

Reine Diffusionsbindung

Rekonstruktion einer antiken Vergoldungstechnik und ihrer Anwendungsbereiche im damaligen Metallhandwerk¹

MATTHIAS BECKER, MANFRED FÜTING,
PETER HAMMER UND ULRICH SIEBLIST

1. Vergoldungsverfahren

1.1 *Forschungsstand und Befundsituation*

Vergoldungen effektiv herzustellen, d. h. mit sparsamstem Materialeinsatz des wertvollen Goldes eine relativ große goldfarbene Fläche zu erzeugen oder gezielt polychrome Effekte zu erreichen, ist eine lang geübte und weit verbreitete Methode seit der Zeit, in der Gold verarbeitet wird.

So nimmt es nicht wunder, daß die Frage nach den dafür angewandten Vergoldungstechniken auch in der archäologischen und technikgeschichtlichen Literatur eine wichtige Rolle spielt. Neben den bekannten antiken Schriftquellen stehen zur Beantwortung dieser Frage auch die Fundstücke selbst zur Verfügung. Doch standen der Wert der Gegenstände, die Exklusivität der Stücke und der wohlbegründete Respekt vor den Ergebnissen handwerklicher Meisterschaft naturwissenschaftlichen Untersuchungen, die mit Eingriffen in das Material einhergehen, meist entgegen. Dadurch waren die Möglichkeiten, auf diese Weise Erkenntnisgewinne zu erzielen, eingeschränkt.

Die Entwicklung neuer Untersuchungsmethoden, das verstärkte Augenmerk auf bereits antik zerstörte Fundstücke sowie die intensivere Auseinandersetzung mit Werkabfällen (z. B. aus Siedlungsgruben) führten im Ergebnis zu vertiefenden Erkenntnissen über die Vergoldungstechniken.

¹ Die vorliegende Studie wäre ohne das freundliche und offene Entgegenkommen zahlreicher Kollegen der unterschiedlichsten Fachdisziplinen und ihre kritischen, anregenden und fruchtbringenden Anmerkungen nicht möglich gewesen. Von besonderer Bedeutung waren Studienreisen von M. Becker, M. Fütting und H. Schnarr sowie von M. Becker und U. Sieblist nach Moesgård und Schleswig. Für die herzliche und entgegenkommende Aufnahme in Moesgård sowie für die weitreichende Möglichkeit, die Preßblecharbeiten aus Illerup zu studieren und Fallbeispiele zu diskutieren, sind wir J. Ilkjær zu großem Dank verpflichtet.

Gleichermaßen möchten wir (M. Becker, U. Sieblist) Herrn Prof. C. von Carnap-Bornheim für die freundliche Aufnahme in Schleswig sowie für die Möglichkeit, die Stücke des Thorsberger Moorfundes eingehend zu studieren, herzlich danken. Sehr anregend waren die mit Prof. von Carnap-Bornheim geführten Diskussionen zur Vergoldungstechnik. Bei diesem Besuch konnten wir die Befunde des Thorsberger Materials auch mit Frau Dr. B. R. Armbruster eingehend erörtern. Ebenso möchten wir auf die konstruktive Zusammenarbeit mit Herrn Dr. H. Schnarr hinweisen, der sich an der Fortsetzung der Arbeiten leider nicht mehr beteiligen konnte.

Moderne Versuche, antike Schriftquellen und Analysebefunde nicht nur vordergründig archäologisch zu interpretieren, tragen zum weiteren Fortschritt bei. So werden nicht nur auf dem theoretischen Sektor werkstoffkundliche Vergleiche mit dem neuesten Kenntnisstand durchgeführt, sondern auch die Praktikabilität bei der Herstellung überprüft.

Unter diesen Gesichtspunkten wurden in letzter Zeit neben der Interpretation von naturwissenschaftlichen Befunden auch Erklärungsmodelle für den Ablauf technologischer Prozesse vorgeschlagen bzw. im Experiment erprobt. Der gegenwärtige Forschungsstand zur Diffusionsbindung als spezifische Vergoldungstechnik soll hier an einigen solchen Beispielen aufgezeigt werden.

An einer Zierscheibe von 9cm Durchmesser aus vergoldetem Silber, vermutlich aus dem 13./14. Jh. v. Chr., wurde kein Quecksilber nachgewiesen. Mikroanalytisch gemessene Konzentrationsprofile der Elemente entlang einer Linie über den Querschnitt hinweg zeigen die Interdiffusion von Gold und Silber und weisen die Stärke einer Silberfolie von ca. 12 µm und einer Goldschicht von ca. 3 µm nach. Dazu wird vermutet: »However, this solid-state diffusion does not necessarily imply that extensive heating was employed, as the experimental work showed that burnishing, followed by just a few seconds heating at a temperature well below red-heat (but sufficient to cause recrystallization of the Silver) was all was required to cause this type of diffusion-bonding« (Oddy u. a. 1981).

Für drei Münzfälschungen aus vergoldetem Silber aus Griechenland (305–295 v. Chr.) und zwei islamische Münzen von 398 AH [Anm. Red.: Ante Hedschra] wird beschrieben: »Gold leaf can be made to stick intimately to Silver very easily by rubbing it down with an suitable burnishing tool, often made of agate or ivory, and then gently heating for a few seconds. This causes interdiffusion of the Gold and Silver to take place, thus creating a strong bond between the Gold and the Silver. It seems to be less easy to make a successful bond with copper« (Oddy/Cowell 1993, 204).

Die Projektgruppe »Plinius« beschreibt in ihren Untersuchungen zu Gold und Vergoldungen als historisch nachweisbare Vergoldungstechniken:

1. Überziehen eines Gegenstandes mit Goldfolie ohne Bindemittel
2. Plattieren durch Aufhämmern
3. Nach Oddy würde nun Goldfolie aufreiben und erhitzen folgen: »Wir sind dagegen der Auffassung, daß derartige Vergoldungen durch gemeinsames Ausschlagen von Gold und Silber vorgenommen wurden. Die Verbindung zwischen aufgelegter Goldfolie und Silber käme somit nicht durch eine thermisch bedingte Diffusion zustande, sondern durch Kaltverschweißung« (Projektgruppe Plinius 1993, 56).

Hier ist anzumerken, daß eine solche Kaltverschweißung für Zwischengold (das gemeinsame Ausschlagen von Gold- und Silberfolien) angenommen wird, der Begriff »Kaltverschweißung« sich jedoch nur auf die mechanische, d. h. sogenannte formschlüssige Verbindung (»Verhakung«) bezieht und ein Nachweis für die Kaltverschweißung nicht bekannt ist.

Ebenfalls mit Bezug auf schriftliche Überlieferung beschreibt Brepohl das Plattieren des Goldes auf Silber mit Reaktionslot: »Eine Silbermenge von 12 Nummi wird gereinigt und zu einem schmalen Streifen, 1/2 kleinen Finger lang, ausgeschmiedet. Dann wird geläutertes Gold von 1 Nummus Gewicht auf gleiche Länge und Breite ausgeschmiedet,

und diese beiden werden mit dem früher beschriebenen Goldlot zusammengelötet, bis sie völlig miteinander zusammenhaften und sollen so zusammen ausgeschmiedet werden, bis ein sehr dünnes Blech entsteht« (Brepohl 1987, 236).

Im Zusammenhang mit der Untersuchung von Preßblechen auf kaiserzeitlichen Scheibenfibeln Norwegens kam Plather, nachdem sie mit Hilfe von mikroanalytisch gemessenen Konzentrationsprofilen der Elemente auf Preßblechquerschnitten die Diffusion von Gold und Silber nachgewiesen hatte, zu dem Schluß: »It appears that the bond between Gold and Silver could have been made simply by hammering.« Die Diffusion von Silber in Gold ist bei diesen Objekten größer als umgekehrt (Plather u. a. 1995, 16).

Anheuser schreibt kurz darauf zur Diffusionsbindung: »The adherence of Gold foil or leaf to Silver could be improved by heating to create an interdiffusion layer between the two metals.« Er gibt den Hinweis darauf, daß diese Technik für große Flächen gebräuchlich war, Überhitzung vermieden werden mußte und für Kupfer wegen der einsetzenden Oxidation schwierig oder gar nicht anzuwenden war (Anheuser 1996, 7f.).

Im Rahmen einer zusammenfassenden Darstellung, insbesondere der Feuervergoldung, beschreibt Anheuser auch die Diffusionsvergoldung: »Eine Haftung von Goldfolie auf Silber konnte auf einfache Weise ohne Klebemittel auch durch heißes Aufpolieren (bei etwa 300°C) erreicht werden. Dabei entstand eine im metallographischen Querschliff deutlich erkennbare schmale Diffusionsschicht ... und eine feste Bindung...« (Anheuser 1999, 8). Zu starke Erhitzung führt zum Ausbleichen des Goldes. Charakteristisch für diese Bindung sind kleine Blasen in der Goldfolie. Bis zur Erfindung der Feuervergoldung war die Diffusionsvergoldung die häufigste Vergoldungstechnik, die eine hohe Qualität der Vergoldungen ermöglichte, die nachfolgend weiter punziert und ziseliert werden konnten.

1.2 Neuere Untersuchungsergebnisse

1.2.1 Fundstücke von Gommern und Vergleichsfunde

Das Anwachsen der Zahl vergoldeter Objekte in jüngster Vergangenheit hat zu erneuter intensiver Beschäftigung mit den Vergoldungstechniken geführt (von Carnap-Bornheim 1994; Becker u. a. 1996; von Carnap-Bornheim/Ilkjær 1996; Anheuser 1999; Voß u. a. 1999). Die Vergoldung entwickelte sich in der römischen Kaiserzeit im germanischen Milieu zu einer weit verbreiteten, häufig ausgeübten und wahrscheinlich auch sehr ausgefeilten Technik. Die stetig zunehmende Anzahl von vergoldeten Preßblechen im Fundstoff ist Indiz für eine allgemeine Verbreitung solcher Objekte und damit wohl auch für die Kenntnis der dazu erforderlichen Technik. Als Beispiel sei neben dem umfangreichen Fundstoff von Illerup (von Carnap-Bornheim/Ilkjær 1996a) auch auf die zahlreichen Preßblechnachweise aus der Siedlung von Klein Körös (zuletzt Gustavs 1994, 121 f. mit Verweisen auf die älteren Publikationen) hingewiesen.

Die inzwischen recht große Zahl bekannter preßblechverzierter Objekte nimmt ihnen etwas von ihrer Exklusivität. Dadurch wird deutlich, daß dem Wunsch, Edelmetall in großem Umfang zu Verzierungszwecken einzusetzen, mittels einer besonderen Technologie sehr weitreichend entsprochen werden konnte.

Mit dem »Fürstengrab« von Gommern steht nun –konzentriert auf einen einzigen Grabfund– ein sehr umfangreiches Material an Preßblechen zur Verfügung. Das betrifft nicht allein die Vielfalt der Verzierungsmuster, sondern auch die Quantität der vergoldeten Fläche.

So ergab sich die Frage nach der Vergoldungstechnologie der Preßbleche von Gommern gewissermaßen automatisch. Im Rahmen der Materialuntersuchungen in einem gemeinsamen BMFT-Projekt (Förderkennzeichen 03-KU9FHG-01) des Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik mit dem Landesamt für Archäologie Sachsen-Anhalt, beide in Halle (Saale), konnte in den Jahren 1993/94 erstmals für die Preßbleche von Gommern und eine Vergleichsserie anderer mitteldeutscher vergoldeter Objekte die Diffusionsvergoldung als Vergoldungstechnik beschrieben werden (Becker u. a. 1996). Bestanden bislang ohne die Grundlage von Materialanalysen verschiedene Vermutungen zur Beschaffenheit dieser Preßbleche (z. B. Goldbleche, feuervergoldete Silberbleche, vergoldete Bleche), so wurde hier nun auf nachprüfbarer Grundlage ein neuer Beitrag zur Diskussion um die Herstellung von germanischen Preßblechen geliefert. Die Ergebnisse der naturwissenschaftlichen Untersuchungen wiesen bereits relativ früh darauf hin, daß der Beweis für das Vorliegen einer Feuervergoldung nicht automatisch durch den Nachweis von Quecksilberspuren zu erbringen ist (pers. Mitt. H. Schnarr, M. Füting, Aug. 1993), sondern daß (vermutlich) nur ab einem bestimmten Mindestgehalt an Quecksilber von einer sicheren Identifizierung ausgegangen werden kann (Becker u. a. 1996, 103). Die dazu parallel laufenden Untersuchungen Anheusers haben diese Vermutung eindrucksvoll gestützt (Anheuser 1999, 53 f.).

Der untersuchungstechnisch eindeutigen Erkenntnis, wie die Vergoldung beschaffen ist, stand damals das Unvermögen gegenüber, die verwendete Technologie in ihrer praktischen Ausführung zu beschreiben. D. h. zum eigentlichen herstellungstechnischen Ablauf dieser Vergoldung sowie zu ihrer konkreten Benennung konnten nur ganz zurückhaltende Aussagen erfolgen: »Auf Grund der mit wenigen Mikrometern sehr geringen Schichtdicken ist eine Blattvergoldung oder Goldplattierung [als Verbindungstechnik] die wahrscheinlichste Variante, wobei ein gleichzeitiger oder anschließender Erwärmungsvorgang zur festeren Haftung des Goldes auf dem Silbersubstrat gedient haben dürfte. Auch gemeinsames Ausschmieden eines Gold-Silber-Verbundes könnte möglich sein« (Becker u. a. 1996, 102).

Die Ableitung lag nahe, daß auch die stilistisch vergleichbaren Preßbleche aus den skandinavischen Mooropferfunden, die auf gleiche Art verwendet wurden, in eben dieser Weise hergestellt worden waren. Obwohl solche Stücke im Rahmen des gemeinsamen Forschungsprojektes nur orientierend mit untersucht werden konnten, lieferten sie doch bereits Hinweise auf eine gleichartige Herstellung (Becker u. a. 1996, 104). Im wesentlichen standen aber für die erste Beschreibung der reinen Diffusionsbindung überwiegend Ergebnisse der Untersuchungen an Preßblechen von verschiedenen mitteldeutschen Fundplätzen im Vordergrund².

Die Kooperation mit dem VW-Projekt »Römische und germanische Bunt- und Edelmetallfunde im Vergleich« (Voß u. a. 1999) erbrachte eine klarere Sicht bezüglich der

² Becker u. a. 1996, Tab. 1; vgl. dazu auch Becker u. a. 1999, 206 Anm. 215.

analytischen Ergebnisse der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden. Dies betrifft insbesondere die jeweilige analytische Sicherheit und Interpretierbarkeit des Quecksilbernachweises in reinen Ausgangsmaterialien sowie in verschiedenen Materialverbunden. Außerdem konnten umfassendere und tiefergehende Überlegungen zur Unterscheidung von »Feuervergoldung« und »Diffusionsplattierung« angestellt werden.

So konnte gezeigt werden, daß die sehr geringen Quecksilbergehalte in Gold oder auch in Gold-Silber-Verbindungen immer im Zusammenhang mit den Aussagemöglichkeiten der angewandten Analysemethode bewertet werden müssen. Ferner wurde herausgearbeitet, daß mit dem Ausdruck »Diffusionsplattierung« der Unterschied zwischen der ohne Hilfsmittel möglichen, also »reinen« Diffusionsbindung, bei der die Diffusion zwischen Gold- und Silberflächen unterschiedlicher Schichtdicken abläuft, und der mit Hilfsmitteln (im konkreten Fall mit Quecksilber) erzeugten Feuervergoldung hervorgehoben werden muß, die physikalisch betrachtet ebenfalls diffusionsbasiert ist (Becker u. a. 1999, 207 Anm. 216).

1.2.2 Fundstücke von Klein Körös, Illerup sowie vergleichende Laboruntersuchungen

Im Rahmen des VW-Projektes zum Vergleich römischer und germanischer Metallbearbeitungstechniken wurde auch der Vergoldungstechnik breite Aufmerksamkeit geschenkt (Voß u. a. 1999). So erfolgten neben vergleichenden Laboruntersuchungen zur Diffusion von Gold und Silber auch Materialuntersuchungen an Objekten aus Klein Körös und Illerup (Hammer 1999a, 190 ff.; Hammer/Voß 1999, 302 ff.). Das Vorkommen einer Vergoldung durch eine Diffusionsbindung ohne Einsatz von Hilfsstoffen wurde bestätigt. Ferner wurden auch genauere Aussagen zum Herstellungsprozeß möglich. Hierbei konnten die notwendigen Rahmenbedingungen erörtert werden. Insbesondere das Zeit-Temperatur-Verhältnis sowie Erscheinungen, die auftreten, wenn einer dieser beiden Parameter sehr stark verändert wird, wurden diskutiert.

So schreibt Hammer zur Diffusionsbindung: »Die Verfahrenstechnik konnte an Hand dreier Proben von Preßblechen aus Klein Körös, Illerup sowie einer Arbeitsprobe im metallographischen Schliff untersucht werden. Die metallographischen Aufnahmen zeigen in allen Fällen gute Kontaktierung des Goldes mit dem Silber fast ohne jede Zwischenschicht, so daß eine hohe Haftfestigkeit gewährleistet ist. Mikroanalytische Untersuchungen (Energiedispersive Line-Scans, EDX-ESMA) stellen an Hand der Elementverteilung diesen Übergangsbereich (Diffusionszone) vom Gold zum Silber dar. Die Breite der Diffusionszone gibt zugleich Hinweise auf die technologische Behandlung (Temperatur und Zeit). So wurden bei den Preßblechen von Klein Körös und Illerup mit 3 bzw. 5 µm Breite eine geringere Temperatur und/oder kürzere Zeit als bei der Arbeitsprobe mit 10 µm Breite (500°C, 1h) angewendet« (Hammer/Voß 1999, 303).

Das im Rahmen des VW-Projektes gemeinsam mit den Autoren der vorliegenden Publikation ausgearbeitete Glossar beschreibt die Diffusionsbindung folgendermaßen: »Diffusionsbindung – mechanisch feste Verbindung, die durch Kontakt (Aufeinanderpressen) zweier metallisch reiner Flächen infolge gegenseitiger Diffusion der Atome entsteht. Darunter fällt das von W. A. Oddy beschriebene Vergoldungsverfahren, bei dem Blattgold direkt auf die Oberfläche von Silber aufgebracht und durch Reiben und Erhitzen mechanisch fest verbunden wird. Eine Diffusionsverbindung ist nicht auf Blattgold

beschränkt, ebenso lassen sich auch Folien und Bleche unter der Voraussetzung metallischen Kontaktes und mechanischer sowie Temperatureinwirkung fest miteinander verbinden. Dabei entsteht eine derart stabile Verbindung, daß nachfolgende Arbeitsgänge wie Treiben, Schmieden, Prägen und andere angewendet werden können, ohne daß sich die beiden Metalle trennen. Bei der Vergoldungstechnik besteht die günstige Möglichkeit, zunächst dickere Bleche durch Diffusionsbindung zu vereinigern und dann gemeinsam dünn auszuschlagen. Das Dickenverhältnis der beiden Metalle wird beibehalten.« (Hammer/Voß 1999a, 316–317).

1.2.3 Begriffsbildung zur reinen Diffusionsbindung und Vergleich mit anderen Vergoldungstechniken

Dennoch war ausgehend von den bisherigen Untersuchungen und Analyseergebnissen sowohl die Definition der Diffusionsbindung mit ausschließlichem Bezug auf Kontakt (Aufeinanderpressen) von metallisch reinen Flächen, als auch die Definition der Diffusionsplattierung mit dem Bezug auf das Zusammenfügen von Gold- und Silberblechen oder -platten nicht gänzlich befriedigend.

Einerseits wird der Aspekt der Diffusionsbindung mit Hilfsmitteln nicht genügend berücksichtigt, andererseits wird zu stark eingeschränkt, wenn beim ausschließlichen Bezug auf Bleche oder Platten die Diffusionsbindung von Goldfolien oder Blattgold vernachlässigt wird. So erschien nach längerer Diskussion die Begriffsbildung »reine Diffusionsbindung« den metallogischen, physikalischen und werkstoffkundlichen Aspekten am besten zu entsprechen. Für die reine Diffusionsbindung lassen sich folgende Kriterien anführen:

a) Es werden keine Zusatz(werk)stoffe verwendet.

Die Diffusionsbindung ist zwischen unterschiedlichen Metallen (Au-Ag, Au-Cu, Ag-Cu, Cu-Sn, Cu-Zn, Pb-Ag, Pb-Au, Fe-Cu, Fe-Sn) als Fremddiffusion und zwischen gleichen Metallen (Au-Au, Ag-Ag, Fe-Fe etc.) als Selbstdiffusion möglich.

b) Es besteht inniger Kontakt zwischen den Metalloberflächen, ggf. durch mechanischen Druck.

Voraussetzung der Diffusion ist der direkte Kontakt beider Metalle; Oberflächenschichten, Oxide, Verschmutzungen wirken als Diffusionsbarriere. Durch äußeren Druck werden die Kontaktverhältnisse verbessert und die Kontaktbereiche vergrößert. Im Sinne der Makrogeometrie gibt es Kontakte zwischen Kugel und Ebene (Granulation), Stab an Stab oder auch Ebene auf Ebene (Plattierung).

c) Stattfinden der Festkörperdiffusion, also der Diffusion unterhalb des Schmelzpunktes, wofür das Temperatur-Zeit-Regime zu beachten ist.

Die Diffusion gehorcht den Diffusionsgesetzen. Der zurückgelegte Diffusionsweg der Atome ist abhängig vom Diffusionskoeffizienten im jeweiligen Stoff und umso größer, je länger die Zeit bzw. je höher die Temperatur ist. Wie die Tabelle 1 zeigt, werden für den gleichen Diffusionsweg bei höheren Temperaturen wesentlich kürzere Zeiten benötigt. Weiterhin ist ersichtlich, daß Silber im Gold etwa 2,5mal schneller diffundiert als umgekehrt.

Tabelle 1

Temperatur in °C	D für Gold in Silber	T in min	D für Silber in Gold	T in min
500	2×10^{-12}	167,0	5×10^{-12}	67,0
600	$1,2 \times 10^{-11}$	27,8	3×10^{-11}	11,1
700	10^{-10}	3,3	$2,5 \times 10^{-10}$	1,3
800	3×10^{-10}	1,1	8×10^{-10}	0,4
900	$1,1 \times 10^{-9}$	0,3	$2,8 \times 10^{-9}$	0,1

Tabelle für Diffusionskoeffizienten D (Werte nach Seith 1955) und Zeit T in Minuten für einen mittleren Diffusionsweg $x=2\mu\text{m}$. Berechnet nach der Formel $D = x^2/2t$. ($2\mu\text{m}$ wurden gewählt, weil bei den Preßblechen von Klein Körös und Illerup 3 bzw. $5\mu\text{m}$ für die Breite der Diffusionszone gemessen wurde. Ebenfalls liegt die Diffusionsbreite der Verbindungszone bei der von Plather untersuchten Rosetten-Fibel bei $5\mu\text{m}$. Diese Breite scheint ein gewisses Optimum für die notwendige Haftfestigkeit und der handhabbaren Behandlungszeit/Temperatur darzustellen).

Blattgold unterliegt natürlich ebenfalls den Diffusionsgesetzen, und es wird erklärlich, daß bei einer Erhitzung auf z.B. 600°C das außerordentlich dünne Blattgold von nur $1\mu\text{m}$ Stärke (Antike) oder $0,1\mu\text{m}$ (modern) in kurzer Zeit praktisch verschwindet. Analytisch ist dann nur noch ein goldhaltiges Silber bzw. goldhaltiges Kupfer an der Oberfläche nachzuweisen (Voß u. a. 1999, Taf. 58).

d) Die Diffusionsbindung ist so fest, daß eine Weiterbearbeitung durch Hämmern, Walzen, Ziehen, Strecken oder Punzen erfolgen kann, ohne daß sich die Verbindung löst.

Die anderen bekannten Vergoldungstechniken stellen an die Weiterverarbeitung bzw. -behandlung jeweils bestimmte Bedingungen, wodurch sie sich ebenfalls von der reinen Diffusionsbindung unterscheiden.

Für Vergolden durch mechanisches Anhaften, z. B. bei der Blattvergoldung oder der Plattierung, bedarf es Zwischenschichten aus Leim oder Eiweiß. (»Vergolden« kleiner, meist ebener Flächen, z. B. durch Tauschieren, wo die Haftung allein durch das mechanische Verbinden der Oberflächen und die einfassenden Ränder des Grundwerkstoffes erfolgt, bleibt in diesem Zusammenhang unberücksichtigt.)

Beim Vergolden unter Einsatz des Zusatz(werk)stoffes Quecksilber – bei der Feuer- oder Amalgamvergoldung – muß nach dem Aufbringen der Amalgamschicht erhitzt und abschließend poliert werden. Hier ist der Zusatzwerkstoff für die Vergoldung unerlässlich.

Auch die Vergoldung durch Auflöten bedarf eines Zusatzwerkstoffes – des Lotes bzw. Reaktionslotes – um dann ohne Aufschmelzen der Grundwerkstoffe durchgeführt zu werden. Auch hier führt nur der Einsatz des Zusatzwerkstoffes zum gewünschten Ergebnis.

Bei der Schweißung kommt es zum Aufschmelzen der Grundwerkstoffe. Dieses Verfahren kann mit und ohne Einsatz weiterer Zusatzwerkstoffe durchgeführt werden. Das grundlegende Charakteristikum der Schweißung ist das Aufschmelzen der Grundwerkstoffe, das den entscheidenden Unterschied zur reinen Festkörperdiffusion darstellt.

In allen aufgezählten Fällen sind Bedingungen erforderlich, die diese Arten der Vergoldung von der reinen Diffusionsbindung unterscheiden.

2. Vergoldung und Preßblechproduktion in der Rekonstruktion

2.1 Versuche zur Diffusionsbindung

Im Zusammenhang mit der Nachbildung verschiedener preßblechverzierter Gegenstände aus dem Grab von Gommern wurden auch die Herstellung von vergoldetem Silberblech und die Preßblechproduktion notwendig. Es mußte also ein brauchbares, alltagstaugliches, reproduzierbares und universell einsetzbares Verfahren für diese beiden Aufgaben aus dem vorhandenen Wissen und den vorhandenen Befunden erschlossen werden. Die vorbereitenden Arbeiten und ersten Versuchsschritte hierzu fanden 1997/98 statt, die Massenproduktion von Preßblechen unterschiedlicher Typen für die Rekonstruktion des Schildes von Gommern im wesentlichen im Jahr 1999.

Ausgehend von der Vorstellung, daß die Diffusionsbindung bei hohen Temperaturen und inniger Kontaktierung von sehr reinen Werkstoffen erreicht werden kann, wurde in den ersten Versuchen das Hauptaugenmerk auf diese Randbedingungen gerichtet.

Das gemeinsame Erwärmen wurde durch Zusammenpressen von je einem goldenen und einem silbernen Rohling zwischen den Backen einer Zange realisiert. Um die geeignete Temperatur zu ermitteln, wurden die Glühfarben der Zangenbacken genutzt. Der zeitliche Ablauf wurde geschätzt. Da das anschließende gemeinsame Ausschmieden der diffusionsgebundenen Werkstoffe Gold und Silber nach dem vorhandenen Wissen keine Probleme bereiten sollte, wurde die zusammenzufügende Fläche verhältnismäßig klein gehalten. Zum Einsatz kamen Werkstücke von ca. 1 cm² Größe mit Dickenverhältnissen Gold zu Silber von ca. 1:10 (typischerweise 0,1 mm Gold auf 1 mm Silber).

Ausgehend von den im Fundstoff der römischen Kaiserzeit vorhandenen Zangen, z. B. aus dem Grab von Dessau (Seelmann 1903), mit etwas breiteren Backen wurde eine solche Zange zum Festhalten genutzt. Die Werkstücke wurden geglüht und gefrischt und dann gemeinsam zwischen die Zangenbacken gelegt. Dann erfolgte das Erhitzen bis zur Rotglut der Zange über einen geschätzten Zeitraum von ca. drei Minuten.

Die metallographischen Untersuchungen an Proben aus dieser ersten Versuchsreihe ergaben folgende Ergebnisse³.

Probe S11: In einem Schmiedefeuer wurde ein Silberblech (875/000, handelsübliche Legierung aus der Scheideanstalt) von 15 x 15 mm Fläche und 1 mm Stärke und ein Goldblech (999/000, handelsübliche Legierung aus der Scheideanstalt) derselben Fläche von 0,15 mm Stärke mit einer Zange bei ca. 700°C etwa drei Minuten zusammengedrückt. Die Metallstücke waren gefrischt und vor dem Einbringen mit Speichel benetzt worden, um oxidfreie Oberflächen zu besitzen und in gewissem Maße Sauerstoffabschluß zu erreichen. Das Erhitzen fand dann überwiegend im reduzierenden Teil der Flamme statt.

Es entstand eine feste Diffusionsbindung, so daß ein Herunterwalzen auf 0,11 mm Gesamtstärke möglich war⁴. Dabei blieb das Stärkeverhältnis der beiden Metalle konstant, d. h. am Ende des Walzvorganges betrug die Stärke der Goldschicht 14 µm. Der metallographische Schliff wurde senkrecht zur Oberfläche angefertigt, indem ein klei-

3 Die metallographischen Untersuchungen wurden von P. Hammer mit freundlicher Unterstützung der Abt. Metallographie, Fr. Dr. Koch, des Institutes für Metallkunde der TH BA Freiberg durchgeführt.

4 Der Einsatz einer Walze ersetzte das für antike Verhältnisse zu unterstellende Ausschmieden des diffusionsgebundenen Bleches.

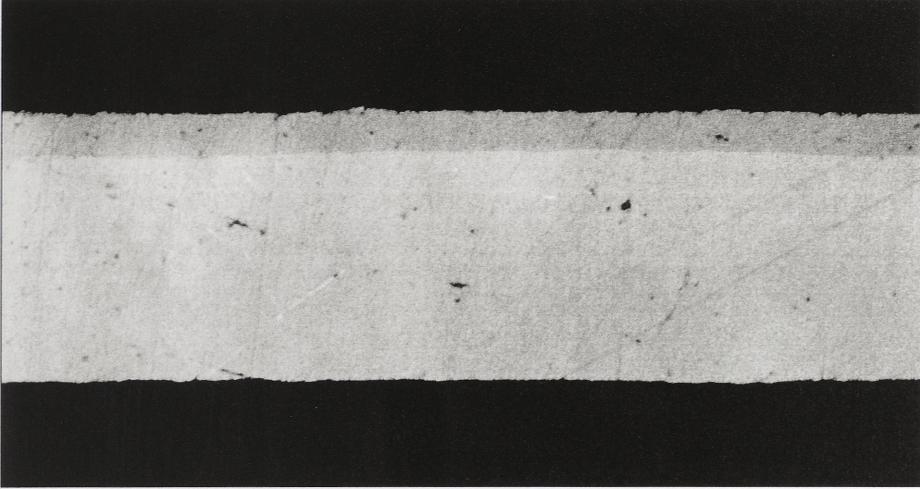


Abb. 1 Diffusionszone von Goldschicht (dunkelgrau oben) und Silberschicht bei der Probe Si 1 in 250facher Vergrößerung.

nes Stück des Verbundbleches abgetrennt, eingebettet, geschliffen und poliert wurde. Die Abbildung 1 zeigt in 250facher Vergrößerung diesen Querschliff, aus dem eine ausgezeichnete Verbindung – ohne Trennstellen, Poren und Verunreinigungen – zwischen der Goldschicht (dunkelgrau oben) und der Silberschicht zu erkennen ist. Im geätzten Zustand (Anlaufätzung mit Schwefelwasserstoff) stellt sich die Goldschicht hell dar und das Silber ist dunkel gefärbt (Abb. 2). Die ebenfalls metallographisch untersuchte Probe Si 5 zeigt ein analoges gutes Ergebnis der Diffusionsbindung.

Obwohl bereits die ersten Versuche zu einer Diffusionsbindung führten, zeigten sich verschiedene Handicaps und Mängel, welche die Reproduzierbarkeit und die Effektivität dieses Arbeitsganges stark einschränkten. Zum einen klebten die Metalle manchmal unkontrolliert an den Backen der Zange. Weiterhin wurde die Fläche des direkten Kontaktes zwischen den Metallen durch die Bildung von Oxiden beim Erhitzen erheblich eingeschränkt, und die Diffusion kam nicht regelmäßig bei jedem der Versuche zustande; in einigen Fällen war sie nur an wenigen Stellen zu erzielen. Die Diffusion war nur bei ganz kleinen Metallstücken möglich und das Verfahren war nicht auf größere Metallstücke umsetzbar. Als nachteilig erwies sich ebenfalls das zu lange Verharren der Zange mit den inliegenden zwei Metallstücken in der Holzkohleglut. Außer zu Verwacklungen kam es durch das Heißwerden der Zange in Verbindung mit dem zum Halten ausgeübten Druck zu Deformierungen, die den durch das Werkzeug ausgeübten Druck reduzierten. Unter Umständen verlief die Diffusion an einigen Stellen zu stark, so daß bereits nach erfolgter Diffusion bzw. dann nach dem gemeinsamen Austreiben das Gold die Oberfläche kaum noch goldfarben erscheinen ließ. Es kam gewissermaßen zum »Versacken« des Goldes im Silber bzw. zum »Durchschlagen« des Silbers, da die Goldschicht verhältnismäßig dünn ist. Durch Nacharbeiten der Oberfläche (Anreicherungsätzung) konnte zwar der Goldton wieder erzeugt werden, jedoch ließ sich dies bei den hergestellten Stücken schlecht beherrschen.

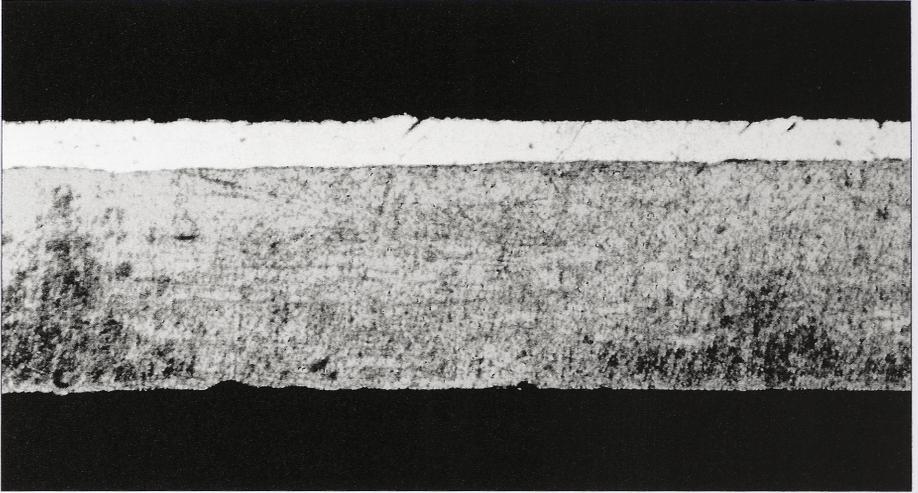


Abb. 2 Diffusionszone von Goldschicht (hell) und Silberschicht (dunkel) der Probe Si 1 nach Anlaufätzung mit Schwefelwasserstoff in 250facher Vergrößerung.

Der Versuch, die gemeinsam erhitzten Metallstücke einfach zusammenzuschmieden, schlug ebenfalls fehl. Offensichtlich stimmte hier das Zusammenspiel der einzelnen Elemente des Diffusionsprozesses nicht.

Jedoch waren beim gemeinsamen Schmieden die Möglichkeiten der Handhabung und der Einflußnahme ungleich größer als bei den Versuchen mit der Zange. In Fortführung der Versuche zum gemeinsamen Ausschmieden konnte durch leichte Veränderung einzelner Faktoren der Prozeß optimiert werden. Um dem Hauptproblem, der Bildung von Oxidschichten auf der Silberoberfläche, zu begegnen, wurde statt einer Silberlegierung Feinsilber (1000/000) verwendet. Dadurch ließ sich das Verfahren zwar jederzeit wiederholen, allerdings war auch dieser Stand unbefriedigend, da die Verwendung von Feinsilber nicht den antiken Verhältnissen entspricht, wie die inzwischen zahlreichen Analysen an Silbergegenständen der römischen Kaiserzeit deutlich erkennen lassen. Andererseits erwies sich z. B. Sterlingsilber (950/000), bei dem die Oxidation zu vernachlässigen gewesen wäre, als nicht duktil genug, um für die Weiterverarbeitung zu Preßblechen geeignet zu sein. Als stets reproduzierbar, effektiv und jederzeit zu beherrschen, erwies sich letztlich folgender Arbeitsablauf:

Zum Arbeiten werden Amboß und Hammer deutlich über Handtemperatur erwärmt. Die zu verbindenden Metallstücke werden im Holzkohlefeuer auf helle Rotglut erhitzt; dann erfolgt ein sanftes Andrücken/Zusammendrücken des Metalls auf dem Amboß mit dem erwärmten Werkzeug. Fehlstellen können dabei auf die gleiche Art und Weise ausgebessert werden.

In Fortführung dieser Technik wurde auch das Diffusionsbinden gleichartiger Metallstücke (reines Silber) probiert, wobei hervorragende Ergebnisse erzielt werden konnten. Auf diese Weise gelang es, ohne Schmelzen und die zwangsläufig damit verbundenen Verluste selbst kleinste Reste von Rohlingen und Halbzeugen aus Silber wieder zu größeren Stücken zu verbinden und z. B. aus zahlreichen Lagen dünnen Blechs einen massi-



Abb. 3 Diffusionsbindung zweier Silberbleche der Probe Si 8 im ungeätzten Zustand und 117facher Vergrößerung.

ven Barren herzustellen, der sich dann problemlos weiterverarbeiten ließ. Dabei können, sofern es sich um Gold und Silber handelt, auch beide Materialien miteinander verbunden oder aber bereits vergoldete Preßblechreste eingearbeitet werden.

Hier ergaben die metallographischen Untersuchungen folgende Ergebnisse:

Probe Si 8: In einem kleinen Holzkohlefeuer eines Lehmofens wurden zwei Silberbleche (1000/000, handelsübliche Legierung aus der Scheideanstalt) von je 0,5 mm Stärke übereinandergelegt, auf eine Temperatur von ca. 900°C gebracht und anschließend auf einem erhitzten Amboß einige Sekunden lang zusammengeschmiedet. Durch diesen Vorgang hatte sich die ursprüngliche Stärke nur gering von 1 auf 0,9 mm verringert. Der metallographische Schliff dieser Verbindung (Abb. 3) zeigt im ungeätzten Zustand eine sehr gute Diffusionsbindung der beiden Silberbleche (Vergrößerung 117:1). Die ehemalige Trennebene ist durch einige Verunreinigungen markiert. Diese würden sich nach weiteren Verformungsprozessen (wie bei Probe Si 1) weniger deutlich abheben. Im geätzten Zustand (Abb. 4) wird deutlich ein Rekristallisationsgefüge sichtbar, dessen Körner über die Diffusionsebene hinweggehen.

Probe Si 9: Unter denselben Bedingungen wie Probe Si 8 wurde zwischen zwei Silberbleche eine vergoldete Silberfolie mit einer Goldschicht von 6–8 µm eingebracht. Der metallographische Querschliff (Abb. 5) zeigt im ungeätzten Zustand (Vergrößerung 235:1) die beiden Silberbleche, zwischen denen die vergoldete Silberfolie am unteren Ende des Schliffbildes herausragt. Die Goldschicht ist als etwas dunklerer Streifen zu erkennen. Auch hier ist eine sehr gute Bindung sowohl von Silber zu Silber als auch von Silber zu Gold festzustellen. Der geätzte Zustand (Abb. 6) zeigt ebenfalls ein rekristallisiertes Gefüge, wobei allerdings die Körner nicht so stark wie bei Probe Si 8 übergreifen. Der helle Goldstreifen hebt sich in geätztem Zustand besser ab als in ungeätztem.

Aus den metallographischen Untersuchungen läßt sich schließen, daß die Diffusionsbedingungen bei den Proben ausreichend waren, so daß stabile Verbindungen entstan-

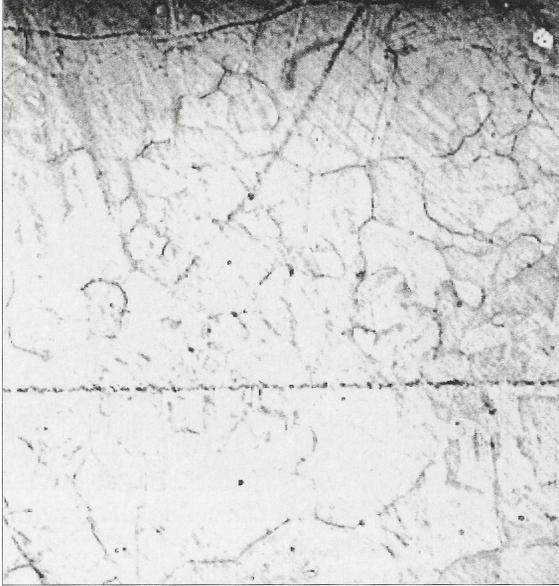


Abb. 4 Diffusionsbindung zweier Silberbleche der Probe Si 8 in geätztem Zustand und 117facher Vergrößerung. Es wird ein Rekristallisationsgefüge deutlich, dessen Körner über die Diffusionsebene hinausgehen.

den, die auch einer weiteren Bearbeitung Stand hielten, ohne daß die Bindung aufriß. Die gewählten Diffusionsbedingungen, 700°C, drei Minuten bei den Proben Si 1 und Si 5 sowie 900°C, einige Sekunden (Proben Si 8 und Si 9) stehen in guter Übereinstimmung mit den in Tabelle 1 angegebenen Werten.

Für Bleche dieser geringen Dimension war ein einfaches Holzkohlefeuer ausreichend, das in einem kleinen Schutz und durch eine Luftzuführung angefacht wurde. Etwa zwei Handvoll Holzkohle in einem kleinen Bett aus Lehm, abgedeckt mit einem viertelkugelförmigen Lehmhäubchen und angeblasen durch einen kleinen Blasebalg, dessen Luftzuführung sich zum Boden des Lehmбетtes hin befindet, reichen als Feuerung aus, um für etwa eine Viertelstunde lang Bleche und Blechreste zu verbinden. Der durch reine Diffusionsbindung geschaffene Materialverbund aus Gold und Silber läßt sich dann in verschiedenen Varianten weiterbearbeiten.

Für die Rekonstruktion der Preßbleche des Schildes aus dem Grab von Gommern wurde für alle Preßbleche Silber mit Gold mit reiner Diffusionsbildung vergoldet. Ausgehend von dem inzwischen erreichten Kenntnisstand und mit Blick auf den notwendigen Fortgang der Rekonstruktionsarbeiten für den Schild von Gommern wurden für diese Preßbleche Feinsilber und Feingold verwendet. Als Rohlinge entstanden dabei Metallstücke im Dickenverhältnis von ca. 1:10 sowie einer Größe von ca. 1 cm². Für die Weiterverarbeitung wurden diese Stücke auf ein Zehntel ihrer Stärke verringert und dabei auf ein Mehrfaches ihrer ursprünglichen Fläche vergrößert. Als historisches Verfahren darf man das Ausschmieden der Stücke annehmen, im modernen Verfahren wurden sie auf die entsprechende Dicke gewalzt (Abb. 7).

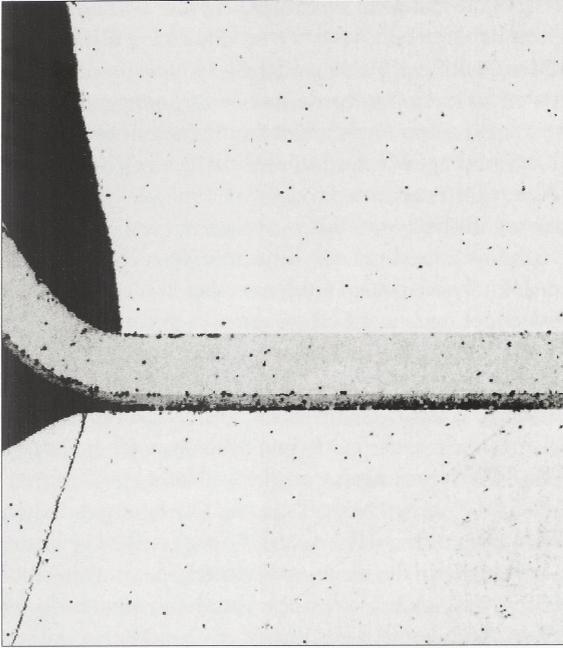


Abb. 5 Diffusionsbindung zweier Silberbleche mit dazwischenliegender diffusionsvergoldeter Silberfolie der Probe Si 9 im ungeätzten Zustand in 235facher Vergrößerung. Die Goldschicht ist als etwas dunklerer Streifen zu erkennen.

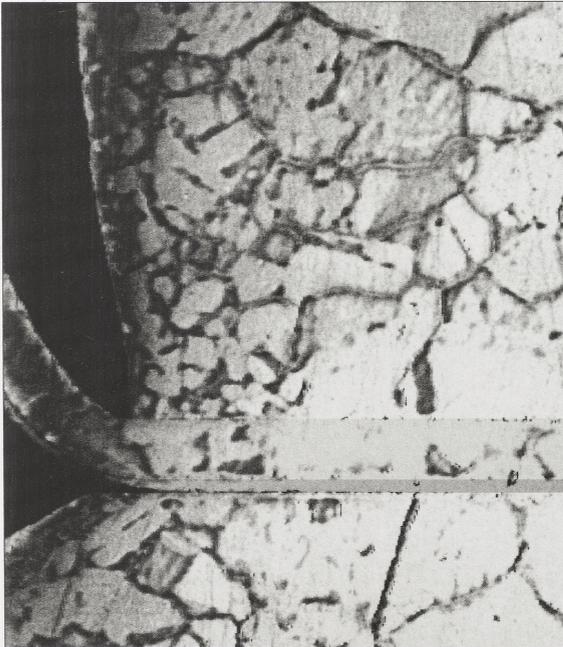


Abb. 6 Diffusionsbindung zweier Silberbleche mit dazwischenliegender diffusionsvergoldeter Silberfolie der Probe Si 9 in geätztem Zustand in 235facher Vergrößerung. Die Goldschicht ist als etwas hellerer Streifen zu erkennen. Es ist ein rekristallisiertes Gefüge erkennbar, wobei die Körner nicht so stark wie in Probe Si 8 überreifen.

Die so entstandenen Folien waren weich und sehr leicht verformbar. Sie ließen sich dann entsprechend den einzelnen Einsatzbereichen weiterverarbeiten, also über Model pressen, punzieren, zuschneiden und mit anderen Blechen oder Glas kombinieren.

Um jedoch der Originaltechnik näher zu kommen wurde, aus Zeitgründen parallel zu den laufenden Rekonstruktionsarbeiten, eine den Analysen des antiken »reinen« Silbers entsprechende Legierung hergestellt. Grundlage hierfür bildeten die zahlreichen Analysenwerte, die im Zusammenhang mit den Untersuchungen des VW-Projektes gewonnen wurden (Voß u. a. 1999). Diese Legierung enthält Materialkomponenten (z. B. Zink), die man aus heutiger handwerklicher Sicht als unbedingt zu vermeiden betrachtet. Bei der Herstellung wurden daher alle in den Analysen nachgewiesenen Materialien wie Gold, Kupfer, Zinn, Zink und Blei mit verwendet, wobei auf einen nicht zu geringen Zinkgehalt und einen nicht zu hohen Kupfergehalt geachtet wurde.

Im archäologischen Fundstoff gibt es regelmäßig aus solchem Material hergestellte antike Preßbleche (vgl. Becker u. a. 1996, 102 Tab. 1). Zum einen war es dem antiken Handwerker nicht möglich, Zweistofflegierungen wie in der modernen Scheideanstalt herzustellen. Zum anderen scheinen die antiken Silberlegierungen trotz der enthaltenen »Verunreinigungen« den Ansprüchen der damaligen Handwerker, z. B. an das Oxidationsverhalten oder die Duktilität, genügt zu haben. Die entsprechend der Analysen hergestellte Legierung antiker Zusammensetzung besitzt Eigenschaften, die weitestgehend denen von Feinsilber entsprechen. Somit ist es dem Handwerker möglich, Werkstücke aus dieser Legierung für die reine Diffusionsbindung zu nutzen. Das könnte daran liegen, daß es beim Erhitzen

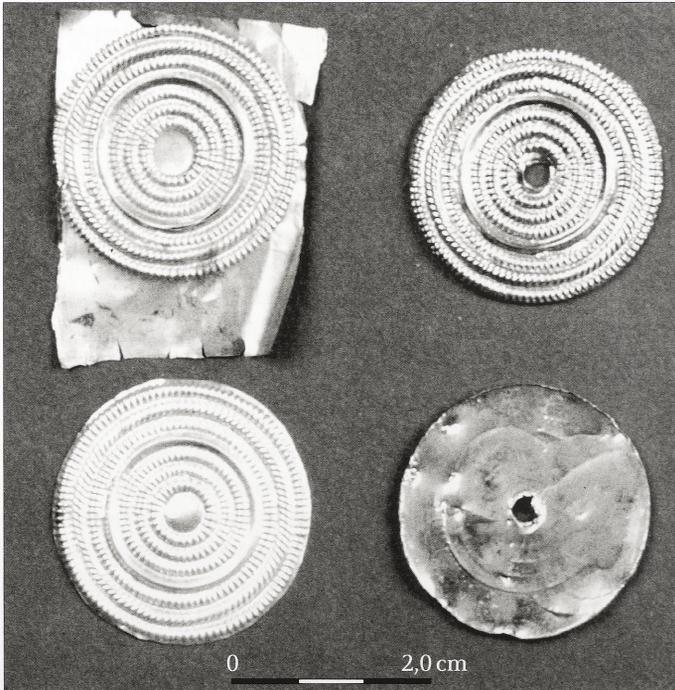


Abb. 7 Arbeitsproben zur Diffusionsvergoldung und zur Preßblechherstellung: vergoldetes Silberblech gepreßt und mit überstehenden Randbereichen, vergoldetes Silberblech ausgeschnitten, gepreßtes Silberblech, Lothinterfüllung des vergoldeten Bleches vor der Endmontage.

eines solchen Silberbleches zum sinnvollen Zusammenspiel verschiedener Legierungskomponenten kommt.

Die Betrachtung möglicher Synergieeffekte der Legierungskomponenten ergibt, daß z. B. Zink, das auf Grund seines extrem unedlen Potentials an der Oberfläche in Bezug auf das Kupfer reduzierend wirkt, gegen dessen Oxidation wirksam ist. Gleichzeitig besitzt Zink die Eigenschaft, die plastische Verformbarkeit der Silberlegierung zu verbessern. Vor allem Zink als Legierungsbestandteil führt also offenbar dazu, daß zwei wichtige Anforderungen an das Silber (gering oxidierend und sehr duktil) erfüllt werden.

Ein entsprechender Zinkgehalt in der Silberlegierung kann demnach als Voraussetzung für die Fähigkeit zur reinen Diffusionsbindung und damit auch für die Weiterverarbeitung zu vergoldeten Preßblechen angesehen werden. Auf die für Oxidationsverhalten und Duktilität wichtige Bedeutung von Zink in Silberlegierungen weist auch schon die technische Fachliteratur vom Beginn des 20. Jh. hin (Lange 1920, 99 ff. Rezept 151), Hinweise finden sich aber auch in der metallkundlichen Literatur zur Münzkunde (Hammer 1993, 29).

So ergibt sich die Frage, ob eine dem Zugeben von Galmei zu Kupfer (vgl. Hammer 1999, 289) ähnliche gezielte Vorgehensweise zur Erlangung besonderer Eigenschaften bei der antiken Herstellung von Silber denkbar wäre, oder ob einfach das Unvermögen, technisch reine Metalle bzw. Zweistofflegierungen herzustellen, zufällig eine Legierung ergab, die für die o. g. Bearbeitung gut geeignet war.

Weiterhin ergibt sich damit natürlich die Frage, inwieweit auch andere Beimengungen, die in den antiken »Standardlegierungen« auftauchen, gewünscht waren, oder nur herstellungsbedingt unvermeidbare Beimengungen darstellen.

Schließlich zeigt sich, daß einige antike Legierungen durch ihr Vermögen zur reinen Diffusionsbindung sich aus der Sicht des Handwerkers wie Eisen beim Feuerverschweißen verhalten und hier vielleicht einer der Ursprünge dieser Technik liegen könnte.

Im Zusammenhang mit diesen Arbeiten ergab sich die Erfahrung, daß das Verhalten der Legierung bei Einsatz einfacher Prüfverfahren (Oxidationsverhalten in der Flamme, Schmiedepfung in Bezug auf die Duktilität) schnell zu aussagekräftigen Ergebnissen zu ihrer Beschaffenheit führte. Das führt zu dem Schluß, daß für den antiken Handwerker die Möglichkeit bestand, verschiedene Silberlegierungen ihrem Verwendungszweck entsprechend zu prüfen und unterscheiden zu können und vermutlich auch versucht wurde, sie unter Nutzung empirischer Erfahrungen entsprechend gezielt herzustellen. Für die reine Diffusionsbindung ist die erfolgreiche Prüfung der Legierungseigenschaften und die Auswahl geeigneter Werkstücke als Voraussetzung zwingend notwendig.

Die Versuche zur Diffusionsbindung haben gezeigt, daß bei Experimenten dieser Art einige Bedingungen erfüllt sein müssen, um zu einem hohen Maß an Wahrscheinlichkeit der Ergebnisse zu gelangen. Die Eigenschaften der Ausgangsmaterialien müssen sich auch ohne Einsatz moderner Analysetechnik durch Methoden, wie sie nach jeweiliger Kenntnis der damaligen Verhältnisse angenommen werden können, sicher und reproduzierbar bestimmen lassen, um Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften ebenso sicher voneinander unterscheiden zu können (vgl. hierzu Furger/Riederer 1995, 166 ff.; Hammer 1999b, 159 ff.). Ebenso müssen sich für das Gelingen notwendige Parameter des technischen Ablaufes während der Durchführung kontrollieren lassen, wobei gleiche Kriterien wie für die Materialprüfung anzusetzen sind. Schließlich trifft diese

Bedingung auch auf das Endprodukt zu, so daß sich auch Erfolg oder Mißerfolg der Arbeit prüfen und damit unterscheiden lassen können. Eine weitere wichtige Bedingung ist die stete Reproduzierbarkeit der angewendeten Verfahren. Der Erfolg eines solchen Experimentes sollte nicht überwiegend vom Zufall abhängen und mit hohen Ausschußzahlen belastet sein, sondern es sollten in sicheren Arbeitsschritten im wesentlichen vorhersehbare Ergebnisse erzielt werden.

2.2 *Diffusionsbindung zum Erzielen vergoldeter Flächen in definierter Größe*

An verschiedenen Stücken des Thorsberger Mooropferfundes (Schildbuckelrest, Spangenklappe, Gesichtsmaske, Panzer-Schulterklappe; Raddatz 1987, Kat.-Nr. 253; 404; 405; 406) liegen Befunde vor, die als Blattvergoldung bzw. Folienvergoldung beschrieben werden (Hammer/Voß 1999, 303).

Ausgehend von diesen Befunden und nach einer Autopsie der Stücke im Museum Schloß Gottorf, Schleswig, erfolgten Versuche, um definierte Flächen mit der reinen Diffusionsbindung zu vergolden.

Es zeigte sich, daß dies in gleicher Art und Weise möglich ist wie die Herstellung des Verbundes für die Preßbleche. Dennoch liegt eine spezifische Schwierigkeit darin, daß die gezielte Wärmeleitung an die jeweils zu vergoldende Stelle erforderlich ist. Auch bei diesem Verfahren ist das Aufbringen unterschiedlicher Blechstärken möglich. Ebenso kann man nicht gut befestigte Stellen auch noch nachträglich nacharbeiten. Die Bindung ist hier ebenso hervorragend wie bei den Preßblechen. Das heißt, daß auch diese Flächen noch nachträglich weiter bearbeitet werden können, z. B. gepunzt oder auch graviert. In diesem Zusammenhang sind die Detailfotos der Lanx von Bizerta (Sobottka-Braun 1997, Taf. 6, 1–3) und die dazu vorliegenden Analysen mit den verhältnismäßig geringen Quecksilbergehalten (Fassbender u. a. 1997, 207 f.) bemerkenswert und können u. a. als Hinweise für eine Diffusionsbindung von Goldfolien an diesen Stellen dienen.

Die vergoldeten Flächen mit definierter Größe sind somit entweder schon durch ihre Formgebung Bestandteil einer Verzierung, oder sie lassen sich ebenfalls weiter bearbeiten und z. B. als reliefierte Teilfläche in einen größeren Zusammenhang einfügen. Offensichtlich ist in eben solcher Art und Weise der Zierfries am Blech von Thorsberg mit alternierend angeordneten silbernen und goldenen Köpfen verziert, wobei nach dem Vergolden der Teilflächen die Punzierung der Gesamtfläche von der Rückseite her erfolgte. So ergibt sich für das Zierblech der Schultererschließen von Thorsberg als mögliches Herstellungsverfahren das gezielte Vergolden festgelegter Bereiche eines Silberbleches durch reine Diffusionsbindung und die nachträgliche Punzierung bezogen auf den bereits vorhandenen gold-silbernen-contrastierenden Untergrund (Abb. 8 und 9).

2.3 *Verarbeitungsvarianten diffusionsvergoldeter Materialien*

2.3.1 *Formgebung*

Ein wesentliches Einsatzgebiet für die diffusionsvergoldeten dünnen Bleche sind die reichen Preßblecharbeiten der römischen Kaiserzeit. Die inzwischen umfangreiche Literatur zu den Preßblechen zeigt verschiedene Möglichkeiten der Bearbeitung (zusammenfas-

send von Carnap-Bornheim/Ilkjær 1996, 389 ff.). An den mitteldeutschen Preßblechen ist zu erkennen, daß die Bleche über Model geformt, gepunzt oder in beiden Techniken bearbeitet worden sind. Für die Fertigung der Model sind deutlich erkennbar oftmals Perldrähte benutzt worden. Das ist auch durch den äußerst seltenen Fund eines Models aus Augsburg belegt (Ulbert 1966). Daß z. B. auch römische Münzen als Model gedient haben können, zeigen die Abdeckungen der Schildfesselniete aus Gommern und Illerup (Becker 1993, 410; von Carnap-Bornheim/Ilkjær 1996, 236 Abb. 177).

Eine einfache Art, diese Model herzustellen, besteht darin, daß man das Verzierungsmuster auf eine Unterlage lötet. Dabei kann das Muster allein aus Drähten, z. B. Perldrähten, gebildet werden. Es kann aber auch aus der Kombination von Drähten und geometrischen Metallstücken bestehen. Als Unterlage eignen sich Buntmetallstücke, jedoch ist auch die Lötung auf Eisen möglich. Die einzelnen Elemente des Models lassen sich nach erfolgter Preßblechfertigung wieder vom Untergrund ablösen und in anderer Kombination oder aber als Rohmaterial weiterverwenden.

Das Preßblech wird dann durch Abschlagen hergestellt, wobei die Model problemlos größere Serien von Blechen überstehen, ohne daß es zu starken Abnutzungserscheinungen kommt. Anders als bei den bisherigen Beschreibungen, die davon ausgehen, daß Blei oder Leder als Zwischenlage benutzt wurde, erwies sich bei der größeren Serienproduktion der Preßbleche für den Nachbau des Schildes von Gommern Bienenwachs, das vorab mit Speichel benetzt wurde, als erheblich günstiger.

Nach Abdruck des Models kann ein weiterer Arbeitsschritt angefügt werden, indem durch Punzen weitere Verzierungselemente hinzugefügt werden. Dabei können verschiedene Punzen zum Einsatz kommen. Neben geometrisch geformten Punzen, wie auf den Schildbuckelbeschlägen von Gommern (Becker 2000, 144), konnten auch figürliche Punzen wie auf den Thorsberger Zierscheiben (Delphine) oder auf den Fibeln von Merseburg-Süd (Vögel) genutzt werden (von Carnap-Bornheim 1997, 90 Abb. 11; Schmidt 1982, Taf. 11; Voß u. a. 1999, Taf. 71, 1). Verschiedene Gegenstände aus Himlingöje und Illerup belegen, daß auch Menschen oder menschliche Gesichter als Dekorelemente verwendet wurden (Lund Hansen 1995, 143 Fig. 4:6 a).

○ Für die Gestaltung von Preßblechen können problemlos auch römische Objekte, die als Punze für die Preßbleche geeignet sind, eingesetzt werden. Das ist auch möglich, wenn man die römische Ikonographie nicht imitieren kann oder will und in bislang neuen oder ungewöhnlichen Kombinationen arbeitet.

2.3.2 Stabilisierung und Befestigung

Die Mehrzahl der bekannten Preßbleche ist auf der Rückseite mit einer Hinterfüllung aus Lot versehen. Bei einigen Bodenfunden ist das Lot bereits so stark korrodiert, daß es nur noch als pulverige Masse vorliegt oder gar nicht mehr erkannt wird. Grundsätzlich dient diese Hinterfüllung einer weiteren Festigung der Preßbleche, die bereits durch die Profilierung und auch durch die Kaltverformung beim Pressen erheblich an Festigkeit gewonnen haben.

Die weitere Befestigung geschieht dann durch die Montage auf Unterkonstruktionen aus Bunt- oder Edelmetall. Bei Fibelkörpern ist damit die Montage der Preßbleche been-



Abb. 8 Detailaufnahmen der Schulterklappe aus dem Thorsberger Moorfund mit alternierend angebrachten silbernen und vergoldeten, punzierten Köpfen.



Abb. 9 Werkprobe zur reinen Diffusionsvergoldung mit definierten Flächengrößen. Das Silberblech wurde mit kleinen zugeschnittenen Goldblechen vergoldet und anschließend das Muster eingepunzt.

det. An Waffenteilen, z.B. auf Schwertscheiden, Orbändern oder Schilden⁵, können diese Unterkonstruktionen auch nochmals befestigt werden. Diese Unterkonstruktionen können entweder durch das Preßblech ganz verdeckt sein, wie z.B. am Schild von Gommern, oder aber sie bilden eine Einfassung für das Preßblech und werden als zusätzliches Gestaltungselement benutzt, wie z.B. am Schild SAUB von Illerup (von Carnap-Bornheim/Ilkjær 1996, 236 Abb. 117).

Schließlich besteht die Möglichkeit, ein oder mehrere Preßbleche mit anderen Materialien (z.B. Glas oder Edelstein) zu Kombinationen zusammenzufügen, wie das z.B. an einem Fibelpaar aus Haßleben, Grab 21 (Behm-Blancke 1973, Taf. 15), zu sehen ist. Besonders eindrucksvoll ist dies auch auf dem Schildbuckelbesatz von Gommern (Becker 2000, 196) und am Schildbuckel SAUE aus Illerup (von Carnap-Bornheim/Ilkjær 1996a, Taf. 56) umgesetzt worden, wobei die Unterkonstruktion als tragendes Element Verwendung finden kann.

3. Zusammenfassung und Ausblick

3.1 Diffusionsvergoldung im archäologischen Fundstoff

Derzeit sind keine allgemeinen und sicheren Angaben dazu möglich, in welchem Umfang sich diffusionsvergoldete Stücke im archäologischen Fundstoff befinden, da in den meisten Fällen nur Bestimmungen der Vergoldungstechnik nach dem Augenschein vorliegen. Hier steht die Analyse der einzelnen Stücke noch am Anfang, und insbesondere die Trennung von Blatt-, Folien- und reiner Diffusionsvergoldung stellt neben dem analytischen auch ein begriffliches Problem dar.

Reine Diffusionsvergoldungen erweisen sich als eine übliche Vergoldungstechnik wahrscheinlich im römischen als auch ganz sicher im germanischen Milieu. Das läßt sich an verschiedenen Stücken erkennen (Anheuser 1999, Abb. 1) oder, wie bei der Lanx von Bizerta, vermuten. Im germanischen Milieu dürften sich für diese Vergoldungstechnik ebenfalls frühe Belege namhaft machen lassen: so z.B. die imitierten Silberskyphoi aus Grab 2/1925 von Lübsow, für die Blattvergoldung als Vergoldungstechnik beschrieben wird (von Carnap-Bornheim 1994, 100). Zwar ist das Zuschneiden und Handhaben sehr kleiner Blattgoldflitter, z.B. für Kreise von ca. 5 mm Durchmesser, noch zu bewerkstelligen, jedoch hat diese Art Vergoldung kaum die erforderliche Haftfestigkeit. Andererseits haben Goldfolien eine solche Stärke, daß ein Anlegen im klassischen Sinne nicht möglich ist. Eine derzeit als sehr wahrscheinlich anzusehende Variante ist die Vergoldung genau begrenzter Flächen durch reine Diffusionsbindung und deren spätere gezielte Nachbearbeitung. Das konnte jedoch im Rahmen dieser Studie nicht weiter verfolgt werden, sondern verdient ebenfalls eine eigene Untersuchungsreihe.

Der Vergleich des römischen mit dem germanischen Milieu läßt es als möglich erscheinen, daß die reine Diffusionsvergoldung im römischen Edelmetallhandwerk *eine* von mehreren Techniken ist, die – wie auch generell die unterschiedlichen Metallbear-

⁵ Vgl. z. B. das umfangreiche Material aus Skandinavien, von Carnap-Bornheim/Ilkjær 1996, 409 ff.

beitungstechniken – in Abhängigkeit von Effektivität und gewollter optischer Wirkung gezielt eingesetzt wurde.

Im germanischen Metallhandwerk scheint sie zumindest zeitweise eine überragende Stellung besessen zu haben, da sie neben der hohen Effektivität auch den Vorteil besaß, unabhängig von importierten Rohstoffen (Quecksilber !) ausgeführt werden zu können.

Die Frage nach dem Ursprung dieser Technik bleibt weiterhin offen, da dieser nach den jetzt vorliegenden Erkenntnissen mit Sicherheit weder im römischen noch im germanischen Metallhandwerk zu bestimmen ist.

3.2 *Vielseitigkeit und Variantenreichtum der reinen Diffusionsvergoldung*

Wie oben beschrieben, ist die reine Diffusionsvergoldung eine sehr effektive Art und Weise sowohl Halbzeuge für die Weiterverarbeitung zu Preßblechen herzustellen als auch gezielt Teilflächen zu vergolden, um damit eine polychrome Wirkung zu erzeugen. Gleichzeitig eröffnet der Einsatz von nur sehr dünn vergoldeten Silberblechen ein sehr hohes Einsparpotential für das weitaus wertvollere Gold. Damit ist eine Voraussetzung dafür geschaffen, Goldflächen für polychrome Verzierungen zu nutzen, ohne den wertvollen Rohstoff im Übermaß verwenden zu müssen. Daß dennoch ein Luxusgut erzeugt wird, zeigt der Einsatz von ca. 10g Gold, der nötig war, um die weit über 100 Preßbleche für die Nachbildung des Schildes von Gommern zu vergolden.

Viel weitergehende Schlußfolgerungen ergeben sich aus der Wahrscheinlichkeit, daß die reine Diffusionsbindung auch zwischen gleichartigen Metallstücken, hier insbesondere Silber, durchgeführt worden ist. Durch dieses Verfahren erschließt sich die Möglichkeit, fast alle Reststücke einer Werkstatt wiederzuverwenden. Während reines Gold sich gut sammeln und fast verlustfrei neu einschmelzen läßt, ist dies bei Silber nur eingeschränkt der Fall. Der Silberguß ist mit Verlusten und Unsicherheiten behaftet und es sollte schon eine genügend große Menge an Schmelzmaterial vorhanden sein, um auch den erheblichen Energieaufwand zu rechtfertigen.

Die reine Diffusionsbindung gestattet es, neben Silberstücken, die als Werkabfall vorhanden sind, auch Reste vergoldeter Preßbleche wieder zu größeren Einheiten zu verbinden und damit als nutzbares Rohmaterial zu erschließen.

Das kann in dem so hergestellten Rohmaterial sonst unüblich hohe Goldgehalte bewirken, kann aber auch – vielleicht eingetragen durch geringe Anteile feuervergoldeter Silbersachen – zu Quecksilberanteilen im Metall führen, die mißgedeutet werden können.

3.3 *Ausblick und weiterführende Fragestellungen*

Durch das Zusammenspiel von Archäologie, Naturwissenschaften und Handwerk ist es gelungen, eine antike Handwerkstechnik ausgehend vom archäologischen Material zu beschreiben, ihre physikalischen und technologischen Grundlagen aufzudecken und die praktische Ausführbarkeit zu erproben. Die naturwissenschaftlichen Ergebnisse demonstrieren dabei ihre historische Relevanz in eindrucksvoller Weise, weil sie es vermögen, die Möglichkeiten und Rahmenbedingungen der handwerklichen Fähigkeiten der antiken Goldschmiede zu bestimmen und so zum Maß für die Wahrscheinlichkeit der archäo-

logischen Deutung der Artefakte zu werden. Damit gelingt es, optisch gleichartig erscheinende Fundstücke durch Untersuchungen zu differenzieren und tatsächlich gleiche Fundstücke zu erkennen. Mit der Einbeziehung handwerklicher Rekonstruktionen wird außerdem die Grundlage geschaffen, über die Nutzung und möglichen Ursachen für das Entstehen und Verschwinden antiker Handwerkstechniken sowie über deren Vor- und Nachteile zu diskutieren und in der Folge Erkenntnisfortschritte bei archäologischen Studien zu erzielen.

Nach jetziger Kenntnis ist die reine Diffusionsbindung eine in der germanischen Goldschmiedekunst übliche Technik gewesen und wurde wahrscheinlich auch bei den Römern verwendet. Sie besitzt während der römischen Kaiserzeit im germanischen Milieu offensichtlich eine weite und allgemeine Verbreitung und stellt in dieser Zeit wohl die dominierende Vergoldungstechnik dar. Vermutlich liegt das darin begründet, daß diese Technik von zusätzlichen Rohstoffen unabhängig eingesetzt werden kann und somit bei entsprechendem Kenntnisstand universell zu handhaben ist. Darüber hinaus stellt sie eine außerordentlich materialsparende Methode dar, die sowohl das Gold – mit geringeren Verarbeitungsverlusten z. B. im Vergleich zur Feuervergoldung – als auch das Silber durch die schwundfreie Wiederaufbereitung effektiver nutzt. Die Unterscheidung zwischen reiner Diffusionsbindung und Feuervergoldung ist durch mikroskopische und analytische Methoden nahezu zweifelsfrei möglich. Ausgehend von den Untersuchungen Raubs über die Analyseerien von Becker, Schnarr und Fütting (Becker u. a. 1996), die Ergebnisse Anheusers bis hin zu den Untersuchungen von Voß, Hammer und Lutz (Voß u. a. 1999, 193) zeigt sich als sicheres analytisches Unterscheidungskriterium der Hg-Gehalt von ca. 5 bis 20% Hg. Geringere Quecksilbergehalte können für den Nachweis einer Feuervergoldung außer Acht gelassen werden⁶.

Die Ursprünge und die verschiedenen Entwicklungslinien der Diffusionsvergoldung sind nur durch weitere gezielte Untersuchungen zu ermitteln, was den Rahmen und die Möglichkeiten der vorliegenden Studie sprengen würde. Ausgehend vom jetzt erreichten Kenntnisstand scheint es überlegenswert, das Vorhandensein monostofflicher reiner Diffusionsbindung (z. B. bei Silber) zu untersuchen, weil sich dadurch u. U. neue Aspekte der Nutzung und Verarbeitung von Werkabfällen in den antiken Edelmetallschmieden ergeben könnten.

Gerade in bezug auf die Frage der allgemeinen Verbreitung des Wissens um diese Vergoldungstechnik, die für die Diskussion zu Wanderhandwerkern sowie Spezialistentum und -wissen wichtig ist, sind Untersuchungen zur Unterscheidung von »Handschriften« bestimmter Produzenten notwendig. Hier scheinen sich Möglichkeiten anzubieten, wenn man das Vorhandensein einer bestimmten Herstellungstechnik mit den verschiedenen handwerklichen Eigenheiten einzelner Personen in einem überregionalen Vergleich zu verknüpfen versucht.

Grundsätzlich zeichnen die jüngsten Erkenntnisse zum antiken Handwerk ein Bild, das geprägt ist vom individuellen Nutzen und Ausnutzen der Techniken, die dem jewei-

⁶ Eine mögliche Ausnahme könnten vergoldete branddeformierte Gegenstände sein, für die aber bislang keine Untersuchungen vorliegen.

ligen Material (z. B. Metall) entsprechen, sowie von einem hohen Niveau der Bearbeitungstechnik auf Basis eines tiefen empirischen Verständnisses für die Eigenschaften des jeweiligen Materials. Für das Metallhandwerk scheint demnach – besonders für den Handwerker im germanischen Milieu – die kreative Verknüpfung aller jeweils zur Verfügung stehenden Techniken, also das universelle Schmiedekönnen, wichtiger als ausgeprägtes Spezialistentum.

Summary

Pure diffusion bonding, reconstruction of an ancient gilding technology and its application in the metalwork of those times

For many years gilding has been a fascinating research topic for archaeology, the natural sciences and particularly metallography. Various ancient gold cladding methods are known, including gilding by diffusion bonding. However, the pure diffusion bonding has four special features:

1. No auxiliary material (additional substances) are used other than the two metals.
2. There is a close contact between the metal surfaces.
3. Solid diffusion takes place below the melting point.
4. Further processing by hammering, stretching or chasing is possible.

In the experiment pure diffusion bonding is used for gilding silver sheet. The most essential prerequisite is that the composition of the silver alloy is comparable to the analysis results for particularly high alloyed ancient silver. The gilded silver sheet that was manufactured in the experiment can be subsequently formed by the goldsmith.

Pure diffusion bonding is demonstrated in Germanic finds material and it is also possible that Roman objects were gilded in this way. The present state of knowledge suggests that the pure diffusion bonding was a common technology of the metal trade in antiquity.

Literatur

Anheuser 1996

K. Anheuser, An investigation of Amalgam Gilding and Silvering on Metalwork (unpubl. Diss.) (Oxford 1996).

Anheuser 1999

K. Anheuser, Im Feuer vergoldet. Geschichte und Technik der Feuervergoldung und der Amalgamversilberung. Schriftenreihe zur Restaurierung und Grabungstechnik 4 (Stuttgart 1999).

Becker 1993

M. Becker, Die römischen Fundstücke aus dem germanischen »Fürstengrab« der spätromischen Kaiserzeit bei Gommern, Ldkr. Burg. Germania 71, 1993, 405–417.

Becker u. a. 1996

M. Becker/H. Schnarr/M. Fütting, Vergoldete Silberpreßbleche der römischen Kaiserzeit aus materialkundlicher und technologischer Sicht. In: S. Ostritz/R. Einicke (Hrsg.), Terra et Praehistoria [Festschr. K.-D. Jäger]. Beitr. Ur- und Frühgesch. Mitteleuropa 9 (Wilkau-Haßlau 1996) 99–106.

Becker u. a. 1999

M. Becker/M. Fütting/H. Schnarr, Metallkundliche und analytische Untersuchungen am Fundmaterial aus dem »Fürstengrab« von Gommern, Ldkr. Jerichower Land. In: H.-U. Voß/P. Hammer/J. Lutz, Römische und germanische Bunt- und Edelmetallfunde im Vergleich. Archäometallurgische Unter-

- suchungen ausgehend von elbgermanischen Körpergräbern. Ber. RGK 79, 1998 (1999) 204–216.
- Becker 2000**
Gold für die Ewigkeit – Das germanische Fürstengrab von Gommern. Begleitband zur Sonderausstellung im Landesmuseum für Vorgeschichte Halle (Saale), 18.10.2000 – 28.02.2001. S. Fröhlich (Hrsg.) (Halle [Saale] 2000).
- Behm-Blancke 1973**
G. Behm-Blancke, Gesellschaft und Kunst der Germanen (Leipzig 1973).
- Brepohl 1987**
E. Brepohl, Theophilus Presbyter und die mittelalterliche Goldschmiedekunst (Leipzig 1987).
- von Carnap-Bornheim 1994**
C. von Carnap-Bornheim, Zur Entwicklung des germanischen Gold- und Silberschmiedehandwerks vor und nach den Markomannenkriegen – Vergoldung, Filigran und Preßblech. In: H. Friesinger/J. Tejral/A. Stuppner, Markomannenkriege – Ursachen und Wirkungen (Brno 1994) 99–107.
- von Carnap-Bornheim/Ilkjær 1996**
C. von Carnap-Bornheim/J. Ilkjær, Illerup Ådal. Die Prachtausrüstungen. Textband. Jutland Arch. Soc. Publ. 25,5 (Aarhus 1996).
- von Carnap-Bornheim/Ilkjær 1996a**
C. von Carnap-Bornheim/J. Ilkjær, Illerup Ådal. Die Prachtausrüstungen. Tafelband. Jutland Arch. Soc. Publ. 25,7 (Aarhus 1996).
- von Carnap-Bornheim 1997**
C. von Carnap-Bornheim, Neue Forschungen zu den beiden Zierscheiben aus dem Thorsberger Moorfund. *Germania* 75, 1997, 69–99.
- Fassbender u. a. 1997**
F. Fassbender/H. Dittmann/A. Hein/P. Kretz/M. Lehnen/H. Mommsen/A. Rosenberg/G. Eggert/U. Sobottka-Braun, Röntgenfluoreszenzanalyse der Lanx von Bizerta. In: Das Haus lacht vor Silber. Die Prunkplatte von Bizerta und das römische Tafelgeschirr. H.-H. von Prittwitz und Gaffron/H. Mielsch (Hrsg.), *Kat. Rheinisches Landesmus. Bonn* 8 (Köln 1997) 202–212.
- Furger/Riederer 1995**
A. Furger/J. Riederer, Aes und aurichalcum. Empirische Beurteilungskriterien für Kupferlegierungen und metallanalytische Untersuchungen an Halbfabrikaten und Abfällen aus metallverarbeitenden Werkstätten in Augusta Raurica. *Jahresber. August u. Kaiseraugst* 16, 1995, 115–180.
- Gustavs 1994**
S. Gustavs, Germanisches Handwerk/Feinschmiedehandwerk von Klein Kōris. Ein Bericht mit Blick auf Gudme-Lundeborg. In: P.O. Nielsen/K. Randsborg/H. Trahne (Hrsg.), *The Archaeology of Gudme and Lundeborg. Papers presented at a Conference at Svendborg, October 1991*. *Ark. Stud.* 10 (København 1994) 118–127.
- Hammer 1993**
P. Hammer, Metall und Münze (Leipzig/Stuttgart 1993).
- Hammer 1999**
P. Hammer, Bemerkungen zum Buntmetallspektrum nach Plinius. In: H.-U. Voß/P. Hammer/J. Lutz, Römische und germanische Bunt- und Edelmetallfunde im Vergleich. *Archäometallurgische Untersuchungen ausgehend von elbgermanischen Körpergräbern*. Ber. RGK 79, 1998 (1999) 289.
- Hammer 1999a**
P. Hammer, Verfahrenstechnische Untersuchungen. In: H.-U. Voß/P. Hammer/J. Lutz, Römische und germanische Bunt- und Edelmetallfunde im Vergleich. *Archäometallurgische Untersuchungen ausgehend von elbgermanischen Körpergräbern*. Ber. RGK 79, 1998 (1999) 179–199.
- Hammer 1999b**
P. Hammer, Metallkundliche Untersuchungen. In: H.-U. Voß/P. Hammer/J. Lutz, Römische und germanische Bunt- und Edelmetallfunde im Vergleich. *Archäometallurgische Untersuchungen ausgehend von elbgermanischen Körpergräbern*. Ber. RGK 79, 1998 (1999) 158–168.
- Hammer/Voß 1999**
P. Hammer/H.-U. Voß, Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei der Anwendung bevorzugter Feinschmiedetechnik. In: H.-U. Voß/P. Hammer/J. Lutz, Römische und germanische Bunt- und Edelmetallfunde im Vergleich. *Archäometallurgische Untersuchungen ausgehend von elbgermanischen Körpergräbern*. Ber. RGK 79, 1998 (1999) 292–306.
- Hammer/Voß 1999a**
P. Hammer/H.-U. Voß, Glossar metallkundlicher und herstellungstechnischer Fachbegriffe – erläutert für antike Handwerkstechnik. In: H.-U. Voß/P. Hammer/J. Lutz, Römische und germanische Bunt- und Edelmetallfunde im Vergleich. *Archäometallurgische Untersuchungen ausgehend von elbgermanischen Körpergräbern*. Ber. RGK 79, 1998 (1999) 314–330.
- Lange 1920**
O. Lange, Chemisch-technische Vorschriften (Leipzig 1920).
- Lund Hansen 1995**
U. Lund Hansen, Himlingøje-Seeland-Europa. Ein Gräberfeld der jüngeren römischen Kaiserzeit auf Seeland, seine Bedeutung und internationalen Beziehungen. *Nordiske Fortidsminder B* 13 (København 1995).
- Oddy u. a. 1981**
W. A. Oddy/S. La Niece/J. E. Curtis/N. D. Meeks, Diffusion-Bonding as a method of Gilding in Antiquity. *MASCA Journal* 1,8, 1981, 239–241.
- Oddy/Cowell 1993**
W. A. Oddy/M. R. Cowell, The technology of gilded coin forgeries. In: *Metallurgy in Numismatics* 3. M. M. Archibald/M. R. Cowell (Hrsg.) (London 1993) 204.
- Plather u. a. 1995**
U. Plather/E. Astrup/E. Straume, Norwegian

- rosette-brooches of the 3rd century AD: their construction, materials and technique.
Journal Hist. Metallurgy Soc. 29,1, 1995, 12–24.
- Projektgruppe Plinius 1993**
Projektgruppe Plinius, Gold und Vergoldung bei Plinius dem Älteren (Tübingen 1993).
- Raddatz 1987**
K. Raddatz, Der Thorsberger Moorfund. Katalog. Teile von Waffen und Pferdegeschirr, sonstige Fundstücke aus Metall und Glas, Ton- und Holzgefäße, Steingeräte. Offa-Bücher 65 (Neumünster 1987).
- Schmidt 1982**
B. Schmidt, Hermunduren-Warnen-Thüringer. Zur Geschichte des 3. bis 5. Jh. im Saalegebiet anhand des birituellen Gräberfeldes von Merseburg-Süd. Jahresschr. Mitteldt. Vorgesch. 65, 1982, 173–216.
- Seelmann 1903**
H. Seelmann, Ein Urnenfund provinzialrömischer Zeit aus Dessau. Unser Anhaltland 3, 1903, 130–132.
- Seith 1955**
W. Seith, Diffusion in Metallen (Berlin/Göttingen/Heidelberg 1955).
- Sobottka-Braun 1997**
U. Sobottka-Braun, Spurensuche auf der Lanx von Bizerta. In: Das Haus lacht vor Silber. Die Prunkplatte von Bizerta und das römische Tafelgeschirr. H.-H. von Prittwitz und Gaffron/H. Mielsch (Hrsg.). Kat. Rheinisches Landesmus. Bonn 8 (Köln 1997) 196–201.
- Ulbert 1966**
G. Ulbert, Ein Preßblechmodell aus dem Römischen Museum Augsburg. Mit Beiträgen von H. Drescher u. H. Kühn. Jahrb. RGZM 3, 1966, 204–211.
- Voß u. a. 1999**
H.-U. Voß/P. Hammer/J. Lutz, Römische und germanische Bunt- und Edelmetallfunde im Vergleich. Archäometallurgische Untersuchungen ausgehend von elbgermanischen Körpergräbern. Ber. RGK 79, 1998 (1999) 107–382.

Abbildungsnachweis

- 1–6 P. Hammer, Zschopau
7 A. Hörentrup, LfA
8 Archäologisches Landesamt in der
Stiftung Schleswig-Holsteinische Landesmuseen Schloß Gottorf, Schleswig
2001
9 E. Hunold, LfA

Anschriften

Dr. Matthias Becker
Landesamt für Archäologie Sachsen-Anhalt
Richard-Wagner-Str. 9–10
D-06114 Halle (Saale)

Dr. Manfred Fütting
Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik
Heideallee 19
D-06114 Halle (Saale)

Dr. ing. Peter Hammer
Greflerweg 4
D-09405 Zschopau

Dipl. rest. (FH) Ulrich Sieblist
Dorfstr. 33
D-06536 Questenberg