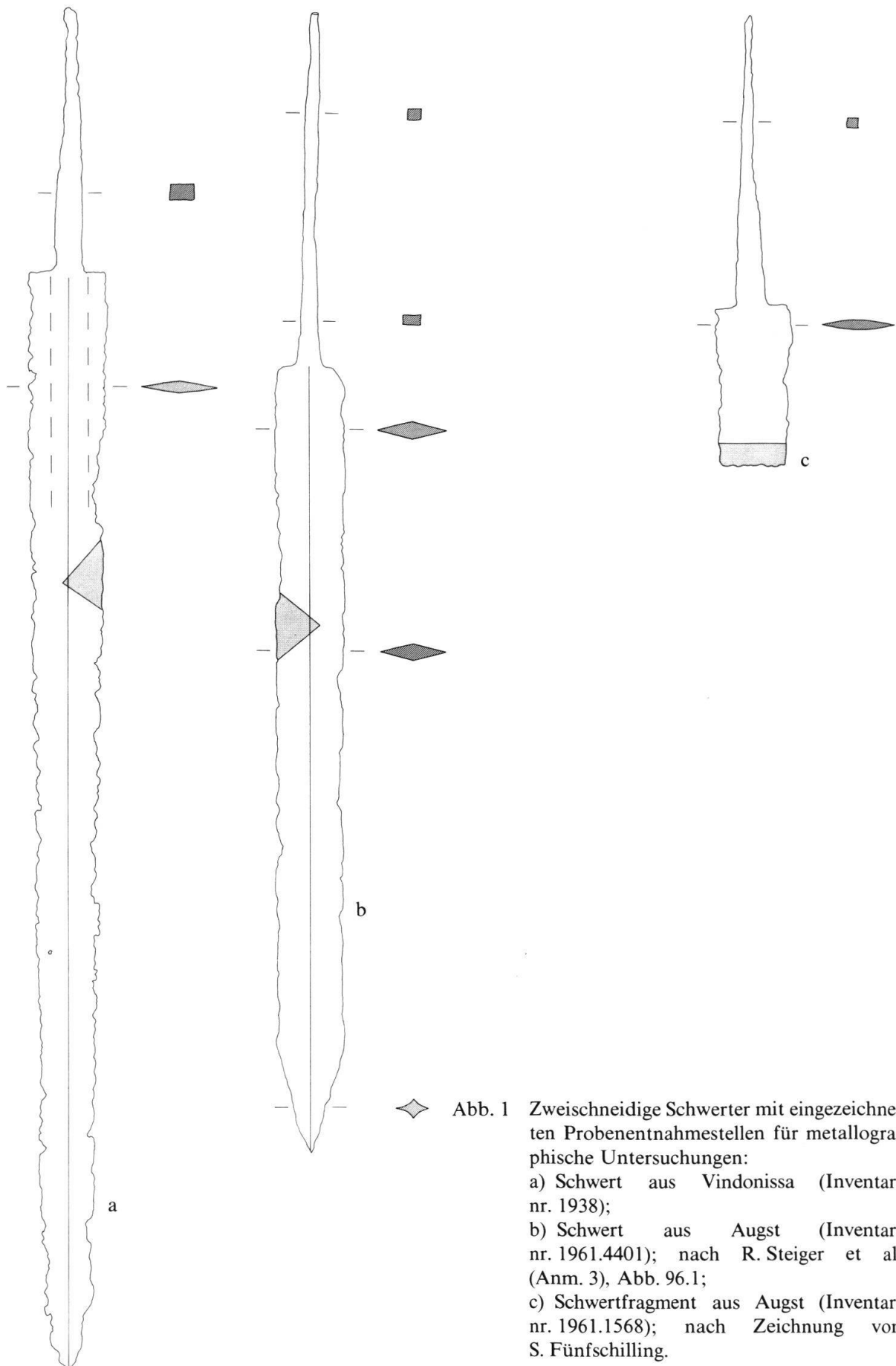
²¹ Biborski, Kaczanowski, Kędzierski, Stępiński, Miecze obosieczne z cmentarzysk kultury przeworskiej w Chmielowie Piaskowym, woj. Kielce i Gaci, woj. Przemyśl w świetle analizy archeologicznej i badań metaloznawczych, Sprawozdania Archeologiczne XXXIII, 1981, S. 112 ff.

²² E. Meyer, Ein tauschiertes Schwert aus einem spätkaiserzeitlichen germanischen Brandgrab von Schmorkau, Kr. Oschatz, Ausgrabungen und Funde Bd. 20, H. 2, 1975, S. 87–90, Taf. 12a.

²³ C. Engelhardt, Nydam Mosefund, Kjöbenhavn 1865, Taf. VII, 17, 17a.

²⁴ Engelhardt, Vimose Fundet, Kjöbenhavn 1869, Taf. VI, 9.

²⁵ H. Bernhard, Germanische Funde der Spätantike zwischen Strassburg und Mainz, Saalburg-Jahrbuch 38, 1982, S. 97, Abb. 32.1.



◆ Abb. 1 Zweischneidige Schwerter mit eingezeichneten Probenentnahmestellen für metallographische Untersuchungen:
 a) Schwert aus Vindonissa (Inventar-nr. 1938);
 b) Schwert aus Augst (Inventar-nr. 1961.4401); nach R. Steiger et al. (Anm. 3), Abb. 96.1;
 c) Schwertfragment aus Augst (Inventar-nr. 1961.1568); nach Zeichnung von S. Fünfschilling.

Tabelle I Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen und der Bestimmung der Mikrohärtigkeit und Härte

Beobachtungsstelle	Gefügebestandteile	Mikrohärte HV 0,05	Härte HV 10
Schwert aus Augst (Inventarnr. 1961.4401)			
A. Kern			
A1. Schneidezzone	A1. Martensit + Troostit	A1. Martensit 531 Troostit 310	A1. 331
A2. Übergangszzone	A2. Perlit	A2. Perlit 244	A2. 275
A3. mittlere Zone des Schwertes	A3a. Perlit + Ferrit A3b. Ferrit + Perlit	A3a. Perlit 222 A3b. Ferrit 127	A3a. 209 A3b. 115
B. linke Deckschicht	B. Ferrit + Perlit	B. Perlit 202	
B1. Schneidezzone			B1. 168
B2. mittlere Zone des Schwertes			B2. 165
C. rechte Deckschicht	C. Ferrit + Perlit	C. Perlit 205	
C1. Schneidezzone			C1. 170
C2. mittlere Zone des Schwertes			C2. 174
Schwert aus Vindonissa (Inventarnr. 1938)			
A. Schneide	A. Sorbit	A. Sorbit 223	A. 216
B. linke Deckschicht	B. Sorbit + Ferrit	B. Sorbit 153 Ferrit	
B1. Schneidezzone			B1. 170
B2. mittlere Zone des Schwertes			B2. 149
B3. Übergangszzone	B3. Ferrit + Sorbit		B3. 144
C. rechte Deckschicht	C. Sorbit + Ferrit	C. Sorbit 203 Ferrit	
C1. Schneidezzone			C1. 193
C2. mittlere Zone des Schwertes			C2. 170
C3. Übergangszzone	C3. Ferrit + Sorbit		C3. 140
D. Kern	D. Ferrit	D. Ferrit 143	D. 108
Schwert aus Augst (Inventarnr. 1961.1568)			
A. Schneide I	A. Ferrit	A. Ferrit 163	A. 178
B. mittlere Zone des Schwertes	B. Ferrit	B. Ferrit 167	B. 181
C. Schneide II	C. Ferrit	C. Ferrit 140	C. 168

Tabelle II Ergebnisse der quantitativen chemischen Analyse

	chemische Zusammensetzung (in %)				
	Si	P	Mn	Ni	Cu
Römer-Museum Augst 1961.4401	0,20	0,13	0,06	0,15	0,21
Vindonissa-Museum Brugg 1938	0,15	0,08	0,04	0,06	0,03
Römer-Museum Augst 1961.1568	0,09	0,30	0,02	0,09	0,02

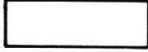

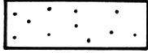

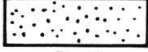

	Eisen	<0.02 %C		wärmebehandelter Stahl
F				
	Weichstahl	0.02 ÷ 0.3 %C		Schmiede-Schweiß-Nähte
F+P				
	Halbhartstahl	0.3 ÷ 0.5 %C	F - Ferrit	M - Martensit
P+F			P - Perlit	T - Troostit
	Hartstahl	0.5 ÷ 0.8 %C		S - Sorbit
P+F ÷ P				

Abb. 2 Legende zu den Abbildungen 3, 7, 12.

Schwert aus Augst (Inventarnr. 1961.4401)

Die polierte Querschnittfläche dieses Schwertes wurde mit 4% Nital geätzt, wodurch das in *Abb. 3a* dargestellte Makrogefüge freigelegt wurde. Die Makrogefügeaufnahme war dann die Grundlage für die Erarbeitung einer schematischen Darstellung der Verteilung von Gefügebestandteilen am Schwertquerschnitt (*Abb. 3b*). Die in diesem Schema aufgeführten Kohlenstoffgehalte in den jeweiligen Schwertbereichen wurden aufgrund metallographischer Prüfungen annäherungsweise ermittelt. Die im folgenden neben den Prüfungsergebnissen präsentierten Mikrogefügeaufnahmen entstammen den in *Abb. 3c* eingezeichneten Querschnittbereichen. Die Freilegung des Makrogefüges erlaubte eine Aussonderung von drei unterschiedlichen Werkstoffschichten. Zwei davon, an den gegenüberliegenden Klingflächen gelegen, gekennzeichnet durch eine ausgeprägte Gefügestreifigkeit, bilden eine Art Deckschichten mit einer Innenschicht (Kern) dazwischen. Die in verschiedenen Querschnittbereichen durchgeführten Härtemessungen ergaben, dass diese Deckschichten, deren Härte zwischen 165 und 174 HV variiert, aus einem gleichartigen Werkstoff hergestellt wurden. Die Härte des Kernes ist stärker differenziert und beträgt 331 HV an der Schneide und im mittleren Teil 115–209 HV, was mit entsprechenden Mikrogefügeunterschieden im Zusammenhang steht.

Aufgrund mikroskopischer Gefügebetrachtung ist festzustellen, dass die Deckschichten aus Weichstahl mit 0,1–0,3% Kohlenstoffgehalt im Schmiedeprozess verarbeitet wurden. Der Kern dagegen ist aus höhergekohltem Stahl gefertigt. Der Kohlenstoffgehalt im Kern reicht von 0,77% nahe der Schneide bis zu 0,1–0,5% im mittleren Teil (*Abb. 3b*). Unmittelbar an der Schneidekante enthält der Werkstoff 0,4–0,5% C.

Der Charakter der Mikrogefügeänderungen am Querschnitt der mittleren Zone ist aus *Abb. 4a–f* ersichtlich. In den Deckschichten kommt das ferritisch-perlitische Gefüge mit Ferritkorn, angeordnet nach dem Widmannstätten System, vor (*Abb. 4b*). Das Mikrogefüge der Deckschichten zeichnet sich auch durch eine früher beobachtete makroskopische Streifigkeit als Folge der weitgehenden plastischen Umformung eines chemisch inhomogenen Werkstoffes aus. Gewisse Merkmale im

Mikrogefüge der Deckschichten legen den Schluss nahe, dass sie beim Schmiedeprozess durch Schweissen mehrerer Werkstoffteile mit annähernd gleicher chemischer Zusammensetzung erzeugt wurden. Auf diese Merkmale soll bei der Besprechung der Morphologie der Schlackeneinschlüsse näher eingegangen werden.

An den Verbindungsstellen zwischen Deckschichten und Kern sind deutliche Schweissnähte zu sehen (Abb. 4c, f). Das Gefüge des Kernes im Querschnitt von Abb. 4a wechselt von einem ferritisch-perlitischen (rechts in Abb. 4d) zu einem perlitisch-ferritischen (links in Abb. 4e). Abb. 5a–d zeigt den Charakter von Mikrogefügeänderungen im Schwertquerschnitt nahe der Schneide. Auch in dieser Zone weisen Deckschichten ein ferritisch-perlitisches Gefüge mit verstärkter Streifigkeit auf. Im Kern hingegen wird ein deutlicher Anstieg des C-Gehaltes im Vergleich zu dem vorher besprochenen Querschnitt beobachtet; zum Gefügebestandteil wird also Perlit mit nur noch vereinzelt Ferritkörnern (Abb. 5b, c). Aus Abb. 6a–c ist das Makrogefüge der Schwertschneide zu ersehen. Die Dreischichtenstruktur des Schwertes bleibt auch in der Schneide erhalten, obwohl rechts ein beträchtlicher, durch Korrosion verursachter Verlust von Deckschicht-Material zu sehen ist. Unmittelbar an der Schneidekante treten im Mikrogefüge nadelförmige Bereiche auf, die eine stellenweise Wärmebehandlung bezeugen (Abb. 6b, c). Da die Perlitkolonien in den Deckschichten mit charakteristischen Ferrithöfen umgeben sind (Abb. 5d), kann man den Schluss ziehen, dass die Abschrecktemperatur der Schneide bei 727–910 °C lag.

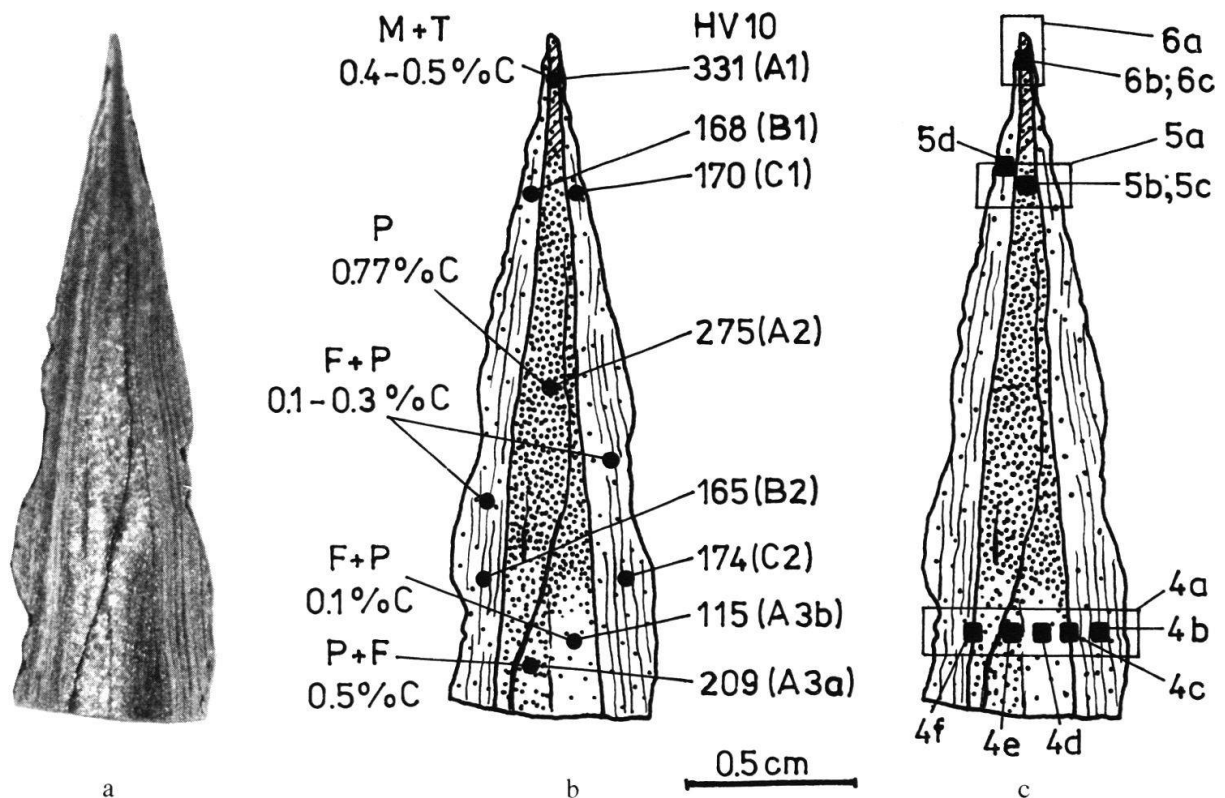


Abb. 3 Schwert aus Augst (Inventarnr. 1961.4401):
a) makroskopische Aufnahme des Querschnitts;
b) schematische Darstellung der Verteilung von Gefügebestandteilen mit Angabe von Härte-
werten (HV 10);
c) Kennzeichnung der mikroskopischen Beobachtungsstellen im Querschnitt.

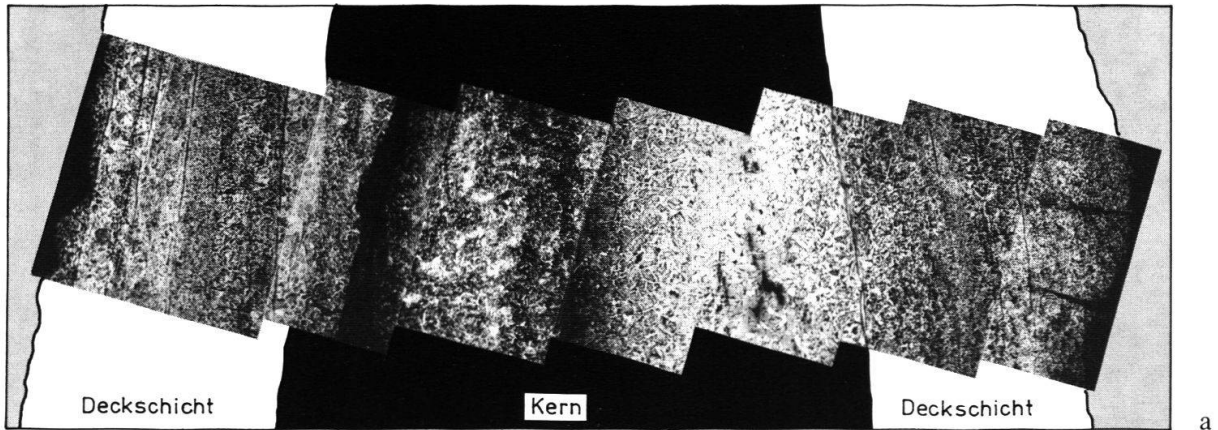
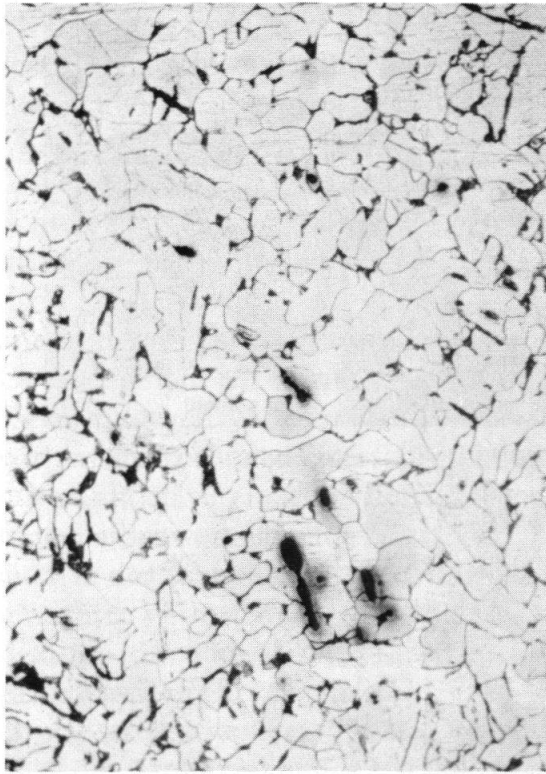
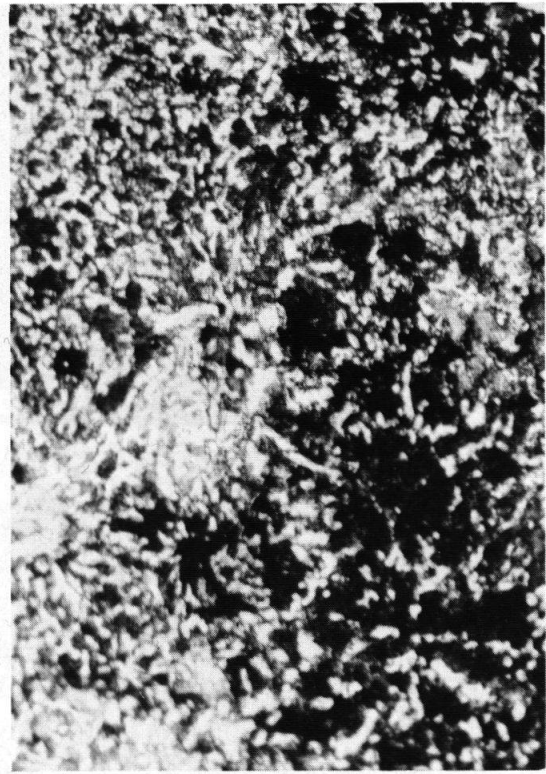


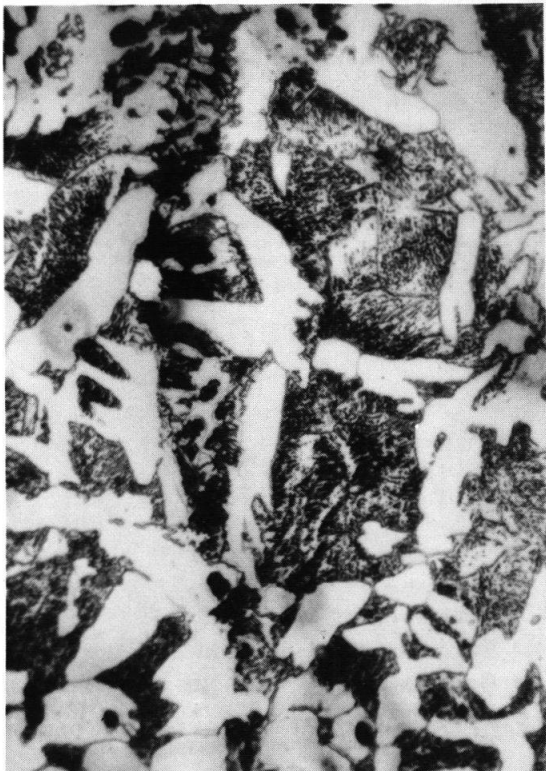
Abb. 4 Mikrostrukturen des Schwertes aus Augst (Inventarnr. 1961.4401) in der mittleren Klingenzone:
 a) Gesamtbild, $V = 45 \times$ (Abb. 20 \times);
 b) rechte Deckschicht, Ferrit + Perlit, $V = 300 \times$;
 c) Schweissnahtstelle zwischen Kern und der rechten Deckschicht, Ferrit + Perlit, $V = 600 \times$;



d

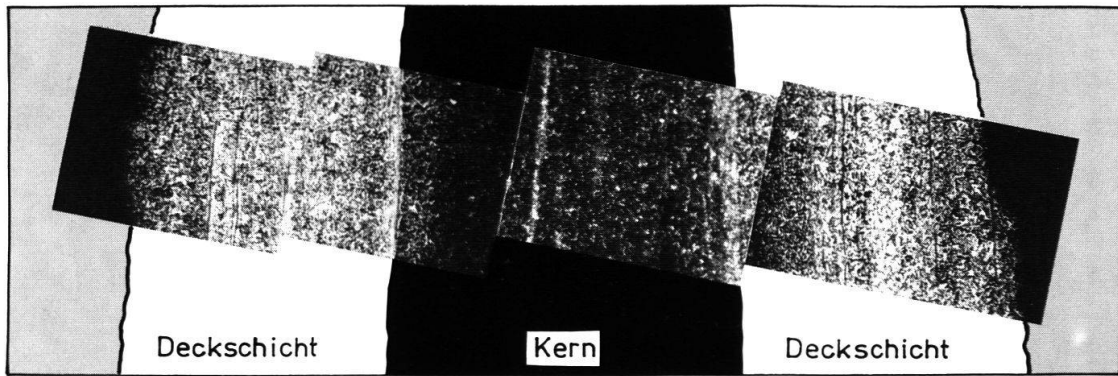


e

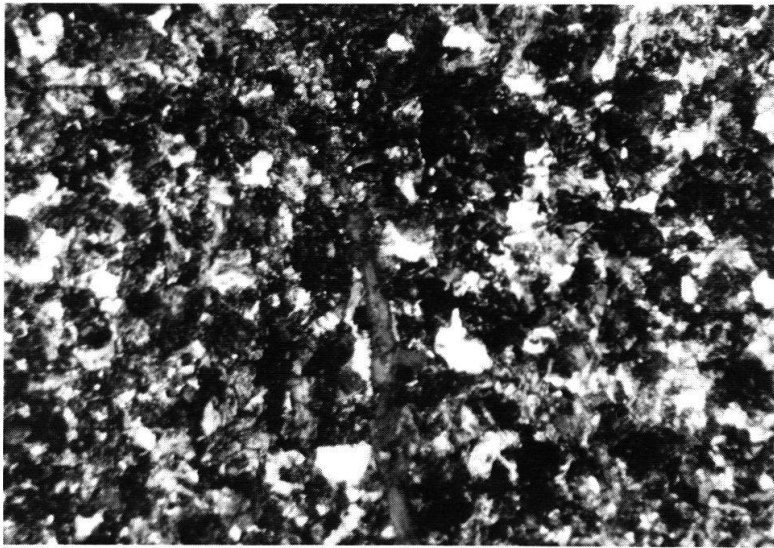


f

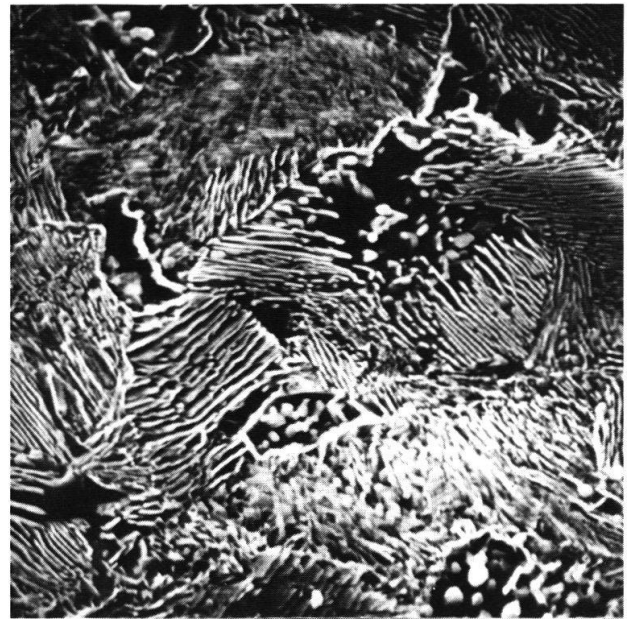
Abb. 4 d) mittlere Kernzone (niedriggekohlt), Ferrit + Perlit, $V = 150 \times$;
e) mittlere Kernzone (höhergekohlt), Perlit + Ferrit, $V = 300 \times$;
f) Schweissnahtstelle zwischen Kern und der linken Deckschicht, Perlit + Ferrit, $V = 600 \times$.



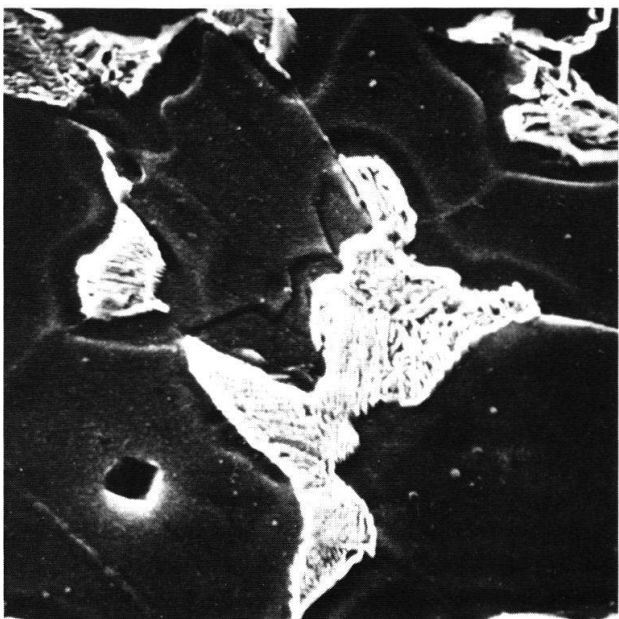
a



b



c



d

Abb. 5 Mikrostrukturen des Schwertes aus Augst (Inventarnr. 1961.4401) in der Schneidezone:

a) Gesamtbild, $V = 45 \times$ (Abb. 25 \times);

b) Struktur des Kernes, Perlit + Ferrit, $V = 300 \times$;

c) Ausschnitt aus Abb. 5b, Lamellenperlit (REM – rasterelektronenmikroskopisch), $V = 5800 \times$;

d) linke Deckschicht, sichtbare Umhüllungen der Perlitkörner (REM), $V = 5800 \times$.

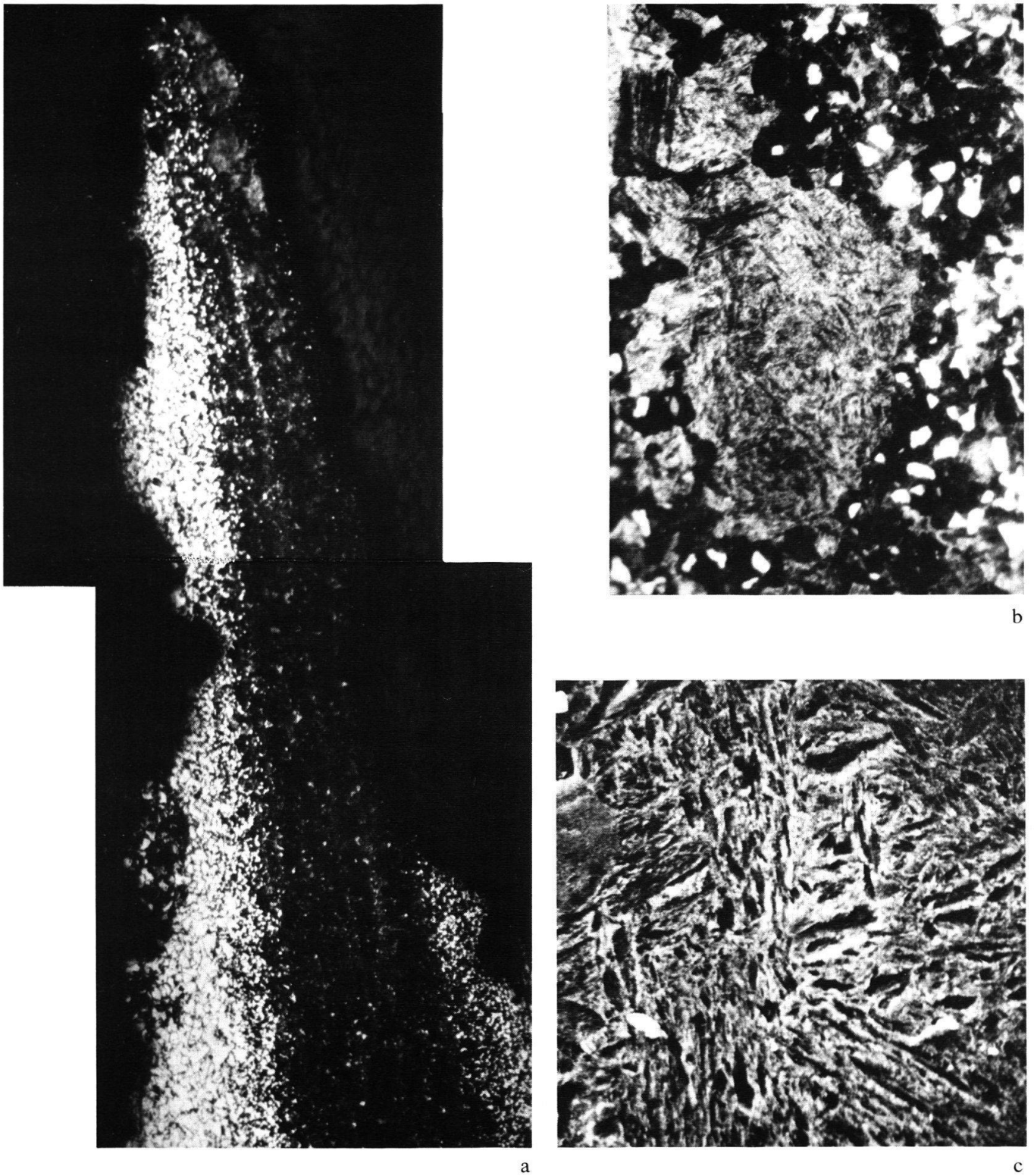


Abb. 6 Mikrostrukturen des Schwertes aus Augst (Inventarnr. 1961.4401) in der Schneide:
 a) Gesamtbild, $V = 50 \times$;
 b) Schneide, sichtbare Spuren der Wärmebehandlung, Martensit + Troostit, $V = 600 \times$;
 c) Martensit in der Schneide (REM), $V = 2800 \times$.

Schwert aus Vindonissa (Inventarnr. 1938)

Das in bereits dargestellter Art und Weise freigelegte Makrogefüge ist in *Abb. 7a* zu sehen. Das Schema der Verteilung von Gefügebestandteilen im Schwertquerschnitt ist in *Abb. 7b* dargestellt. In *Abb. 7c* werden mikroskopisch beobachtete Zonen aufgeführt. Aus dem Makrogefügebild des Schwertes geht klar hervor, dass es, ähnlich wie das Exemplar von Augst (Inventarnr. 1961.4401), aus drei Werkstoffschichten besteht. Die dunkleren Aussenschichten (Deckschichten) enthalten 0,3–0,5% C und besitzen eine Härte von 149–193 HV. Die höheren Härtewerte der Deckschichten in der Schneidzone, die ungefähr bis zu 216 HV betragen, sind das Ergebnis der Wärmebehandlung. Der Eisenkern mit einem makroskopisch sichtbaren Korngefüge weist praktisch keinen C-Gehalt auf und hat eine Härte von ca. 108 HV. In *Abb. 8a–h* ist ein Beispiel für die Differenzierung des Mikrogefüges im Querschnitt nahe der mittleren Klingenzone angegeben. Das Mikrogefüge der Deckschichten im Bereich der gegenüberliegenden Klingenoberflächen ist in *Abb. 8b, c* dargestellt. Das Mikrogefüge ist durch nadelförmige Ferritausscheidungen mit Perlit auf dem Hintergrund des Sorbits gebildet. Mit geringer werdendem Abstand zum Kern steigt der Ferritanteil an (*Abb. 8d, e*). Die allgemeinen Gefügemerkmale weisen darauf hin, dass dieses Gefüge infolge der Abschreckung entstanden ist. Im Kern tritt ein grobkörniges Ferritgefüge (*Abb. 8g*) mit stellenweise zahlreichen grossen Schlackeneinschlüssen auf (*Abb. 8h*). Die Schweissnähte, welche die Deckschichten mit dem Kern verbinden, kommen je nach Beobachtungsstelle mehr oder weniger deutlich zum Ausdruck. Im Bereich der Schweissnähte setzt ein Wechsel des C-Gehaltes ein (*Abb. 8d, f; 9a, b*). Den Verlauf der Schweissnähte festzustellen, wird gelegentlich auch durch das Vorhandensein von Schlackeneinschlüssen an der Verbindungsstelle verschiedener Werkstoffteile erleichtert (*Abb. 9b*). Nahe der Schneide rücken die Schweissnähte beider gegenüberliegender Deckschichten näher zusammen (*Abb. 9c*), indem sie eine Zone bilden, in der es nicht zur Durchmischung der Werkstoffe von Kern und Deckschichten gekommen ist. In dieser Zone sind verschiedenartige Schlacken vorhanden (*Abb. 9d*). Die Schneidekante weist ein nadeliges Gefüge auf (*Abb. 10a–c*), was eine Wärmebehandlung bezeugt. In der Schneidzone tritt eine Unterbrechung des Zusammenhangs auf (*Abb. 11*), die als Fehler im für die Schwertherstellung verwendeten Werkstoff zu deuten ist. Die Beobachtungen des Mikrogefüges lassen vermuten, dass das ganze Schwert bei einer Temperatur von 727–910 °C abgeschreckt und anschliessend auf weniger als 727 °C erwärmt wurde.

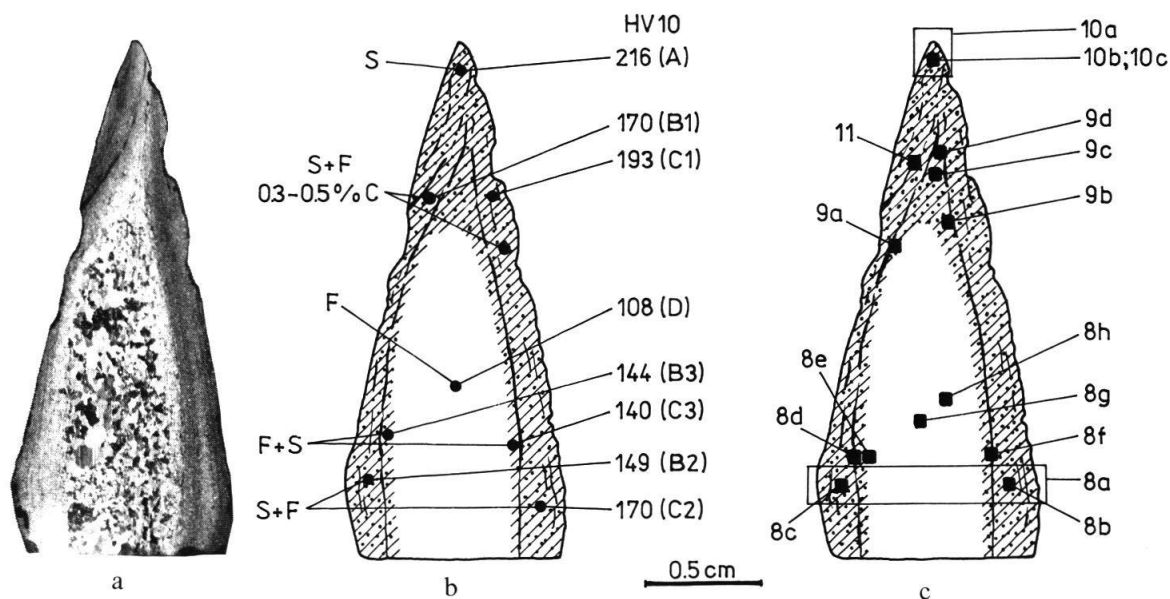


Abb. 7 Schwert aus Vindonissa (Inventarnr. 1938):
 a) makroskopische Aufnahme des Querschnitts;
 b) schematische Darstellung der Verteilung von Gefügebestandteilen mit Angabe von Härtewerten (HV 10);
 c) Kennzeichnung der mikroskopischen Beobachtungsstellen im Querschnitt.

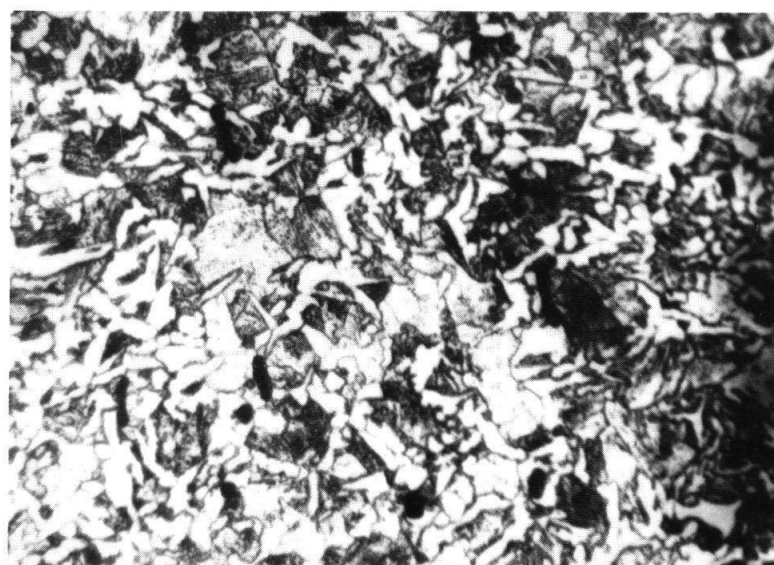
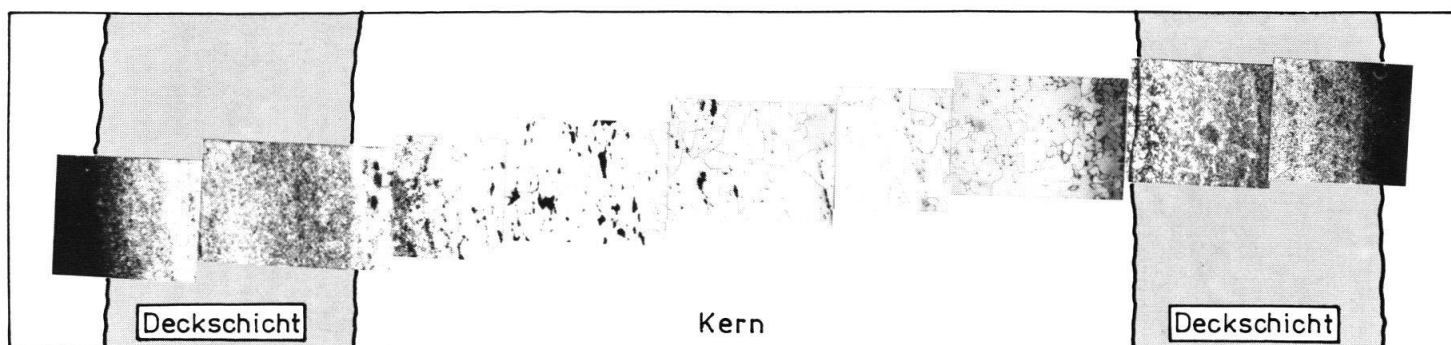
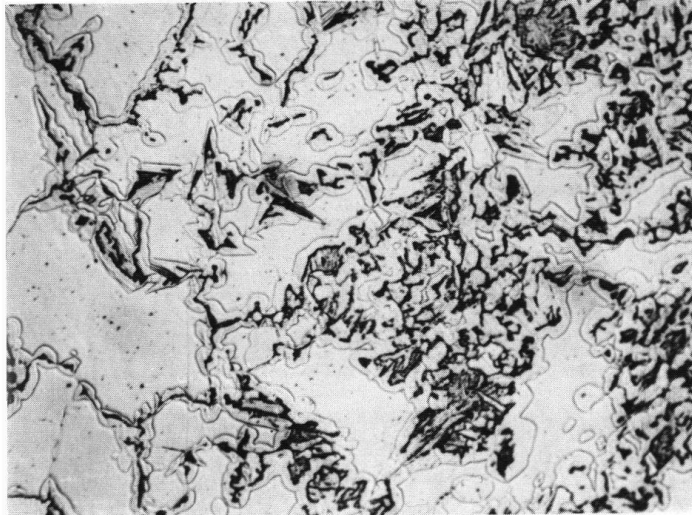
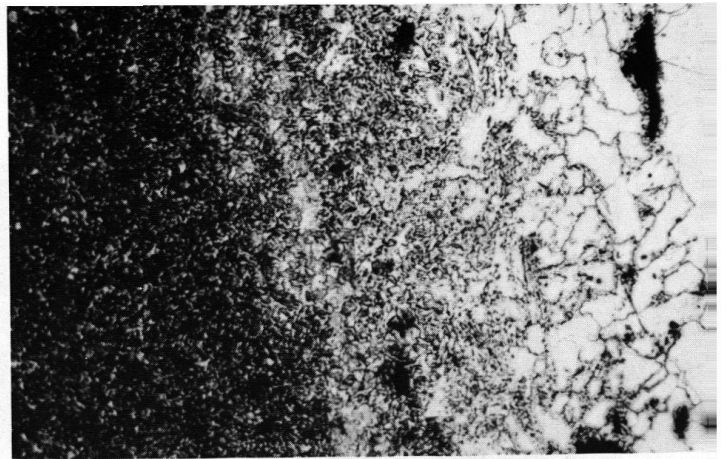


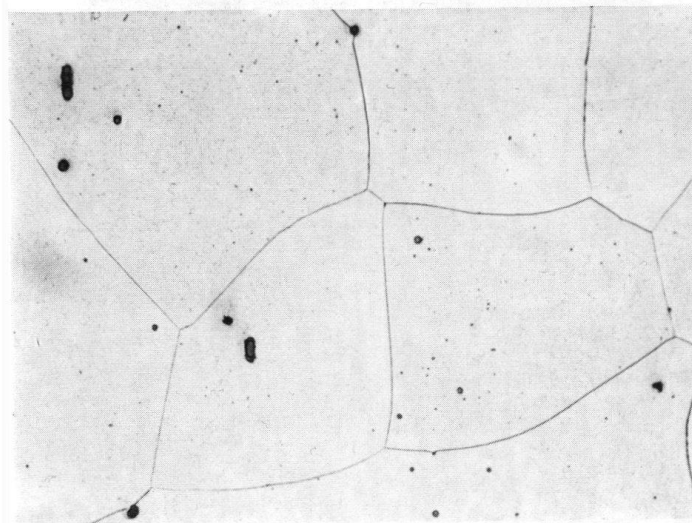
Abb. 8
 Mikrostrukturen des Schwertes aus Vindonissa (Inventarnr. 1938) in der mittleren Klingenzone:
 a) Gesamtbild, $V = 27 \times$ (Abb. 15 \times);
 b) rechte Deckschicht, Ferrit + Sorbit, $V = 600 \times$;



c



e



g

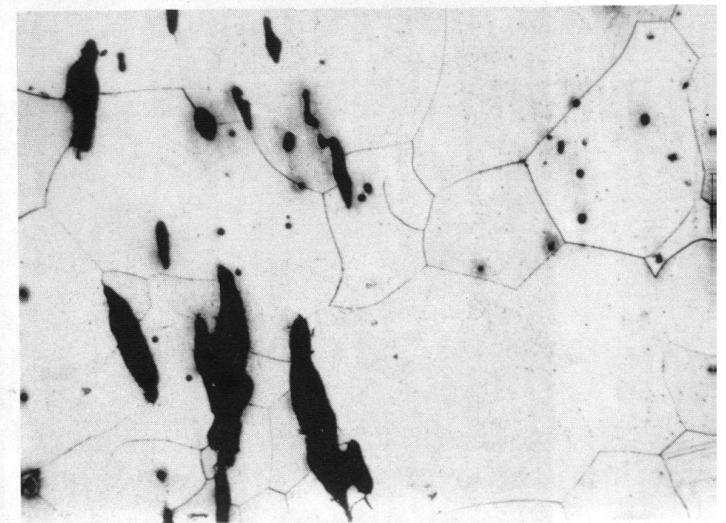
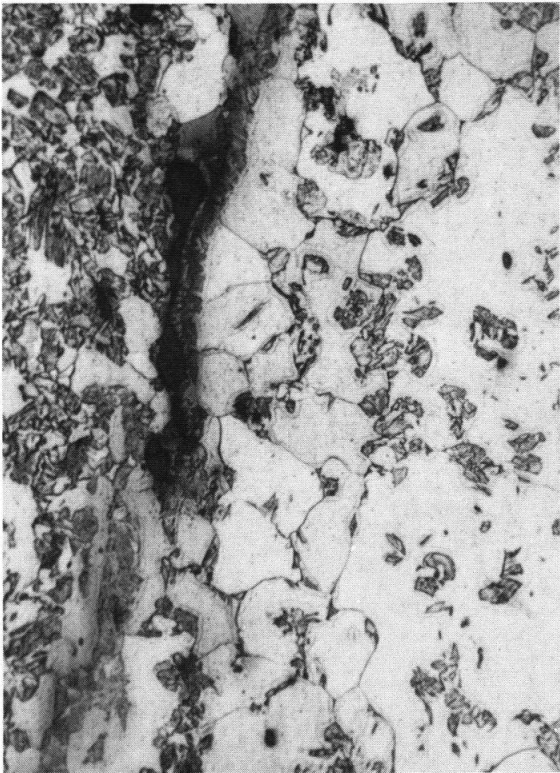
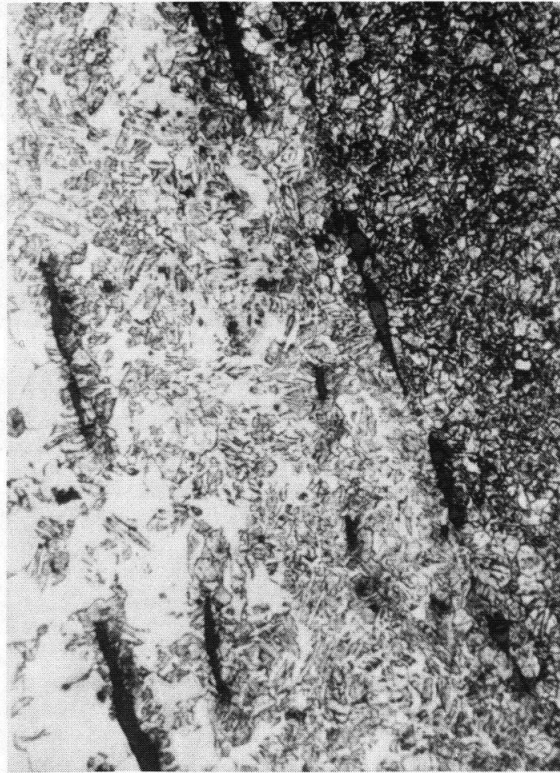


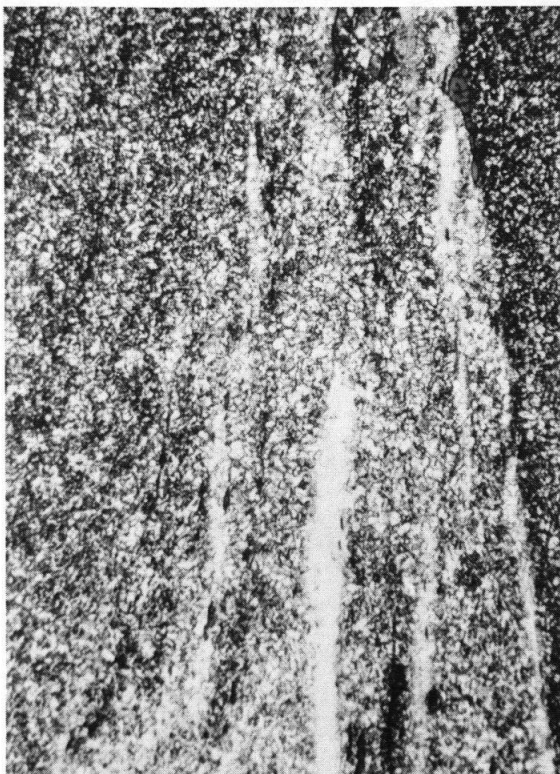
Abb.8 c) linke Deckschicht, Ferrit + Sorbit, $V = 600 \times$;
 d) Schweissnahtstelle zwischen Kern und der linken Deckschicht, $V = 75 \times$;
 e) Mikrostruktur des Kernes in der Zone der Schweissnahtstelle, Ausschnitt aus Abb. 8c, sichtbare Umhüllungen der Perlitkörner, $V = 300 \times$;
 f) Schweissnahtstelle zwischen Kern und der rechten Deckschicht, $V = 300 \times$;
 g) grobkörniger Ferrit im Kern, $V = 150 \times$;
 h) grosse Schlackeneinschlüsse im Kern, $V = 150 \times$.



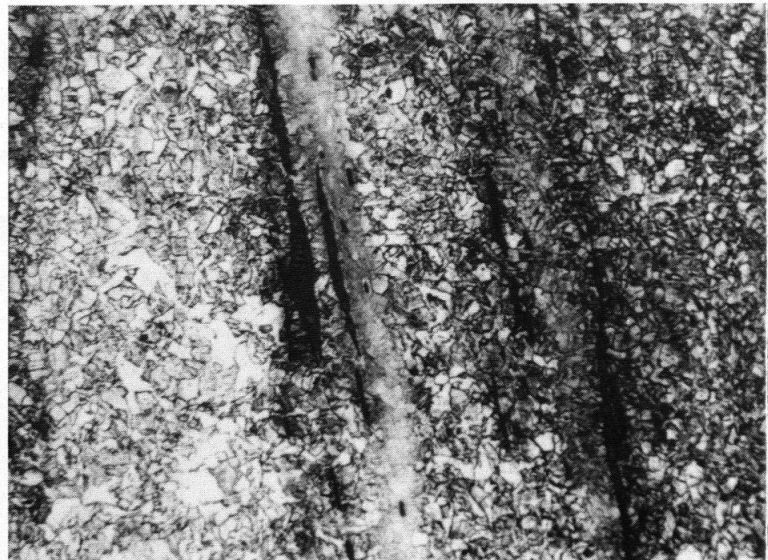
a



b



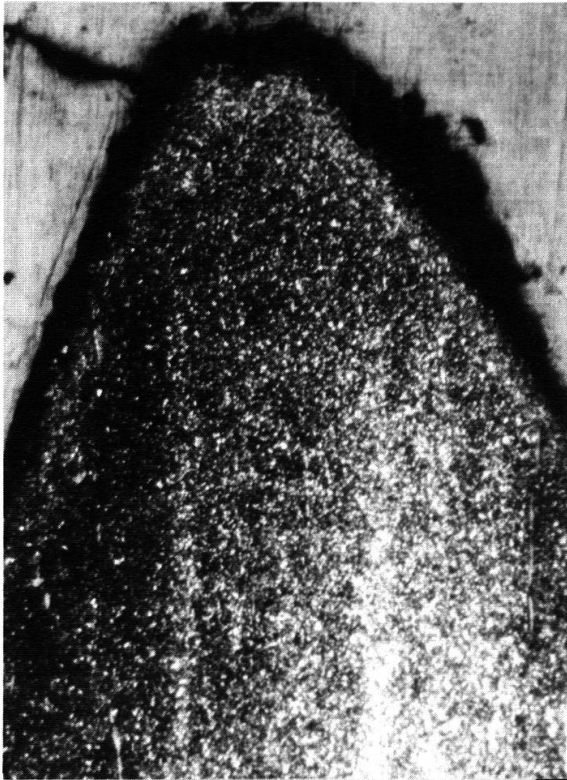
c



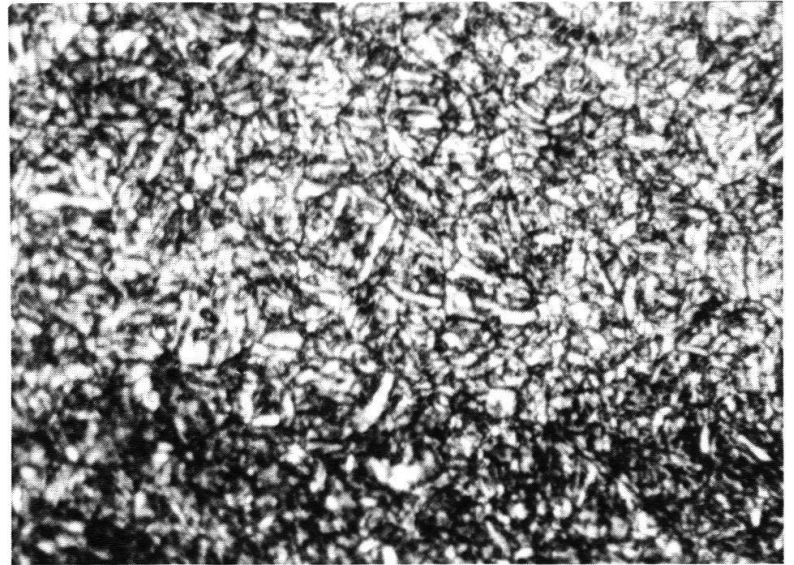
d

Abb. 9 Mikrostrukturen des Schwertes aus Vindonissa (Inventarnr. 1938) in der Übergangszone zwischen Kern und Schneide:

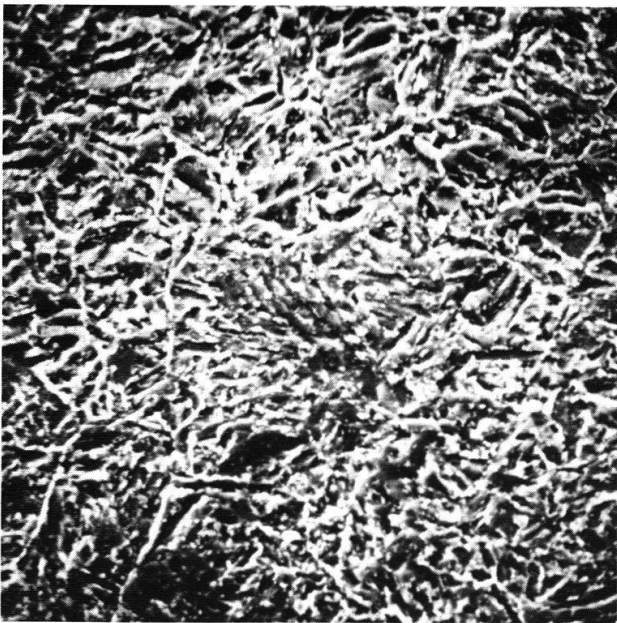
- a) unterschiedliche C-Gehalte beiderseits der Schweissnahtstelle, $V = 150 \times$;
- b) Schlackeneinschlüsse in der Schweissnahtzone; $V = 150 \times$;
- c) Mischzone des Materials von Kern und Deckschichten, $V = 75 \times$;
- d) Schlackeneinschlüsse in der gleichen Zone wie in Abb. 9c, $V = 150 \times$.



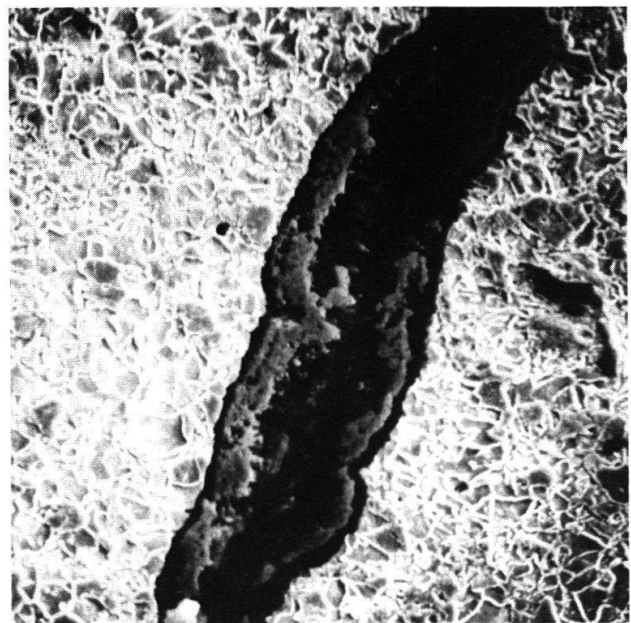
10a



10b



10c



11

Abb. 10 Mikrostrukturen in der Schneide des Schwertes aus Vindonissa (Inventarnr. 1938):
a) Schneide, $V = 75 \times$;
b) Sorbit in der Schneide, $V = 600 \times$;
c) Sorbit in der Schneide, (REM), $V = 1200 \times$.

Abb. 11 Schwert aus Vindonissa (Inventarnr. 1838). Unterbrechung des Materials nahe der Schneide, mit Schlacke verfüllt (REM), $V = 525 \times$.

Schwert aus Augst (Inventarnr. 1961.1568)

Das Makrogefüge des Schwertes einschliesslich der schematischen Verteilung von Gefügebestandteilen im Querschnitt und der Beobachtungsstellen des Mikrogefüges ist in *Abb. 12a–c* dargestellt. Der Charakter des Makrogefüges verweist auf eine andere, einfache Fertigungstechnik des Schwertes. Die Härtemessungen ergaben keine eindeutigen Unterschiede zwischen den einzelnen Querschnittsbereichen (*Abb. 12b*). Aus den mikroskopischen Beobachtungen geht hervor, dass das ganze Schwert aus Eisen verfertigt ist, bei dem der C-Gehalt den Grenzwert der Löslichkeit nicht überschreitet (kein Zementit vorhanden).

Beispiele von Mikrogefügen im Querschnitt sind in *Abb. 13a–f* wiedergegeben. Bei jedem beobachteten Bereich ist das Gefüge durch den grobkörnigen Ferrit mit zahlreichen grossen Schlackeneinschlüssen gebildet. In dunkleren Zonen (*Abb. 12a*) wurden mikroskopisch sehr grobe Ferritkörner mit gelegentlichen Verformungszwillingen festgestellt (*Abb. 13e*). Aufgrund der Analyse der chemischen Zusammensetzung

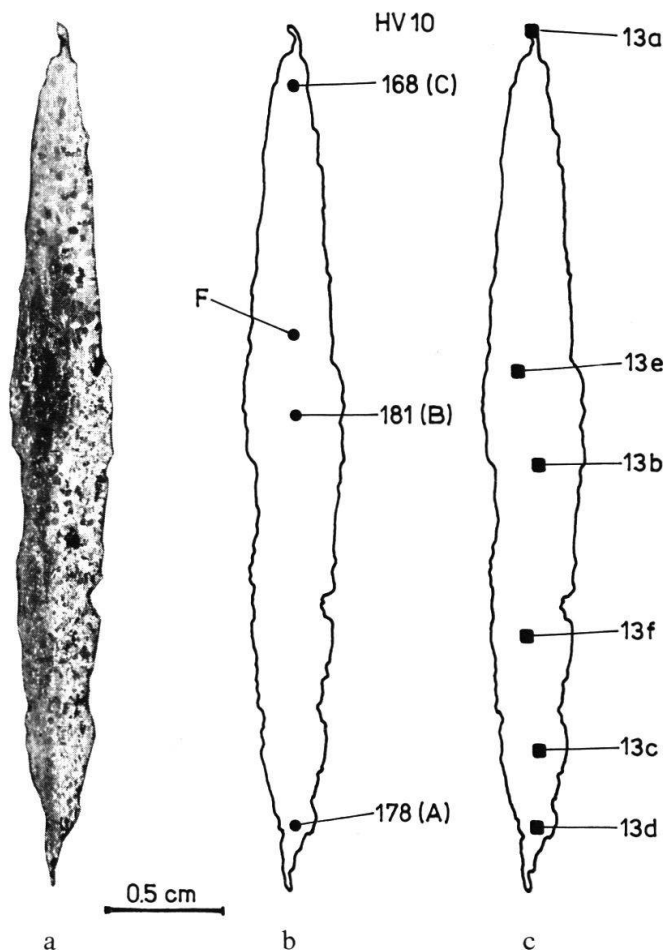
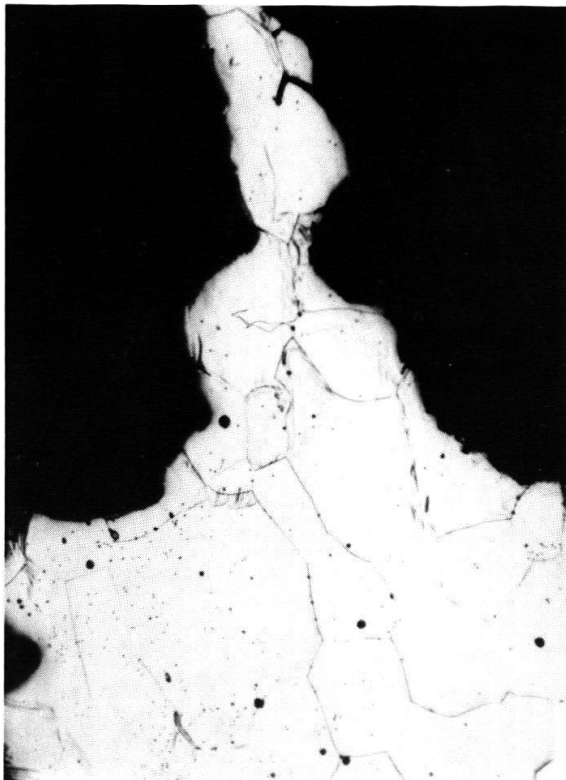


Abb. 12 Schwert aus Augst (Inventarnr. 1961.1568):
a) makroskopische Aufnahme des Querschnitts;
b) schematische Darstellung der Verteilung von Gefügebestandteilen mit Angabe von Härtewerten (HV 10);
c) Kennzeichnung der mikroskopischen Beobachtungsstellen im Querschnitt.

zung, die einen Phosphorgehalt von 0,3% ergeben hat, des grobkörnigen Gefüges und des Auftretens von sog. Verformungszwillingen ist anzunehmen, dass wir es mit den Bereichen mit erhöhtem Phosphorgehalt zu tun haben. Vermerkt sei auch noch, dass das ganze Schwert aus phosphorhaltigem Eisen gefertigt ist; aus diesem Grunde erreicht die Ferrithärte verhältnismässig hohe Werte von 168–181 HV. Von der minderwertigen Qualität des für die Fertigung des Schwertes verwendeten Werkstoffes mag auch das Vorhandensein von zahlreichen grossen Schlackeneinschlüssen zeugen. Ein Beispiel eines unter Anwendung des Lichtmikroskopes beobachteten Schlackeneinschlusses ist in *Abb. 13f* zu sehen.



a



b

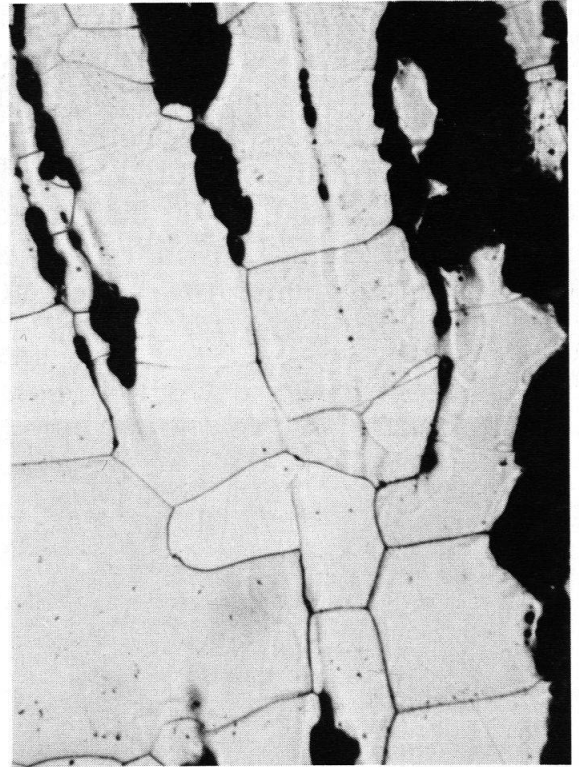
Abb. 13 Mikrostrukturen des Schwertes aus Augst (Inventarnr. 1961.1568):

a) Ferrit in der Schneide, $V = 75 \times$;

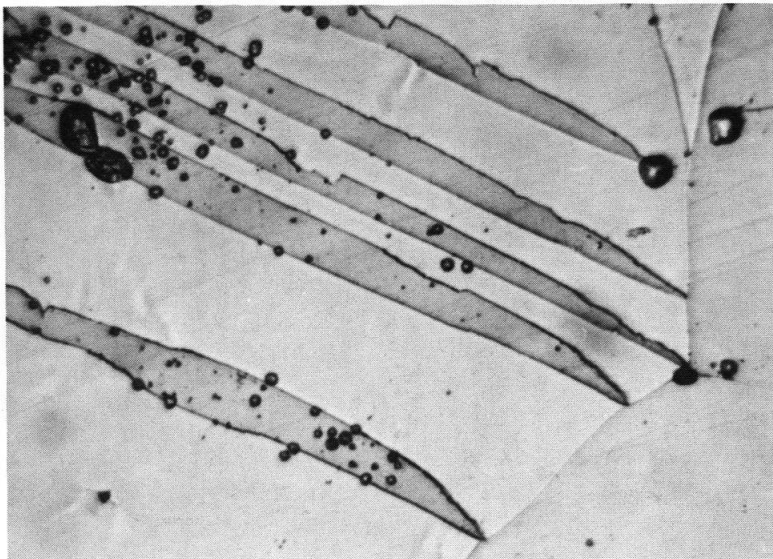
b) grobkörniger Ferrit in der mittleren Klingenzone, $V = 150 \times$;



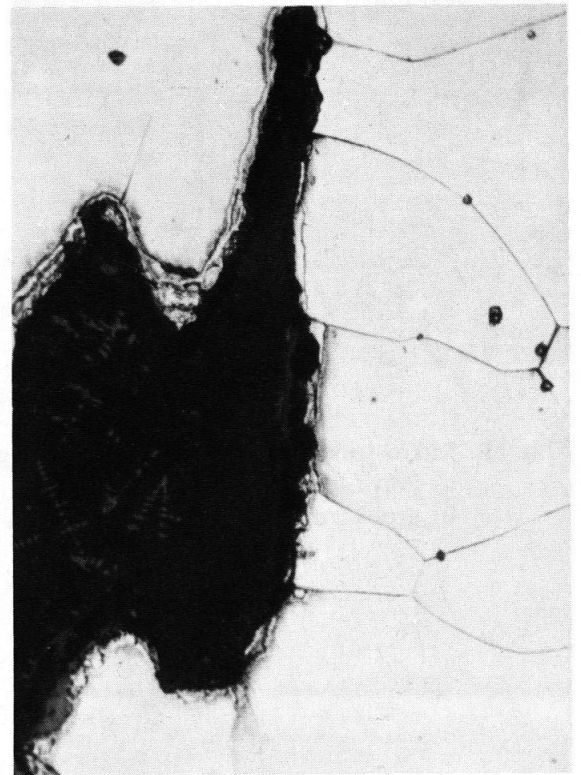
c



d



e



f

Abb. 13 c) Schlackeneinschlüsse in der Ferrit-Grundmasse, $V = 75 \times$;
 d) wie in Abb. 13c, $V = 150 \times$;
 e) Verformungszwillinge im Ferrit mit hohem Phosphor-Gehalt, $V = 600 \times$;
 f) Mikrogefüge eines grossen Schlackeneinschlusses, $V = 300 \times$.

Analyse von Schlackeneinschlüssen

Die Analyse von Schlackeneinschlüssen wurde unter Anwendung des Rasterelektronenmikroskopes, ausgerüstet mit «Kevex»-Spektrometer, durchgeführt. Die Beobachtung des Makro- und Mikrogefüges ergab, dass sich die Schlackeneinschlüsse im Werkstoff in zwei Grundtypen einteilen lassen: Schlacke vom Schmelzprozess und Schlacke vom Schmiedeprozess. Die Schlackeneinschlüsse des Schmelzprozesses sind im Werkstoff im allgemeinen zufällig vorhanden, die anderen dagegen kommen an den Stellen vor, wo beim Schmieden pressgeschweisst wurde. Die analysierten Schlacken wurden a priori in vorgenannte Typen in Anlehnung an ihr Vorkommen und die Mikrogefügemerkmale eingeteilt; anschliessend wurde ihre chemische Zusammensetzung analysiert. Es sei betont, dass eine sichere Identifizierung der vom Schmelzprozess anfallenden Schlacken, welche nur auf den Mikrogefügemerkmalen basiert, in vielen Fällen mit beträchtlichen Schwierigkeiten verbunden war.

Schwert aus Augst (Inventarnr. 1961.4401)

Beispiele von Schlacken, die dem Schmelzprozess entstammen und im Kern dieses Schwertes vorhanden sind, sind aus *Abb. 14a; 15a* ersichtlich. Trotz ihrer weitgehend verschiedenen Form enthielten sie zumeist ähnliche chemische Elemente, vor allem Fe, Si, Ca, K (*Abb. 14b*) und gelegentlich auch noch Mn (*Abb. 15b*) und Spuren von P. Die in den Deckschichten vorkommenden Schlacken weichen in ihrer Zusammensetzung von den im Kern vorhandenen Schlacken prinzipiell nicht ab (*Abb. 16a, b*). Auffallende Unterschiede betreffen nur ihre Form. Die in den Deckschichten vorkommenden Schlacken des Schmelzprozesses erfuhren infolge eines weitgehenden Verschmiedungsprozesses des Werkstoffes eine starke Verlängerung, so dass sie ihrer

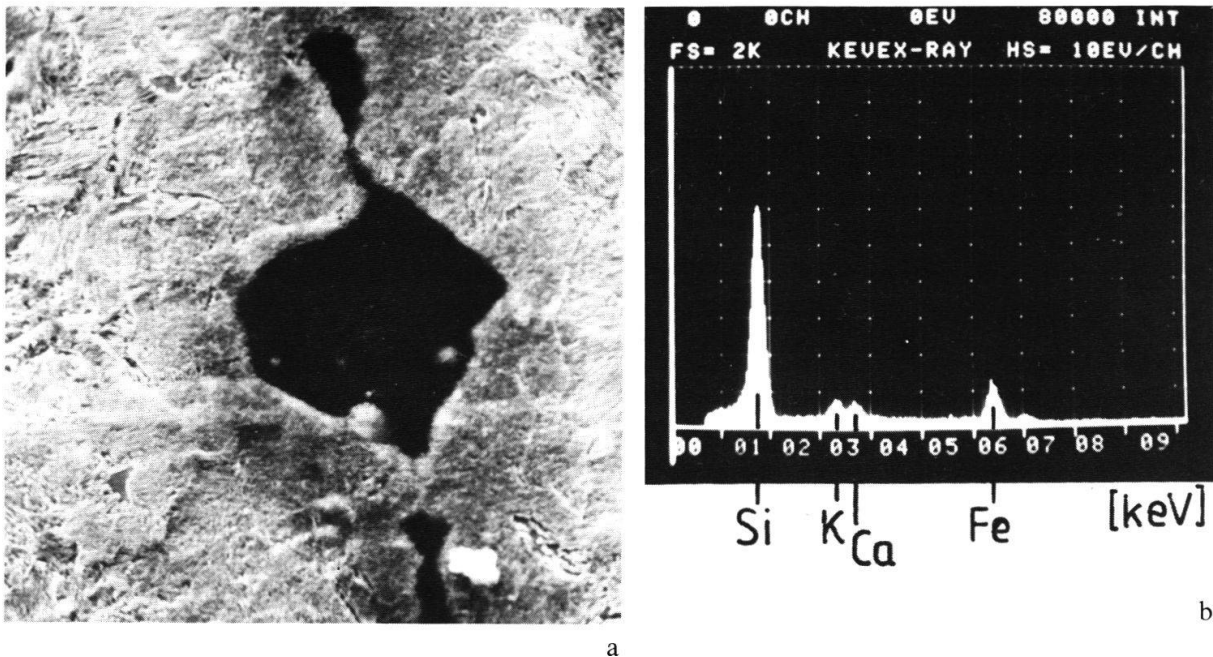


Abb. 14 Schmelzschlacke im Kern des Schwertes aus Augst (Inventarnr. 1961.4401):
a) mikroskopische Aufnahme der Schlacke (REM), $V = 2400 \times$;
b) energiedispersives Röntgenspektrum der Schlacke von Abb. 14a.

Form nach von den Schweissnahtschlacken nur schwer zu unterscheiden sind. Das Vorhandensein von K, das in der Holzkohle vorkommt, und von Si, Ca, Mn und P, die im erzführenden Gestein anzutreffen sind, in den Schlacken, die als vom Schmelzprozess stammend angenommen wurden, bestätigt die vorangehende Klassifizierung

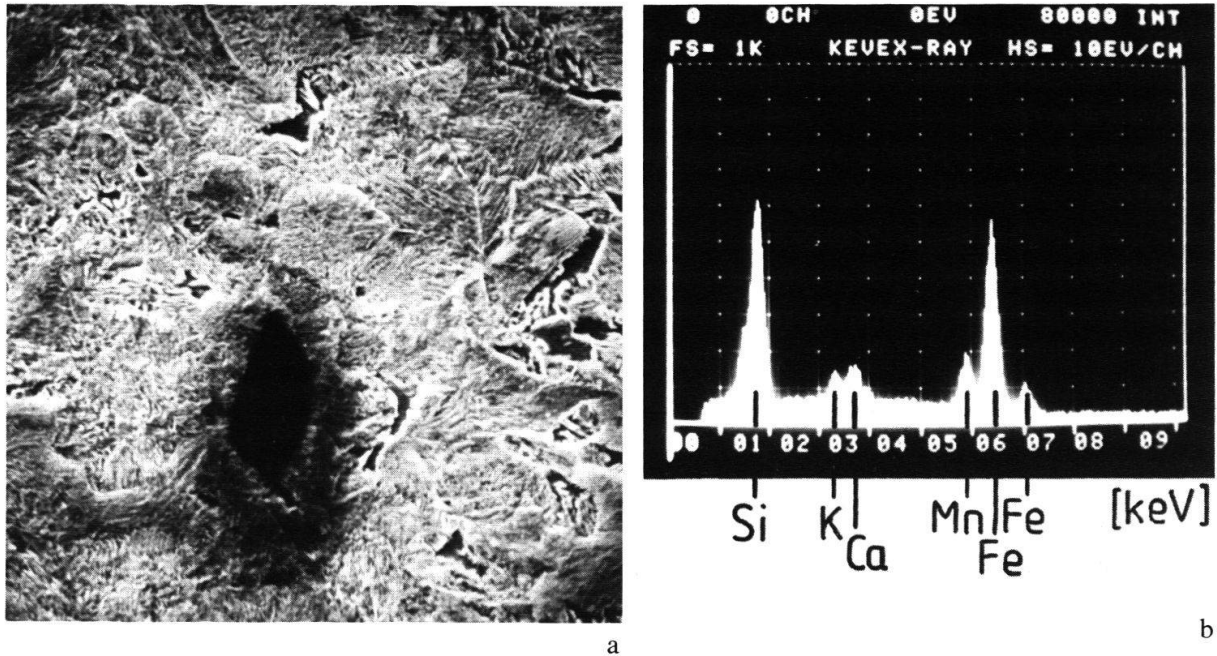


Abb. 15 Schmelzschlacke im Kern des Schwertes aus Augst (Inventarnr. 1961.4401):
a) mikroskopische Aufnahme der Schlacke (REM), V = 2500 ×;
b) energiedispersives Röntgenspektrum der Schlacke von Abb. 15a.

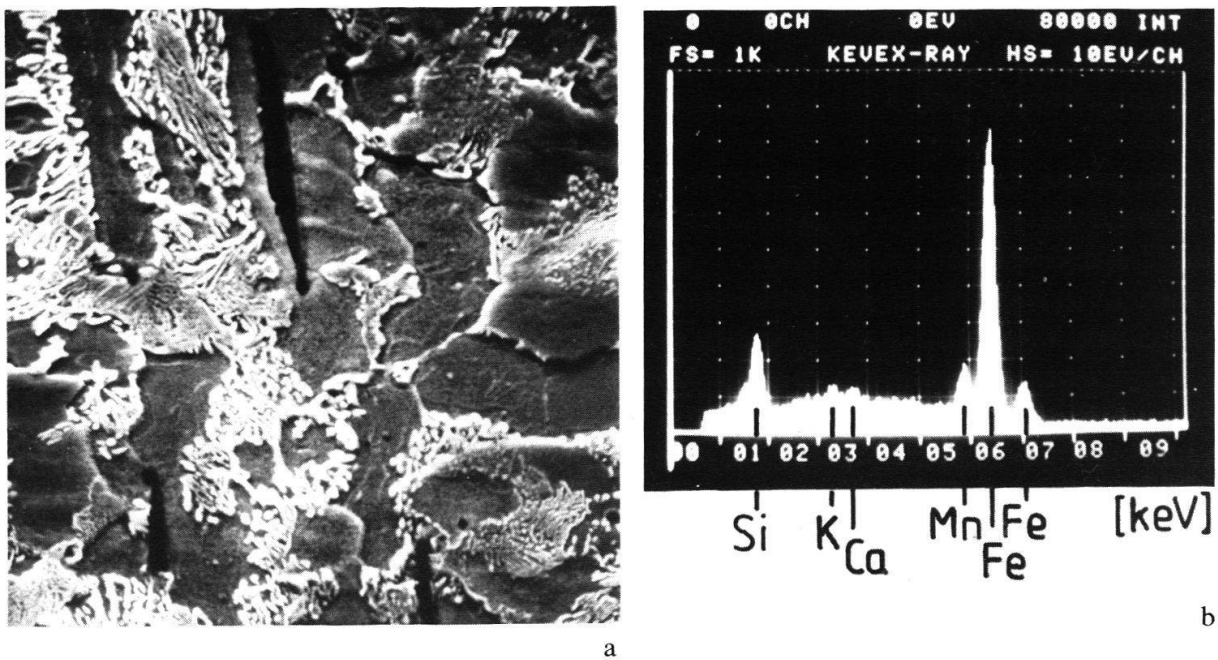
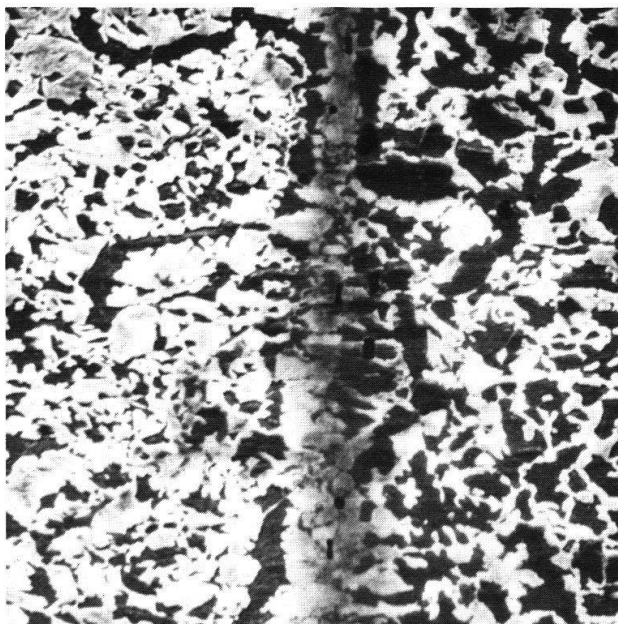


Abb. 16 Schmelzschlacken in der Deckschicht des Schwertes aus Augst (Inventarnr. 1961.4401):
a) mikroskopische Aufnahme der Schlacken (REM), V = 1900 ×;
b) energiedispersives Röntgenspektrum der Schlacken von Abb. 16a.

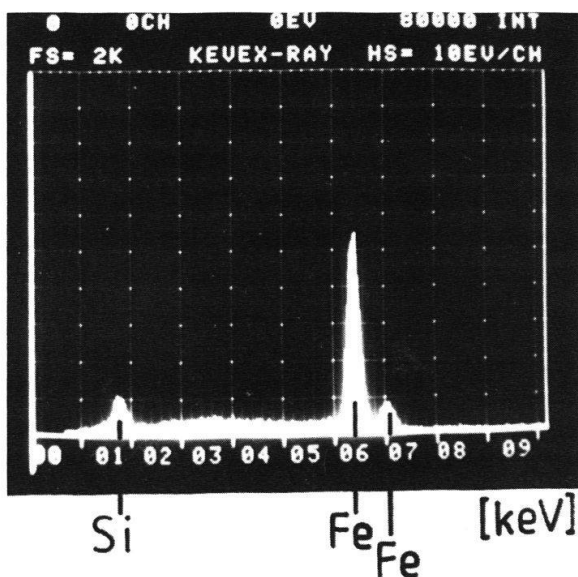
dieser Schlacken nur aufgrund ihrer Verteilungsart. Schlacken, die aufgrund der Gefügebeobachtung zu Schweissnahtstellen gehören, sind in *Abb. 17a-c* gezeigt. Im Vergleich zu den vorgenannten weisen sie eine einfachere chemische Zusammensetzung auf und enthalten vor allem Eisen (Eisenoxid) sowie niedrige Siliziumanteile. Die einfache chemische Zusammensetzung dieser Schlacken wurde als eine Bestätigung der richtigen Ortsbestimmung der Schweissnähte angenommen. Im Zusammenhang damit ist auch zu vermuten, dass die Deckschichten, in denen mehrere parallel angeordnete Streifen von chemisch einfachen Schlacken vorhanden sind, durch das mehrfache Pressschweissen eines chemisch gleichartigen Werkstoffes erzeugt wurden. Die eventuell in Frage kommende Fertigungstechnik, Pressschweissen, wurde bereits bei der Besprechung der Mikrogefügemerkmale angedeutet. Diese Gefügemerkmale lieferten aber an und für sich noch keine Grundlage für eine solche Annahme.



a



b



c

Abb. 17 Schlacken in der Schweissnahtstelle des Schwertes aus Augst (Inventar-nr. 1961.4401):
a) mikroskopische Aufnahme der Schweissnahtstelle (REM), $V = 500 \times$;
b) Ausschnitt aus *Abb. 17a* (REM), $V = 2000 \times$;
c) energiedispersives Röntgenspektrum der Schlacken von *Abb. 17b*.

Schwert aus Vindonissa (Inventarnr. 1938)

Die Einteilung in Schmelz- und Schmiedeschlacken wurde beibehalten. In *Abb. 18a; 19a* sind Beispiele der für den Kernbereich typischen Schmelzschlacken dargestellt. Die in *Abb. 18a* gezeigten Schlacken stellen mehrphasige Anhäufungen dar, in deren an Fe, Si, Ca, K reichem Grundgefüge (*Abb. 18b*) helle Eisenoxidteilchen auftreten (*Abb. 18c*). Eine andere Schlackenart (*Abb. 19a*) sind kleine Teilchen mit Fe, Si, K, Ca (*Abb. 19b*), in denen auch Spurenanteile von P (*Abb. 19c*) festgestellt worden sind. Die Schlacken des Schmelzprozesses kommen auch in den Deckschichten vor (*Abb. 20a*). Sie stellen dunkle langgezogene Teilchen dar, in denen Fe, Si, K, Ca und Mn vorherrschend sind (*Abb. 20b*) oder zuweilen auch Titan-Spuren vorkommen. Eine andere in den Deckschichten vertretene Schmelzschlackenart ist aus *Abb. 21a* zu ersehen. Es handelt sich hier um getrennte, hellere oder dunklere Teilchen

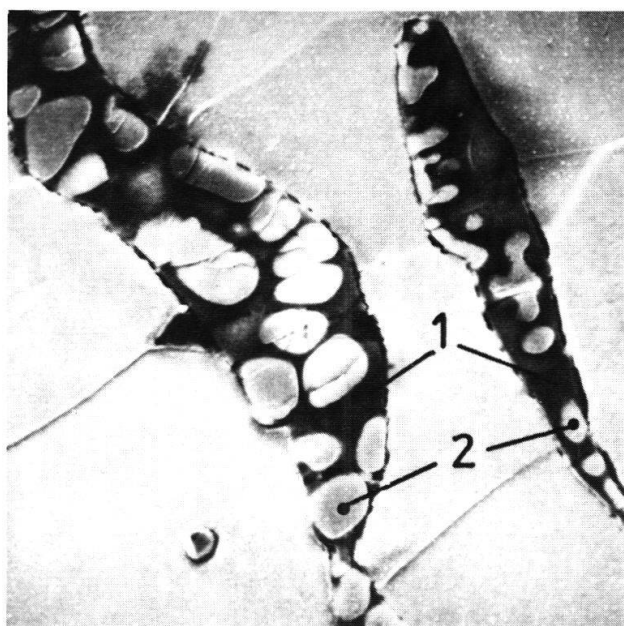
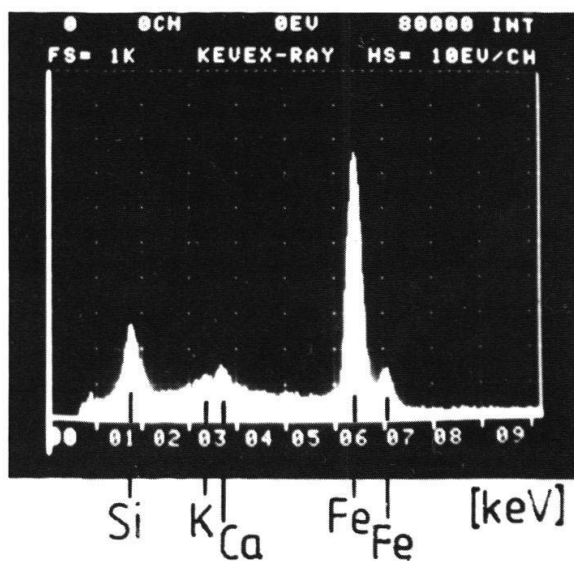


Abb. 18

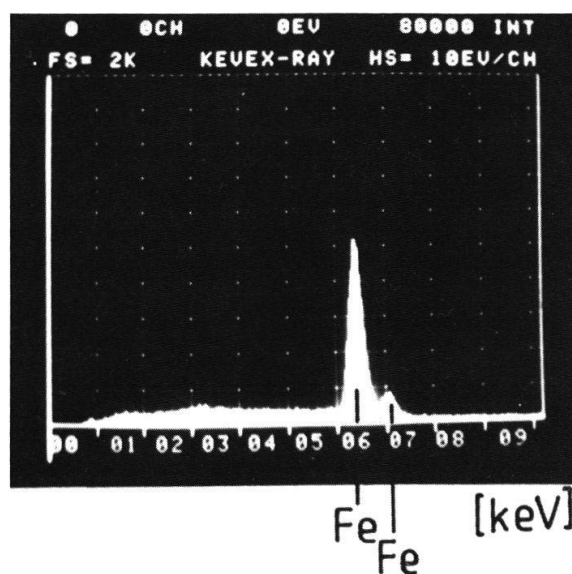
Schmelzschlacken im Kern des Schwertes aus Vindonissa (Inventarnr. 1938):

a) mikroskopische Aufnahme der mehrphasigen Schlacken (REM), $V = 1100 \times$;
 b) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 1 (dunkler Schlackenhintergrund) in *Abb. 18a*;

c) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 2 (helle Schlackenteilchen) in *Abb. 18a*.



b



c

(Abb. 21a) oder zweiphasige Anhäufungen (Abb. 21b). Unabhängig von der Morphologie enthalten die helleren Teilchen Eisen und Mangan (Abb. 21d) und die dunkleren Elemente wie Fe, Si, K, Ca und Mn (Abb. 21c). Die im Kern und in den Deckschichten vorkommenden Schmelzschlacken unterscheiden sich voneinander in der chemischen Zusammensetzung. Gegenüber der Schmelzschlacke des Kernbereiches wurde in der Schmelzschlacke der Deckschicht Mangan nachgewiesen. In den Schmelzschlacken des Kernes wurden gleichzeitig auch Phosphor-Spuren belegt, die in den Schmelzschlacken der Deckschicht überhaupt nicht vorkommen.

Schlacken, deren Vorkommensbereich darauf hindeutet, dass es sich bei ihnen um Schlacken des Schmelzprozesses handelt, sind in Abb. 22a und 23a dargestellt. Es sind dies dunkle, langgezogene Streifen von zweiphasigem Aufbau (Abb. 22b). In dem dunklen an Fe, Si, Ca, P reichen Grundgefüge (Abb. 20c) kommen helle Oxidteilchen vor (Abb. 22d). Sie sind zum Teil auch durch dunkle, einphasige Teilchen mit Fe, Si, P

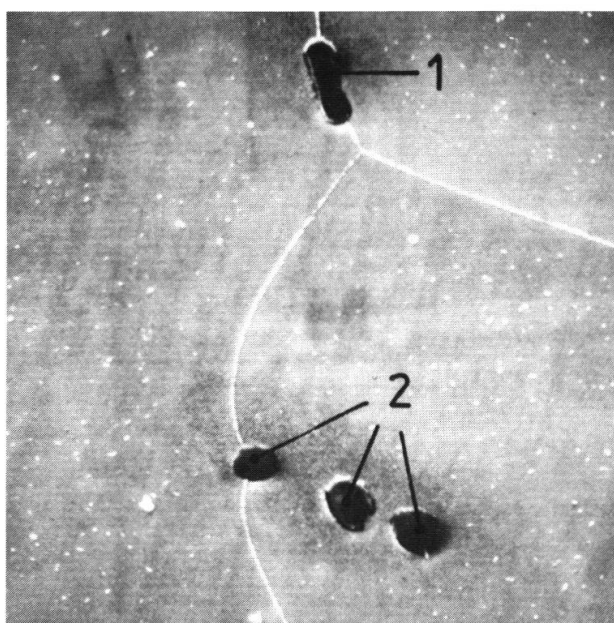
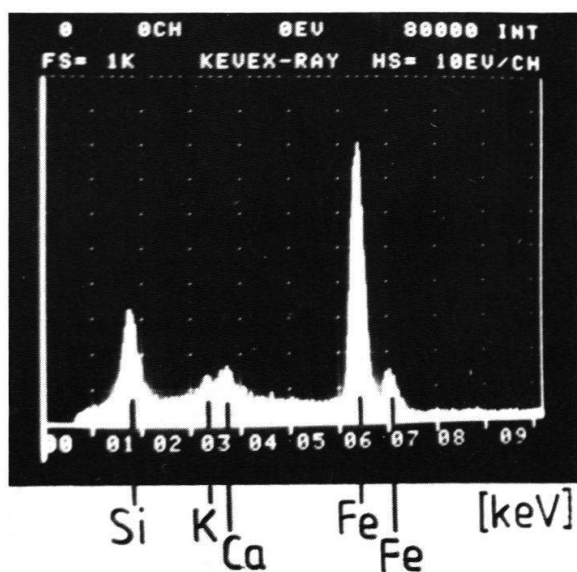


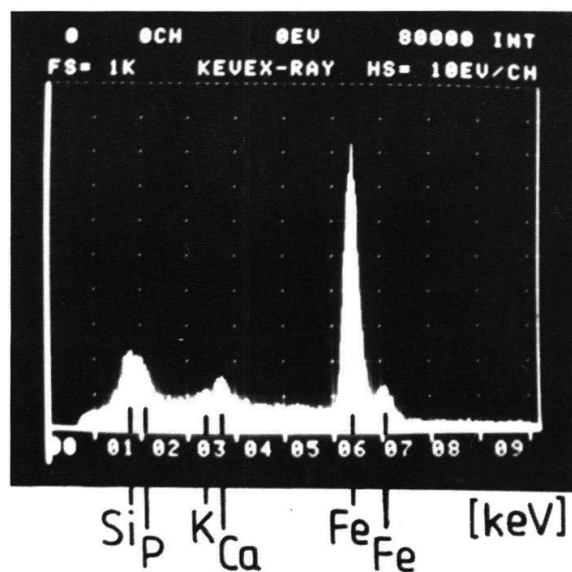
Abb. 19

Schmelzschlacken im Kern des Schwertes aus Vindonissa (Inventarnr. 1938):

- a) mikroskopische Aufnahme der Schlacken (REM), $V = 900 \times$;
- b) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 1 in Abb. 19a;
- c) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 2 in Abb. 19a.



b



c

und Ca gebildet (Abb. 23b). Es sei hervorgehoben, dass die in der Schweißnaht eingelagerten Schlacken keinen Kalium-Gehalt aufweisen und trotz dem direkten Kontakt mit den Deckschichten auch kein Mangan enthalten.

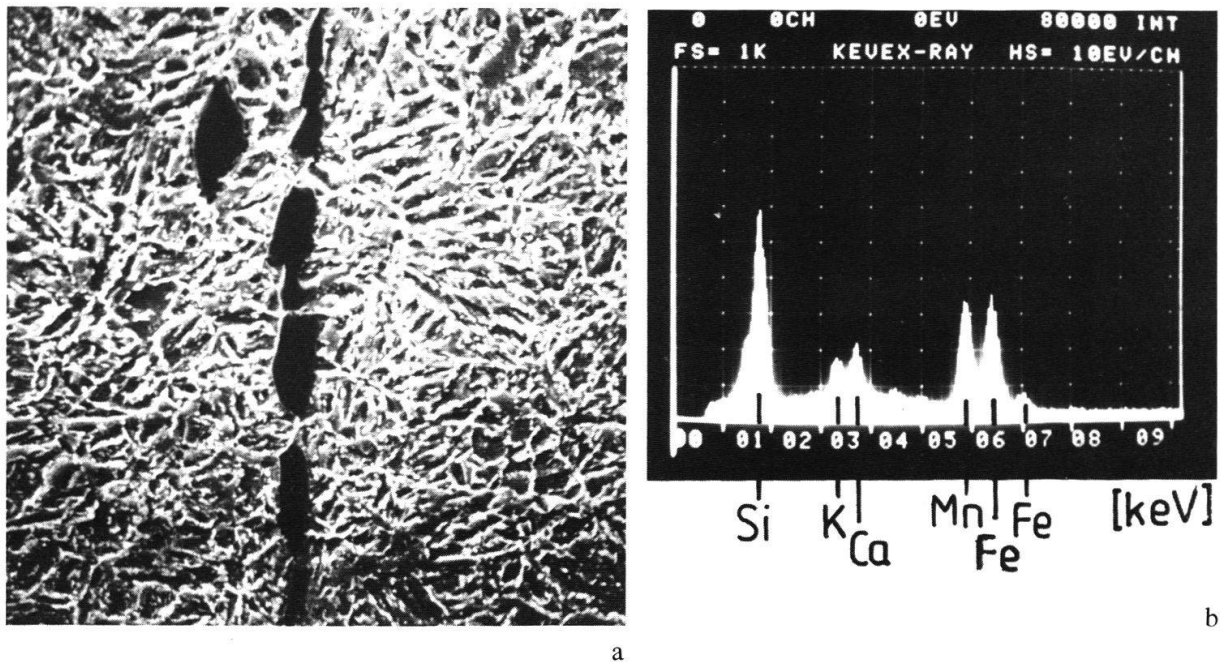


Abb. 20 Schmelzschlacken in der Deckschicht des Schwertes aus Vindonissa (Inventarnr. 1938):
a) mikroskopische Aufnahme der Schlacken (REM), $V = 1200 \times$;
b) energiedispersives Röntgenspektrum der Schlacken von Abb. 20a.

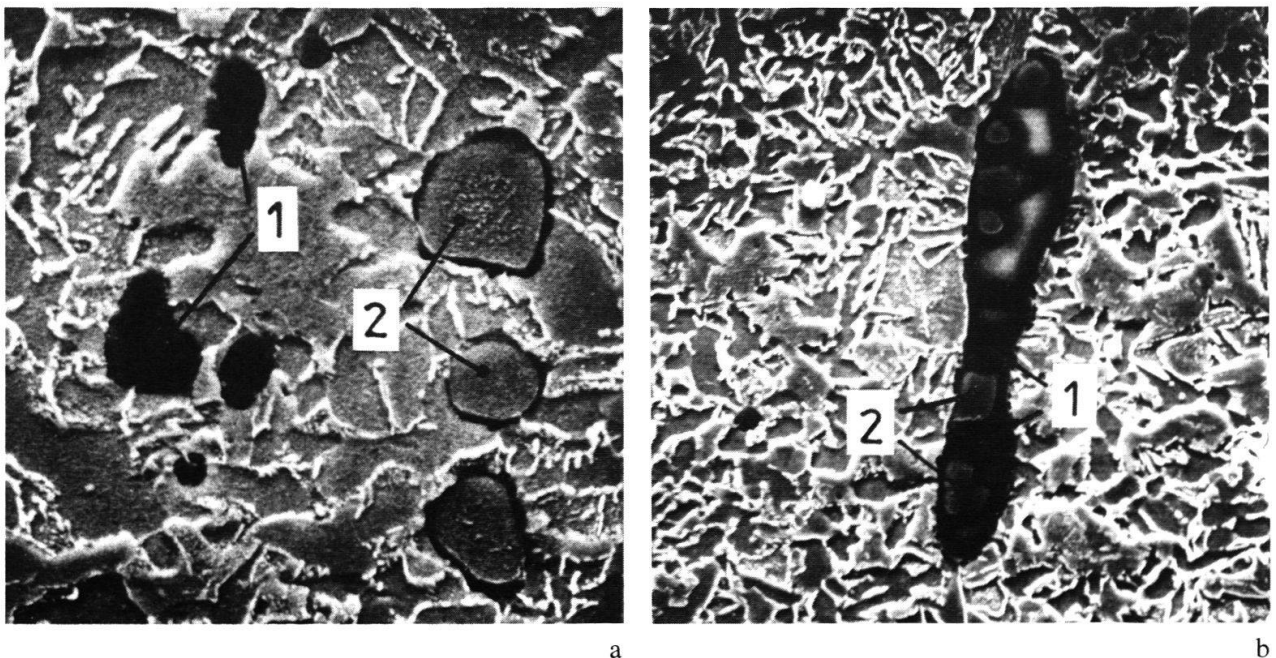
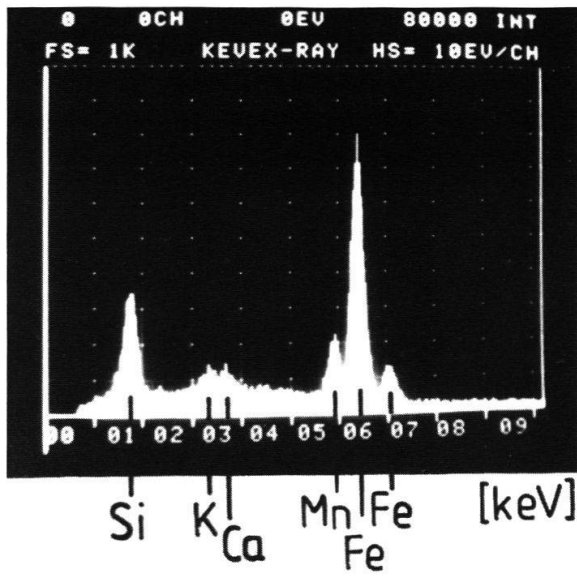
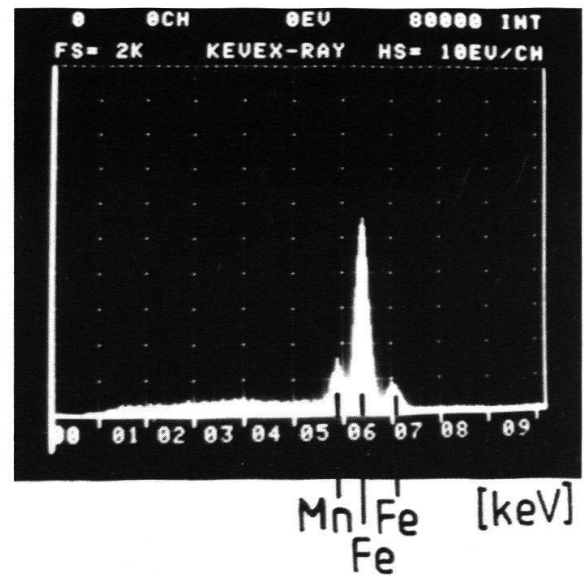


Abb. 21 Schmelzschlacken in der Deckschicht des Schwertes aus Vindonissa (Inventarnr. 1938):
a) mikroskopische Aufnahme der einphasigen Schlacken (REM); $V = 1800 \times$;
b) mikroskopische Aufnahme der mehrphasigen Schlacken (REM), $V = 1850 \times$;

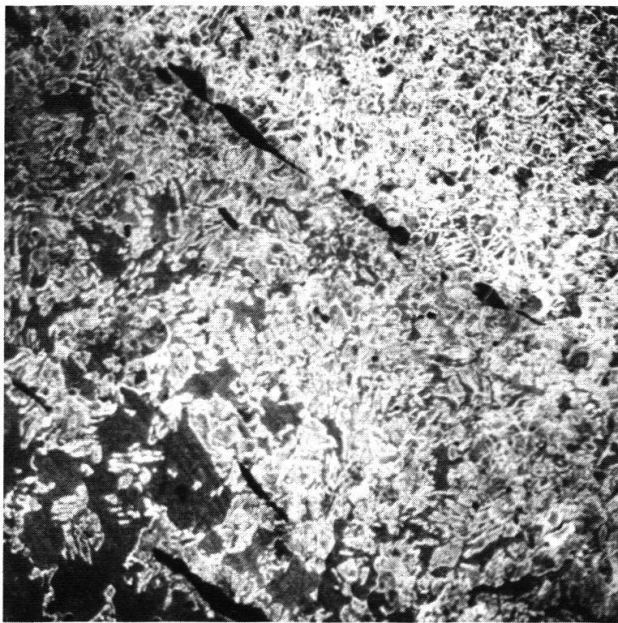


c

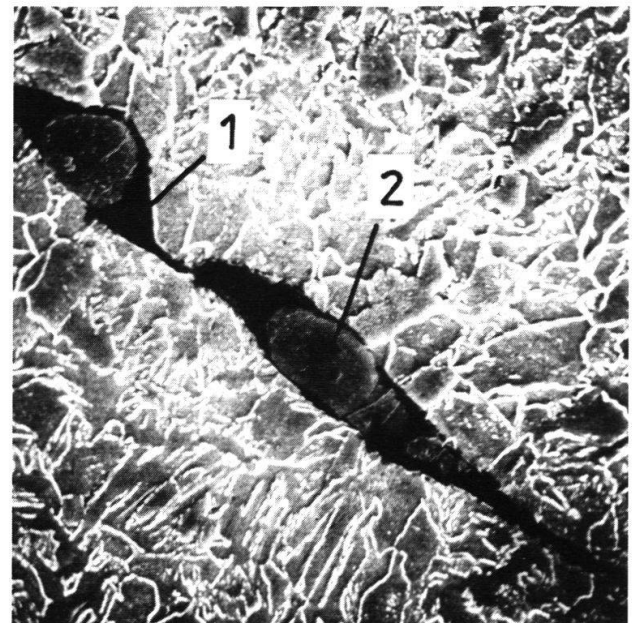


d

Abb. 21 c) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 1 in Abb. 21a und 21b;
d) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 2 in Abb. 21a und 21b.

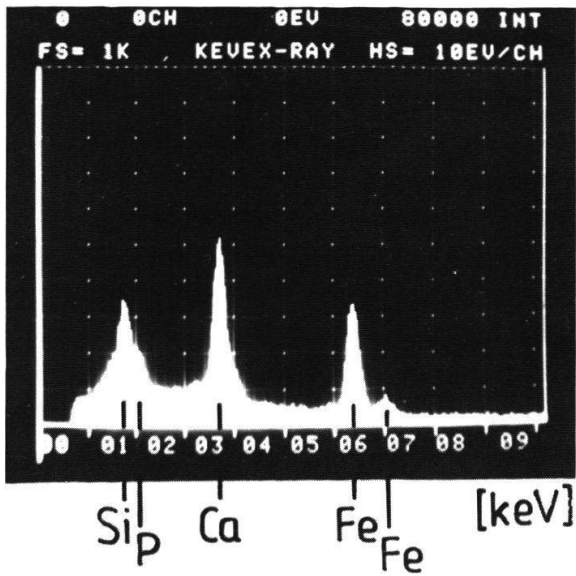


a

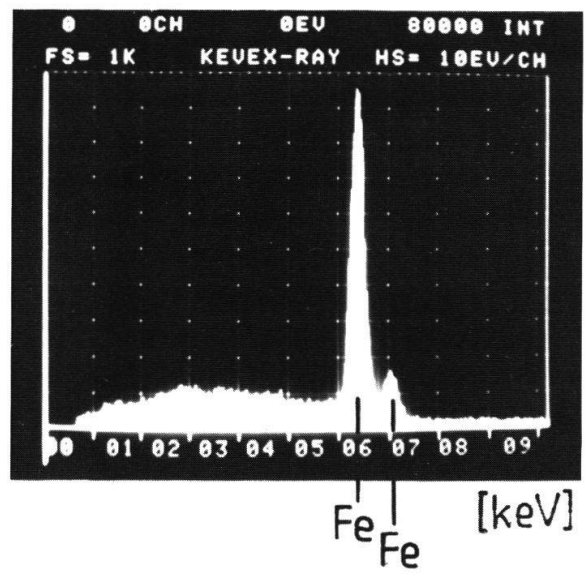


b

Abb. 22 Schlacken in der Schweissnahtstelle des Schwertes aus Vindonissa (Inventarnr. 1938):
a) mikroskopische Aufnahme der Schweissnahtstelle (REM), $V = 120 \times$;
b) Ausschnitt aus Abb. 22a (REM), $V = 1200 \times$;

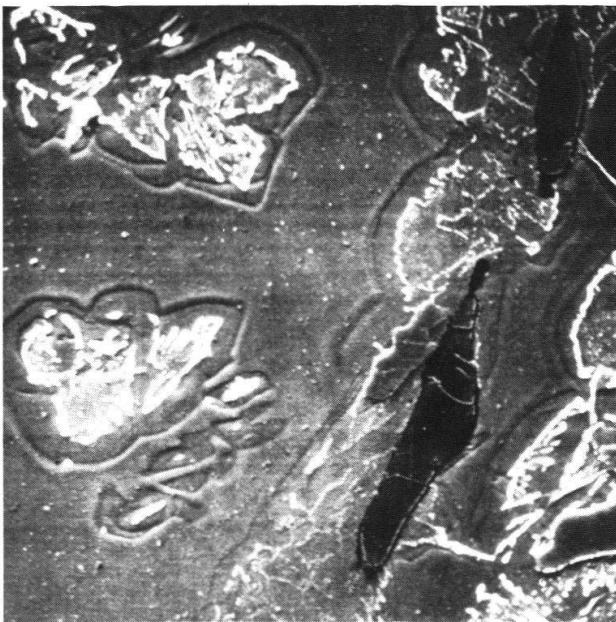


c

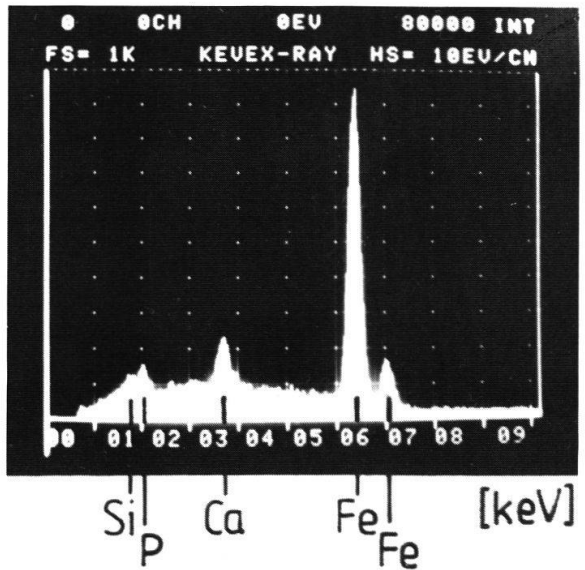


d

Abb. 22 c) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 1 (dunkler Schlackenhintergrund) in Abb. 22b; d) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 2 (helles Schlackenteilchen) in Abb. 22b.



a



b

Abb. 23 Schlacken in der Schweissnahtstelle des Schwertes aus Vindonissa (Inventarnr. 1938): a) mikroskopische Aufnahme der Schweissnahtstelle (REM), $V = 1100 \times$; b) energiedispersives Röntgenspektrum der Schlacken von Abb. 23a.

Schwert aus Augst (Inventarnr. 1961.1568)

Es wurden ebenfalls zahlreiche Schlacken festgestellt, die aufgrund ihrer Verteilung als Schmelzschlacken zu deuten sind. Trotz einer beträchtlichen morphologischen Verschiedenheit zeichneten sie sich durch annähernd gleiche chemische Zusammensetzung aus. In *Abb. 24a, 25a, 26a* werden Beispiele von Schlacken gezeigt, die sich in Grösse, Form und Struktur voneinander unterscheiden. Diese Schlacken sind zumeist mit einer Eisenoxidschicht umhüllt (*Abb. 24b, e; 25a, b; 26a, d*). Eisenoxide sind auch helle, dendritische Ausscheidungen, die im gesamten Volumen der fraglichen Schlacken vorkommen (*Abb. 13f; 25a, b*).

Das zweiphasige Grundgefüge der Schlacken (*Abb. 24b; 26a*) weist je nach Beobachtungsstelle eine weitgehende Differenzierung der chemischen Zusammensetzung

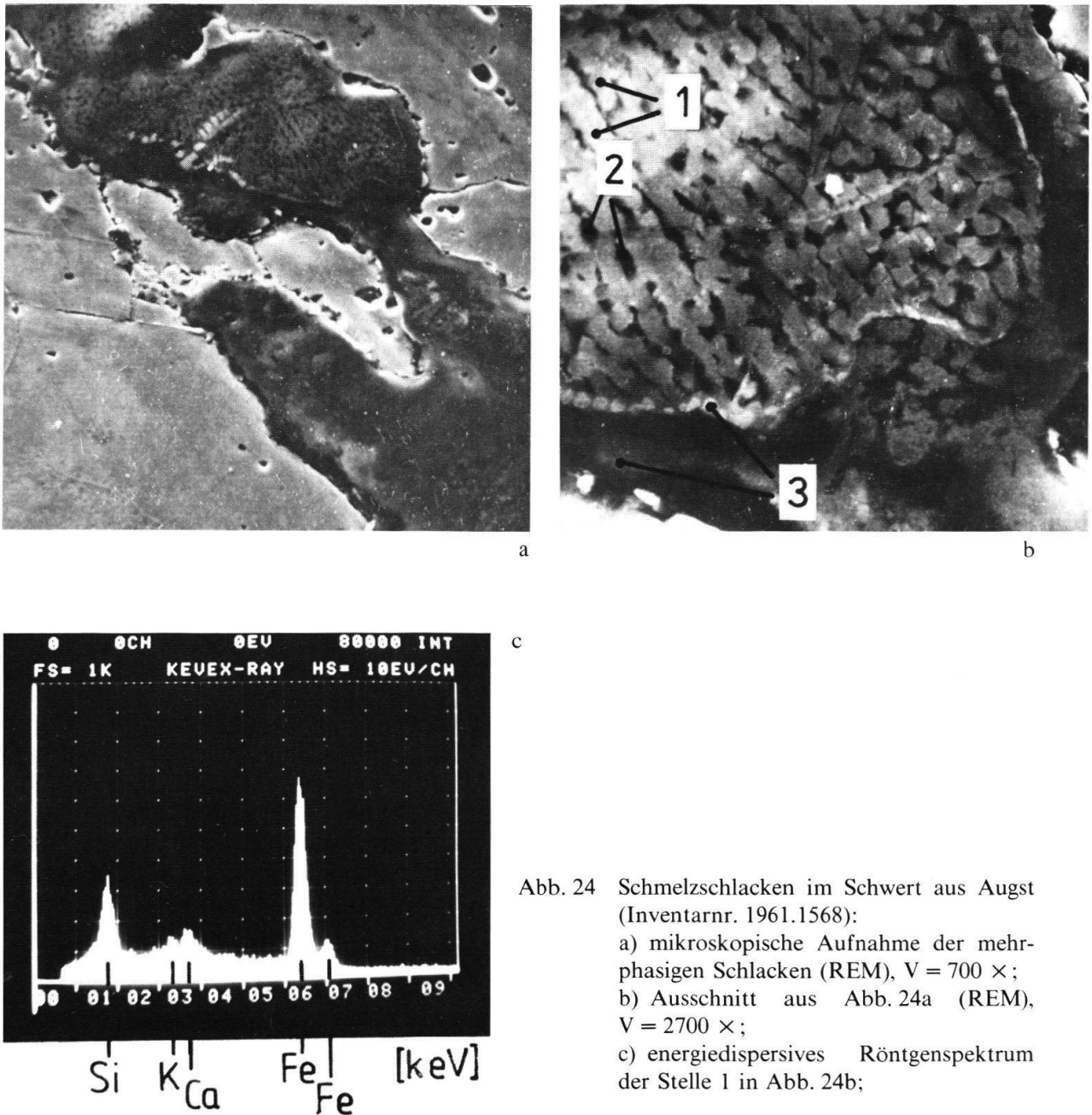
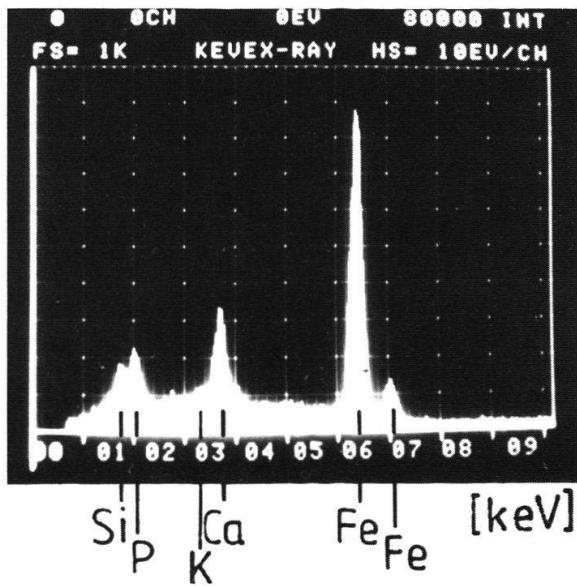
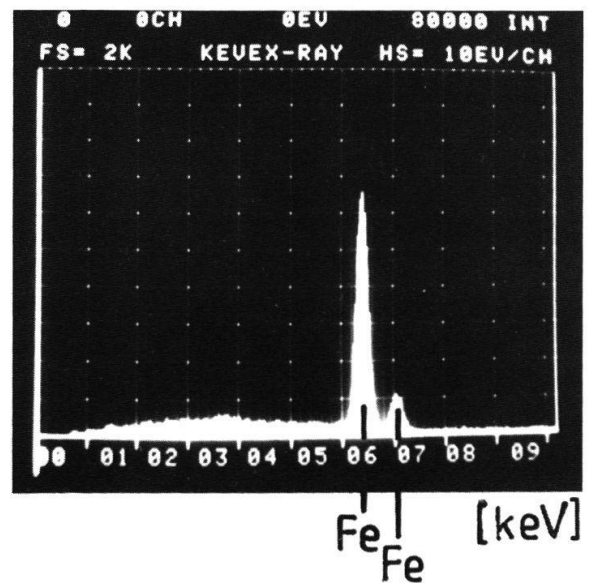


Abb. 24 Schmelzschlacken im Schwert aus Augst (Inventarnr. 1961.1568):
 a) mikroskopische Aufnahme der mehrphasigen Schlacken (REM), $V = 700 \times$;
 b) Ausschnitt aus *Abb. 24a* (REM), $V = 2700 \times$;
 c) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 1 in *Abb. 24b*;

auf. Die helleren Zonen enthalten allerdings vor allem Elemente wie Fe, Si, K und Ca (Abb. 24c; 26b). In den dunkleren Zonen kommt dagegen zusätzlich Phosphor vor (Abb. 24d; 26c). Das Auftreten dieser Elemente bestätigt die Annahme, dass die analysierten Schlacken vom Schmelzprozess herkommen.

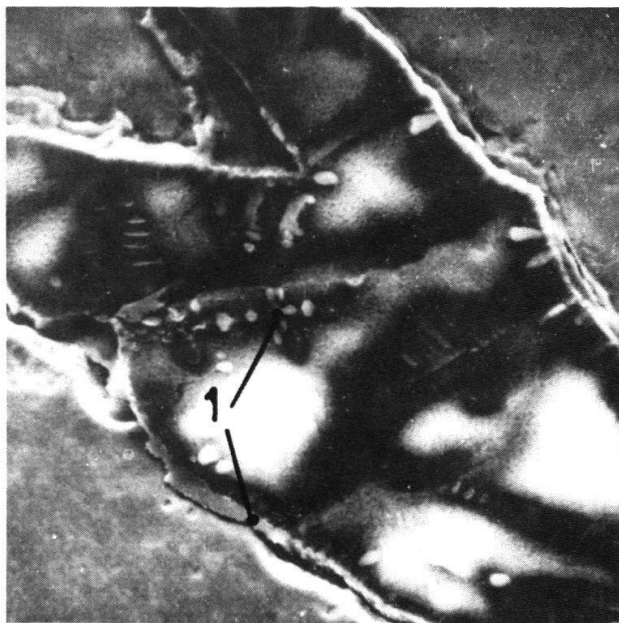


d

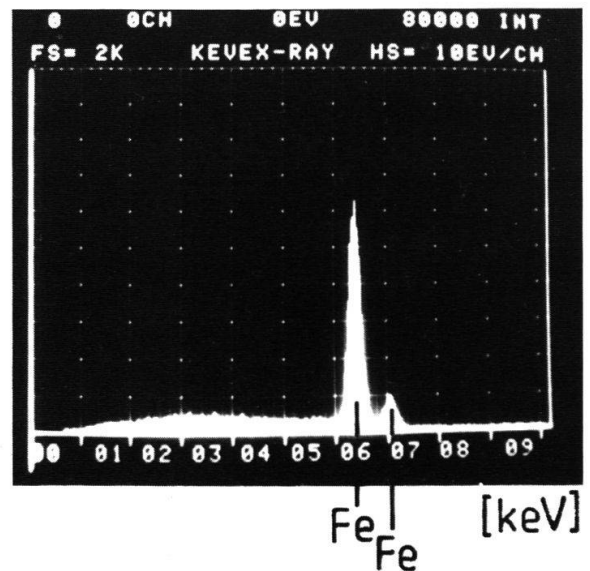


e

Abb. 24 d) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 2 in Abb. 24b;
e) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 3 in Abb. 24b.

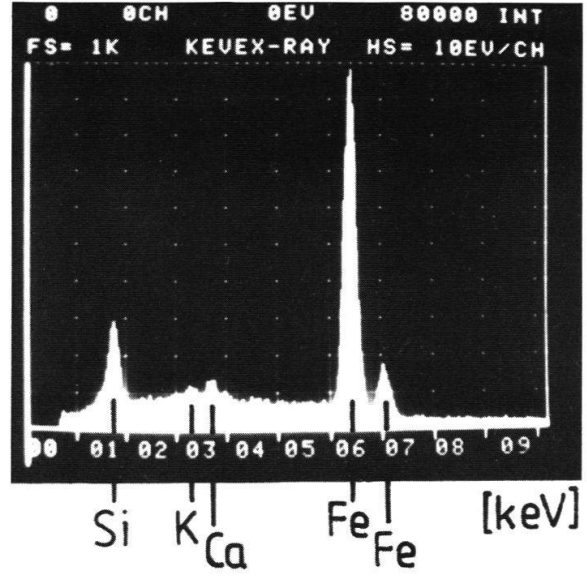
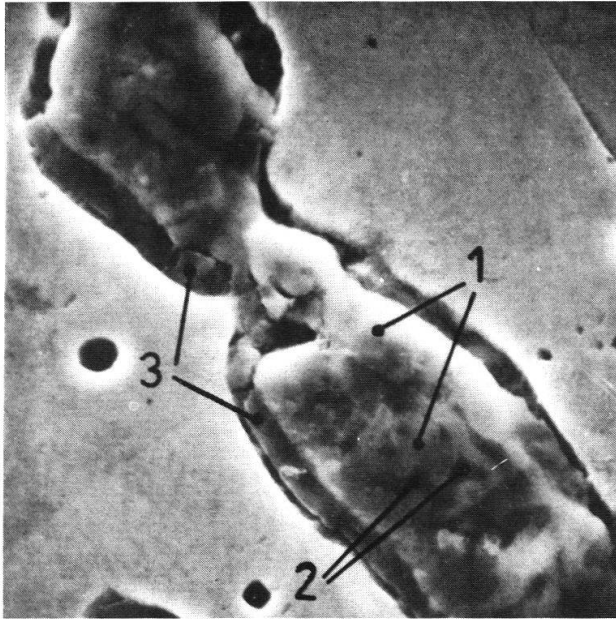


a

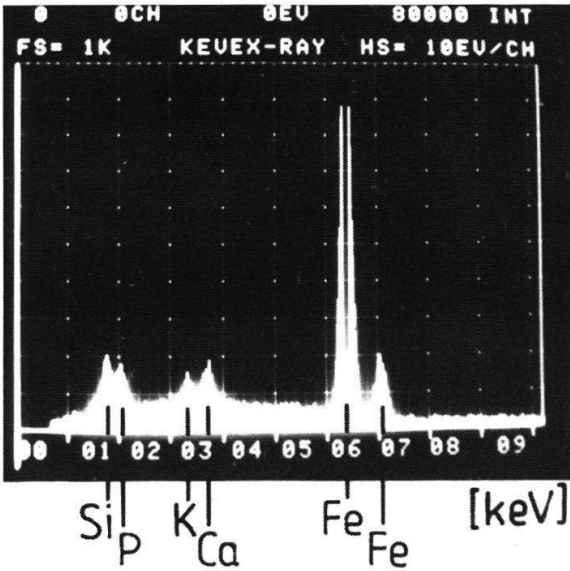


b

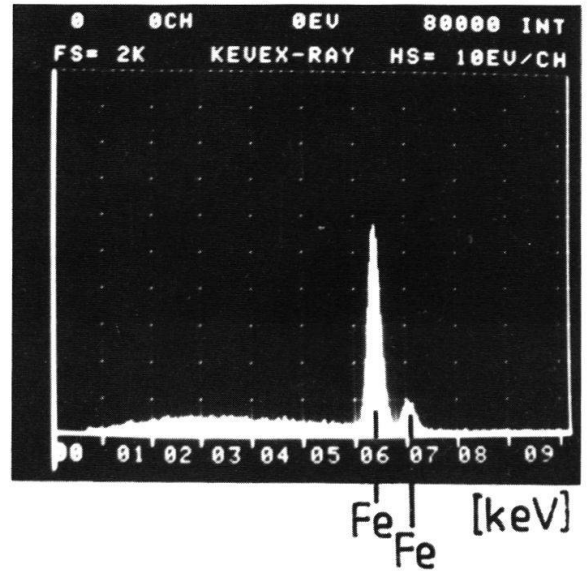
Abb. 25 Schmelzschlacken im Schwert aus Augst (Inventarnr. 1961.1568):
a) mikroskopische Aufnahme der mehrphasigen Schlacke (REM), $V = 1000 \times$;
b) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 1 in Abb. 25a.



b



c



d

Abb. 26 Schmelzschlacken im Schwert aus Augst (Inventarnr. 1961.1568):
 a) mikroskopische Aufnahme der mehrphasigen Schlacke (REM), $V = 2550 \times$;
 b) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 1 in Abb. 26a;
 c) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 2 in Abb. 26a;
 d) energiedispersives Röntgenspektrum der Stelle 3 in Abb. 26a.

Besprechung der Untersuchungsergebnisse

Die erzielten Untersuchungsergebnisse deuten auf eine beträchtliche Verschiedenheit der geprüften Schwerter hin. Das Schwert von Augst (Inventarnr. 1961.4401) ist in Schichttechnik gefertigt, wobei zielbewusst Werkstoffe mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung gewählt wurde. Nimmt man als Kriterium die Art des bei der Fertigung des Schwertes verwendeten Werkstoffes (Stahl), so kann man drei Schwertschichten aussondern (*Abb. 3*). Die zwei Randschichten sind aus niedriggekohltem Weichstahl, die Innenschicht dagegen aus perlitischem Hartstahl. Obwohl das Werkstoffkriterium auf einen dreischichtigen Aufbau des Schwertes hindeutet, ergibt sich aus der Beobachtung der Schlacke, dass die Deckschichten durch zusätzliches Pressschweissen von mehreren Werkstofflagen mit ähnlicher chemischer Zusammensetzung gefertigt werden konnten. Derartig erzeugte Deckschichten wurden anschliessend mit dem hochgekohlten Kern durch Hammerschläge zusammengesprengt. In *Abb. 27* sind vermutliche Fertigungsverfahren des Schwertes schematisch aufgeführt. Wie aus der Untersuchung des Mikrogefüges hervorgeht, wurde das fragile Schwertexemplar nach der Fertigstellung zielbewusst einer stellenweisen Wärmebehandlung ausgesetzt. Von der Verteilung der nadelförmigen Austenit-Zerfallsprodukte im Schwertquerschnitt ist auf ein Abkühlungsverfahren zu schliessen, bei dem nur der Schneidenrand in ein Kühlmedium eingetaucht und die im Kern gespeicherte Wärmemenge anschliessend zum Anlassen verwertet wurde. Die Härte der nadelförmigen Struktur zeugt nämlich davon, dass das Schwert wärmebehandelt (angelassen) wurde. Das lokale Härten von Axtschneiden durch das Eintauchen in Wasser und die anschliessende Verwertung der Wärme in der Axtbahn im Prozess des sog. Selbstanlassens wurde noch bis vor kurzem von den Schmieden angewandt.

Das Schwert im Vindonissa-Museum in Brugg (Inventarnr. 1938) ist aus drei Werkstoffteilen in Schichttechnik hergestellt. Im Gegensatz zu dem oben behandelten Exemplar ist der Kern weich, aus Eisen gemacht, und die ihn umfassenden Deck-

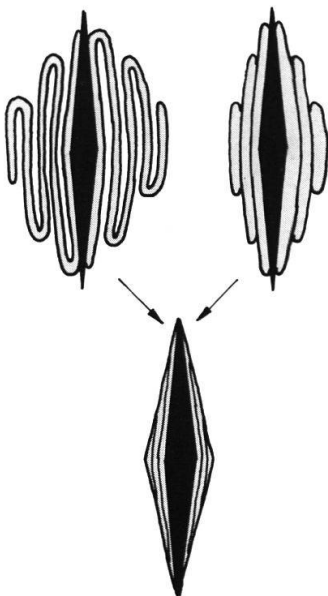


Abb. 27 Schematische Darstellung der vermutlichen Herstellungsarten des Schwertes aus Augst (Inventarnr. 1961.4401).

schichten sind härter, aus perlitisch-ferritischem Halbhartstahl (Abb. 7). In Abb. 28 sind vermutliche Fertigungsverfahren des Schwertes schematisch gezeigt. Die Analyse des Mikrogefüges deutet auf eine Wärmebehandlung des Schwertes hin. Sie umfasste die Abkühlung der gesamten Schwertlänge in einem milden Kühlmedium, z.B. Öl, wodurch nur der dünnste Querschnittsbereich, d.h. die Schneide, gehärtet werden konnte. In den Schmelzschlacken der Deckschichten wurde Mangan nachgewiesen. Dieses Element ist in den Schmelzschlacken des Kernes nicht belegt. Da das Vorhandensein von Mangan in Verbindung mit dem Charakter des bei der Erschmelzung verwendeten Eisenerzes zu betrachten ist, mag das Vorhandensein von Mangan in den Schlacken der Deckschichten und das Fehlen dieses Elementes in den Schlacken des Kernes davon zeugen, dass das Material aus ganz verschiedenen Erschmelzungsprozessen stammt, die vielleicht in verschiedenen Verhüttungszentren durchgeführt worden waren.

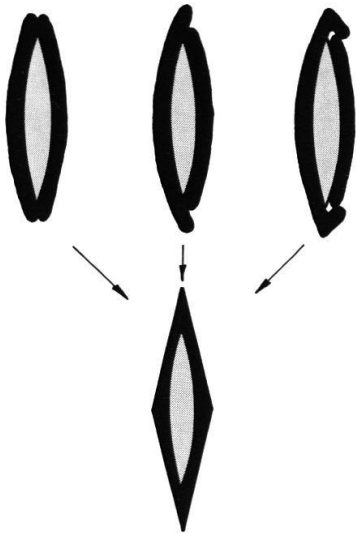


Abb. 28 Schematische Darstellung der vermutlichen Herstellungsarten des Schwertes aus Vindonissa (Inventarnr. 1938).

Die beiden besprochenen Schwerter weisen eine Reihe von Merkmalen auf, die von grosser Erfahrung und grossem Können der damaligen Schmiede zeugen. Der verbundartige Aufbau mit abwechselnd harten und weichen Schichten verleiht den Schwertern eine gute Elastizität und gute Schneideigenschaften, wodurch zugleich auch eine hohe Bruchzähigkeit erreicht ist. Die Verwendung des Materials mit entsprechender chemischer Zusammensetzung in den am besten geeigneten Schwertbereichen zeugt davon, dass die Schmiede durchaus imstande waren, zwischen Stahlsorten mit unterschiedlichem Kohlenstoffgehalt zu unterscheiden und die Werkstoffeigenschaften treffsicher einzuschätzen. Weitere Beweise für ihre hervorragenden Fachkenntnisse sind die sachgemässe, partiell durchgeführte Wärmebehandlung sowie der Einsatz des Anlassens. Obwohl die dargestellten Exemplare keine kunstvolle Damaszierung aufweisen, kann man sie dennoch der Gruppe von qualitativ hochwertigen Schwertern zurechnen.

Ganz anders ist die Fertigungstechnik im Falle des zweiten Schwertes von Augst (Inventarnr. 1961.1568). Es wurde aus einem Stück hochphosphorhaltigen Eisens geschmiedet. Das für die Verfertigung des Schwertes eingesetzte Material ist durch eine

erhebliche Phosphor-Steigerung und einen niedrigen Verschmiedungsgrad gekennzeichnet, was durch das Vorhandensein zahlreicher grosser Schlackeneinschlüsse zum Ausdruck kommt. Der niedrige Kohlenstoffgehalt ist in diesem Fall durch den höheren Phosphorgehalt (0,3% P) ausgeglichen, wodurch die Eisenhärte auf 170–180 HV 10 erhöht werden konnte. Die durch den höheren Phosphorgehalt erreichte Härtezunahme verbessert zwar die Elastizität und das Schneidverhalten des Schwerter, doch bringt sie auch gewisse Nachteile mit sich. Es sind dies das grobkörnige Gefüge und die Neigung zur plastischen Verformung infolge der Zwillingsbildung. Die beiden genannten Faktoren steigern in beträchtlichem Masse die Sprödigkeit des Materials, wodurch die Bruchgefahr grösser wird.

Die bisherigen metallographischen Untersuchungen von römischen Schwertern erbrachten eine beträchtliche Differenzierung der Herstellungsverfahren bei dieser Waffenart. Die römischen Schmiede stellten sowohl hochqualitative Schwerter, d.h. Exemplare mit harten und zugleich elastischen Klingen, als auch qualitativ minderwertige, leicht verformbare Schwerter aus weichem Eisen sowie harte, aber ziemlich spröde Schwerter her. Obwohl die Forschung auf diesem Gebiet sich erst im Anfangsstadium befindet, kann man auf gewisse Zusammenhänge zwischen den bisher ausgesonderten Herstellungsverfahren und den Schwertformen hinweisen sowie die Veränderungen der vom 1. bis zum 5. Jh. n. Chr. von den römischen Schmieden angewandten Herstellungsverfahren aufzeigen. Bei der Erforschung dieser Problematik stützen wir uns auf die Schwerter, deren römische Herkunft gesichert ist, also auf die in den Provinzen und dem europäischen Barbaricum gefundenen Exemplare, deren Merkmale eindeutig auf ihre römische Provenienz hindeuten (Exemplare mit Stempelmarken und lateinischen Inschriften in «Punctim»-Technik, mit den in römischer Ikonographie inkrustierten Darstellungen oder auch Schwerter mit charakteristischen morphologischen Merkmalen, wie z. B. die Ringknaufschwerter²⁶). Die Angaben über die Herstellungsverfahren der sicher römischen Schwerter werden gewissermassen auch durch andere metallographisch untersuchte Schwerter aus Mittel- und Nordeuropa ergänzt. Es ist allerdings sehr schwer, aufgrund einer Analyse der Form und der Abmessung die römischen Importe auszusondern. Beidseits des Limes beobachten wir nämlich eine weitgehende Ähnlichkeit der Schwerter und denselben Wechselrhythmus ihrer Form und Abmessungen. Diese Sachlage berechtigt uns zu der Schlussfolgerung, dass die römischen Schwerter als Vorbilder einen sehr starken Einfluss auf die Produktion in den «barbarischen» Schmiedewerkstätten ausübten und ausserdem der Anteil der römischen Schwerter an den Funden aus Mittel- und Nordeuropa viel höher war, als bisher angenommen. Letztere Annahme findet ihre Bestätigung in den Ergebnissen metallkundlicher Untersuchungen einer umfangreichen Serie von zweischneidigen Schwertern aus Polen, aus dem Gebiet der Przeworsk-Kultur²⁷. Diese Schwerter, darunter fast alle mit charakteristischem Klingenquer-

²⁶ Biborski, Kaczanowski, Kędziński, Stępiński, Metallographische Untersuchungen als Kriterium a. a. O. S. 78–95.

²⁷ Biborski, Kaczanowski, Kędziński, Stępiński, Miecze obosieczne z cmentarzysk a. a. O. S. 113–131; J. Piaskowski, Niektóre dziwerowane miecze na ziemiach Polski, Z Otchłani Wieków Bd. XXXI, H. 1, 1965, S. 36–39.

schnitt, d. h. Exemplare mit Blutrinnen, wurden zum grossen Teil unter Anwendung eines höchst komplizierten Verfahrens hergestellt. Es handelt sich bei diesem Verfahren um ein präzise durchgeführtes Schmieden beim gleichzeitigen Verdrehen eines zielbewusst gewählten Werkstoffes.

Aus den bisherigen metallographischen Analysen der römischen Schwerter mit Klingen, die einen Kern besitzen, kann man den Schluss ziehen, dass solche Schwerter, wie das oben dargestellte Exemplar aus Vindonissa (*Abb. 7*) oder das vollständig erhaltene Schwert aus Augst (*Abb. 3*), eine Seltenheit darstellen. Ausser den von uns untersuchten Exemplaren wurde eine ähnliche Herstellungstechnik, soweit man aus einer Publikation von A. M. Rosenqvist entnehmen kann, nur bei einem in Norwegen, im Brandgrab von Rør²⁸, gefundenen römischen Schwert sowie bei den Schwertern aus dem Moorfund von Illerup²⁹ (Jütland, Dänemark) nachgewiesen. Das Schwert von Rør ist dem Exemplar von Vindonissa in der Herstellungstechnik sehr nahe; sein Eisenkern ist mit harten Deckschichten umwunden. Aufgrund der Untersuchungen sowohl der zweifellos römischen Schwerter als auch der Exemplare vom europäischen Barbaricum, die in ihrer Form an die römischen Vorbilder stark anknüpfen, kann man feststellen, dass unter den chronologisch und typologisch früheren Schwertern, zu denen vor allem der Gladius-Typ und seine Ableitformen gehören, die nach zwei Fertigungsverfahren hergestellten Exemplare vorherrschend sind. Das erste Herstellungsverfahren repräsentieren diejenigen Schwerter, die, wie das Exemplar von Augst (*Abb. 12*), aus einem Werkstoffstück geschmiedet wurden. Diese Technik scheint bei den Schwertern des 1. Jh. n. Chr. am häufigsten vertreten zu sein, ist aber auch noch unter den Funden aus dem 3. Jh. n. Chr. belegt, also aus der Periode der stärkeren Verbreitung von hochkomplizierten Schmiedeverfahren. Die aus einem einzigen Werkstoffstück geschmiedeten Schwerter unterschieden sich voneinander durch die Qualität. Vertreten waren unter ihnen weiche Exemplare aus Eisen mit geringem Aufkohlungsgrad (z. B. von Xanten³⁰) sowie die Schwerter mit beträchtlicher Härte, aus gleichmässig aufgekohltem Eisen (z. B. von Biała, Woiw. Łódź, Grab 11³¹). Eine umfassende Bestimmung der Gebrauchseigenschaften dieser Schwerter ist im Falle der «barbarischen» Grabfunde wegen der die Spuren einer eventuellen Wärmebehandlung verwischenden Hochtemperatureinwirkung auf dem Scheiterhaufen wesentlich erschwert. Das gilt auch für die Schwerter, die in anderen Fertigungstechniken hergestellt wurden. Nur wenige dem Gladius-Typus oder seinen Ableitformen zugerechnete Schwerter weisen eine komplizierte Struktur auf, die ihnen hochstehende Gebrauchseigenschaften verleiht. Zu ihnen gehört das Schwert von Vindonissa sowie das den Gladius-Typus Mainz repräsentierende Schwert aus Bonn. Die sonstigen Gladii und ihre Ableitformen wurden aus einem Werkstoffstück besserer oder schlechterer Qualität oder auch aus zwei, drei, seltener mehreren Schichten von manchmal gleicher Struktur geschmiedet. Eine besondere Stellung

²⁸ A. M. Rosenqvist, Sverd med klinger ornet med figurer i kopperlegeringer fra eldre jernalder i Universitetets Oldsaksamling, Aarbok 1967–1968, S. 185–187.

²⁹ R. Thomsen, Et meget Maerkeligt metal, Varde 1975, S. 84–87.

³⁰ Biborski, Kaczanowski, Kędzierski, Stępiński, Metallographische Untersuchungen als Kriterium a. a. O. S. 80 ff, Abb. 5b.

³¹ Biborski, 1978 (= Anm. 13) S. 113.

nimmt das erwähnte Schwert aus Bonn ein³². Es wurde in einer höchstkomplizierten Technik (pattern-welding-Technik) geschmiedet. Das Verfahren besteht darin, durch Schmieden unterschiedliche Stäbe zu verbinden, wodurch jene Schwerter gewonnen worden sein könnten, die manchmal in der archäologischen Literatur irrtümlich als sog. damaszierte Schwerter bezeichnet werden. Es ist zu betonen, dass diese Herstellungstechnik, mit deren Hilfe zuweilen auch sehr komplizierte Muster an der Klingeoberfläche erzeugt wurden, mit der neuzeitlichen Damaszierungstechnik nichts gemein hat. Die massenweise Herstellung von Schwertern nach dem pattern-welding-Verfahren verbreitete sich zu der Zeit, als die Gladii bereits ausser Gebrauch kamen und durch Exemplare mit deutlich längeren Klingen, kürzeren und weniger scharfen Spitzen ersetzt wurden, die als Übergangsformen zu den für die spätrömische Kaiserzeit typischen, von der Reiterei gebrauchten Spathen angesehen werden können. Sowohl das Schwert von Vindonissa als auch das vollständig erhaltene Exemplar von Augst weichen in ihren Qualitätseigenschaften nicht von den sog. damaszierten Schwertern ab. Wie diese zeichnen sie sich auch durch harte und zugleich elastische Klingen aus.

³² Biborski, Kaczanowski, Kędzierski, Stepiński, Metallographische Untersuchungen als Kriterium a. a. O. S. 82.

Erläuterung der im Text gebrauchten metallkundlichen Termini

<i>Anlassen</i>	Erwärmung von Stählen im Anschluss an eine vorangegangene Härtung zur Reduzierung der Sprödigkeit des Werkstoffes. Die Anlasstemperatur soll 727 °C nicht überschreiten.
<i>Ferrit</i>	fast reines, weiches Eisen.
<i>Gefüge-Streifigkeit</i>	ein Mikrogefüge, gekennzeichnet durch eine schichtweise Anordnung des Werkstoffes mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung.
<i>Härten</i>	Härtesteigerung, bestehend im Eintauchen des über 727 °C erwärmten Stahls in ein kaltes flüssiges Medium, z.B. Wasser, Öl u. dgl.
<i>Martensit</i>	sehr harte nadelige Struktur als Folge einer sehr raschen Abkühlung (Härten) des über 727 °C erwärmten Stahls.
<i>Nital</i>	4%ige Alkohollösung der Salpetersäure.
<i>Perlit</i>	eine aus Ferritlamellen und Zementit bestehende Struktur.
<i>Schmelzschlacken</i>	Schlackenreste nach dem Schmelzprozess von Metall.
<i>Schmiedeschlacken</i>	an der Schweiss-Stelle des Metalls entstehende Schlacken.
<i>Sorbit</i>	ein beim Anlassen von Martensit entstehendes Gefüge, eine Mischung von Ferrit und feindispersen, kugelförmigen Zementit-Teilchen.
<i>Stahl</i>	Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit Gehalten bis etwa 2% C.
<i>Troostit</i>	feinlamellarer Perlit.
<i>Verformungszwillinge</i>	Defekte an metallischen Kristallkörnern in Form von dünnen Lamellen oder Nadeln als Folge der Kaltverformung.
<i>Wärmebehandlung</i>	Verfahren oder Kombination mehrerer Verfahren, bei denen ein Werkstoff (z.B. Stahl) im festen Zustand Temperaturveränderungen unterworfen ist, um bessere Werkstoffigenschaften zu erzielen.
<i>Widmannstättensches Gefüge</i>	nadelförmiges, unter rascher Abkühlung von Hochtemperaturen (ca. 1000 °C) entstehendes Ferrit-Gefüge.
<i>Zementit</i>	sehr harte chemische Verbindung von Eisen und Kohlenstoff (Fe ₃ C), die selbständig im Ferrit vorkommen oder ein Bestandteil des Perlits sein kann.