

UNTERSUCHUNGEN  
ÜBER DIE HALLSTATTZEITLICHE TECHNIK  
FÜR BRONZEEINLAGEN IN EISEN

PETER EICHHORN, HANS ROLLIG, UTE SCHWARZ, BENNO URBON  
und ULRICH ZWICKER

Mit 37 Textabbildungen

Bei Nachrestaurierungsarbeiten an hallstattzeitlichen Eisenfunden mit Einlegearbeiten im Württembergischen Landesmuseum, Stuttgart, wurde die Vermutung<sup>1</sup> bestätigt, daß die Einlegearbeiten zumindest teilweise nicht durch einfaches Einhämmern der Einlagen in das entsprechend vorbereitete Grundmetall Eisen entstanden sein konnten. Deshalb wurden verschiedene Teile eingehend metallographisch und mit Hilfe einer im Institut für Werkstoffwissenschaften II zur Verfügung stehenden Einrichtung für die Mikroröntgenfluoreszenzanalyse untersucht. Die für diese Einlegearbeiten verwendeten Legierungen sollten analysiert, die Diffusionsbereiche zwischen Einlage- und Grundwerkstoff untersucht und so die Technik für die Einlegearbeiten festgestellt werden. Die verschiedenen untersuchten Fundstücke werden im folgenden einzeln beschrieben.

1. Radnabe aus einem Grabhügel aus Winterlingen, Kr. Balingen. Fundort: Tal beim Dürrenbühl, 5,5 km nördlich Winterlingen, 820 m Meereshöhe (Verbleib: Württ. Landesmuseum Stuttgart)<sup>2</sup>.

In Abb. 1 ist die im Württembergischen Landesmuseum nachrestaurierte Radnabe mit Punkt-Kreis- und Lamellen-Verzierung wiedergegeben. Als Proben für die metallographische Untersuchung und für die Prüfung mit der Mikrosonde dienten eine Bronzeeinlage (Probe A 1) aus dem nahe der Mitte gelegenen lamellen-tauschierten Eisenwulstring sowie eine bronzene Ringeinlage aus dem Punkt-Kreis-verzierten flachen Band der Nabenbüchse (Probe A 2). Das Eisen der Nabe ist völlig durchoxidiert. Abb. 2 zeigt die Probe A 1 im Querschnitt. Die Abb. 3 gibt eine stärkere Vergrößerung dieser Probe mit den Spuren der Röntgenfluoreszenz-Mikroanalyse wieder. Der mittlere Gehalt an Zinn wurde mit ungefähr 10–15 Gew. % bestimmt und liegt damit an der maximalen Löslichkeit des Zinns im Kupfer. Auf der an der Oberfläche befindlichen Seite wurde ein größerer Einschluß gefunden, der in Abb. 3 deutlicher sichtbar ist. Es handelt sich um einen an Zinn angereicherten und entsprechend an Kupfer verarmten Gefügebestandteil. Eine Punktanalyse des in Abb. 3 wiedergegebenen Einschlusses an der Außenseite der eingelegten Lamellenverzierung, eine zweite Punktanalyse in der Mitte der eingelegten Bronze und eine dritte Punktanalyse in der Eisenoxidschicht des an-

<sup>1</sup> A. RIETH/P. EICHHORN, Zur Herstellungstechnik der Eisendolche in der späten Hallstattzeit. Jahrb. RGZM. 16, 1969, 55 ff.

<sup>2</sup> O. PARET, Das Fürstengrab der Hallstattzeit aus Bad Cannstatt. Fundber. aus Schwaben N. F. VIII, 1935, 21 f. — v. FÖHR, Hügelgräber auf der Schwäbischen Alb (1892) 22. — A. RIETH, Die Tauschieretechnik der Hallstattzeit. Mannus-Bücherei 27 (1935) 102 ff. u. 70 (1942) 50 ff. 103 ff.

schließenden oxidierten eisernen Beschlagteiles ergaben in Übereinstimmung mit der Analyse mit bewegter Probe (Weganalyse), daß der Kupfergehalt im Einschluß gegenüber dem in der Mitte der Bronze vermindert ist. Zusätzlich wird ein Eisengehalt von ungefähr 15–20 % festgestellt. Es handelt sich demnach wahrscheinlich um ein Mischoxid zwischen Eisen, Kupfer und Zinn. Auch die Tatsache, daß der Probenstrom beim Übergang in den Einschluß schwankt, weist auf einen oxidischen, elektrisch sehr viel weniger leitenden Einschluß hin. Die Punktanalyse in der Mitte der eingelegten Bronze ergab, daß in der Bronze kein Eisen vorhanden ist, jedoch treten Spuren von Blei, Nickel und Kobalt auf. In der oxidischen Schicht an der Innenseite der Einlage wurden außer einem hohen Anteil von Eisen noch erhebliche Anteile von Kupfer in der Größenordnung von etwa 10 % gefunden, was auf die Bildung eines Mischoxids zwischen Kupfer und Eisen hinweist. Weitere Elemente konnten in diesem Bereich nicht festgestellt werden. Fünf Messungen der Konzentrationsänderung mit Hilfe der Mikrosonde auf der am Eisen anliegenden Seite der Probe (Abb. 3 und 4 unten) sollten klären, ob sich Zinn an dieser Seite angereichert hat, um festzustellen, ob eine Weichlotzwischen-schicht für die Einlegearbeit verwendet wurde. Um die Abrundung an der Schliiffkante gegenüber dem Eisenoxid auszugleichen, wurde zunächst mit beiden Spektrometern auf Zinn geprüft. Eine Zinnanreicherung in diesem Bereich wurde nicht gefunden. Infolge der geringeren Leitfähigkeit der Oxidzone wird der Elektronenstrahl leicht abgelenkt, so daß eine genaue Bestimmung in diesem Bereich erschwert wird. Auch bei den weiteren Untersuchungen dieses Bereiches mit Prüfung auf Kupfer und Zinn bzw. Eisen und Zinn (zweimal) konnte keine Zinnanreicherung im Grenzgebiet der Bronze und der eisenoxidhaltigen Anschlußzone gefunden werden. Damit wird sichergestellt, daß die Einlegearbeit bei dieser Probe ohne eine Lotzwischen-schicht im kalten oder warmen Zustand erfolgt ist. Abb. 4 zeigt in 500facher Vergrößerung den sehr feinkörnigen Aufbau des eingelegten Werkstoffs mit kleinen, länglichen und runden Fremdeinschlüssen. An der Grenzschicht sind einige Zwillinge erkennbar, die auf eine Kaltverformung in diesem Bereich hinweisen.

Die Probe A 2 der Punkt-Kreis-Verzierung zeigte, daß offenbar auch hier eine ohne Löten hergestellte Einlegearbeit vorliegt. Die Abb. 5 gibt das Gefüge des weichgeglühten Bronzedrahtes mit zahlreichen Schlackeeinschlüssen (Kreisring) in einem An-schliff parallel zur Oberfläche wieder. Wie die Abb. 6 und 7 zeigen, ist bei den Fremdeinschlüssen im polarisierten Licht ein Farbumschlag zu erkennen, der darauf hinweist, daß es sich um Kupferoxidul handelt. Die Analyse ergab auch hier einen Gehalt von 10–15 % Zinn. Die Oxidation ist teilweise entlang von Gleit- und Zwillingebenen erfolgt, wie dies auf Abb. 8 ersichtlich ist. Die Tauschierung dieser Radnabe ist demnach mechanisch, wahrscheinlich durch Einhämmern oder Einkleben hergestellt worden.

2. Radnabe aus Grab VI des Grabhügels Hohmichele, Kr. Saulgau. 13,5 m hoch, 80 m Durchmesser, mit 26 000 cbm Inhalt, größter vorgeschichtlicher Grabhügel Mitteleuropas (Verbleib: Württ. Landesmuseum Stuttgart)<sup>3</sup>.

Eine Aufnahme der restaurierten Radnabe ist in Abb. 9 wiedergegeben. Die auf abgewinkelten Eisenreifen angebrachte Tauschierung zeigt die Abb. 10 in stärkerer Vergrößerung. Es handelt sich dabei auf der einen Seite um eine strichförmige und auf der anderen Seite neben einer strichförmigen um eine Schrägkreuztauschierung. Die teilweise schräg-

<sup>3</sup> O. PARET, *Fundber. aus Schwaben N. F. XI*, 1951, 74 ff. — S. SCHIEK, *Fürstengräber der jüngeren Hallstattkultur in Südwestdeutschland*. Ungedr. Diss. Tübingen (1956). — G. RIEK/H.-J. HUNDT, *Der Hohmichele. Röm.-Germ. Forsch.* 25 (1962) 132 ff.

kreuzförmige Tauschierung war senkrecht zur Radachse und die ausschließlich strichförmige Tauschierung parallel zur Radachse angebracht worden. Die strichförmige Tauschierung parallel zur Radachse ist, wie Abb. 10 zeigt, an der Außenseite an drei Stellen — an den beiden Kanten und in der Mitte — durch jeweils drei Linien unterbrochen. Die in Abb. 11 und 12 wiedergegebene stärkere Vergrößerung der parallelen und schrägkreuzförmigen Tauschierung der zur Radachse senkrechten Fläche, die bei der Nachrestauration zutage trat, zeigt bei der Strichtauschierung eine ungleichmäßige Bronzearauflage. Bei der schrägkreuzförmigen Tauschierung konnte keine Abgrenzung der Einlagen an den Überschneidungen festgestellt werden, was die Verwendung eines Einlagedrahtes ausschließt. Wie die Abb. 13 zeigt, wurde zusätzlich auf der Rückseite des Eisenreifens eine dicke Bronzeschicht gefunden, die von außen nicht sichtbar war. Ein grob angeschliffenes Stück des Eisenreifens (Abb. 14) zeigt weiterhin, daß diese Bronzeschicht im Bereich der Einlage die gesamte Kante umfaßte.

Die deutlich sichtbaren Primärkristalle der Bronze ließen vermuten, daß die Bronze in den flüssigen Zustand übergegangen gewesen war. Die weiteren Untersuchungen bestätigten diese Vermutung. In der Abb. 9 ist die Probenentnahmestelle an der Strichverzierung eingezeichnet. Die Probe selbst ist in Abb. 15 wiedergegeben. Die Abschnitte für die mikroskopische Untersuchung, die in den folgenden Bildern teilweise wiedergegeben ist, sind unter der Abb. 15 eingetragen. Abb. 16 zeigt einen Querschliff durch drei Einlagen in 25facher Vergrößerung, Abb. 17 eine Einlage, die in Abb. 9 noch durch eine Oxidschicht überdeckt ist, und die Abb. 18 die linke Einlage von Abb. 16 in jeweils 100facher Vergrößerung. In Abb. 19 ist der Rand der Einlage von Abb. 18 in 500facher Vergrößerung wiedergegeben. Ein weiteres Gefügebild aus einer Einlage der Strichverzierung zeigt Abb. 20. Der Primärkristallisationsbereich des Kupfer-Zinn-Mischkristalls in der Restschmelze wird in Abb. 19 durch Ätzen und in Abb. 21 durch Schrägbeleuchtung sichtbar.

Eine Punktanalyse bei den eingezeichneten drei Punkten der Abb. 21 ergab einen Zinngehalt von  $\leq 7\%$  im Primärkristall und eine Anreicherung auf  $\geq 20\%$  Zinn in der Restschmelze. Die zweite Einlage von Abb. 20 ist in Abb. 22 und 23 in stärkerer Vergrößerung wiedergegeben. Die helle Stelle am rechten Bildrand in Abb. 22 konnte als elementares Eisen mit Hilfe der Mikroröntgenfluoreszenzanalyse identifiziert werden. Die Spuren des Elektronenstrahls über dem Bereich zwischen diesem Eisenstück und der Einlage sind auf der Gefügebildaufnahme als heller bzw. dunkler Streifen sichtbar. Die Prüfung auf Zinn und Eisen hat ergeben, daß in der Nähe des elementaren Eisens eine Anreicherung von Zinn auftritt, ohne daß Kupfer vorhanden ist. Diese Anreicherung von Zinn in der Oxidschicht könnte durch eine selektive Oxidation des Zinns aus der Bronze entstanden sein, das wesentlich schneller diffundiert sein müßte als das Kupfer, oder, da kein Kupfer gefunden wird, durch eine Oxidation einer Zinnschicht auf dem Eisen.

Die Abb. 24 gibt die Außenseite des Eisenringes in starker Vergrößerung wieder, während die Abb. 25 das Gefüge der Bronzeschicht auf der Innenseite zeigt. In beiden Fällen liegt ein Gußgefüge vor. Verschiedene Bereiche wurden durch eine Mikroanalyse untersucht. Die Punkt- und Weganalysen sind in dem Gefügebild 25 eingetragen. Es zeigte sich, daß bei der Schmelzplattierung durch die flüssige Bronze Eisen aufgenommen werden war. In der Bronze wurde sowohl bei der Probe der Außenseite als auch bei der Probe der Innenseite eine Zunahme des Eisengehaltes in der Bronze an der Grenze zum Eisen hin festgestellt. In der Restschmelze der Bronze wurde ebenfalls eine deutliche Zunahme des Eisengehaltes und zusätzlich eine Spur Blei gefunden. Sowohl im Primär-Mischkristall als auch in der Restschmelze wurden bei den Punktanalysen Spuren von Nickel festge-

stellt. In der dünnen Auflageschicht der Außenseite von Abb. 24 wurden einige Primärkristalle von Eisen gefunden, die etwa 8 0/0 Kupfer entsprechend der maximalen Löslichkeit des Kupfers im Eisen bei etwa 1100° C enthielten. Diese Eisenprimärkristalle sind in der Abb. 24 mit „A“ und „B“ gekennzeichnet. Auch hier sind in der Restschmelze größere Gehalte an Eisen nachzuweisen. Der Zinngehalt in den Eisen-Primärkristallen liegt unter 1 0/0. Das an den Eisenring anschließende Bronzebeschlagteil, das die Holznahe überdeckte, bestand aus einem etwa 0,5 mm starken Bronzeblech.

3. Gürtelblech aus Tannheim, Kr. Biberach, Grab 20 b (Verbleib: Württ. Landesmuseum Stuttgart)<sup>4</sup>.

In den Abb. 26 und 27 ist die Vorder- und Rückseite des Gürtelbleches nach der Restaurierung wiedergegeben. Hier wird ebenfalls deutlich sichtbar, daß auch die Rückseite des eisernen Gürtelbleches mit Bronze überzogen ist. Eine Mikroaufnahme der Oberfläche (Abb. 28) zeigt, daß ebenfalls Kupfer-Zinn-Primärmischkristalle vorhanden sind. Die Bronze war demnach auch hier in den flüssigen Zustand überführt worden.

4. Dolchgriff, Fundort unbekannt (Verbleib: Fürstlich Hohenzollernsches Museum Sigmaringen)<sup>5</sup>.

Die Abb. 29 zeigt den Dolch mit Klinge. Eine Seite des Knaufes ist in etwas stärkerer Vergrößerung in der Abb. 30 wiedergegeben. Sie zeigt eine ungleichmäßige Verteilung der Bronzeeinlage, wie das in Abb. 31 durch stärkere Vergrößerung deutlicher zu sehen ist. Die senkrechten Linien der Bronze gehören zu dem Lot, mit dem die beiden Griffschalenhälften zusammengelötet wurden. Die Abb. 32 zeigt einen Querschnitt durch zwei Einlagestellen. An einer Einlage (rechts) ist das Lot tief in das Eisengrundmaterial, wahrscheinlich an einer Rißstelle, eingedrungen. Der Bereich des Übergangs zwischen Bronze und Eisen wurde, wie in Abb. 33 eingetragen, durch verschiedene Konzentrations-Weg-Diagramme durch Mikroanalyse auf Eisen und Kupfer, Eisen und Zinn sowie Kupfer und Zinn mit Hilfe der Mikrosonde untersucht. In dem dunklen Einschlus in der Bronze vermindert sich der Zinngehalt stärker als der Kupfergehalt, und der Eisengehalt steigt wenig. Eine Punktanalyse dieses schwarzen Einschlusses ergab neben Kupfer und Zinn etwas Eisen, ferner höhere Gehalte an Schwefel und einen niedrigen Gehalt an Nickel. Die hellgrauen runden Primärkristalle wurden auch hier als Eisen-Mischkristall (mit 8 0/0 Kupfer) identifiziert. In der Restschmelze der Bronze ist ebenfalls Zinn angereichert. Auf der Eisenseite wird eine schmale Diffusionsschicht gefunden.

5. Dolchgriff von Harthausen-Scheer (Verbleib: Fürstlich Hohenzollernsches Museum Sigmaringen)<sup>5</sup>.

Abb. 34 gibt eine Aufnahme des Griffs dieses Dolches wieder. Der Querteil ist noch sichtbar, während der Klingenanatz nicht mehr abgebildet ist. Auch hier sind die Bronzeeinlagen ungleichmäßig. Das Gefüge (Abb. 35) zeigt ebenfalls, daß die Bronze im flüssigen Zustand aufgebracht worden sein muß. Die Konzentrations-Diagramme der Mikrosonde, deren Spuren in Abb. 35 eingetragen sind, ergaben auch hier, daß hellgraue Einschlüsse, die sich in den Spuren des Elektronenstrahls von Abb. 35 nur wenig abheben, einem Eisen-Mischkristall mit etwa 92 0/0 Eisen und etwa 8 0/0 Kupfer zuzuordnen sind.

<sup>4</sup> Frhr. GEYR v. SCHWEPPEBURG/P. GOESSLER, Hügelgräber im Illertal bei Tannheim (1910). — M. SCHRÖDER, Drei neue Tauschierungen der Hallstattkultur aus Württemberg. Fundber. aus Schwaben N. F. 15, 1959, 108 ff.

<sup>5</sup> RIETH, Tauschieretechnik<sup>2</sup> 102 ff.

## Diskussion der Versuchsergebnisse und Vergleichsversuche

Die Untersuchungen an hallstattzeitlichen Radnaben, einem Gürtelblech und an Dolchgriffen haben gezeigt, daß mit Ausnahme einer Radnabe des Fundortes Winterlingen alle Einlegearbeiten über eine schmelzflüssige Aufbringung der Bronze erfolgt sind. Aufgrund der Tatsache, daß sich auf dem Eisenreif der Radnabe des Grabhügels Hohmichele und des Gürtelbleches von Tannheim auch auf der Rückseite Bronze befindet, ferner aufgrund des Befundes, daß die Dolchgriffhälften der beiden untersuchten Dolchgriffe ebenfalls mit Bronze verbunden wurden, ist anzunehmen, daß die Technik der Einlegearbeiten in der Weise erfolgt ist, daß die Eisenteile zunächst mit Vertiefungen für die Verzierungen versehen wurden, möglicherweise dann verzinkt wurden und anschließend mit Bronzeblech belegt worden sind. Die so gefertigten Teile wurden vielleicht mit Ton ummantelt, wie das im mittelalterlichen Schrifttum<sup>6</sup> beschrieben wird, und in Holzkohle bis etwa 1150°C erhitzt. Durch die Verzinnung und/oder durch die reduzierende Atmosphäre im Holzkohlenfeuer wurde eine Oxidation des Eisens verhindert. Es ist zu vermuten, daß so eine gute Bindung zwischen der flüssigen Bronze und dem Eisen entstanden ist. Vergleichsversuche<sup>7</sup>, bei denen mit Einkerbungen versehenes Weicheisen mit CuSn<sub>6</sub> in Form von 0,1 mm Blech (weichgeglüht) eingewickelt und in Holzkohle auf 1150°C erhitzt wurde, zeigten (Abb. 36), daß sich bei diesem Verfahren Eisenmischkristalle aus der flüssigen Bronze ausscheiden können. Auch beim Tauchen einer Eisen-Probe in eine desoxidierte Kupfer-Zinn-Schmelze werden, wie Abb. 37 zeigt, Eisen-Mischkristalle vom Eisen abgelöst. In beiden Fällen werden, wie die Mikroanalyse ergab, etwa 8% Kupfer vom Eisen aufgenommen. Durch eine Ummantelung mit Ton kann ein zu starkes Abtropfen der Bronze vermieden und eine gute Füllung der eingekerbten Bereiche erzielt werden. Es ist anzunehmen, daß durch das einfache Verfahren des Umhüllens des Eisens durch Bronze-Blech und des Ummantelns mit Ton und Erhitzen in Holzkohle in der Hallstattzeit Bronze aufgebracht und die überschüssige Bronzeauflage durch Abschleifen außerhalb der Kerben entfernt wurde, wodurch das Eisen an den nicht vertieften Stellen wieder zum Vorschein kam.

## Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß während der Hallstattzeit in vielen Fällen die Tauschierung von Bronze auf Eisen wahrscheinlich durch eine Bronzeblechummantelung von vorgekerbtem Eisen und durch Erhitzung des mit Ton ummantelten Verbundes in Holzkohle bis zum Schmelzen des Bronzebleches erfolgt ist. Eine Abarbeitung der Bronze legte dann die nicht eingetieftete Eisenschicht frei. Die in den vorher angebrachten Vertiefungen zurückbleibende Bronze ergab die Tauschierung. In anderen Fällen ist eine Tauschierung durch Warm- oder Kalteinhämmern oder Einkleben von Draht oder Blech in die Vertiefungen erfolgt. Die Technik des Umhüllens mit Bronzeblech und Ummantelns mit Ton ist wesentlich einfacher, insbesondere bei komplizierten Verzierungen, als die des Einhämmerns, Einklebens oder Einlöten von sorgfältig zugeschnittenen Blech- oder Drahtstückchen.

<sup>6</sup> THEOPHILUS PRESBYTER, *Diversarum Artium Schedula*, hrsg. von W. THEOBALD (1933) 168.

<sup>7</sup> Nach Untersuchungen im Institut für Werkstoffwissenschaften II der Universität Erlangen-Nürnberg, Untersuchungsbericht 67/70, Untersuchungsbericht 78/72.

*Anschriften der Verfasser:*

Prof. Dr. ULRICH ZWICKER, HANS ROLLIG und UTE SCHWARZ, Institut für Werkstoffwissenschaften II (Werkstoffkunde und Technologie der Metalle), Technische Fakultät, Universität Erlangen-Nürnberg

852 Erlangen, Martensstraße 5

BENNO URBON und PETER EICHHORN, Konservierungs-Werkstätten des Württembergischen Landesmuseums

7 Stuttgart 1, Altes Schloß



Abb. 1 Radnabe von Winterlingen, Kr. Balingen; mit Strich- und Kreis-Punkt-Einlegearbeit und Stellen der Probenahme (A 1 und A 2).

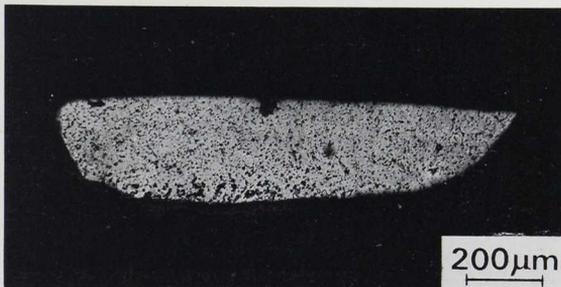


Abb. 2 Makrogefüge, Probe A 1 aus der Innennabe mit Lamellenverziehung (Eisen unten).

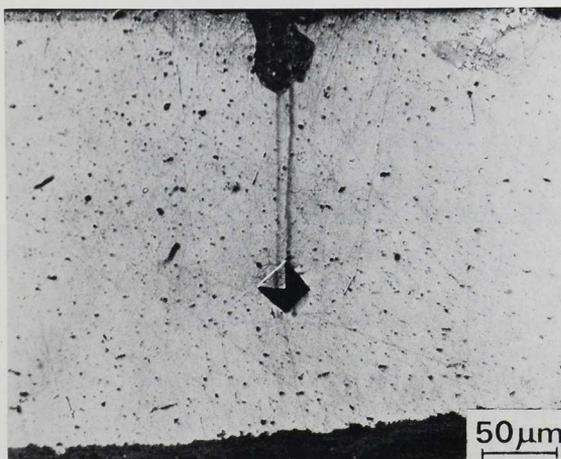


Abb. 3 Mikrogefüge, Probe von Lamellenverziehung (A 1) mit Spur des Elektronenstrahls, Eisenseite unten.

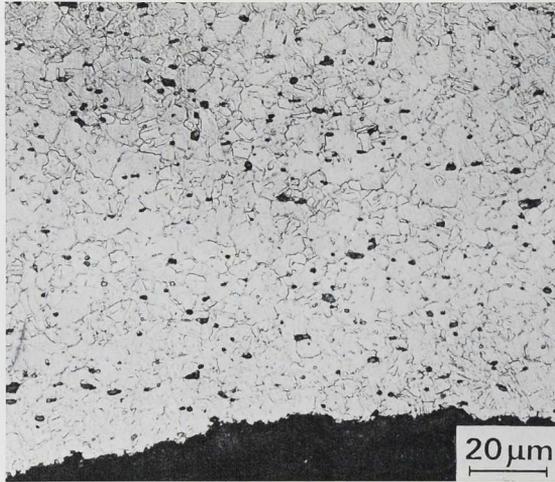


Abb. 4 Wie Abbildung 3; im Bereich der verzünderten Eisenschicht (unten), geätzt.

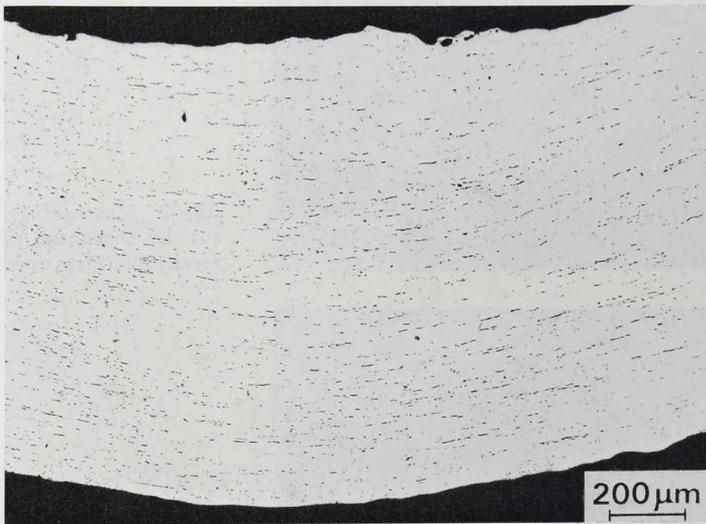


Abb. 5 Gefüge der Bronzeinlage (Kreisverzierung) der Probe A 2, nicht geätzt, mit Schlackeneinschlüssen.

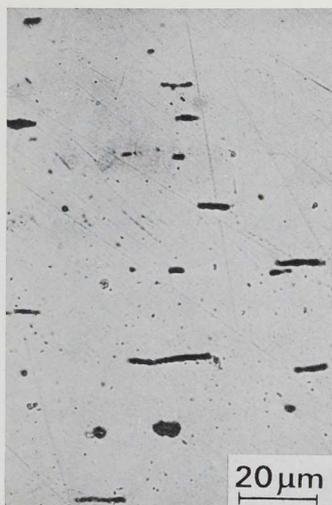


Abb. 6 Wie Abbildung 5; polarisiertes Licht, nicht geätzt.



Abb. 7 Wie Abbildung 6; geänderte Winkeleinstellung des Analysators, nicht geätzt.

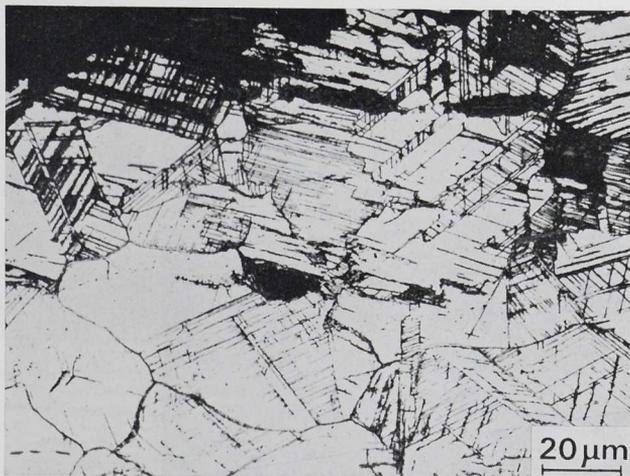


Abb. 8 Gefüge der Bronzeinlage im Bereich der Oxidation an der Eisenseite mit bevorzugter Oxidation im Bereich der Zwillingsbildung, nicht geätzt.

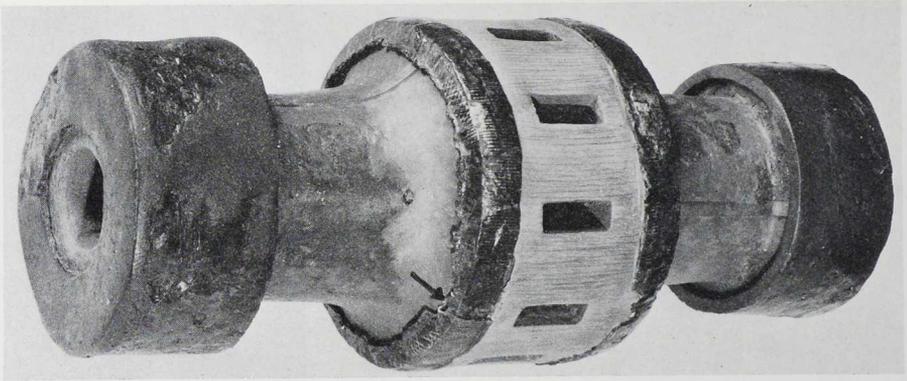


Abb. 9 Restaurierte Radnabe aus Grabhügel Hohmichele, Kr. Saulgau; mit Strichverzierung (oben) und gemischter Schrägkreuz- und Strichverzierung (seitlich). Radnabendurchmesser etwa 17 cm.

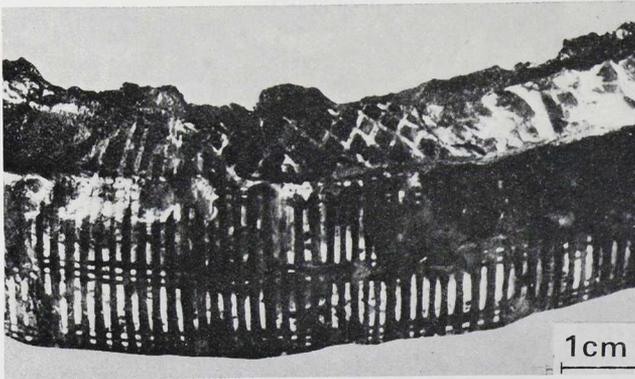


Abb. 10 Tauschierung auf Eisenreifen der Radnabe aus Grabhügel Hohmichele, Kr. Saulgau.

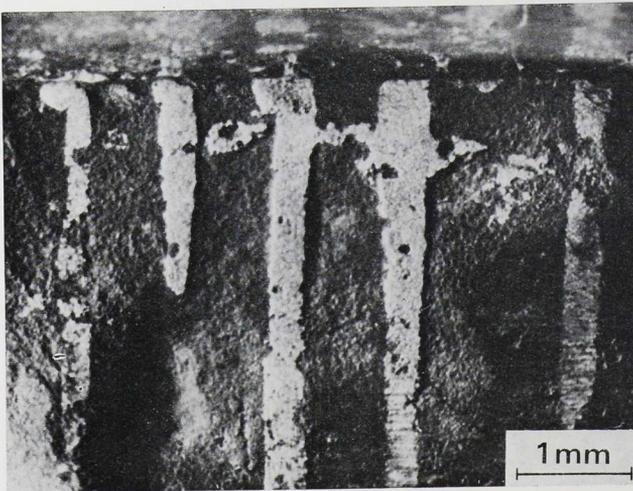


Abb. 11 Strichförmige Tauschierung auf Eisenreif senkrecht zur Radachse.

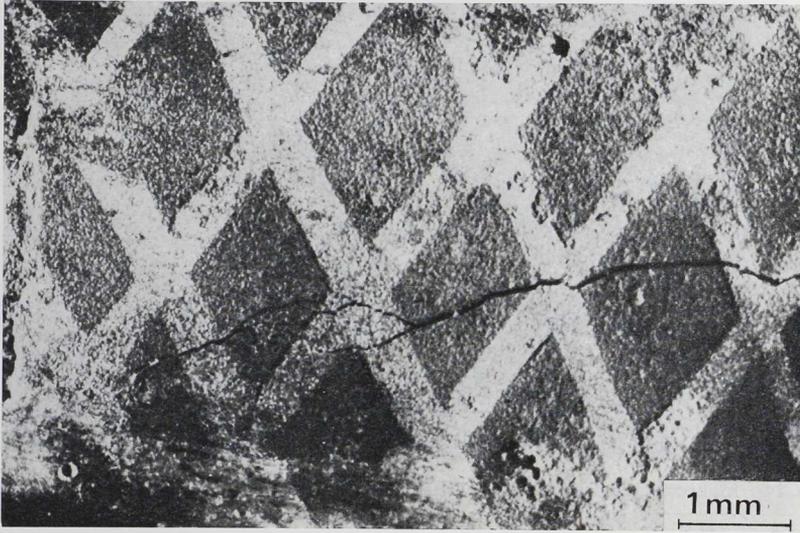


Abb. 12 Schrägkreuztauschierung auf Eisenreif senkrecht zur Radachse.

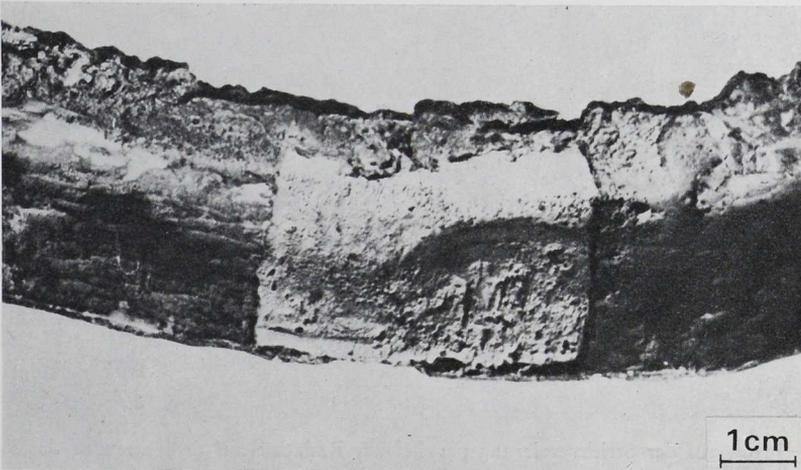


Abb. 13 Innenseite des Eisenreifens der Radnabe Hohmichele mit teilweise freigelegter Bronzeschicht.

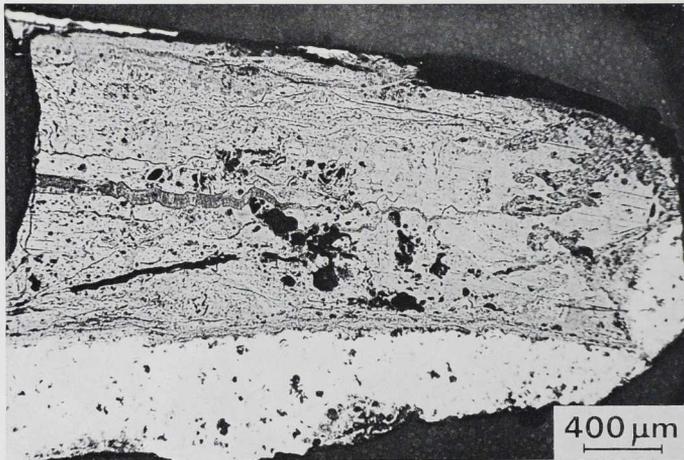


Abb. 14 Makrogefüge, Randzone des Eisenreifens (dicke Brozeschicht auf der Innenseite).

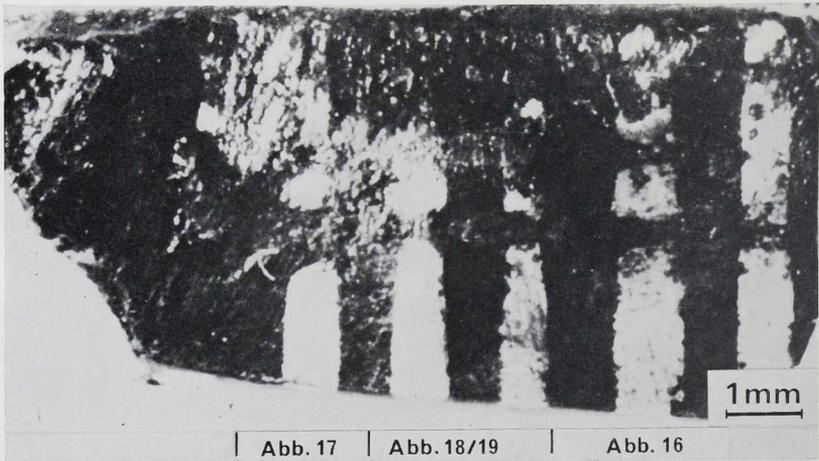


Abb. 15 Probe aus der Strichverziehung parallel zur Radachse auf dem Eisenreif der Radnabe.

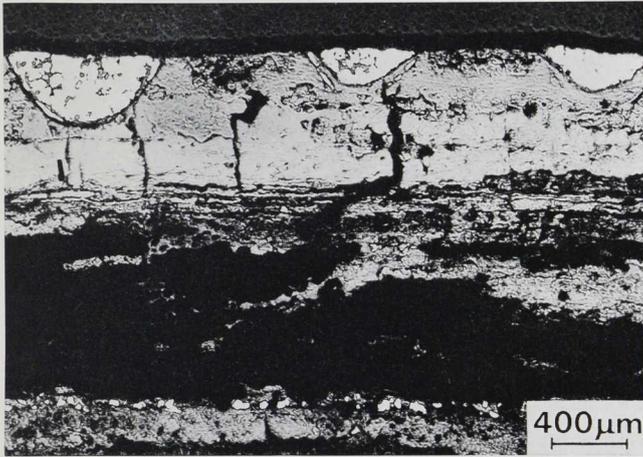


Abb. 16 Makrogefügebild des in Abbildung 15 eingelagerten Bereiches senkrecht zur Oberfläche.



Abb. 17 Mikrogefüge einer von Oxidschicht überdeckten Einlage aus dem Bereich 17 von Abbildung 15, nicht geätzt.

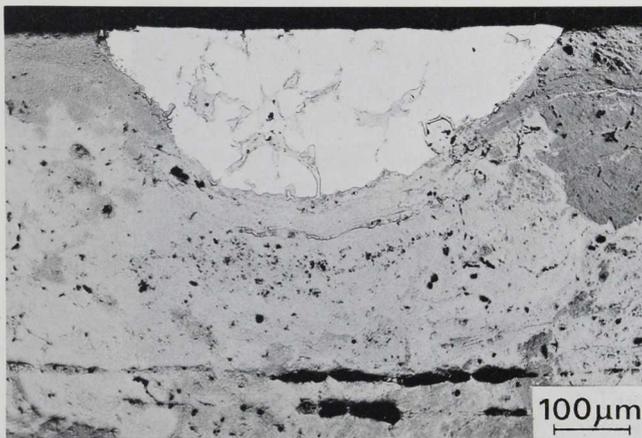


Abb. 18 Mikrogefüge des in Abbildung 15 eingetragenen Abschnittes 18/19, nicht geätzt.

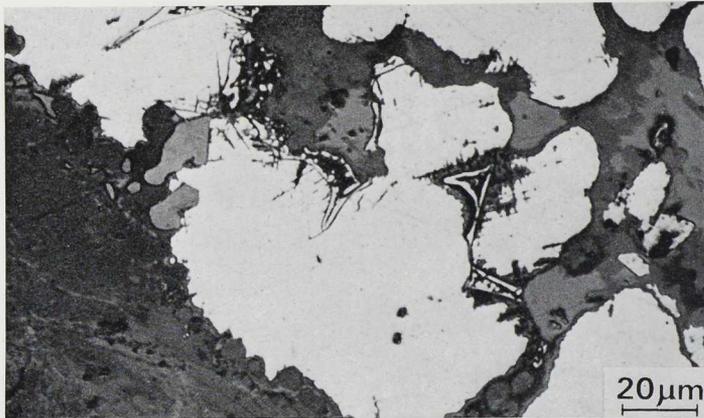


Abb. 19 Aus Abbildung 18, linke mittlere Zone der Einlage, Mikrogefüge, nicht geätzt.

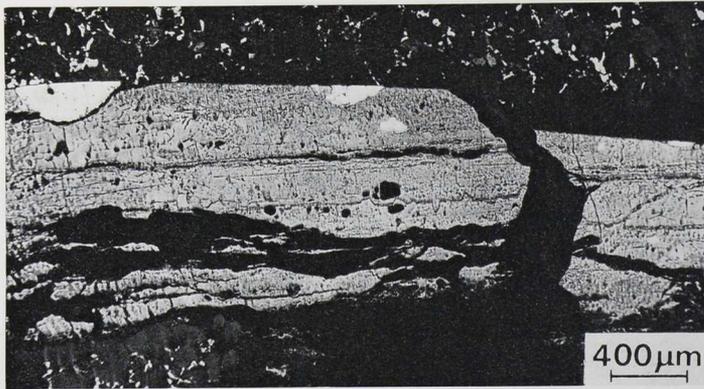


Abb. 20 Makrogefüge der Probe aus Strichverziehung.

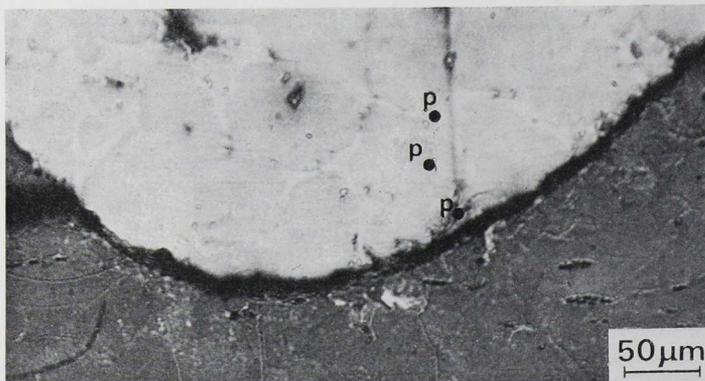


Abb. 21 Wie Abbildung 20, dort links wiedergegebene Einlage in Schrägbeleuchtung, Mikrogefüge, nicht geätzt.



Abb. 22 Mikrogefüge der mittleren Einlage von Abbildung 20 mit Spuren der Mikroröntgenfluoreszenzanalyse, nicht geätzt.

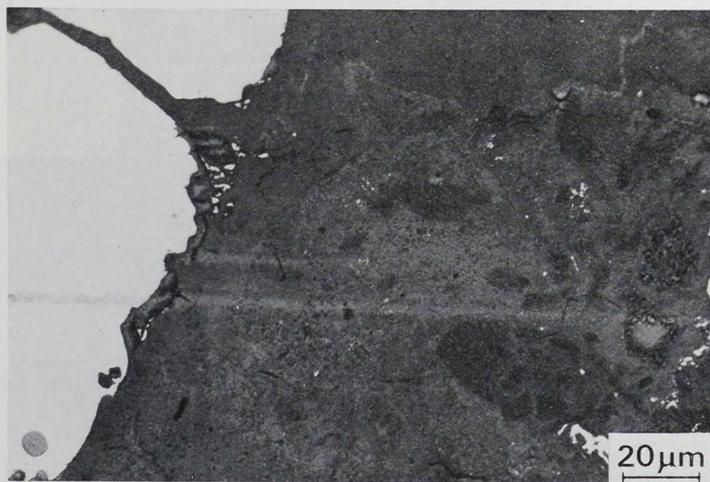


Abb. 23 Wie Abbildung 22; in stärkerer Vergrößerung.

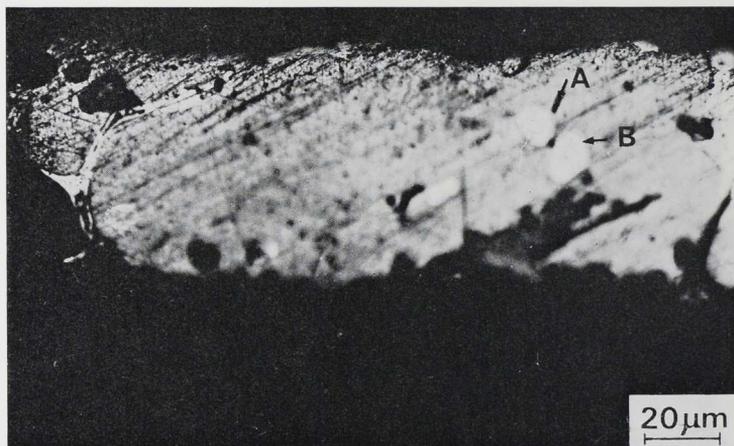


Abb. 24 Mikrogefüge, dünne Einlage (Außenseite) des Eisenreifens, nicht geätzt.

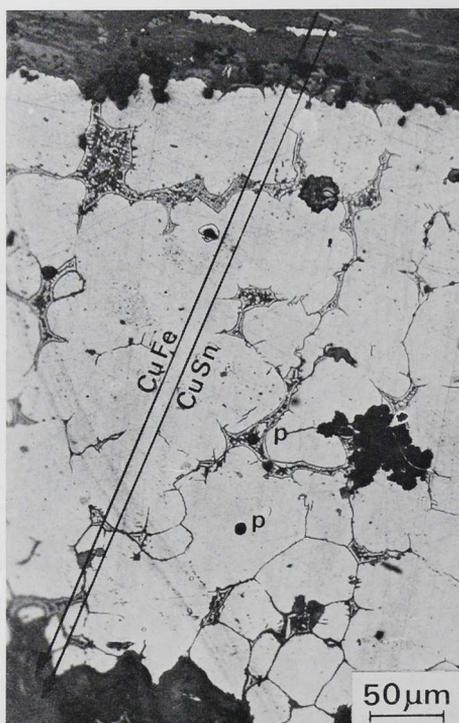


Abb. 25 Mikrogefüge, Innenseite des Eisenreifens mit dicker Bronzeschicht und eingezeichneten Spuren der Mikroröntgenfluoreszenzanalyse, nicht geätzt.



Abb. 26 Gürtelblech aus Tannheim, Kr. Biberach; Vorderseite mit Tauschierung.



Abb. 27 Gürtelblech-Rückseite, helle Zone freigelegte Bronzeschicht.



Abb. 28 Mikroaufnahme der Oberfläche einer dreieckigen Einlage des Gürtelbleches Tannheim.



Abb. 29 Dolch von unbekanntem Fundort.

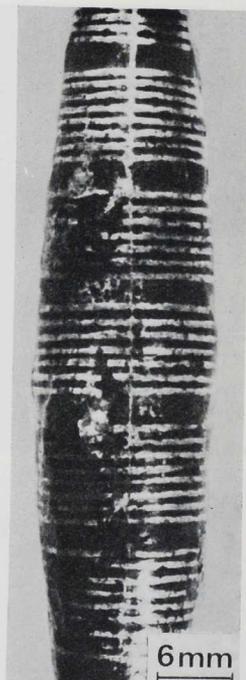


Abb. 30 Seitenansicht des Knaufes von Dolch Abb. 29.

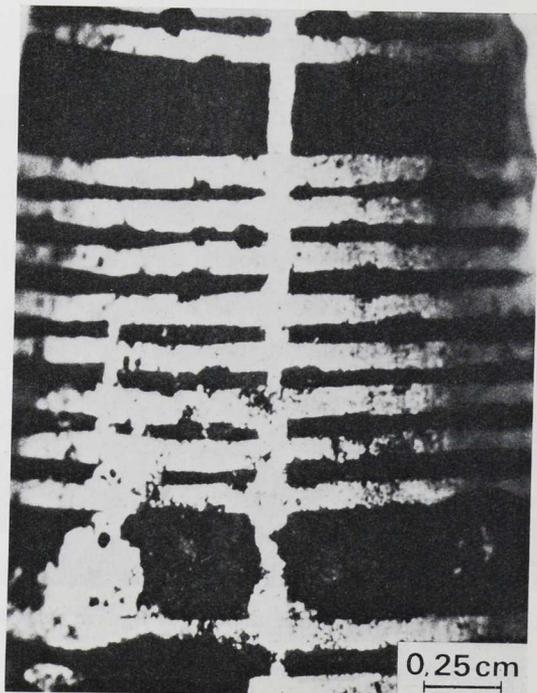


Abb. 31 Stärkere Vergrößerung aus dem Bereich der Abbildung 30.



Abb. 32 Gefüge von zwei Einlagen des Dolches unbekannter Herkunft, nicht geätzt.

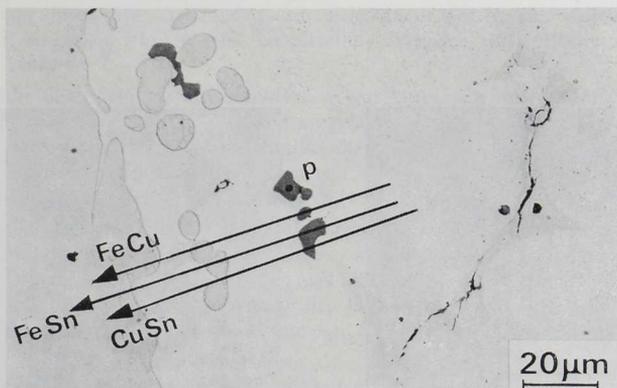


Abb. 33 Mikrogefüge und Eintragung der Spur des Elektronenstrahls im Bereich des Übergangs Eisen (hellgrau) zur Bronze (hell), nicht geätzt.



Abb. 34 Klingensatz des Dolches von Harthausen-Scheer.

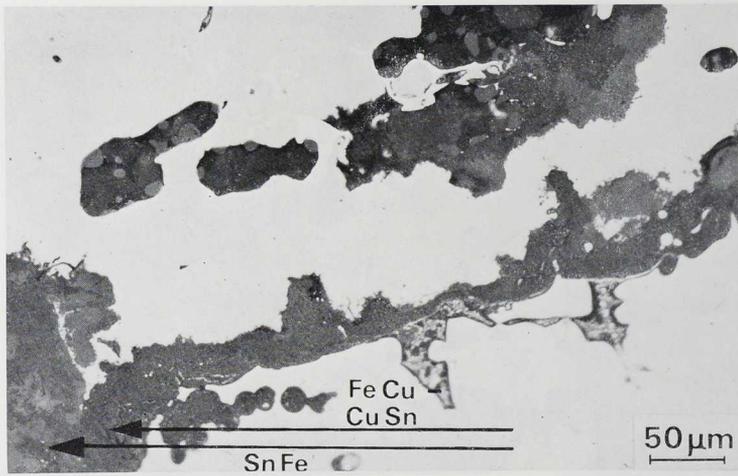


Abb. 35 Mikrogefüge aus dem Bereich der Übergangszone zwischen Einlage und Eisenwerkstoff des Dolchgriffes von Harthausen, nicht geätzt.

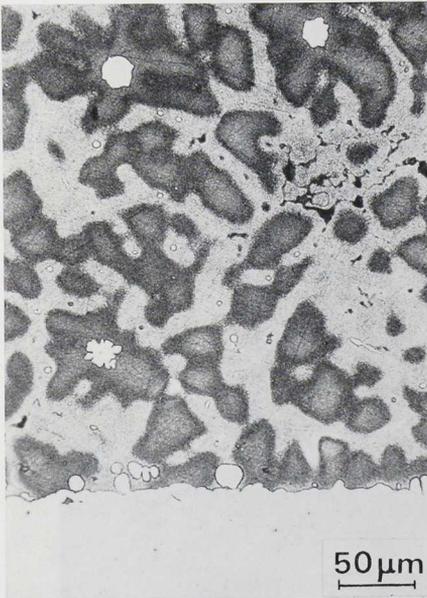


Abb. 36 Mikrogefüge der Diffusionszone eines mit CuSn6-Bronzeblech (0,1 mm) umhüllten Eisens (5 min 1150° C in Holzkohle ge-  
glüht), geätzt.

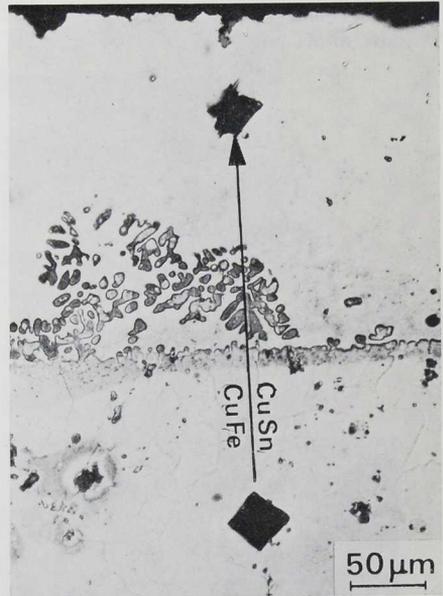


Abb. 37 Mikrogefüge der Verbundzone einer in desoxidierte CuSn10-Schmelze eingetauchten verzinn-  
ten Eisenprobe (Badtemperatur 1250° C, Tauchzeit 7,5 sec), geätzt.