

JOSEF RÖDER †

Das Schwert von Vrasselt

Oberflächenuntersuchung*

Wohl durch die Lagerung im Rheinsumpf unter Luftabschluß, vielleicht aber auch durch die Eigenart der Härtung, hat sich am Schwert von Vrasselt – ein sehr seltener Fall bei Eisen – ein nicht unerheblicher Teil der originalen Oberfläche samt den Schlifffspuren erhalten (Abb. 1–4). Bei Lupenbetrachtung präsentieren sich diese Schlifffspuren als feine parallele Linien, die den Gedanken an einen Schliff mit dem rotierenden Schleifstein auf waagerechter Welle aufkommen ließen. Es ist schon eine alte Streitfrage, ob es dieses Gerät in der Antike überhaupt gegeben habe¹. Hier versprach die Untersuchung des Vrasselter Schwertes einige Neuerkenntnisse, zumindest was die Oberflächenfeinbehandlung antiker Eisenwaren angeht. Daß hierbei sämtliche bekannte Untersuchungsverfahren eingesetzt werden mußten, war selbstverständlich. Es ist hier nicht der Ort, auf Definitionen², Erkenntnisse, Verfahrensweisen und Literatur der modernen Oberflächenkunde einzugehen oder gar eine allgemeine Beschreibung der Instrumente zu geben³. Bei der Darstellung des Untersuchungsganges werden auch die Geräte und – sofern nötig – ihre Wirkungsweise erläutert. Objekt der Untersuchung waren lediglich die Spuren mechanischer Oberflächenbehandlung.

Zunächst wurde das Schwert bei verschiedenen Vergrößerungen im Stereomikroskop durchmustert. Auf Umrisszeichnungen wurden interessante Befunde lagemäßig einskizziert. Gleichzeitig wurden wichtige Details farbig fotografiert. Es wurde mit dem Zeiss-Stereomikroskop II gearbeitet, das einen schnellen Wechsel sowohl der Vergrößerungen wie des binokularen Beobachtungstubus gegen den Fotoschiebetubus mit Aufsetzkamera und Belichtungsmeßeinrichtung erlaubt. Zwar stellt das

* Der Abschluß dieses postum publizierten Manuskripts erfolgte ca. 1964/65. (Die Redaktion.) – Zum Schwert von Vrasselt vgl. auch Bonner Jahrb. 143–144, 1938–1939, 436 ff.

¹ A. Schröder, Entwicklung der Schleiftechnik bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts (1930) 13.

² Dazu DIN 3141, 3142, 4760, 4761, 4762.

³ Dazu allgemein: J. Perthen, Prüfen und Messen der Oberflächengestalt (1949). H. Schorsch, Gütebestimmungen an technischen Oberflächen (1958). Beide Werke sind – je nach Erscheinungsjahr – mehr oder weniger ergänzungsbedürftig, aber nach wie vor als Einführungen unentbehrlich. – Zur allgemeinen Beschreibung der Instrumente vgl. u. a.: K. Rantsch, Die Optik in der Feinmeßtechnik (1949). Wenn auch ein Großteil der besprochenen bzw. abgebildeten Geräte Modernisierungen erfahren hat, zu einem Teil nicht mehr gebaut wird oder durch Neukonstruktionen ersetzt ist, handelt es sich noch immer um ein grundlegendes Werk.

Stereomikroskop für Aufnahmen, die nicht stereoskopisch ausgewertet werden sollen, nur einen Notbehelf dar, doch ist die Qualität der Aufnahmen im Bereich niedriger Vergrößerungen durchaus ausreichend. Wegen der farblichen Differenzierung der einzelnen heutigen Oberflächenschichten wurden alle diese Aufnahmen auf Farbfilm gemacht. Die Beobachtung durch das Stereomikroskop – neben der Lupe sicherlich das wichtigste optische Instrument für das Studium von Form- und Bearbeitungseinheiten an Altertüchern – ließ Struktur und Aufbau der Oberfläche sowie Form und Richtung der Bearbeitungsspuren in allen wesentlichen Einzelheiten erkennen. Der Einsatz weiterer Instrumente diente dann hauptsächlich der Messung. Im folgenden sei zunächst der Aufbau der Oberfläche dargestellt. Die Maße wurden mit dem Lichtschnittmikroskop ermittelt⁴. Die heutige Oberfläche des Schwertes zeigt einen komplizierten Aufbau, der zunächst unter weitgehendem Verzicht auf eine Erläuterung der Genese dargestellt sei. Das Schwert besitzt eine noch weitgehend zusammenhängende alte Oberfläche. Freilich hängen die unregelmäßigen Flecken oft nur durch schmale Stege aneinander. In größeren abgerosteten Flächen blieben oft unregelmäßige Inseln stehen. Der Gesamtanteil alter Oberfläche (einschließlich der zu schildernden grauen Oxydationsauflage) beträgt nach Ausmessung mit dem von A. Hennig entwickelten Integrationsokular unter dem Mikroskop rund 60 % der Gesamtoberfläche des Schwertes⁵. Freilich liegt diese Oberfläche nicht in ihrer Gesamtheit unangetastet vor. Ein Teil dieser Oberfläche zeigt bei Betrachtung mit der Lupe und unter entsprechendem Lichteinfall, besser bei Durchmusterung mit dem Stereomikroskop, deutlich gröbere und feinere Bearbeitungsspuren. Es handelt sich dabei um rund 30 % der erhaltenen Oberfläche, d. h. ca. 20 % der Oberfläche des Schwertes überhaupt. Wir wollen diese Oberfläche als Spurenoberfläche bezeichnen. Sie liegt uns nun keineswegs in durchweg gleichem Erhaltungszustand vor. Auf weite Strecken, besonders im damazierten Teil der Klinge, ist die heute dunkelbraune bis braunrote Spurenoberfläche rötlich verfärbt und läßt sie bei Schrägbeleuchtung oft wie durchscheinend wirken. Die Bearbeitungsspuren sind hier genauso gut und ohne irgendwelche Veränderung in ihren Ausmaßen zu sehen. Als nächstes Stadium treten dünne, ein- oder mehrschichtige flächenhafte Auflagen von rotem Rost auf, die sehr deutlich noch die Bearbeitungsspuren zeigen, bei zunehmender Dicke jedoch immer verwaschener. Diese durchaus harte und feste Schicht läßt sich bei vorsichtiger Präparierung unter dem Mikroskop mechanisch ablösen, und es erscheint die originale, an diesen Stellen allerdings immer ins Rötliche verfärbte alte Spurenoberfläche. Wird diese Rostaufgabe dicker unter gleichzeitiger Verfärbung ins Graue, so zeigt sie bis zu einer Dicke von 7 µm noch die vergrößerten Spuren großer Schleiffrillen, die feinen Schlifffspuren verschwinden. Es setzt eine Pustelbildung ein und gleichzeitig damit die endgültige Zerstörung der alten Oberfläche, die verschieden weit flächenhaft und auch in die Tiefe fortgeschritten sein kann. Versucht man diese meist weiche und schwammige Schicht zu lösen, so zeigt sich stellenweise noch die alte Oberfläche – auch die Spuren treten zutage –, jedoch reichen vielfach zapfen- oder craque-

⁴ Vgl. S. 435 Anm. 6.

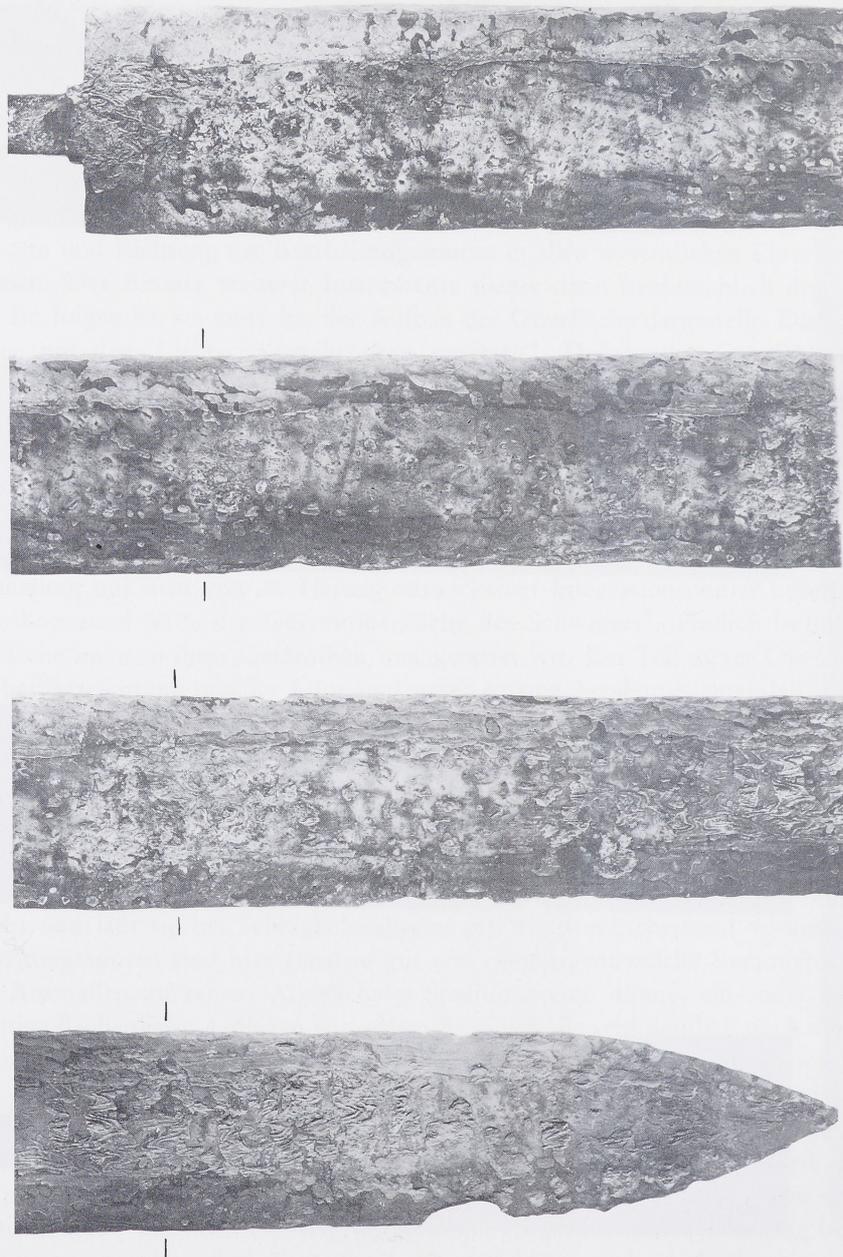
⁵ A. Hennig, Zählen und Messen unter dem Mikroskop. Zeiss-Werkzeitschrift 30, 1958.



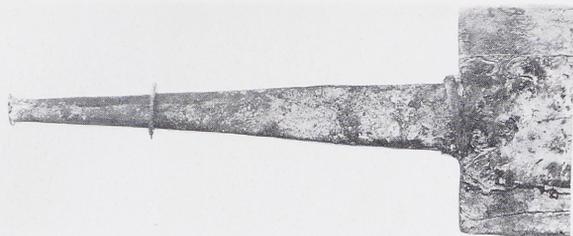
1 Schwert von Vrssett. – Maßstab 1 : 5.

2

2 Schwert von Vrssett, Seite a. – Maßstab 1 : 2.



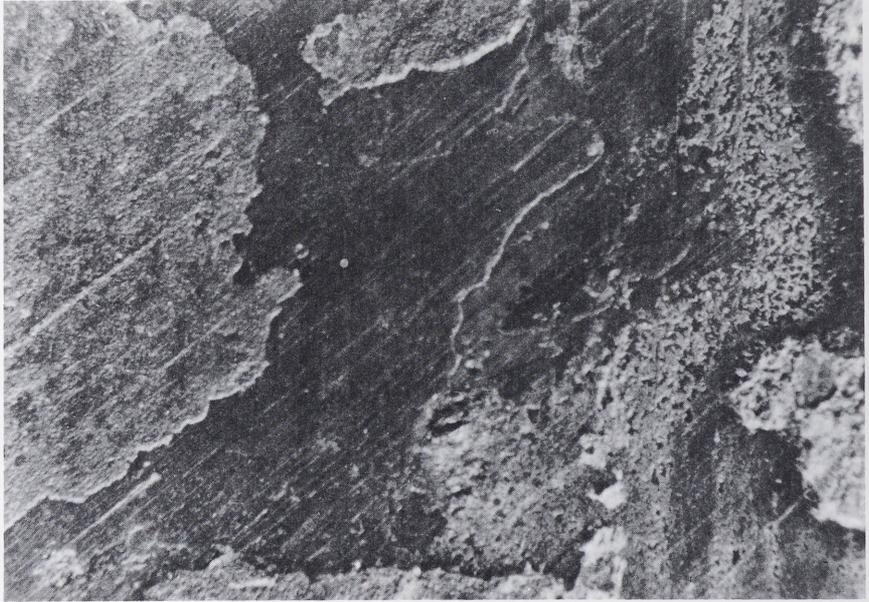
3 Schwert von Vrselt, Seite b. – Maßstab 1 : 2.



4 Schwert von Vrasselt, Griffangel. – Maßstab 1 : 2.

léhafte Zerstörungen schon in die Tiefe, bzw. diese Zerstörungen haben bereits selbst mehr oder weniger zusammenhängende flächenhafte Form angenommen. Die Spurenoberfläche ist zerstört. Diese Zerstörung kann verschieden tief gedrunen sein. Bei einer flächenhaften Zerstörung bis etwa $20\ \mu\text{m}$ zeichnen sich die vergrößerten Spuren der einstigen Bearbeitung auch hier noch ab, manchmal sogar noch das ganze System der Schlifffspuren, bei größerer Zerstörungstiefe (bis $30\ \mu\text{m}$) oft nurmehr die Spuren besonders tiefer Schleifrillen. Die Erklärung für diese Erscheinung liegt auf der Hand, wie sie denn auch in anderen Werkstoffen feststellbar ist. Durch die Bearbeitung wurde das Werkstoffgefüge bis zu einer gewissen Tiefe gestört (z. B. der Zusammenhang der Kristalle gelockert). An der Grenze zwischen gestörtem und ungestörtem Werkstoffgefüge bilden sich deswegen die Bearbeitungsspuren unsichtbar wieder aus; die Grenze wird durch den Korrosionsvorgang freigelegt. Diese sattsam bekannte Erscheinung soll aber hier nicht weiter verfolgt und dargelegt werden.

Neben dieser flächenhaften Zerstörung, die wohl mit der Erdeinlagerung einsetzte, tritt nun noch die wohl erst seit der Auffindung einsetzende und bis heute weitergreifende Hydroxydverwitterung auf, die wir als Lochfraß bezeichnen, da sie tiefe kraterförmige Löcher hinterläßt. Dieser Lochfraß wirkt wie eine Eiterbeule von der Tiefe her. Er wölbt die Spurenoberfläche auf, wobei diese zuerst noch den Zusammenhang bewahrt und die Spuren gut sichtbar bleiben; bei weiterer Aufwölbung zerreißt die alte Oberfläche, und der rote schwammige Rost quillt empor. An den Rändern der Blase stehen die Reste der Spurenoberfläche als schräge Schollen. Schließlich fällt alles ab, und es bleibt ein tiefer Krater übrig (Abb. 5–6). Abb. 5 führt im Mittelstreifen die schwarzbraune Spurenoberfläche vor. Nach rechts wird sie überschichtet von einer dünnen roten Rostauflage, die aber die Spuren noch gut wiedergibt. Weiter nach rechts folgt als nächste Zone die hier zum Teil wieder abgelöste Schicht der grauen Oxydbildung, unter der (rechts unten) die Spurenoberfläche teilweise noch durchscheint. Diese Schicht zeigt aber auch die dendritenähnlichen flächenhaften Einfressungen in die Spurenoberfläche. Ganz rechts, nur an zwei Stellen noch ins Bild ragend, und am unteren Bildrande wird diese dicke graue Auflage in ihrer Originalgestalt sichtbar. Am linken Bildrand hebt sich eine Zone der unter der Spurenoberfläche liegenden flächenhaften Verwitterung ab, die noch sehr deutlich Form und Verlauf einzelner Arbeitsspuren der Spurenoberfläche wiedergibt. Jedoch handelt es sich dabei nur um einzelne tieferegreifende Spuren, die feinere Bearbeitung der originalen Oberfläche bildet sich nicht mehr ab. Abb. 6 zeigt im linken unteren Bildteil die bereits etwas rötlich verfärbte Spurenoberfläche,



5 Schwert von Vrasselt, Detail der Oberfläche.

die mit 3 Ausläufern und mehreren Inseln sich nach oben zu weiter verfolgen läßt: Im rechten unteren Bildteil die pustelförmige graue Auflage, die keine Spuren mehr erkennen läßt. Im rechten oberen Bildteil wird die flächenhafte Verwitterung mit deutlicher Ausbildung feinerer wie gröberer Schleifspuren sichtbar. Im Mittelteil eine Zone tieferer Zerstörung, die die Richtung der Arbeitsspuren nurmehr errahnen läßt. Links oben tiefgehende Zerstörungen durch Lochfraß. Die beiden Abbildungen stammen von den Waten des Schwertes und geben deren typische Schlißform wieder. Komplizierte Spurensysteme offenbaren Abb. 7 und 8 von der Grenze von Bahn und Waten, da hier andere Schlißspuren hinzutreten. Auf Abb. 7 stehen in einem Feld tiefgreifender flächenhafter Zerstörung, das keine Spuren mehr aufweist, unregelmäßige Reste der tiefbraunen Spurenoberfläche, darauf vier Lochfraßstellen, eine davon noch im Stadium der Aufwölbung mit emporgehobenen Resten der ins Rötliche verfärbten Spurenoberfläche. Auf der Abbildung sind Spurensysteme fünf verschiedener Richtungen zu sehen. Ein nur schwach sichtbares System läuft etwa von oben nach unten. Es gehört zur primären Bearbeitung der Klinge, die vier weiteren verlaufen alle schräg dazu und gehören zum Watenschliß. In welchem Ausmaß auch Stellen mit flächenhafter Verwitterung zur Spurenbearbeitung und Spurensicherung herangezogen werden können, beweist Abb. 8 von der Grenze zwischen Waten und Bahn. Der Mittelteil des Bildes zeigt eine weitausgedehnte flächenhafte Zerstörung, die nur an den Rändern noch von Resten der Spurenoberfläche gerahmt wird. Das Mittelfeld, dessen Spurenoberfläche bis auf eine kleine Insel längst abgefallen ist, weist nur noch zwei sich überschneidende vergrößerte Spurensysteme auf. Das eine, das in diagonaler Richtung verläuft, gehört zum Watenschliß, das zweite, ungefähr parallel zur Klingennachse verlaufende System, zu einem groben Vorbearbeitungsstadium. Der Vorgang der Rostaufblähung (Lochfraß) der Oberfläche wurde mit dem



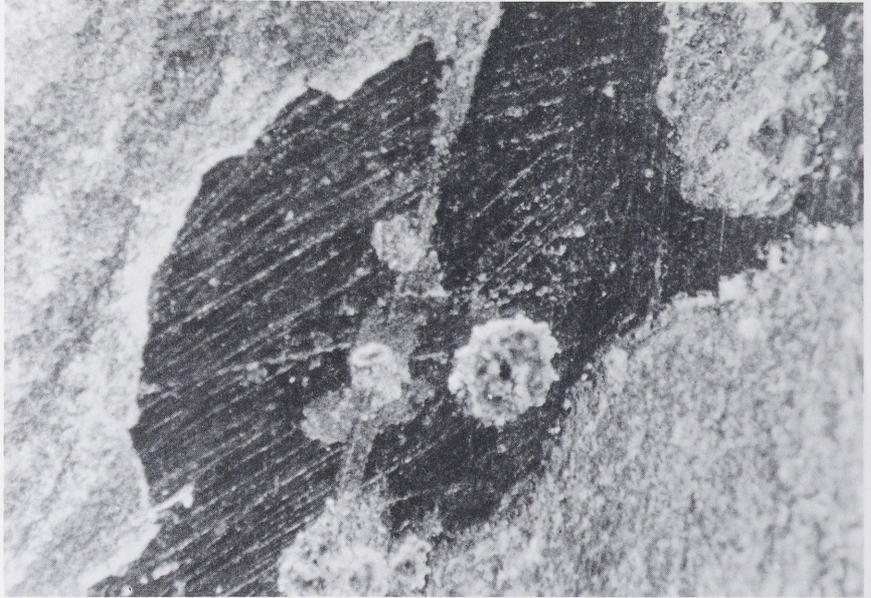
6 Schwert von Vrasselt, Detail der Oberfläche.

Lichtspaltgerät (E. Leitz-Wetzlar) beobachtet und fotografiert (Abb. 9). Auf Abb. 9 a sieht man deutlich die Aufblähung der Oberfläche, die aber noch völlig ihren Zusammenhang bewahrt hat. Auf Abb. 9 b ist eine solche Rostaufblähung geplatzt. Ein Teil der Oberfläche ist als schräge Kraterwand stehengeblieben. Abb. 9 c zeigt, wie der schwammige Rost eine kleine Oberflächenschuppe in die Höhe gehoben hat, bei der schon der Zusammenhang mit der übrigen Oberfläche verloren ist. Abb. 9 d gibt den Zustand wieder, nachdem die Oberfläche und der Rost abgefallen sind.

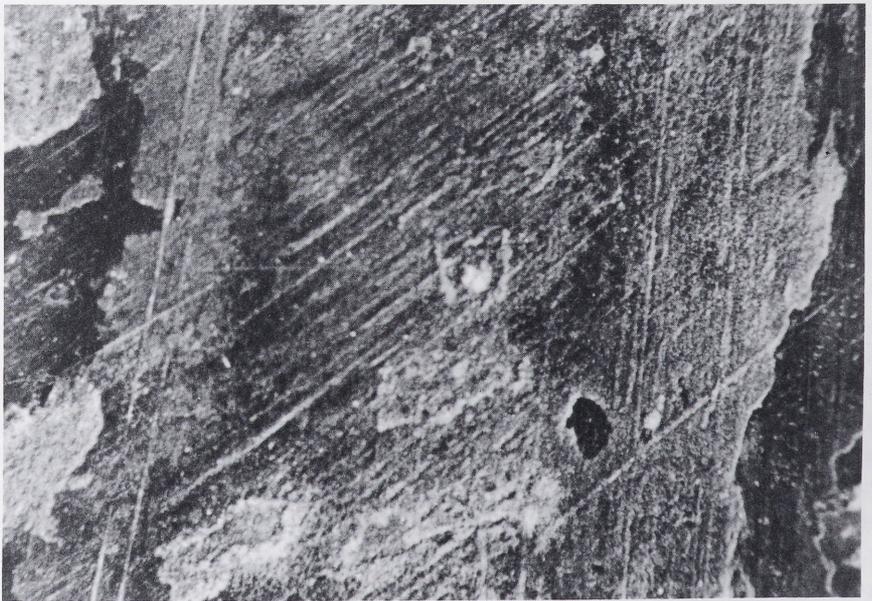
Die Durchmusterung der gesamten Spurenoberfläche des Schwertes zeigt, daß wir es mit 3 verschiedenen Stadien der Bearbeitung zu tun haben. Es handelt sich um:

1. Grob-, Feinschliff und Politur der gesamten Klinge (Bahn und Waten).
2. Grobschliff der angeschmiedeten Waten.
3. Abziehen der eigentlichen Schneide.

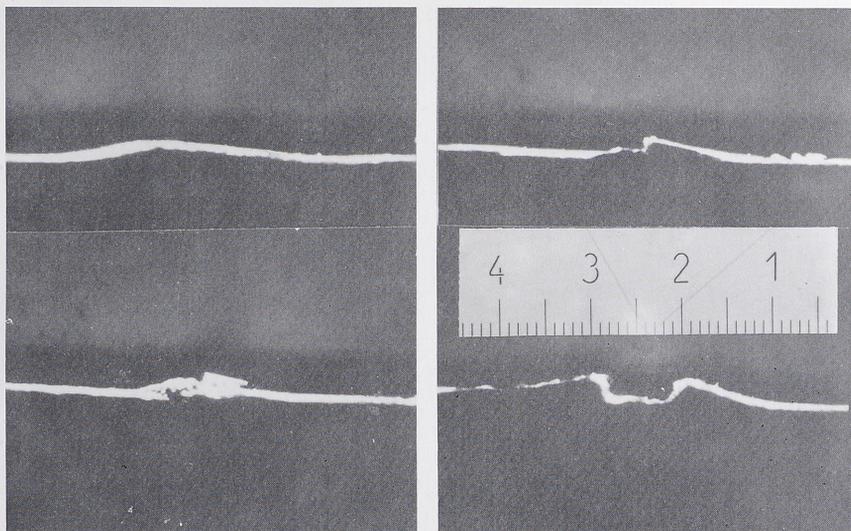
Zur Sichtbarmachung und fotografischen Dokumentation der Spurensysteme eignet sich nun das Original selbst weniger als Filmabdrücke, die im Durchlichtmikroskop betrachtet werden. Die Benutzung von Lackfilmen und Filmabdrücken zum Studium der Details von Oberflächen ist heute eine allgemein geübte Praxis, und es gibt – je nach Aufgabenstellung – zahlreiche Rezepte zu deren Herstellung. Für unsere Zwecke genüßten einfache Filmabdrücke. Nach Reinigung der Oberfläche mit Azeton wurde je nach Größe des anzufertigenden Abdruckes Azeton auf die Oberfläche gegeben, ein Stückchen Abdruckfilm daraufgelegt und mit dem Finger eine Zeitlang angedrückt und dann abgezogen. Auch an solchen Abdrücken wird der stufenförmige Aufbau der Oberfläche deutlich. Abb. 10 bis Abb. 14 sowie ein Teil der als Interferenzaufnahmen wiedergegebenen Abdrücke (Abb. 15–20) zeigen neben der Spurenoberfläche auch Teile flächenhafter Verwitterung, z. T. mit in diese



7 Schwert von Vrasselt, Detail der Oberfläche.

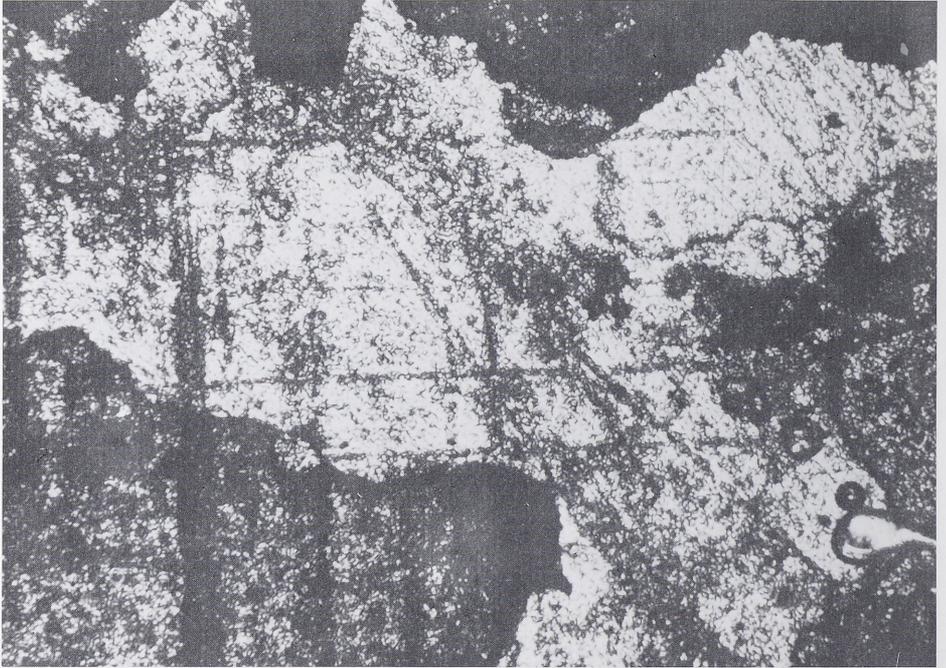


8 Schwert von Vrasselt, Detail der Oberfläche.



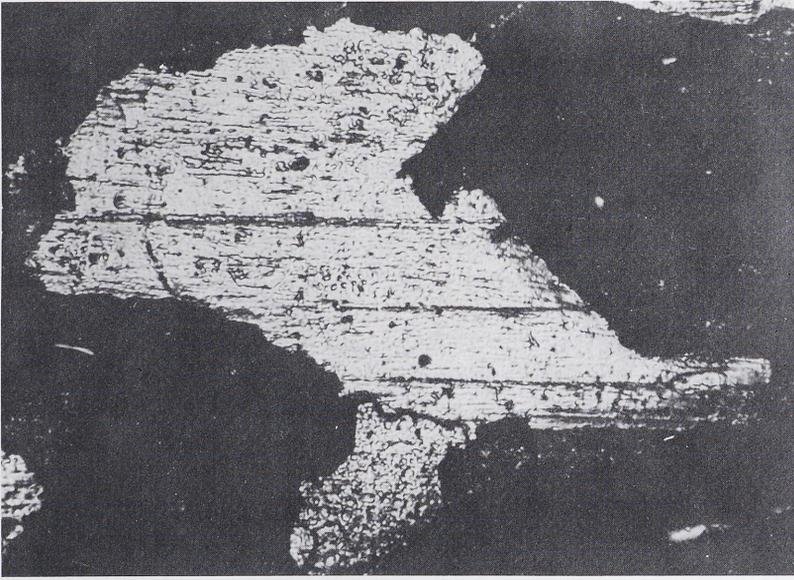
9 Schwert von Vrasselt. Aufnahme der Oberfläche mit dem Lichtspaltgerät.

weiterlaufenden vergrößerten Spuren (vgl. Abb. 10), Rostauflagen verschiedener Dicken und die überall auftretenden größeren und kleineren Lochfraßstellen. Die im folgenden beschriebenen Bilder sind alle so orientiert, daß die Waagerechte parallel zur Schwertachse verläuft. Auch sind sie, mit Ausnahme von Abb. 13, im gleichen Maßstab gehalten. Abb. 10 führt eine Stelle des Bandes nahe dem Ansatz der Waten vor Augen. Das gitterförmige, rechtwinklig sich schneidende System grober Spuren, das außerdem noch von einem ähnlichen System schräg durchschnitten wird, ist zwar keineswegs typisch für den Schliff des Bandes, kommt aber doch an einer ganzen Reihe meist recht eng begrenzter Stellen vor. Normalerweise verlaufen die Spuren des Bandes parallel zur Schwertachse, also in Längsrichtung des Schwertes. An Stellen wie der vorliegenden wich man von der allgemeinen Übung ab. Der Grund ist leicht ersichtlich. Hier wies das Schwert nach dem Schmieden etwas größere Buckel auf, die man nur durch ein Angehen in mehreren Richtungen beim ersten groben Schleifen rasch entfernen konnte. Daß es sich bei diesen Spuren um Relikte eines ersten groben Schleifganges handelt, wird daraus ersichtlich, daß diese Spuren in einer im übrigen glatten Fläche stehen. Es sind die letzten Reste besonders tiefer Schleifgräben, deren Wände bei der folgenden Bearbeitung zum größten Teil abgetragen wurden. Das gleiche Bild, nun aber mit fast durchgehend paralleler Anordnung dieser Schleifspuren, begegnet auf Abb. 11 und 12. Auch hier wird deutlich, daß diese tiefen Spuren als letzte nicht weggearbeitete Reste in einer weitgehend ebenen Fläche liegen. Auch diese ebenen Flächenstücke sind von mannigfachen feineren Spuren durchzogen, die nicht immer streng, aber doch im wesentlichen in gleicher Richtung verlaufen. Eine Analyse nach Größe und Form wäre bei dieser völlig verebnenden Betrachtung nicht sinnvoll. Wesentlich ist freilich, daß Flächenstücke auftauchen, die überhaupt keine Spuren mehr aufweisen, also eine noch bessere Glättung besitzen als die Flächen mit deutlich sichtbaren Spuren, so daß allein aus diesen Bildern mindestens drei immer feiner werdende



10 Schwert von Vrasselt. Durchlichtaufnahme der Oberfläche.

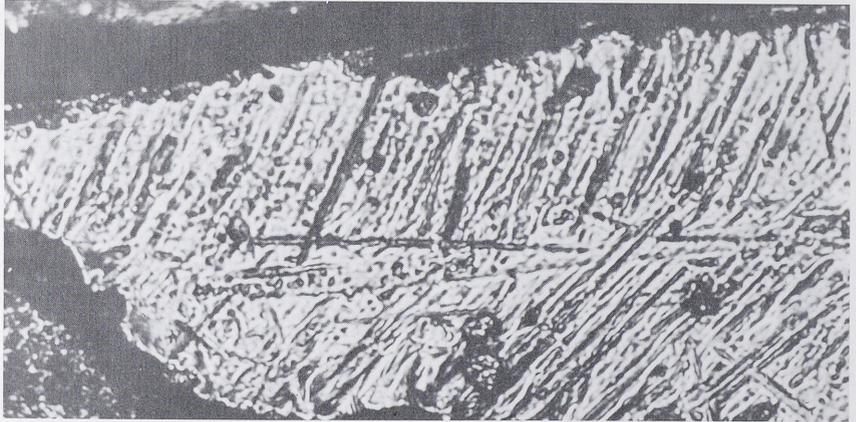
Bearbeitungsgänge erschlossen werden können. Die Analyse muß hauptsächlich den Interferenzverfahren, z. T. auch den Tastschnitten überlassen bleiben. Grundsätzlich erfordert – und das gilt für die Antike genauso wie heute – ein geschmiedetes Stück, wenn die Oberflächengüte soweit getrieben wird, wie es die Interferenz- aufnahmen in unserem Falle zeigen, drei Schleifgänge und einen Poliergang. Einen völlig anderen Charakter haben die Spuren des Waten- und Schneidenschliffs, weil beide nicht mehr überglättet sind. Der Waten- schriff kommt bereits auf den Farbaufnahmen gut zur Geltung, so daß die Wiedergabe einer Durchlichtauf- nahme (Filmabdruck) genügen kann (Abb. 14). Sie zeigt mit der nötigen Deutlich- keit, daß dieses bald dichte, bald schütterere Spurensystem erst entstand, als die ge- samte Klinge bereits geglättet war. Deutlich heben sich unter den schräg verlaufenden Spuren des Waten- schliffs tiefere und flachere Schriffspuren des Klingenschliffs ab. Hier sind zwischen den groben Schleifrillen des Waten- schliffs überall Inseln und Stege der geglätteten Klinge- oberfläche mit ihren Spuren stehengeblieben, die sich dem Auge noch in weitgehend zusammenhängendem Verlauf darbieten. Nach der Bahn zu hat sich auch hier die fein gegliederte Oberfläche (angenagt von Loch- fraß und flächenhafter Zerstörung) mit ihren eigenen Spurensystemen erhalten. An einer Reihe von Stellen ist gut zu sehen, wie sich Spuren des Waten- schliffs mit dünner Spitze ansetzen, sich verbreitern und dann wieder ausdünnen. Die Waten selbst sind schwach gewölbt. Die Spuren sowohl des eigentlichen Klingenschliffs wie die des Waten- schliffs können von einer bemerkenswerten Länge sein. Auf der Bahn gelegentlich über 1 cm, auf den Waten bis 0,5 cm. Diese Tatsache ist für die Rekonstruktion von Arbeitsgang wie Arbeitsgerät von nicht unerheblicher Wich- tigkeit. Im allgemeinen fällt eine strenge Parallelität der Spuren innerhalb meist



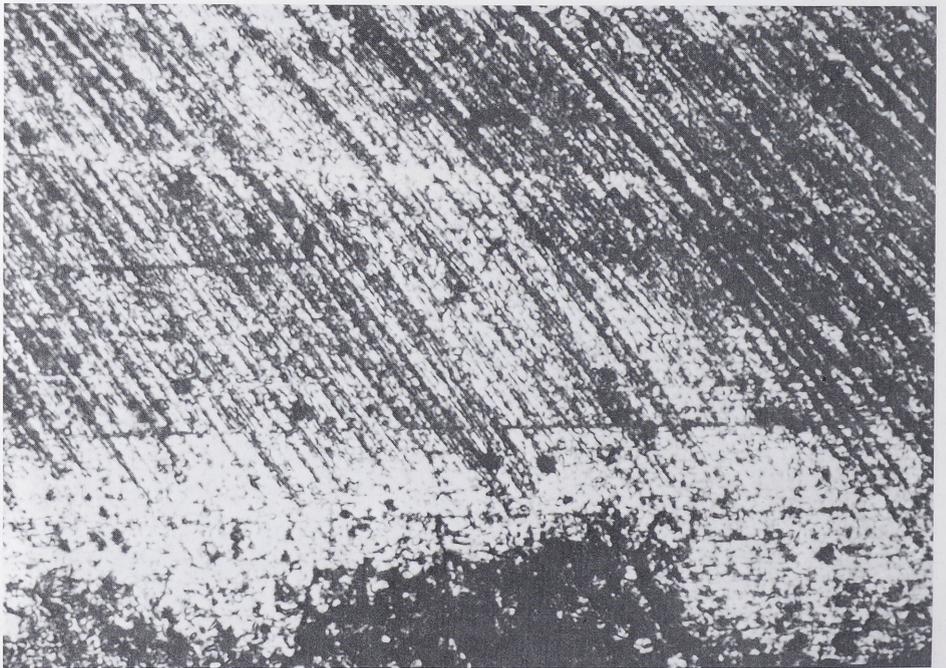
11 Schwert von Vrasselt. Durchlichtaufnahme der Oberfläche.



12 Schwert von Vrasselt. Durchlichtaufnahme der Oberfläche.



13 Schwert von Vrsasselt. Durchlichtaufnahme der Oberfläche.



14 Schwert von Vrsasselt. Durchlichtaufnahme der Oberfläche.

breiterer Spuren­bündel auf, was auf mechanische Schleifvorrichtungen schließen läßt. Das hindert nicht, daß andere Spuren­bündel im Fortschreiten der Fläche immer wieder eine etwas andere Richtung einnehmen, je nachdem sich der Winkel, unter dem das Werkstück gegen die Schleifvorrichtung angedrückt wurde, etwas änderte. Die mehrfache Richtungsänderung auf engem Raum wie auf Abb. 7 ist selten. Diese Erscheinung fällt speziell beim Watenschliff auf, wo sich die Spurenrichtung über die Breite der Wate gelegentlich bis zu fünfmal ändert. Im allgemeinen aber halten sie doch eine generelle Richtung bei. Um diese Verhältnisse genauer zu studieren, wurden die Schliffspuren einer Wate von der Spitze bis zum Abschluß

unter dem Meßmikroskop vermessen. Legt man das Schwert vor sich mit der Angel nach rechts, so laufen alle Spurensysteme des Watenschliffs der oberen Wate nach links oben, der unteren Wate nach rechts unten. Die Verhältnisse sind auf beiden Seiten des Schwertes völlig gleich. Die Spurensysteme weisen zur Klingennachse alle Winkel zwischen 30° und 47° auf, an der Verjüngung zur Spitze durchweg 50° . Das bedeutet, daß das Schwert beim Schleifen schräg gegen die senkrecht stehende Schleifscheibe angedrückt wurde. Die Breite der Schleifscheibe ist aus der Breite gleichgerichteter Spurensysteme freilich nur mit einem relativ großen Unsicherheitsfaktor zu entnehmen, da das Schwert niemals über deren ganze Breite angedrückt zu werden brauchte. Auch wurden gleiche Stellen gelegentlich mehrfach unter verschiedenem Winkel angedrückt. Auch die Schräghaltung des Schwertes und die Wölbung der Waten verhinderte oft ein Angreifen in der ganzen Breite der Schleifscheibe. Trotzdem wurde versucht, durch Verfolgen gleichgerichteter Spurensysteme einen, wenn auch noch so unsicheren, Anhaltspunkt zu gewinnen. An mehreren Stellen wurden solche Spurensysteme von rund 5 cm Breite ermittelt, was wohl der Mindestbreite der Schleifscheibe entspricht.

Der eigentliche Schneidenschliff ist nur an ganz wenigen Stellen auf einigen Millimetern Länge erhalten. Diese Spuren Abb. 13 zeigen schon durch ihre etwas wirre Art eine andere Entstehung als die übrigen. Sie laufen im spitzen Winkel zur Schneidkante. Spuren eines älteren Schneidenschliffs – die Schneide wurde wohl mehrfach abgezogen – liegen darunter. Auf dem abgebildeten Ausschnitt werden im unteren Bildteil die auslaufenden Spuren des Watenschliffs bemerkbar. Unter beiden Schliffen liegen größere Schleifgraben in Längsrichtung. Sie stammen vom Grobschliff der vorausgegangenen Glättung der gesamten Oberfläche. Dieses Bild wurde in etwas höherer Vergrößerung reproduziert, um die Zerkerbung, die durch solche groben Schliffe entsteht, etwas deutlicher wiederzugeben. Während die Erschließung der Schliffverfahren allgemein uns noch in weiterem Zusammenhang interessieren soll, kann aus der Form der Spuren des Schneidenschliffs ohne weiteres auf die Benutzung eines Handschleifsteines (Abziehstein) geschlossen werden.

Auflichtbetrachtung des Originals wie das Studium der Abdrücke im Durchlicht ermöglichen nur eine qualitative Beurteilung der Oberfläche, das Meßmikroskop nur eine Vermessung in der Ebene. Zur maßlichen Erfassung bedarf es besonderer feintechnischer Verfahren, wie Lichtschnitt⁶, Interferometrie⁷ und Tastschnitten mit Profilschrieb⁸. Welche Verfahren und Geräte man einzeln oder nebeneinander anwenden wird, hängt von der Aufgabenstellung ab. Die Lichtschnitt- und Tastschnittgeräte haben gemein, daß sie jeweils nur einen Profilschnitt durch die zu untersuchende Oberfläche legen⁹. Beim Lichtschnittverfahren wird ein feiner Licht-

⁶ Dazu Rantsch a. a. O. (Anm. 3) 268 ff.; Schorsch a. a. O. (Anm. 3) 67 ff.; 94 ff.; 129 ff.; 138 ff.

⁷ Rantsch a. a. O. (Anm. 3) 284 ff.; Schorsch a. a. O. (Anm. 3) 70 ff.; 100; 141 ff.; A. Kohaut, Technische Interferenzmikroskopie in: H. Freund, Handbuch der Mikroskopie in der Technik 1,2 [Frankfurt o. J.]; W. Krug, J. Rienitz u. G. Schulz, Beiträge zur Interferenzmikroskopie (1961).

⁸ Eine den neuesten Entwicklungsstand der Tastschnittgeräte zusammenfassende Arbeit fehlt. Man vgl. Schorsch a. a. O. (Anm. 3) und die Firmenprospekte, in Deutschland u. a. der Firmen Hommel-Werke-Mannheim (Perth-O-Meter), Hahn und Kolb-Stuttgart (Profilograph von Dr. Förster), E. Leitz-Wetzlar (Forster-Gerät und Leitz-Rauhtester), Deutsch-Wuppertal (Mikrogeometer).

⁹ Das neue Lichtschnittmikroskop der Optischen Werke-Jena erlaubt allerdings auch Serienschnitte.

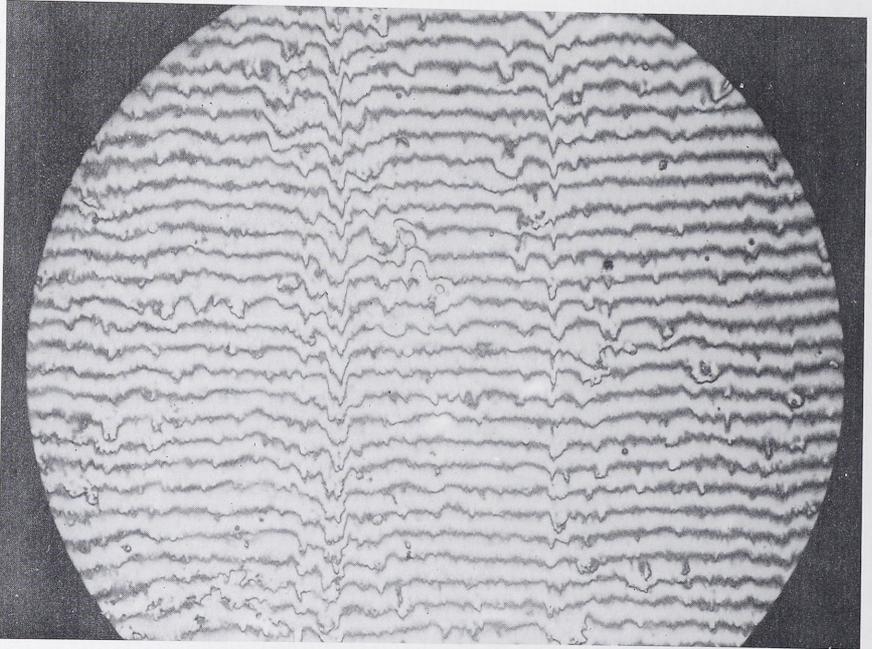
spalt auf die Prüfungsoberfläche projiziert und seine Auslenkungen auf dieser durch ein Mikroskop betrachtet und vermessen. Beim Leitz-Lichtspaltgerät (Vergrößerung 20 : 1) wird dieser Lichtspalt senkrecht auf die zu untersuchende Fläche projiziert und unter einem Winkel von 8° gegen die Fläche mit einem Mikroskop betrachtet. Eine Überhöhung des Profils tritt dabei praktisch nicht auf.

Beim Zeiss-Lichtschnittmikroskop (Vergrößerung in Profilhöhe 200 : 1 und 400 : 1) sind sowohl das Projektionsobjektiv wie das Betrachtungsobjektiv zur Werkstückoberfläche in einem Winkel von 45° geneigt, so daß eine Profilüberhöhung um den Faktor $\sqrt{2} \cong 1,42$ eintritt. Der Tiefenmeßbereich des Lichtschnittmikroskops liegt zwischen $1 \mu\text{m}$ und etwa $400 \mu\text{m}$, der des Lichtspaltgerätes zwischen 50μ und mehreren Millimetern. Dieses Gerät ist speziell zur Untersuchung rauher Oberflächen gedacht¹⁰. Das Lichtschnittmikroskop wurde zur Ausmessung der Schichtdicken der Oberfläche unseres Schwertes eingesetzt, das Lichtspaltgerät zur Vermessung und Darstellung der Vorgänge bei der Bildung des Lochfraßes (vgl. S. 427 ff. und Abb. 9). Über die Tastschnittgeräte vgl. die Angaben weiter unten. Die Interferenzverfahren sind die universellsten in der Feinmeßtechnik. Sie erlauben eine flächenhafte Prüfung des Spurenverlaufs durch Serienschnitt, verbunden mit der Möglichkeit, die Tiefe der Spuren an allen Stellen gleichzeitig zu messen. Die typischen Streifenbilder kommen dadurch zustande, daß in den Mikrointerferometern (Interferenzmikroskopen) das Licht in zwei Teilstrahlenbündel aufgespalten wird, von denen eines zu einer Vergleichsfläche, das andere zur Prüflingsoberfläche geht. Nach der Wiedervereinigung wird überall da, wo sich durch Ungleichheit zwischen der optisch planen Vergleichsfläche und der Rauheit der Prüflingsoberfläche eine Wegdifferenz um eine halbe Wellenlänge ergibt, Dunkelheit eintreten. Kippt man nun den Prüfling bzw. die Vergleichsfläche ein wenig, so werden je nach Rauheit der Prüflingsoberfläche mehr oder weniger ausgelenkte helle und dunkle Linien entstehen. Eleganter ist der gleiche Effekt durch den Einbau kipp- und schwenkbarer planparalleler Platten in die Teilstrahlengänge zu erreichen. Man kann sich das Meßverfahren mit Interferenzen so vorstellen, daß der Prüfling sich in einem System paralleler Schichten befindet, die abwechselnd von Licht erfüllt oder dunkel sind. Der Abstand aller Schichten (z. B. von Schichtmitte) beträgt immer die Hälfte der Wellenlänge des verwendeten Lichtes (bei Thalliumlicht = $0,27 \mu\text{m}$; bei Weißlicht $0,3 \mu\text{m}$).

Die Interferenzlinien erscheinen als ein System von Lichtschnitten, die die Oberfläche unter einem ungemein flachen Winkel treffen. Auf einer optisch planen Prüflingsoberfläche bieten sie sich als ein System gerader paralleler Linien dar, auf einer Kugel als konzentrische Kreise, usw. Jede Formabweichung macht sich in einer Störung des Verlaufs der Interferenzlinien bemerkbar, ebenso aber auch jede Welligkeit bzw. Rauheit der Oberfläche durch gebogte oder zackige Auslenkungen der Interferenzstreifen. Der Linienmaßstab (der Abstand von Streifenmitte zu Streifenmitte) beträgt immer die Hälfte der Wellenlänge des verwendeten Lichtes. Durch Schätzen oder Messen lassen sich Auslenkungen bis rd. $\frac{1}{10}$ des Streifenabstandes

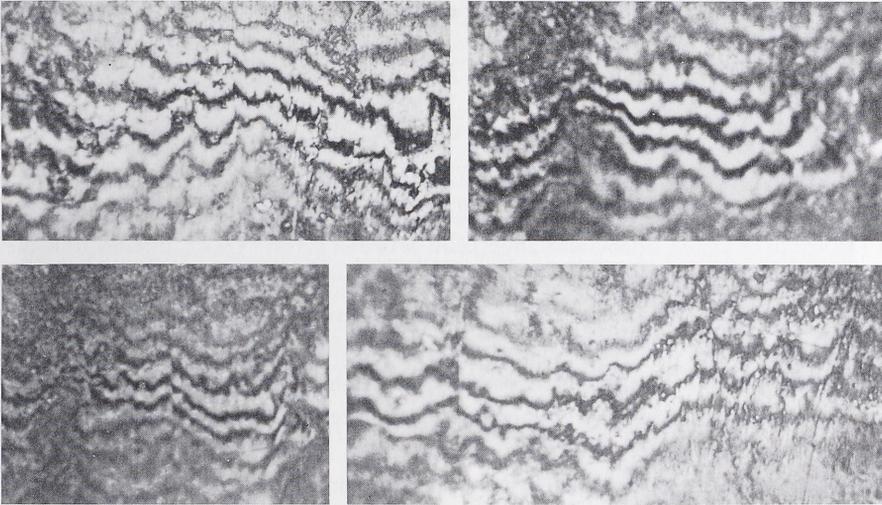
¹⁰ Das Gerät wird in seiner alten Form nicht mehr gebaut und wird durch den Lichtspaltansatz zum Leitz-Meßmikroskop ersetzt.

noch ermitteln und damit Rauhtiefenmaße bis etwa $0,027\ \mu\text{m}$ bzw. $0,03\ \mu\text{m}$ ausmessen. Je nach Ausbildung der Oberfläche kann man im monochromatischen (Thallium-)Licht Rauheiten bis ca. $1\ \mu\text{m}$, bei Verwendung von Weißlicht, wobei nur zwei dunkle Streifen auftreten, solche bis etwa $2\ \mu\text{m}$ erfassen. Oberflächen weisen nun, auch wenn es sich nicht um Vorfertigungsstufen handelt, vielfach Rauheiten auf, die einer Interferenzdirektbetrachtung nicht mehr zugänglich sind. Hier hilft die Vergrößerung des Linienmaßstabes durch die Betrachtung immersierter Abdrücke mit Hilfe der sog. Zehenderkammer. Durch Abdruckfilme und Immersionsmittel mit jeweils entsprechend gewählten Brechzahlen läßt sich der Linienmaßstab den Rauheiten der Prüflingsoberfläche anpassen (bis zu $10\ \mu\text{m}$ Linienmaßstab), so daß praktisch alle interessierenden Oberflächen bis zu Rauhtiefen von etwa $60\ \mu\text{m}$ interferometrisch erfaßt werden können. Freilich verschwinden mit der Vergrößerung des Linienmaßstabes auch feine Details der Oberfläche, die Interferenzen der Interferenzlinien werden ärmer. Es empfiehlt sich daher, z. B. von Oberflächen mit großen Rauheiten mehrere Abdrücke zu machen und den Linienmaßstab zu variieren, damit einmal auch die größten Rauhtiefen erfaßt, andererseits aber auch feine Arbeitsspuren auf einzelnen Buckeln der Oberfläche nicht verlorengehen. Gearbeitet wurde mit dem Interferenzmikroskop der Firma Carl Zeiss Oberkochen. Es handelt sich dabei um ein Gerät, das auf dem Prinzip der Zweistrahlinterferenz beruht (vgl. oben). Ein Teil der marktgängigen Geräte (z. B. von den Optischen Werken Jena) arbeitet mit Vielstrahleninterferenzen. Diese liefern schärfere und besser deutbare Streifen, doch sind diese von geringerem Informationsgehalt als die Zweistrahlinterferenzen. Erwähnt werden muß schließlich, daß die durch die Auslenkungen der Interferenzstreifen gebildeten Profilschnitte durch starke Überhöhung meist kein unmittelbar anschauliches Bild der Profilgestalt geben. Erfahrungsgemäß bestehen zuerst erhebliche Schwierigkeiten, sich in die Interferenzbilder einzudenken und daraus den Charakter der Oberfläche abzulesen, besonders wenn – wie auch in unserem Fall – wechselnde Linienmaßstäbe gewählt werden müssen. Es wäre durchaus sinnvoll, Oberflächen danach zu beurteilen, ob sie deutbare Interferenzen bei Direktbetrachtung oder nur an immersierten Abdrücken liefern. In unserem Falle liegen nun freilich die Verhältnisse nicht ganz so einfach, indem der Watschliff nur an immersierten Abdrücken interferometrisch zu erfassen ist, die vorausgehende Glättung der Klinge aber nur stellenweise so gut ist, daß sie Direktinterferenzen liefert. Oben wurde darauf hingewiesen, daß dieser Schliff überall nicht weggearbeitete Grabenspuren eines ehemaligen Grobschliffs aufweist. Um die gesamte Oberfläche einschließlich dieser tiefen Rillen interferometrisch zu erfassen, muß auch hier zur Vergrößerung des Linienmaßstabes unter Einbettung von Abdrücken in der Zehenderkammer geschritten werden. Abb. 15 zeigt einen solchen Abdruck einer Stelle von der Bahn des Schwertes. Der Linienstab beträgt $1,6\ \mu\text{m}$. Zu beachten bleibt, daß manche hofartigen Ausbiegungen der Interferenzlinien auf kleine Lochfraßstellen zurückzuführen sind. Dies gilt auch für alle weiteren Interferenzaufnahmen. Durch den linken Bildteil zieht sich der Rest eines tiefen, breiten Schleifgrabens von durchweg einem Linienabstand (= $1,6\ \mu\text{m}$) Tiefe. Durch den rechten Bildteil zieht sich ein eben solcher, allerdings schmalerer und nicht ganz so tiefer (im Höchstfall $1,4\ \mu\text{m}$). Diese Gräben, zusammen mit Resten weiterer, gehören dem ersten groben Schliff des

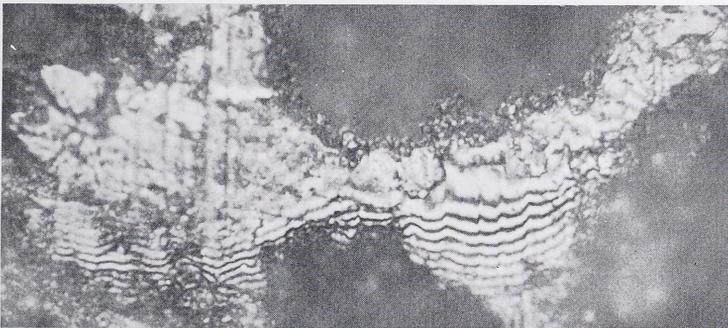


15 Schwert von Vrssett, Oberfläche. Interferenzaufnahme.

Schwertes an. Dabei ist zu beachten, daß diese nurmehr letzte Reste ehemals viel tieferer Gräben darstellen, die weitgehend eingeebnet wurden. Sie werden ehemals um $10\ \mu\text{m}$, stellenweise noch erheblich tiefer gewesen sein. Gräben von ca. $3\ \mu\text{m}$ Tiefe treten noch allenthalben auf. Diese Rumpfflächen der Einebnung machen den Hauptteil des Bildes aus. Aber auch diese sind wie an den Auslenkungen der Interferenzstreifen nach unten – alle Interferenzbilder sind so orientiert, daß die Gräben nach unten weisen – sichtbar wird, von zahlreichen feineren Schliffspuren des zweiten Arbeitsganges durchzogen, die durchweg $\frac{2}{10}$ – $\frac{3}{10}$ des Linienmaßstabes ausmachen (= $0,32$ – $0,48\ \mu\text{m}$). Zwischen diesen sind buckelige, gerade oder schräg abgeflachte Stege wahrzunehmen, die der Oberfläche einen geradezu kleinwelligen Charakter verleihen. Bei genauer Betrachtung – zur Vergrößerung empfiehlt sich ein sog. Leselineal (Zylinderlinse) – zeigt sich, daß auch diese Buckel Verunschärfungen weiterer noch feinerer Bearbeitungsspuren tragen. Es handelt sich hier um die Spuren eines dritten Arbeitsganges, die auf unserem Bild nicht mehr auflösbar sind. Gerade diese größeren und kleineren Stege, die zwischen den Rillen des zweiten Arbeitsganges stehengeblieben sind, sind nun der Direktinterferenz zugänglich (Abb. 16). Man beachte nun den völlig veränderten Linienmaßstab von $0,3\ \mu\text{m}$ der Weißlichtinterferenz wie die erheblich höhere Mikroskopvergrößerung. Abb. 17 gibt eine kleine Insel der Bandoberfläche wieder. Auf der rechten Bildseite machen sich flache parallele Spuren bemerkbar, zwischen denen breite glatte Stege stehen. Die Partie links oben enthüllt durch die Interferenzlinien (man betrachte hauptsächlich die beiden tiefschwarzen Streifen) die wahre Gestalt dieser Fläche. Sie ist als Ganzes etwas gewölbt. In ihrem Verlauf zeigen die Streifen grabenartige Einschnitte, die Schleiffrillen des zweiten Arbeitsganges, und zwischen diesen kleine



16 Schwert von Vrasselt, Oberfläche. Interferenzaufnahmen.



17 Schwert von Vrasselt, Oberfläche. Interferenzaufnahme.

Bögen bzw. abgeflachte Erhebungen. Die Grabenschnitte betragen rund ein Drittel des Streifenabstandes, d. h. etwa $0,1 \mu\text{m}$. Auf den Bögen und Erhebungen zeigen sich kaum Ansätze weiterer Auslenkungen, d. h. es handelt sich um eine sehr gute, geglättete Oberfläche. Die Berge wie die Täler dieses Oberflächenreliefs sind hierbei sorgfältig geglättet. Die Güte dieser Oberfläche wird an den meisten anderen noch erhaltenen Stellen des Klingenschliffs nicht erreicht. Trotzdem lassen die meisten eine Interferenzbetrachtung im Weißlicht ohne weiteres zu. Zunächst muß noch gesagt werden, daß auch die Erhaltung dieser Oberflächen, selbst wenn sie alle Einzelheiten der Spuren deutlich zeigen, nicht überall die gleiche ist. Kleine Rostaussfressungen und Rostauflagen kommen in wachsendem Ausmaß überall vor und stören die Interferenzbilder durch punktförmige oder flächenhafte Unschärfen bzw. unterbrechen diese sogar. Es dürfte lehrreich sein, die ganze Variation in der Güte gerade der Bandoberfläche zu studieren und den Befund auch bildlich festzuhalten, zumal damit gerechnet werden muß, daß das Schwert durch weitere Verrostung viel von seiner originalen Oberfläche verlieren wird und eine dann eventuell

notwendig werdende Präparierung entweder die Spuren verdecken oder weiter zerstören wird.

Die Interferenzaufnahmen (Abb. 16; 17), die von anderen Stellen des Bandes stammen, zeigen grundsätzlich die gleiche Erscheinung wie Abb. 15. Da fällt zunächst an fast allen Bildern eine gewisse 'Welligkeit' auf. Sie rührt daher, daß tiefere Schleifkratzer des zweiten Vorbearbeitungsstadiums nicht völlig beseitigt, sondern nur die Stege zwischen diesen tiefen Rillen durch die weitere Bearbeitung abgerundet (Abb. 16 b.c; 17) oder auch abgeflacht wurden (Abb. 16 a). Die Spuren dieses Abtragens – eines dritten Bearbeitungsanges – heben sich im Gegensatz zu Abb. 15 hier überall als kleinere, zitterige Auslenkungen der Streifen ab. Besonders gut ist diese Erscheinung auf Abb. 16 a–c zu sehen. Die Ausmessung ist bei solchen stark gebogt verlaufenden Streifensystemen oft nicht ganz einfach. Sie können zwischen $\frac{1}{5}$ und etwa $\frac{1}{4}$ der Streifenbreite alle Werte annehmen (zwischen 0,06 und 0,12 μm). Bei der später noch zu besprechenden Bearbeitungsweise war es nicht möglich, eine völlig ebene Fläche herzustellen, sondern einzelne Partien liegen in verschiedenen Höhen, die auf unseren Bildern über eine Streifenbreite (ca. 0,5 μm) gegeneinander versetzt sein können. Diese Erscheinung tritt natürlich ebenso in Richtung der Spuren auf wie quer dazu.

Nun ist es interessant zu sehen, daß die Flanken solcher Niveausprünge, genauso wie die Wellenflanken, feine Streifenauslenkungen (Abb. 16 a–c) tragen. Diese Tatsache ist von einiger Bedeutung für die Rekonstruktion der Bearbeitungsverfahren. Fassen wir in einer kurzen Liste die Ergebnisse der interferometrischen Messungen zusammen, so ergeben sich die unten zusammengestellten Zahlen. Es muß dazu gesagt werden, daß der Gesamtvorgang der Entstehung und Abtragung des Oberflächengebirges durch die Schleifvorgänge klar ist, daß es andererseits aber schwierig ist, in allen Fällen die richtige Zuordnung der Spuren zu den Bearbeitungsängen zu treffen, zumal die Körnungen der Schleifmittel sicherlich sehr unterschiedlich waren. Es ergibt sich aber doch folgendes Bild:

1. Bearbeitungsgang	Rauhtiefe
ursprünglich	ca. 6–15 μm
heute nach Überarbeitung durch 2 u. 3	ca. 1,8–6 μm
2. Bearbeitungsgang	
nach Überarbeitung durch 3 noch	ca. 0,1–0,48 μm
3. Bearbeitungsgang	ca. 0,06–0,12 μm

Die Rauhtiefen dieses dritten Bearbeitungsanges liegen durchaus im Bereich polierter Oberflächen heutiger Metallbearbeitungsverfahren. Nun zeigen die Interferenzen auf Abb. 17 keinerlei Auslenkungen mehr, an anderen Stellen glaubt man bei der Direktbetrachtung, feinste Verunschärfungen eines vierten Arbeitsanges zu sehen. Doch sind solche Stellen wie auf Abb. 16 a sehr selten und an anderen ist die erhaltene Fläche zu klein bzw. auch mit Oxydationserscheinungen so durchwoben, daß noch feinere Meßmethoden wie Interferenzkontrast¹¹, Kohautverfahren¹² oder Herstellung von Aequidensiten¹³ wenig Erfolg versprochen. Schließlich bleibt zu

¹¹ G. Krüger, Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik 25 H. 8, 1959.

¹² Kohaut a. a. O. (Anm. 7) 594.

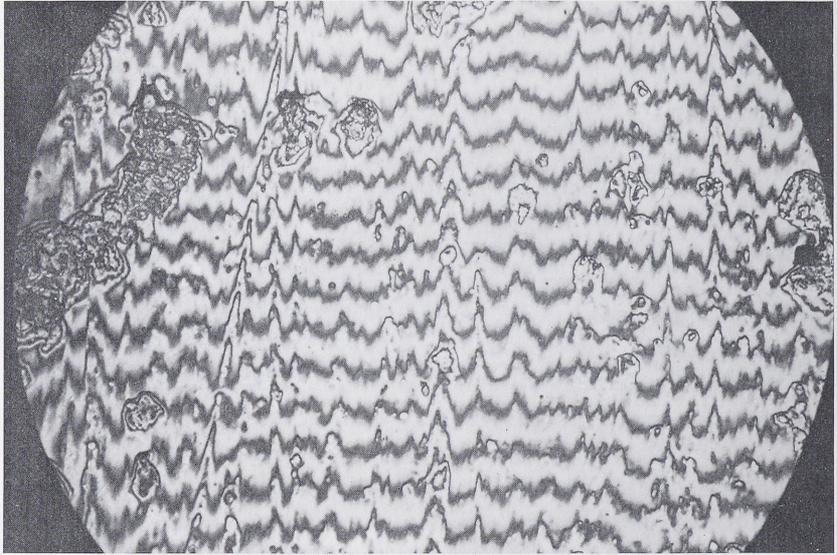
¹³ E. Lau u. W. Krug, Die Aequidensitometrie (1957).



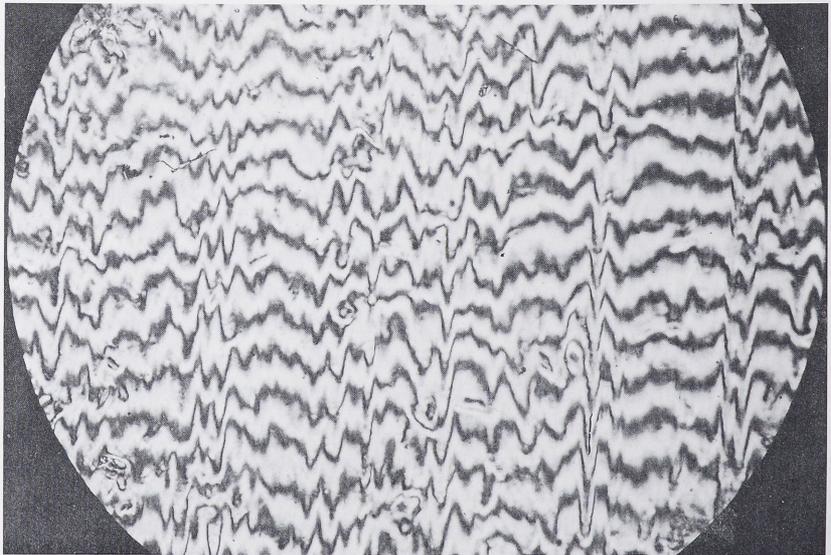
18 Schwert von Vrasselt, Oberfläche. Interferenzaufnahmen.

bedenken, daß einzelne Stellen beim dritten Bearbeitungsgang infolge Abnutzung des Schleifkorns besonders fein ausfielen. Hinzu kommt, daß ein nachträgliches sich Blankreiben während der Benutzung des Schwertes eingetreten sein kann. Abb. 21 zeigt in schematischer Weise die Entstehung der Feinoberfläche auf der Bahn des Schwertes.

Einen völlig anderen Charakter haben die Spuren des Watenschliffs (vgl. dazu auch die Tastschnitte Abb. 22). Der Watenschliff greift in eine bereits hervorragend geglättete Oberfläche ein und ist nicht mehr überarbeitet. Es gibt Stellen mit einer dichten Reihung tiefer Spuren und solche mit lockerer Verteilung. Schließlic ist noch zu unterscheiden, ob Spuren nahe ihres Einsatzes oder Auslaufens auf der Oberfläche betrachtet werden. Ferner ist zu beachten, daß diese Spuren keinerlei Glättung erfahren haben. Hier liegt ein Schliff in Originalgestalt vor und seine verschiedenartige Ausprägung läßt Rückschlüsse auch auf den recht unterschiedlichen Ausfall der Spuren bei der vorangegangenen Klingebearbeitung zu. Abb. 18–20 sind im gleichen Maßstab wie Abb. 15 gehalten, freilich ist die interferentielle Vergrößerung verschieden. Je nach Mikroskopvergrößerung und Abstand der Interferenzlinien voneinander ist die Vertikalüberhöhung gegenüber der Horizontalen (Verzerrung) verschieden groß. Der Linienmaßstab bleibt jedoch derselbe, in unserem Falle $1,6 \mu\text{m}$. Obwohl die größten Rauhtiefen bei den hier wiedergegebenen Bildern des Watenschliffs kaum größer sind als auf Abb. 15, so fallen doch die Unterschiede in die Augen: in dem einen Falle die weitgehende Glättung der Oberfläche, im anderen die durchgehend in ihrem ganzen Verlauf stärkere Auslenkung der Interferenzstreifen. Abb. 18 macht durch den engen Streifenabstand den Verlauf einzelner tiefer Spuren besonders deutlich. Dazwischen stehen breite Felder ehemals geglätteter Oberfläche, die durch den Schleifprozeß aufgerissen wurden. Die Genese der Oberflächen Abb. 15 und Abb. 18–20 ist also eine verschiedene. Auf der einen Seite wurde ein rauhes Oberflächengebirge abgetragen, hier ein rauher Schliff auf eine gut geglättete Oberfläche gebracht. Während auf Abb. 19 die alte geglättete Oberfläche durch Anlegen einer Geraden an die höchsten Punkte der Interferenzlinien noch gut erkennbar wird, ist bei Abb. 20 die Zerkfurchung der Oberfläche weiter fortgeschritten. Bei diesen in der Zehenderkammer völlig flachliegenden Abdrücken kommt die Wölbung der Waten interferometrisch nicht zum Aus-

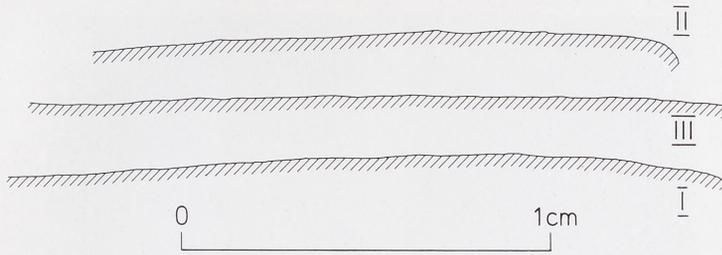


19 Schwert von Vrasselt, Oberfläche. Interferenzaufnahmen.



20 Schwert von Vrasselt, Oberfläche. Interferenzaufnahmen.

druck. Gut verfolgbar ist jedoch an manchen Schleiffrillen wie sie sich in den Werkstoff einsenken und langsam wieder lösen. Dabei fällt auf, daß einzelne Spuren über eine längere Strecke eine gleichmäßige Tiefe aufweisen. Man vergleiche dazu die beiden tiefen Gräben im Mittelfeld. Die gleiche Erscheinung tritt bei den tiefen und flacheren Schliffgräben des Schliffes der Schwertbahn auf und reicht, bei gleichbleibender Tiefe, bei beiden Schliffen gelegentlich 1–2 mm weit. Diese Tatsache gibt einen wesentlichen Hinweis auf die Arbeitsverfahren und -geräte. Die unterschied-

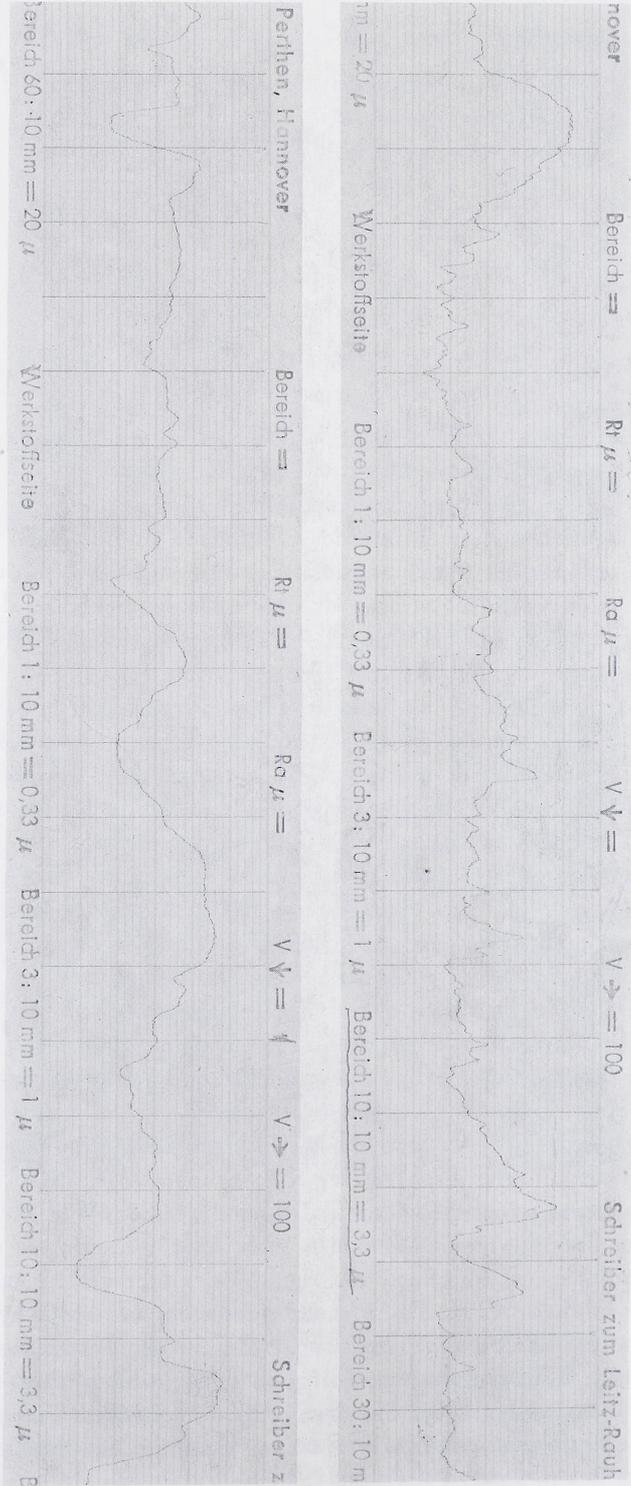


21 Schwert von Vrasselt, Oberfläche. Scheidenquerschnitte.

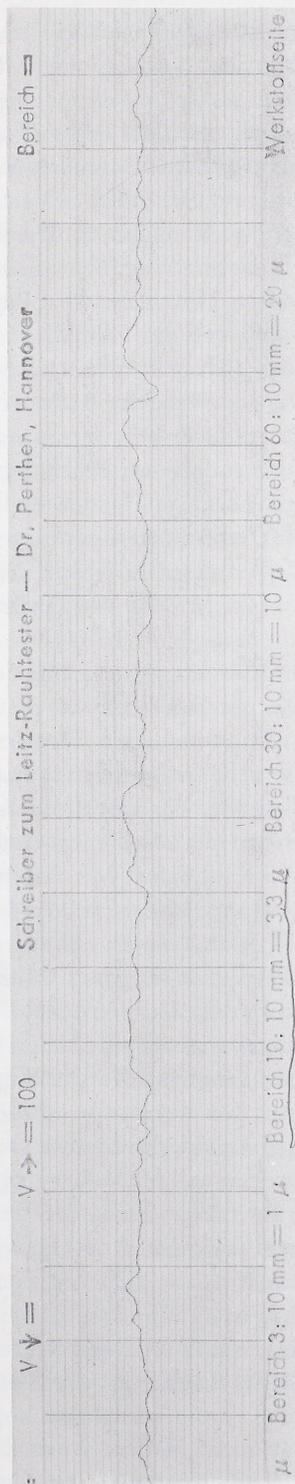
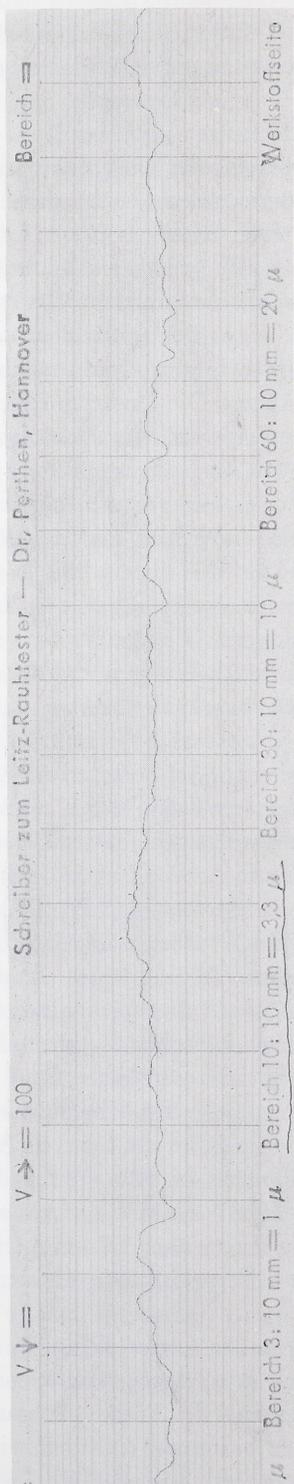
liche Tiefe der einzelnen Schleifgräben gerade beim Watenschliff weist auf recht unterschiedliche Schleifkorngrößen während eines Arbeitsganges.

In die industrielle Praxis der Oberflächenkunde haben heute weitgehend Tastschnittgeräte Eingang gefunden. Solche Geräte liefern nur jeweils einen Profilschnitt durch die Oberfläche, der Vorteil simultaner flächenhafter Prüfung entfällt. Trotz der interferentiellen Betrachtung der Oberfläche sind solche Profilschriebe auch im Rahmen unserer Untersuchung durchaus interessant. Schon die Abtastung einer wesentlich größeren Bezugsstrecke als sie die kleinen Sehfelder der optischen Geräte liefern, ist ein wesentlicher Vorteil. Bei den handelsüblichen Ausführungen kann meist sowohl die Vertikal- wie die Horizontalvergrößerung variiert werden, wodurch Schriebe mit wechselnder Überhöhung (Verzerrung) entstehen, die je nach Fragestellung, die eine oder andere Erscheinung besser hervortreten lassen. Es wurde mit dem Leitz-Rauhtester gearbeitet, der als sog. Freitastsystem den Vorzug oberflächenunabhängiger Führung des Tastkopfes hat. Um die Vergleichbarkeit der Schriebe (Abb. 22 und 23) nicht zu beeinträchtigen, wurden diese alle mit gleicher Überhöhung angefertigt (33:1). Solche überhöhten Tastschriebe haben mit den Interferenzen gemein, daß sie nur den maßlichen Charakter der Oberfläche zum Ausdruck bringen, nicht aber den natürlichen. Dies gilt es immer zu beachten.

Auf Abb. 23 sind charakteristische Schriebe der Bahnoberfläche, auf Abb. 22 der Waten zusammengestellt. Im Gegensatz zu den Interferenzaufnahmen, die nur eine Bezugsstrecke von Bruchteilen eines Millimeters haben, geben die Schriebe Ausschnitte von durchweg 2 mm Bezugsstrecke wieder und damit einen besseren Einblick in den Gesamtaufbau der Oberflächen. Von den auf Abb. 23 wiedergegebenen Schrieben würden sich weite Strecken zur Interferenzdirektbetrachtung eignen. Ein Teil der aus den Interferenzen gewonnenen Erkenntnisse läßt sich denn auch ohne weiteres in diesen Schrieben wiederfinden, so die feinen 'Welligkeiten' von $0,3\ \mu\text{m}$ und darunter der Interferenzaufnahmen Abb. 15–17, ebenso die entsprechenden Profilversetzungen und die Stege mit ebener oder schräger Abtragsfläche. An sich gestattet das benutzte Gerät die Einstellung einer noch zehnmal höheren Vertikalvergrößerung, die dann auch einen Schrieb der in den Interferenzen sichtbar werdenden feineren Bearbeitungsspuren möglich gemacht hätte. Dem stand jedoch gegenüber, daß der Tastdruck der Saphirnadel des Rauhtesters selbst kleine Eindrücke auf der Oberfläche in Größe der zu analysierenden Spuren hinterließ, eine Erscheinung, die sich in unseren Profilen maßlich nicht ausspricht, eine Analyse gerade dieser feinsten Spuren aber unmöglich gemacht hätte. Es besteht nämlich eine



22 Schwert von Vrasselt. Tastschrieb der Werten.



23 Schwert von Vrasselt. Tastschrieb der Bahnoberfläche.

auffällige Härteanisotropie zwischen der Oberfläche des Bandes und der Waten. Auf diesen hinterließ die Tastnadel keinerlei Eindrücke. Auf den Oberflächen-schrieben der Bahn kommt also einer, wenn nicht zwei Bearbeitungsgänge nicht zum Ausdruck.

Die Schriebe des Watenschliffs Abb. 22 sind insofern interessant, als sie nicht nur ein Bild des rauhen Oberflächenreliefs vermitteln, das ein grober Schliff erzeugt, sondern auch die durch ein solches Verfahren recht unterschiedliche Ausprägung desselben. Die größte Rauhtiefe mißt bei beiden Profilen etwa $6,5 \mu\text{m}$. In einem Fall spannen sich flache weite Täler mit wesentlich geringeren Rauhtiefen auf kürzeren Bezugsstrecken zwischen steilen Bergen aus, im anderen beherrschen massige Berge und Rumpfebenen das Feld. Erst die langen Bezugsstrecken machen solche Verhältnisse deutlich. Die Interferenzaufnahmen führen zwar ähnliche, aber doch auch wieder etwas abgewandelte Bilder vor Augen. Die Unterschiedlichkeit solcher Grobschliffe, die normalerweise in römischer Zeit durch die nachfolgende Bearbeitung nie ganz ausgeglichen ist, führt dazu, daß im Endzustand tiefe Gräben, Niveauveränderungen, schräge Flächen und dergleichen bestehen bleiben. Nach den Interferenzen wie Tastschnitten gewinnt man – nicht nur im vorliegenden Falle – den Eindruck, daß in der römischen Zeit die auf den Grobschliff folgenden Bearbeitungsgänge zu fein gewählt wurden bzw. für unsere Begriffe zu früh abgebrochen wurden.

Aus der Gesamtbetrachtung von Interferenzerscheinung und Tastschnitten läßt sich, im Verband mit den Auflicht- bzw. Abdruckaufnahmen der Oberflächen, auch deren Entstehung umreißen. Der erste Schliff von Bahn und Waten, von dem nurmehr einzelne tiefe Grabenreste stehen blieben, hat eine zerfurchte Oberfläche geliefert. Der Charakter der Oberfläche gleicht etwa dem des Watenschliffs, allerdings wie die Breiten der erhaltenen Grabenreste zeigen, mit teilweise wenigstens erheblich größeren Rauhtiefen. Mit dem nächsten Arbeitsgang wurden die teilweise massigen Berge abgetragen, es entstanden Rohformen der Profile des Klingenschliffs (Abb. 23). Man braucht sich nur in den Profilen a und b auf Abb. 22 die aufgedruckten Mittellinien als neues Glättungsniveau zu denken, um die Urformen der Profile a/b auf Abb. 23 zu erhalten. Auf den Rumpfflächen der Berge prägen sich nun neue Spurensysteme aus; kleine Gräben zwischen Stegen und Bergen, wie dies etwa der besonders feine Watenschliff Abb. 22 a vor Augen führt. Der nächste Arbeitsgang nimmt nun weniger an Masse weg. Er greift vielmehr die vorgefundenen Formen an, ebnet oder verrundet sie. Es sind dies die feineren Auslenkungen der Interferenzstreifen auf den wellenartigen Stegen der Abb. 16 a–c; 17. Es wurde oben bereits darauf hingewiesen, daß auch diese kleinen Rauheiten (wenigstens teilweise) in einem weiteren Arbeitsgang ihrerseits nochmals abgetragen wurden (Politur). Wir hatten es also sicher mit drei, stellenweise aber mit vier Arbeitsgängen zu tun.

Oberflächen, wie die hier untersuchten, sind in der Antike allgemein üblich, wenn sie auch, je nach Werkstoff, in verschiedener Ausprägung erscheinen. Allgemein läßt sich sagen, daß – von Ausnahmen abgesehen – die Antike die Spuren der Vorbearbeitungsgänge nicht in dem Ausmaße zu entfernen trachtete wie die neuere Zeit. Das war sicherlich teilweise ein Unvermögen, teilweise auch wohl Absicht. Wo das Auge bei gewöhnlicher Betrachtung Unebenheiten nicht mehr erkennen

konnte, war dies möglich sobald man die Glanzprobe machte, d. h. das Licht spiegelnd über die Fläche gleiten ließ. Noch empfindlicher ist die Probe mit dem rasch über eine Fläche geführten Fingernagel, der Urform des Tastschnitts. Hierbei sind Rauheiten bis zu $0,1 \mu\text{m}$ bei einiger Übung, solche bis $0,5 \mu\text{m}$ ohne weiteres spürbar¹⁴. Solche Prüfverfahren sind uralte und werden auch aus dem naturvölkischen Bereich erwähnt. Steinbeile haben gelegentlich eine Oberflächengüte, deren feinste Rauheiten mit dem Interferenzverfahren nicht mehr faßbar sind, ebenso antike Edelsteine. Der Arbeitsaufwand muß unverhältnismäßig hoch gewesen sein. Für Massenartikel, wie es sicher auch unser Schwert war, kam ein solcher Aufwand nicht in Frage und wäre mit den vorhandenen Geräten wohl auch nicht erreichbar gewesen. Eine wesentliche Rolle mag dabei auch die Schwierigkeit gespielt haben, eine einigermaßen gleichmäßige Körnung der Schleif- und Poliermittel zu erreichen.

Wenn wir die Einzelergebnisse zusammenfassen und versuchen, ein Bild der Arbeitsgänge bei der Herstellung der Oberfläche unseres Schwertes und der dabei verwendeten Geräte zu entwerfen, so bleibt als unbehagliches Faktum, daß uns vorläufig die Möglichkeit der Nachprüfung an weiterem Material fehlt. Trotzdem bietet das Schwert durch die Fülle der Spuren, die ja immer nur in charakteristischer Auswahl gebracht werden konnte, selbst eine, wie ich glaube, genügend feste Grundlage zu einem solchen Unterfangen. Nachdem die Spuren gedeutet und eingeordnet waren und bereits ein Bild der Arbeitsgänge, die sich zwangsläufig aus diesen Spuren ergeben, gewonnen war, sprach der Verfasser mit alten Degenschmiedern von Solingen¹⁵. Es ergab sich das für den, der um die weit zurückreichenden Wurzeln im alten Handwerksbrauch Bescheid weiß, keineswegs überraschende Ergebnis, daß ein Solinger Schleifer um 1900, ja noch um 1920, hätte er unser Schwert schleifen und polieren sollen, kaum anders verfahren wäre als dies die römische Zeit tat.

Nachdem ein Schwert geschmiedet war, wurde es zunächst in glühendem Zustand durch Eintauchen in Öl – wobei die Flammen oft bis an die Werkstattdecke schlugen – gehärtet. Es folgte das Schleifen auf der Laufbahn eines rotierenden Schleifsteines (Sandstein) von 1,80–2,50 m Durchmesser. Dabei würde ein Schwert unserer Gestalt nur in der Längsrichtung geschliffen worden sein. Lediglich zum Abschleifen von Buckeln und des Abschlusses bei der Angel hätte man auch einmal in anderer Richtung geschliffen. Dieses Schleifen erstreckte sich nicht nur auf das Blatt, sondern auch auf die Waten und auf die Schneide, die in ihrer keilförmigen Gestalt bereits durch das Schleifen herausgeholt werden mußte. Der Schleifer mußte dabei so stehen, daß die Oberkante des rotierenden Steines etwa in Leibeshöhe lag. Er hielt das Schwert an seinen Enden fest und drückte es unter Durchbiegen auf die Laufbahn des Steines. So wurde das Schwert dem Umfang des Steines angeglichen, und es entstanden lange Schleifspuren, die ganz anderen Charakter haben als etwa die in der Achatschleiferei. Hier kann das Werkstück nicht gebogen werden, und der Stein hinterläßt nur kurze Eindrücke, da er das Werkstück ja nur

¹⁴ Vgl. Perthen a. a. O. (Anm. 3) 98.

¹⁵ Dem Schleifermeister K. Sprunkel-Neuwied und dem Herrn Geschäftsführer der Firma Eickhorn-Solingen vom Stein ist der Verfasser zu besonderem Dank verpflichtet.

am Berührungspunkt trifft. Nach diesem Schleifen, bei dem das Schwert einen Teil seiner Härte verliert, wird es durch das sog. Anlassen (oder Bläuen) erneut gehärtet. Es wird im Feuer erwärmt, eventuell auch in Wasser abgeschreckt und steht nun bereit zur weiteren Oberflächenbehandlung, die aus drei Arbeitsgängen besteht, zwei Schleifgängen und dem Polieren. Dieses Schleifen wird Pließten genannt, und man unterscheidet Grobpließten, Feinpließten und Blaupließten (Polieren). All das geschieht nun nicht mehr mit Hilfe von Schleifsteinen, sondern mit rotierenden Holzscheiben, die auf der Laufbahn eine Lederbandage tragen. Auf dieser wird mit Öl bzw. Fett (Nieren- oder Lungenfett) vermischter Schmirgel aufgetragen, der immer feinere Körnungen aufweist, je nach Arbeitsgang. Praktisch steht für jeden Arbeitsgang eine eigene Scheibe zur Verfügung, da sich der Schmirgel aus dem Leder nicht mehr restlos entfernen läßt. Leder wurde gewählt, weil es sich wegen seiner Elastizität nicht punktförmig, sondern in größerer Breite an das Werkstück anschmiegt und deshalb mit dem Schleifmittel eine größere Fläche bestreicht. Tatsächlich sind die Spuren dieser Arbeitsverfahren mehrere Millimeter lang, was man an jedem Küchen- oder Tafelmesser studieren kann. Die elastische Schleif- und Poliermittelgrundlage hatte obendrein den Vorzug, daß die feineren Arbeitsgänge auch die Täler und Hänge gröberer Vorbearbeitungsstadien noch erfassen und auch diese noch ausglätten konnten, selbst wenn sie nicht völlig beseitigt wurden. Daraus erklärt sich die Regel, alle Arbeitsgänge immer in derselben Richtung vorzunehmen.

Ein Schwert, das nicht nur ein Paradestück war, hatte eine Schneidefunktion, die es in dem blanken Zustand, in den es durch die geschilderte Behandlung gebracht wurde, nicht erfüllen konnte. Deshalb wurden die Waten angeschliffen, etwa in der Art wie das Grobpließten, und zwar schräg zur Schwertachse. Schließlich wurden noch die eigentlichen Schneiden mit einem Abziehstein (Ölstein) geschärft.

Die hier geschilderte Art der Oberflächenbehandlung eines Schwertes könnte direkt eine Darstellung der Bearbeitung des Vrsasser Schwertes sein. Aus der Analyse der Spuren der Gesamtklingenbehandlung haben wir 3–4 immer feinere Arbeitsgänge erschlossen. Der Grobschliff mit seinen langen Spuren könnte sehr wohl auf der Laufbahn eines großen rotierenden Sandsteines erfolgt sein. Die Gleichmäßigkeit und Parallelität der Spuren spricht gegen ein Abziehen mit einem Handschleifstein, der andere Spuren hinterläßt. Freilich möchte ich glauben, daß nicht die übermäßig großen Schleifsteine wie später benutzt wurden. Ein Stein mit einem Durchmesser von etwa 1 m bis höchstens 1,5 m mag den gleichen Effekt erzielt haben. Die Parallelität der feineren Spuren, ihr Vorkommen auch in den Tälern und an den Flanken der vom Grobschleifen herrührenden und nicht weggearbeiteten Stege und Berge, spricht ebenfalls für eine mechanische und zugleich elastisch sich anpressende Schleifvorrichtung. Was liegt näher als auch hier an lederbesetzte Scheiben zu denken. Zur Gewißheit wird dies durch den Watenschliff. Bei der leichten Wölbung der Wate konnte kein rotierender Schleifstein und kein Abziehstein diese langen und ihrer Tiefe über längere Strecken gleichbleibenden Spuren erzeugen. Hier kann nur ein breit sich andrückender Lederbesatz als Schleifmittelträger angenommen werden. Der Schneidenschliff, und dafür sprechen die etwas wirren Spuren, ist dann mit dem Abziehstein gemacht. Mit der, wie ich glaube, begründeten Annahme der Verwendung lederbandagierter Schleifscheiben beim Pließ-

ten unseres Schwertes wird die Frage nach dem Schleifmittel akut. Plinius erwähnt den Naxoschmirgel zum Sägen von Marmor und zur Bearbeitung von Edelsteinen¹⁶. Römische Glasgravuren (etwa die Herstellung der Diatrete) sind ohne Benutzung dieses bis in die neueste Zeit unentbehrlichen Schleifmittels, das erst durch den Elektrokorund verdrängt wurde, nicht denkbar. Die Fundstellen lagen auf Naxos und einigen benachbarten Inseln sowie in Kleinasien¹⁷. Es wäre von brennendem Interesse, gerade auf Naxos antike Gewinnungsstätten des Schmirgels aufzufinden und das Ausmaß des antiken Abbaus schätzen zu lernen. Die Erwähnung von Naxium zum Marmorsägen durch Plinius braucht nun nicht zu bedeuten, daß Naxoschmirgel wie in späterer Zeit vorwiegend in fester Form gewonnen und zerkleinert worden wäre. Das wäre bei dem enormen Bedarf an Sägesand beim Marmorsägen eine Verschwendung an wertvollstem Material gewesen, wie sie sich die Neuzeit nicht geleistet hat. Naturschmirgel ist ein Gemenge von Korund (Mohshärte 9) mit Quarzsand, Hämatit usw. in wechselnden Prozentsätzen. Die neuere Zeit hat den Schmirgel gemahlen und aus dem Pulver hauptsächlich den Korund gewonnen und ihn in immer feineren Mahl- und Siebgängen in den verschiedensten Körnungen in den Handel gebracht. Die Gewinnung festen Schmirgelsteines für Handschleifsteine dürfte in der Antike durchaus eine nicht unbedeutende Rolle gespielt haben, vielleicht auch das Zerstoßen zu Schleifpulver. Wahrscheinlicher ist, daß man sich in großem Ausmaß natürlicher Verwitterungsprodukte bediente. Es muß in den Flüssen und Bächen auf Naxos – ebenso an den anderen Fundstellen des Schmirgels – ganze Schmitzen und Bänke von fast reinem Korund, neben solchen in denen Korund und Quarzsand in wechselnder Mischung auftrat, gegeben haben. Je nach Länge des Flußtransportes und unter der Einwirkung der natürlichen Aussiebung lagerte sich das Material dann auch in verschiedener Korngröße ab. Die Ausbeutung solcher Lagerstätten mag in der Antike eine große Rolle gespielt haben. Es lag dann Schleifmaterial der verschiedensten Körnungen und Mischungen für die einzelnen Verwendungszwecke vor. Die Kleinheit von Naxos spricht nicht gegen ein solches Vorgehen, da es sich um eine überall auftretende Erscheinung der Verwitterung und des Flußtransportes handelt. Freilich wird die Aussiebung immer feinerer Korngrößen nicht so vollkommen gewesen sein wie in langen Flußläufen. Schließlich wäre bei der Gewinnung auch an primitive Sinkschwemmverfahren zu denken. Nur mit Bedenken wurden diese langen theoretischen Betrachtungen hier eingeflochten. Die karge Erwähnung des Naxoschmirgels in der Antike kann seine Bedeutung nicht umreißen. In den Großmanufakturen von Eisenwaren – speziell in den Waffenwerkstätten – hat er sicherlich ebenso eine Rolle gespielt wie in der Edelsteinschleiferei und in der Glasgravur. Unser Schwert ist in einer gut ausgerüsteten, leistungsfähigen Werkstätte von guten Fachleuten hergestellt, das beweisen die metallurgischen Untersuchungen ebenso wie die Oberflächenprüfung. Das entspricht auch dem, was wir über zentrale spätantike Waffenschmieden wissen.

Der Verfasser ist sich darüber im klaren, daß seine Darlegungen und Deutungen zu

¹⁶ Plin. nat. hist. 36, 53; 37, 109; vgl. auch Schröder a. a. O. (Anm. 1) 10 f.

¹⁷ B. Dammer, Die nutzbaren Mineralien 2 (1967) 263 ff.

Widerspruch führen müssen. Er hofft, in größerer Breite seine bisherigen Untersuchungen zu antiken Schleif- und Polierverfahren auch an anderen Werkstoffen vorlegen zu können, um die hier niedergelegten Ansichten durch den Einbau in das Gesamtgebiet dieser antiken Techniken fester zu verankern.