

Archäometrische Untersuchungen der Kupfer- und Bronzeartefakte des Hortfundes von Nebra

Inhaltsverzeichnis

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	2
<u>Abbildungsverzeichnis</u>	3
<u>Tabellenverzeichnis</u>	5
<u>1 Einleitung</u>	6
<u>2 Archäometrische Untersuchungsmethoden</u>	8
2.1 Probenahme	8
2.1.1 Beifunde: Lochbohrung	8
2.1.2 Himmelsscheibe: Funkenerosives Verfahren	10
2.1.2.1 Vorversuche an der Probenprobe	12
2.1.2.2 Probenahme am Original	16
2.1.3 Himmelsscheibe: Lochbohrung	19
2.2 Einige theoretische und praktische Grundlagen der ange-wandten archäometrischen Untersuchungsmethoden	22
2.2.1 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)	22
2.2.2 Neutronenaktivierungsanalyse (NAA)	23
2.2.3 Multikollektor-Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (MC- ICP-MS)	24
2.2.4 Metallkundliche Untersuchungen	25
<u>3 Ergebnisse, Auswertung und Interpretation</u>	30
<u>4 Zusammenfassung und Ausblick</u>	62
<u>Literaturverzeichnis</u>	64
<u>Anhang</u>	67
<u>Abbildungsverzeichnis</u>	68
<u>Tabellenverzeichnis</u>	69

Abbildungsverzeichnis

<u>Abbildung 1-1</u>	<u>ungereinigte Himmelsscheibe von Nebra (zur Verfügung gestellt vom Landesamt für Vorgeschichte Sachsen-Anhalt)</u>	6
<u>Abbildung 1-2</u>	<u>ungereinigte Beifunde der Himmelsscheibe von Nebra (zur Verfügung gestellt vom Landesamt für Vorgeschichte Sachsen-Anhalt)</u>	6
<u>Abbildung 3-1</u>	<u>Prinzipdarstellung eines Niets</u>	31
<u>Abbildung 3-2</u>	<u>doppellogarithmisches Diagramm der provenienzspezifischen Elemente Nickel gegen Silber (die verwendete Symbolgröße entspricht in etwa der des Messergebnisses inklusive $\pm 10\%$ zufälliger Messfehler)</u>	34
<u>Abbildung 3-3</u>	<u>doppellogarithmisches Diagramm der provenienz-/herstellungsspezifischen sowie chemisch verwandten Elemente Antimon gegen Arsen (die verwendete Symbolgröße entspricht in etwa der des Messergebnisses inklusive $\pm 10\%$ zufälliger Messfehler)</u>	35
<u>Abbildung 3-4</u>	<u>Häufigkeitsfaktoren der analytisch ähnlichen Vergleichsfunde bezüglich deren Fundregionen</u>	38
<u>Abbildung 3-5</u>	<u>Häufigkeitsfaktoren der lagerstättenähnlichen Vergleichsfunde bezüglich deren Fundregionen</u>	38
<u>Abbildung 3-6</u>	<u>Häufigkeitsdiagramm der Typen nach dem Typenschlüssel SAM (KRAUSE im Druck b, 8ff.) von den analytisch ähnlichen Vergleichsfunden</u>	39
<u>Abbildung 3-7</u>	<u>Kartierung der analytisch (77 Fundorte kartiert)- und lagerstätten-ähnlichen (421 Fundorte kartiert) Vergleichsfunde von der Himmelsscheibe von Nebra; je nach Symbolgröße handelt es sich um 1, 5 oder um 10 Vergleichsfunde von einem Fundort (Grundkarte von Dr. STEFAN SCHWENZER)</u>	41
<u>Abbildung 3-8</u>	<u>doppellogarithmisches Diagramm der provenienzspezifischen und chemisch verwandten Spurenelemente Gold gegen Silber (die verwendete Symbolgröße entspricht in etwa der des Messergebnisses inklusive ± 2 bis 5% zufälliger Messfehler)</u>	43
<u>Abbildung 3-9</u>	<u>Dreiisotopendiagramm $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ gegen $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (die verwendete Symbolgröße entspricht in etwa der des Messergebnisses inklusive $\pm 0,03\%$ zufälliger Messfehler)</u>	45
<u>Abbildung 3-10</u>	<u>Dreiisotopendiagramm $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ gegen $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (die verwendete Symbolgröße entspricht in etwa der des Messergebnisses inklusive $\pm 0,03\%$ zufälliger Messfehler)</u>	46
<u>Abbildung 3-11</u>	<u>Zustandsschaubild Kupfer-Zinn (SCOTT 1991, 122, Figure 198)</u>	48
<u>Abbildung 3-12</u>	<u>Übersicht des Schliffes der funkenerosiv aus der Himmelsscheibe von Nebra herausgetrennten Probe (FG-020725) vor der Bedampfung mit Kohlenstoff (Hellfeldaufnahme mit Neophot 30, spiegelverkehrt)</u>	49
<u>Abbildung 3-13</u>	<u>FG-020725 mit Glühzwillingen und lichtmikroskopisch homogenem, einphasigem, polygonalem Gefüge vor der Bedampfung mit Kohlenstoff (Hellfeldaufnahme mit Neophot 30, spiegelverkehrt)</u>	50
<u>Abbildung 3-14</u>	<u>Entstehung der unterschiedlichen Merkmale des einphasigen Metallgefüges kfz-Mischkristalle (SCOTT 1991, 8, Figure 12); die Zuordnung des mit der Himmelsscheibe von Nebra (Abbildung 3-13) vergleichbaren Gefüges erfolgt durch die rote Markierung</u>	51
<u>Abbildung 3-15</u>	<u>Gefügemerkmale kfz-Mischkristalle (SCOTT 1991, 7, Figure 11a-f) 1: dendritisches Gussgefüge mit Zonenmischkristallen 2: kaltverformte Dendriten 3: homogenisiertes Gefüge mit hexagonalen Körnern 4: kaltverformtes Gefüge mit gestreckten Körnern 5: rekristallisiertes Gefüge mit Glühzwillingen 6: kaltverformtes Gefüge mit verformten Glühzwillingen und Gleitlinien</u>	52
<u>Abbildung 3-16</u>	<u>FG-020725 parallel zur Oberfläche langgestreckte, verformte Einschlüsse vor der Bedampfung mit Kohlenstoff (Hellfeldaufnahme mit Neophot 30, mit Filter zur Kontrastverstärkung, spiegelverkehrt)</u>	53
<u>Abbildung 3-17</u>	<u>FG-020725 Gefüge mit verformten Einschlüssen vor der Bedampfung mit Kohlenstoff (Hellfeldaufnahme mit Neophot 30, spiegelverkehrt)</u>	54
<u>Abbildung 3-18</u>	<u>FG-020725 Einschluss (Rückstreuelektronenabbildung mit REM aufgenommen)</u>	54
<u>Abbildung 3-19</u>	<u>Einschlüsse im Rückstreuelektronenmodus des REM aufgenommen inklusive Lage der vorgenommenen Punktanalyse (eingescannter Bildschirmausdruck mit 600 dpi)</u>	55
<u>Abbildung 3-20</u>	<u>Randschicht im Rückstreuelektronenmodus, wodurch die unterschiedlichen Phasen deutlich hervortreten (eingescannter Bildschirmausdruck mit 600 dpi)</u>	56
<u>Abbildung 3-21</u>	<u>Linienanalyse 1 mit $1\text{ }\mu\text{m}$ Schrittweite (dargestellt sind 600 Analysenpunkte)</u>	57
<u>Abbildung 3-22</u>	<u>Linienanalyse 3 mit $1\text{ }\mu\text{m}$ Schrittweite (dargestellt sind 400 Messpunkte) Aufnahmen mit Nikon eclipsen ME 600 nach Bedampfung mit Kohlenstoff (eingescannt mit 800 ppi) obere Aufnahme (polarisiertes Licht) untere Aufnahme (Hellfeld) (Maßstäbe stimmen überein)</u>	59

Abbildung 3-23 Linienanalyse 2 mit 0,5 μm Schrittweite (dargestellt sind 741 Messpunkte) Aufnahmen mit Neophot 30 (vor Bedampfung mit Kohlenstoff, seitenverkehrt) und mit Nikon eclipsen ME 600 (nach Bedampfung mit Kohlenstoff) obere Aufnahme (Hellfeld) untere Aufnahme (polarisiertes Licht) (Maßstäbe stimmen überein) _____ 60

Tabellenverzeichnis

<u>Tabelle 3-1</u>	<i>Zusammenstellung der Elemente – geordnet bezüglich ihrer Aussagekraft und Nutzung in der Archäometrie, vereinfacht nach PERNICKA (1999, 170, Table 1)</i>	33
<u>Tabelle 3-2</u>	<i>An- und Abreicherungs faktoren berechnet mit den ausreißerunempfindlichen Medianen aus Tabelle A-3-2 im Anhang</i>	36
<u>Tabelle 3-3</u>	<i>mit ausreißerunempfindlichen Medianen (Tabelle A-3-2 im Anhang) berechnete Suchintervallbreiten für die Stuttgarter Analysendatenbank</i>	37

1 Einleitung

„Teller von Nebra“, „Edeldiskus“, „Bronzediskus“, „Wunderdiskus“, „Prachtartefakt“, „Weltsensation“, „Himmelsatlas“, „ein Jahrhundertfund“, „Sternenscheibe von Sangerhausen“ oder „Sonnenscheibe von Sangerhausen“ sind einige der seit etwas über einem Jahr in den Medien geäußerten Umschreibungen die Himmelsscheibe von Nebra betreffend.

Gemeinsam mit den unter dem Begriff Beifunden (*Abbildung 1-2*) zusammengefassten Beilen, Schwertern, Armspiralen und dem Meißel bildet die mit Goldapplikationen in Form von Himmelskörpern verzierte Scheibe (*Abbildung 1-1*) den aus einer Raubgrabung stammenden bronzezeitlichen Hortfund von Nebra. Das kupferfarbene Metall dieser Artefakte wurde im Institut für Archäometrie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg naturwissenschaftlich untersucht.

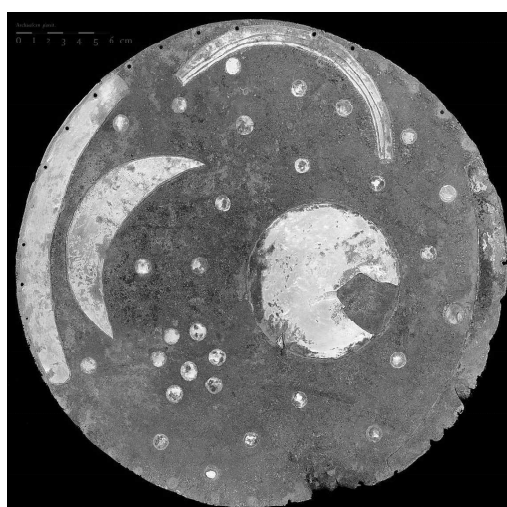


Abbildung 1-1 ungereinigte Himmelsscheibe von Nebra (zur Verfügung gestellt vom Landesamt für Vorgeschichte Sachsen-Anhalt)



Abbildung 1-2 ungereinigte Beifunde der Himmelsscheibe von Nebra (zur Verfügung gestellt vom Landesamt für Vorgeschichte Sachsen-Anhalt)

Nachfolgend stichpunktartig umrissene, primäre Fragestellungen sollten mittels des im Vorfeld konzipierten Ablaufplans (in *Abbildung A-1-1* im Anhang), der sowohl die Heran-

gehensweise als auch die dafür ausgewählten Untersuchungsmethoden (Kapitel 2.2) wiedergibt, beantwortet werden:

- Sind die Nebraer Artefakte chemisch und isotopisch einheitlich oder uneinheitlich? Welche Aussagen über die potentielle Provenienz der verwendeten Rohstoffe lassen sich davon ableiten?
- Ist eine mit metallkundlichen Untersuchungsverfahren heute noch fassbare, absichtliche Verzinnung auf der Himmelsscheibe von Nebra zu konstatieren?
- Welche herstellungsrelevanten Erkenntnisse können aus dem Gefüge der Himmelsscheibe von Nebra gewonnen werden?

Doch bevor diese Fragen beantwortet werden konnten, mussten die Messdaten an unverfälschtem Probenmaterial ermittelt werden. Bei der mit einer grünen Schicht überzogenen Nebraer Scheibe, die infolge ihrer Einzigartigkeit Informationen aus derartigen Analysen zwingend erfordert, gestaltete sich die Findung der geeigneten und notwendigen Probenahme besonders schwierig. Hervorzuheben ist die gefundene technologische Umsetzung der Probenahme, die als richtungsweisend für derartige Problemstellungen benannt werden kann. Die dem Objekt gebührende äußerst vorsichtige Vorgehensweise bei der Auswahl der Probenahmetechnik sowie die im Vorfeld an den sogenannten Probenproben¹ durchgeführten Vorversuche waren ebenso Bestandteil dieser Arbeit (Kapitel 2.1).

Daneben gab es eine Vielzahl weiterer Hürden bei der praktischen Durchführung der archäometrischen Untersuchungen zu überwinden, deren detaillierte Lösungsbeschreibungen den entsprechenden Unterpunkten des Kapitels 2.2 entnommen werden können.

Im Kapitel 3 sind die aus den archäometrischen Untersuchungen erhaltenen Ergebnisse, Auswertungen sowie deren Interpretationsansätze in chronologischer Folge zu finden. Bedeutsam dabei sind die erstellten Kartierungen, die erstmals die archäometrischen Ergebnisse des Hortfundes von Nebra mit umfangreichen geografischen und archäologischen Daten verbinden.

Die Zusammenfassung wird die wichtigsten Erkenntnisse nochmals aufgreifen und mit einem Ausblick diesen Artikel abschließen (Kapitel 4).

¹ Dieser Begriff wurde eingeführt, um Verwechslungen mit den eigentlichen Artefaktproben zu verhindern.

2 Archäometrische Untersuchungsmethoden

Archäometrische Untersuchungsmethoden können zerstörungsfrei oder zerstörend sein. Jede dieser Methoden hat ihre speziellen Vor- und Nachteile. Letztgenannte lassen sich unter gegebenen Umständen rechtfertigen. Bevor die archäometrischen Untersuchungsmethoden vorgestellt und die Durchführung der Messungen beschrieben werden, soll die Probenahme im Mittelpunkt der Betrachtung stehen.

Nachfolgend aufgezählte Faktoren tragen zur Auswahl der Analysemethoden bei: Ziele, Forschungsrelevanz und die sich daraus ableitende Notwendigkeit, geeignetes Prinzip, Nachweisgrenzen, Kosten, Verfügbarkeit, Probenahme und -vorbereitung usw. (zum Teil aus PERNICKA 1989, 141).

2.1 Probenahme

Die Probenahme von den zu untersuchenden Artefakten ist dann zwingend notwendig, wenn zum einen nicht zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden angewendet werden müssen, um beispielsweise Aussagen zur Provenienz zu erhalten². Der heutige Stand der Technik verlangt für derartige Analysen, um an das obige Beispiel anzuknüpfen, eine in gelöster Form vorliegende Probe, die bei der Untersuchung vollständig verbraucht wird. Zum anderen müssen Proben entnommen werden, wenn das Untersuchungsobjekt von nichtrepräsentativen Oberflächenschichten, von Korrosionsschichten zum Beispiel, überzogen ist. Ziel ist es, das innere, nicht durch äußere Umwelteinflüsse veränderte Metall zu analysieren. Des Weiteren interessiert bei der Himmelsscheibe eine eventuell heute noch nachweisbare, prähistorische Oberflächenbehandlung, speziell die Verzinnung.

Die Probenahme kann somit als „ein Zwischenschritt, allerdings ein sehr wichtiger“ (PERNICKA 1989, 138) betrachtet werden, um die Fragen mittels geeigneter Analysemethoden zu klären.

Die durch jede Probenahme erfolgte Objektveränderung muss mit dem ermöglichten Informationsgewinn zu rechtfertigen sein. Ist das der Fall, muss die Probenahmetechnik in Abhängigkeit von der Artefaktbeschaffenheit festgelegt werden. Außerdem darf infolge der Probenahme, sei es Bohrung oder Heraustrennen, keine Veränderung des Zustandes der Probe erfolgen. Derartige verändernde Faktoren können Wärmeentwicklung, Kontamination oder Verformung sein (HUNGER/VETTERS 1995, 88). Deswegen waren Versuchsprobenahmen an Nachgüssen (Probenproben) im Voraus unumgänglich.

Diese hier vorangestellten Prinzipien bildeten die Grundlage für die Vorgehensweise der Probenahme. Nachfolgend sollen die unterschiedlichen eingesetzten Techniken zur Probengewinnung an den Beifunden und an der Himmelsscheibe explizit erläutert werden.

2.1.1 Beifunde: Lochbohrung

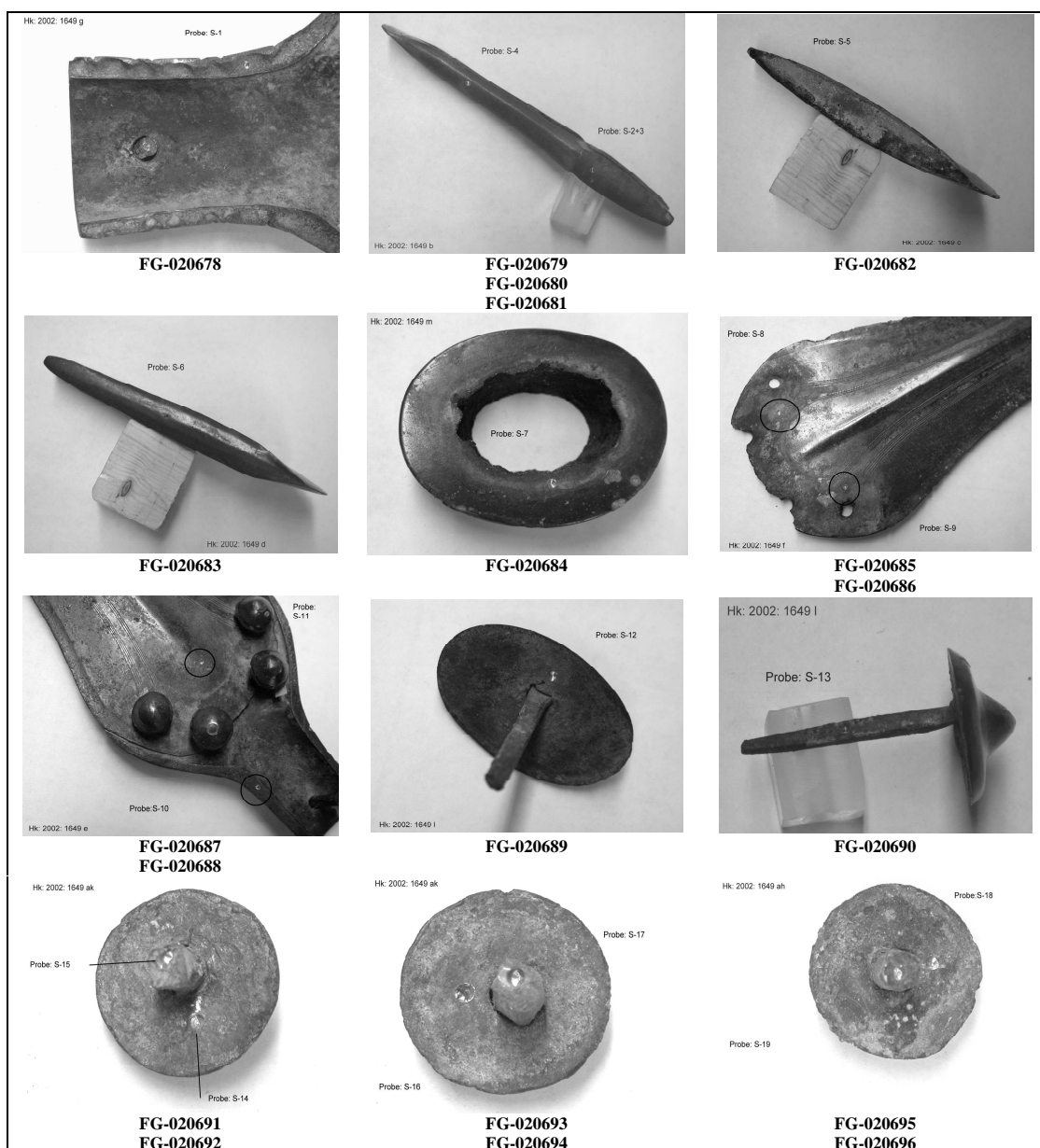
Die Beprobung der Beifunde erfolgte mittels der Lochbohrung, eine mittlerweile routinemäßige Probenahmetechnik unter Zuhilfenahme des Bohrers, um die gewünschten

² Auf dimensional beschränkte Analysenvoraussetzungen, wie beispielsweise zu kleine Probenkammern, wird in diesem Rahmen nicht eingegangen; sie wären mittels aufwendiger Konstruktionen möglich und in Anbetracht der Einzigartigkeit des zu untersuchenden Fundes gerechtfertigt gewesen.

repräsentativen Proben – Bohrspäne des originalen Metalls³ – mit geringem Zeitaufwand zu erhalten.

Es mussten verschiedene Kriterien für die Entscheidung der Probenahmestelle beachtet werden. Zunächst war wichtig, dass die ausgewählte Stelle von den Restauratoren problemlos wieder geschlossen werden kann, um den Gesamteindruck des Artefaktes nicht zu stören. Ferner sollte sie nicht, wenn irgendwie vermeidbar, auf der Schauseite des Objektes angebracht werden. Die benutzte Größe des Chrom-Vanadium-Stahlbohrers richtete sich nach der Beschaffenheit der Objekte. In diesem Fall wurden Bohrer mit einem Durchmesser von 1,5 mm bzw. 1,2 mm benutzt.

Die makroskopische Dokumentation der Probenahmestellen und Endansichten ist in **Abbildung 2-1** zu finden. Das Aussehen der Artefakte wurde vor und nach der Probenahme digital mit der Kamera Nikon COOLPX 990 festgehalten.



³ Die Probenmengen können in **Tabelle A-2-1** im Anhang nachgeschlagen werden.

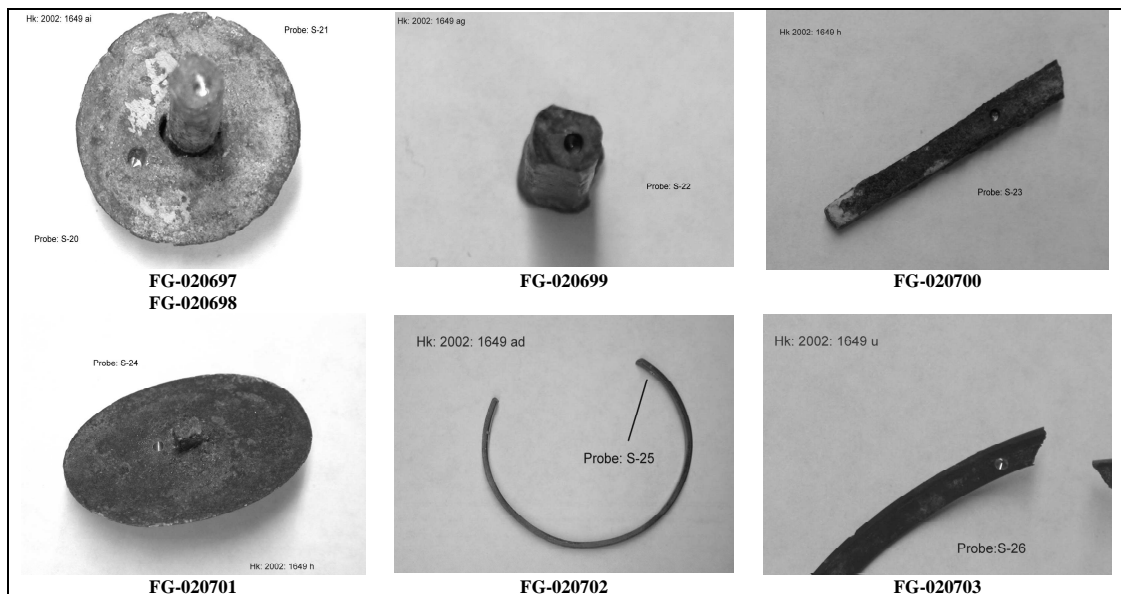


Abbildung 2-1 makroskopische Dokumentation von den Probenahmestellen der Artefakte
(zur Verfügung gestellt vom Landesamt für Vorgeschichte Sachsen-Anhalt)

Die aufgezählten Kriterien zeigen, wie sehr die Notwendigkeit besteht, eine enge Zusammenarbeit des Archäometrikers mit dem Landesarchäologen und dem Restaurator anzustreben, um so den höchstmöglichen Informationsgewinn bei geringster Objektbeschädigung zu erzielen.

Besondere Sorgfalt ist auch nach der Durchführung der Bohrung notwendig, dass heißt Austausch oder peinlichste Säuberung der Bohrer, um eine Querkontamination zu verhindern.

Bei einer Probenahme mit einem Bohrer muss immer die Zusammensetzung des Bohrermaterials bekannt sein, denn es ist im Allgemeinen eine Kontamination, die von dem Bohrer kommt, nicht vollständig auszuschließen. Ist die Zusammensetzung des Bohrermaterials bekannt, können potentielle Abriebe besser abgeschätzt und fehlerhafte Ergebnisse in der Analyse korrigiert werden. Dennoch sollte immer darauf geachtet werden, dass nicht gerade die Elemente das Legierungsmetall des Bohrers bilden, die auch bei den Analysen von höchster Bedeutung sind. Insbesondere sind dabei an Spuren- bzw. Superspurenelemente zu denken.

2.1.2 Himmelsscheibe: Funkenerosives Verfahren

Die Einmaligkeit der Himmelsscheibe und die sich damit ergebende Fülle von Fragen an die Himmelsscheibe veranlassten eine vorausgehende Recherche bezüglich möglicher Probenahmetechniken, um auf die schonendste Art und Weise eine zumindest teilweise „reversible“ Probe der Himmelsscheibe zu entnehmen. Mit „reversibler“ Probe ist gemeint, dass sich die entnommene Probe mit vorzugsweise quadratischer Probenform, nach der Durchführung der in Kapitel 2.2 aufgezählten Analysen restauratorisch wieder in die Himmelsscheibe einfügen lässt.

Die Notwendigkeit für eine derartige Probenahme ist bereits im Punkt 2.1 erläutert worden. Weitere Gründe, die für diese Vorgehensweise sprechen, sind neben dem Wiedereinfügen der Probe in die Himmelsscheibe, die Wiederherstellung des geisteswissenschaftlichen (archäologisch, ästhetisch, künstlerisch) und naturwissenschaftlichen (analytisch, technisch u.a.) Gesamteindrucks. Natürlich wäre auch eine „künstliche“ Materialergänzung

möglich gewesen. In dem hier vorliegenden Fall ist eine materialehrliche, also die Wiedereinfügung der originalen Probe gegeben. Des Weiteren ist es denkbar, dass die herausgetrennte Scheibenprobe nach Bedarf jederzeit wieder fachmännisch entnommen und für zukünftig weitere mögliche Untersuchungen genutzt wird. Besondere Bedeutung hat auch der Schnittverlust, der bei jeder Probenahme nicht zu verhindern, aber in Abhängigkeit von der Probenahmetechnik deutlich minimierbar ist. Zusätzlich entstehen bei einer quadratischen Probenform vier Schnittflächen, an denen Lochbohrungen (für Neutronenaktivierungsanalyse usw.) durchgeführt werden können, ohne dass auf der Schauseite sichtbare Bohrlöcher entstünden, die eine schwierigere Restauration als das Wiedereinsetzen der quadratischen Probe bedeuten würden⁴. Hinzu kommt die Möglichkeit, eine Schnittfläche für metallkundliche Untersuchungen zu nutzen.

Nach der Durchführung unterschiedlicher Trennverfahren, beispielsweise mittels feinen Laubsägeblättern (0,3 mm breit; 0,7 mm tief) oder konventionellem Sägedraht (2,2 mm im Durchmesser, 300 mm lang) sowie Diamantdrahtsägen an Versuchsgüssen, und diversen Recherchen erwies sich das funkenerosive Verfahren als das geeignetste. Gründe dafür sind, dass die Probe weder verformt noch verschmutzt und die sich bei dem Vorgang entwickelnde Wärme sofort durch einen ständigen, zu regulierenden Wasserstrahl (Dielektrikum) minimiert wird. Dadurch ist gewährleistet, dass infolge des durchgeführten Trennverfahrens der Zustand der Probe nicht verfälscht wird (HUNGER/VETTERS 1995, 88). Eine Probengröße von 0,5 x 0,5 cm ist problemlos mit präzisen Schnitten herauszutrennen. Computergestützt erfolgt die Einprogrammierung des Trennschnittverlaufes im Voraus. Nicht unerwähnt darf der minimale Schnittverlust bleiben, der aufgrund des geringen Drahtdurchmessers (0,2 mm, Trennschnitt 0,3 mm breit) erreicht wird. Letztgenannter Grund sowie der scharfe Schnitt trugen erheblich dazu bei, sich für diese Methode zu entscheiden.

Nach DIN 8580 und DIN 8590 zählt die Funkenerosion, auch als Elektroerosion oder EDM (engl. **E**lectrical **D**ischarge **M**achining) bekannt, zu den Abtragenden Fertigungsverfahren.

Der Hauptunterschied zu den spanenden Verfahren (u.a. Sägen) ist, dass es bei den abtragenden Verfahren keine Schnittkräfte gibt. Es laufen andere physikalische Prozesse ab, die nachfolgend kurz erläutert werden sollen (PEROVITZ 2000, Vorwort): Bevor das funkenerosive Abtragen zum Einsatz kommen kann, muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass das Objekt, von welchem Substanz abgetragen werden soll, aus elektrisch leitendem Material besteht. Kein Problem stellt dies bei metallischen, nicht korrodierten Werkstoffen dar. Dagegen müssen Werkstoffe mit einer Korrosionsschicht entlang der vorgesehenen Trennlinie von dieser Schicht befreit werden, damit die elektrische Leitfähigkeit gewährleistet ist und damit diese Trennmethode angewendet werden kann. Infolge periodischer, zeitlich voneinander getrennter elektrischer Funkenentladungen zwischen zwei Stromleitern, der Werkstück- (zu bearbeitendes Objekt) und der Werkzeug-Elektrode, wird dann das Werkstück bearbeitet, d.h. abgetragen. Notwendig dafür ist ein Arbeitsmedium, da beim Erodiervorgang an der Entladungsstelle Temperaturen über dem Siedepunkt des Werkstoffes entstehen und das erodierte Material abtransportiert werden muss. Als Arbeitsmedium wird Dielektrikum, ein elektrisch nichtleitendes Wirkmittel, genutzt, welches entionisiertes Wasser oder Raffinationen von Mineralölen sein kann.

Die Kenngrößen einer Entladung, wie Impulsdauer, Entladestrom, Pausendauer usw., sind je nach Anwendung variierbar, um ein Optimum an Abtrag zu erreichen. Es gibt unterschiedliche funkenerosive Bearbeitungsarten. In dieser Arbeit wird auf das verwendete Verfahren, das Schneiden mit einer Drahtelektrode, näher eingegangen. Letztgenanntes zeichnet sich durch eine kurze Impulsdauer und lange Pausendauer aus. (PEROVITZ 2000; CHARMILLES TECHNOLOGIES 1992)

⁴ Mündliche Mitteilung von CHRISTIAN-HEINRICH WUNDERLICH.

2.1.2.1.1 Vorversuche an der Probenprobe

Wie bereits einleitend erwähnt, wurden alle an der Himmelsscheibe durchgeführten Maßnahmen zuvor an Versuchsgüssen erprobt, um nach der theoretischen auch zusätzlich die praktische Durchführung mindestens einmal im Voraus zu durchlaufen. Diese Probegüsse aus Kupfer-Zinn-Legierungen wurden mit variierenden Zinngehalten (zwischen 2,5 bis 8 Masseprozent Zinn) angesetzt, da der genaue Wert des Zinngehaltes in der Himmelsscheibe erst nach der Probenahme ermittelt werden konnte. **Abbildung 2-2** zeigt eine derartige Probenprobe, welche zusätzlich noch mit einer patinaähnlichen Schicht⁵ versehen wurde, um dem Original so nahe wie nur möglich zu kommen.

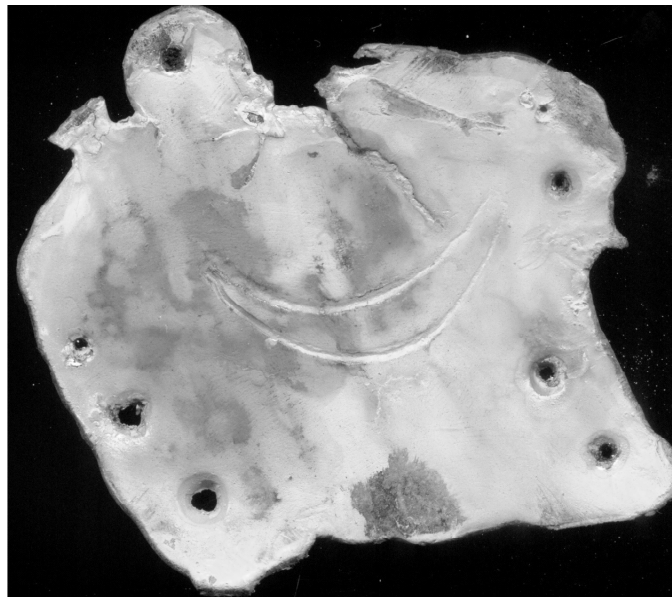


Abbildung 2-2 *Probenprobe (Archäoscan: eingescannt mit 600 dpi) (zur Verfügung gestellt vom Landesamt für Vorgeschichte Sachsen-Anhalt)*

Am 05.08.2002 fand die Probenahme an den besagten Versuchsgüssen im Forschungszentrum Rossendorf statt. Zur Probenahme mittels der Funkenerosion diente das Gerät „ROBOFIL 310 CHARMILLES TECHNOLOGIES“, eine Drahterodiermaschine.

Bei der genutzten beweglichen Werkzeugelektrode handelt es sich um einen legierten Kupferdraht (Schichtkupfer oder Messing), der in verschiedenen Größen erhältlich ist. Durch geeignete Programmierungen können mittels dieser Bearbeitungselektrode gewünschte Bahnen in das Werkstück geschnitten werden. Unterschiedliche Formen, sogar konische, wozu ein geeigneter Draht notwendig ist, lassen sich damit herstellen. Voraussetzung für den Bearbeitungsbeginn ist ein sogenanntes Startloch, welches bei Nichtvorhandensein durch eine Bohrung im Werkstück realisiert werden kann. Alternativ kann die Bearbeitung auch von der Kante des Werkstückes aus erfolgen. Während des gesamten Prozesses gibt es keinen mechanischen Kontakt zwischen beiden Elektroden, also berührungsfrei.

⁵ Diese Patinapaste ist ein Gemisch aus Malachit und Paraloid, welches auf dem Versuchsguss aufgebracht wurde. Paraloid wurde in diesem Falle als Bindemittel für synthetischen Malachit, ein OH-gruppenführendes Kupferkarbonat, benutzt. Der Handelsname ist Paraloid B72 der Firma ROEM. Chemisch gesehen ist Paraloid ein Polymethylmethacrylat.

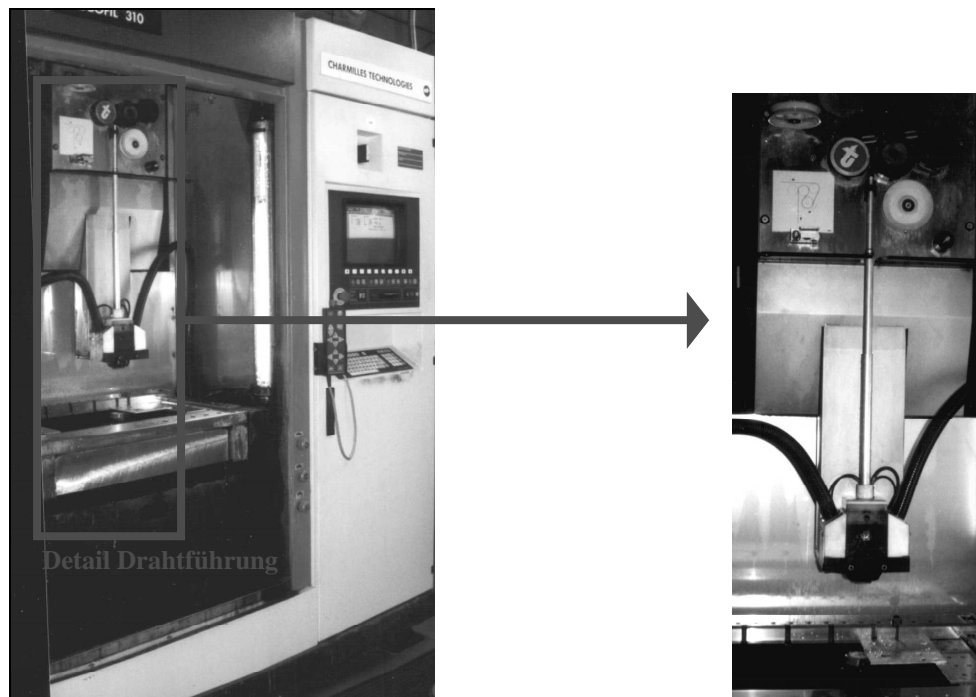


Abbildung 2-3 Drahterodiermaschine vom Typ „ROBOFIL 310 CHARMILLES TECHNOLOGIES“

Die Drahterodiermaschine funktioniert wie das eben beschriebene Schema. Eine Besonderheit dieser Maschine ist die über ein Führungssystem fixierte automatisierte Drahtführung. Eine Drahtrolle sorgt für ständigen Nachschub an Erodierdraht, der während der Prozedur verbraucht wird. Zudem ist diese Rolle unter ständiger Beobachtung des Maschinenführers, falls ein Drahtrollenwechsel vonnöten sein sollte. Drahtumlenkung und Spannrollen sorgen für die erforderliche Drahtführung (**Abbildung 2-3**).

Protokollarisch wird nachfolgend der Ablauf der funkenerosiven Probenahme an der Probenprobe erläutert. Der Versuchsguss (**Abbildung 2-2**) wurde in das Gerät eingespannt und geerdet. Anschließend führte der Maschinenführer den Draht mit einem Durchmesser von 0,25 mm heran. Insgesamt wurden zwei Proben genommen: die eine vom Rand aus, die andere beginnend an einer Lochbohrung.

Bei der Randbeprobung schlug der erste Versuch, einen Kontakt herbeizuführen, aufgrund zu geringer Leitfähigkeit der Probe fehl. Ursache war hierfür, dass die metallene Probenprobe mit einer künstlichen, nichtleitenden Patina umhüllt war. Diese Malachit-Paraloid-Paste wurde an einer Stelle mit einem Messer abgekratzt. Ein erneuter Versuch, Kontakt herzustellen, gelang. Ein ständiger Wasserstrahl, dessen Druck eingestellt und auch während des Abtrages verändert werden kann (variiert zwischen 1 bis 10 bar), dient als Arbeitsmedium. Jeder Schnitt, der benötigt wurde, um eine 0,5 x 0,5 cm große Probe herauszutrennen, wurde vorher einzeln in den Computer eingegeben (Schnittlänge und Richtung). Der Schnitt an sich dauerte einige Minuten. Ein Problem bei der Abtrennung solch kleiner Probenobjekte ist, dass der hohe Druck des Wasserstrahls die Probe irgendwohin katapultieren könnte – eventuell unauffindbar. Deswegen wurde das herauszutrennende Stück nach dem vorletzten Schnitt mit einem acetonlöslichen Schnellkleber an der restlichen Probenprobe befestigt. Dazu musste die Maschine angehalten werden. Nach der Probenahme ist eine gründliche Reinigung der Probe, um überflüssiges Dielektrikum zu entfernen, natürlich erforderlich. In dem hier vorliegenden Anwendungsfall wurde die Probe anschließend mit Pressluft getrocknet.

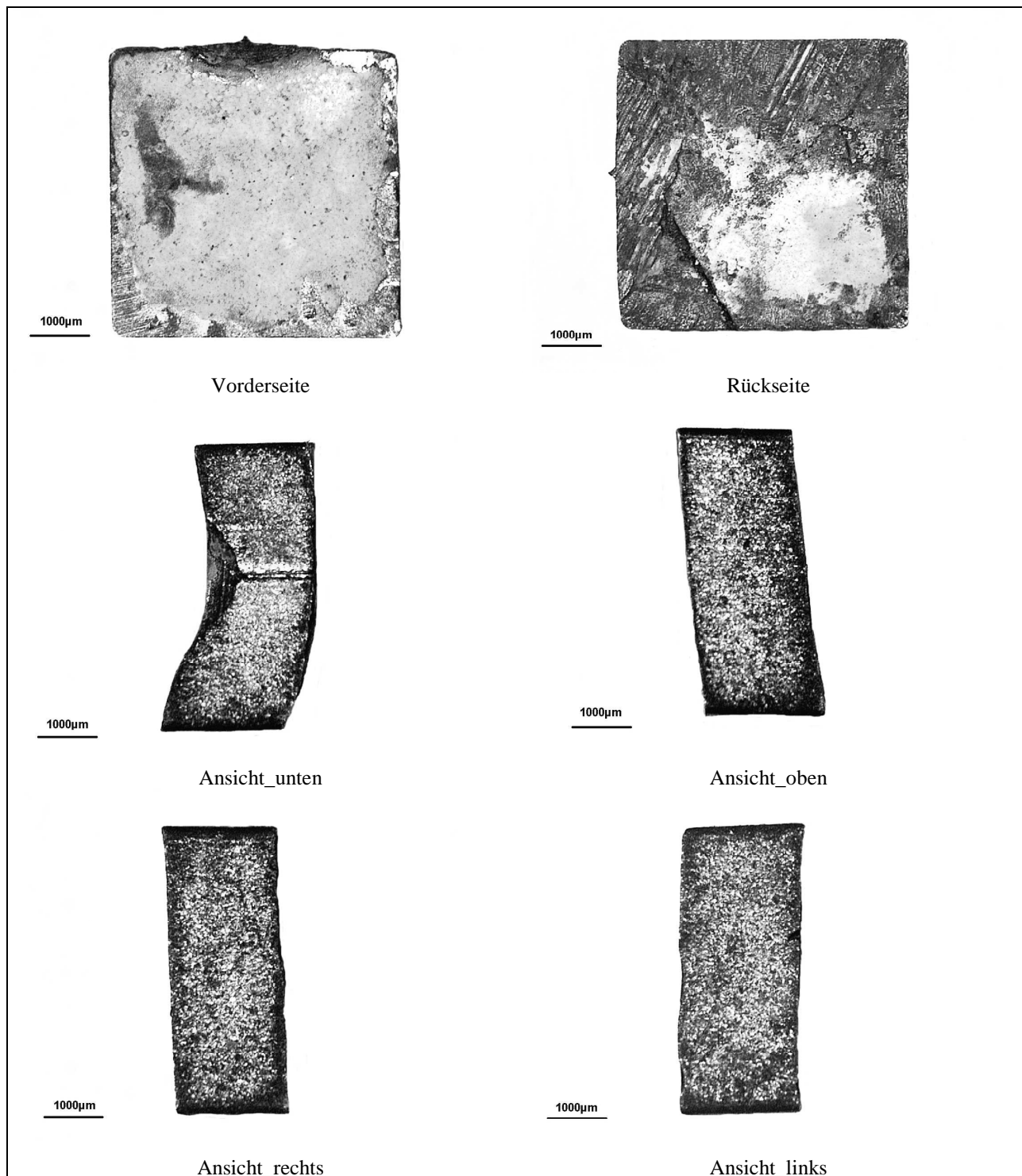


Abbildung 2-4 zweiter funkenerosiver Versuchsdurchlauf makroskopisch mit dem Stereomikroskop (12,5facher Vergrößerung) dokumentiert

Der zweite funkenerosive Versuchsdurchlauf begann in einem Startloch. Dazu musste ein 0,3 mm großes Loch gebohrt werden. Das Lochinnere wurde nun vorsichtig von der künstlichen Patinaschicht befreit in der Hoffnung, dass wenigstens der Draht zu Anfang Kontakt erhält und sich dann infolge der Temperatur weiter durch die künstliche Korrosionsschicht vorarbeitet. Der Draht musste durch das Loch hindurch geführt werden. Ein Schnittprogramm wurde auch hier per Computer gezeichnet und in das Maschinenprogramm eingeladen, wodurch die Schnitte automatisch ausgeführt wurden. Kurz vor Beendigung des Schnittes wurde die Maschine angehalten, um anstelle Schnellkleber leicht mit Wasser quell-

bare Holzblättchen in die bereits vorhandenen Schnittfugen zwischen Probe und restlichem Probeguss einzuführen. Dieses Unterfangen ohne vorherige großflächige Entfernung der Patina gelang und auch die kleine Probe konnte gut mit dieser Auffangart sichergestellt werden (*Abbildung 2-4*).

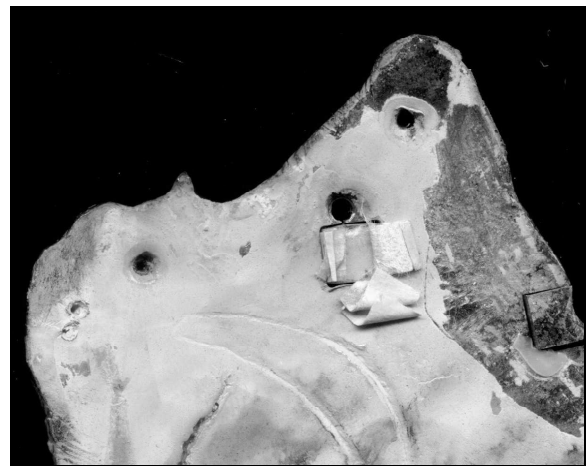
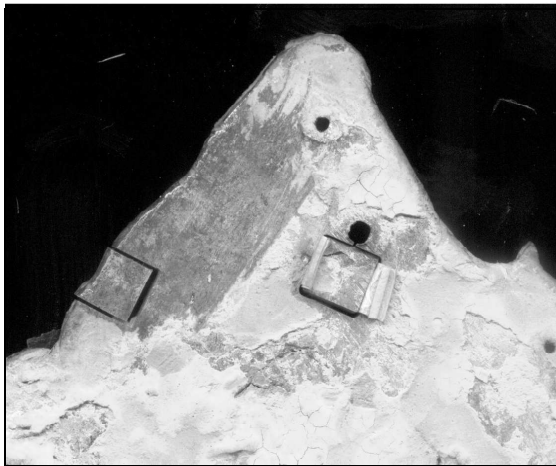


Abbildung 2-5 *funkenerosive Probenahme an der Probenprobe (Archäoscan: eingescannt mit 600 dpi) (zur Verfügung gestellt vom Landesamt für Vorgeschichte Sachsen-Anhalt)*

Nach erfolgter Probenahme wurden beide Probenproben digital dokumentiert (*Abbildung 2-5*). Es konnte eine Spaltbreite von 0,32 mm festgestellt werden. Dieser Verlust ist nach der Meinung aller am Projekt beteiligten Personen bei Erhalt einer nahezu reversiblen Probe mit präzisen Trennschnitten vertretbar. Hinzu kam, dass keine Farbveränderungen der künstlichen Korrosionsschicht konstatiert werden konnten. Dieser positive Testverlauf und alle bereits erwähnten Faktoren ließen eine Probenahme am Original mit dieser Technik zu. Nachfolgend soll nur kurz auf die Probenahme eingegangen werden, da die Probenahme an sich bereits intensiv betrachtet worden ist. Auf einige Besonderheiten wird dennoch explizit hingewiesen.

2.1.2.2 Probenahme am Original

Bevor die Probenahme am Original, also an der Himmelsscheibe von Nebra, durchgeführt werden konnte, musste eine Stelle auf der letztgenannten gefunden werden, die sich für eine Entnahme einer 0,5 x 0,5 cm großen Probe eignet. Die Auswahl der Probenahmestelle erfolgte vorwiegend unter Berücksichtigung des Artefaktzustandes, wie der mechanischen Stabilität, der Korrosion, der bestmöglichen Voraussetzungen für die Restaurierung und der archäologischen Aussagekraft; soll heißen, dass die mit Goldapplikationen dargestellten Ornamente unangetastet bleiben sollten, da der Erkenntnisgewinn nicht mit der Zerstörung hätte konform gehen können. Handelt es sich beispielsweise um ein korrodiertes Artefakt? Um diese Frage bei der Himmelsscheibe beantworten zu können, wurde das Röntgenbild (*Abbildung 2-6*) eingehend studiert. So war die Möglichkeit gegeben, die metallenen Stellen, die sich für eine Probenahme anbieten würden, bereits herauszufiltern.

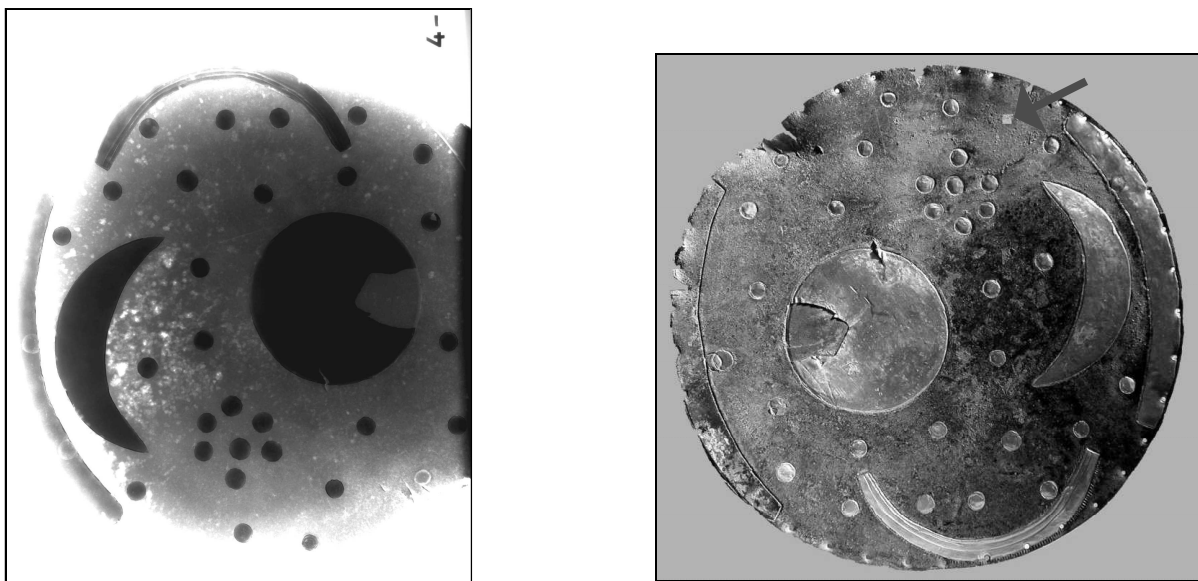


Abbildung 2-6 Röntgenbildaufnahme und vorgesehene Probenahmestelle von der Himmelsscheibe von Nebra (zur Verfügung gestellt vom Landesamt für Vorgeschichte Sachsen-Anhalt)

Nachdem die Probenahmestelle ausgewählt worden war, konnte am 23.10.2002 die Probenahme an der Himmelsscheibe von Nebra im Forschungszentrum Rossendorf durchgeführt werden. Da die eigentlichen Vorversuche bereits im August abgeschlossen worden waren, konnte in analoger Weise mit der Beprobung der originalen Himmelsscheibe vom Loch aus begonnen werden. Auch bei der Nebraer Himmelsscheibe handelt es sich um einen metallischen Werkstoff und damit ist die nötige elektrische Leitfähigkeit der Probe gegeben. Nachteilig wirkt allerdings die vorhandene Korrosionsschicht. Diese muss entlang der Schnittlinie entfernt werden, damit die Leitfähigkeit wieder hergestellt werden kann. Umgesetzt wurde dieser Arbeitsschritt an der Nebraer Scheibe mittels einer Diamantschleifspitze, die die störende Patina an besagten Stellen entfernte. Weiterhin benötigte die Himmelsscheibe eine speziell für diesen Anwendungsfall abgestimmte Präparation. Da das funkenerosive Verfahren als Arbeitsmedium Dielektrikum nutzt, musste in diesem Anwendungsfall das Unterkriechen des Dielektrikums verhindert werden. Damit kein Wasser unter die Patina und die Goldapplikationen geriet, wurde die Himmelsscheibe von Nebra mit Ausnahme der zu

beprobenden Stelle mit einer sublimierenden Chemikalie, nämlich Cyclododecan⁶, abgedeckt. Außerdem erfolgte eine gründliche Nachbehandlung sowie Reinigung der Scheibe und des herausgetrennten Probestückchens.

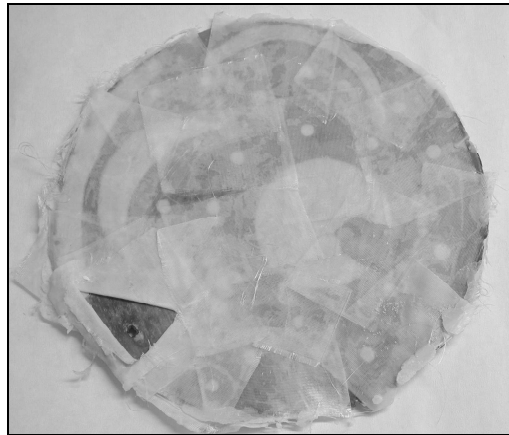


Abbildung 2-7 *Habitus der Scheibe kurz nach der Probenahme (zur Verfügung gestellt vom Landesamt für Vorgeschichte Sachsen-Anhalt)*

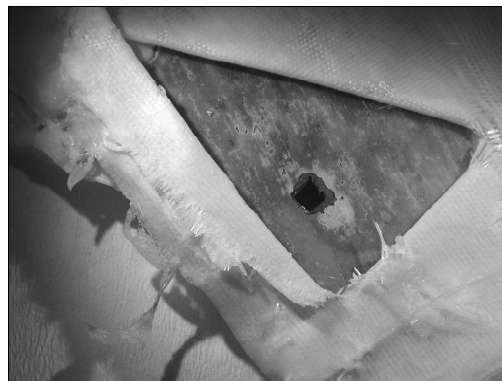


Abbildung 2-8 *Vergrößerter Ausschnitt aus Abbildung 2-7 (zur Verfügung gestellt vom Landesamt für Vorgeschichte Sachsen-Anhalt)*

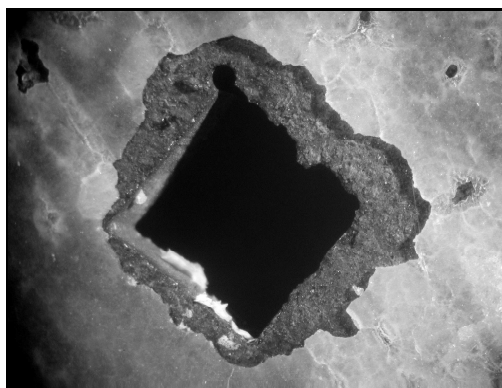


Abbildung 2-9 *Vergrößerter Ausschnitt aus Abbildung 2-8 nach der Probenahme (zur Verfügung gestellt vom Landesamt für Vorgeschichte Sachsen-Anhalt)*

⁶ Hierbei handelt es sich um eine weiße, feste, wachsähnliche Paste, die chemisch inert ist und nach einigen Tagen rückstandslos verdunstet.

Abbildung 2-7 bis **Abbildung 2-9** zeigen den Habitus der Scheibe kurz nach der Probenahme. Die auf diesen Abbildungen (**Abbildung 2-7** und **Abbildung 2-8**) sichtbare Verpackung bestand aus Glasfasergewebe, welches über diese pastöse Verbindung gelegt wurde. Nur die ausgewählte Probenahmestelle blieb frei.

Als Startloch fungierte hier ebenso wieder eine 0,3 mm im Durchmesser betragende Bohrung, welche direkt vor Ort angebracht wurde. Dieses Startloch hat also beinahe die Dimension des Erodierdrahtes. Anschließend wurde die Scheibe in die Maschine gespannt, gewässert und der Maschinenführer bereitete alles für die folgende funkenerosive Entnahme einer 0,5 x 0,5 cm großen Probe vor. Aufgrund der starken Patina brach der Prozess relativ häufig ab, weswegen nur ein langsames Vorankommen möglich war. Als eine weitere Folge weisen die Schnittflächen nicht die gewünschte Ebenheit wie die Probenproben (**Abbildung 2-4**) auf, was die Restaurierung allerdings vereinfachen wird. Die Probenahme dauerte nahezu 1,5 h unter anderem infolge analoger und digitaler Dokumentation mit Fotoapparaten und einer Filmkamera eines professionellen Filmteams. Das Ergebnis dieser Probenahme war sehr zufriedenstellend.

In **Abbildung 2-9** ist neben der Schutzschicht aus Cyclododecan der noch vorhandene Schnellkleber nach der Probenahme zu sehen. Die Probe musste von diesem Schnellkleber befreit werden. Er war eingesetzt worden, um das Probenstückchen nicht im Maschinengehäuse zu verlieren. Unter dem Binokular Nikon SMZ 645 wurde während der gesamten Säuberungsprozedur strikt darauf geachtet, dass keine Patina sich löste oder eventuelle andere ungewollte Veränderungen herbeigeführt wurden. Zunächst wurde mittels einer Pinzette versucht, die überschüssigen Sekundenkleberreste zu entfernen, was auf einer der Schnittflächen auch sehr gut gelang. Danach wurde das Probenstück mit Aceton p.A. mehrfach gewaschen, nachgespült mit destilliertem Wasser und getrocknet, wobei sich nicht der erhoffte Erfolg einstellte. Längeres Einlegen der Probe in Aceton entfernte wenigstens teilweise den Kleber. Doch insgesamt ging die Prozedur nur äußerst schleppend voran. Das immer noch nicht zufriedenstellende Ergebnis zwang zu neuen Maßnahmen: um den Schnellkleber zu lösen, wurde Dimethylformamid⁷ (DMF) eingesetzt. Mit Ohrenstäbchen und Watte wurde der Versuch unternommen, den durch das Aceton teilweise fein dispergierten Kleber von der Probenoberfläche zu entfernen. Mittels der mechanischen Bearbeitung (Reibung) und dem Waschen gelang dieses Unterfangen. Die Spülung mit destilliertem Wasser verhinderte eine wiederholte feine Verteilung des angelösten Klebers infolge des Verdampfens von DMF.

Die **Abbildung 2-10** dokumentiert die 0,5 x 0,5 cm große, gereinigte Probe aus kupferrotem Metall, wie die Schnittflächen verraten. Aufgenommen wurden diese Bilder mit einem Stereomikroskop und einer 16fachen Vergrößerung⁸.

⁷ Bei Dimethylformamid ($\text{HCON}(\text{CH}_3)_2$) handelt es sich um eine leichtflüchtige, basische Chemikalie, die nicht die Korrosionsschicht angreift. Dem blanken Metall kann dieses Lösungsmittel ebenso nichts anhaben.

⁸ Diese Art der Makrodokumentation ermöglicht zwar einen räumlichen Eindruck der Oberfläche, allerdings können mittels Kamera meist nur Monobilder angefertigt werden.

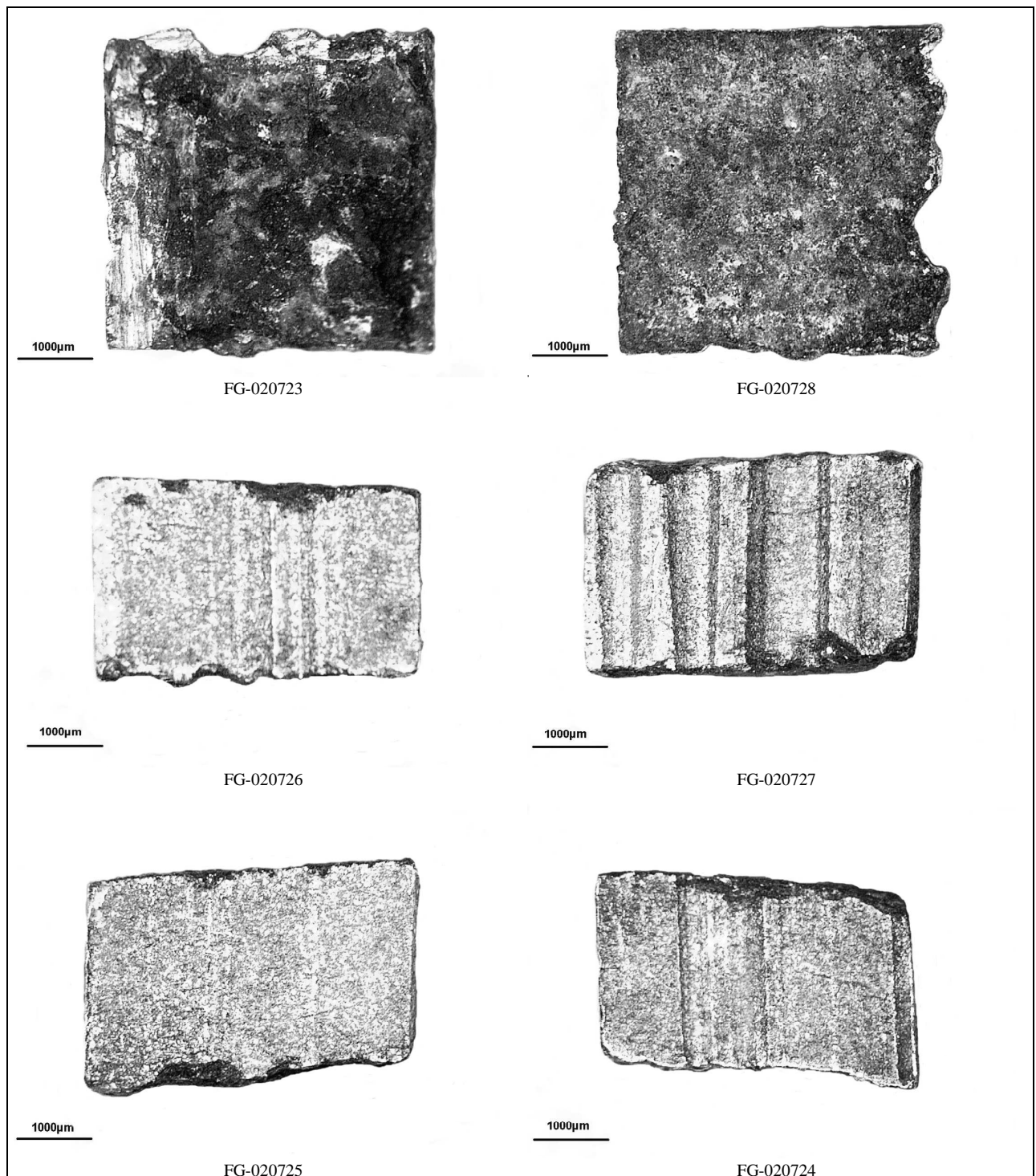


Abbildung 2-10 *funkenerosiv herausgetrennte Probe aus der Himmelsscheibe von Nebra (Stereomikroskopaufnahme mit 16facher Vergrößerung)*

2.1.3 Himmelsscheibe: Lochbohrung

Nach der Durchführung der Röntgenfluoreszenzanalysen (Kapitel 2.2.1) an allen sechs Flächen der Himmelsscheibenprobe wurden aus einer Schnittfläche des Scheibenstückchens (FG-020727) Bohrspäne mittels der Lochbohrung entnommen.

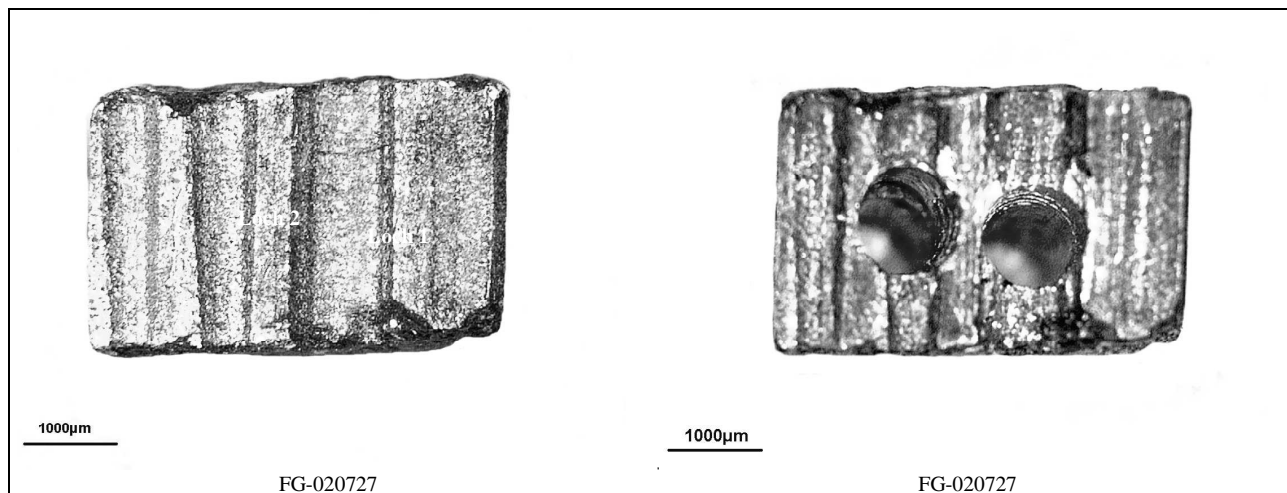


Abbildung 2-11 Probe der Himmelsscheibe von Nebra vor (links) und nach (rechts) der Lochbohrung (Stereomikroskopaufnahme mit 16facher Vergrößerung)

Der **Abbildung 2-11** ist die genaue Stelle der Probenahme zu entnehmen. Es wurde eine unebene Schnittfläche herausgesucht, die sich wegen des nötigen großen Materialabtrags nicht für die Metallographie geeignet hätte. Analog zur Lochbohrung der Beifunde war auch hier das Ziel, metallische Bohrspäne mit einem 1 mm kleinen Chrom-Vanadium-Stahlbohrers für die chemische (NAA) und isotopische (MC-ICP-MS) Untersuchung zu erhalten. Das Anbringen der Lochbohrung und die Vorkehrungen verliefen entsprechend zu den der Beifunde (Kapitel 2.1.1). Hinzu kam bei dieser Probenahme die Notwendigkeit, einen Schraubstock zu benutzen (**Abbildung 2-12**), der zum Halten der 0,5 x 0,5 cm kleinen Probe diente. Wichtig ist in diesem Zusammenhang zu erwähnen, dass die Schraubbacken mit Plexiglasüberzügen versehen waren, damit es zu keiner Kontamination kommen konnte.

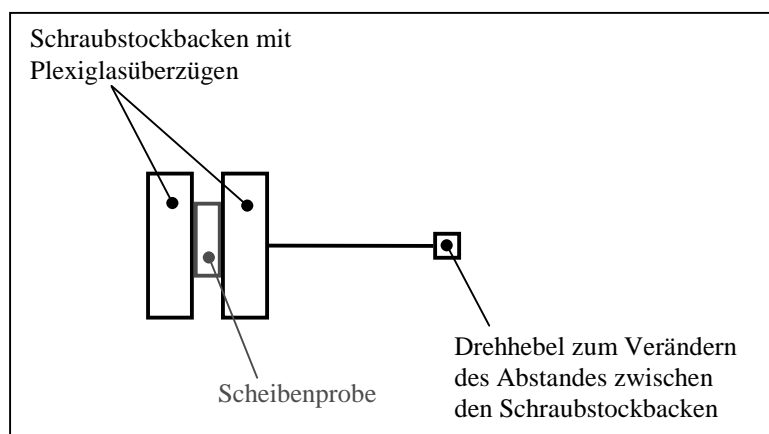


Abbildung 2-12 Schraubstock zum Halten der Scheibenprobe während der Lochbohrung

Insgesamt wurden vorsichtig zwei Löcher (Loch 1 und Loch 2) mit einer Tiefe von 4 mm⁹ angebracht. Ihre genaue Position ist in **Abbildung 2-11** zu sehen.

⁹ Dieser Wert konnte mit einem speziellen am Tischbohrer befestigten Messgerät infolge der Berechnung des Hubes bestimmt werden.

Die Masse des funkenerosiv herausgetrennten Scheibenstückchens wurde am 28.11.2002 mit der Waage vom Typ KERN 770 festgestellt und ergab den Wert von 0,4428 g. Nach der Bohrprobenahme am 07.12.2002 wiegt die Probe der Nebraer Himmelsscheibe noch 0,3891 bzw. 0,3893 g.

2.2 Einige theoretische und praktische Grundlagen der angewandten archäometrischen Untersuchungsmethoden

2.2.1 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Bei der **Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)** wird die anregende **primäre** Röntgenstrahlung dazu benutzt, die Elektronen innerer Schalen herauszukatapultieren. Infolge der entstehenden instabilen Elektronenkonfigurationen springen die Elektronen äußerer Schalen auf die freigewordenen Vakanzen zurück. Die dabei emittierte **sekundäre** Röntgenstrahlung ist elementspezifisch.

Unterschieden wird bei der RFA zwischen dem wellenlängen- und energiedispersiven Verfahren. Verschieden verhält sich ihr apparativer Aufbau: bei den wellenlängendispersiven Geräten wird die Dispersion der emittierten Röntgenstrahlung infolge der Beugung am Analysatorkristall (Wellencharakter der Strahlung) und bei den energiedispersiven Geräten am Halbleiterdetektor (Teilchencharakter der Strahlung) zur Elementbestimmung ausgenutzt. (WEBER-DIEFENBACH 2000, 117f.)

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen wurde das energiedispersive Röntgenfluoreszenzspektrometer Typ TX 5000 der Firma TRACTOR Xray, Inc., USA verwendet (SPECTRACE 5000).

Der bedeutendste Vorteil der energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse ist die zerstörungsfreie sowie simultane qualitative und quantitative Messung der in der Probe enthaltenen Elemente (makroskopische Multielementanalyse von Bor bis Uran) bei kurzer Analysenzeit, hohem Probendurchlauf sowie hoher Genauigkeit. Eingesetzt wird die RFA häufig in der Archäometrie für Übersichtsanalysen der Haupt-, Neben- und Spurenelemente von vorwiegend Festkörpern, beispielsweise aus Metall oder Mineralen. Der Messfehler der meisten Elemente bei der RFA, speziell in prähistorischen Kupferlegierungen, wird mit 5 % bei >1 Masse-% und 10 – 15 % bei 0,1 – 1 Masse-% angesetzt (LUTZ/PERNICKA 1996, 316). Diese Genauigkeit genügt zum Beispiel für eine Gruppierung der Metallsorten (siehe Kapitel 3), die deutlich stärker streuen als es der analytische Fehler zu verursachen vermag (LUTZ/PERNICKA im Druck, 11). Die meist ausreichende Nachweisstärke der energiedispersiven RFA zeigt sich in ihren Nachweisgrenzen, die element- und matrixabhängig zwischen 50 bis 1000 (meist 100) ppm variieren.

Nachteilig ist die Tatsache, dass nur oberflächennahe Bereiche untersucht werden können, wodurch die Probenahme, speziell auch im hier vorliegenden Fall, unumgänglich ist, um genaue Messergebnisse des authentischen Materials zu erhalten.

Insgesamt wurden mit dem SPECTRACE 5000 32 Proben bei einer Messzeit von 1000 s gemessen. Es handelt sich bei den Proben um 26 Bohrspänprouben der Beifunde und 6 Oberflächenproben der funkenerosiv herausgetrennten Himmelsscheibenprobe, wovon 4 Analysen an den Schnittflächen und 2 an den korrodierten Oberflächen durchgeführt wurden. Von höherem Aussagewert sind die am unverwitterten Metall¹⁰ vorgenommenen Analysen sowie die Analysen der Bohrspäne aufgrund der geringen Informationstiefe.

Die Besonderheit bei der praktischen Durchführung der Analysen von den Schnittflächen der Himmelsscheibenprobe bestand in der Notwendigkeit, die korrodierten Stellen abzudecken. Die aus der Himmelsscheibe herausgetrennte Probe ist nicht exakt

¹⁰ Im Gegensatz dazu unterliegt die der Atmosphäre ausgesetzte Oberfläche unterschiedlichen An- und Abreicherungen der Legierungsbestandteile (Einfluss von Boden, Wasser, Zeit, Temperatur usw.), weswegen die Zusammensetzung stark vom ursprünglichen Metall abweichen kann (LUTZ/PERNICKA im Druck, 12f.).

symmetrisch, weswegen eine Anregung der seitlich sich befindenden Korrosionsschicht nicht vollständig ausgeschlossen werden konnte, trotz sorgfältigster mittiger Positionierung auf dem Probenhalter. Um diesen möglichen Fehlereinfluss zu eliminieren, wurden die korrodierten Schichten mit vollständig wieder ablösbarem Montagekitt abgedeckt.

Um für die Messergebnisse eine unabhängige Bestätigung zu erhalten, wurden weitere Messungen mit der NAA durchgeführt.

2.2.2 Neutronenaktivierungsanalyse (NAA)

Bei der Neutronenaktivierungsanalyse (NAA) wird die Probe mit im Kernreaktor generierten Neutronen bestrahlt. Als Folge bilden sich radioaktive Nuklide, auch Indikator-nuklide genannt, die in einer charakteristischen Halbwertszeit¹¹ zu stabilen Nukliden benachbarter Elemente zerfallen und dabei radioaktive Strahlung, unter anderem γ -Strahlung, aussenden. Heute wird meist die γ -Strahlung, die durch Übergänge der Nukleonen zwischen unterschiedlichen Energieniveaus im Kern entsteht, genutzt, um sowohl qualitative als auch quantitative Aussagen über die in der Probe enthaltenen Elemente zu formulieren. (PERNICKA 2000b; OTTO 1995; LIESER 1991; KULEFF/PERNICKA 1995)

Hinsichtlich der Probenbehandlung wird bei der NAA zwischen der hier genutzten instrumentellen und der radiochemischen Neutronenaktivierungsanalyse unterschieden. Letztgenannte zeichnet sich im Vergleich zur zerstörungsfreien instrumentellen Neutronenaktivierungsanalyse durch die chemische Abtrennung des Indikator-nuklids von der Matrix aus.

Von größtem Vorteil bei der NAA sind die im Vergleich zur RFA sehr geringen Nachweisgrenzen von bis zu 3 ppb (KULEFF/PERNICKA 1995, 156, table 3). Meist befinden sich diese unterhalb der niedrigsten Elementgehalte, die beispielsweise für die Herkunft des Metalls zu Rate gezogen werden (KULEFF/ PERNICKA 1995, 155). Mit zunehmender Komplexität der Probe ist allerdings auch mit einer Erhöhung der Nachweisgrenze zu rechnen (PERNICKA 2000b, 157f.).

Der Multielementcharakter, das Nachweisvermögen und die Zerstörungsfreiheit machen speziell die instrumentelle Neutronenaktivierungsanalyse zu einer vielseitig einsetzbaren Methode. Der relative Fehler der NAA liegt meist bei 2 %, schwankt aber je nach Probenzusammensetzung von 10 bis 1 %. (KULEFF/PERNICKA 1995, 157; OTTO 1995; PERNICKA 2000b)

Nachteilig ist die Tatsache, dass Bismut und Blei gar nicht oder nicht zuverlässig mit der Gammaspektroskopie bestimmt werden können, weswegen Alternativmethoden, wie ICP-MS, nötig sind. Außerdem müssen im Umgang mit radioaktivem Material spezielle Ausrüstungen vorhanden sein und Sicherheitsvorkehrungen beachtet werden.

Die aufgeführten Vorteile machen die Anwendung der NAA im Rahmen dieser Arbeit für die bereits mit der RFA analysierten metallischen Bohrspäne der Nebraer Fundobjekte (24 Proben von den Beifunden, 1 Probe von der Himmelscheibe) erforderlich. Neben der Nachweisstärke vieler Elemente stehen die Proben bei der instrumentellen Neutronenaktivierung nach dem Abklingen der induzierten Aktivität für weitere Analysen bereit (Kapitel 2.2.3). Mittels geringer Probenmengen ist somit ein Maximum an Informationen erreichbar (**Tabelle A-2-1** im Anhang).

Sobald die induzierte Aktivität der Proben bis unterhalb der Freigrenze abgesunken war, konnten die Proben für die ICP-MS präpariert werden.

¹¹ Die Halbwertszeit beschreibt die Zeit, in der die Hälfte der Kerne zerfallen ist.

2.2.3 Multikollektor-Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (MC-ICP-MS)

Die hier eingesetzte Multikollektor-Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (MC-ICP-MS) trennt die ionisierte Probe in ihre, durch unterschiedliche Massenzahlen sich auszeichnenden, isotopischen Bestandteile auf. Deshalb ermöglicht MC-ICP-MS Isotopenverhältnismessungen, die zudem sehr präzise und richtig sind.

Speziell für diese Arbeit kam das doppelfokussierende MC-ICP-MS Typ AXIOM, VG Elemental, zum Einsatz. Die Kombination von elektrostatischem und magnetischem Sektorfeld wird als doppelfokussierend bezeichnet und gestattet eine hohe Auflösung. Je nach geometrischer Anordnung beider Sektorfelder wird vom verwendeten NIER-JOHNSON-Modell¹² oder MATTAUCH-HERZOG-Modell¹³ gesprochen.

NIEDERSCHLAG et al. (2003, 68f.) gibt geräteinterne relative Standardabweichungen (2σ) für $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ mit 0,09 %, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ mit 0,08 %, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ mit 0,04 % und $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ mit 0,02 % an. Diese Werte stammen aus 125 Kontrollmessungen des Standards NIST-SRM-981. Im Vergleich mit der Arbeitsgruppe von GALER/ABOUCAMI und um TODT kann eine Abweichung zwischen 0,02 und 0,03 % konstatiert werden, woraus sich eine Genauigkeit der Verhältnisangaben bis zur 3. Nachkommastelle ableiten lässt.

Zur Provenienzbestimmung von Blei- oder bleihaltigen Artefakten bilden die genauen Messungen der Bleiisotopenverhältnisse die Ausgangsbasis (Kapitel 3). Vor diesem Hintergrund wurden 17 mittels der Lochbohrung genommene Artefaktproben (*Tabelle A-2-1* im Anhang) für die Analyse ausgewählt. Geeignet war jede Probe, die eine ausreichende Bleikonzentration und genügend unkorrodiertes, also authentisches Probenmaterial enthielt. Bei bereits für die instrumentelle NAA genutzten Proben musste sich deren Aktivität unterhalb der Freigrenze befinden. Die Probenpräparation gestaltete sich schwierig, da bestimmte Matrices Isotopenmessungen erschweren bzw. verfälschen, weswegen sich dann meist für eine Matrixabtrennung, auch bei den hier vorliegenden Kupfer-Zinnlegierungen, entschieden werden musste. Routinemäßig durchgeführt wurden die Trennungen mit der zeitaufwendigen Säulenaustauschermethode. Übrig bleibt dann nur noch das Eluat mit dem interessierenden Element Blei. Der Kontaminationsgefahr wegen wird während der Probenpräparation unter Reinraumbedingungen gearbeitet. Dies bedeutet unter anderem auch die Verwendung von ausschließlich MERCK-Suprapur Qualität Reagenzien und hochreinem, deionisiertem Wasser. Es darf kein Blei infolge der chemischen Präparation eingetragen werden, da andernfalls die gemessenen Bleiisotopenzusammensetzungen entstellt werden würden.

Um 5 ml-Probenlösungen mit 200 ppb Blei für die Durchführung dieser Analyse zu erhalten, wurden dafür erforderliche Einwaagen mit Hilfe der mit der RFA erhaltenen Blei-Übersichtswerte (*Tabelle A-3-1* im Anhang) errechnet.

Erwähnt sei noch, dass die hierbei eingesetzte Probe vollständig verbraucht wird. Dennoch wurde sich für den Einsatz dieser Methode entschieden, da der Informationsgewinn überwiegt und keine Alternativmethode mit der hohen Genauigkeit existiert.

¹² elektrostatisches Sektorfeld von 90°, magnetisches Sektorfeld 60 oder 90°.

¹³ elektrostatisches Feld von 31°50', magnetisches Feld von 90°.

2.2.4 Metallkundliche Untersuchungen

Metallkundliche Untersuchungen¹⁴ geben den „Zusammenhang zwischen den Zustandsdiagrammen, dem Gefügebautbau und den Eigenschaften der Metalle und Legierungen“ wieder (SCHUMANN 1991, 13). Die dazu relevanten, im Rahmen dieser Arbeit genutzten Verfahren sind die Auflichtmikroskopie, die Elektronenstrahlmikroanalyse und die Rasterelektronenmikroskopie. Alle drei Verfahren setzen eine ebene, sehr glatte Oberfläche, einen Schliff, voraus. Die Herstellung eines Schliffs soll am Beispiel der funkenerosiv genommenen Probe aus der Himmelscheibe gezeigt werden:

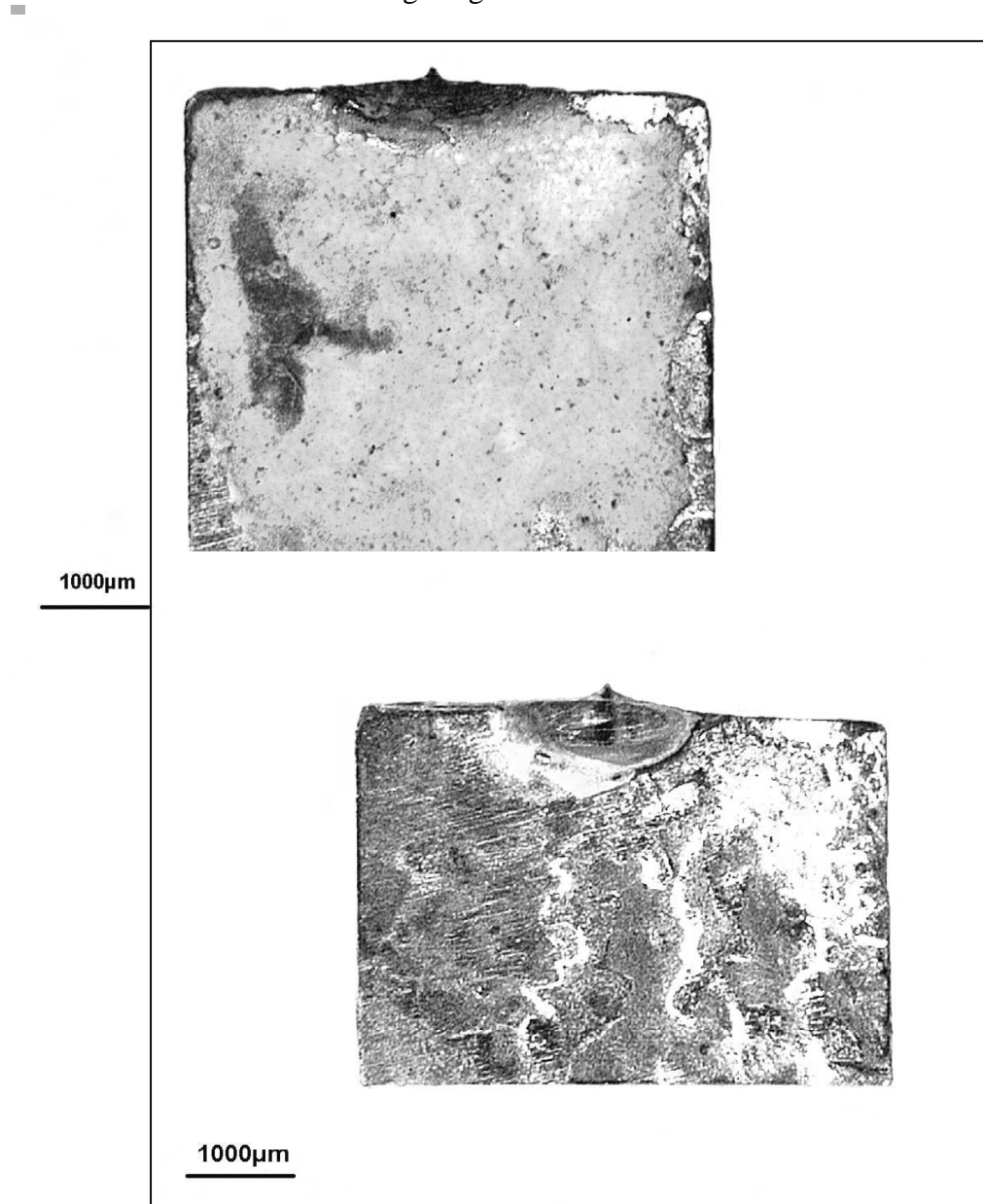


Abbildung 2-13 Vorderseite der funkenerosiv genommenen Probenprobe (Kapitel 2.1.2.1) vor (oberes Bild) und nach (unteres Bild) der Präparation (Stereomikroskopaufnahme mit 12,5facher Vergrößerung)

¹⁴ Die ursprüngliche Bezeichnung Metallographie (Metallbeschreibung), neuerdings Materialographie, bildet definitionsgemäß einen Bestandteil davon.

Bei sehr kleinen Untersuchungsobjekten, wie der 0,5 x 0,5 cm großen Probe der Himmelsscheibe, sind Einbettungen unumgänglich. Sie sind nicht nur die Voraussetzung für die Realisierung eines Schliffs, sondern garantieren auch die Unversehrtheit der auf der Vorder- und Rückseite vorhandenen Korrosionsschicht. Im vorliegenden Fall war die Suche nach dem geeigneten Einbettmittel problematisch. Ausschlaggebend war, dass sich nach den durchgeführten metallkundlichen Untersuchungen die Probe unbeschädigt und authentisch ausbetten lässt. Zuzüglich musste das Einbettmittel beständig gegenüber Vakuum, Elektronenstrahlen und Präparation sein. Eine weitere Forderung an das Einbettmittel war eine gute Haftung an der Probe, um Linienanalysen an den Randbereichen durchführen zu können. Geeignet dafür ist das Kalteinbettmittel Technovit 5071, wie sich nach umfassenden Recherchen und Experimenten herausstellte. Sowohl mit Technovit 5071 (HERAEUS KULZER 2000, 3) als auch mit dem Duosan Universalkleber (UHU 2000) wurden gezielte Vorversuche an Probenproben, wie es bereits bei der Probenahme erfolgte, unternommen, um die Tauglichkeit zu überprüfen.

Zunächst wurde die funkenerosiv herausgetrennte Probenprobe (Kapitel 2.1.2.1) mit der künstlich aufgetragenen Korrosionsschicht, einem Gemisch aus Paraloid (Polymethylmethacrylat, $[CH_2 = C(CH_3) - COOH - CH_3]_n$) und synthetischem Malachit, eingebettet, nach metallographisch üblichen Vorschriften präpariert und anschließend wieder ausgebettet. Das Einbettmittel Technovit 5071 ist acetonlöslich und wurde im Acetonbad auch aufgelöst. Das Ergebnis war aber keineswegs zufriedenstellend, denn wie die **Abbildung 2-13** zeigt, ist keine Korrosionsschicht nach dem Ausbettvorgang mehr vorhanden. Geschuldet ist dies der Tatsache, dass Paraloid genau wie Technovit 5071 acetonlöslich ist. Natürlich gewachsene Korrosionsschichten, zum Beispiel die der Himmelsscheibe bestehend aus Malachit und Kassiterit¹⁵, sind dagegen nicht acetonlöslich.

Daraufhin wurde dieses Experiment wiederholt, diesmal mit einer Probenprobe, die eine im Vergleich zur Himmelsscheibe lockere Korrosionsschicht aus Malachit und Paratacamit¹⁶ aufweist. Nach dem erfolgten Einbetten wurde überschüssiges Einbettmittel mit einer Bandsäge entfernt und anschließend die Probenprobe mit dem restlichen Einbettmittel in ein mit Aceton p.A. gefülltes, abgedecktes Becherglas gelegt und unter Rühren und erhöhten Temperaturen (50–100°C) gelöst. Nach mehrmaligem Wechseln des Acetons und Spülen der auszubettenden Probenprobe mit destilliertem Wasser war nach nur 1 Stunde die Probe ausgebettet. Ein Großteil der Korrosionsschicht war erhalten geblieben, dennoch waren noch nicht die optimalen Ausbettbedingungen gefunden. Deswegen wurde eine Probenprobe mit identischer Korrosionsschicht eingebettet, mit Ethanol, Wasser und OP-U, einer Oxidpolitur, gespült und anschließend wieder ausgebettet. Analog zur eben beschriebenen Ausbettung wurden die Überreste des Einbettmittels abgesägt und danach die Probenprobe mit Aceton p.A. in eine abgedeckte Petrischale unter den Abzug gestellt. Diesmal wurde weder die Temperatur erhöht noch mechanisches Rühren angewandt, um die Reaktion zu beschleunigen. Nach 8 Stunden wurde erstmals das Lösungsmittel gewechselt. Dieser Vorgang wurde mehrfach in Abständen wiederholt und somit allmählich die Probenprobe vollständig von dem Einbettmittel innerhalb von 24 Stunden befreit. Das Ergebnis der getrockneten Probenprobe ist der **Abbildung 2-14** zu entnehmen und überzeugt. Die Korrosionsschicht wurde makroskopisch nicht verändert. Unter dem Binokular Nikon SMZ 645 konnten auch keine Reste des Einbettmittels mehr konstatiert werden. Dieses Gelingen sprach dafür, zum Einbetten des Originals Technovit 5071 einzusetzen.

Parallel dazu wurde ein neues Experiment mit Duosan Universalkleber¹⁷ durchgeführt. Diese farblose, glasklare mittelviskose Lösung ist ein stark aushärtender Kleber und ebenso

¹⁵ Persönliche Mitteilung von C.-H. WUNDERLICH.

¹⁶ Entstanden ist diese 2 Monate lang gewachsene Schicht durch Bedampfen der Kupfer-Zinn-Legierung mit HCl und CO₂ (persönliche Mitteilung von C.-H. WUNDERLICH).

¹⁷ Informationen der Firma UHU zufolge ist die Basis Polyvinylester und löslich ist der Kleber mit Aceton (UHU 2000).

acetonlöslich. Allerdings enthält er zu viel Lösungsmittel. Letztgenanntes führt zu einer starken Schrumpfung. Deswegen ist Duosan für den hier vorliegenden Zweck nicht geeignet. Die Konsistenz des Einbettmittels war nach 3 Tagen immer noch gummiartig und blasig. Die verhältnismäßig große Menge an benötigtem Kleber zeigt ganz deutlich die Schrumpfung aufgrund des verdampfenden Lösungsmittels. Dieses Experiment wurde abgebrochen, da der Kleber als potentiell einbettmaterial nicht die anfangs formulierten Anforderungen erfüllte.

Technovit 5071 besteht aus schnellhärtendem, kaltpolymerisierendem 2-Komponenten-Kunststoff auf der Basis von Methylmethacrylat in Form von Pulver und Flüssigkeit, von grüner Farbe und ist löslich in Aceton. Die eingebettete Probe der Nebraer Himmelsscheibe zeigt **Abbildung 2-15**.

Neben dem Einsatz des geeigneten Einbettmittels war es wichtig, den Materialabtrag des Schiffs so gering wie nur möglich zu halten. Die Makrodokumentation in **Abbildung 2-13** zeigt die Probenprobe vor und nach dem Präparationsdurchlauf. Das Ätzen und Überpolieren trägt zum erhöhten Materialabtrag bei. Deswegen wurde kein perfekter, also absolut kratzerfreier, Schliff, aber dennoch ein Informationen enthaltener Schliff angestrebt. Wenn möglich, sollte auch auf die Ätzung zum Sichtbarmachen des Gefüges verzichtet werden. Möglicherweise würde OP-U bereits die interessierenden Details offen legen. Eine Ätzung ist aus mehreren Gründen im vorliegenden Fall nicht anzustreben:

- Störung bei den ESMA-Messungen (Fokussierungsprobleme des Elektronenstrahls)
 - mögliche Beeinflussung der Korrosionsschicht
- sind nur einige davon.



Abbildung 2-14 Vorderansicht der Probenprobe mit einer natürlichen (Malachit und Paratacamit) Korrosionsschicht nach dem Einbetten in Technovit 5071, der Behandlung mit Alkohol und OP-U, Wasser sowie ausgebettet mit Aceton p.A. (Stereomikroskopaufnahme mit 8facher Vergrößerung)

Die Schnittfläche FG-020725 der Probe aus der Himmelsscheibe von Nebra wurde zum Schliff präpariert, weil sie im Vergleich zu den anderen drei Schnittflächen (Kapitel 2.1.2.2) sehr eben war und somit den geringsten Materialabtrag für eine ordentliche Präparation bedeutete (**Abbildung 2-10**). Die verwendeten metallkundlichen Untersuchungen

wurden in logischer Reihenfolge nacheinander durchgeführt, wobei die Probe nicht nochmals Polier- oder Schleifdurchgänge durchlaufen sollte. Den Materialabtrag zu minimieren bei größtmöglichstem Informationsgewinn war das Ziel. Dennoch sollten optimale Messbedingungen für die einzelnen Analysen erreicht werden. Deswegen wurden nach der Aufrichtmikroskopie die wellenlängendispersive, anschließend die energiedispersive **RMA (Röntgenmikrobereichsanalyse)** vorgenommen und letztlich die rasterelektronenmikroskopisch vergrößerten Abbildungen angefertigt.



Abbildung 2-15 mit Technovit 5071 in die Kautschukeinbettform eingebettete Probe der Himmelsscheibe

Die Schliffherstellung begann mit der Einebnung der Probenoberfläche durch Nassschleifen, indem Schleifpapier mit Siliziumcarbid unterschiedlicher Körnungen von grob (1 200 #) nach fein (4 000 #) zum Einsatz kam. Das Wasser verhindert dabei die Erwärmung der Probe während des Schleifens. Danach erfolgte zunächst die mechanische Diamantpolitur¹⁸ mit grünem Lubrikant, einer Schmierflüssigkeit auf Wasserbasis ohne Alkohol. Dabei wurde mit der 6 μ -Paste auf dem PAN-W-Tuch begonnen und anschließend mit 3 μ auf der MD-MOL-Unterlage weiterpoliert. Zur Beseitigung restlicher Kratzer wurde mit der 1 μ -Diamantpaste auf dem NAP-Tuch poliert. Im Anschluss an die Diamant- folgte die Oxidpolitur mit kolloidalem Siliziumdioxid (OP-U; Korngröße 0,04 mm und 9,8 pH-Wert) im Verhältnis eins zu eins mit Wasser auf dem MD-CHEM-Tuch. Letztgenannte chemische Politur kombiniert mit mechanischem Abtrag wird besonders bei weichem und duktilem Material für absolut kratzerfreie und verformungsfreie Proben angewendet (BJERREGAARD et al. 1996, 58). Ein positiver Nebeneffekt ist die Tatsache, dass bereits ein leicht angeätztes Gefüge erhalten wird. Diese Kontrastierungsmaßnahme ist auch noch für die RMA eine geeignete Oberfläche, um genaue Ergebnisse zu erzielen. Damit war es möglich, die im Gefüge vorhandenen Geheimnisse bezüglich der Herstellung abzulesen (Kapitel 3).

Das Ergebnis des Schliffs stellt einen Kompromiss dar. Vereinzelt treten Kratzer noch deutlich hervor. Allerdings hatte der geringste Materialabtrag höchste Priorität. Es galt das Gefüge festzuhalten und nur zur Verschönerung wäre der Materialabtrag nicht zu rechtfertigen.

¹⁸ Die dazu verwendeten Tücher sind Träger des Poliermittels, die je nach Anwendungsfall aus Seide, Filz usw. bestehen.

tigen gewesen. Eine zufriedenstellende, für die nachfolgende Untersuchung geeignete Oberfläche musste vorhanden sein.

Aufgenommen wurden die Gefügebilder mit dem NEOPHOT 30 von CARL ZEISS Jena (inverses Auflichtmikroskop) und der Nikon eclipsen ME 600 (aufrechtes Auflichtmikroskop). Die mit der Digitalkamera festgehaltenen Bilder wurden in das Programm eingelesen. Die mit der Nikon aufgenommenen Dias mit 800 ppi im Durchlichtmodus eingescannt.

Nach der Lichtmikroskopie wurde der Schliff mit einer dünnen gleichmäßigen (1 -10 nm) leitfähigen Kohlenstoffschicht (wegen der nichtleitenden Korrosionsschicht) bedampft, um den Anforderungen des **REM** (**R**asterelektronen**m**ikroskops) Typ DSM 969 von ZEISS und **ESMA** (**E**lektronenstrahl**m**ikro**a**nalysator) Typ JOEL JXA-8900 RL zu genügen. Auf ein ansonsten übliches Ätzen als chemische Kontrastierungsmaßnahme gefolgt von einem Überpolieren wurde in diesem Fall aufgrund des minimalst zu haltenden Materialabtrages verzichtet.

Für ausgewählte vergrößerte Gefügeabbildungen des Himmelsscheibenmetalls sowie energiedispersive Punktanalysen (Einschlüsse, Phasen) wurde das REM genutzt.

Pauschal können die Nachweisgrenzen für energiedispersive Spektrometer bei Elementen mit Ordnungszahlen größer 10 mit 0,1 Masse-% und bei Elementen mit Ordnungszahlen kleiner 10 im Prozentbereich angegeben werden. Die wellenlängendispersiven Geräte erreichen Nachweisgrenzen bei Ordnungszahlen größer 10 von 0,01 Masse-% und darunter, bei leichten Elementen etwa 0,1 Masse-%. Der relative Fehler der Analysen schwankt in Abhängigkeit von Element, Konzentration und Matrix. Allgemein kann die Genauigkeit mit 0,5 bis 5 % angesetzt werden. (HUNGER/BAUMGARTL 1995; MOMMSEN 1986)

Im Rahmen dieser Arbeit wurde mittels des ESMA 3 wellenlängendispersive Linienanalysen hinsichtlich der interessierenden Zinnkonzentration durchgeführt, bei der Punktanalysen in einem bestimmten Abstand aneinandergereiht werden, um die Verteilung bestimmter Elemente (hier Kupfer und Zinn) entlang einer vorgegebenen Strecke aufzuzeigen.

3 Ergebnisse, Auswertung und Interpretation

Die mit den angewandten archäometrischen Untersuchungsmethoden¹⁹ (Kapitel 2.2) erzielten Messergebnisse der analysierten Fundobjekte des Hortfundes von Nebra werden nachfolgend zusammengestellt sowie sich daraus ergebende Erkenntnisse abgeleitet.

Für eine schnelle und genaue makroskopische Multielementuntersuchung der Artefakte eignen sich Röntgenfluoreszenzanalysen. Die mit dieser Methode erzielten Messergebnisse der Himmelsscheibe und der Beifunde von Nebra sind in **Tabelle A-3-1** im Anhang aufgeführt.

Bei näherer Betrachtung der Messergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse (**Tabelle A-3-1** im Anhang) fällt zunächst auf, dass die von der Tauschierung des Schwertes ohne Griff genommene Probe (FG-020686) mit 99 Masseprozent Kupfer und 0,35 Masseprozent Zinn sich deutlich von den restlichen Proben, die mindestens das siebenfache an Zinn und dementsprechend weniger an Kupfer als Hauptbestandteile enthalten, abhebt. Des Weiteren weist diese Probe die höchste Spurenelementkonzentration an Gold auf. Nicht unerwähnt soll in diesem Zusammenhang bleiben, dass sich Gold in solch niedrigen Konzentrationen mit der RFA (siehe **Tabelle A-3-1** im Anhang) nicht ausreichend empfindlich nachweisen lässt. Zudem weisen Messergebnisse unmittelbar an der Nachweisgrenze höhere Messfehler auf. Deswegen wurde im Rahmen dieser Arbeit zusätzlich die Neutronenaktivierungsanalyse mit weitaus niedrigeren Nachweisgrenzen eingesetzt, auf deren Ergebnisse später eingegangen wird.

Das nachgewiesene nahezu reine Kupfer der Tauschierung überrascht keineswegs. Unlegiertes Kupfer ist hervorragend verarbeitbar, zum Beispiel in Form von Einlegearbeiten wie im vorliegenden Fall. Noch deutlicher tritt dieser Unterschied beim Vergleich mit der Metallzusammensetzung der Probe dieses verzierten Schwertes (FG-020685, FG-020678) hervor. Mit 8,5 Masseprozent Zinn weist diese Metallzusammensetzung eine weitaus höhere Festigkeit, Härte sowie geringere Dehnbarkeit auf und ist demzufolge schwerer bearbeitbar als der Verzierungswerkstoff (SCHUMANN 1991, 649f.). Die aufgeführten Eigenschaften sind für ein Schwert als stabiles Gerät unerlässlich, weswegen bei einem Zinngehalt von 8,5 Masseprozent von einer Legierung ausgegangen werden kann. Unter Legierung wird das absichtliche Zusammenmischen zweier oder mehrerer Metalle zur Optimierung von bestimmten Eigenschaften (mechanisch, optisch usw.) verstanden (z.B. SCOTT 1991, 11), was durchaus auch auf diese archäologischen Metallfunde übertragbar ist (PERNICKA 1990, 47). Es besteht aber gerade hierbei das schon oft diskutierte Problem, zuletzt bei NIEDERSCHLAG et al. (2003, 94), dass nicht genau gesagt werden kann, ab welchem Prozentsatz die Zinnzugabe Absicht oder Zufall war. Aus lagerstättenkundlichem Blickwinkel betrachtet, ist zu konstatieren, dass Kupfer- und Zinnerze äußerst selten vergesellschaftet vorkommen. Deswegen geht PERNICKA (1990, 47) bei mehreren Masseprozent Zinn in einer Zinnbronze von einer Absichtlichkeit aus. NIEDERSCHLAG et al. (2003, 94) gibt dafür als Zahlenwert >1 Masseprozent Zinn an.

Ob nun zum Beispiel die chemisch und isotopisch untersuchten Schwerter wirklich als Waffen benutzt wurden oder eher Motiv- oder nur Prestigecharakter besaßen, kann nur eine Analyse prähistorischer Abnutzungsspuren an den Objekten sowie eine Gegenüberstellung mit Vergleichsfunden erbringen.

Neben den mechanischen spielten sicherlich auch die optischen Eigenschaften eine Rolle. Aus heutiger Sicht betrachtet, fällt es leicht zu entscheiden, welche Eigenschaften eine höhere Bedeutung besitzen. Allerdings ist dies nicht einfach auf die Zeit vor 3 600 Jahren zu

¹⁹ Namentlich die energiedispersive Röntgenfluoreszenzanalyse, instrumentelle Neutronenaktivierungsanalyse, Multikollektor-Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma, materialkundliche Untersuchungen.

übertragen. Denkbar ist durchaus, dass für Dekorations- oder wie auch immer gearteter kultischer Zwecke den Farben zur Erzielung optischer Ästhetik eine besondere Bedeutung zukam. Ersteres erscheint im Zusammenhang mit der Tauschierung auf der zinnhaltigen Schwertklinge glaubwürdig, wobei Dekoration und gute Verarbeitbarkeit sicherlich als glückliche Verbindung zu werten sind. Aufgrund variabler Zinnanteile im Kupfermetall sind außer unterschiedlichen Härten auch verschiedene Farben zu erzielen. Ersteres äußert sich schon bei der Probenahme (Spanbeschaffenheit) und letzteres korreliert mit den optischen makroskopischen Beobachtungen: beispielsweise lachsrot mit etwa 0 – 3,5 Masseprozent Zinn, braunrot (etwa 3,5 – 6,5 Masseprozent Zinn) sowie gelbrot (etwa 6,5 – 8,5 Masseprozent Zinn) zu rötlich gelb (8,5 – 10 Masseprozent Zinn) bis gelb mit etwa 10 – 13,5 Masseprozent zulegiertem Zinn (DIES 1967, 521).

Auf Proben, die vorwiegend aus korrodiertem Oberflächenmaterial der Beifunde (z.B. FG-020679) bestehen, wird nicht näher eingegangen, da die mit der RFA als eine Oberflächenanalyse (0,01 mm Informationstiefe) erhaltenen Elementgehalte nicht vom ursprünglichen Metall, sondern von der durch äußere Einflüsse veränderten, also nichtrepräsentativen Korrosionsschicht stammen.

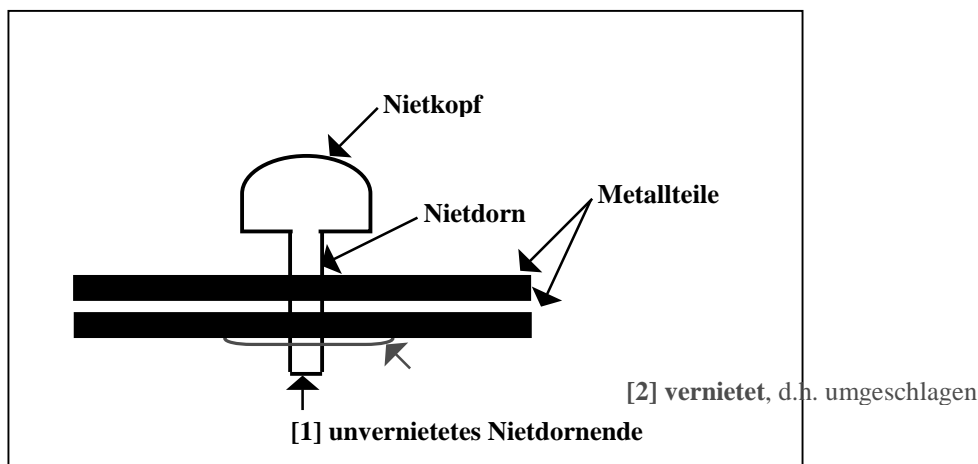


Abbildung 3-1 Prinzipdarstellung eines Niets

Ferner kann bei den Nieten die Tendenz beobachtet werden, dass die Nietköpfe immer kupferreicher und zinnärmer (bis zu 30 %) als die Proben der untersuchten Nietdorne sind (FG-020691 – FG-020696). Der Niet besteht im Allgemeinen aus einem Zierkopf und einem Nietdorn. Letztgenannter wird durch mindestens zwei Metallteile hindurchgetrieben, um sie miteinander zu verbinden. Dabei wird das Nietende ohne Zierkopf vernietet, das heißt zusammengestaucht und umgeschlagen (**Abbildung 3-1**). Eine Variante der Herstellung ist der Guss aus einem Stück (z.B. Wachsausschmelzverfahren). Danach müsste die Zusammensetzung von Nietkopf und -dorn übereinstimmen. Im zulegierten Element Zinn ist das hier allerdings nicht der Fall. Der halbrunde Zierkopf besteht aus einer leichter umzuformenden Legierung. Ein Vergleich mit der Zusammensetzung der Schwerter mit und ohne Griff zeigt, dass die Nietköpfe anhand ihrer Zinngehalte den jeweiligen Schwertern zuordenbar sind, was allerdings noch weiterer Prüfung bedarf.

Es kann davon ausgegangen werden, dass Nietkopf und -dorn nicht aus einem Stück gegossen wurden. Vorstellbar für die Herstellung des Nietkopfes wären ein Überfangguss (zweiteilige Form oder Wachsausschmelzverfahren) oder ein Gesenk. Die Verbindung mit dem Dorn ließe sich beispielsweise mit Gießen oder Löten, Schweißen sowie mit einer Gesenkszange erklären.

Bereits KAUFMANN (1998, 48) erkannte, dass die Härte von Nietstiften zur Befestigung der Griffschale am Heft der Kurzscherter vermutlich des besseren Durchtreibever-

mögens wegen gesteigert (auch im Vergleich zum Schwert) wurde. Diese Beobachtung bestätigt sich durch die hier vorliegenden Funde. Aufgrund des ausschließlich unkorrodierten Probenmaterials kann ein dafür verantwortlicher Korrosionseffekt ausgeschlossen werden.

Die zwei Spiralringe des Hortfundes von Nebra zeigen im Gegensatz zu allen anderen untersuchten Funden erhöhte Tellurwerte, lassen sich aber ansonsten in das Bild der Randleistenbeile, Nieten und Schwerter mit einreihen.

Mit 2,55 Masseprozent Zinn im Mittel zeigen die Messdaten der Schnittflächen der Himmelsscheibe von Nebra nur in den Hauptelementen Kupfer und Zinn auffällige Unterschiede zu den übrigen Artefakten des Hortfundes. Die einleuchtendste Erklärung dafür ist, dass dieser geringe Konzentrationszuschlag des Zinns absichtlich gewählt wurde, um optimale Bearbeitungsbedingungen für die zahlreichen Verzierungen zu haben.

Bei den Spurenelementen des Metalls der Himmelsscheibe besitzt lediglich Zink eine leichte Erhöhung. Allerdings befindet diese sich auch wieder nahe der Nachweisgrenze, weswegen die Mikrospurenelementmethode NAA nötig ist. Eine Absicht dahinter zu vermuten, ist sehr gewagt. Wahrscheinlicher ist eine herstellungsbedingte Abweichung, die weder für eine Legierung noch für eine lagerstättenspezifische Besonderheit spricht.

Sicher ist, dass den Blei- und Bismutwerten keine zu große Bedeutung beigemessen werden darf. Beide Elemente sind im festen Zustand mit Kupfer nahezu vollständig unmischbar und liegen keinesfalls homogen in der Kupfermatrix vor.

Die Zinnkonzentrationen der vier Schnittflächen von der Nebraer Himmelsscheibe schwanken um circa 5 %, was zugleich auch dem Messfehler der RFA entspricht. Zur Kontrolle wurden ebenso die Korrosionsflächen der funkenerosiv aus der Scheibe genommenen Probe mitgemessen. Dass sich dabei beispielsweise erhöhte Zinngehalte ergaben, verdeutlicht, welche korrosionsbedingten An- und Abreicherungsprozesse auf die Himmelsscheibe von Nebra einwirkten.

Dieser eben beschriebene elementbezogene Vergleich versucht zu klären, inwieweit bei den Fundobjekten des Hortes von Nebra von einer einheitlichen Metallzusammensetzung ausgegangen werden darf. Dabei interessiert Zinn nicht, denn es wurde zulegiert infolge funktionaler oder ästhetischer Beweggründe. Hier sind nur die Spurenelemente von Bedeutung. Handelt es sich um eine einheitliche Zusammensetzung, liegt die Vermutung nahe, ebenso eine herkunftsspezifische Metallzusammensetzung und damit eine Erzlagerstätte fassen zu können – allerdings müssen bestimmte Regeln beachtet werden.

Unstrittig ist, dass infolge der Erzverhüttung die chemische Zusammensetzung des gewonnenen Metalls verändert wird. Vorerst ist demzufolge keine Korrelation zwischen Erz und Fertigprodukt zu konstatieren. Dennoch ist es nicht aussichtslos, chemisch ähnlich zusammengesetzte Artefakte und Erze einer Lagerstätte zu finden. Der Grund ist der, dass nicht alle Elemente bei den Verhüttungsprozessen gleichmäßig verändert werden (PERNICKA 1990, 76). Außerdem müssen die Spurenelemente vorwiegend vom Kupfer bestimmt werden, damit eine Lagerstätte, nämlich die des Kupfers, erfasst werden kann (NIEDERSCHLAG et al. 2003, 69). Die hier vorliegenden Nebraer Objekte aus Kupfer-Zinn-Legierungen besitzen mindestens den 10fachen Kupferanteil im Vergleich zum Zinn, weswegen diese Bedingung erfüllt ist.

Bei den nun folgenden Herkunftsuntersuchungen werden nur die **chalkophilen** Elemente, welche ausschließlich von der chemischen Zusammensetzung des Erzes und nicht von der Herstellung abhängen, betrachtet. Während der vorwiegend reduzierenden Verhüttungsprozesse lassen sich diese ähnlich oder besser als Kupfer reduzieren. Somit begleiten die provenienzspezifischen Elemente Kupfer beim Weg aus dem Erz zum Metall und sind nahezu unverändert. Dieser „chemische Fingerabdruck“ ist von Interesse. (PERNICKA 1990, 76)

Daneben gibt es **lithophile** Elemente, die bevorzugt in die Schlacke gehen. Deren Gehalt im Artefakt ist somit wesentlich durch die Art und Weise der Prozessführung beim Verhüttungsvorgang sowie der Weiterverarbeitung geprägt und nicht durch die Zusammensetzung des Erzes. Des Weiteren beschreibt PERNICKA (1990, 77) eine Zwischengruppe an

Elementen als herstellungs- oder herkunftsaussagend. Ihre Zugehörigkeit hängt vom verhütteten Erz ab (**Tabelle 3-1**).

Tabelle 3-1 Zusammenstellung der Elemente – geordnet bezüglich ihrer Aussagekraft und Nutzung in der Archäometrie, vereinfacht nach PERNICKA (1999, 170, Table 1)

Herstellung	Provenienz und/oder Herstellung	Provenienz
Al, B, Ba, Be, Ca, Cr, Cs, Fe, Ga, Ge, Hf, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, P, Rb, S, Sc, SEE, Si, Sr, Ta, Ti, Th, U, V, W, Y, Zr	As, Cd, Co, In, Hg, Re, Sb, Se, Te, Tl	Au, Ag, Bi, Ir, Ni, Os, Pd, Pt, Rh, Ru
Sn > ca. 1 %	Sn < ca. 1 %	
Zn > ca. 5 %	Zn < ca. 5 %	
Pb > ca. 5 %	Pb < ca. 5 %	

Zur Auswertung der RFA-Messergebnisse wird sich im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit auf die in **Tabelle 3-1** rot markierten Elemente beschränkt, anhand derer potentielle Klassifikationen vorgenommen werden können. Diese Elementmuster gilt es zu erkennen.

Um zunächst die chemometrisch überprüfte Aussage einer einheitlichen chemischen Zusammensetzung der Nebraer Artefaktproben formulieren zu können, müssen doppellogarithmische Diagramme erstellt werden. Darin sind zwei Variable, hier zwei Elemente, mit dem Ziel der gleichzeitigen Betrachtung gegeneinander aufgetragen. Die logarithmische Ordinate- und Abszissenachse ist nötig, weil die geochemische Faustregel besagt, dass die Spurenelementverteilungen in der Natur oft ebenso logarithmisch sind. Um die provenienzspezifischen Verunreinigungen betrachten zu können, interessieren die Konzentrationsbereiche kleiner 0,1 Masseprozent und nicht die höheren, in der Regel zulegierten, also herstellungsspezifischen Konzentrationen. Letztere würden in einem linearen Diagramm bessere Beachtung finden. (PERNICKA 1990, 92f.)

Doppellogarithmische Diagramme gestatten ein problemloses Ablesen der Größenordnungsunterschiede zwischen jeweiligen Elementkonzentrationen. Dies ist vor allem bei niedrigen Gehalten durch die gestreckten Achsen von Vorteil.

Für die Untersuchung einer homogenen Metallzusammensetzung werden zwei Elementpaare herangezogen. Zum einen Nickel gegen Silber, weil beide Elemente die Verhüttungs- und Bearbeitungsprozesse stabil überleben, wodurch indirekte Auskünfte bezüglich des verwendeten Erzes und damit der Lagerstätte gegeben werden. Des weiteren Arsen gegen Antimon, die bei der Verhüttung oxidischen Erzes auch über die Provenienz Auskunft geben. (PERNICKA 1988, 191)

Zudem wurden diese Elementkombinationen gewählt, weil sie homogen in der Kupfermatrix verteilt und mittlerweile viele Arbeitsgruppen, z.B. NIEDERSCHLAG et al. (2003), diesem Schema gefolgt sind, wodurch eine schnelle und unkomplizierte Vergleichbarkeit gewährleistet wird.

Nach der Auswahl der Elemente folgt die chemometrische Betrachtung. „Chemometrie ist die chemische Disziplin, bei der mathematische und statistische Methoden verwendet werden [...] zur Gewinnung maximaler chemischer Information bei der Analyse chemischer Daten.“ (OTTO 1997, 1). Wie bereits erläutert, eignet sich dafür die Darstellung der Messergebnisse (**Tabelle A-3-1** im Anhang) in doppellogarithmischen Diagrammen. Erstellt wurden diese mit dem Statistikprogramm STATGRAPHICS Plus 5.0. Mit der RFA gemessene Obergrenzen sind mit Pfeilen gekennzeichnet.

Abbildung 3-2 und **Abbildung 3-3** zeigen die unter obig genannten Gesichtspunkten ausgewählten Elementkonzentrationen.

Plot of Ni vs Ag_Himmelsscheibe und Beifunde

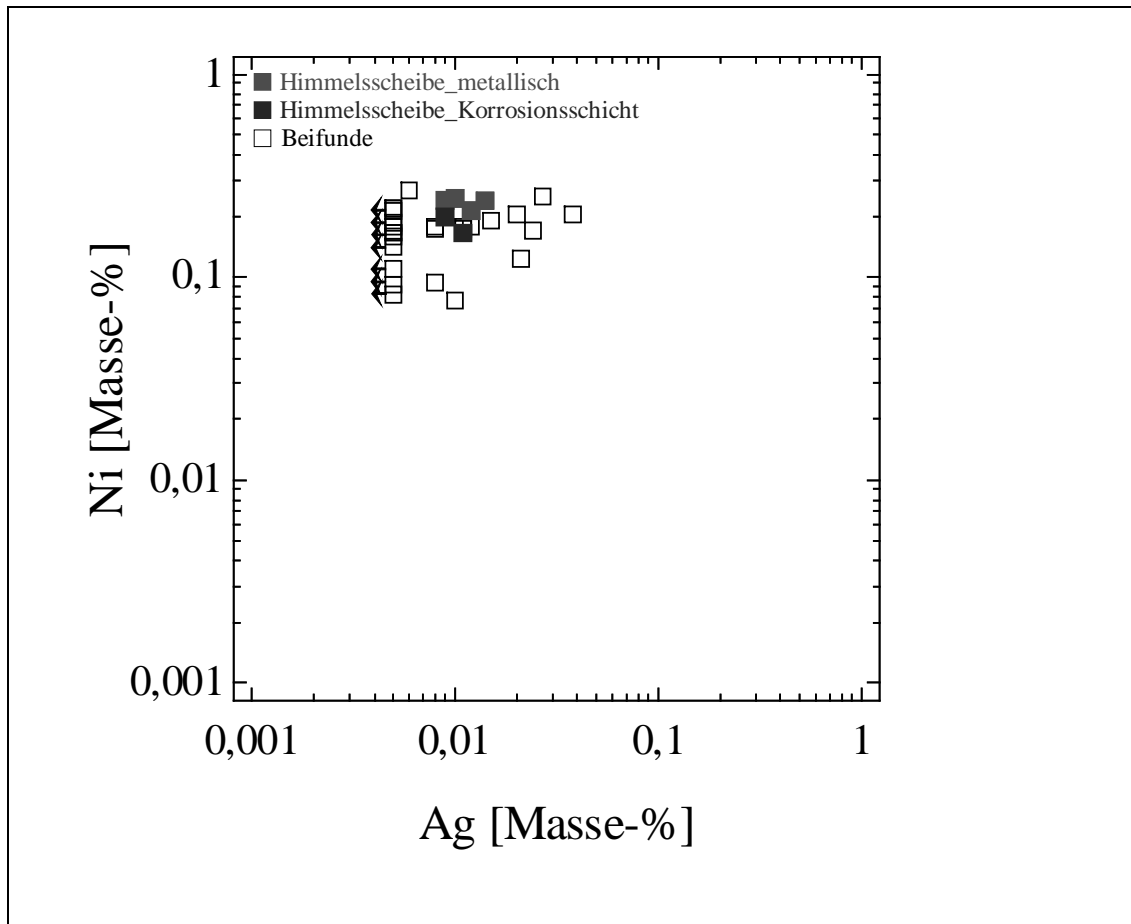


Abbildung 3-2 *doppellogarithmisches Diagramm der provenienzspezifischen Elemente Nickel gegen Silber (die verwendete Symbolgröße entspricht in etwa der des Messergebnisses inklusive $\pm 10\%$ zufälliger Messfehler)*

Abbildung 3-2 gibt die lagerstättenspezifischen Elemente Nickel über Silber von der Nebraer Himmelsscheibe und der Beifunde in einem Diagramm aufgetragen wieder. Deutlich zeichnet sich dabei eine dichte Punktwolke ab, in die hinein sich die Himmelsscheibenergebnisse gut einfügen. Die Messungen an der Korrosionsschicht der Scheibe, hier im Vergleich mit aufgetragenen, zeigen im Gegensatz zu den Messungen der Schnittflächen leicht erniedrigte Nickelgehalte. Auffällig ist ferner, dass bei den meisten Silberwerten die Nachweisgrenze der RFA nicht ausreicht, weswegen die Notwendigkeit einer Superspurenmethode, der NAA, erneut deutlich wird. Die Silberwerte streuen insgesamt von $< 0,005$ (Nachweisgrenze) bis 0,04, die Nickelwerte von 0,077 bis 0,264 Masseprozent. Die geringe Streubreite bis zu maximal einer Größenordnung spricht für eine homogene Metallzusammensetzung und damit mit größter Wahrscheinlichkeit für ein aus einer Lagerstätte stammendes Ausgangserz. PERNICKA (1990, 72f.) zählt mehrere untersuchte Erzlagerstätten auf, die laut den analysierten Elementen Variationsbreiten von ein bis zwei Größenordnungen aufweisen. Darauf aufbauend gibt es keinen ersichtlichen Grund, diese scheinbar typische Streubreite von Elementgehalten der Erze nicht auch auf die daraus gewonnenen Metalle zu übertragen. Bei den Variationen der untersuchten Metallartefakte (**Abbildung 3-2**, **Abbildung 3-3**) kann der Schritt gewagt werden, von einer gemeinsamen Lagerstätte als Rohstofflieferant auszugehen.

Plot of Sb vs As_Himmelsscheibe und Beifunde

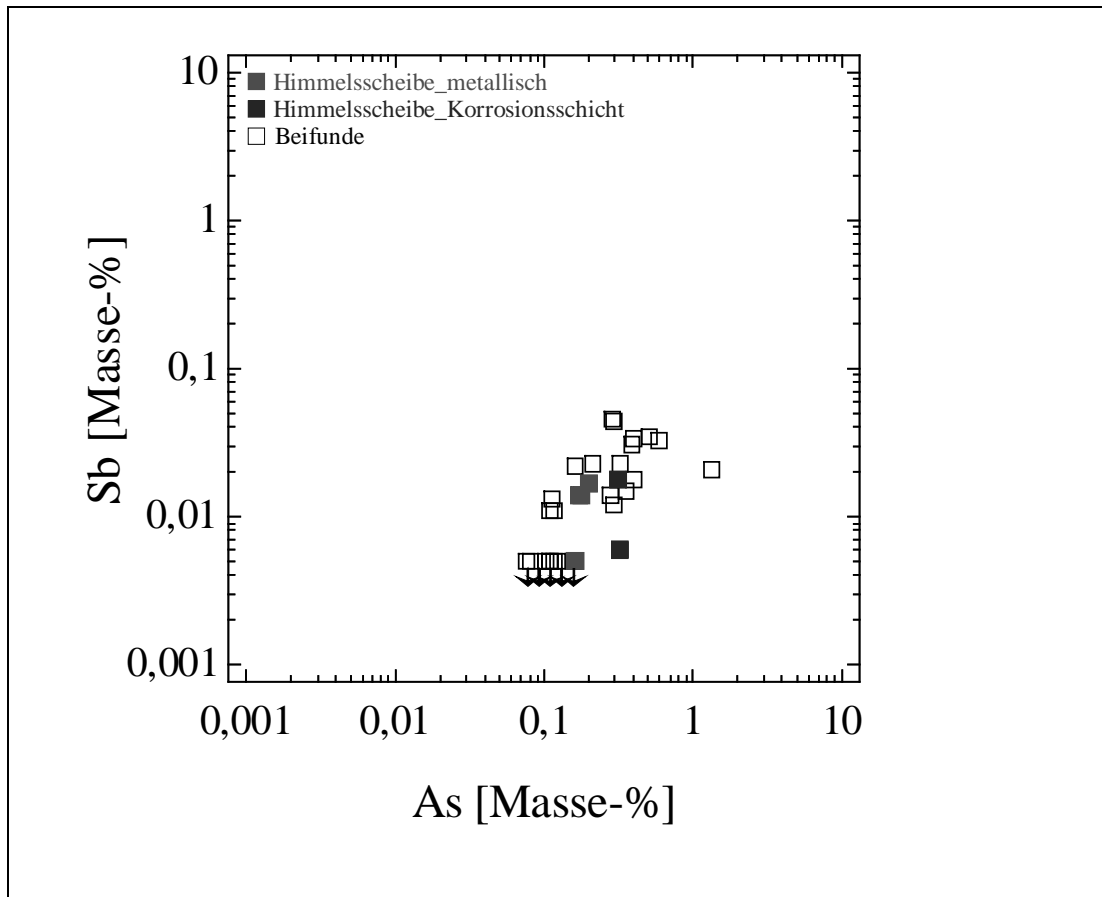


Abbildung 3-3 *doppellogarithmisches Diagramm der provenienz-/herstellungsspezifischen sowie chemisch verwandten Elemente Antimon gegen Arsen (die verwendete Symbolgröße entspricht in etwa der des Messergebnisses inklusive $\pm 10\%$ zufälliger Messfehler)*

Der **Abbildung 3-3** ist auf einen Blick die Verteilung der metallurgie- und/oder provenienzspezifischen chemisch verwandten Elemente Antimon und Arsen zu entnehmen. Auch hier wiederholt sich das bereits in **Abbildung 3-2** angedeutete Bild, wenngleich die RFA für die Antimonwerte teilweise nicht ausreichend nachweisstark ist. Dennoch streuen die Messwerte nur eine Größenordnung, was auch für eine absichtliche Prozessführung bei der Herstellung und ein einheitlich benutztes Erz spricht. Bei dem Ausreißer, der zum Dorn des Schwertes (FG-020690) gehört, lag eine vollständig korrodierte Probe vor. Diese darf demzufolge als nicht repräsentativ, zumal bei Beachtung der geringen Einwaage, eingeschätzt werden. Die Arsenwerte von minimal 0,08 bis maximal 1,35 Masseprozent, wobei letztgenannter Wert dem Ausreißer (FG-020690) zuzuordnen ist, und die Antimongehalte erstrecken sich von $< 0,005$ bis 0,045 Masseprozent (**Tabelle A-3-1** im Anhang). Wie nicht anders zu erwarten, weisen die in die Elementwolke eingebetteten Daten der Himmelsscheibe von Nebra höhere Arsenwerte in der Korrosionsschicht auf.

Analog zu LUTZ/PERNICKA (im Druck, 13) wurden An- und Abreicherungs faktoren der Himmelsscheibe (**Tabelle 3-2**) mit

$$\text{An- / Abreicherungs faktor} = \frac{\text{Oberflächengehalte (Korrosionsschicht)}}{\text{Probenahmegehalte (Schnittfläche)}} \quad (\text{Formel 3-1})$$

bestimmt und ergaben Anreicherungen der Elemente Zinn, Kobalt, Gold und Arsen sowie Abreicherungen an der Oberfläche (Korrosionsschicht) der Elemente Silber, Bismut, Kupfer, Eisen, Nickel, Blei, Antimon und Zink. Beeinflussende Faktoren für An- und Abreicherungen

sind unter anderem Bodenlagerung, Wassergehalt, Metallzusammensetzung, Zeit und Temperatur. Im Rahmen dieser Arbeit soll darauf nicht näher eingegangen werden. Es sei nur so viel gesagt, dass die errechneten Faktoren wieder beweisen, wie unerlässlich Analysen am unkorrodierten Metall sind, denn die unmittelbar der Atmosphäre ausgesetzten Flächen archäologischer Metallfunde zeigen Veränderungen gegenüber dem authentischen, „unberührten“ Metall.

Tabelle 3-2 An- und Abreicherungs-faktoren berechnet mit den ausreißerunempfindlichen Medianen aus **Tabelle A-3-2** im Anhang

Element	An- und Abreicherungs-faktoren
Ag	0,91
As	1,8
Au	1,25
Bi	0,83
Co	2,42
Cu	0,98
Fe	0,6
Ni	0,76
Pb	0,5
Sb	0,86
Sn	1,58
Te	1
Zn	0,3
Se	nicht berechnet wegen Nachweisgrenze

Die in **Tabelle A-3-2** im Anhang aufgeführten Variationskoeffizienten, also die relativen Standardabweichungen, sind definitionsgemäß auf den Mittelwert bezogen und nur teilweise so groß, weil die Elementgehalte bei sehr niedrigen Werten liegen, oftmals unter oder nahe der Nachweisgrenze. Bei derartigen Fällen ist dann auch der Analysenfehler größer.

Zusammenfassend lässt sich anhand der doppellogarithmisch aufgetragenen Messwerte der herkunftsaussagenden Elemente schlussfolgern, dass es sich bei der Himmels-scheibe und den Beifunden von Nebra unter Zugrundelegen der gerätespezifischen und geräteeigenen Nachweisgrenzen um eine chemisch homogene Metallzusammensetzung handelt. Die hier verwendete Kupfersorte ist arsen- und nickelhaltig. Die Ergebnisse der zur makroskopischen chemischen Materialanalyse eingesetzten RFA bestärken damit die Authentizität des Fundzusammenhangs und werden noch mit einer unabhängigen zweiten Methode, der Neutronenaktivierungsanalyse, verglichen.

Doch zuvor werden potentielle Herkunftsregionen des für die Himmelsscheibe²⁰ verwendeten Metalls anhand einer Kartierung aufgezeigt. Dabei sollen Ballungsgebiete von Fundorten mit chemisch der Himmelsscheibe ähnelnden Funden aufgespürt werden, um Rückschlüsse auf mögliche fundortnahe Lagerstätten zu ziehen oder wenigstens potentielle Regionen herauszufiltern, die als Rohstofflieferant in Frage kommen. Es wird allgemein angenommen, dass in vorgeschichtlicher Zeit vorwiegend nahe dem Fundort gelegene Lager-

²⁰ Aufgrund der chemischen Ähnlichkeit zwischen den Fundobjekten von Nebra sind diese Gebiete ebenso für die Beifunde zutreffend. Doch interessiert hier vor allem die Himmelsscheibe, weswegen die Messergebnisse am unkorrodierten Himmelsscheibenmetall als Einzelanalyse von den übrigen Artefakten abgetrennt und zur Kartierung genutzt wurden.

stätten abgebaut wurden. Die Ergebnisse derartiger Kartierungen sind als signifikant richtungsweisend zu verstehen.

Die metallanalytisch ähnlichen Funde befinden sich in der Stuttgarter Analysendatenbank mit 41808 Einträgen analysierter Artefakte (**Tabelle A-3-3** im Anhang). Diese EDV-Datenbank wurde im Rahmen des Stuttgarter Metallanalysenprojekts (SMAP, 1990 – 1994) aus bis dahin durchgeführten Artefaktanalysen erstellt. Im Jahre 1997 enthielt die Datenbank bereits circa 38500 Analysen. Mit dem nachfolgenden FMZM-Projekt (Frühe Metallurgie im zentralen Mitteleuropa, 1995 – 1996) wurden etwa 2800 Analysen neolithischer und frühbronzezeitlicher archäologischer Fundobjekte aus dem Osten Deutschlands und von bayrischen Fundplätzen realisiert. (KRAUSE im Druck)

Für die Kartierungen wurden insgesamt zwei Abfragen mit unterschiedlich großen Intervallbreiten der herkunftsanzeigenden Spurenelemente in der Stuttgarter Analysendatenbank ausgeführt: der kleinere Faktor ± 2 sucht Funde ähnlicher Spurenelementzusammensetzung heraus. Es interessieren nur die bereits oben benannten, nicht absichtlich bei der Herstellung zugegebenen Elemente, nämlich Nickel, Silber, Arsen und Antimon. Der größere Faktor ± 4 spiegelt die Streuung dieser Spurenelemente innerhalb einer Lagerstätte wieder. Die gefundenen Objekte sind lagerstättenähnlich. Die berechneten Intervallbreiten sind in **Tabelle 3-3** zusammengestellt. (KLASSEN/PERNICKA 1998, 40f.)

Tabelle 3-3 mit ausreißerunempfindlichen Medianen (**Tabelle A-3-2** im Anhang) berechnete Suchintervallbreiten für die Stuttgarter Analysendatenbank

Fundgruppe	Element	Count	Median [Masse- %]	Faktor ± 2 (Median)	Faktor ± 4 (Median)
Himmelsscheibe	Ag	4	0,011	0,0055 bis 0,022	0,00275 bis 0,044
	As	4	0,175	0,0875 bis 0,35	0,04375 bis 0,7
	Ni	4	0,238	0,119 bis 0,476	0,0595 bis 0,952
	Sb	4	0,014	0,007 bis 0,028	0,0035 bis 0,056

Die anhand dieser Suchkriterien in der Datenbank gefundenen Vergleichsfunde sind in **Tabelle A-3-4** und **Tabelle A-3-5** im Anhang geordnet nach Großräumen zu finden. Es konnten 121 analytisch der Himmelsscheibe ähnliche Artefakte gefunden werden. Infolge des größeren Intervalls konnten entsprechend mehr bei den lagerstättenähnlichen, nämlich 1037 Vergleichsfunde konstatiert werden.

Die relative Häufigkeitsverteilung der Vergleichsfunde bezüglich der Großräume (nach SANGMEISTER) wurde anschließend in **Abbildung 3-4** und **Abbildung 3-5** dargestellt. Wichtig ist in diesem Zusammenhang zu betonen, dass die Angaben jeweils auf die Anteile der Gesamteinträge normiert sind, wodurch forschungsbedingte Überrepräsentativitäten einzelner Fundregionen mit den anderen vergleichbar werden. Der **Abbildung 3-4** ist zu entnehmen, dass eine überproportionale Häufigkeit ähnlich zusammengesetzter Funde mit einem Häufigkeitsfaktor größer 1 in Südwest-Mitteleuropa, Österreich, Polen, Skandinavien und Island, Ostdeutschland sowie in Böhmen und Mähren zu finden ist.

Diese Gebiete sind nahezu (außer Island und Südwest-Mitteleuropa) mit der Verbreitung der Aunjetitzer Kultur und der die Beifunde bildenden spätfrühbronzezeitlichen Artefakttypen identisch.

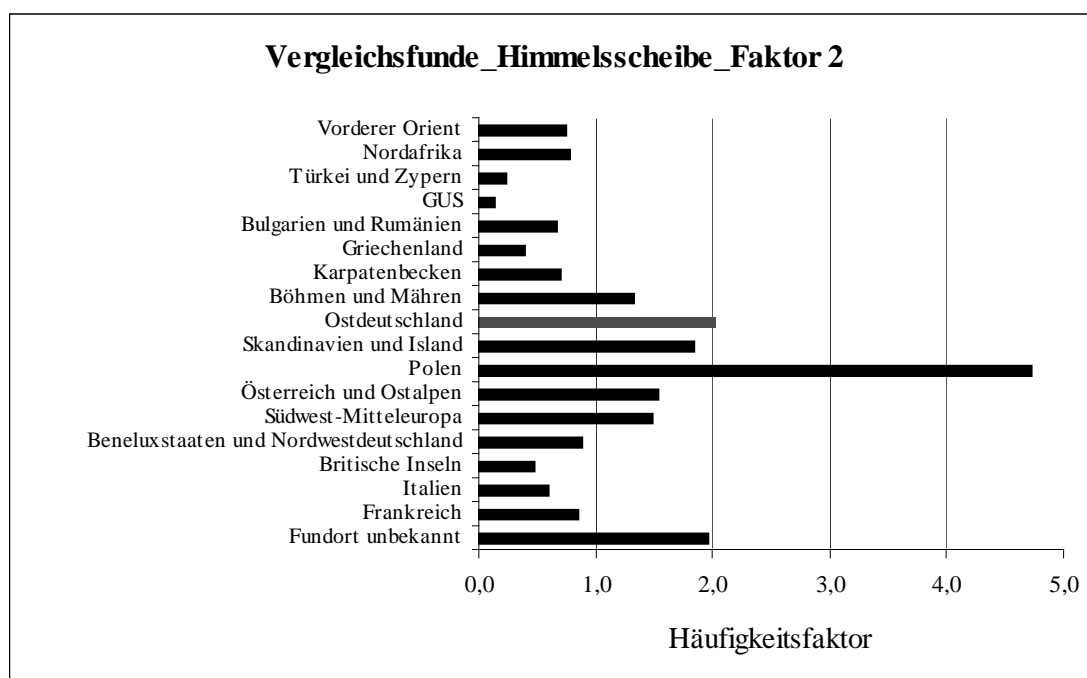


Abbildung 3-4 Häufigkeitsfaktoren der analytisch ähnlichen Vergleichsfunde bezüglich deren Fundregionen

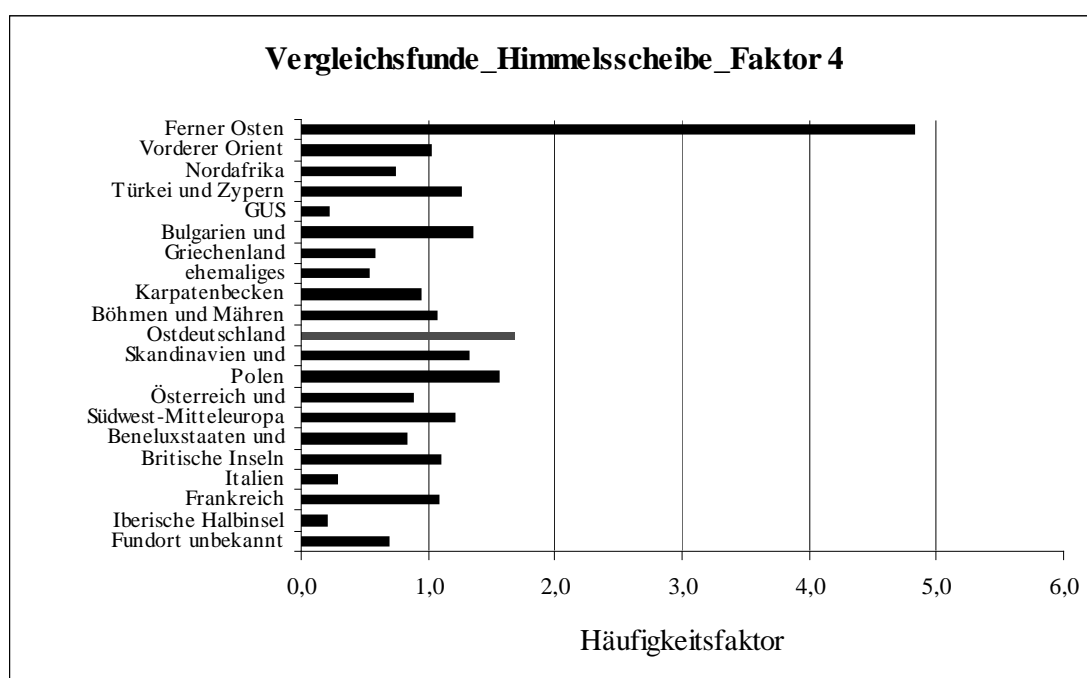


Abbildung 3-5 Häufigkeitsfaktoren der lagerstättenähnlichen Vergleichsfunde bezüglich deren Fundregionen

Die Vergleichsfunde innerhalb der größeren Streubreite in der **Abbildung 3-5** sind bevorzugt in den Großregionen Frankreich, Britische Inseln, wieder Südwest-Mitteuropa, Polen, Skandinavien und Island, ebenso in Ostdeutschland, Böhmen und Mähren, sowie in Bulgarien und Rumänien, Türkei und Zypern, Vorderer Orient und Fernen Osten zu finden. Letztgenanntes Kulturgebiet weist, wie ein Blick in die **Tabelle A-3-5** im Anhang verrät, nur einen Vergleichsfund auf, weswegen dieser Hinweis nicht überbewertet, aber dennoch

beachtet werden sollte. Insgesamt beschreibt die Häufigkeitsverteilung der **Abbildung 3-5** ein nahezu mit der **Abbildung 3-4** identisches Bild: deutlich zeichnet sich die Verwendung von lokalem Kupfer für die Herstellung der Bronzescheibe ab. Diese Erkenntnis kann dann auch auf die Beifunde infolge der chemischen Einheitlichkeit übertragen werden.

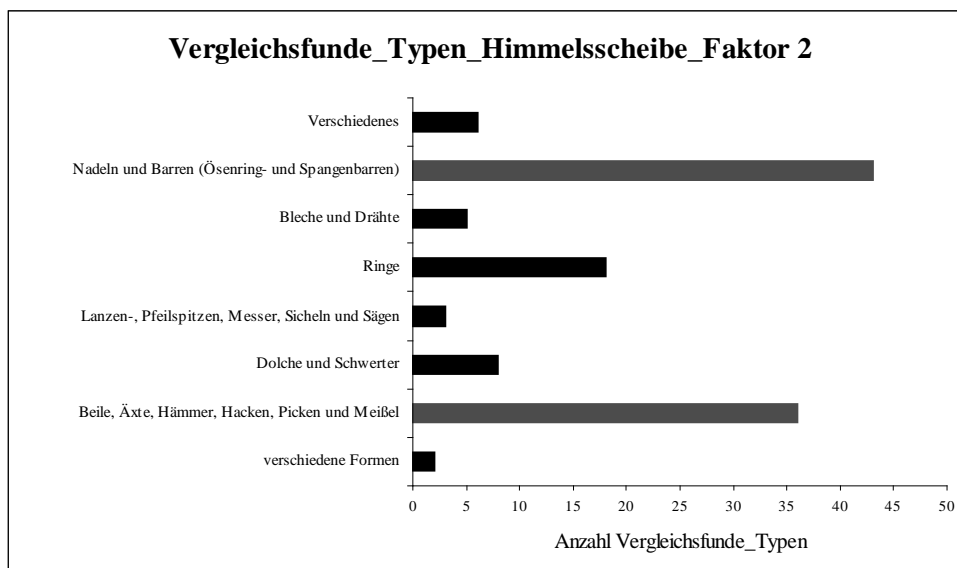


Abbildung 3-6 Häufigkeitsdiagramm der Typen nach dem Typenschlüssel SAM (KRAUSE im Druck b, 8ff.) von den analytisch ähnlichen Vergleichsfunden

Um die Verbreitung der Fundorte dieser Vergleichsanalysen in einer Karte darzustellen, wurde eine Kartierung angefertigt, die in **Abbildung 3-7** zu sehen ist. Dazu sind geografische Koordinaten²¹, nämlich die Längen- und Breitengrade, nötig. Ausgeführt wurden die computergestützten Kartierungen mit dem Softwareprogramm MapInfo Professional 5.0. Nach dem Einlesen der ausgewählten Datensätze wurden die Fundorte in einer Karte dargestellt, wodurch schnell regionale und überregionale Zusammenhänge sowie Strukturen zwischen geografischen Koordinaten und archäologischen Informationen visualisiert werden (MAPINFO CORPORATION 1992–1998, 2). Analytisch dem „Nebraer Metall“ ähnliche Vergleichsfunde sind verstärkt in Regionen Ost (u.a. Harz)- und Nordostdeutschlands sowie Westpolens (Elbe-Odermündungs-Gebiet), in Dänemark, Irland, im westlichen Karpatenbecken, Rhône-Donau-Gebiet, entlang der Donau (v.a. Österreich, Ungarn) sowie im Norden und Süden des Zentralmassivs zu fassen (**Abbildung 3-7**). Inwieweit dabei von einer Rohstoffquelle oder von mehreren Lagerstätten mit gleicher Streubreite der Elementkonzentrationen ausgegangen werden darf, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden. Hier können infolge durchgeführter chemischer und statistischer Auswertungen ausschließlich wahrscheinlichste Kandidaten aufgezeigt werden. Dennoch ist eine lokale Provenienz des Rohstoffes für die Himmelsscheibe von Nebra auch durch diese Darstellungsweise sehr wahrscheinlich. Ein Blick auf die Häufigkeitsdarstellung in **Abbildung 3-6** zeigt, dass die analytisch mit der Nebraer Scheibe vergleichbaren Funde nach dem Typenschlüssel SANGMEISTER`s (KRAUSE im Druck b, 8ff.) überwiegend Ösenring- und Spangenbarren (späte

²¹ Wenn keine Einträge vorhanden waren, konnten diese Fundorte auch nicht kartiert werden. So reduzierte sich die Anzahl der kartierten Fundorte bei Faktor ± 2 auf 96 und bei ± 4 auf 796 Vergleichsfunde.

Frühbronzezeit) sowie Randleistenbeile sind. Zudem kann mit gebührender Vorsicht bezüglich teilweise veralteter absolutchronologischer Zeitangaben der in der SMAP-

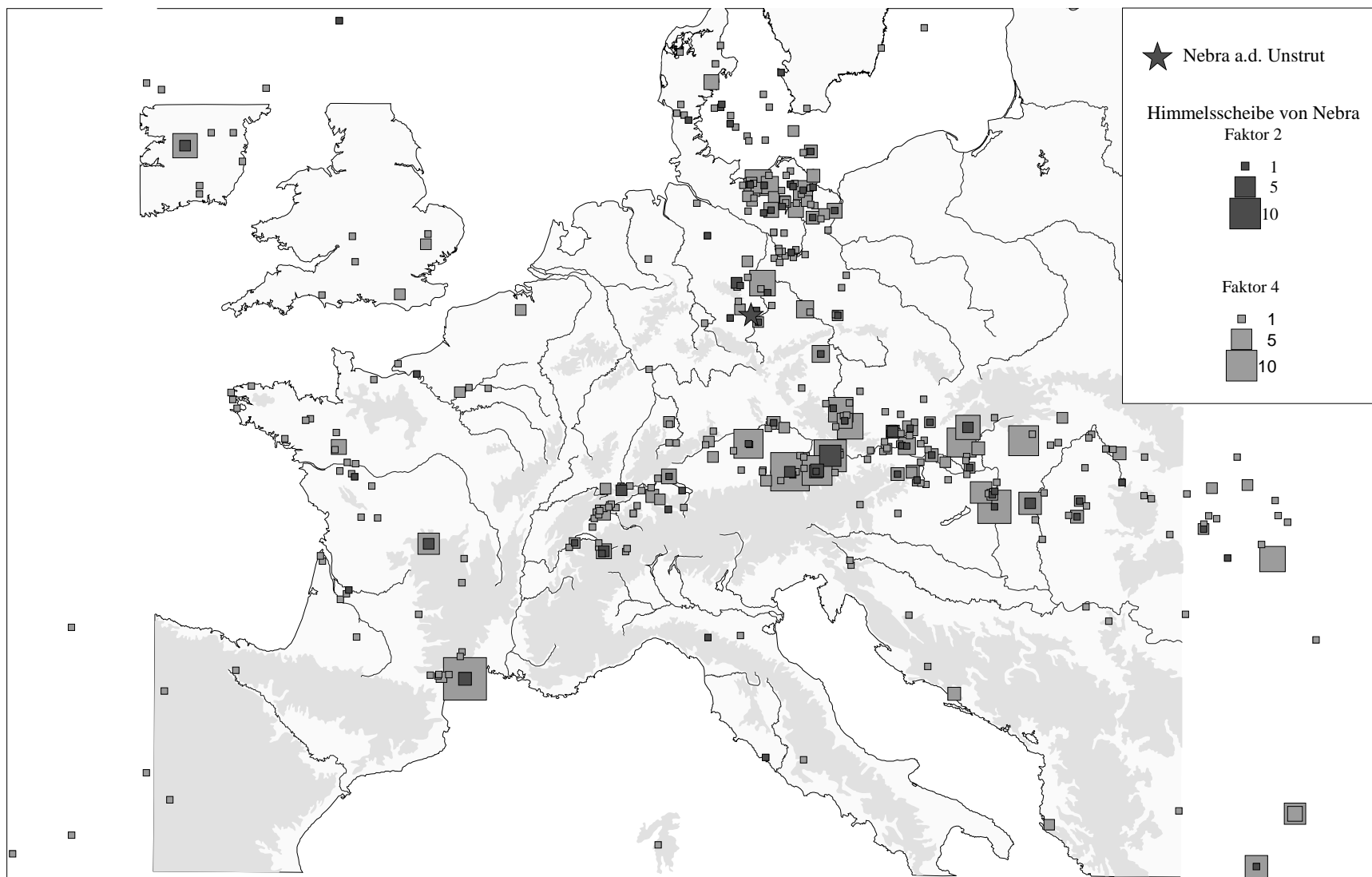


Abbildung 3-7 Kartierung der analytisch (77 Fundorte kartiert)- und lagerstätten-ähnlichen (421 Fundorte kartiert) Vergleichsfunde von der Himmelsscheibe von Nebra; je nach Symbolgröße handelt es sich um 1, 5 oder um 10 Vergleichsfunde von einem Fundort (Grundkarte von Dr. STEFAN SCHWENZER)

Datenbank (KRAUSE im Druck b, 2f.) aufgeführten Datierungen der herausgesuchten Vergleichsproben, die von den Archäologen vorgenommene Datierung der Himmelsscheibe von Nebra bestätigt werden. Diese Aussage basiert auf der Annahme, dass in einer Region zeitgleiche Artefakte mit gleichem provenienzenspezifischem Spurenelementmuster infolge identischer Rohstoffquellen verbreitet sind. Unterstützt werden die soeben formulierten Erkenntnisse durch die kartierten lagerstättenähnlichen Vergleichsfunde (**Abbildung 3-7**). Die Tendenz der Verbreitung bleibt erhalten.

Als weiterer Schritt zur Provenienzbestimmung des verwendeten Rohstoffmaterials ist die Bleiisotopenmethode zu verstehen. Wünschenswert wäre, die Bleiisotopenverhältnisse der Metallartefakte des Hortes von Nebra, speziell der Himmelsscheibe, und der in den herausgefilterten potentiellen Herkunftsgebieten vorkommenden Erze sowie andere Artefakte zu vergleichen.

Sich aus beiden Methoden ergebende, indirekte Beweise für interkulturellen Austausch, sei es in Form von Handel (Fertigprodukte, Rohmaterialien) oder sonstigen Kontakten (Präsente) usw. gewähren einen Einblick in die frühere, schriftlose Zeit.

Außer der RFA wurde eine weitere empfindlichere archäometrische Untersuchungsmethode, die NAA, zur Untersuchung der Artefakte des Hortes von Nebra angewandt. Derartige Kombinationen mit anderen Methoden sind nötig, um beispielsweise alle archäometrisch relevanten Elemente fassen zu können. Hierbei waren speziell die Konzentrationen der Spurenelemente Gold und Silber von Interesse. Ein Blick in **Tabelle 3-1** verrät, dass auch Gold zu den provenienzanzeigenden Elementen zählt. Allerdings ist Gold, genau wie Silber, mittels der RFA nicht empfindlich genug ermittelbar. Die Ergebnisse der instrumentellen Neutronenaktivierungsanalyse sind in der **Tabelle A-3-6** im Anhang zusammengestellt, wobei die Spurenelementkonzentrationen mittels der absoluten Einwaagen geeigneter Isotope, entweder kurz- oder langlebig, berechnet wurden.

Die bei der ersten Messung erfassten und auch für die Berechnung genutzten kurzlebigen Isotope sind ^{76}As und ^{198}Au . Nach einer Abklingzeit von vier Wochen erbrachten die erneut vermessenen Proben die langlebigen Nuklide ^{58}Ni , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{124}Sb , ^{65}Zn sowie ^{59}Fe , um nur die für diese Arbeit relevanten zu nennen.

Zunächst fällt bei der Betrachtung der Messergebnisse (**Tabelle A-3-6** im Anhang) auf, dass die schon in den Ergebnissen der RFA gezeigte, im Vergleich zu anderen Objekten erhöhte Zinkkonzentration der Himmelsscheibe von Nebra (FG-020984) durch die NAA bestätigt werden konnte. Der bereits angesprochene hohe Goldgehalt der Tauschierung des Schwertes ohne Griff (FG-020686) wurde dagegen mit der NAA nicht be-, sondern entkräftet. Die angegebene Konzentration ist mit 0,63 ppm fast der zehnfache Teil der Nietkopf I-Probe (FG-020691). Mit 580,20 ppm Silber fällt die Probe des Schwertes mit der Nummer FG-020701 deutlich aus der Masse der anderen Werte heraus. Die Gegenüberstellung mit der Probe desgleichen Objekts (FG-020700) lässt vermuten, dass es sich möglicherweise um Korrosionsmaterial handelt, welches infolge der Probenahme mit aufgenommen wurde.

Analog zu **Abbildung 3-2** und **Abbildung 3-3** ist das doppellogarithmische Diagramm Gold über Silber aufgetragen worden (**Abbildung 3-8**). Wie bereits aus den ersten Trendbeobachtungen hervorgeht, tritt der Nietkopf I (FG-020691) als abseits von der Mehrheit der Daten gelegener Messpunkt erneut deutlich visualisiert hervor. Die niedrigsten Gold- und Silbergehalte weisen in identischer Art und Weise die beiden Spiralringe (FG-020702, FG-020703) auf. Die Probe der Himmelsscheibe ist auch hier wieder inmitten der homogenen Punktwolke der Werte zu finden.

Zusammenfassend lässt sich daher feststellen, dass die Streuung der Spurenelementkonzentrationen von ein bis maximal zwei Größenordnungen auch nach dieser Mikrospuren-

elementanalyse durchaus noch für eine einheitliche Metallsorte und somit für eine Provenienz spricht, wodurch der bereits mit den Daten der energiedispersiven Röntgenfluoreszenz-

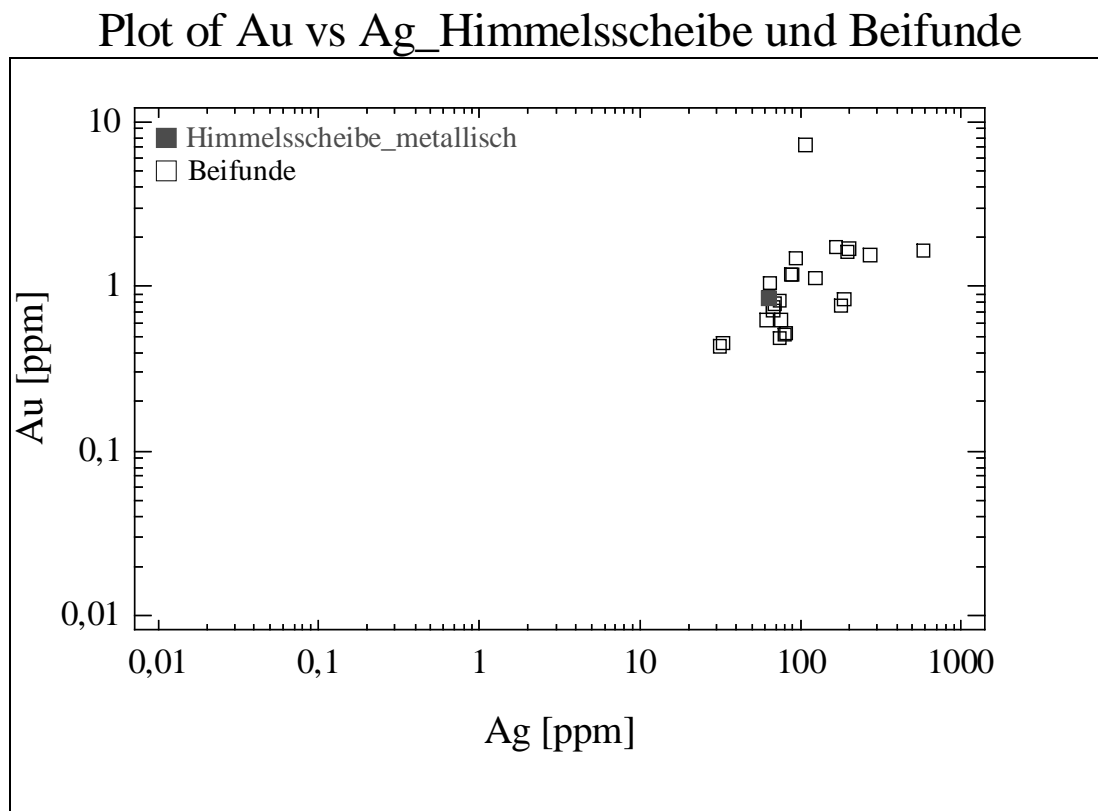


Abbildung 3-8 *doppellogarithmisches Diagramm der provenienzspezifischen und chemisch verwandten Spurenelemente Gold gegen Silber (die verwendete Symbolgröße entspricht in etwa der des Messergebnisses inklusive ± 2 bis 5 % zufälliger Messfehler)*

Was die Himmelsscheibe und deren Beifunde des Hortfundes von Nebra anbelangt, interessiert vorrangig, woher das Ausgangsmaterial stammt und inwieweit von einer chemischen Zusammensetzung und damit von einer Metallsorte, die eine gemeinsame Herkunft impliziert, ausgegangen werden darf. Die einheitliche chemische Zusammensetzung der chalkophilen Spurenelemente scheint indes sicher, unter anderem auch in Anbetracht der grafischen Darstellungen (**Abbildung 3-2**, **Abbildung 3-3**, **Abbildung 3-8**). Es gibt neben der chemischen Spurenelementzusammensetzung noch die weiterführende Möglichkeit, mit den Isotopenverhältnissen des Bleis, Materialgruppen und Lagerstättenzuordnungen vorzunehmen. Dazu müssen sowohl die bleihaltigen Metallartefakte des Hortfundes von Nebra als auch potentielle Erzproben hinsichtlich ihrer Bleiisotopie untersucht und verglichen werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich die Isotopenverhältnisse der Artefakte analysiert, um Aussagen über die isotopische Einheitlichkeit formulieren zu können. Bereits in vergangenen Jahren untersuchte Erze mit gleichen Bleiisotopenverhältnissen und chemischer Zusammensetzung wie die Artefakte und damit potentielle, in prähistorischen Zeiten abbauwürdige Lagerstätten zu finden, wäre einem ausgesprochenen Glücksumstand zuzuschreiben, was neben neuen Erzanalysen unbedingt Gegenstand zukünftiger intensiver Forschungen sein sollte.

Grundlegendste Voraussetzung für diese Methode stellt die Bildung der stabilen Bleiisotopenverhältnisse dar. Während der Lagerstättengenese von Blei- und bleihaltigen Erzen trennt sich das Blei von den radioaktiven Elternkernen Thorium und Uran, weswegen das Mengenverhältnis der stabilen Bleiisotope $^{22} - ^{204}\text{Pb}$, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb – nicht mehr verändert wird. Die unterschiedlichen Verhältnisse jeweiliger Erzvorkommen erklären sich durch die ständigen Zerfälle von ^{232}Th und ^{235}U sowie ^{238}U zu den stabilen Bleiisotopen mit Ausnahme des seit Erdentstehung gleichgebliebenen, primordialen ^{204}Pb (MOMMSEN 1987, 164). Erzvorkommen, die unterschiedliche Bleiisotopenverhältnisse besitzen, wurden demzufolge auch zu geologisch verschiedenen Zeiten gebildet. Der bedeutendste Vorteil gegenüber der Betrachtung herstellungsspezifischer Spurenelemente stellt die Tatsache dar, dass durch chemische Prozesse, zum Beispiel die Erzverhüttung, das Bleiisotopenverhältnis nicht messbar verändert wird. Dadurch ist die Möglichkeit gegeben, dieses Verhältnis noch am Endprodukt – also am Artefakt – zu ermitteln, ohne den Herstellungsweg kennen zu müssen (BEGEMANN et al. 1987, 269). Wichtig bei der Anwendung dieser Methode zur Herkunftsbestimmung des Kupfers ist, dass das Blei als Verunreinigung des Kupfererzes mit ins Kupfer, dem Rohmaterial des Artefakts, gelangte und nicht absichtlich aus einer anderen Quelle zulegiert wurde. Letztgenanntes kann aber bei einer Konzentration von unter 5 Masseprozent, hier sogar unterhalb ein Masseprozent, ausgeschlossen werden (PERNICKA 2000a, 1026). Andernfalls würde sich eine Herkunftsbestimmung auf den Bleizusatz beschränken. Außerdem muss der Rohstoff aus einem Erzkörper stammen und keine Materialmischung unterschiedlicher Lagerstätten darf vorliegen, da sonst die Gefahr der Verfälschung der Isotopenverhältnisse besteht. In der Literatur begegnet man der Meinung, dass mit wachsendem Alter der Artefakte, eine Mischung von Materialien als unwahrscheinlich betrachtet wird und deswegen die Isotopenanalyse gute Anwendung findet. Bei den Fundobjekten des Hortes von Nebra handelt es sich um Kupfer-Zinn-Legierungen der Spätphase der Frühbronzezeit. Hierbei muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass auch vorwiegend das Kupfer den Bleigehalt einbringt, um Aussagen bezüglich der Provenienz des Kupfers treffen zu können. Die **Tabelle A-3-1** im Anhang zeigt, dass die Artefakte mindestens den zehnfach größeren Kupferanteil im Vergleich zum Zinn besitzen, weswegen die Spurenelemente, isotopisch und chemisch gesehen, vom Kupfer bestimmt werden (NIEDERSCHLAG et al. 2003, 69).

Mit den mittels der MC-ICP-MS sehr genau bestimmbaren Bleiisotopenverhältnissen lassen sich indirekt Aussagen zum Beispiel zu Handelswegen einer bestimmten Zeit, Verbindung Fundort zu Rohstoffliefergebiet, Kulturkontakte, alte Metallurgie und Abbauzeitraum der Quellen ableiten. Diese Isotopenanalyse liefert aber eindeutige Aussagen nur dahingehend, dass infolge der Bleiisotopenverhältnisse ganz klar Herkunftsorte für das verwendete Rohmaterial ausgeklammert werden können; derartige Angaben werden auch als ausschließende Aussagen bezeichnet (BEGEMANN et al. 1989, 276). Eine positive Zuordnung einer Lagerstätte ist nicht eindeutig, da Überlappungen von Isotopenverhältnissen unterschiedlicher Erzquellen möglich sind. Gründe für derartige Überschneidungen können ähnliche Bedingungen und Zeitpunkte der Lagerstättenbildung innerhalb einer und auch mehrerer Regionen sein sowie die Tatsache, dass die Klassifizierung der Lagerstätte nur anhand drei Isotopenverhältnissen erfolgt. Dadurch besteht eine erhöhte Gefahr, dass zwei unterschiedliche Lagerstätten zufällig den gleichen sogenannten Fingerabdruck besitzen (PERNICKA et al. 1984, 583). Bei Überschneidungen kann ein Ausweg beispielsweise die Spurenelementanalyse bieten, die bei der Bewertung der Bleiisotope mit berücksichtigt wird.

Die vom Auswerteprogramm des MC-ICP-MS gelieferten Messergebnisse mit 5 signifikanten Stellen sind mit den zugehörigen analysierten Proben des Hortfundes von Nebra in der **Tabelle A-3-7** im Anhang zusammengestellt. In **Abbildung 3-9** und **Abbildung 3-10** sind drei stabile Bleiisotope, mit Ausnahme des primordialen ^{204}Pb , dargestellt. Bevorzugt

²² Allgemeine Bleizusammensetzung: ^{204}Pb (1,4 %), ^{206}Pb (24,1 %), ^{207}Pb (22,1 %) und ^{208}Pb (52,4 %).

werden diese Isotope als Häufigkeitsverhältnisse normiert auf ^{206}Pb , wie im hier vorliegenden Fall, genutzt. Die Messwerte inklusive der experimentellen Unsicherheit von ± 300 ppm sind in der **Abbildung 3-9** und **Abbildung 3-10** in einem sogenannten Dreisotopendiagramm, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ gegen $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, aufgetragen. Damit wird gewährleistet, dass eine schnelle Vergleichbarkeit mit anderen Daten ohne größeren Aufwand möglich ist, denn diese genannte Darstellungsweise zuzüglich der auf ^{206}Pb normierten Isotopenverhältnisse ist mittlerweile üblich in der archäometrischen Forschung. Das Verhältnis $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ wurde der Vollständigkeit halber mit in die Aufstellung (**Tabelle A-3-7** im Anhang) hineingenommen, obwohl es keine zusätzlichen Informationen preisgibt, denn die erstgenannten Isotopenverhältnisse sind am signifikantesten.

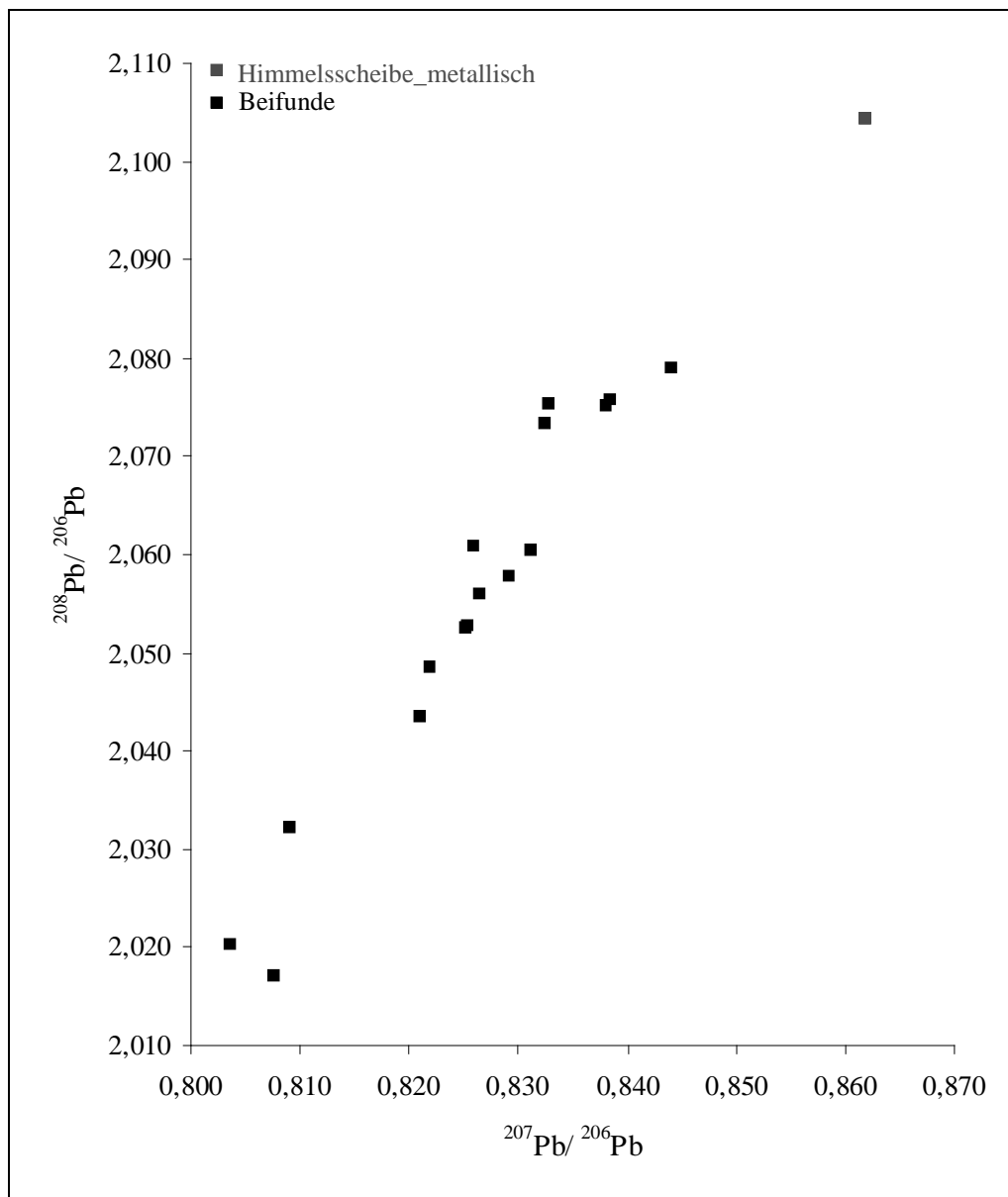


Abbildung 3-9 Dreisotopendiagramm $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ gegen $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (die verwendete Symbolgröße entspricht in etwa der des Messergebnisses inklusive $\pm 0,03$ % zufälliger Messfehler)

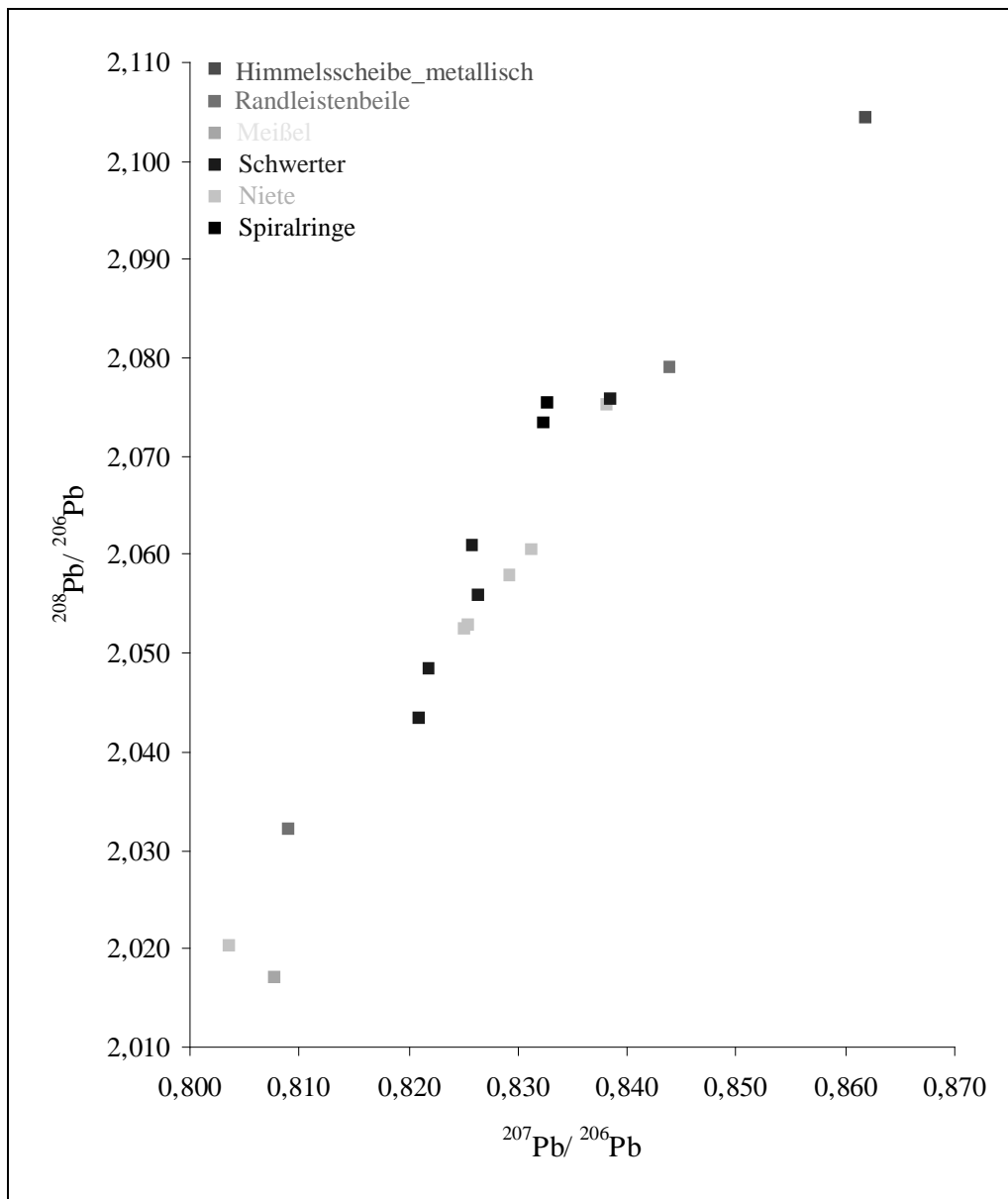


Abbildung 3-10 *Dreiisotopendiagramm $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ gegen $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ (die verwendete Symbolgröße entspricht in etwa der des Messergebnisses inklusive $\pm 0,03\%$ zufälliger Messfehler)*

Isotopisch gesehen unterscheidet sich die Himmelsscheibe von Nebra signifikant von den dazugehörigen Beifunden. Die Abweichungen betragen einige Prozent. Zum Beispiel 4,1 Prozent Unterschied zwischen höchstem und niedrigstem $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -Verhältnis und 6,3 Prozent bei $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Gründe dafür sind schwierig zu benennen. Aufgrund der zeitlichen Einordnung der Himmelsscheibe von Nebra kann als unwahrscheinlich angenommen werden, dass es sich um eine Materialmischung handelt. Vielmehr besteht die Möglichkeit, dass hier ein uran- und/oder thoriumhaltiger Rohstoff zu fassen ist. Die Trennung von den Mutternukliden Thorium und/oder Uran während der Lagerstättengenese wäre somit nicht vollständig abgelaufen, weswegen immer noch radiogenes Blei produziert und die isotopische Bleizusammensetzung sich somit ändern würde. Überprüfbar ist diese Theorie anhand der Untersuchung bezüglich vorhandener Uran- und Thoriumkonzentrationen. Bei letztgenannten Elementen handelt es sich um lithophile Elemente, die also während des Verhüttungsprozesses in die Schlacke wandern und demzufolge nicht im Artefakt, sondern ausschließlich in den

Erzen und den Schlacken zu finden sind. Beides ist derzeit noch nicht verfügbar, weswegen diese Spur nicht weiter verfolgbar ist. Dass es derartige isotopisch inhomogene Lagerstättenregionen gibt, konnte unter anderem NIEDERSCHLAG et al. (2003) anhand der Erzproben des Erzgebirges zeigen. In logischer Folge müssten nun Vergleiche der isotopischen Daten erfolgen um herauszufinden, inwieweit die Erze dieser Lagerstättenregion wegen der geografischen Nähe mit den Artefakten von Nebra korrelieren.

Ein Blick auf **Abbildung 3-10** zeigt, dass bestimmte Artefakttypen in einem kleinen Rahmen streuen (z.B. Nieten, Schwerter, Spiralinge). Vielleicht handelt es sich bei den Spiralingen nicht um Fragmente zweier, sondern lediglich um einen Spiraling. Nur bestimmte Artefakttypen weisen stärker variierende Bleisotopenverhältnisse (Randleistenbeile) auf. In weitaus größerem Rahmen konnte die gleiche Beobachtung bezüglich der Randleistenbeile von NIEDERSCHLAG et al. (2003, 82) gemacht werden. Die von NIEDERSCHLAG et al. (2003, 84ff.) untersuchten Spangenbarren sind chemisch (**Abbildung 3-6**) und isotopisch ganz ähnlich wie die Nebraer Scheibe zusammengesetzt.

Die isotopische Inhomogenität der Nebraer Artefakte spricht nicht gegen eine einheitliche Metallherkunft. Vielmehr kann davon ausgegangen werden, dass hier ein uran- und/oder thoriumhaltiger Rohstoff vorliegt. Deswegen ist ausschließlich die Einheitlichkeit der charkophilen Spurenelementanalyse und nicht die isotopische Inhomogenität von Bedeutung.

Die funkenerosiv aus der Himmelsscheibe von Nebra genommene Probe hatte nicht nur zur Aufgabe, das für die Hinweise bezüglich deren isotopischen Zusammensetzung nötige unkorrodierte Probenmaterial, sondern auch Informationen über deren mögliche, heute noch erkennbare metallische, speziell verzinnte Oberfläche zu liefern. Entstanden war letztgenannte Vermutung in Anbetracht der Tatsache, dass die Goldauflagen auf einem rötlichen Untergrund (Kupfer mit 2,6 Masseprozent Zinn (**Tabelle A-3-2** im Anhang)) aus ästhetischen Gesichtspunkten nicht ausreichend hervortreten würden (PERNICKA/WUNDERLICH 2002, 28). Deswegen wurde auch dem Hinweis der bis zu 60 % erhöhten Zinnkonzentration im Gegensatz zum unkorrodierten Probenmaterial, wie die Messungen der Korrosionsschicht der RFA ergaben, nachgegangen (**Tabelle A-3-1** im Anhang). Doch bevor die wellenlängendispersive Röntgenmikrobereichsanalyse des Elektronenstrahlmikroanalysators dafür zum Einsatz kommen konnte, musste eine präparierte Schlifffläche geschaffen werden.

Die Schlifffläche wurde zusätzlich metallographisch mittels des Auflichtmikroskops untersucht, um Informationen über herstellungs- und bearbeitungstypische Merkmale des Artefakts zu erhalten. Mechanische und thermische Belastungen hinterlassen im Materialgefüge fertigungsspezifische Spuren.

Basierend auf der vorausgehenden chemischen Übersichtsanalyse erfolgt die Auswahl des geeigneten Zustandsschaubildes (**Abbildung 3-11**). Solche Schaubilder schaffen die Grundlage jeder metallkundlichen Betrachtung, um beispielsweise Zustands- und Phasenänderungen von Legierungen in Abhängigkeit der Zustandsgrößen Temperatur und Konzentration ablesen zu können.

In Bezug auf dieses Zustandsschaubild sei vorausgeschickt, dass aufgrund des großen Erstarrungsintervalls von niedriglegiertem Kupfer, wozu das Metall der Himmelsscheibe von Nebra zählt, sowie der für einen Konzentrationsausgleich zu geringen Diffusionsgeschwindigkeit, mit Kristallseigerungen (Entmischungserscheinungen) zu rechnen ist. Es sind deshalb keine homogenen α -Mischkristalle bei der Erstarrung der Schmelze zu erwarten. Aus technischer Sicht betrachtet werden jedoch gleichmäßige, homogene Gefüge angestrebt, weshalb Homogenisierungsglühen des Gefüges nach vorheriger Verformung erforderlich ist (SCHUMANN 1991, 367).

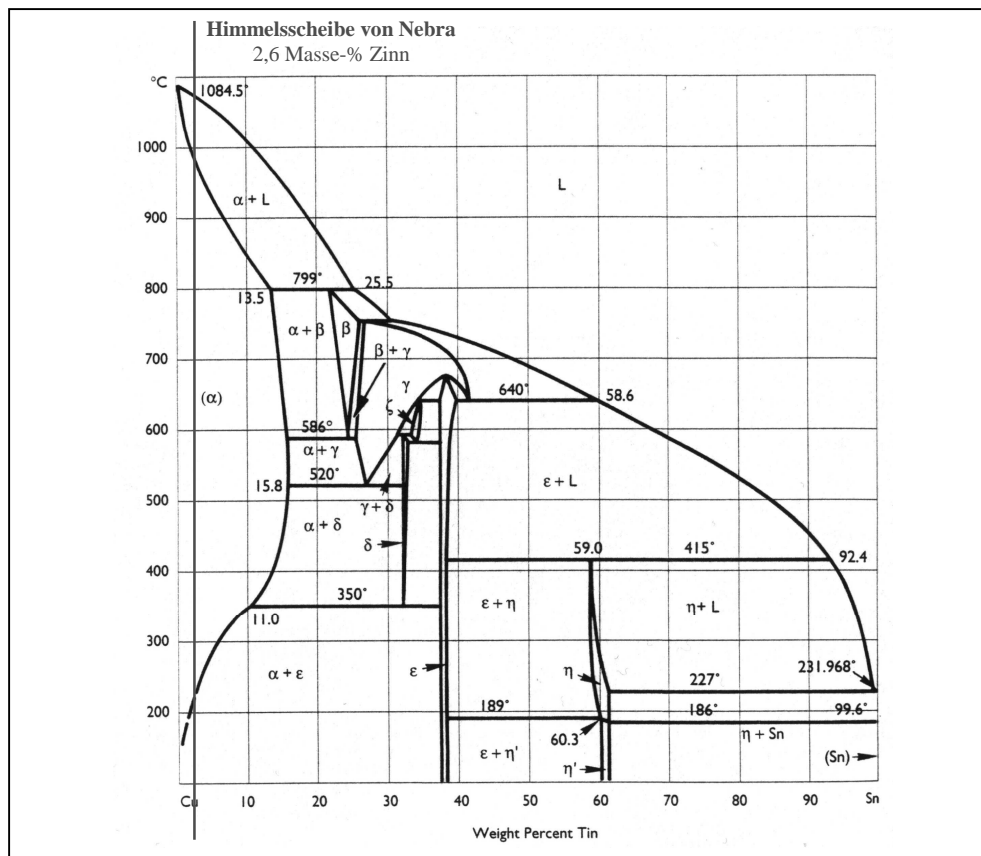


Abbildung 3-11 Zustandsschaubild Kupfer-Zinn (SCOTT 1991,122, Figure 198)

Der Schliff der Himmelsscheibe von Nebra (FG-020725) besitzt als Hauptelemente im Mittel 2,6 Masseprozent Zinn und 96,5 Masseprozent Kupfer. Diese Werte auf **Abbildung 3-11** übertragen heißt, dass mit α -Mischkristallen zu rechnen ist. Maximal beträgt die Löslichkeit des Zinns im kubisch flächenzentrierten (kfz) α -Mischkristall (Substitutionsmischkristall) 15,8 Masseprozent bei 586°C bis 520°C. Bei Raumtemperatur ist nur noch mit einer Zinnlöslichkeit von unter 1 Masseprozent zu rechnen. Allerdings muss wiederholt darauf verwiesen werden, dass die in **Abbildung 3-11** befindlichen Liquidus- und Solidus-Gleichgewichtslinien ausschließlich unter idealen Abkühlungs- und Aufheizungsbedingungen in ihrer Lage bestätigt werden. Aufgrund der in der Praxis üblichen höheren Abkühlungsgeschwindigkeiten und der damit einhergehenden fehlenden Zeit für die Diffusion zeigt das Schaubild die auftretenden Gefügestrukturen äußerst unvollständig und darf deswegen nur als richtungsweisend betrachtet werden. Eine individuell für jedes Untersuchungsobjekt durchgeführte metallographische Untersuchung ist dabei unausbleiblich. (SCHUMANN 1991, 649)

Zur **Abbildung 3-11** ist zu sagen, dass das Kupfer-Zinn-System folgende feste Phasen aufweist: sieben intermetallische Verbindungen, reines Zinn und den kupferreichen α -Mischkristall. Außerdem sind an den jeweiligen Ordinatenachsen die Schmelzpunkte des reinen Kupfers mit 1083°C und des Zinns mit 232°C abzulesen.

Bei der mikroskopischen Betrachtung des leicht mit OP-U angeätzten Gefüges der Übersichtsaufnahme (**Abbildung 3-12**) mit einer Breite von 2840 μm treten zuerst deutlich die gestreckten, zeilenförmig im gesamten Gefüge angeordneten graublauen bis schwarzen Einschlüsse (Schlackeneinschlüsse) hervor. Die Vorzugsrichtung dieser Gefügestrukturen ist als ein Relikt einer Verformung des Untersuchungsobjekts, der Himmelsscheibe von Nebra, zu werten. Die rechts im Schliffbild vorhandene Verfärbung ist präparationsbedingt, wie aus den Messergebnissen des ESMA hervorgeht (**Abbildung 3-22**).

Als Einschluss wird die Substanz bezeichnet, die während des Schmelz- und Gießprozesses ins flüssige Metall gelangt und nicht wieder ausgeschieden wird. Unterschieden wird

zwischen exogenen und endogenen Einschlüssen. Die durch metallurgische Reaktionen in der flüssigen Legierung entstandenen Einschlüsse sind endogen. (SCHUMANN 1991, 382f.)

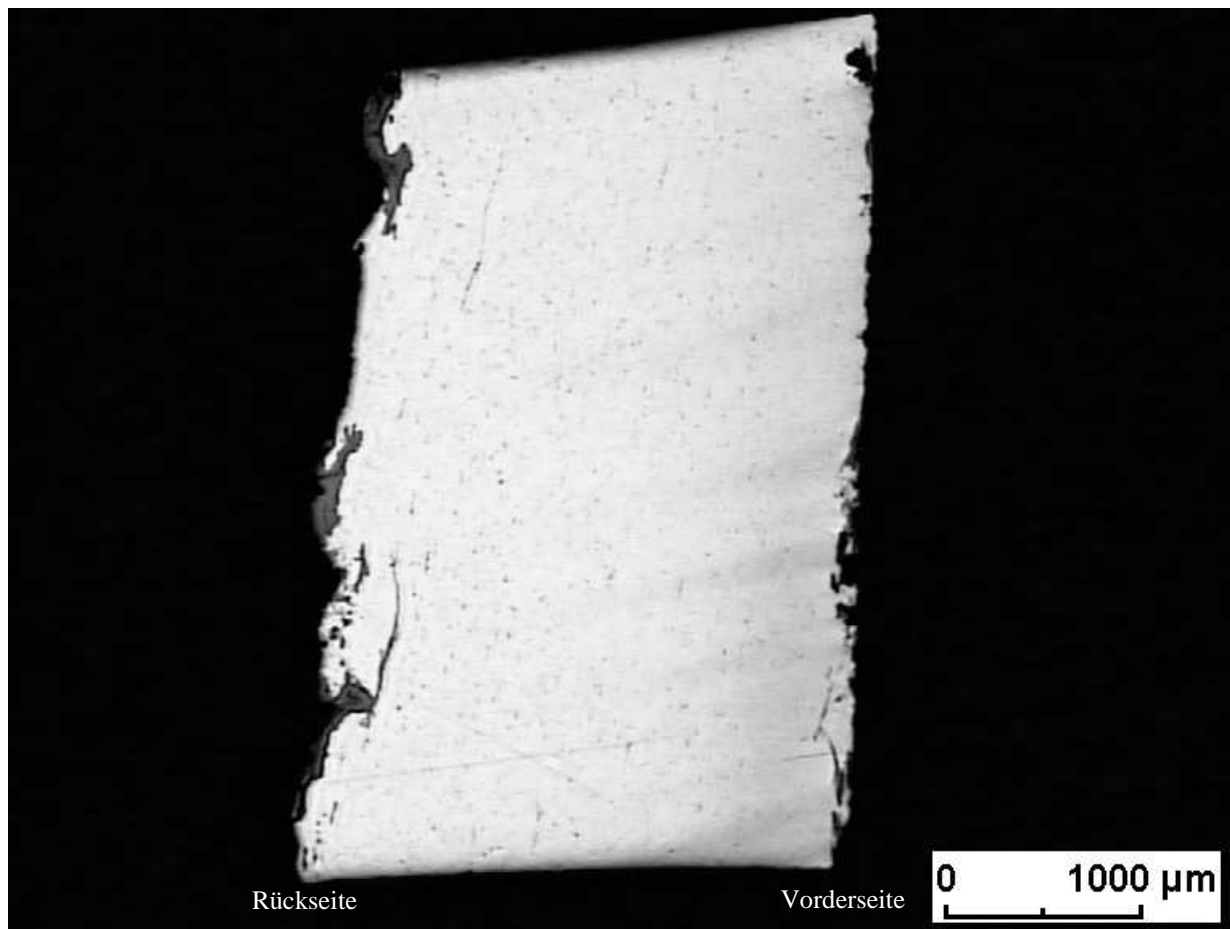


Abbildung 3-12 *Übersicht des Schliffes der funkenerosiv aus der Himmelscheibe von Nebra herausgetrennten Probe (FG-020725) vor der Bedampfung mit Kohlenstoff (Hellfeldaufnahme mit Neophot 30, spiegelverkehrt)*

In der **Abbildung 3-12** zeigt die zur Rückseite der Himmelscheibe gehörende Schicht partielle Verdickungen auf. Der Rand der Vorderseite (**Abbildung 3-12**) erscheint dagegen viel homogener, geglätteter und von einer gleichmäßigen dünnen, vermutlich ebenso mehrphasigen mit variierender grau bis graubläulicher Schicht überzogen. Die Rückseite lässt vermuten, dass die mit einem groben Werkzeug ausgeführten Schläge diese Unregelmäßigkeiten hervorgerufen haben. Dafür sprechen auch die auf der Rückseite der Himmelscheibe von Nebra erkennbaren Hammerspuren (vom Ausschmieden) sowie die unterschiedliche Dicke (zum Rand hin dünner) und Risse am Rand der Scheibe²³.

Weiterhin ist denkbar, dass es sich bei den Verdickungen im Randbereich um Gussrelikte, eingehämmerte Gusschaut, handelt.

Der **Abbildung 3-13** ist das im Hellfeld betrachtete Gefüge der Himmelscheibe von Nebra zu entnehmen. Es handelt sich um ein einphasiges rekristallisiertes Metallgefüge mit unverformten, geradlinigen Glühwillingen im Innern der Körner (**Abbildung 3-15**) sowie um gestreckte Einschlüsse. Die Größe der rekristallisierten Körner variiert zwischen 50 und 100 µm, wirkt aber gleichmäßig. Die quer über das Bild durch mehrere Körner verlaufenden

²³ Persönliche Mitteilung von C.-H. WUNDERLICH.

dunklen Linien sind präparations- und materialbedingte Kratzer, die des Materialabtrages wegen nicht eliminiert werden konnten.

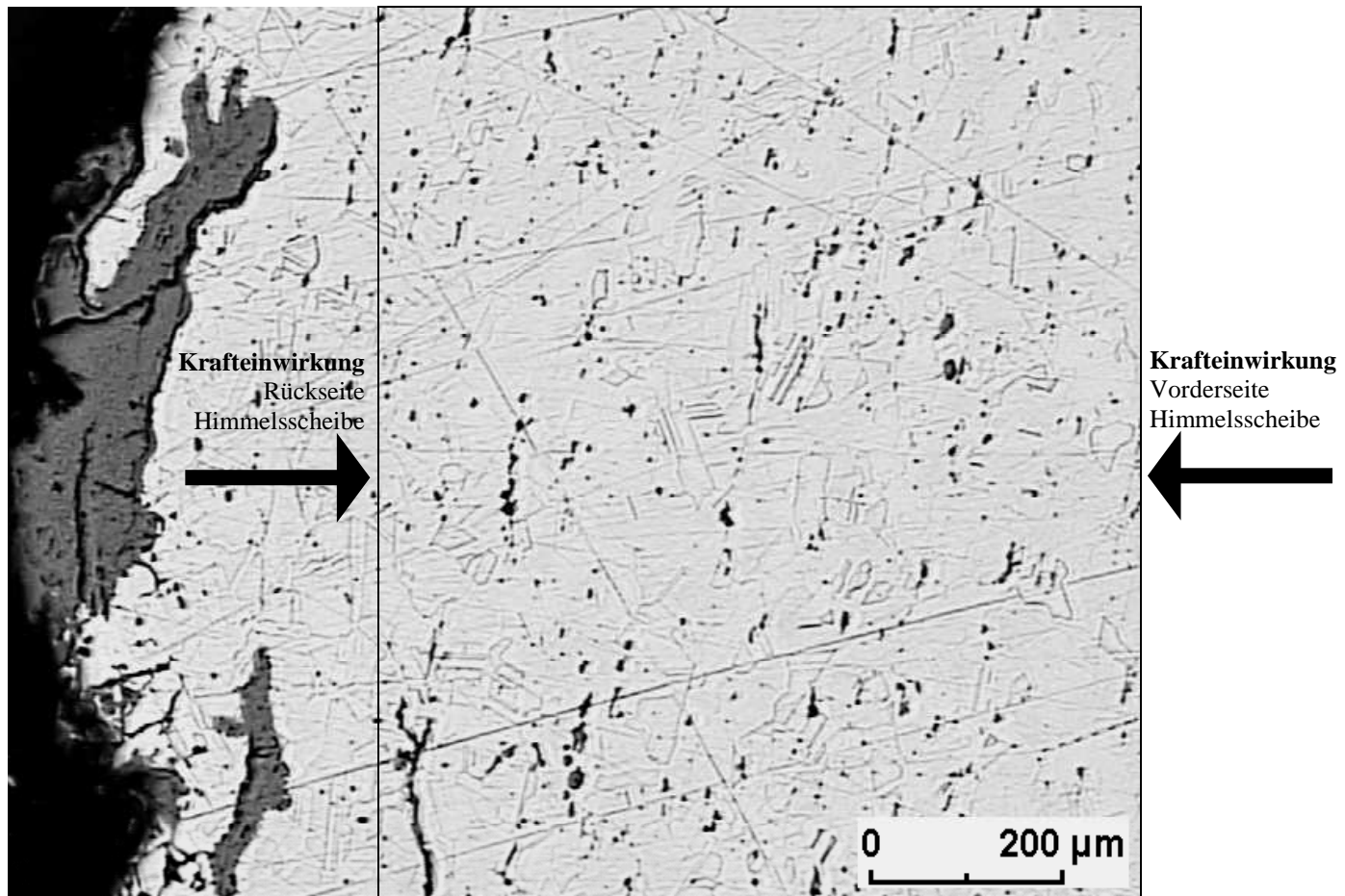


Abbildung 3-13 FG-020725 mit Glühzwillingen und lichtmikroskopisch homogenem, einphasigem, polygonalem Gefüge vor der Bedampfung mit Kohlenstoff (Hellfeldaufnahme mit Neophot 30, spiegelverkehrt)

Das hier vorliegende Gefüge der erodierten Probe aus der Nebraer Himmelsscheibe entsteht infolge bestimmter Bearbeitungsschritte. Eine Zusammenstellung davon ist in **Abbildung 3-14** zu sehen. Es kann davon ausgegangen werden, dass der bronzezeitliche Hersteller zuerst einen Rohling, vorzugsweise sicherlich von runder Form, gegossen hat. Die dabei entstandenen dendritischen α -Mischkristallseigerungen können durch langes Homogenisierungsglügen ausgeglichen worden sein. Es bildet sich dann ein homogenes hexagonales Gefüge, welches infolge plastischer Verformung bei Temperaturen oberhalb der Rekristallisationstemperatur (600°C, abhängig von Legierungselementen, Verunreinigungen, Korngröße, Kaltverformungsgrad (SCOTT 1991)) der **Abbildung 3-13** ähnliche Gefüge erzeugt (SCHUMANN 1991, 397). Daneben können aber auch hexagonale Körner kalt verformt und anschließend erneut wärmebehandelt worden sein. Die Folge ist ebenso ein rekristallisiertes Gefüge.

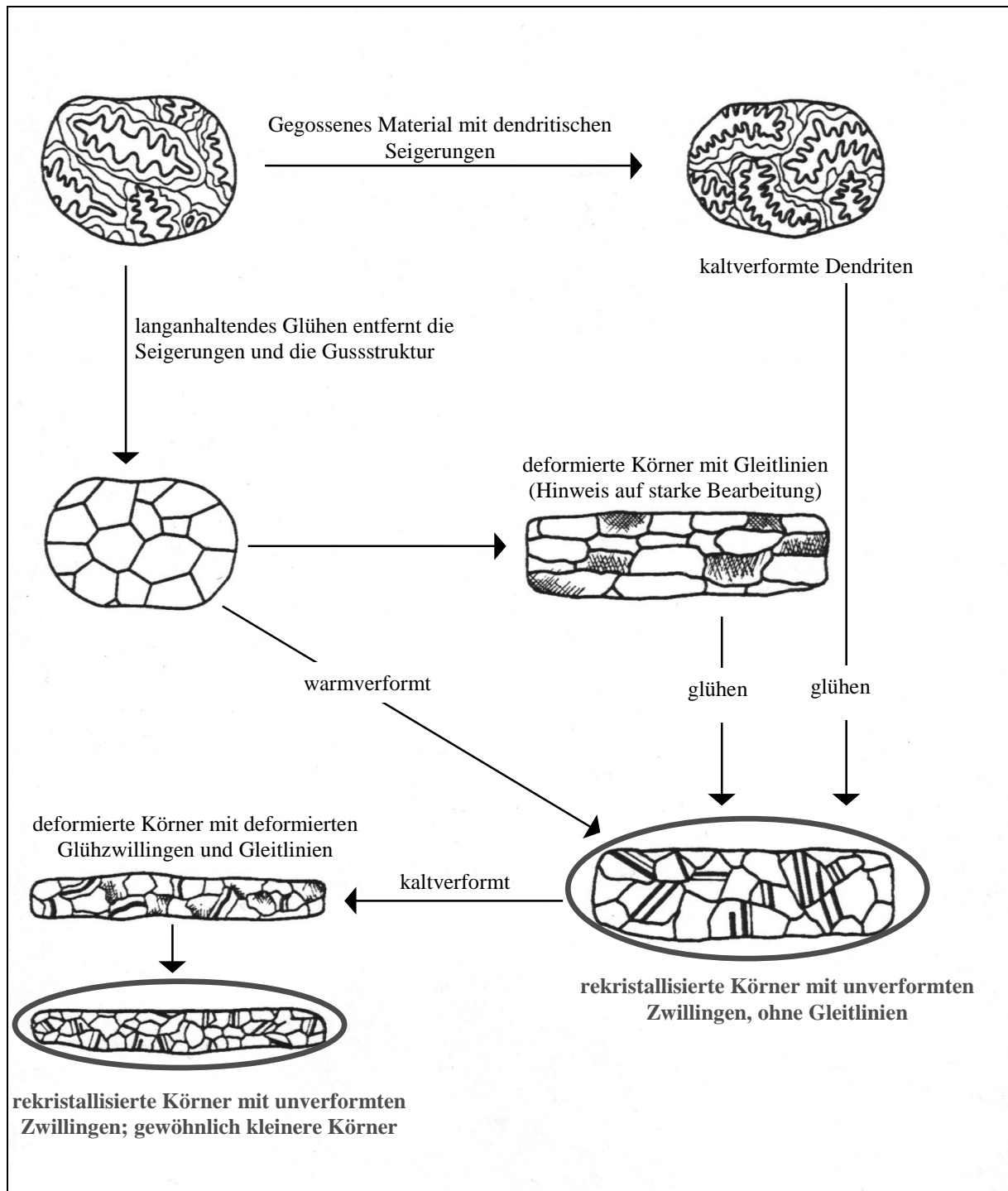


Abbildung 3-14 Entstehung der unterschiedlichen Merkmale des einphasigen Metallgefüges kfz-Mischkristalle (SCOTT 1991, 8, Figure 12); die Zuordnung des mit der Himmelsscheibe von Nebra (Abbildung 3-13) vergleichbaren Gefüges erfolgt durch die rote Markierung

Letzte von SCOTT (1991, 8) in **Abbildung 3-14** für kfz-Mischkristalle aufgezeigte Variante ist die, bei der rekristallisiertes, innerhalb der Körner verzwilligtes, ohne Deformationslinien und Dendriten aufweisendes Gefüge entsteht, wenn das gegossene Material kalt plastisch verformt und anschließend geglüht wird. Homogene α -Mischkristalle, bei denen das Zinn komplett gelöst ist, sind das Ergebnis. Alles weist darauf hin, dass die Himmelsscheibe von Nebra zunächst gegossen, dann verformt und/oder geglüht worden ist. Sicher ist, dass das

Fehlen von Gleitlinien oder –bändern sowie von deformierten Glühzwillingen als kaltverformungsspezifische Merkmale, eine Kaltverformung als letzten dem Material widerfahrenen Bearbeitungsschritt ausschließt. Das Vorhandensein des rekristallisierten Gefüges, der ausgerichteten Einschlüsse sowie der Bearbeitungsspuren, speziell an der zur Rückseite der Himmelsscheibe gehörenden Schicht (**Abbildung 3-12**) beweisen aber, dass das Material verformt wurde. Außerdem spricht der Fakt, dass kein Primärgefüge (dendritische Gussstruktur) mehr vorhanden ist für ein vollständiges sowie gekonntes Umformen und Homogenisierungs-glühen. Ungeklärt bleibt, ob die dadurch hervorgerufenen Änderungen der Materialeigenschaften zielgerichtet stattfanden und somit von einem hohen Kenntnisstand des Herstellers, vielleicht sogar des auf Metallverarbeitung spezialisierten Handwerkers, zeugen.

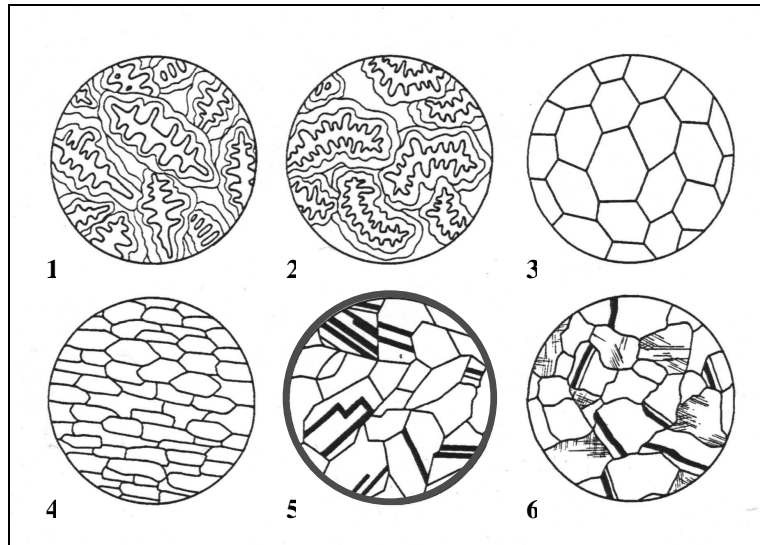


Abbildung 3-15 Gefügemerkmale kfz-Mischkristalle (SCOTT 1991, 7, Figure 11a–f)
 1: dendritisches Gussgefüge mit Zonenmischkristallen
 2: kaltverformte Dendriten
 3: homogenisiertes Gefüge mit hexagonalen Körnern
 4: kaltverformtes Gefüge mit gestreckten Körnern
 5: rekristallisiertes Gefüge mit Glühzwillingen
 6: kaltverformtes Gefüge mit verformten Glühzwillingen und Gleitlinien

Abbildung 3-14 zeigt deutlich, dass mit mehrmaliger Wiederholung des Verformungs- und Glühvorgangs das Gefüge feinkörniger wird. Natürlich sollte dabei nicht außer Acht gelassen werden, dass beispielsweise mit steigender Umformstärke ebenso ein feineres Korn erzielt werden kann (SCHUMANN 1991, 398f.). Demzufolge ist nicht mit absoluter Bestimmtheit bei einem feinkörnigen Gefüge auch von einem mehrmaligen Umformen und Glühen auszugehen. Neben dem Umformgrad beeinflussen hauptsächlich

- Temperaturhöhe
- Zeitdauer des Glühvorgangs
- Abkühlungsgeschwindigkeit nach dem Glühen

die Korngröße.

Das abschließende Glühen beseitigt die durch Verformung entstandenen Gitterstörungen (z.B. Versetzungen²⁴), welche das Gefüge verspannen und verfestigen. Das Material wird rekristallisiert²⁵ und dadurch wieder bearbeitbar gemacht.

²⁴ Die angesprochenen Gleitlinien resultieren aus den bis an die Oberfläche auf im Kristall befindlichen Gleitflächen gewanderten Versetzungen.

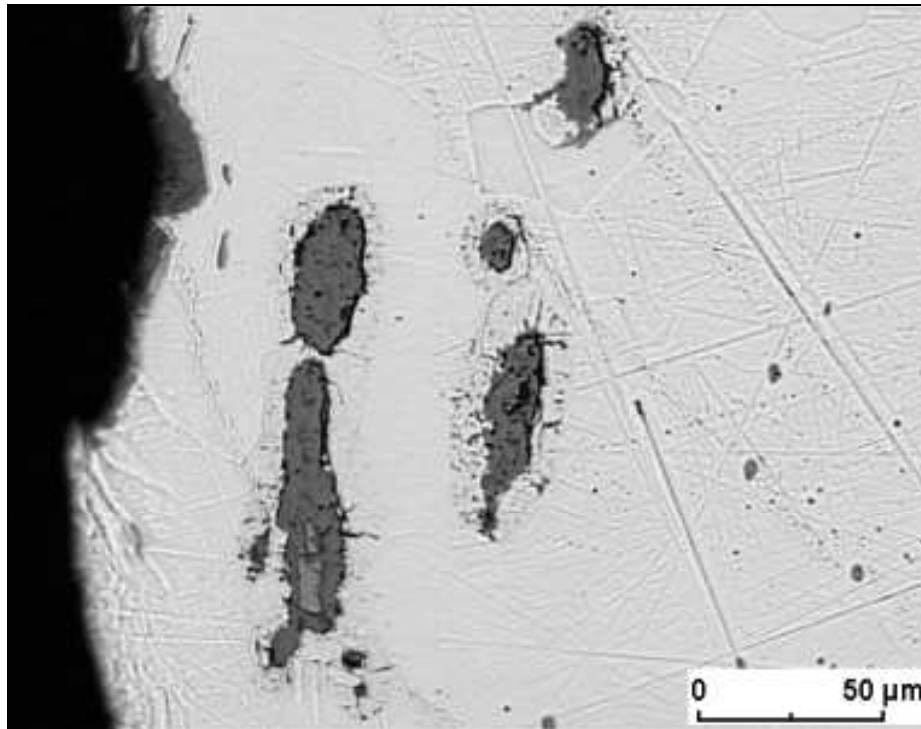


Abbildung 3-16 FG-020725 parallel zur Oberfläche langgestreckte, verformte Einschlüsse vor der Bedampfung mit Kohlenstoff (Hellfeldaufnahme mit Neophot 30, mit Filter zur Kontrastverstärkung, spiegelverkehrt)

In **Abbildung 3-16** und **Abbildung 3-18** sind einige der bereits bei erster Betrachtung aufgefallenen Einschlüsse entlang der Korngrenzen zu sehen. Es gibt große, stark gestreckte Einschlüsse (**Abbildung 3-12**) und, die sich verstärkt nahe dem rückseitigen und etwas schwächer am vorderseitigen Randbereich befinden. Ihre Ausmaße reichen von circa 50 bis 150 μm und ihre Farbe im Dunkelfeld und im polarisierten Licht erscheint rot bis orange, im Hellfeld graublau; die kleineren, dunkelgraublauen (Hell-, Dunkelfeld, polarisiertes Licht) vereinzelt mit rot umrandeten (Dunkelfeld, polarisiertes Licht), etwa 5 bis 25 μm langen Einschlüsse sind ebenfalls deformiert, jedoch relativ gleichmäßig im gesamten Probenquerschnitt anzutreffen (**Abbildung 3-17**). Die hier vorliegenden kleineren Einschlüsse sind mit sehr großer Wahrscheinlichkeit endogener Natur, beispielsweise Restschmelze oder Schlacke. Die größeren Einschlüsse sind nach dem farblichen Verhalten unter den verschiedenen Kontrastierungsverfahren als Kupferoxide zu identifizieren.

Abbildung 3-16 und **Abbildung 3-18** zeigen Einschlüsse, die aus verschiedenen Phasen bestehen. Die sich im Einschluss befindlichen hellen Adern der **Abbildung 3-18** sind zinnreich, wohingegen der zur Matrix abgetrennte saumartige Bereich einen niedrigeren Zinngehalt (etwa 2,16 Masseprozent Zinn) als die Matrix mit 2,6 Masseprozent im Mittel aufweist. Die dunkle Phase im Innern des Einschlusses ist Kupferoxid.

²⁵ Die im Metallgefüge sichtbaren Zwillingsstreifen entstehen bei der Erhitzung bis zur Rekristallisationstemperatur.

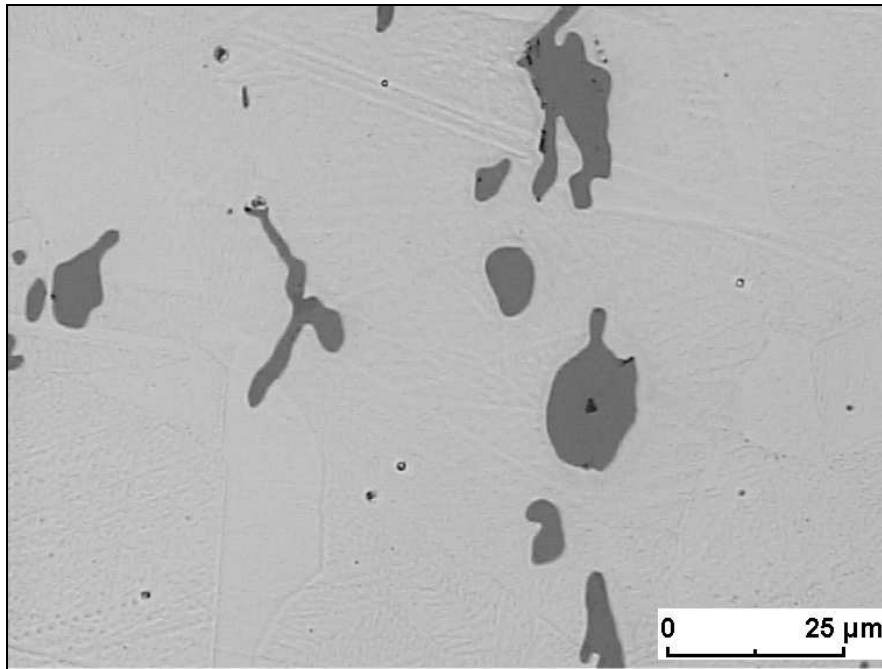


Abbildung 3-17 FG-020725 Gefüge mit verformten Einschlüssen vor der Bedampfung mit Kohlenstoff (Hellfeldaufnahme mit Neophot 30, spiegelverkehrt)

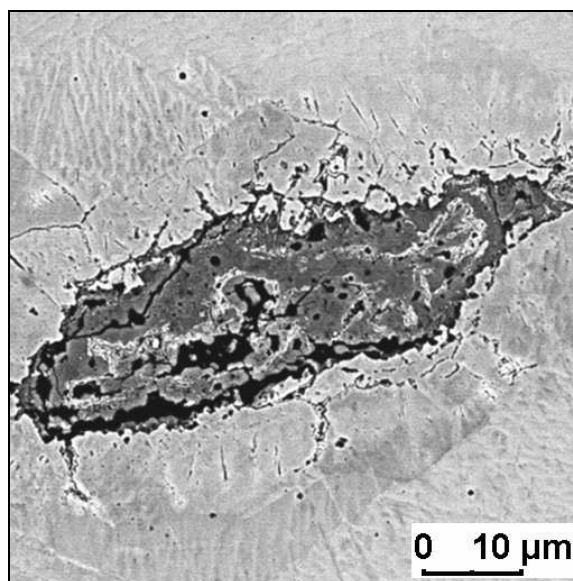


Abbildung 3-18 FG-020725 Einschluss (Rückstreuelektronenabbildung mit REM aufgenommen)

Die Verdickungen an den vorder- und rückseitigen Randbereichen des Schliffs (z.B. **Abbildung 3-21** bis **Abbildung 3-23**) und ebenso die auffällige, leicht gewellte Schliere, die im unteren Drittel der Übersichtsaufnahme auf **Abbildung 3-12** hervortritt, sind mit der gleichfarbigen Substanz (polarisiertes Licht, Dunkelfeld, Hellfeld), aus der die größeren Einschlüsse bestehen, gefüllt. Laut den mit dem Rasterelektronenmikroskop durchgeführten energiedispersiven Punktanalysen handelt es sich um Kupferoxide, höchstwahrscheinlich

Produkte der Korrosion²⁶. Daneben konnten auch Kupfersulfide als Einschlüsse bestimmt werden. Im Anhang **Tabelle A-3-8** befinden sich die arithmetischen Mittelwerte der REM-Messergebnisse. **Abbildung 3-19** gibt die genaue Lage zweier Punktanalysen wieder.

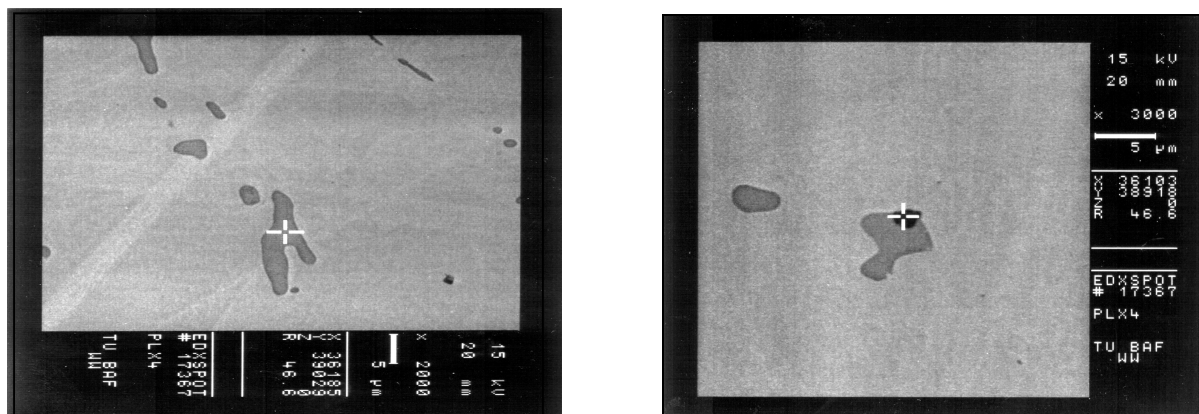


Abbildung 3-19 Einschlüsse im Rückstreuelektronenmodus des REM aufgenommen inklusive Lage der vorgenommenen Punktanalyse (eingescannter Bildschirm Ausdruck mit 600 dpi)

Die gemessenen Komponenten der kleineren Einschlüsse sind Kupfer und Schwefel, die ein durchschnittliches Verhältnis von 70 zu 30 ergeben. Nahe liegend ist es, diese beiden Hauptkomponenten als Cu_2S (Chalkocit) mit einem Verhältnis von 66 zu 33 zu interpretieren. Daneben treten sauerstoffreiche Kupferverbindungen mit Schwefel-, Zinn- und vereinzelt Siliziumgehalten auf. Allgemein wird das Vorliegen von schwefelhaltigen Schlackeneinschlüssen als ein Indiz für die Verhüttung sulfidischer Erze verstanden. Die Kupfer-Sauerstoffverbindungen in den Einschlüssen konnten bereits anhand der Lichtmikroskopie eindeutig erkannt werden. Letztgenannte sprechen auch für oxidische Verhältnisse in der Schmelze.

Die zu Anfang formulierte Idee, dass die leicht erhöhten Zinngehalte für eine verzinnte Oberfläche der Himmelsscheibe von Nebra sprechen könnten, sollte bestätigt oder entkräftet werden. Dazu wurden die im Schliff ersichtlichen Randschichten, die zur Vorder- und zur Rückseite des Artefakts gehören, untersucht. Bereits bei der Betrachtung der Rückstreuelektronenabbildungen im REM waren keine Hinweise in Bezug darauf vorhanden. Vielmehr konnten die auch im Lichtmikroskop sichtbaren Oxidverbindungen mit signifikanten Gehalten an Kupfer qualitativ und quantitativ analysiert werden. Wie die Farben der Schichten im polarisierten Licht, im Hell- und Dunkelfeld (**Abbildung 3-21** bis **Abbildung 3-23**) verdeutlichen, handelt es sich bei den unterschiedlichen Phasen nicht nur um sauerstoffreiche Kupferverbindungen, wie z.B. Cuprit (Cu_2O), der rot im Dunkelfeld und polarisiertem Licht erscheint. Auch karbonatische Kupferverbindungen sind aufgrund der grünen Farbe denkbar. Dafür sprechen die röntgendiffraktometrischen Ergebnisse, die die grüne und dichte Korrosion auf der Scheibe eindeutig als Malachit (basisches Kupferkarbonat) und Kassiterit identifizieren (PERNICKA/WUNDERLICH 2002, 24). Derartig genaue Angaben erfordern andere Untersuchungsmethoden (z.B. Röntgendiffraktometrie), die aber nicht Bestandteil dieser Arbeit waren. Die Ergebnisse der **Tabelle A-3-8** im Anhang sollten deswegen für stöchiometrische Umrechnungen mit Skepsis betrachtet werden. Dennoch ist auffällig, dass zwischen beiden Oxidphasen der Unterschied hauptsächlich mit der Detektion von Zinn zustande kommt. Zinn besitzt eine hohe Ordnungszahl. Deswegen lässt das den Ordnungszahl-

²⁶ Der Begriff Korrosionsschicht bzw. Korrosion tritt häufiger in dieser Arbeit auf. Damit ist die makroskopisch sichtbar äußere Schicht auf der Himmelsscheibe von Nebra gemeint und soll kein voreiliges Urteil der gleich noch folgenden Oberflächenuntersuchung bezüglich möglicher prähistorischer Verzinnung darstellen.

kontrast hauptsächlich wiedergebende Rückstreuelektronenbild diese Phase heller als die andere Phase, ebenfalls eine Kupferoxidverbindung, erscheinen. Diese hellere Phase ist mit großer Wahrscheinlichkeit Cuprit.

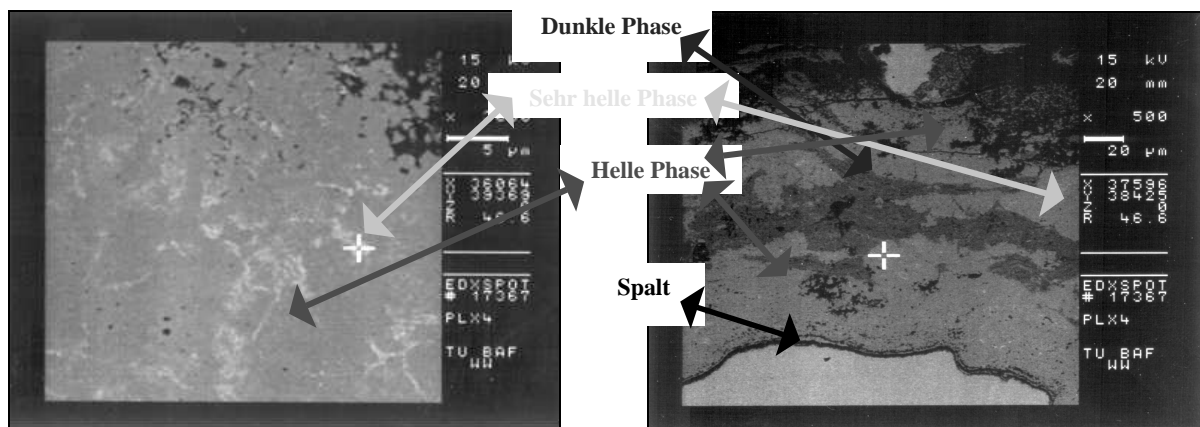


Abbildung 3-20 Randschicht im Rückstreuelektronenmodus, wodurch die unterschiedlichen Phasen deutlich hervortreten (eingescannter Bildschirm Ausdruck mit 600 dpi)

Neben den Kupferoxiden der hellen und dunklen Phase findet sich auch eine sehr hell schlierenartige Phase in der rückseitigen Randschicht (**Abbildung 3-20**). Letztgenannte Phase stellt eine Oxidverbindung mit signifikanten Gehalten an Zinn (25 Masseprozent) und hauptsächlich Kupfer dar. Allerdings konnte diese Phase nur am rückseitigen Rand festgestellt werden. Es könnte sich hierbei um Zinnseigerungen infolge des Korrosionsprozesses oder des Gießvorgangs handeln.

Die gegenüber der Matrix leicht erhöhten Zinngehalte dieser äußeren Schicht überraschen bei einer Korrosionsschicht an sich nicht, denn es laufen An- und Abreicherungsprozesse bestimmter Elemente ab. In diesem Fall ist Zinn aufgrund seiner geringeren Löslichkeit im Umfeld angereichert.

Neben den Punktanalysen wurden auch stochastisch verteilte kleinere Flächenanalysen in der Metallmatrix vorgenommen. Ziel war die Überprüfung der mit der RFA detektierten Hauptelemente, welche vollends mit 2,8 Masseprozent Zinn als arithmetischer Mittelwert bestätigt werden konnten. Auch hierbei kann bereits aus der hellen Farbe in der Abbildung im Rückstreuelektronenmodus das Vorhandensein von Verbindungen mit zum Beispiel Sauerstoff oder Schwefel, die eine dunklere Farbe ergeben müssten, ausgeschlossen werden.

Die Linienanalysen des ESMA, speziell im Matrixbereich, enthüllten, dass nahezu konstant ein Zinngehalt von circa 2 Masseprozent im Kupfer gelöst ist, was gegen ein Vorhandensein von Zinnseigerungen spricht. Dagegen könnten die in **Abbildung 3-18** sichtbaren hellen Adern im rekristallisierten Korn geseigertes Zinn darstellen. Die möglichen Zinnseigerungen gleichen in ihrem Aussehen einer leicht verformten dendritischen Struktur, die höchstwahrscheinlich als Gussrelikte richtig charakterisiert sind.

Zur genaueren, unabhängigen Messung der Zinn und Kupferwerte wurden insgesamt drei Linienanalysen mit zwei wellenlängendispersiven Spektrometern des Elektronenstrahlmikroanalysators durchgeführt. Die Ergebnisse und die Lage der Analysen im Vergleich mit den metallographischen Aufnahmen im Hell- und Dunkelfeld bzw. polarisierten Licht sind der **Abbildung 3-21**, **Abbildung 3-22** und **Abbildung 3-23** zu entnehmen. Es wurde darauf geachtet, dass die Messpunktreihenungen durch mehrphasige Randschichten hindurch gehen, um stark erhöhte Zinngehalte, die eine Verzinnung andeuten könnten, zu erfassen. Die vom ESMA gelieferten Messergebnisse aller Linienanalysen sind Impulse, die in Masseprozent

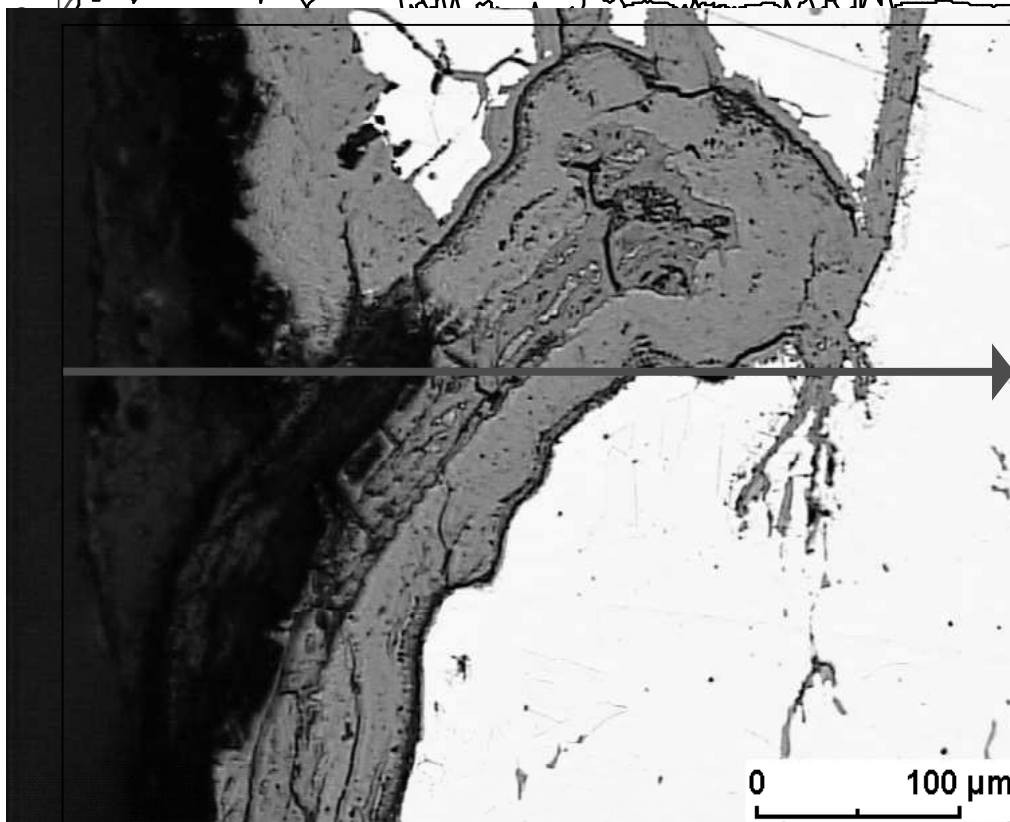
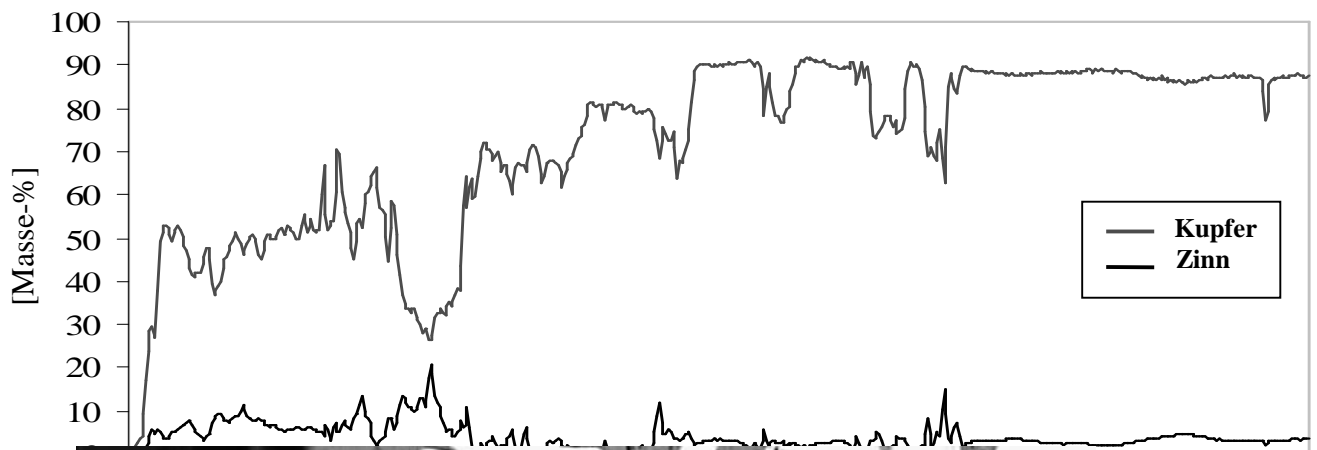
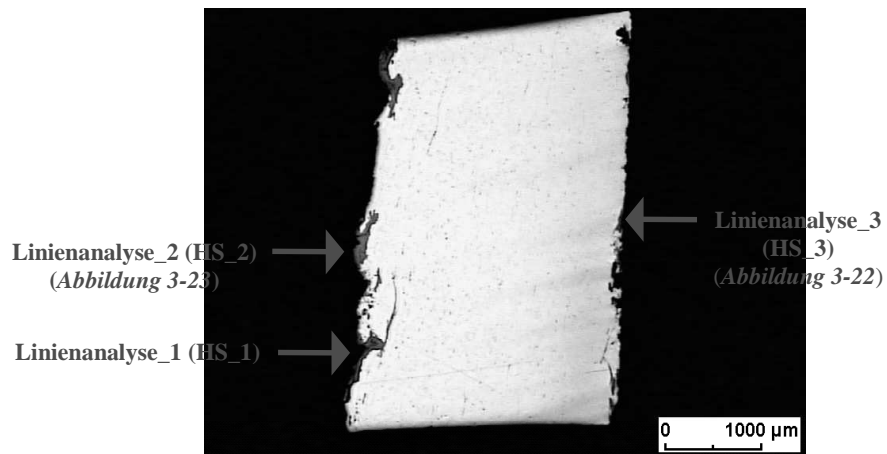


Abbildung 3-21 Linienanalyse_1 mit 1 μm Schrittweite (dargestellt sind 600 Analysenpunkte)

*Hellfeldaufnahmen mit Neophot 30, seitenverkehrt
(Maßstäbe stimmen überein)*

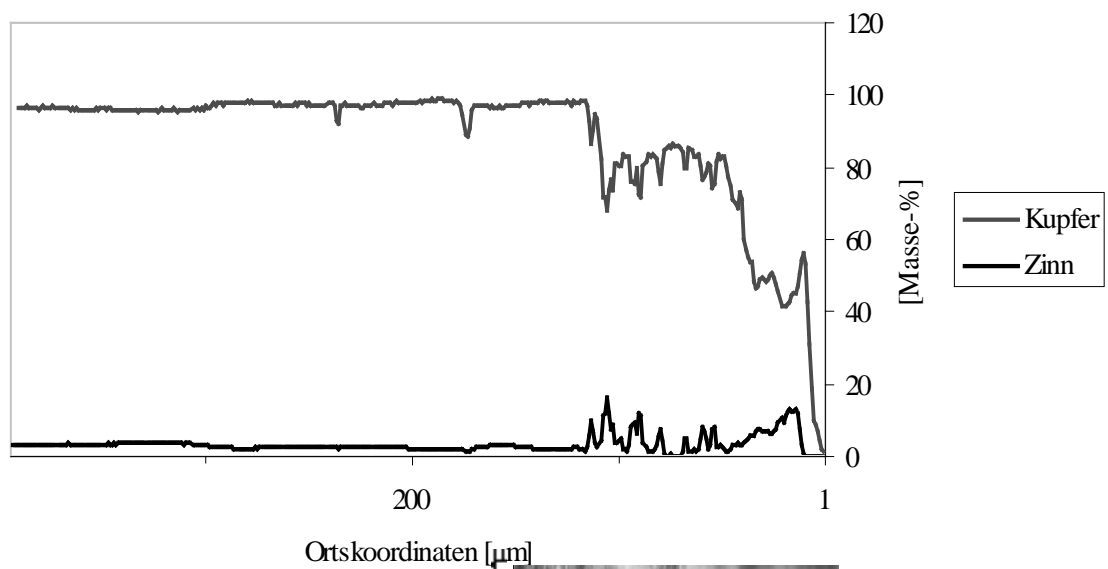
umgerechnet und anschließend als Konzentration über der Ortskoordinate aufgetragen wurden.

Die in **Abbildung 3-21** grafisch dargestellte Linienanalyse_1 (1000 Messpunkte mit 1 μm Schrittweite) wurde von der zur Rückseite gehörigen Randschicht bis in das Matrixmetall der Himmelsscheibe von Nebra hineingeführt. Bei der Betrachtung der Kurven und der dazu gehörigen lichtmikroskopischen Aufnahmen kann eine Anreicherung des Zinns konstatiert werden. Auffällig ist der mit dem REM als herausgebrochen identifizierte Bereich zwischen 149 und 168 μm mit 9 bis maximal 20,51 (bei 164 μm mit 26,32 Masseprozent Kupfer) Masseprozent Zinn. Das Diagramm (**Abbildung 3-21**) verdeutlicht, dass von einer mechanisch zerklüfteten Oberfläche ausgegangen werden kann, die auch mit den vorangegangenen Gefügeuntersuchungen konform geht. Eine Verzinnung ist nicht festzustellen.

Bei der zur Vorderseite der Scheibe gehörigen Schicht wurden 600 Messungen mit 1 μm Schrittweite durchgeführt. Die resultierende Linienanalyse_3 ist der **Abbildung 3-22** zu entnehmen. Hiermit ist bewiesen, dass die in **Abbildung 3-12** sichtbare Verfärbung des Schliffs eindeutig als präparationsbedingt zu bewerten ist. Es handelt sich um keine erkennbare Diffusionszone des Zinns. Die im polarisierten Licht (**Abbildung 3-22**) grün erscheinende Schicht beginnt bei 20 μm mit 3 Masseprozent Zinn und 54 Masseprozent Kupfer. Die Zinnkonzentration steigt bis 13 Massenprozent (26 μm) an, um dann abzufallen auf 2 bis 3 Masseprozent im Bereich von 49 bis 61 μm . Die unter der grünen befindliche rote Schicht des vorderseitigen Randbereichs der Nebraer Himmelsscheibe (obere Aufnahme der **Abbildung 3-22**) zeigt stark variierende Zinngehalte von 0 bis circa 12 Masseprozent Zinn. Bei 114 μm , direkt am Übergang zwischen Metallmatrix und vorderseitiger Randschicht, wurde ein Maximum an Zinnkonzentration von 16,31 Masseprozent und 68,22 Masseprozent Kupfer gemessen. Dieser Wert befindet sich innerhalb eines Bereichs von 5 μm mit erhöhter Zinnkonzentration (8 bis 16 Masseprozent Zinn bei 111 bis 116 μm). Das bereits für die Linienanalyse_1 Resümierte kann hier wiederholt werden: Zinnanreicherung konstatiert, allerdings keine Verzinnung.

Eine dritte Linienanalyse_2 (**Abbildung 3-23**) wurde an der Rückseite der Scheibe von Nebra mit einer Schrittweite von 0,5 μm für 1500 Messwerte durchgeführt. Das Ziel der Messung war es, unterschiedliche Schichtungen sichtbar zu machen und hinsichtlich ihrer metallischen Hauptelemente zu untersuchen, indem die einzelnen Messpunkte überlappend angeordnet wurden. Das Ergebnis weist keine als Verzinnung anzusprechende Schicht auf. Eine Zinnanreicherung bis 14 Masseprozent und 70 Masseprozent Kupfer bei circa 75 μm vom Rand in Richtung Matrix ist vorhanden, allerdings kann auch hier nur das bereits mikro- und makroskopisch festgestellte untermauert werden: es handelt sich um eine ungestörte, mehrschichtig aufgebaute Korrosionsschicht. Eine Diffusionsschicht kann aufgrund des bei 186 μm abrupten Kupferanstiegs und Zinnabfalls (ebenso wie in **Abbildung 3-22**) ausgeschlossen werden. Der Zinngehalt fällt von etwa 10 auf 2,3 Masseprozent.

Um zinnreiche Oberflächen auf Kupfer-Zinn-Artefakten zu erhalten, gibt es verschiedene Möglichkeiten: beispielsweise bei Objekten mit niedrigem Zinngehalt in der Kupfermatrix kann Verzinnung (Reduktion von Kassiterit), Zinnschweiß (auch umgekehrte Blockseigerung (Entmischung)) oder der Effekt infolge von Korrosionsprozessen vorliegen (MEEKS 1993).



Kontaminationsspur
(Linienanalyse)

Abbildung 3-22

Linienanalyse_3 mit 1 μm Schrittweite (dargestellt sind 400 Messpunkte)

Aufnahmen mit Nikon eclipsen ME 600 nach Bedampfung mit Kohlenstoff (eingescannt mit 800 ppi)

obere Aufnahme (polarisiertes Licht)

untere Aufnahme (Hellfeld)

(Maßstäbe stimmen überein)

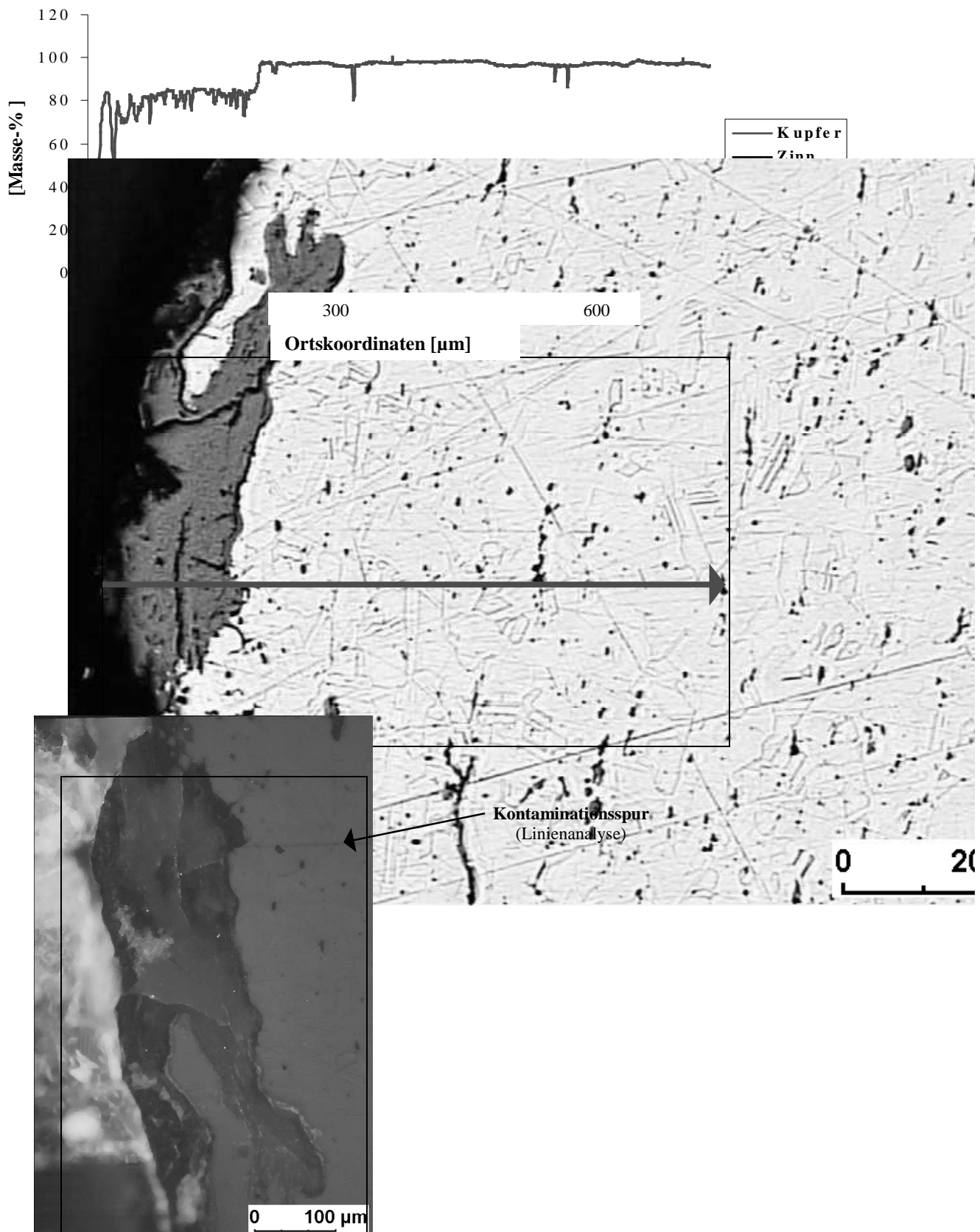


Abbildung 3-23 Linienanalyse_2 mit 0,5 μm Schrittweite (dargestellt sind 741 Messpunkte)
 Aufnahmen mit Neophot 30 (vor Bedampfung mit Kohlenstoff, seitenverkehrt) und mit Nikon eclipsen ME 600 (nach Bedampfung mit Kohlenstoff)
 obere Aufnahme (Hellfeld)
 untere Aufnahme (polarisiertes Licht)
 (Maßstäbe stimmen überein)

Der Zinnschweiß entsteht natürlich durch das Gießen und folgende Erstarren der Schmelze. Dabei wird die zinnreiche Schmelze interdendritisch von innen nach außen infolge des inneren Drucks (Schrumpfung des Metalls) und gelöster, während der Abkühlung freige-wordener Gase gezwungen und verleiht der Oberfläche eine silberne Farbe. Das entstandene $\alpha + \delta$ -Eutektoid (mit 20 bis 26 Masseprozent Zinn) ist mit 10 bis 50 μm meist dicker als ver-zinnte Oberflächen (5 bis 10 μm). Die Schicht ist demzufolge nicht homogen in Abhängigkeit von Abkühlungsgeschwindigkeit, Tiegelmateriale etc. (MEEKS 1993, 263). Danach würde sich zumindest die zinnhaltige rückseitige Phase der Randschicht der Himmelsscheibe von Nebra (**Tabelle A-3-8** im Anhang) erklären lassen.

Die mit dem ESMA (**Abbildung 3-21**, **Abbildung 3-22**, **Abbildung 3-23**) und dem REM (**Tabelle A-3-8** im Anhang) erzielten Messergebnisse von der erodierten Himmels-scheibenprobe können keine der intermetallischen Verbindungen²⁷ ausmachen. Eben jene Phasen sind es, die laut MEEKS (1993, 253) anstelle des reinen, nie bisher bei prähistorischen Verzinnungen angetroffenen Zinns zu erwarten wären. Gründe dafür sind Diffusionsprozesse zwischen Bronze und geschmolzenem Zinn während der Herstellung oder der Korrosions-prozesse. MEEKS (1993, 260) fand bisher δ - und/oder η -Verbindungen nur auf verzinnnten Oberflächen. Eine von ODDY und BIMSON (1985, 36) vorgestellte Verzinnung wurde auf der das unkorrodierte Metall bedeckenden Korrosionsschicht entdeckt. Die Zusammensetzung dieser zinnreichen Schicht ließ sich mit 38,75 Masseprozent Zinn auf Cu_3Sn zurückrechnen. Zusätzlich gab es eine Diffusionsschicht.

Im Falle der Nebraer Himmelsscheibe weist alles darauf hin, dass hier Korrosionspro-zesse die zinnhaltige Oberfläche verursachten. Die Korrosionsschichten heben sich durch einen kleinen Spalt vom Matrixmetall ab, wie **Abbildung 3-20**, **Abbildung 3-21** und **Abbildung 3-22** verdeutlichen. Darüber befinden sich nahezu lagenweise die verschiedenen unlöslichen Korrosionsprodukte des Kupfers. Die klassische Lehrmeinung gibt folgende Abfolge der Korrosionsprodukte an: Metall, Cuprit, gefolgt von Tenorit und dann Malachit. Insgesamt sind die Einflüsse auf die Ausbildung der Korrosionsschicht vielgestaltig. Umwelt-einflüsse oder vorsätzliches Einwirken, Metallzusammensetzung, Temperatur, Feuchte, Lagerung, Dauer sind nur einige davon (STAMBOLOV et al. 1987, 45).

Mit den im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Untersuchungsmethoden liegt kein An-haltspunkt vor, der rechtfertigen würde, von einer verzinnnten Oberfläche der Himmelsscheibe von Nebra zu sprechen. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass die einstige Oberfläche eine heute nicht mehr nachzuweisende, in der vorgeschichtlichen Zeit absichtlich erzeugte Schicht (Patinierung, organische Auflage) besaß, um den ästhetischen Gesichtspunkten bezüglich des Kontrasts zu den Goldauflagen zu genügen.

²⁷ $\delta = \text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ (32,6 Masseprozent Zinn), $\eta = \text{Cu}_6\text{Sn}_5$ (61 Masseprozent Zinn), $\delta = \text{Cu}_3\text{Sn}$ (38,2 Masseprozent Zinn).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse aus den archäometrischen Untersuchungen der Nebraer Himmelscheibe und ihrer Beifunde gestatten die Diskussion und Beantwortung der in der Einleitung aufgeführten Fragen.

Die makroskopischen chemischen Materialanalysen der energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse sowie die der nachweisempfindlicheren instrumentellen Neutronenaktivierungsanalyse sprechen für eine **einheitliche Metallzusammensetzung**. Dieser aus dem Erz gewonnene Rohstoff stammte höchstwahrscheinlich aus **einer Lagerstätte** und wurde sowohl für die Beifunde als auch für die Himmelsscheibe zur Herstellung genutzt.

Basierend auf dieser Erkenntnis wurden in der SMAP-Datenbank, die 41808 Analyseneinträge enthält, chemisch ähnliche Funde mit ihren jeweiligen Ortskoordinaten abgefragt. Zur Visualisierung dieser Abfrageergebnisse wurden anschließend Häufigkeitsdiagramme und Karten erstellt. Die größten Ansammlungen von Funden mit identischer chemischer Spurenelementzusammensetzung wie die Nebraer Scheibe können vorwiegend in den Regionen Ostdeutschlands und Polens konstatiert werden. Damit kristallisiert sich ein ernst zu nehmender Hinweis für **lokale Provenienz** des verwendeten Rohstoffs für die Himmelsscheibe heraus. Aufgrund der festgestellten chemischen **Übereinstimmung der Spurenelemente** kann diese Aussage auch auf die Beifunde übertragen werden. Zugleich kann mit gebührender Vorsicht wegen der teilweise veralteten absolutchronologischen Datierungen der aus der SMAP-Datenbank herausgesuchten Vergleichsproben die **archäologische Datierung der Nebraer Himmelsscheibe bestätigt** werden. Diese Aussage basiert auf der Annahme, dass gleichaltrige Artefakte bestimmter Regionen infolge identischer Rohstoffquellen eine ähnliche chemische Zusammensetzung aufweisen.

Die massenspektrometrisch ermittelten Bleiisotopenverhältnisse weisen signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Artefakten des Hortfundes von Nebra auf. Dennoch widerspricht dies keiner einheitlichen Rohstoffprovenienz. Wurden uran- und/oder thoriumhaltige Erze verhüttet, streuen die Bleiisotopenverhältnisse der Metalle und der Erze trotz identischer Rohstoffquelle signifikant. Deswegen ist in derartigen Fällen einzig die chemische Spurenelementanalyse, abgesehen von den immer nötigen archäologischen und lagerstättenkundlichen Untersuchungen, für die Herkunftsbestimmung aussagekräftig.

Die Oberfläche der Himmelsscheibe von Nebra ist anhand der Lichtmikroskopie, der wellenlängen- und energiedispersiven Röntgenmikrobereichsanalysen sowie der rasterelektronenmikroskopischen Abbildungen **nicht als Verzinnung** identifizierbar. Vielmehr weist alles darauf hin, dass die mit der RFA festgestellte erhöhte Zinnkonzentration der Korrosionsschicht infolge **korrosionsbedingter An- und Abreicherungen** zustande kam.

Aus dem Gefüge der Nebraer Scheibe ist abzulesen, dass nach dem **Gießen** des vermutlich runden Rohlings dieser **verformt** und **abschließend gegläht** worden ist. Die heute noch makroskopisch auf der Rückseite der Scheibe sichtbaren Spuren stammen sicherlich vom Treibprozess, wofür nicht zuletzt die zum Rand hin sich reduzierende und in sich auch variierende Dicke der Himmelsscheibe spricht. Das entstandene Gefüge zeichnet sich durch rekristallisierte Körner mit unverformten Glühzwillingen sowie durch deformierte oxidische und sulfidische Einschlüsse aus.

Im Rahmen dieser Arbeit war es das Ziel, eine fundierte Datenbasis der Objekte des Hortfundes von Nebra einschließlich der einzigartigen Himmelsscheibe für weiterführende Forschungen zu schaffen. Die erstmalige Anwendung der in der Werkzeugherstellung üblichen Funkenerosion brachte die Möglichkeit einer reversiblen Probenahme. Die dadurch erzielten konkreten Anhaltspunkte bezüglich der potentiellen Provenienz des Rohstoffs Kupfer gilt es in naher Zukunft nachzugehen, um sie verifizieren oder falsifizieren zu können.

Sowohl chemische als auch isotopische Untersuchungen der jeweiligen Erze und bereits analysierter anderer Artefakte sowie der anschließende Vergleich mit den hier vorliegenden Daten wären wünschenswert, um weiter etwas Licht ins Dunkel des vorgeschichtlichen Himmels zu bringen.

Literaturverzeichnis

BEGEMANN et al. 1987:

BEGEMANN, F., SCHMITT-STRECKER, S., PERNICKA, E., Isotopic Composition of Lead in Early Metal Artefacts – Results, Possibilities and Limitations. In: HAUPTMANN, A., PERNICKA, E., WAGNER, G. A. (Hrsg.), Old World Metallurgy, 1987, 269–278.

BJERREGAARD et al. 1996:

BJERREGAARD, L., GEELS, K., OTTESEN, B., RÜCKERT, M., Metalog guide (Kopenhagen 1996).

CHARMILLES TECHNOLOGIES 1992:

CHARMILLES TECHNOLOGIES, Schulungshandbuch-Grundkurs Maschine Robofil 310 (Baar 1992).

DIES 1967:

DIES, KURT, Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik (Berlin und Heidelberg 1967).

HERAEUS KULZER 2000:

HERAEUS KULZER & Co. KG, Materialprüfung mit Technovit® - Das große Programm für Schliffeinbettungen und indirekte Oberflächenprüfung (Wehrheim 2000).

HUNGER/BAUMGARTL 1995:

HUNGER, HANS-JÖRG, BAUMGARTL, SIEGFRIED, Rasterelektronenmikroskopie und Elektronenstrahlmikroanalyse. In: HUNGER, HANS-JÖRG (Hrsg.), Werkstoffanalytische Verfahren (Leipzig 1995), 281 – 314.

HUNGER/VETTERS 1995:

HUNGER, HANS-JÖRG, VETTERS, HERMANN, Lichtmikroskopie. In: HUNGER, HANS-JÖRG (Hrsg.), Werkstoffanalytische Verfahren (Leipzig 1995), 68 – 105.

KAUFMANN 1998:

KAUFMANN, STEPHANIE, Archäometrische Untersuchungen an bronzzeitlichen Metallartefakten (Clausthal-Zellerfeld 1998)

KLASSEN/PERNICKA 1998:

KLASSEN, LUTZ, PERNICKA, ERNST, Eine kreuzschneidige Axthacke aus Südsandinavien? – Ein Beispiel für die Anwendungsmöglichkeiten der Stuttgarter Analysendatenbank. Archäologisches Korrespondenzblatt 28, Heft 1, 1998, 35 – 45.

KRAUSE im Druck a/b/c:

KRAUSE, RÜDIGER, Studien zur kupfer- und frühbronzezeitlichen Metallurgie zwischen Karpatenbecken und Ostsee, Bd. 1–3, Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Archäologische Denkmalpflege Stuttgart 1999)

KULEFF/PERNICKA 1995:

KULEFF, IVELINE, PERNICKA, ERNST, Instrumental neutron activation analysis of native copper: Some methodological considerations. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 191, No. 1 (1995), 145 – 161.

LIESER 1991:

LIESER, KARL HEINRICH, Einführung in die Kernchemie (Weinheim 1991).

LUTZ/PERNICKA im Druck:

LUTZ, JOACHIM, PERNICKA, ERNST, Analytische Untersuchungen zur frühen Kupfer und Bronzemetallurgie in Mittel- und Ostdeutschland (im Druck).

LUTZ/PERNICKA 1996:

LUTZ, JOACHIM, PERNICKA, ERNST, Energie dispersive X-ray fluorescence analysis of ancient copper alloys: empirical values for precision and accuracy, Archaeometry 38, 2 (1996), 313 – 323.

MAPINFO CORPORATION 1992 – 1998:

MAPINFO CORPORATION, MapInfo Professional TM Benutzerhandbuch (New York 1992 – 1998).

MEEKS 1993:

MEEKS, NIGEL, Surface characterization of tinned bronze, high-tin bronze, tinned iron and arsenical bronze, 247 – 275. In: LA NIECE, SUSAN, CRADDOCK, PAUL (Hrsg.), Metal platin and patination (Oxford 1993).

MOMMSEN 1986:

MOMMSEN, H., Archäometrie (Stuttgart 1986).

NIEDERSCHLAG et al. 2003:

NIEDERSCHLAG, ELKE, PERNICKA, ERNST, SEIFERT, THOMAS, BARTELHEIM, MARTIN, The determination of lead isotope ratios by multiple collector ICP-MS: a case study of early bronze age artefacts and their possible relation with ore deposits of the Erzgebirge. Archaeometry 45, 2003, 61 – 100.

ODDY/BIMSON 1985:

ODDY, W. A., BIMSON, M., Tinned Bronze in Antiquity, 33 – 39. In: MILES, G., POLLARD, C. (Hrsg.), Lead and tin studies in conservation and Technology, UKIC Occasional Papers No 3, 1985.

OTTO 1995:

OTTO, MATTHIAS, Analytische Chemie (Weinheim 1995).

OTTO 1997:

OTTO, MATTHIAS, Chemometrie – Statistik und Computereinsatz in der Analytik (Weinheim 1997).

PERNICKA 1988:

PERNICKA, ERNST, Metallanalysen, 181 – 213. In: KRAUSE, RÜDIGER, Die endneolithischen und frühbronzezeitlichen Grabfunde auf der Nordstadtterrasse von Singen am Hohentwiel. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 32, 1988.

PERNICKA 1989:

PERNICKA, ERNST, Zur Probenahme von archäologischen Metallobjekten. Arbeitsblätter für Restauratoren, Heft 1, 1989, 138 – 148.

PERNICKA 1990:

PERNICKA, ERNST, Gewinnung und Verbreitung der Metalle in prähistorischer Zeit. Jb. RGZM 37, 1990, 21–129.

PERNICKA 2000a:

PERNICKA, ERNST, Isotope archaeology. In: RAMMLMAIR, D., MEDERER, J., OBERTHÜR, TH., HEIMANN, R. B., TENTINGHAUS, H., Applied Mineralogy in Research, Economy, Technology, Ecology and Culture. Volume 2, 2000, 1025 – 1028.

PERNICKA 2000b:

PERNICKA, ERNST, Neutronenaktivierungsanalyse (NAA). In: PAVIČEVIĆ, MIODRAG K., AMTHAUER, GEORG (Hrsg.), Physikalisch-chemische Untersuchungsmethoden in den Geowissenschaften Band 1, Mikroskopische, analytische und massenspektrometrische Methoden (Stuttgart 2000), 151-158.

PERNICKA/WUNDERLICH 2002:

PERNICKA, ERNST, WUNDERLICH, CHRISTIAN-HEINRICH, Naturwissenschaftliche Untersuchungen an den Funden von Nebra, Archäologie in Sachsen-Anhalt, 1, 2002, 24 – 29.

PERNICKA et al. 1984:

PERNICKA, E., SEELIGER, T., WAGNER, G. A., BEGEMANN, F., SCHMITT-STRECKER, S., EIBNER, C., ÖZTUNALI, Ö., BARANYI, I., Archäometallurgische Untersuchungen in Nordwestanatolien. Jb. RGZM 31, 1984.

PEROVIĆ 2000:

PEROVIĆ, BOŽINA, Spanende und abtragende Fertigungsverfahren: Grundlagen und Berechnungen (Renningen-Malmsheim 2000).

SCHUMANN 1991:

SCHUMANN, HERMANN, Metallographie (Leipzig 1991).

STAMBOLOV et al. 1987:

STAMBOLOV, TODOR, BLECK, ROLF-DIETER, EICHELMANN, NORBERT, Korrosion und Konservierung von Kunst- und Kulturgut aus Metall I (Weimar 1987).

UHU 2000:

UHU Technisches Merkblatt, DUOSAN Universalkleber (Bühl 2000).

WEBER-DIEFENBACH 2000:

WEBER-DIEFENBACH, KLAUS, Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA). In: PAVIČEVIĆ, MIODRAG K., AMTHAUER, GEORG (Hrsg.), Physikalisch-chemische Untersuchungsmethoden in den Geowissenschaften Band 1, Mikroskopische, analytische und massenspektrometrische Methoden (Stuttgart 2000), 115-132.

Anhang

Abbildungsverzeichnis

<u>Abbildung A-1-1</u>	<u>Gegenüberstellung des Programmablaufplans mit der daraus entwickelten Gliederung dieser vorliegenden Arbeit</u>	73
------------------------	--	----

Tabellenverzeichnis

<u>Tabelle A-2-1</u>	<i>Übersicht der genommenen Probenmengen sowie deren Verteilung auf die angewandten archäometrischen Untersuchungsmethoden</i>	74
<u>Tabelle A-3-1</u>	<i>Messergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse</i>	75
<u>Tabelle A-3-2</u>	<i>chemometrische Daten der mittels der RFA gemessenen Schnittflächen der funkenerosiv herausgetrennten Probe aus der Himmelsscheibe von Nebra, allerdings ohne die der Korrosionsschicht (alle Selenwerte befinden sich unterhalb der Nachweisgrenze und sind deswegen in dieser Auflistung nicht zu finden); ausgeführt wurden die Berechnungen mit der Software STATGRAPHICS Plus 5.0 und die in Tabelle A-3-1 im Anhang aufgeführten Werte unterhalb der Nachweisgrenze, die mit einem „<“-Zeichen markiert sind, mussten für diese statistische Auswertung mit dem empirischen Faktor 0,5 multipliziert werden</i>	77
<u>Tabelle A-3-3</u>	<i>Zusammenstellung der in der smap_01_99.mdb aufgeführten 41808 Datenbankeinträge und deren Verteilung auf die dazu angegebenen Großräume nach SANGMEISTER (KRAUSE im Druck c. 5ff.)</i>	78
<u>Tabelle A-3-4</u>	<i>121 Vergleichsfunde der Himmelsscheibe mit den berechneten Suchintervallen (Tabelle 3-3) von ± 2</i>	79
<u>Tabelle A-3-5</u>	<i>1037 Vergleichsfunde der Himmelsscheibe mit den berechneten Suchintervallen (Tabelle 3-3) von ± 4</i>	80
<u>Tabelle A-3-6</u>	<i>Messergebnisse der Neutronenaktivierungsanalyse</i>	81
<u>Tabelle A-3-7</u>	<i>Messergebnisse der Multikollektor-Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma</i>	83
<u>Tabelle A-3-8</u>	<i>Messergebnisse der enerdiedispersiven Röntgenmikrobereichsanalysen durchgeführt mit dem Rasterelektronenmikroskop (Messbedingungen aller Punktanalysen: ■15,0 kV ■Beam Current 100,0 pA ■working distance 25 mm ■tilt angle 0,0 ° ■takeoff angle 35,0 ° ■solid angle*beamcurrent 0,6)</i>	84

Ablaufplan für Bearbeitung des Themas

Gliederung der Arbeit

1 **Einleitung**

Funde

2 **Archäologische Betrachtungen**

Beifunde

Himmelsscheibe

Archäologische Betrachtung

Festlegung der archäometrischen Untersuchungsmethoden

3 **Archäometrische Untersuchungsmethoden**

Probenahme

3.1 Probenahme

Beifunde

Himmelsscheibe

3.1.1 Beifunde: Lochbohrung

Erprobung am Dummie

3.1.2 Himmelsscheibe: funkenerosives
Abtragen

Probenahme an Originalen

— | —
Probenahme am Original

3.1.2.1 Vorversuche an der Proben-
probe

3.1.2.2 Probenahme am Original

Proben

3.1.3 Himmelsscheibe: Lochbohrung

Archäometrische Untersuchungsmethoden

Beifunde
Methode
Himmelsscheibe

3.2 Einige theoretische und praktische Grundlagen der angewandten archäometrischen Untersuchungsmethoden

3.2.1 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

EDRFA

3.2.2 Neutronenaktivierungsanalyse (NAA)

3.2.3 Multikollektor-Massenspektrometrie mit
induktiv gekoppeltem Plasma
(MC-ICP-MS)

INAA

3.2.4 Metallkundliche Untersuchungen

MC-ICP-MS

4 Ergebnisse, Auswertung, Interpretation

Metallografie
ESMA



Ergebnisse

Methoden der Auswertung/ Interpretation

Beifunde
Methode
Himmelsscheibe

Betrachtung der Trends

chemometrische Betrachtungen

Verfahren zur potentiellen Provenienzbestimmung

5 Zusammenfassung und Ausblick

Auswertung/ Interpretation

Zusammenfassung/ Ausblick/ Fortführung

Abbildung A-1-1 *Gegenüberstellung des Programmablaufplans mit der daraus entwickelten Gliederung dieser vorliegenden Arbeit*

Tabelle A-2-1 Übersicht der genommenen Probenmengen sowie deren Verteilung auf die angewandten archäometrischen Untersuchungsmethoden

Pr_Nr (Proben- nummer)	Originalnummer	Objekt	Einwaagen (EW)					Trennung
			(Gesamteinwaage)		(nicht funktioniert)			
			EW [mg] EDRFA	EW [mg] INAA	EW [mg] MC-ICP-MS	EW [mg] MC-ICP-MS	EW [mg] (Rest)	
FG-020984		Himmelsscheibe		13,6		11,6	13,6	05.02.2003
FG-020678	Hk: 2002: 1649 g	Schwert ohne Griff (Griff mit 1 fehlendem Niet)	13,3	12,9		12,9 (von INAA)	0,4	30.01.2003
FG-020679	Hk: 2002: 1649 b	Meißel (Oberflächenprobe)	2	nein	nein		2	nein (da Oberflächenprobe)
FG-020680	Hk: 2002: 1649 b	Meißel (Metallproben)	40,2	21		17,7	22,5	30.01.2003
FG-020681	Hk: 2002: 1649 b	Meißel	34,8	26		nein	34,8	nein (da vom selben Objekt)
FG-020682	Hk: 2002: 1649 c	Randleistenbeil I	81	33,7	15,2 (08.01.2003)	14,9	50,9	30.01.2003
FG-020683	Hk: 2002: 1649 d	Randleistenbeil II	76	25,5	15,1 (08.01.2003)	25,5	35,4	30.01.2003
FG-020684	Hk: 2002: 1649 m	Schwert (Knauf)	20,5	20,1			20,5	nicht analysiert
FG-020685	Hk: 2002: 1649 f	Schwert ohne Griff	4	3,9		3,9	0,1	28.02.2003
FG-020686	Hk: 2002: 1649 f	Schwert ohne Griff (Tauschierung)	2,4	2,4		nein	2,4	nein (zu wenig Probenmaterial)
FG-020687	Hk: 2002: 1649 e	Schwert mit Griff (Griff hinten)	42,9	28,5		14,5	28,4	30.01.2003
FG-020688	Hk: 2002: 1649 e	Schwert mit Griff (Mittelrippe)	6	6,2		6	0	05.02.2003
FG-020689	Hk: 2002: 1649 I	Schwert (Dorn)	20,2	20			20,2	nicht analysiert
FG-020690	Hk: 2002: 1649 I	Schwert (Dorn_seitliche Probenahme)	4	nein	nein		4	nein (da Oberflächenprobe)
FG-020691	Hk: 2002: 1649 ak	Nietkopf I	6,9	6,9		nein	6,9	nein
FG-020692	Hk: 2002: 1649 ak	Nietdorn I	12,2	11,8		11,8	0,4	13.02.2003
FG-020693	Hk: 2002: 1649 ak	Nietkopf II	24,5	22,9		nein	24,5	nein (da Mehrfachprobe)
FG-020694	Hk: 2002: 1649 ak	Nietdorn II	14	13,8		13,8	0,2	13.02.2003
FG-020695	Hk: 2002: 1649 ah	Nietkopf III	10,8	10,8		10,8	0	13.02.2003
FG-020696	Hk: 2002: 1649 ah	Nietdorn III	15,7	15,2		15,2	0,5	28.02.2003
FG-020697	Hk: 2002: 1649 ai	Niet mit langem Dorn (Nietkopf)	21,2	20,3		nein	21,2	nein (da Mehrfachprobe)
FG-020698	Hk: 2002: 1649 ai	Nietdorn mit langem Niet	27,4	25		25	2,4	13.02.2003
FG-020699	Hk: 2002: 1649 ag	Nietstift	23,2	21,7		21,7	1,5	28.02.2003
FG-020700	Hk: 2002: 1649 h	Schwert (Griffdorn)	13,6	11,7		nein	13,6	nein
FG-020701	Hk: 2002: 1649 h	Schwert (Griffdornkopf, Unterseite)	44,7	20,3		14,1	30,6	05.02.2003
FG-020702	Hk: 2002: 1649 ad	Spiralring	4,7	4,9		4,9	0	28.02.2003
FG-020703	Hk: 2002: 1649 u	Spiralring	8,8	8,4		8,4	0,4	13.02.2003

Tabelle A-3-1 Messergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse

Pr_Nr	Objekt	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Au	Pb	Bi	Ag	Sn	Sb	Te
FG-020723	Himmelsscheibe (Korrosion)	0,12	0,012	0,198	95	< 0,1	0,31	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,009	4,1	0,018	< 0,008
FG-020724	Himmelsscheibe (Schnittfläche)	0,15	< 0,005	0,236	97	0,1	0,161	< 0,005	0,01	0,02	< 0,005	0,009	2,56	< 0,005	< 0,008
FG-020725	Himmelsscheibe (Schnittfläche)	0,16	< 0,005	0,241	97	0,2	0,174	< 0,005	0,02	0,04	< 0,005	0,01	2,47	0,014	0,02
FG-020726	Himmelsscheibe (Schnittfläche)	0,25	< 0,005	0,24	96	0,2	0,176	< 0,005	< 0,01	0,03	0,006	0,014	2,55	0,014	< 0,008
FG-020727	Himmelsscheibe (Schnittfläche)	0,17	0,006	0,213	96	0,1	0,202	< 0,005	0,01	0,02	< 0,005	0,012	2,82	0,017	< 0,008
FG-020728	Himmelsscheibe (Korrosion)	0,08	< 0,005	0,164	95	< 0,1	0,32	< 0,005	0,02	0,02	< 0,005	0,011	4	0,006	< 0,008
FG-020678	Schwert ohne Griff (Griff mit 1 fehlendem Niet)	< 0,05	0,014	0,201	93	< 0,1	0,285	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,02	8,1	0,045	< 0,008
FG-020679	Meißel (Oberflächenprobe)	0,14	0,01	0,179	94	< 0,1	0,293	0,007	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,012	9,5	0,012	< 0,008
FG-020680	Meißel (Metallprobe)	0,07	0,014	0,165	87	< 0,1	0,162	< 0,005	0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	8	0,022	< 0,008
FG-020681	Meißel	0,14	0,012	0,179	87	< 0,1	0,21	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,008	8,7	0,023	< 0,008
FG-020682	Randleistenbeil I	0,13	0,02	0,264	89	< 0,1	0,155	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,006	6,1	< 0,005	< 0,008
FG-020683	Randleistenbeil II	0,19	0,012	0,179	92	< 0,1	0,076	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	4,2	< 0,005	< 0,008
FG-020684	Schwert (Knauf)	0,08	0,007	0,219	91	< 0,1	0,39	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	6,7	0,031	< 0,008
FG-020685	Schwert ohne Griff	0,06	0,01	0,247	93	< 0,1	0,35	< 0,005	0,01	< 0,01	< 0,005	0,027	8,5	0,015	< 0,008
FG-020686	Schwert ohne Griff (Tauschierung)	< 0,05	0,006	0,158	99	< 0,1	0,108	0,006	0,03	< 0,01	< 0,005	< 0,005	0,35	< 0,005	< 0,008
FG-020687	Schwert mit Griff (Griff hinten)	0,11	0,01	0,211	89	< 0,1	0,4	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	6,7	0,034	< 0,008
FG-020688	Schwert mit Griff (Mittelrippe)	0,05	0,016	0,192	94	< 0,1	0,32	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,015	7,1	0,023	< 0,008
FG-020689	Schwert (Dorn)	< 0,05	0,014	0,216	92	< 0,1	0,4	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	6,9	0,018	< 0,008
FG-020690	Schwert (Dorn_seitliche Probenahme)	0,13	< 0,005	0,123	90	< 0,1	1,35	0,008	0,02	< 0,01	< 0,005	0,021	8,6	0,021	< 0,008
FG-020691	Nietkopf I	< 0,05	0,013	0,172	94	< 0,1	0,275	< 0,005	0,02	0,04	< 0,005	0,011	8,3	0,014	< 0,008
FG-020692	Nietdorn I	< 0,05	0,012	0,184	91	< 0,1	0,115	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	9,6	< 0,005	< 0,008
FG-020693	Nietkopf II	< 0,05	< 0,005	0,094	91	< 0,1	0,109	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,008	6,8	< 0,005	< 0,008
FG-020694	Nietdorn II	< 0,05	< 0,005	0,165	90	< 0,1	0,117	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	9,8	0,011	< 0,008
FG-020695	Nietkopf III	< 0,05	< 0,005	0,077	93	< 0,1	0,111	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,01	7	0,011	< 0,008

FG-020696	Nietdorn III	< 0,05	0,006	0,177	91	< 0,1	0,112	0,006	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,011	9,2	0,013	< 0,008
FG-020697	Nietkopf mit langem Dorn	< 0,05	< 0,005	0,082	92	< 0,1	0,122	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	< 0,005	7,1	< 0,005	< 0,008
FG-020698	Nietdorn mit langem Dorn	< 0,05	0,006	0,141	89	< 0,1	0,109	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,005	8,3	< 0,005	< 0,008
FG-020699	Nietstift	0,05	0,008	0,171	92	< 0,1	0,51	0,008	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,024	7,3	0,035	< 0,008
FG-020700	Schwert (Griffdorn)	< 0,05	0,012	0,172	92	< 0,1	0,59	0,006	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,008	7,9	0,033	< 0,008
FG-020701	Schwert (Griffdornkopf, Unterseite)	< 0,05	0,009	0,205	89	< 0,1	0,292	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,038	6,5	0,044	< 0,008
FG-020702	Spiralring	0,09	0,017	0,092	93	< 0,1	0,104	< 0,005	0,02	< 0,01	< 0,005	< 0,005	9,1	< 0,005	0,017
FG-020703	Spiralring	0,07	0,007	0,109	92	< 0,1	0,08	< 0,005	0,02	0,02	< 0,005	< 0,005	8,6	< 0,005	0,018

Tabelle A-3-2 chemometrische Daten der mittels der RFA gemessenen Schnittflächen der funkenerosiv herausgetrennten Probe aus der Himmelscheibe von Nebra, allerdings ohne die der Korrosionsschicht (alle Selenwerte befinden sich unterhalb der Nachweisgrenze und sind deswegen in dieser Auflistung nicht zu finden); ausgeführt wurden die Berechnungen mit der Software STATGRAPHICS Plus 5.0 und die in **Tabelle A-3-1** im Anhang aufgeführten Werte unterhalb der Nachweisgrenze, die mit einem „<“-Zeichen markiert sind, mussten für diese statistische Auswertung mit dem empirischen Faktor 0,5 multipliziert werden²⁸

Fundgruppe	Element	Count	Average [Masse- %]	Median [Masse- %]	Variance [Masse- %]	Standard deviation [Masse- %]	relative Standard deviation [%]	Minimum [Masse- %]	Maximum [Masse- %]	Range [Masse- %]	Ausreißer
Himmelsscheibe	Ag	4	0,011	0,011	4,91667E-06	0,002	19,710	0,009	0,014	0,005	keinen
	As	4	0,178	0,175	0,0003	0,017	9,634	0,161	0,202	0,041	keinen
	Au	4	0,011	0,01	3,95833E-05	0,006	55,925	0,005	0,02	0,015	keinen
	Bi	4	0,003	0,003	3,0625E-06	0,002	51,852	0,003	0,006	0,004	keinen
	Co	4	0,003	0,003	3,0625E-06	0,002	51,852	0,003	0,006	0,004	keinen
	Cu	4	96,5	96,5	0,333	0,577	0,598	96	97	1	keinen
	Fe	4	0,183	0,165	0,002	0,046	25,060	0,15	0,25	0,1	keinen
	Ni	4	0,233	0,238	0,0002	0,013	5,668	0,213	0,241	0,028	keinen
	Pb	4	0,028	0,025	9,16667E-05	0,010	34,816	0,02	0,04	0,02	keinen
	Sb	4	0,012	0,014	4,10625E-05	0,006	53,962	0,003	0,017	0,015	keinen
	Sn	4	2,6	2,555	0,023	0,152	5,850	2,47	2,82	0,35	keinen
	Te	4	0,008	0,004	0,0001	0,008	100,000	0,004	0,02	0,016	keinen
	Zn	4	0,15	0,15	0,003	0,058	38,490	0,1	0,2	0,1	keinen

²⁸ Persönliche Mitteilung von E. PERNICKA.

Tabelle A-3-3 Zusammenstellung der in der *smap_01_99.mdb* aufgeführten 41808 Datenbankeinträge und deren Verteilung auf die dazu angegebenen Großräume nach SANGMEISTER (KRAUSE im Druck c, 5ff.)

Großräume nach SANGMEISTER	Anzahl der untersuchten Funde (Datenbankeinträge)	Anteil Gesamteinträge [%]
/	61	0,15
Fundort unbekannt	177	0,42
Iberische Halbinsel	2187	5,23
Frankreich	5300	12,68
Italien	1145	2,74
Britische Inseln	2185	5,23
Beneluxstaaten und Nordwestdeutschland	387	0,93
Südwest-Mitteleuropa	5576	13,34
Österreich und Ostalpen	2487	5,95
Polen	438	1,05
Skandinavien und Island	1308	3,13
Ostdeutschland	3741	8,95
Böhmen und Mähren	2075	4,96
Karpatenbecken	5432	12,99
ehemaliges Jugoslawien und Albanien	753	1,80
Griechenland	894	2,14
Bulgarien und Rumänien	1578	3,77
GUS (Gemeinschaft unabhängiger Staaten)	2673	6,39
Türkei und Zypern	1468	3,51
Nordafrika	437	1,05
Vorderer Orient	1385	3,31
Indien und Afghanistan	83	0,20
Ferner Osten	9	0,02
Neuseeland	1	0,00
Südamerika	28	0,07

Tabelle A-3-4 121 Vergleichsfunde der Himmelsscheibe mit den berechneten Suchintervallen
(Tabelle 3-3) von ± 2

Großräume nach SANGMEISTER	Anzahl der Vergleichsfunde	Anteil Vergleichs- funde [%]	Häufigkeitsfaktor = $\frac{\text{Anteil Vergleichsfunde} [\%]}{\text{Anteil Gesamteinträge} [\%]}$
ohne Angabe	2	1,65	11,02
Fundort unbekannt	1	0,83	1,97
Frankreich	13	10,74	0,85
Italien	2	1,65	0,60
Britische Inseln	3	2,48	0,47
Beneluxstaaten und Nordwestdeutschland	1	0,83	0,89
Südwest-Mitteleuropa	24	19,83	1,49
Österreich und Ostalpen	11	9,09	1,53
Polen	6	4,96	4,72
Skandinavien und Island	7	5,79	1,85
Ostdeutschland	22	18,18	2,03
Böhmen und Mähren	8	6,61	1,33
Karpatenbecken	11	9,09	0,70
Griechenland	1	0,83	0,39
Bulgarien und Rumänien	3	2,48	0,66
GUS	1	0,83	0,13
Türkei und Zypern	1	0,83	0,24
Nordafrika	1	0,83	0,79
Vorderer Orient	3	2,48	0,75

Tabelle A-3-5 1037 Vergleichsfunde der Himmelsscheibe mit den berechneten Suchintervallen (**Tabelle 3-3**) von ± 4

Großräume nach SANGMEISTER	Anzahl der Vergleichsfunde	Anteil Vergleichsfunde [%]	Häufigkeitsfaktor = Anteil Vergleichsfunde [%] Anteil Gesamteinträge [%]
ohne Angabe	3	0,29	1,93
Fundort unbekannt	3	0,29	0,69
Iberische Halbinsel	11	1,06	0,20
Frankreich	143	13,79	1,09
Italien	8	0,77	0,28
Britische Inseln	60	5,79	1,11
Beneluxstaaten und Nordwestdeutschland	8	0,77	0,83
Südwest-Mitteleuropa	167	16,10	1,21
Österreich und Ostalpen	54	5,21	0,88
Polen	17	1,64	1,56
Skandinavien und Island	43	4,15	1,32
Ostdeutschland	156	15,04	1,68
Böhmen und Mähren	55	5,30	1,07
Karpatenbecken	128	12,34	0,95
ehemaliges Jugoslawien und Albanien	10	0,96	0,54
Griechenland	13	1,25	0,59
Bulgarien und Rumänien	53	5,11	1,36
GUS	15	1,45	0,23
Türkei und Zypern	46	4,44	1,26
Nordafrika	8	0,77	0,73
Vorderer Orient	35	3,38	1,02
Ferner Osten	1	0,10	4,82

Tabelle A-3-6 Messergebnisse der Neutronenaktivierungsanalyse

Pr_Nr	Objekt	As [g/g]	± Fehler [g/g]	As [ppm]	Sb [g/g]	± Fehler [g/g]	Sb [ppm]	Au [g/g]	± Fehler [g/g]	Au [ppm]	Ag [g/g]	± Fehler [g/g]	Ag [ppm]
FG-020984	Himmelsscheibe	1,370E-03	3,9E-05	1370,0	1,293E-04	2,2E-06	129,30	8,557E-07	2,3E-08	0,8557	6,245E-05	1,7E-06	62,45
FG-020678	Schwert ohne Griff (Griff mit 1 fehlendem Niet)	2,661E-03	5,0E-05	2661,0	5,020E-04	5,8E-06	502,00	1,538E-06	2,6E-08	1,5380	2,736E-04	4,2E-06	273,60
FG-020680	Meißel (Metallprobe)	1,676E-03	3,2E-05	1676,0	4,338E-04	4,3E-06	433,80	7,698E-07	1,5E-08	0,7698	1,783E-04	2,7E-06	178,30
FG-020681	Meißel	1,780E-03	3,2E-05	1780,0	4,505E-04	4,0E-06	450,50	8,373E-07	1,4E-08	0,8373	1,891E-04	2,7E-06	189,10
FG-020682	Randleistenbeil I	1,787E-03	3,5E-05	1787,0	6,423E-05	9,0E-07	64,23	1,053E-06	1,4E-08	1,0530	6,438E-05	1,3E-06	64,38
FG-020683	Randleistenbeil II	8,028E-04	1,8E-05	802,8	2,437E-05	5,0E-07	24,37	6,202E-07	1,0E-08	0,6202	6,079E-05	1,4E-06	60,79
FG-020684	Schwert (Knauf)	3,714E-03	7,1E-05	3714,0	4,773E-04	5,2E-06	477,30	1,188E-06	2,1E-08	1,1880	8,824E-05	2,2E-06	88,24
FG-020685	Schwert ohne Griff	3,212E-03	7,5E-05	3212,0	3,230E-04	8,6E-06	323,00	1,747E-06	3,7E-08	1,7470	1,660E-04	5,4E-06	166,00
FG-020686	Schwert ohne Griff (Tauschierung)	8,674E-04	4,2E-05	867,4	3,320E-05	2,0E-06	33,20	6,262E-07	3,2E-08	0,6262	7,499E-05	6,5E-06	74,99
FG-020687	Schwert mit Griff (Griff hinten)	3,885E-03	7,2E-05	3885,0	4,913E-04	4,5E-06	491,30	1,190E-06	1,6E-08	1,1900	8,613E-05	1,6E-06	86,13
FG-020688	Schwert mit Griff (Mittelrippe)	2,304E-03	5,2E-05	2304,0	1,617E-04	3,4E-06	161,70	1,120E-06	2,3E-08	1,1200	1,245E-04	4,9E-06	124,50
FG-020689	Schwert (Dorn)	3,806E-03	6,7E-05	3806,0	4,933E-04	4,6E-06	493,30	1,469E-06	2,0E-08	1,4690	9,379E-05	2,5E-06	93,79
FG-020691	Nietkopf I	2,106E-03	5,6E-05	2106,0	1,755E-04	3,4E-06	175,50	7,178E-06	8,0E-08	7,1780	1,069E-04	2,6E-06	106,90
FG-020692	Nietdorn I	1,061E-03	3,1E-05	1061,0	5,259E-05	1,2E-06	52,59	8,251E-07	1,6E-08	0,8251	7,354E-05	2,4E-06	73,54
FG-020693	Nietkopf II	1,114E-03	2,6E-05	1114,0	3,049E-05	6,0E-07	30,49	4,916E-07	9,7E-09	0,4916	7,356E-05	1,6E-06	73,56
FG-020694	Nietdorn II	1,017E-03	2,7E-05	1017,0	5,086E-05	1,1E-06	50,86	7,866E-07	1,5E-08	0,7866	6,834E-05	1,9E-06	68,34
FG-020695	Nietkopf III	1,159E-03	3,2E-05	1159,0	3,290E-05	9,0E-07	32,90	5,060E-07	1,6E-08	0,5060	7,852E-05	2,1E-06	78,52
FG-020696	Nietdorn III	9,616E-04	2,6E-05	961,6	4,642E-05	9,4E-07	46,42	7,569E-07	1,6E-08	0,7569	6,682E-05	1,8E-06	66,82
FG-020697	Nietkopf mit langem Dorn	1,141E-03	2,8E-05	1141,0	3,308E-05	6,6E-07	33,08	5,242E-07	1,0E-08	0,5242	8,180E-05	1,6E-06	81,80
FG-020698	Nietdorn mit langem Dorn	9,708E-04	2,3E-05	970,8	4,298E-05	9,5E-07	42,98	7,146E-07	1,2E-08	0,7146	6,741E-05	1,4E-06	67,41
FG-020699	Nietstift	4,638E-03	8,2E-05	4638,0	4,232E-04	4,8E-06	423,20	1,701E-06	2,2E-08	1,7010	1,983E-04	2,8E-06	198,30
FG-020700	Schwert (Griffdorn)	4,354E-03	9,0E-05	4354,0	4,208E-04	5,4E-06	420,80	1,614E-06	2,6E-08	1,6140	1,972E-04	3,5E-06	197,20
FG-020701	Schwert (Griffdornkopf, Unterseite)	3,033E-03	6,2E-05	3033,0	6,849E-04	6,6E-06	684,90	1,671E-06	2,5E-08	1,6710	5,802E-04	6,5E-06	580,20
FG-020702	Spiralring	7,572E-04	3,2E-05	757,2	8,877E-05	3,5E-06	88,77	4,593E-07	2,1E-08	0,4593	3,259E-05	2,6E-06	32,59
FG-020703	Spiralring	6,898E-04	2,5E-05	689,8	7,532E-05	2,1E-06	75,32	4,306E-07	1,5E-08	0,4306	3,139E-05	1,8E-06	31,39

Pr_Nr	Objekt	Ni [g/g]	± Fehler [g/g]	Ni [ppm]	Fe [g/g]	± Fehler [g/g]	Fe [ppm]	Zn [g/g]	± Fehler [g/g]	Zn [ppm]
FG-020984	Himmelsscheibe	2,423E-03	9,7E-05	2423,0	1,516E-04	3,9E-05	151,6	7,666E-04	1,4E-04	766,60
FG-020678	Schwert ohne Griff (Griff mit 1 fehlendem Niet)	2,285E-03	8,6E-05	2285,0	nicht detektiert		nicht detektiert	nicht detektiert		nicht detektiert
FG-020680	Meißel (Metallprobe)	1,910E-03	7,0E-05	1910,0	8,267E-04	2,2E-04	826,7	nicht detektiert		nicht detektiert
FG-020681	Meißel	1,736E-03	6,8E-05	1736,0	5,625E-04	1,7E-04	562,5	nicht detektiert		nicht detektiert
FG-020682	Randleistenbeil I	2,789E-03	8,9E-05	2789,0	7,672E-04	1,4E-04	767,2	nicht detektiert		nicht detektiert
FG-020683	Randleistenbeil II	1,826E-03	5,5E-05	1826,0	1,654E-03	2,3E-04	1654,0	2,298E-05	4,0E-06	22,98
FG-020684	Schwert (Knauf)	2,089E-03	6,9E-05	2089,0	nicht detektiert		nicht detektiert	nicht detektiert		nicht detektiert
FG-020685	Schwert ohne Griff	2,656E-03	1,6E-04	2656,0	nicht detektiert		nicht detektiert	nicht detektiert		nicht detektiert
FG-020686	Schwert ohne Griff (Tauschierung)	1,857E-03	2,1E-04	1857,0	nicht detektiert		nicht detektiert	5,189E-04	3,2E-05	518,90
FG-020687	Schwert mit Griff (Griff hinten)	2,298E-03	6,6E-05	2298,0	7,617E-04	1,8E-04	761,7	1,741E-05	5,4E-06	17,41
FG-020688	Schwert mit Griff (Mittelrippe)	2,239E-03	1,1E-04	2239,0	nicht detektiert		nicht detektiert	nicht detektiert		nicht detektiert
FG-020689	Schwert (Dorn)	2,191E-03	7,1E-05	2191,0	nicht detektiert		nicht detektiert	nicht detektiert		nicht detektiert
FG-020691	Nietkopf I	1,784E-03	1,2E-04	1784,0	nicht detektiert		nicht detektiert	nicht detektiert		nicht detektiert
FG-020692	Nietdorn I	1,874E-03	8,2E-05	1874,0	nicht detektiert		nicht detektiert	4,457E-05	5,5E-06	44,57
FG-020693	Nietkopf II	8,214E-04	3,7E-05	821,4	nicht detektiert		nicht detektiert	2,435E-05	3,4E-06	24,35
FG-020694	Nietdorn II	1,893E-03	8,7E-05	1893,0	nicht detektiert		nicht detektiert	4,086E-05	4,8E-06	40,86
FG-020695	Nietkopf III	7,849E-04	5,5E-05	784,9	nicht detektiert		nicht detektiert	2,810E-05	5,3E-06	28,10
FG-020696	Nietdorn III	1,620E-03	6,7E-05	1620,0	nicht detektiert		nicht detektiert	3,384E-05	5,2E-06	33,84
FG-020697	Nietkopf mit langem Dorn	9,139E-04	4,1E-05	913,9	nicht detektiert		nicht detektiert	nicht detektiert		nicht detektiert
FG-020698	Nietdorn mit langem Dorn	1,656E-03	5,5E-05	1656,0	4,337E-04	1,3E-04	433,7	nicht detektiert		nicht detektiert
FG-020699	Nietstift	1,668E-03	6,6E-05	1668,0	4,619E-04	1,7E-04	461,9	nicht detektiert		nicht detektiert
FG-020700	Schwert (Griffdorn)	1,971E-03	9,2E-05	1971,0	nicht detektiert		nicht detektiert	nicht detektiert		nicht detektiert
FG-020701	Schwert (Griffdornkopf, Unterseite)	2,060E-03	7,4E-05	2060,0	nicht detektiert		nicht detektiert	nicht detektiert		nicht detektiert
FG-020702	Spiralring	7,393E-04	1,6E-04	739,3	nicht detektiert		nicht detektiert	4,691E-05	1,1E-05	46,91
FG-020703	Spiralring	6,645E-04	8,3E-05	664,5	nicht detektiert		nicht detektiert	5,292E-05	7,0E-06	52,92

Tabelle A-3-7 Messergebnisse der Multikollektor-Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma

Pr_Nr Objekt	Korrigierte Mittelwerte der Bleisotopenverhältnisse		
	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
FG-020984	2,1043	0,86185	18,105
Himmelsscheibe			
FG-020678	2,0758	0,83851	18,687
Schwert ohne Griff (Griff mit einem fehlendem Niet)			
FG-020680	2,0171	0,8077	19,503
Meißel (Metallprobe)			
FG-020682	2,0321	0,80899	19,463
Randleistenbeil I			
FG-020683	2,079	0,84399	18,588
Randleistenbeil II			
FG-020685	2,0434	0,82106	19,19
Schwert ohne Griff			
FG-020687	2,0609	0,82595	19,043
Schwert mit Griff (Griff hinten)			
FG-020688	2,0559	0,82644	19,019
Schwert mit Griff (Mittelrippe)			
FG-020692	2,0528	0,82543	19,035
Nietdorn I (Niet I)			
FG-020694	2,0525	0,82512	19,051
Nietdorn II (Niet II)			
FG-020695	2,0605	0,83122	18,88
Nietkopf III (Niet III)			
FG-020696	2,0752	0,83814	18,696
Nietdorn III (Niet III)			
FG-020698	2,0578	0,82923	18,934
Nietdorn mit langem Niet			
FG-020699	2,020267	0,80362	19,589
Nietstift			
FG-020701	2,0485	0,82191	19,126
Schwert (Griffdornkopf, Unterseite)			
FG-020702	2,0734	0,8324	18,881
Spiralring			
FG-020703	2,0753	0,83275	18,869
Spiralring			

Tabelle A-3-8 *Messergebnisse der enerdiedispersiven Röntgenmikrobereichsanalysen durchgeführt mit dem Rasterelektronenmikroskop*
(Messbedingungen aller Punktanalysen:

- *15,0 kV*
- *Beam Current 100,0 pA*
- *working distance 25 mm*
- *tilt angle 0,0 °*
- *takeoff angle 35,0 °*
- *solid angle*beamcurrent 0,6)*

Punktanalyse	Element									
	O	O	Cu	Cu	Sn	Sn	S	S	Si	Si
	[Masse-%]	[Atom-%]	[Masse-%]	[Atom-%]	[Masse-%]	[Atom-%]	[Masse-%]	[Atom-%]	[Masse-%]	[Atom-%]
[REM_1] Randschicht (sehr helle Phase, Seigerung?)	8,15	28,79	66,39	59,08	25,47	12,13	/	/	/	/
[REM_2], [REM_8], [REM_9], [REM_10] Randschicht (helle Phase)	6,0	20,47	91,16	78,22	2,83	1,30	/	/	/	/
[REM_7] Randschicht (dunkle Phase)	10,71	32,27	89,29	67,73	/	/	/	/	/	/
[REM_4], [REM_6] Einschluss (kleinerer, hellere Phase)	/	/	81,74	69,31	/	/	18,26	30,69	/	/
[REM_5] Einschluss (dunklere Phase)	2,71	9,8	92,72	84,39	2	0,98	1,78	3,21	0,79	1,62

Dipl.-Arch. DANIELA NICKEL
Lessingstrasse 40
09599 Freiberg

Prof. Dr. ERNST PERNICKA
Institut für Archäometrie (Technische Universität Bergakademie Freiberg)
Zeunerstrasse 5
09596 Freiberg