



Berg Huettenmaenn Monatsh (2023) Vol. 168 (9): 453–467
<https://doi.org/10.1007/s00501-023-01380-1>
 © The Author(s) 2023

BHM Berg- und
Hüttenmännische
Monatshefte

Untersuchung eines Doppelspitzschlängels aus dem Umfeld der römischen Siedlung Michlhallberg nahe Altaussee (Steiermark, Österreich)

Daniel Modl¹, Susanne Strobl² und Roland Haubner²

¹Abteilung Archäologie & Münzkabinett, Universalmuseum Joanneum, Graz, Österreich

²Technische Universität Wien, Wien, Österreich

Eingegangen 14. Juli 2023; angenommen 18. Juli 2023; online publiziert 17. August 2023

Zusammenfassung: Ein eiserner Doppelspitzschlängel aus dem Umfeld der römischen Siedlung am Michlhallberg (Steiermark) wurde untersucht, der im Kontext mit einem möglichen römischen Salzabbau an der Südseite des Sandlings bei Altaussee steht. Das Eisen für den Doppelspitzschlängel wurde aus einer Rennfeuerluppe hergestellt. Durch diese Art der Eisengewinnung ist eine Weiterverarbeitung durch Schmieden notwendig. So findet man im Schlängel sowohl Schlacke als auch eine recht ungleichmäßige Kohlenstoffverteilung. Deshalb erfolgte eine Probenentnahme an mehreren Stellen.

Es liegt ein variationsreiches Stahlgefüge vor, bestehend aus unter-, über- und eutektoidem Kohlenstoffgehalt. Von beinahe reinem polygonalem Ferrit über Widmannstätschem, Korngrenzen- und säulenartigem Ferrit treten auch Perlit (unterschiedlicher Feinheit), Zwischenstufe (Bainit), Martensit, sowohl tetragonaler als auch kubischer, und reiner Zementit, langnadelig bzw. an den Korngrenzen, auf.

Es wurde auch die abgebrochene Spitze eines Doppelspitzschlängels untersucht, die möglicherweise mit der Reparatur eines defekten Schlängels zusammenhängt. Regelmäßige Reparaturen an den Gezähnen waren notwendig.

Schlüsselwörter: Gezähe, Stahl, Archäometallurgie, Römerzeit

Investigation of a Double-Pointed Pick from the Environment of the Roman Settlement Michlhallberg near Altaussee (Styria, Austria)

Abstract: A double-pointed pick made of iron from the environment of the Roman settlement at Michlhallberg (Styria) was examined, which stands in the context of a possible Roman salt mining on the south side of the Sandling near Altaussee. The iron for the double-pointed pick was made in a bloomer furnace. This type of iron production requires further processing by forging. So, both slag and a rather uneven distribution of carbon can be found in the pick. For this reason, samples were taken from several points.

There are various steel structures, consisting of hypo-, hyper- and eutectoid carbon content. From almost pure polygonal ferrite through Widmannstätten, grain boundary and columnar ferrite, pearlite with varying fineness, bainite, martensite, both tetragonal and cubic, and pure cementite, long-acicular or at the grain boundaries, also occur.

The broken tip of a double-pointed pick was also examined, possibly related to the repair of a damaged pick. Regular repairs of the mining tools were necessary.

Keywords: Mining tool, Steel, Archaeometallurgy, Roman Age

1. Archäologisches Fundgebiet

1.1 Der Michlhallberg

Nordwestlich von Altaussee liegt der 1717 m hohe Kalkstock des Sandling, der das größte Salzvorkommen Österreichs überdeckt. Das ergiebige Hauptsalzlager an der Ostseite des Berges im Bereich der heutigen Salzwelten Altaussee wurde nachweislich schon seit dem Hochmittelalter beschürft. Die ältesten Bergbauaktivitäten dürften jedoch an der Südseite des Sandlings zu suchen sein, dort wo die Rö-

Prof. Dr. R. Haubner (✉)
 Technische Universität Wien,
 Getreidemarkt 9/164–03,
 Wien, Österreich
 roland.haubner@tuwien.ac.at

mer im verkehrstechnischen Abseits und in Ungunstlage auf rund 1000m Seehöhe eine Siedlung errichteten. Diese liegt im Hangbereich unmittelbar östlich der oberösterreichisch-steirischen Grenze bzw. des heutigen Michlhallbachs (Sandlingbach). Benannt wurde die römische Siedlung nach dem dortigen Flurnamen Michlhallberg, der auf die mittelalterliche Salzgewinnung verweist [1–4].

1.2 Forschungen 1997–1999

Die römische Siedlung Michlhallberg wurde in den Jahren 1997 bis 1999 durch das Institut für Klassische Archäologie der Universität Innsbruck unter der Leitung von Gerald Grabherr systematisch erforscht [5, 6]. Bei den Grabungen wurde festgestellt, dass durch Massenbewegungen die Siedlungsschichten teilweise talabwärts verlagert wurden. Dies erklärt möglicherweise auch, warum vor Ort keine aussagekräftigen baulichen Strukturen aus der Römerzeit mehr festgestellt werden konnten. Durch Grabungen und Prospektionen sind aber immerhin rund 1600 Kleinfunde aus Keramik, Glas, Metall, Stein und Holz geborgen worden, darunter Münzen, Fibeln, Gürtelbestandteile, Werkzeuge sowie Ess-, Koch- und Vorratsgeschirr, die nahelegen, dass die Siedlung vom Ende des 2. bis in das späte 4. Jh. n. Chr. bestand. Diverse Militaria im Fundmaterial lassen zudem die Anwesenheit von Militär oder von staatlichen Beamten in der Siedlung am Michlhallberg vermuten, die hier Schutz und Verwaltung sicherstellen sollten. Ihre Präsenz wurde mit einem vermuteten Salzabbau vor Ort begründet, für den jedoch keine konkreten Bergbauspuren, sondern nur der Fund eines einzelnen Doppelspitzschlängels sprachen, also eines schweren Werkzeugs zur Steinbearbeitung [7].

1.3 Forschungen 2011–2022

In den Jahren 2011 bis 2013 und 2021/22 wurden die Geländeforschungen im Umfeld der römischen Siedlung am Michlhallberg durch die Archäologische Arbeitsgemeinschaft Salzkammergut bzw. den lokalen Verein HEFOSA, das Bundesdenkmalamt und das Universalmuseum Joanneum in Graz wieder aufgenommen und erbrachten rund 300 weitere Metallfunde, darunter auch 20 vollständig erhaltene Doppelspitzschlängel und diverse Fragmente von Spitzen, die als Einzelfunde bzw. als Teil eines Werkzeugdepots im Umfeld des in den 1990er-Jahren untersuchten Hauptsiedlungsbereich bzw. der dazugehörigen Straßen-trasse entdeckt wurden (Abb. 1, [8]). Sie scheinen die Interpretation des Fundortes als römische Bergbausiedlung weiter zu stützen. Zudem konnte in diesem Areal auch ein verbrochenes Stollenmundloch mit vorgelagerter Halde untersucht werden, das jedoch nicht der Römerzeit, sondern dem frühneuzeitlichen Salzbergbau, um die Mitte des 16. Jahrhunderts zuzuordnen ist. Aufgrund der Instabilität des geologischen Untergrundes – bestehend aus Kalkschollen, die auf einem duktilen Haselgebirge ruhen – und daraus resultierender Massenbewegungen scheint es unwahrscheinlich, dass in Zukunft am Michlhallberg noch zeitlich weiter zurückreichende, oberflächennahe Berg-



Abb. 1: Auswahl einiger gut erhaltener Doppelspitzschlägel vom Michlhallberg. (Foto: D. Modl)

bauspuren, wie z. B. aus der Römerzeit, entdeckt werden können.

2. Der Doppelspitzschlägel

2.1 Einsatzbereich und Anwendung

Der Doppelspitzschlägel ist eine alte Gezäheform, die auch unter den Namen Zweispitz, Flügeleisen oder Doppelkeilhaue bekannt ist. Mit ihm wurden mittelfeste Weichgesteine, wie z. B. Sandstein, Kalkstein und Marmor gebrochen, flächig zugerichtet oder mit Ausnehmungen versehen (Keilloch, Schrämgraben) [9–11]. Der Doppelspitzschlägel ist auch aus dem Kontext der Salzbergwerke und Salinen im 19. und 20. Jahrhundert bekannt, wo er zum Brechen von Steinen, zur Zurichtung von Mauerquadern, beim Schrämen und Schlitzen im Steinsalz und teilweise auch beim Ablösen der Salzkruste vom Boden der Sudpfannen genutzt wurde (Abb. 2, [12, 13]).

Dieses vielfältig einsetzbare Werkzeug wurde zweihändig geführt und hatte dabei – je nach Verwendung – Stiellängen von ungefähr 40 bis 80 cm. Die Stiele waren meist aus Buchen und Eschenholz gefertigt. Durch die zweifache Spitze war dieses Schlagwerkzeug nicht nur besser ausbalanciert als einseitige Gezähe, sondern besaß auch eine höhere Standzeit, da nach Abarbeitung der einen Spitze, die Arbeit mit der zweiten unmittelbar fortgesetzt werden konnte.

2.2 Beschreibung und Erhaltung

Die am Michlhallberg gefundenen Doppelspitzschlägel besitzen einen langgestreckten Körper mit einer deutlichen Schwellung im Bereich des Stielauges bzw. Schaftlochs. Beidseitig des Stielauges verlaufen zwei annähernd symmetrische Schenkel mit hochrechteckigem Querschnitt, die in kurze, stabile Spitze auslaufen. Der Doppelspitzschlägel



Abb. 2: Drei historische Doppelspitzschlägel („Zwoaspitz“) aus der Saline Aussee (mit der Draufsicht und dem Querschnitt), vermutlich 19./20. Jahrhundert; Sammlung „Steirisches Salz“ in Schloss Trautenfels, Universalmuseum Joanneum: a Inv.-Nr. 11.323; b Inv.-Nr. 14.684, c Inv.-Nr. 11.270. (Foto/Grafik: D. Modl)

erscheint im Querschnitt plankonvex mit einer flachgewölbten Oberseite und einer relativ ebenen Unterseite. Die Länge und das Gewicht der bislang untersuchten Stücke schwankt zwischen 36,8 bis 24,9 cm und 2,6 bis 1,2 kg (Abb. 3). Auch die Maße des ovalen und in einigen Fällen komplett mit Limonit verkrusteten Stielauges kann erheblich variieren, wenn man die größte und kleinste Lochung miteinander vergleicht, die bei $4,1 \times 3,1$ cm bzw. $2,9 \times 1,9$ cm liegen. Je nach Durchmesser des Stielauges beträgt die größte Breite der Doppelspitzschlägel zwischen 4,8 und 6,3 cm.

Der größte Teil der am Michlhallberg geborgenen Doppelspitzschlägel wirkt auf den ersten Blick einsatzbereit und kaum abgenutzt, wie ihre intakten Spitzen zeigen. Einige Exemplare weisen jedoch deutliche Schäden auf, wie ein aufgerissenes Stielauge bzw. Schafthaus, einen gebrochenen Schenkel oder deformierte oder fehlende Spitzen (Abb. 4). Bei einigen Doppelspitzschlägeln liegt das Schaftloch zudem nicht mittig, was vermutlich damit zusammenhängt, dass abgearbeitete oder abgebrochene Spitzen kontinuierlich, aber ungleichmäßig nachgeschmiedet wurden. In diesem Kontext sind vielleicht auch die kleineren Doppelspitzschlägel zu sehen, deren Länge – außer dies war arbeitstechnisch gewollt – durch das wiederholte Nachspitzen schrumpfte.

2.3 Datierung und Vergleiche

Da am Michlhallberg ein neuzeitlicher Salzbergbau belegt ist, wurde zu Beginn der aktuellen Forschungen die Datierung der dort gefundenen Doppelspitzschlägel in die Römerzeit noch einmal kritisch hinterfragt und Vergleichsuntersuchungen angestellt. Vier Charakteristika unterscheidet

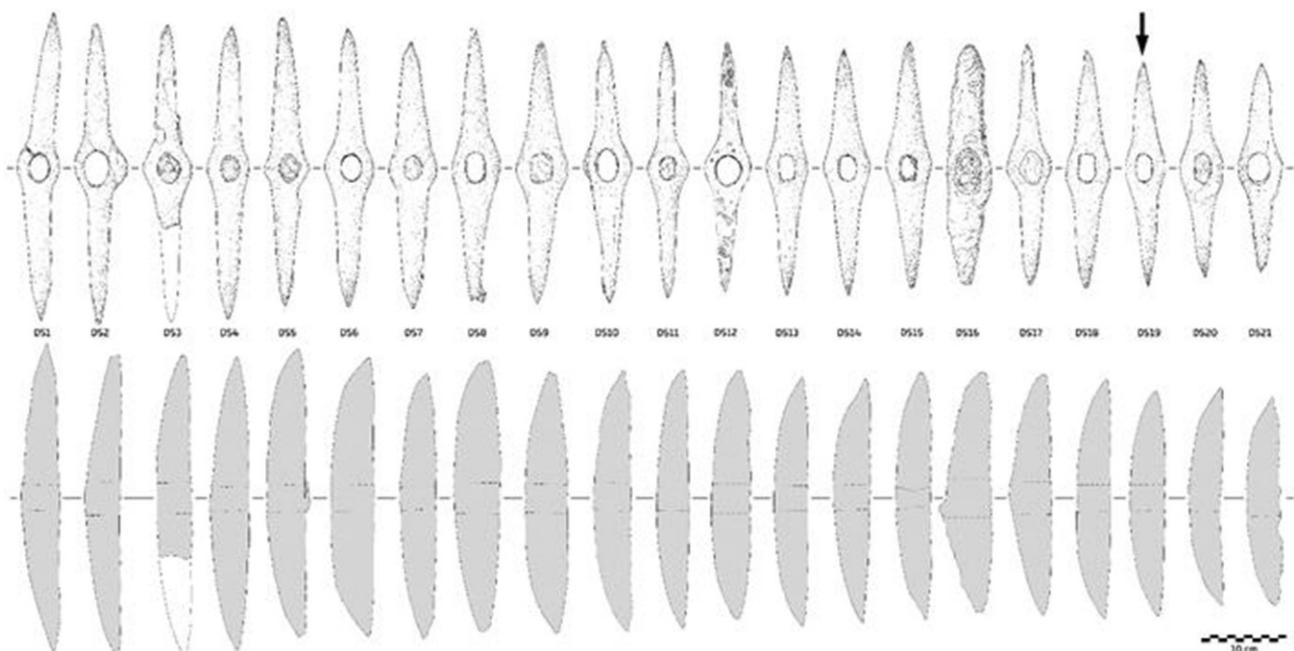


Abb. 3: Zeichnerische Gegenüberstellung der Doppelspitzschlägel DS1–21 mit der Draufsicht und dem Querschnitt (der *Pfeil* markiert den untersuchten Doppelspitzschlüssel DS19). (Grafik: M. Windholz-Konrad/D. Modl)



Abb. 4: Gegenüberstellung von drei beschädigten Spitzen: **a** Verbogene Spitze (DS18); **b** Deformierte Spitze (DS8), **c** Abgebrochene Spitze (DS8). (Foto: D. Modl)

die Exemplare vom Michlhallberg von den meisten ihrer neuzeitlichen Gegenstücke [14, 15]: Sie erscheinen insgesamt weniger gedrunken und verfügen über eine stärkere Schwellung im Bereich des Schaftlochs, sie besitzen durchgehend ein ovales Auge und sie weisen keine mit einer Formpunze eingeschlagenen Schmiedemarken auf.

Innerhalb der bekannten römischen Gezähe bilden die Doppelspitzschlägel vom Michlhallberg entsprechend ihres charakteristischen Aussehens einen eigenen Typ, zu dem bislang nur wenige Vergleichsbeispiele existieren. Werkzeuge aus der Bergbauregion Río Tinto in der spanischen Provinz Huelva [16, 17], aus dem Bereich der römischen Moselbrücke in Trier [18], aus den Tuffgruben der Pellenz in der Osteifel [19], aus dem römischen Kastell Saalburg bei Bad Homburg [20], vom Moosberg bei Murnau am Nordrand der bayerischen Alpen [21] oder aus dem für seine antike Salzmine bekannten Turda in der rumänischen Region Siebenbürgen [22] ähneln in manchen Charakteristika den Exemplaren von Michlhallberg. Den Vergleichsstücken ist gemein, dass sie oft aus keinen gesicherten, römerzeitlichen Fundzusammenhängen stammen. Auffällig ist auch, dass sie an den genannten Fundorten nur in ein oder zwei Ausführungen erscheinen. Aus der archäologischen Fundregion um den Michlhallberg sind dagegen 21 fast vollständige Exemplare bekannt, die durch ein weiteres Fundstück von der spätrömischen Höhensiedlung auf der Knallwand in Ramsau am Dachstein [23], ungefähr 23 km südlich vom Michlhallberg, ergänzt werden. Nach derzeitigem Kenntnisstand wird ein römerzeitliches Alter für die Doppelspitzschlägel vom Michlhallberg angenommen.

3. Metallkundliche Untersuchungen

3.1 Ausgangslage

In Österreich sind römische Bergbauwerkzeuge bislang erst selten werkstoffkundlich untersucht worden. Hierzu zählen zwei Gezähetypen aus Kärnten, einerseits ein massiver Doppelspitzschlägel mit achteckig facettierten Kopf aus dem römerzeitlichen Marmorsteinbruchrevier Spitzel-

ofen [24, 25] und ein länglicher Tüllenlappenpickel von der Fundstelle Altbergbau 1 vom Hüttenberger Erzberg [26]. Durch die Gefügeuntersuchungen eines Doppelspitzschlägels und einer abgebrochenen Spitze vom Michlhallberg erwarteten sich die Autor*innen weitere Erkenntnisse zum Fertigungsprozess von Gezähen und zur Stahlverarbeitung während der Römerzeit.

3.2 Probenauswahl

Aus dem umfangreichen Konvolut an Doppelspitzschlägeln und ihren Bruchstücken vom Michlhallberg wurden zwei Stücke für metallkundliche Untersuchungen ausgewählt und dementsprechend präpariert.

Beim ersten Objekt handelte es sich um den vollständig erhaltenen Doppelspitzschlägel mit der Fundnummer 5WM2013 bzw. der Bearbeitungsnummer DS19 (Abb. 5). Mit einer Länge von 26,4 cm, einer Breite von 4,8 cm, einer Höhe von 4,1 cm und einem Gewicht von 1382 g gehörte er zu den kleinsten bekannten Exemplaren dieses Gezähetyps. Der Doppelspitzschlägel besitzt ein ovales Auge bzw. Schaftloch mit Maßen von 3,5 × 2,0 cm. Die gesamte Oberfläche des Doppelspitzschlägels ist stark korrodiert und mit Rost überzogen.

Bei dem zweiten Objekt handelt es sich um die abgebrochene Spitze eines Doppelspitzschlägels mit der Fundnummer 12MP078 (Abb. 6). Sie ist 6,1 cm lang, 2,9 cm breit und besitzt ein Gewicht von 80 g. Charakteristisch für die langpyramidale Spitze mit rechteckigem Querschnitt ist eine an der Bruchfläche abstehende Lamelle. Auch die Oberfläche dieses Objekts war stark mit Korrosion überzogen, die bei einer vorangegangenen Restaurierung teilweise mittels Sandstrahlgerät abgetragen wurde.

3.3 Probenpräparation

Der Doppelspitzschlägel wurde mittels einer Bandsäge zuerst halbiert, worauf eine der Hälften der Länge nach geteilt wurde. Die weitere Zerteilung dieses Segments erfolgte mittels einer metallographischen Labortrennmaschine. Die Entnahmestellen der verschiedenen Proben bzw. Untersuchungsbereiche wurden in einer perspektivischen Ansicht des Segments verzeichnet (Abb. 7). Die abgebrochene Spitze konnte dagegen direkt mit der Labortrennmaschine zerteilt werden.

Die Teilstücke wurden in Epoxidharz kalteingebettet und danach mittels Schleifen und Polieren präpariert. Die polierten Proben wurden sowohl ungeätzt als auch nach einer Ätzung mit 3%iger Nital- bzw. Klemm1-Lösung im Lichtmikroskop (LOM) untersucht. Um die vorliegenden Stahlgefüge besser beurteilen zu können, wurden Mikrohärtemessungen nach Vickers HV 0,1 durchgeführt.

4. Gefüge des Doppelspitzschlägels

Im Doppelspitzschlägel findet man, aufgrund sehr ausgeprägter C-Gradienten, nahezu alle gängigen Stahlgefüge



Abb. 5: Orthoansichten des Doppelspitzschlängels DS19 mit vier Querschnitten. (3D-Modell: Archaeogon/P. Bayer; Grafik: D. Modl)

sowie auch Abschreckgefüge. Die Beschreibung beginnt bei der Spitze mit den Bereichen A, B und C, setzt sich fort mit den Bereichen D und E am mittleren Schenkel und endet am Auge des Doppelspitzschlängels mit den Bereichen F und G (Abb. 7).

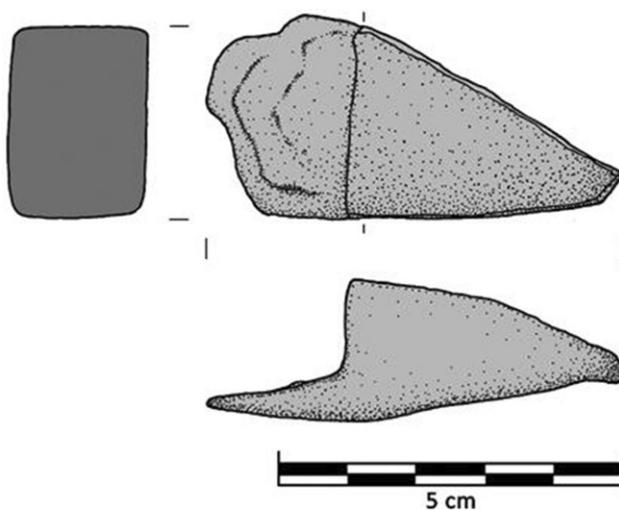


Abb. 6: Einzelspitze: Seitenansicht, Unterseite und Querschnitt. (Grafik: M. Windholz-Konrad/D. Modl)

4.1 Bereich A: Spitze, vorderer Abschnitt, Längsschnitt (Abb. 8)

An den zusammengesetzten Überblicksbildern der Abb. 8a, b erkennt man deutlich die Korrosion und die Schlackeneinschlüsse. Nach dem Ätzen mit Nital (Abb. 8b, c) lassen sich weiße sowie unterschiedlich braun gefärbte Bereiche unterscheiden. Ein derartiges Ätzverhalten deutet auf Gefügeveränderungen durch eine Wärmebehandlung hin. In den Detailbildern Abb. 8d, e sind Martensit und Restaustenit zu sehen, wobei in Abb. 8e neben dem dunklen, kubischen Martensit auch weißer, tetragonaler Martensit auftritt. Während Abb. 8f einen Überblick gibt, handelt es sich bei Abb. 8g, h um entsprechende Detailbilder. Sie zeigen überwiegend Perlit, etwas Ferrit (weiß) und Zwischenstufe (Bainit). In Abb. 8h ist zusätzlich Restaustenit und Martensitbildung zu beobachten.

4.2 Bereich B: Spitze, Querschnitt (Abb. 9)

Die unterschiedlich angeätzten Gefüge zeigen in der Überblicksaufnahme einen Kohlenstoffgradienten an (Abb. 9a). Die helleren bunten Zonen enthalten weniger Kohlenstoff und die dunkelblauen etwas mehr. Einige Stellen wurden vom Ätzmittel nicht angegriffen und hier befinden sich Höfe, in deren Zentrum Schlackeneinschlüsse erkennbar sind.

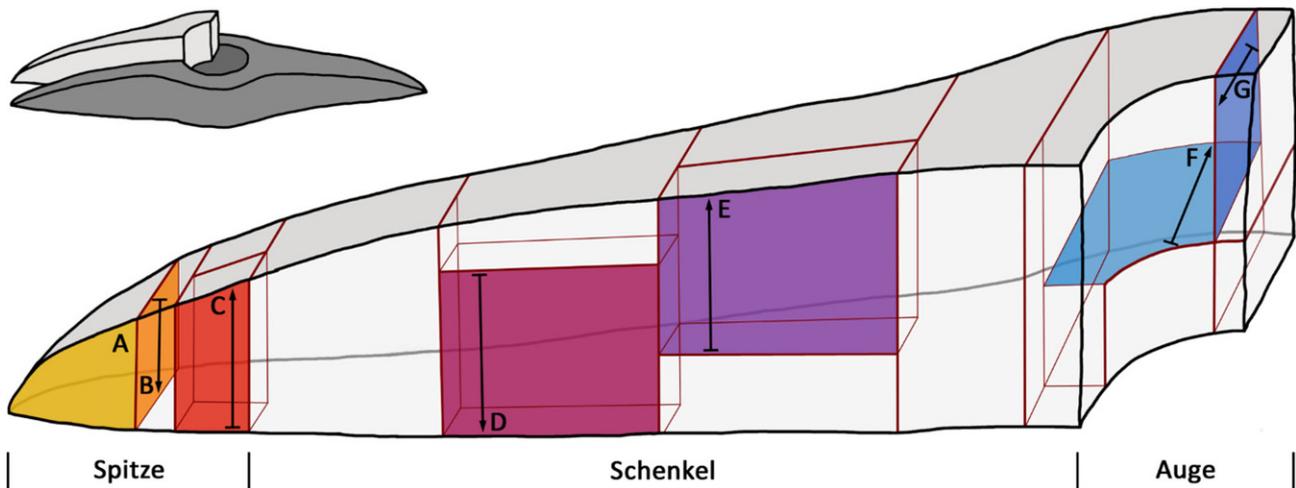


Abb. 7: Entnahmestellen von Proben für die metallographische Präparation. (Grafik: J. Preslmayr/D. Modl)

Die Detailbilder Abb. 9b, c zeigen ferritisch-perlitische Gefüge, wobei der Ferrit überwiegend polygonal beziehungsweise säulenartig vorliegt, und dazwischen befindet sich Perlit. Die dunkelblauen Bereiche bestehen überwiegend aus Perlit (Abb. 9d).

4.3 Bereich C: Spitze, hinterer Abschnitt, Längsschnitt (Abb. 10)

Schon in der mit Nital geätzten Überblicksaufnahme sind sowohl ein Kohlenstoffgradient als auch Schlackeneinschlüsse beziehungsweise Lunker deutlich erkennbar (Abb. 10a). In diesem Bereich findet man sowohl über-eutektoide, eutektoide und untereutektoide Strukturen. Die Aufnahmen mit übereutektoidem Stahl (Abb. 10b–e) zeigen Perlit, Zwischenstufe und ein typisches Zementitnetzwerk. Ein beinahe gänzlich eutektoides Stahlgefüge mit nur sehr wenig Ferrit ist in den Abb. 10f, g dargestellt. Gefüge mit untereutektoidem Kohlenstoffgehalt enthalten Widmannstättchen Ferrit, Zwischenstufe und Perlit (Abb. 10h, i).

4.4 Bereich D/E: Schenkel, Längsschnitt (Abb. 11a–f)

Auch der Schenkel des Doppelspitzschlagers ist durch Inhomogenität im Kohlenstoffgehalt geprägt, wobei die Bereiche D und E idente Gefüge zeigten. Bei den Aufnahmen in Abb. 11a, b, e handelt es sich um Überblicksbilder, die Aufnahmen in Abb. 11c, d, f zeigen Detailbilder nach einer Ätzung mit Klemm 1. Auch hier sind sehr unterschiedliche Strukturen wie Ferrit (säulenartig, Widmannstättisch, selten polygonal), Perlit (grob, fein) und möglicherweise Zwischenstufe zu finden.

4.5 Bereich F: Auge, mittlerer Schaftlochbereich, Querschnitt (Abb. 11g–i)

Der Bereich um das Auge des Doppelspitzschlagers enthält weniger Kohlenstoff. In den Bildern Abb. 11g–i ist polygonaler Ferrit bei unterschiedlichen Vergrößerungen dargestellt. Eine andere Stelle in diesem Bereich lässt neben polygonalem auch säulenartigen Ferrit erkennen (Abb. 11i). Zusätzlich treten sowohl weißer Korngrenzenzementit (Abb. 11k) als auch Perlit zwischen dem säulenartigen Ferrit (Abb. 11l) auf.

4.6 Bereich G: Auge, Querschnitt (Abb. 12)

Nach einer Nitalätzung ist die inhomogene Kohlenstoffverteilung im zusammengesetzten Überblicksbild deutlich erkennbar (Abb. 12a). Die dunkleren Bereiche zeigen eine schlierenförmige Anordnung, die bei der Herstellung des Auges des Doppelspitzschlagers durch Lochung entstanden sein könnte. Detailliertere Aufnahmen in unterschiedlichen Vergrößerungen sind in Abb. 12b–i dargestellt. Einerseits liegen sehr homogene ferritisch-perlitische Gefüge vor, die sich im Kohlenstoffgehalt unterscheiden. So enthält der Bereich in Abb. 12b, c ca. 0,3 Gew.% C und jener in Abb. 12d, e etwa 0,1 Gew.% C. Andererseits findet man Stellen, die einen deutlich unterschiedlichen C-Gehalt aufweisen und damit einhergehend tritt eine Gefügeveränderung auf. In Abb. 12f, g sind ferritisch-perlitische Regionen zu sehen, die etwa 0,3 Gew.% C (heller) bzw. 0,45 Gew.% C (dunkler) enthalten. Aufnahmen in noch höherer Vergrößerung belegen, dass neben Perlit nicht nur Korngrenzenferrit und Widmannstättischer Ferrit sondern auch Zwischenstufe entstand (Abb. 12h, i).

4.7 Mikrohärtmessungen

Um die vorliegenden Stahlgefüge besser zuordnen zu können, wurden Mikrohärtmessungen nach Vickers HV0,1 in

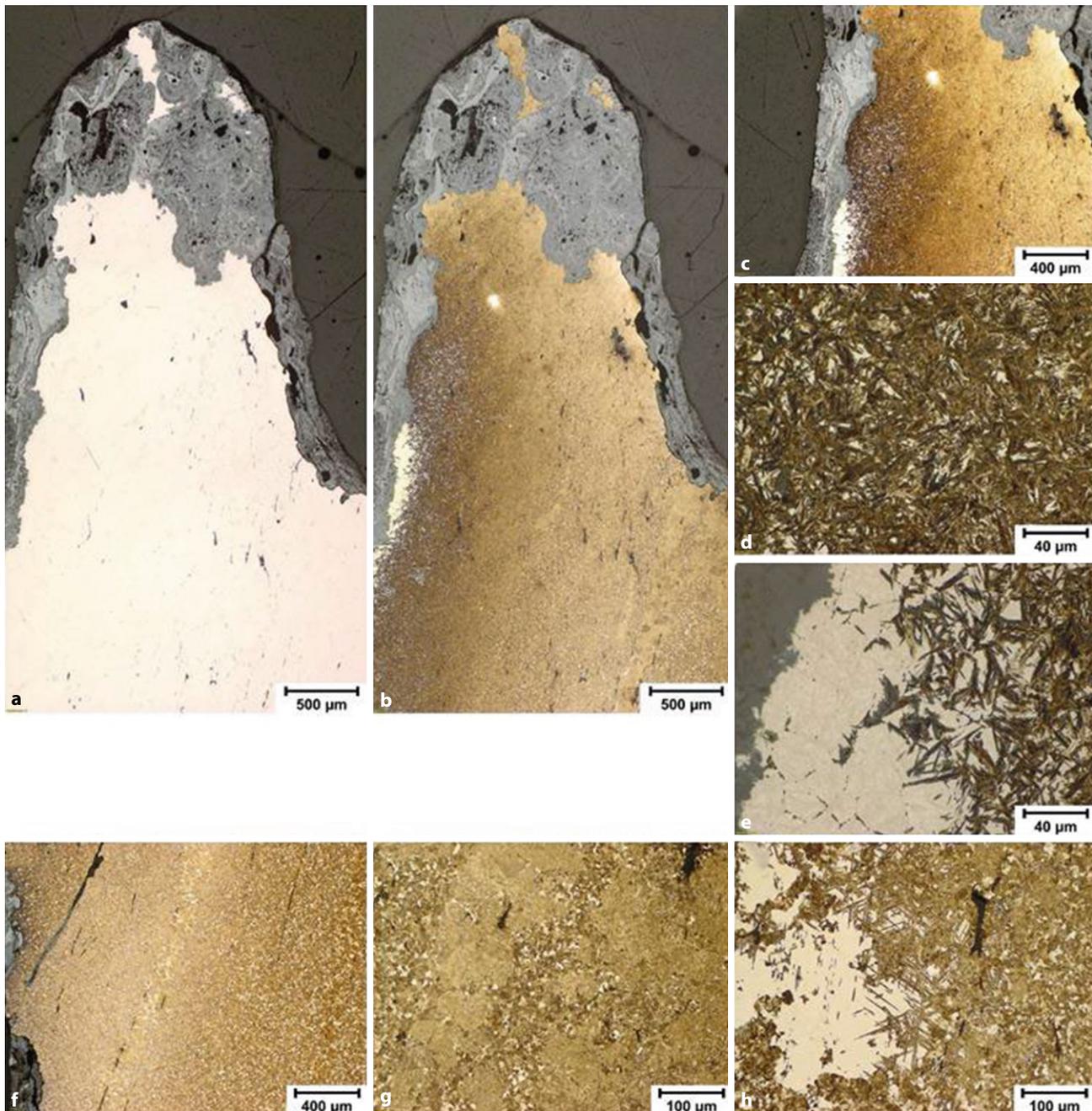


Abb. 8: Bereich A: a Poliert; b–h Nital Ätzung

den Bereichen A–G durchgeführt. Ferritische Gefüge mit geringem Zementitgehalt haben Härten um 130 HV_{0,1} und mit zunehmenden Kohlenstoffgehalt steigt auch die Härte auf etwa 260 HV_{0,1}. Eutektoide perlitische Gefüge (0,8 Gew.% Kohlenstoff) haben Härtewerte bis maximal 280 HV_{0,1}. Bei der Zwischenstufe wurden Werte von 330 bis 400 HV_{0,1} gemessen und in den martensitischen Bereichen 460 bis 870 HV_{0,1}. Die höchsten Härtewerte sind auf weißen Martensit zurückzuführen.

5. Gefüge der abgebrochenen Spitze

Die von ein Doppelspitzschlägel stammende Spitze wurde an zwei Stellen, der eigentlichen Spitze und der abstehenden Lamelle, eingehender untersucht.

5.1 Vorderer Bereich der Spitze (Abb. 13)

Die Aufnahmen der polierten Proben in Abb. 13a–c zeigen sehr klar sowohl Schlackeneinschlüsse als auch eine ausgeprägte Korrosion, wobei verschiedene Grautöne zu er-

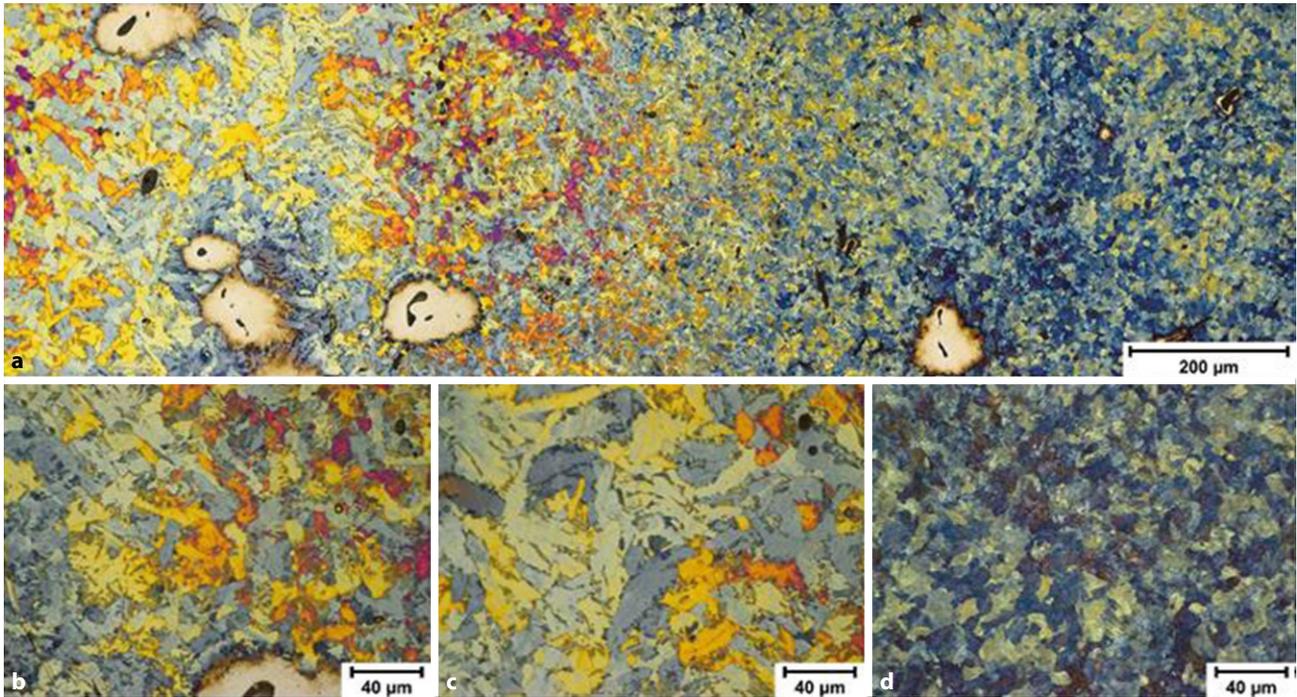


Abb. 9: Bereich B, Klemm 1 Ätzung: a Übersichtsaufnahme; b–d Detailaufnahmen

kennen sind, die auf unterschiedliche Korrosionsprodukte hinweisen (diverse Oxide und Hydroxide). Nach dem Ätzen ist ein Härtegefüge erkennbar (Abb. 13d–f). Es handelt sich um Martensit, der auch etwas Restaustenit enthalten könnte, sowie den dunkel erscheinenden Abschrecktroostit. Abschrecktroostit ist ein äußerst feiner Perlit, dessen Lamellenstruktur auch im Rasterelektronenmikroskop (REM) nur schwer aufgelöst werden kann [27].

5.2 Abstehende Lamelle (Abb. 14)

Bei der abstehenden Lamelle können zwei Bereiche unterschieden werden. Einerseits die eigentliche Lamelle (Abb. 14a, b) und andererseits eine Schweißnaht mit Teilen des eigentlichen Spitzenmaterials (Abb. 14c, d).

Bei der Lamelle sind ausgeprägte Korrosionsschichten erkennbar, die zum Teil tief ins Innere des Querschliffs eindringen (Abb. 14a, b). An der feuerverschweißten Stelle liegen Korrosionsprodukte vor, wobei nicht unterschieden werden kann, ob diese während des Schmiedens durch Verzunderung oder später durch Korrosion entstanden sind (Abb. 14c, d). Auf beiden Seiten der Schweißnaht sind Schlackeneinschlüsse zu sehen.

Der innere, metallische Teil der Lamelle hat einen über-eutektoiden Kohlenstoffgehalt, was an dem primär ausgeschiedenen Zementit zu erkennen ist, der sowohl netzartig als auch langnadelig angeordnet ist (Abb. 15a–d). Dazwischen befinden sich Sorbit und Zwischenstufe. Die Korrosionsschicht (Abb. 15e) zeigt eine schichtförmige, lamellenartige Struktur, welche durch unregelmäßige Korrosion mit dazwischenliegenden Pausen erklärt werden kann. Sowohl im LOM (Abb. 15f) als auch im REM (Abb. 15g) ist erkennbar,

dass der helle Zementit in der Korrosionsschicht nicht korrodiert ist. Abb. 15h zeigt hingegen ein weißes Netzwerk aus Ferrit und Ferritnadeln, die leichter korrodieren (dunkelgrau). Dies verdeutlicht wiederum, dass in diesen Teilen sehr unterschiedliche Kohlenstoffgehalte vorliegen und bevorzugt die Gefüge Perlit und Zwischenstufe korrodieren.

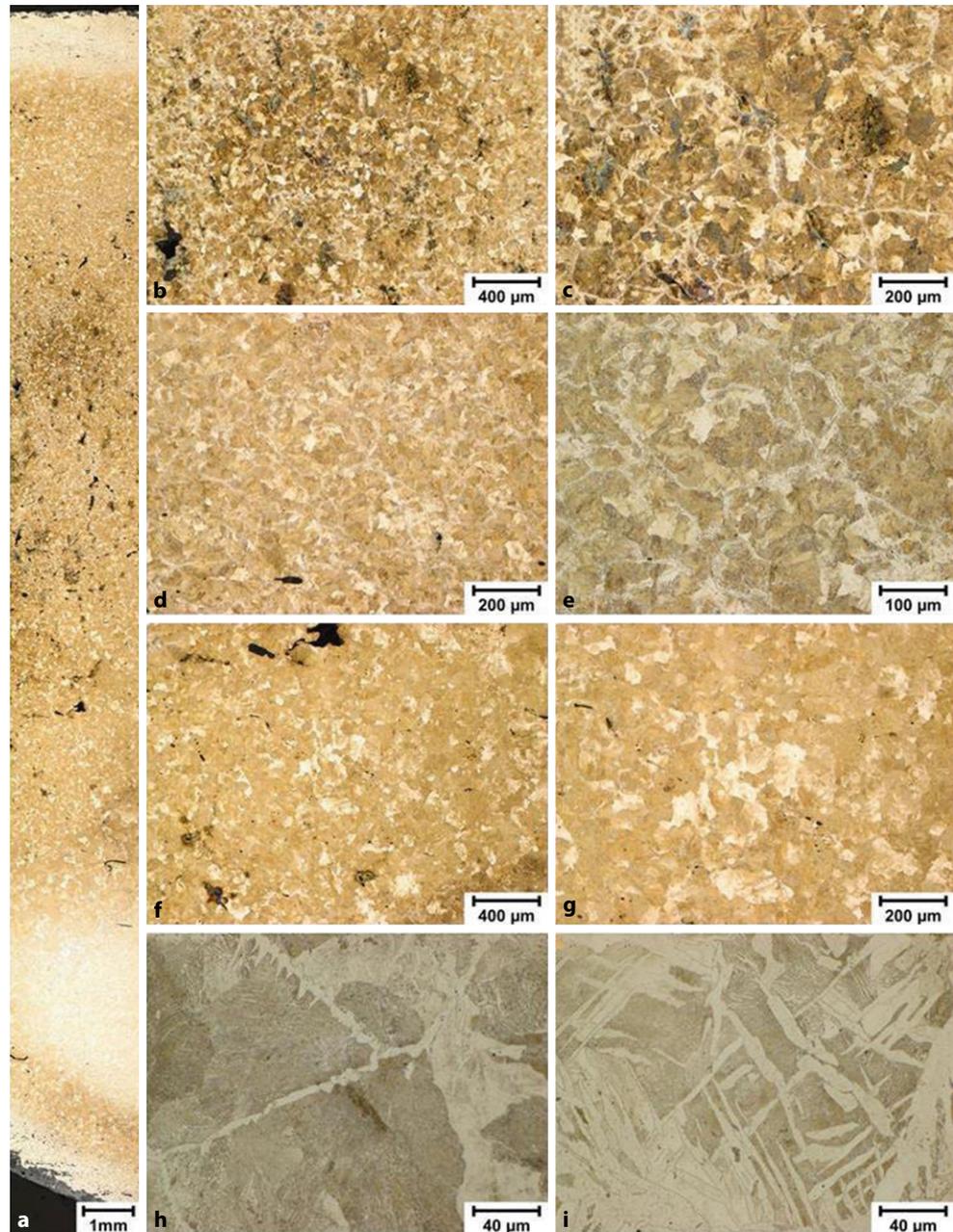
Abb. 15i zeigt die stark oxidierte Schweißnaht, wobei auch ein Riss in der Oxidschicht zu sehen ist. Der Grundwerkstoff der Spitze besteht aus annähernd eutektoidem Stahl mit wenig Ferrit (Abb. 15j, k). An einzelnen Stellen ist der Stahl untereutektoid mit überwiegend Ferrit und Widmannstätschem Ferrit, dazwischen sind Perlit bzw. Sorbit eingelagert (Abb. 15l). Der Sorbit, wie auch der in der Spitze nachgewiesene Abschrecktroostit, könnte auf eine schnelle Abkühlung des Metalls hinweisen.

6. Auswertung der Untersuchungsergebnisse

6.1 Herstellung

Das Eisen für die Doppelspitzschlägel vom Michlhallberg wurde im Rennofen hergestellt. Das Rennfeueisen enthält neben unterschiedlichen Kohlenstoffkonzentrationen auch Schlackeneinschlüsse und Oxide. Obwohl die Schlackenreste beim Ausheizen und Schmieden reduziert wurden, waren diese bei den aktuellen Untersuchungen noch deutlich nachweisbar. Aus diesem Grund ist anzunehmen, dass die bis zu 2,6 kg schweren Doppelspitzschlägel nicht aus qualitativ hochwertigen Halbzeugen (Barren, Stangen), sondern aus noch nicht stark aus- bzw. umgeschmiedeten Eisenluppen gefertigt worden waren. Erfolgte das Homoge-

Abb. 10: Bereich C, Nital Ätzung; a Übersichtsaufnahme; b–i unterschiedliche Gefüge



nisieren und Feuerverschweißen der Luppen unzureichend, bestand die Gefahr, dass bei Beanspruchung die verbundenen Teile und Lagen wieder aufgingen. Entsprechend ihrem Kohlenstoffgehalt können die Luppen als Stahl bezeichnet werden [28, 29].

Nachdem der Eisenrohling auf die Form des Doppelspitzschlägels gebracht worden war, wurde er mittig mit einem meißelartigen Werkzeug gespalten und das Stielauge mit einem dornähnlichen Arbeitsgerät von beiden Seiten geweitet. Danach wurden die beiden Spitzen ausgearbeitet und gehärtet [30, 31]. Nach einer langsamen Erwärmung des gesamten Werkstücks wurde der Bereich der Spitzen auf eine Temperatur um die 800 °C gebracht. Unter dieser Temperatur verwandelte sich das Ferrit-Zementit-Gemisch

in Austenit, in dem der Kohlenstoff gelöst ist. Durch das unmittelbar darauf folgende schnelle Abschrecken der glühenden Spitzen in Wasser erfolgte eine Härtung. Je nach Abkühlgeschwindigkeit entstanden Martensit und andere Härtegefüge.

Erfolgte die Härtung nicht korrekt, dann konnten Spannungsrisse oder Versprödungen im Material die Folge sein [32]. Die härtebedingte Sprödigkeit hätte durch nachträgliches Anlassen bei 200 bis 350 °C beseitigt werden können. Das an der Spitze des Doppelspitzschlägels nachgewiesene „Mischgefüge“ aus Martensit und Restaustenit könnte für eine schlechte oder gar nicht erfolgte Temperung nach dem Abschrecken sprechen.

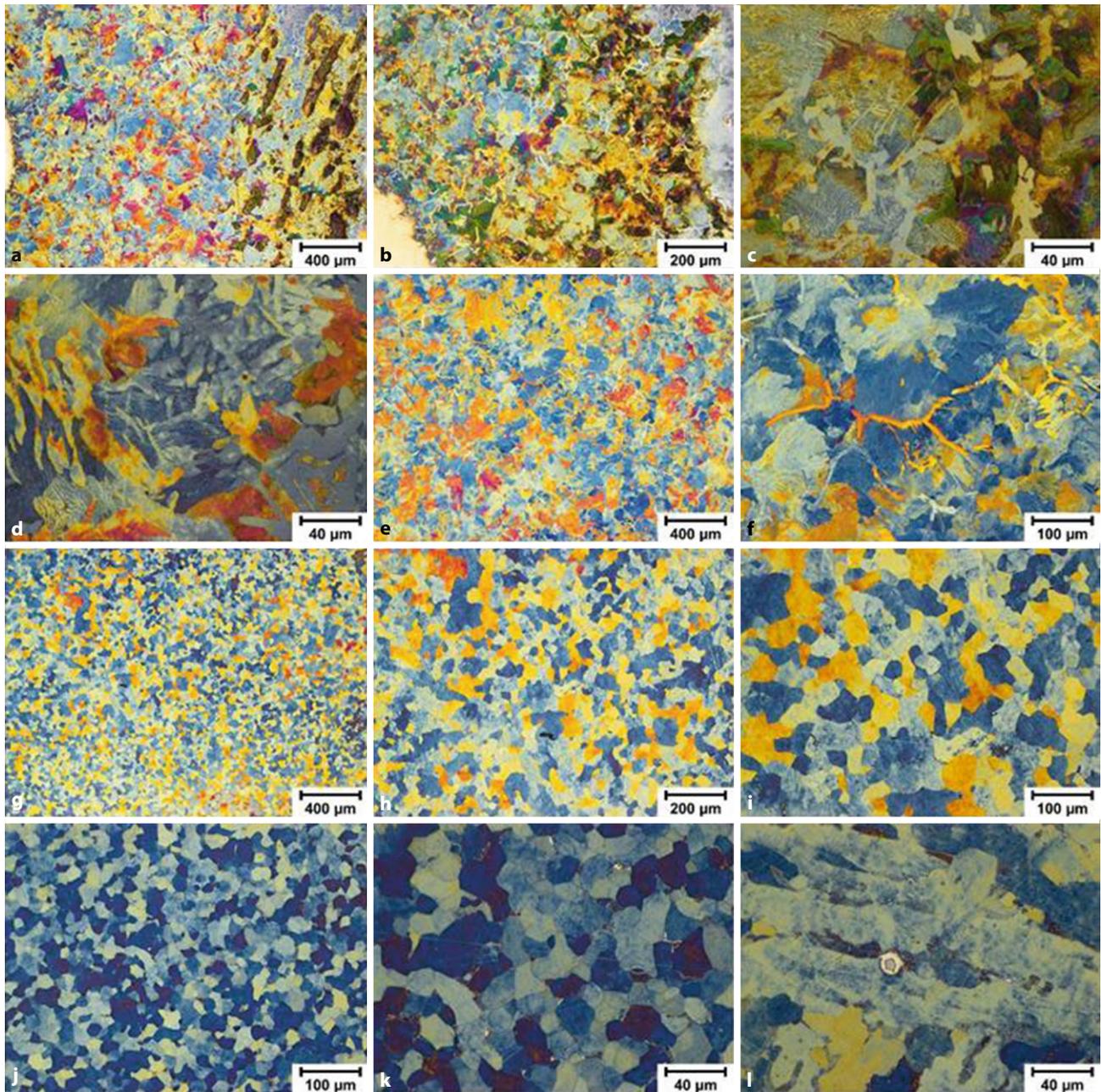


Abb. 11: Bereich D (a–f), Bereich F (g–l), Klemm 1 Ätzung

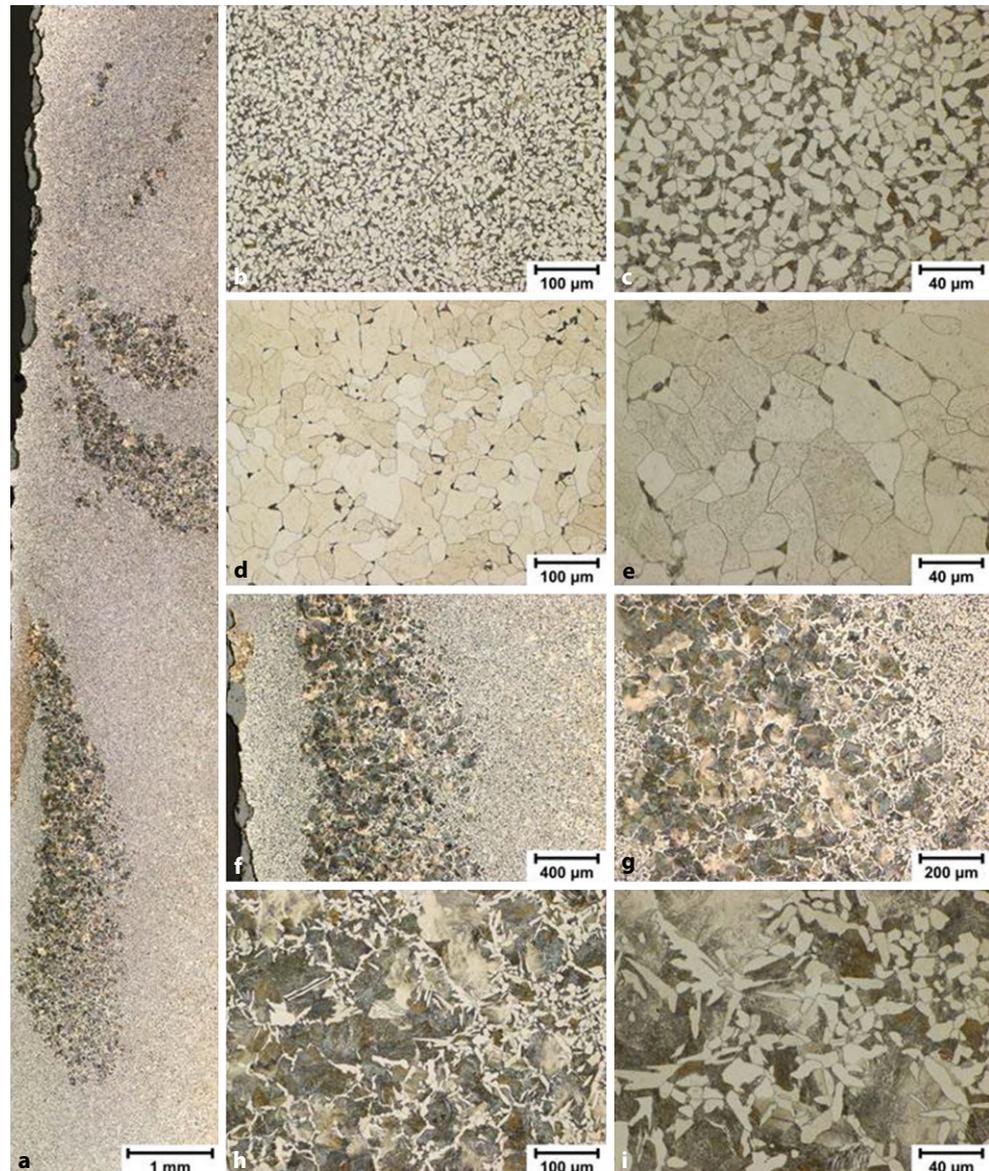
Nach der Fertigstellung des Schlägelkopfes wurde dieser mit einem Stiel versehen, der vermutlich um die 60 cm lang gewesen sein dürfte. Das ovale Schaftloch sorgte für einen festen Sitz des Stiels. Ein von Wolfgang Scheiblechner nachgeschmiedeter und mit einem Stiel aus Eschenholz versehener Doppelspitzschlüssel rekonstruiert das vermutliche Aussehen der Gezähe vom Michlhallberg (Abb. 16).

6.2 Reparatur

Über die genaue Anwendung der Doppelspitzschlüssel am Michlhallberg kann nur spekuliert werden. Möglicherweise

dienten sie zum Brechen von Kalkstein, der als grober Geröllschutt das Salzlager überdeckte, oder dem wesentlich weicheren Haselgebirge bzw. Steinsalz. Wie die Mikrohärtmessungen ergaben, wäre der untersuchte Doppelspitzschlüssel bestens für den Abbau dieser weichen bis mittelfesten Gesteine geeignet gewesen. Wie Schäden an den Doppelspitzschlüsseln und zahlreiche Einzelspitzen mit einer durchschnittlichen Länge von 4 cm im Fundgut zeigen, waren die Gezähe trotzdem erheblichen Belastungen und starken Verschleiß ausgesetzt, der regelmäßige Reparaturen bzw. ein neuerliches Ausschmieden der stumpf geschlagenen Spitzen notwendig machte. Die oben beschriebenen

Abb. 12: Bereich G, Nital Ätzung; a Übersichtsaufnahme; b–i Unterschiedliche Gefüge



Härtefehler können somit auch bei der nachträglichen Instandsetzung der Doppelspitzschlägel erfolgt sein.

Die Bruchflächen der meisten Spitzenfragmente erscheinen – soweit diese Beobachtung nach starker Korrosion und Restaurierung heute noch sicher möglich ist – relativ glatt zu verlaufen, was für einen Spröbruch sprechen würde. Nur selten sind unregelmäßig ausgeprägte Bruchflächen zu beobachten, die eher mit einem Verformungsbruch in Verbindung zu bringen sind (Abb. 4). Das Vorkommen der zahlreichen Einzelspitzen am Michlhallberg hat – wohl unter dem Eindruck der frühneuzeitlichen Bergeisen mit ihren angeschweißten Stahlspitzen [33, 34] – zur Theorie geführt, dass diese extra angefertigt wurden um als „Ersatzspitzen“ an die gebrochenen Stümpfe der Doppelspitzschlägel angeschmiedet zu werden [35].

Um darüber Klarheit zu erlangen, wurde neben einem vollständigen Doppelspitzschlägel auch eine ausgewählte Einzelspitze untersucht. Tatsächlich konnte hier eine stark

oxidierte Schweißnaht festgestellt werden, die diese Annahme zu stützen scheint, doch ist es möglich, dass diese, wie auch die abstehende Lamelle, noch mit der ursprünglichen Herstellung in Zusammenhang steht. Die Einzelspitze macht nicht den Eindruck einer gezielt hergestellten „Ersatzspitze“, vielmehr dürfte es sich um eine abgebrochene Spitze handeln. Dies zeigt der zunächst gerade verlaufende Bruch, der sich dann entlang einer vermutlich unvollkommenen Schweißnaht weiter ausbreitete, wodurch die Lamelle entstand. Falls mit dem vorliegenden Bruchstück tatsächlich eine Feuerverschweißung versucht wurde, dann hat die Spitze zumindest nicht der Belastung standgehalten, denn sie brach neuerlich ab.

Die Herstellung von „Ersatzspitzen“ und deren nachträgliche Feuerverschweißung erscheint aus heutiger Sicht ineffizient, zeitraubend und auch nicht ohne Risiko. Schließlich bestand die Möglichkeit, dass die kleine Spitze durch die hohe Schweißtemperatur ein grobkörniges Gefüge erhielt

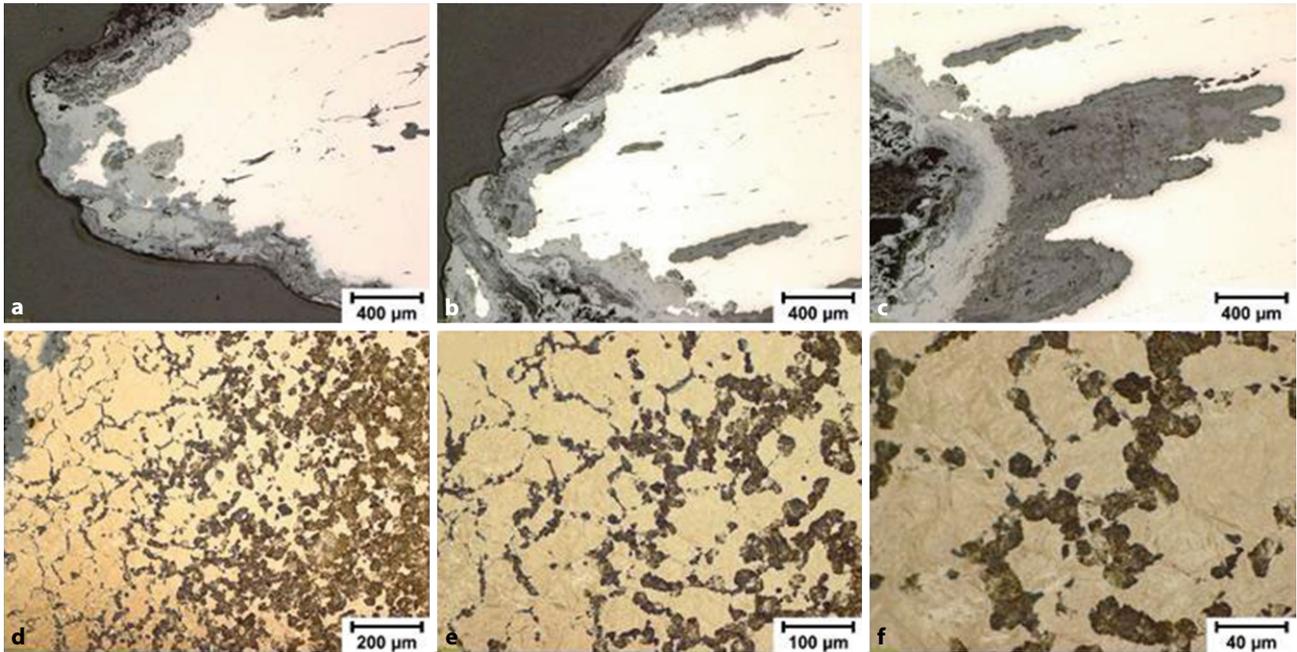
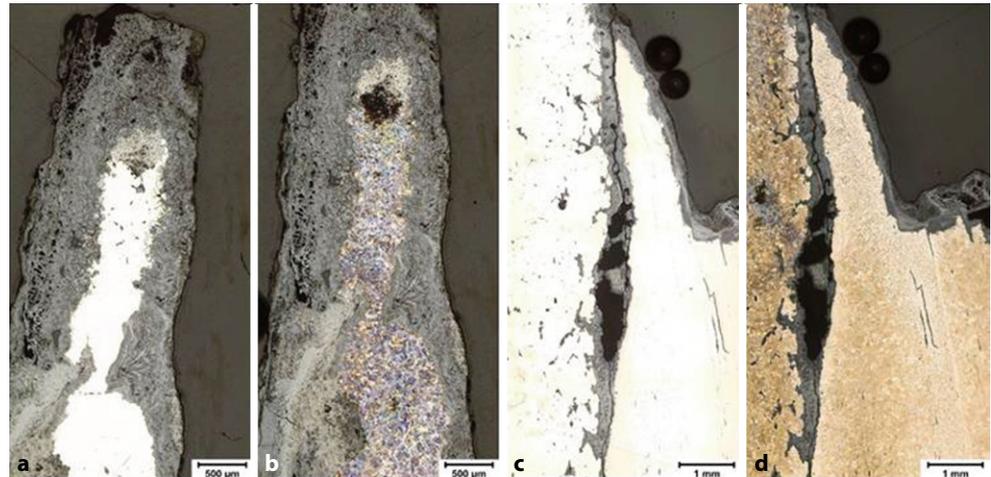


Abb. 13: Vorderer Bereich der Einzelspitze: (a, b, c) poliert, (d, e, f) Nital geätzt, Martensit und Abschrecktroostit

Abb. 14: Abstehende Lamelle: a, b Spitze der Lamelle; c, d Schweißnaht; a, c Poliert; b, d Nital geätzt



oder an den Randzonen entkohlte. Ein niedriger Kohlenstoffgehalt hätte die spätere Härtung verhindert. Aus diesem Grund dürfte man neue Spitzen – so lange wie möglich – aus den abgearbeiteten oder gebrochenen Stümpfen ausgeschmiedet haben, wie die unterschiedliche Schenkellänge (Abstand Spitze-Auge) der Doppelspitzschlägel sowie relativ kleine Exemplare im Fundgut vermuten lassen. Für eine genauere Beurteilung der Sachlage scheint es jedoch notwendig weitere Doppelspitzschlägel und Einzelspitzen vom Michlhallberg zu untersuchen.

7. Zusammenfassung

Ein eiserner Doppelspitzschlägel und eine einzelne Spitze aus dem Umfeld der römischen Siedlung Michlhallberg

(Steiermark, Österreich) wurde werkstoffkundlich untersucht, um Informationen über ihren Aufbau und die vorliegenden Gefüge zu erhalten. Beide Objekte sind im Kontext mit einem möglichen römerzeitlichen Salzabbau an der Südseite des Sandling zu sehen.

Die Kohlenstoffverteilung im Doppelspitzschlägel ist sehr inhomogen und variiert zwischen 0,1 und 0,8 Gew.% C. Dementsprechend werden auch die typischen Stahlgefüge, polygonaler Ferrit, Widmannstätscher Ferrit und Perlit beobachtet. Zusätzlich wurden noch die Härtegefüge Zwischenstufe und Martensit beobachtet. Die diversen Kohlenstoffgradienten könnten einerseits aus der Eisenherstellung im Rennfeuer stammen oder durch Aufkohlung beziehungsweise Entkohlung während des Schmiedes entstanden sein. Die Ergebnisse zeigen auch, dass die Spitzen des Doppelspitzschlägels bei relativ hohen Temperaturen

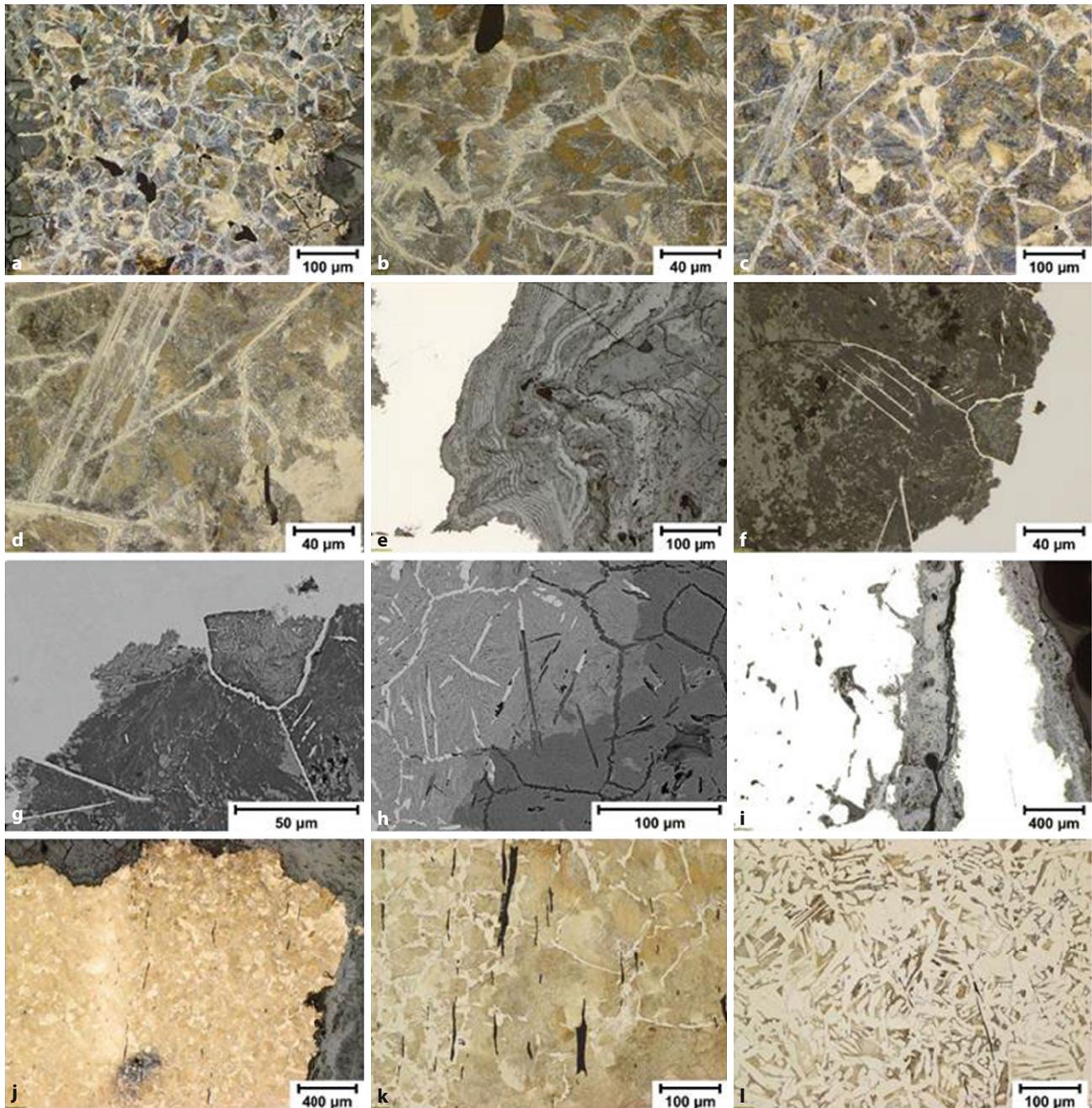


Abb. 15: Spitze: a–h Gefüge Lamelle; i Schweißnaht; j–l Grundmaterial Spitze; a–d, j–i Nital geätzt, e, f, i poliert, g, h REM

(>728 °C) geschmiedet und danach im Wasserbad abgeschreckt wurden.

Die untersuchte Einzelspitze besteht ebenfalls aus einem Härtegefüge, wobei neben Martensit auch Abschrecktroostit beobachtet wurde. Eine durch Feuerschweißen erzeugte Schweißnaht lässt vermuten, dass die Spitze möglicherweise zur Reparatur eines verschlissenen Doppelspitzschlägels verwendet wurde.

Danksagung. Unser Dank gilt Herrn Jan Preslmayr, der im Rahmen seiner Bachelorarbeit an der TU Wien, bei der metallographischen Probenpräparation

und der Härtemessung mitgeholfen hat. Weiters danken wir Paul Bayer (Firma Archaeogon, Graz), Hubert Flatscher (Archäologische Arbeitsgemeinschaft Salzkammergut/Verein HEFOSA), Univ.-Doz. Dr. Bernhard Hebert (Bundesdenkmalamt, Abteilung für Archäologie, Wien), Dr. Anna Holzner (Keltenmuseum Hallein), Dr. Stephan Karl (Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Antike), Mag. Katharina Krenn und Wolfgang Otte (beide Universalmuseum Joanneum, Schloss Trautenfels), Matthias Pointinger (Archäologische Arbeitsgemeinschaft Salzkammergut/Verein HEFOSA), Johann F. Schatteiner (Hallein), Wolfgang Scheiblechner (Palgau), Dr. Bernd Steidl (Archäologische Staatssammlung München), Univ.-Prof. Dr. Thomas Stöllner (Deutsches Bergbau-Museum Bochum, Abteilung Forschung, Forschungsbereich Montanarchäologie), Dr. Barbara Tober (Keltenmuseum Hallein), Dr. Stefan Traxler (Oberösterreichisches Landesmuseum, Abteilung Kunst- und Kulturwissenschaften, Archäologie) und Dr. Maria



Abb. 16: Originaler Doppelspitzschlägel (DS1) mit der nachgeschmiedeten und geschäfteten Rekonstruktion. (Foto: D. Modl)

Windholz Konrad (Graz) für Informationen oder die Bereitstellung von Abbildungen.

Funding. Open access funding provided by TU Wien (TUW).

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

- Schraml, C.: Das oberösterreichische Salinenwesen vom Beginne des 16. bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts. Studien zur Geschichte des österreichischen Salinenwesens, Bd. 1. Verlag der Generaldirektion der österreichischen Salinen, Wien, S. 183–189 (1932)
- Stadler, F.: Das ehemalige Salzbergwerk am Michel-Hallbach. Ein Beitrag zur Ausseer Salinengeschichte. *Da Schau Her* 7(4), 11–15 (1986)
- Stadler, F.: Salzerzeugung, Salinenorte und Salztransport in der Steiermark. In: Rausch, W. (Hrsg.) *Stadt und Salz, Beiträge zur Geschichte der Städte Mitteleuropas*, Bd. X, S. 89–129. Österreichischer Arbeitskreis für Stadtgeschichteforschung, Linz (1988)
- Stadler, F.: Alte, abgekommene Salinen und die Landesgrenze zur Steiermark, ein Beitrag zur Geschichte der Salinen am Michel-Hallbach. In: Hufnagl, F., Marchetti, H. (Hrsg.) *Der Bezirk Gmunden und seine Gemeinden. Von den Anfängen bis zur Gegenwart*, S. 273–280. Verein zur Herausgabe eines Bezirksbuches Gmunden, Gmunden (1991)
- Grabherr, G.: *Michlhallberg – Die Ausgrabungen in der römischen Siedlung 1997–1999 und die Untersuchungen an der zugehörigen Straßentrasse*. Mit Beiträgen von F. Bauer/H. Stadler, K. Nicolussi, E. Pucher/M. Schmitzberger und C. Walde. Schriftenreihe des Kammerhofmuseums Bad Aussee, Bd. 22. Verein der Freunde des Kammerhofmuseums, Bad Aussee (2001)
- Peitler, K., Modl, D.: Der römische Münzhort von der Pötschenwand (Steiermark, Österreich). Ein neuer Verwahrfund aus Noricum mit Inflationsantoninianen, *Schild von Steier*, 27/2015–2016, S. 276–344 (2016)
- Windholz-Konrad, M.: 2.1.9. Doppelspitzhacke. In: Bundesdenkmalamt (Hrsg.) *schätze.gräber.opferplätze – traunkirchen.08. Archäologie im Salzkammergut. Katalog zur Ausstellung im ehemaligen Kloster Traunkirchen*, 29. April bis 2. November 2008, Fundberichte aus Österreich, Materialheft A, Sonderheft, Bd. 6, S. 110–111. Ferdinand Berger & Söhne, Wien (2008)
- Windholz-Konrad, M.: Forschungszwischenbericht über die unveröffentlichten archäologischen Maßnahmen des Bundesdenkmalamtes und der „Archäologischen Arbeitsgemeinschaft Salzkammergut“ bis zum Jahr 2013 in der Steiermark und in Oberösterreich. *Fundberichte aus Österreich*, Bd. 55., S. D589–D695 (2016)
- Gätzschmann, M.F.: *Vollständige Anleitung zur Bergbaukunst. Dritter Theil: Die Gewinnungslehre*. J. G. Engelhardt, Freiberg, S. 117–139 (1846). Taf. III/9–13
- Gall von Gallenstein, J.: *Der praktische Grubenbau, oder die wichtigsten Grundsätze aus dem Gebiete des Bergbaues, der bergmännischen Arbeitslehre und Gedingsberechnung: mit besonderer Berücksichtigung für Steinkohlen-Gewinnung*. Manz, Graz, S. 23 (1858). Ein populäres Handbuch für angehende Huthleute und Steiger, Fig. 32–33
- Opderbecke, A.; Wittenbecher, H.: *Der Steinmetz. Umfassend die Gewinnung und Bearbeitung natürlicher Bausteine, das Versetzen der Werksteine, die Mauern aus Bruch-, Feld- und bearbeiteten Werksteinen, die Gesimse, Maueröffnungen, Hausgiebel, Erker und Balkone, Treppen und Gewölbe mit Werksteinrippen*. Für den Schulgebrauch und die Baupraxis, Leipzig: Verlag von Bernhard Friedrich Voigt, 1905 (Das Handbuch des Bautechnikers, XV), S. 15, Fig. 37
- Fürer, F.A.: *Salzbergbau- und Salinenkunde*. Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig, S. 401 (1900). Fig. 53
- Hänsel, V., Stadler, F.: *Steirisches Salz, Katalog der 12. Sonderausstellung im Landschaftsmuseum Schloß Trautenfels*, 7. Juni – 31. Oktober 1975. Steiermärkisches Landesmuseum Joanneum, Landschaftsmuseum Schloss Trautenfels, Liezen, S. 38 (1975). Nr. 96
- Reinthaler, G.: *Eingeschlagene Symbole auf Äxten und anderen Schmiedeerzeugnissen*. Eigenverlag, Graz, S. 154 (2001). Taf. 95/364
- Hottwagner, F., Lang, R.: *KG Raach, OG Raach am Hochgebirge, VB Neunkirchen / KG Reichenau, MG Reichenau an der Rax, VB Neunkirchen (Fundchronik 2002, Neuzeit, Niederösterreich)*. *Fundberichte aus Österreich*, Bd. 41., S. 753 (2002). Abb. 761–763
- Maddin, R., Hauptmann, A., Weisgerber, G.: *Metallographische Untersuchungen an römischem Gezähe aus Rio Tinto, Spanien*, Bd. 3/1, S. 27–42 (1996)
- Delgado Domínguez, A.: *Catálogo del Museo Minero de Riotinto*. Fundación Rio Tinto, Sevilla, S. 79–214 (2006)
- Cüppers, H.: *Die Trierer Römerbrücken. Trierer Grabungen und Forschungen*, Bd. V. Philipp von Zabern, Mainz, S. 121 (1969). Abb. 135/7
- Oesterwind, B.C., Schäfer, K.: *Ausgewählte Funde zur römischen Steinindustrie in den Museen von Mayen und Andernach*. In: Bockius, R. (Hrsg.) *Steinbruch und Bergwerk – Denkmäler römischer Technikgeschichte zwischen Eifel und Rhein*, Kataloghandbuch zu den Ausstellungen in den Museen von Mayen und Andernach, Vulkanpark-Forschungen, Bd. 2, S. 135–143. RGZM, Mainz (2000). Abb. 2/3

20. Pietsch, M.: Die römischen Eisenwerkzeuge von Saalburg, Feldberg und Zugmantel. Saalburg-Jahrbuch, Bd. 39., S. 18–89 (1983). Taf. 4/51
21. Garbsch, J.: Der Moosberg bei Murnau. Münchner Beiträge zur Vor- und Frühgeschichte, Bd. 12. C.H. Beck, München, S. 85 (1966). Taf. 22/17, 20, 31/1–3
22. Wollmann, V.: Mineritul metalifer, extragerea sării și carierele de piatră în dacia Romană /Der Erzbergbau, die Salzgewinnung und die Steinbrüche im römischen Dakien. Bibliotheca Musei Napocensis 13/Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum 63. Ministerul Culturii, Muzeul Național de Istorie a Transilvaniei; Deutsches Bergbau-Museum Bochum, Cluj-Napoca; Klausenburg, S. 469 (1996). Taf. CXI/9
23. Steinklauber, U.: Inneralpine spätantike Höhengiedlungen im steirischen Ennstal. Unter Verwendung von Restaurierberichten von R. Fürhacker und K. Gowald. Mit einem Anhang von M. Brandl. Schild von Steier, Bd. 18., S. 135–192 (2005). Taf. 11/K 121
24. Karl, S.: Das römerzeitliche Marmorsteinbruchrevier Spitzelofen in Kärnten, Montanarchäologische Forschungen. Fundberichte aus Österreich, Beiheft, Bd. 1. Ferdinand Berger & Söhne, Wien, S. 109–117 (2021). Mit Beiträgen von P. Bayer, M. Grabner, M. Hainzmann, R. Haubner, C. A. Hauzenberger, A. G. Heiss, K. Layr, D. Modl, W. Prochaska, S. Strobl, B. Toškan, E. Wächter, M. Weißl und S. Wiesinger
25. Scheiblechner, W., Karl, S., Modl, D., Strobl, S., Haubner, R.: Untersuchung eines Doppelspitzschlängels aus dem römerzeitlichen Marmorsteinbruchrevier Spitzelofen in Kärnten, Österreich. Berg Huettenmaenn Monatsh **166**(7), 363–369 (2021)
26. Birch, T.: Ein römisches Bergbauwerkzeug: Untersuchung und Identifikation eines Eisenobjekts. In: Cech, B. (Hrsg.) Die Produktion von Ferrum Noricum am Hüttenberger Erzberg. Die Ergebnisse der interdisziplinären Forschungen auf der Fundstelle Semlach/Eisner in den Jahren 2006–2009, Austria Antiqua, Bd. 6, S. 455–474. Unipress, Graz (2017)
27. Houdremont, E.: Handbuch der Sonderstahlkunde. Stahlleisen; Springer, Düsseldorf, Berlin (1956)
28. Preßlinger, H.: Metallkundliche Untersuchung einer Stahlluppe aus Altaussee. Da Schau Her **16**(1), 17 (1995)
29. Furger, A.R.: Antike Stahlerzeugung – Ein Nachweis der Aufkohlung von Eisen aus Augusta Raurica, Basel. Beiträge zur Technikgeschichte, Bd. 2. LIBRUM, Frankfurt a.M. (2019)
30. Maddin, R., Hauptmann, A., Baatz, D.: A metallographic examination of some iron tools from the Saalburgmuseum. Saalburg-Jahrbuch **46**, 5–23 (1991)
31. Epprecht, W., Schaller, E.: Eisen und Stahl aus Vindonissa. Jahresbericht – Gesellschaft Pro Vindonissa, Bd. 1981., S. 29–53 (1981)
32. Holdermann, C.-S., Trommer, F.: Zum Fertigungsprozess von „Berg-eisen“ im spätmittelalterlichen/frühneuzeitlichen Bergbaubetrieb am Schneeberg, Moos in Passeier/Südtirol, Experimentelle Archäologie in Europa, 13/Bilanz 2014, S. 153–163 (2014)
33. Hebenstreit, G.: Historische Metallkunde des Eisens. Werkzeugaufbau und Herstellungsmethode von mittelalterlichen Bergeisen und Bestimmung der Herkunft durch deren Schlackeneinschlüsse. Montanuniv., Leoben, S. 9–27 (2000). Dipl.-Arb.
34. Cech, B., Walach, G.: Alpine Bergschmieden des 15. und 16. Jahrhunderts. In: Melzer, W. (Hrsg.) Schmiedehandwerk in Mittelalter und Neuzeit. Beiträge des 6. Kolloquiums des Arbeitskreises zur archäologischen Erforschung des mittelalterlichen Handwerks, Soester Beiträge zur Archäologie, Bd. 5, S. 117–128. Westfälische Verlagsbuchhandlung Mocker & Jahn, Soest (2004)
35. Grabherr, G.: Ausgrabungen in einer römerzeitlichen Siedlung in Aussee – die erste römische Saline im steirischen Salzkammergut? J. Salt. Hist. **6**, 117–126 (1998)

Hinweis des Verlags. Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.