

DIE RÖNTGENFLUORESCENZANALYSE IN DER ARCHÄOLOGIE

Methode

Die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) beruht auf folgenden physikalischen Grundlagen: Eine Probe wird durch eine starke Röntgenstrahlung beschossen, so daß sie — ähnlich der Anode einer Röntgenröhre — dazu angeregt wird, sogenannte sekundäre Röntgenstrahlung, auch Fluoreszenzstrahlung genannt, auszusenden. Diese sekundäre Röntgenstrahlung ist nun von der Zusammensetzung der Probe abhängig, d. h. eine Probe aus reinem Eisen sendet eine charakteristische Eisen-Strahlung, eine Probe aus reinem Zinn eine charakteristische Zinn-Strahlung und eine Probe unbekannter Zusammensetzung eine Mischung der charakteristischen Element-Strahlungen entsprechend ihrer Zusammensetzung aus. Diese Mischung sekundärer, charakteristischer Strahlungen besteht aus elektromagnetischen Wellen, die sich nach Wellenlänge, Energie oder Frequenz den Elementen zuordnen lassen. Durch Messung der Amplituden (Intensitäten) ergibt sich ein Maß für die Stärke der einzelnen Strahlungsanteile und damit für die Konzentration der jeweiligen Element-Anteile. Die meßtechnische Anordnung der Charakterisierung der Strahlenarten ist nun darauf ausgerichtet, daß man entweder die Verteilung der verschiedenen Energien mißt, indem man mit einem Silicium (Li)- oder Germanium-Detektor die Strahlung direkt mißt und dann eine Gesamtschau derselben besitzt (energiedispersive Methode), oder daß man die Fluoreszenz-Strahlung an einem Kristall beugt bzw. reflektiert, wobei man je nach Stellung des Kristalls nach und nach alle charakteristischen Linien je nach der Wellenlänge im Detektor messen kann (wellenlängendispersive Methode). Die energiedispersive Methode benötigt nach dem Detektor einen oder mehrere Verstärker sowie einen Multikanal-Analysator und zeigt ihr Ergebnis auf einem Monitor, wobei die Daten üblicherweise in einem Computer gespeichert werden. Die wellenlängendispersive Methode benötigt zunächst einen Analysator-Kristall und mißt dann schon direkt mit dem Strahlungsmeßgerät. Die Daten werden entweder üblicherweise über einen Schreiber visualisiert oder aber an Meßröhren abgelesen. Der weitere apparative Aufwand dürfte bei beiden Methoden etwa gleich groß sein. Die energiedispersive Methode führt schon in Sekunden bis zu wenigen Minuten zu einem Gesamtbild der Zusammensetzung der Probe. Die wellenlängendispersive Methode erlaubt es — allerdings mit längeren Meßzeiten — auch niedrigere Konzentrationen (höhere „Empfindlichkeit“) zu analysieren und führt zu einem besseren Unterscheidungsvermögen (bessere „Auflösung“) der verschiedenen Strahlungsantei-

le¹⁾. Am Römisch-Germanischen Zentralmuseum wird die wellenlängendispersive Methode angewandt.

Die Anwendung der RFA in der Archäologie ist zunächst durch die Zerstörungsfreiheit der Methode in Gang gekommen: Die Proben werden bestrahlt, senden Sekundärstrahlung aus, und sind nach dem Abschalten der Röhre unverändert geblieben. Ein weiterer Vorteil der Methode besteht darin, daß auch chemische Elemente, die man aus Kenntnis moderner Materialien zunächst nicht vermutet, durch das quasi automatische Analysensystem nachgewiesen werden. Schließlich ist eine Analyse in relativ kurzer Zeit zu erstellen, wenn sie nicht sehr genau sein soll: Die quantitative Analyse hängt von der Güte der bestrahlten Fläche, also von ihrer absolut ebenen und fein geschliffenen Oberfläche ab, was bei Bodenfunden, die der Korrosion unterliegen, nicht zu erwarten ist. Auch die Heterogenität einer Probe — zum einen horizontal von Punkt zu Punkt auf der Oberfläche, zum anderen vertikal von der (korrodierten) Oberfläche zum Innern der Probe — ist eine entscheidende Beschränkung für die RFA, eine Beschränkung, die jedoch auch für alle anderen Methoden gilt, wenn man nicht die teilweise Zerstörung oder die fortdauernde radioaktive Strahlung (wie z. B. bei der Neutronenaktivierungsanalyse) der Probe oder des Objekts in Kauf nimmt.

Da in der Archäologie die genaue quantitative Analyse normalerweise nur bei Serienuntersuchungen von Bedeutung ist, kann bei der engen Zusammenarbeit von Archäologen und Restauratoren im Bereich der täglichen Forschung die RFA als die Methode gelten, die am schnellsten jene Ergebnisse liefert, welche man für den Fortgang der laufenden Forschungs- und Restaurierungsarbeiten einsetzen kann. Dies gilt umso mehr, als materialabhängige Eichungen und apparative Umrüstungen dann entfallen können, wenn nur halbquantitative Resultate erwartet werden. In besonderem Maße ist die RFA im Mikrobereich von Interesse, wofür oft nur geringste Proben zur Verfügung stehen können²⁾.

1) S. Filippakis, *Wavelength dispersive X-Ray Fluorescence*. *PACT* 5 (in Vorbereitung). — K. Warren, *Energy dispersive X-Ray Fluorescence*. *Ebd.* — V. F. Hanson, *Application of Science in Examination of Works of Art* 2 (1970) 18 ff.

2) J. N. Barrandon, *Étude comparative de la fluorescence X et des méthodes nucléaires dans leur application à l'archéologie*. *PACT* 1, 1977, 61–75. — Ch. Lahanier, *L'application des méthodes de fluorescence X à l'archéologie au laboratoire de recherche des musées de France*. *PACT* 1, 1977, 101–109. — L. Maes, *X-ray fluorescence spectrometric analysis of Etruscan mirrors*. *PACT* 1, 1977, 131–137. — H. McKerrell, *Non-dispersive XRF applied to ancient metalworking in copper*

and tin bronze. *PACT* 1, 1977, 138–173. — E. T. Hall, F. Schweizer u. P. A. Toller, *X-Ray fluorescence analysis of museum objects: a new instrument*. *Archaeometry* 15/1, 1973, 53–78. — M. E. Salomon, *An X-Ray fluorescence method for micro-samples*. In: *Meeting of the Internat. Inst. for Conservation of hist. and art. works, American group*, Los Angeles (1969). — H.-J. Hundt u. D. Ankner, *Die Bronzeräder von Haßloch*. *Mitt. Hist. Ver. Pfalz* 67, 1969, 14–34 Taf. 1–14. — L. Lehoczky, *Technische Untersuchung und Restaurierung eines Greifenkessels aus Salamis (Zypern)*. *Jahrb. RGZM* 21, 1974, 128–143. — D. Ankner, *L'application de l'analyse en fluorescence X au Römisch-Germani-*

Anwendungen

Materialbestimmung

Da die moderne archäologische Forschung in zunehmendem Maße auch technologische Untersuchungsmethoden heranzieht und in direktem Kontakt zur Restaurierung vor- und frühgeschichtlicher Funde steht, ist die jeweilige Bestimmung des Materials und seines Zustands von großer Bedeutung.

Die allseits bekannte Erkennung von „Bronzefibeln“ als Silberfibeln soll zunächst genannt werden: Die Silberfibeln bestehen oft aus minderwertigen Silberlegierungen mit einem relativ hohen Kupferanteil. Bei der Korrosion wird das Kupfer wesentlich schneller angegriffen, so daß grüne Patinaschichten auf der Silberfibel entstehen, die dem Ausgräber eine „Bronzefibel“ vortäuschen. Eine Bestimmung des Materials ergibt sodann die richtige Beurteilung „Silberfibel“. Natürlich ist es hierzu von Bedeutung auch den relativ hohen Kupfergehalt mit anzugeben, weil ja die Verwendung der minderwertigen Silberlegierung durchaus auf eine bestimmte geographische Herkunft, für eine bestimmte chronologische Einordnung oder für die soziale Stellung des Bestatteten Hinweise geben kann.

Die Bestimmung charakteristischer Metallegierungen ist in besonderem Maße von Interesse, wenn man die verschiedenen Tauschierungs- oder Plattierungstechniken betrachtet: Die RFA frühgeschichtlicher Beschläge ist von besonderem Vorteil, da sie sich auf kleinste Teilchen beschränkt und zerstörungsfrei ist, so daß sie während der Restaurierung ohne Schwierigkeiten ausgeführt werden kann — zum einen sind kleine Teilchen der Tauschierung oft lose, zum anderen kann man mit einer Metallmaske direkt jenen Punkt auf dem Beschlag analysieren, von dem man annimmt, daß die etwas verschiedene Färbung auf ein anderes Tauschierungsmetall hinweist. Schließlich ist die genaue Festlegung der Zusammensetzung der tauschierten Linien oder Flächen oder auch der plattierten Flächen nur in direkter täglicher Zusammenarbeit mit dem Restaurator möglich, weil eine unabhängige Probenahme durch den Analytiker allein zu ähnlichen Fehlschlüssen führen kann, wie wenn der Restaurator den Auftrag erhält, Proben zu entnehmen, und diese dann einem weit entfernten, vielleicht sogar anonymen Analytiker zugestellt werden.

Ein solches Beispiel sei an dem bei uns durch die RFA beschriebenen Beschlag von Wendlingen dargelegt³⁾: Eine Analyse des offensichtlich mit Silber tauschierten

sches Zentralmuseum à Mayence. PACT 1, 1977, 47–60. — E. T. Hall, *Recent research at the Research Laboratory for Archaeology and the History of Art, Oxford*. In: W. J. Young (ed.), *Application of Science in Examination of Works of Art* (1965) 105–113. — H. R. Bowman, R. D.

Giaque u. I. Perlman, *Rapid X-Ray Fluorescence Analysis of Archaeological Materials*. In: R. Berger (Hrsg.), *Scientific Methods in Medieval Archaeology* (1970) 409ff.

³⁾ H.-J. Hundt, *Fundber. Schwaben* N.F. 18/1, 1967, 309f.

Beschlags hätte sicher mit Proben begonnen, die aus dem plattierten Zentrum entnommen worden wären. Das Ergebnis — Silber mit einem geringen Bleigehalt — wäre weder ganz falsch noch neu gewesen. Die Zusammenarbeit mit dem Restaurator, aber auch mit dem Röntgenassistenten, führte jedoch zu einem anderen Resultat: Der Beschlag ist zwar an allen plattierten Flächen mit Silber belegt; jene Linien, die jedoch die eigentliche tierstil-artige Verzierung tragen, bestehen aus Messing. Eine Analyse außer Haus und weg vom Restaurator wäre deswegen falsch geworden, weil die feinen Linien, die die Verzierung darstellen, sehr dünn waren und sicher nicht als Probe entnommen und damit in ihrer Verschiedenheit nicht erkannt worden wären. Eine Analyse, dort wo der Fund auch restauriert wurde, konnte den gesamten Beschlag untersuchen, wobei jene Bereiche, die im Augenblick nicht interessant waren, durch eine Aluminium-Maske⁴⁾ abgedeckt werden konnten.

Hallstattzeitliche Tauschierungen sind wesentlich seltener als solche aus dem frühen Mittelalter. Eine eiserne Lanzenspitze (Ha D), deren Tülle mit Kupfer tauschiert ist, und die von Offenbach-Rumpenheim stammt⁵⁾, wurde zwar weit entfernt von Novo Mesto in Slowenien gefunden, die Ähnlichkeit zu einer dortigen, ebenfalls kupfertauschierten Lanzenspitze⁶⁾ ist jedoch deutlich. Die Tauschierung in der späten Hallstattzeit, wie sie von uns z. B. an Dolchen von Villingen-Magdalenenberg oder von Corno Lauzo mit der RFA beobachtet werden konnte⁷⁾, wurde in den uns vorliegenden Fällen mit Kupfer oder seltener mit Silber ausgeführt, wobei die Technik noch nicht in ausreichendem Maße untersucht wurde. P. Eichhorn u. a.⁸⁾ haben auch Bronze-Tauschierungen in baden-württembergischen Funden nachweisen können, bei denen sie durch metallurgische Gefügeuntersuchungen eine Bronzeblechummantelung von vorgekerbtem Eisen annehmen, wobei der mit Ton ummantelte Verbund in Holzkohle bis zum Schmelzen der Bronze erhitzt wurde; eine Abarbeitung der überschüssigen Bronze legte dann die Tauschierung frei.

Eine Neubearbeitung möglichst aller tauschierten hallstattzeitlichen Funde, wie sie schon

4) Die Aluminium-Maske besteht aus einem sehr reinen Aluminium (welches in unserem Falle nur noch eine geringe Menge Gallium enthält, was bei keiner unserer Messungen stört); in dieses Blech wird jeweils nur ein so großes Loch geschnitten, daß lediglich der speziell ausgewählte Bereich bestrahlt wird.

5) K. Ulrich, *Ein späthallstattzeitliches Wagengrab von Offenbach-Rumpenheim*. *Arch. Korrbl.* 3, 1973, 313–315 Taf. 60.

6) Zum Fundplatz: T. Knez, *Novo Mesto v davni. Novo Mesto in der Vorzeit* (1972) Hügel 1, Gr. 31. Einzelveröffentlichung demnächst.

7) K. Spindler, *Magdalenenberg III. Der hallstatt-*

zeitliche Fürstengrabhügel bei Villingen im Schwarzwald (1973). Antennendolch aus dem Grab 67: 33f., Taf. 20; 94, b und Abb. 9. — Ders., *Magdalenenberg IV* (1976). Eiserner Dolch aus dem Grab 90: 30f., Taf. 10,9. — O. u. J. Taffanel, *Deux tombes de chefs à Mailbac*. *Gallia* 18, 1960, 4–37. — H. J. Hundt in: W. Schüle, *Die Meseta-Kulturen der Iberischen Halbinsel*. *Madriider Forschungen* 3 (1969) 94f.

8) P. Eichhorn, H. Rollig, U. Schwarz, B. Urbon u. U. Zwickler, *Untersuchungen über die hallstattzeitliche Technik für Bronzeeinlagen in Eisen*. *Fundber. Baden-Württemberg* 1, 1974, 293ff.

Rieth mehrfach teilweise vorgelegt hatte⁹⁾, erscheint aufgrund der vielen Neufunde, der neuartigen Untersuchungs- und Bestimmungsmöglichkeiten der verwendeten Materialien und vielfach genauerer Restaurierung notwendig.

Von Tauschierungen mit Gold wurde bisher nur bei wenigen phönizischen Silberschalen und bei mykenischen Dolchen berichtet. Eine ägyptische Bronzeschale aus der 19./20. Dynastie, vermutlich von Kantir im Nordostdelta¹⁰⁾, deren Verzierung zunächst nur mit der Röntgenfotografie sichtbar war, da die Bronzepatina die Fragmente vollkommen überwucherte, wurde mit der RFA untersucht. Dabei ließen sich deutlich zwei verschiedene Tauschierungsmaterialien unterscheiden: Zum einen waren feine Drähte in die Bronze eingelegt, die aus einem Gold bestanden, welches mit relativ viel Silber und etwas Kupfer legiert war. Zum anderen waren dagegen flächige Zonen mit einem helleren, silber- bis goldglänzenden Metall bedeckt, das zwar in der Hauptsache aus Kupfer, daneben aber auch aus Silber und etwas Gold bestand. Man könnte hierbei an eine Legierung von Kupfer mit dem im Vorderen Orient und in Ägypten häufig vorkommenden Elektron denken.

Ähnliche Beispiele für die direkte Zusammenarbeit des Restaurators mit dem Röntgenfluoreszenzanalytiker seien aufgezeigt bei der Materialbestimmung eines frühmittelalterlichen Metallanhängers von Altenerding (Klettham Gr. 1257), der insgesamt bestrahlt werden konnte und somit durch die RFA keinerlei Beschädigung erlitt. Die Legierung besteht aus sehr reinem Zinn, welches weder mit Blei noch mit Silber verunreinigt war. Abgesehen von der Seltenheit frühmittelalterlicher Zinn-Gegenstände, war das Resultat für die Restaurierung und für die zukünftige Magazinierung des Fundes von Bedeutung. Die oberflächliche Reinigung von Oxyden, die Feststellung mit einer Röntgenfeinstrukturaufnahme, daß kein α -Zinn vorhanden war (also kein graues, pulveriges Zinn, welches sich bei einer Temperatur unterhalb $13,2^\circ$ bildet), eine Konservierung mit einem Acrylat-Lack und der Hinweis, daß der Zinn-Anhänger relativ warm (immer über $13,2^\circ$) magaziniert werden muß, waren die Folgerungen aus der Materialanalyse. Ähnliche Analysen, Restaurierungs- und Konservierungshinweise empfehlen sich auch bei der Bearbeitung von Keramik, die mitunter mit metallischem Zinn verziert war, wobei dieses Zinn meist so stark korrodiert ist, daß es sich aufgrund seiner grauweißen Färbung kaum mehr erkennen läßt.

Gestempelte Pasten von römischen Augenärzten werden zwar immer wieder gefunden¹¹⁾, Analysen dazu fehlen jedoch fast durchweg, da die Konservatoren üblicherweise

⁹⁾ A. Rieth, *Die Tauschertechnik der Hallstattzeit. Mannus-Bücherei* 27 (1935) 102ff. und 70 (1942) 50ff. 103ff. — Ders. (mit Beiträgen von P. Eichhorn und H. J. Hundt), *Zur Herstellungstechnik der Eisendolche in der späten Hallstattzeit. Jahrb. RGZM* 16, 1969, 17ff.

¹⁰⁾ J. Settgast (Hrsg.), *Von Troja bis Amarna. The Norbert Schimmel Collection New York* (Ausstellungskatalog 1978) Nr. 250.

¹¹⁾ H. Nielsen, *Ancient ophthalmological agents* (1974).

vor der Zerstörung der „Arznei-Tabletten“ zurückschrecken. Eine zerstörungsfreie RFA einer solchen „Paste“ von Krefeld-Gellep (Grab 3218/13) ergab relativ reines Bleihydroxycarbonat mit einer Verunreinigung von etwa 1% Zinkoxid. Weitergehende Analysen an 10 Proben von solchen gestempelten Pasten aus einem römischen Arzneikästchen von Wehringen¹²⁾ ergaben, daß zur Ausstattung des dortigen römischen Arztes sechs verschiedene Medikamente gehörten, die im wesentlichen aus wechselnden Anteilen von Zink-, Blei-, Kupfer-, seltener auch von Eisen- oder Zinn-Verbindungen bestanden.

Diese Beispiele zur Bestimmung vorliegenden Materials ließen sich beliebig erweitern. Sie finden oft in den archäologischen Publikationen neuen Fundgutes ihren Niederschlag, wobei die Hilfe der RFA vom Archäologen zwar gerne entgegengenommen wird, aber nicht eingehend beschrieben werden kann, weil die Art und Weise, wie der Naturwissenschaftler zu seinen Resultaten gelangt, den Leser der entsprechenden Publikationen meist kaum interessiert.

Die Materialbestimmung ist jedoch auch oft mit anderen Analysetechniken möglich — wobei diese allerdings nur selten zerstörungsfrei sind —, so daß die RFA hier nicht jenen Stellenwert einnimmt, den sie bei der Untersuchung alter Herstellungstechniken hat.

Erforschung alter Herstellungstechniken

Die besonderen Möglichkeiten der RFA liegen hier vor allem darin, daß selbst kleinste Probemengen untersucht werden können. Bei der Restaurierung werden oft Details beobachtet, wo entweder eine sofortige RFA mit einer Aluminium-Maske angebracht erscheint oder, wo dies wegen der Größe des Objektes nicht möglich ist, eine winzige Probe entnommen werden muß.

Die Untersuchung der kläglichen Überreste eines kaiserzeitlichen Gürtels von Bornstein¹³⁾, soll zunächst die Art und Weise unseres Vorgehens erläutern: Der Gürtel war in einem Verbund mit Erde und Sand lediglich als graubraune Verfärbung sichtbar, wobei einige wenige Glasperlchen und dünne Goldblechfragmente zu sehen waren. Die Ausgräber hatten den gesamten Fund eingegipst, so daß wir zunächst ohne die Sorge einer etwaigen Verschiebung Röntgenaufnahmen herstellen konnten. Dabei ergaben sich umrißartig bereits die Formen der Gürtelbeschläge, so daß der Restaurator — mit dem Binokular und den beleuchteten Röntgenaufnahmen neben sich — nach und nach die umgebende Erde entfernen konnte. Dabei stellten wir allerdings fest, daß die Gürtelbeschlagteile zu einem großen Teil nur noch aus grauschwäzlichem Pulver bestanden, welches in kleinen Proben der RFA zugeführt wurde. An einigen Stellen wurden dann

¹²⁾ H. U. Nuber (mit Anhang D. Ankner), *Das römische Arzneikästchen von Wehringen. Jahresber. der Bayerischen Bodendenkmalpflege* (in Vorbereitung).

¹³⁾ Kaiserzeitliche Herrengräber, Bornstein Kr. Eckernförde; Verbleib: Schleswig-Holsteinisches Landesmuseum Schleswig (Der Gürtel stammt aus dem Grab 7).

zwei Schichten feiner Pulver festgestellt (nachdem die RFA einmal höhere Silbergehalte, zum anderen Zinn- und Bleianteile, in mehreren Fällen aber auch Silber, Zinn und Blei nachwies), die eine Rekonstruktion der Beschläge erlaubten (Abb. 1): Auf einer Grundlage von Blei + Zinn (die natürlich viel billiger als Silber war) saß ein Silberblech, welches wiederum mit einem rechteckigen vergoldeten Silberblech bedeckt war, das jeweils zwei bräunliche Glasperlen trug. Reste von Leder, das durch einen sehr hohen Stickstoffgehalt auch chemisch diagnostiziert werden konnte (nachdem optisch schon eine relative Sicherheit vorhanden war), ließen uns die begründete Vermutung eines Gürtels fast zur Sicherheit werden. Endgültig sicher waren wir, als wir ein kleines dreieckiges Endbeschlagteil und einen Teil der Gürtelschnalle herauspräpariert hatten.

Ähnliche RFA-Untersuchungen wurden auch zur Frage der Hartlötungen durchgeführt, wie sie in der Hallstattzeit schon häufig nachzuweisen sind. So konnte an dem Kugelortband des Eisendolches von Wolfegg¹⁴⁾ wie auch an dem des Eisendolches von Estavayer-le-Lac¹⁵⁾ festgestellt werden, daß die Kugelortbänder jeweils aus zwei durch Hartlötung mit Kupfer verbundenen Halbkugeln zusammengesetzt sind. Ähnliche Beobachtungen konnte auch Rieth (mit P. Eichhorn und H.-J. Hundt) an mehreren Eisendolchen der späten Hallstattzeit machen, wobei Eichhorn erstaunliche Ähnlichkeiten der Technik der Hartlötung und der Tauschierung feststellen konnte (s. Anm. 8). Auch für die Latène-Zeit konnten wir den Fortbestand dieser Hartlötungstechnik mit Kupfer an Funden von Reinheim und Manching nachweisen. Eine Weiterentwicklung der Verbindungstechnik durch Hartlöten könnte im Verbundguß der Räder von Haßloch¹⁶⁾ gesehen werden, bei denen die RFA den technischen Ablauf der Herstellung und Reparatur der Bronzeräder weitgehend erklären konnte.

Es soll auch noch auf die Frage der Oberflächen-Arsenierung bzw. -Verzinnung hingewiesen werden, die wir mit der RFA untersuchen konnten. Hierzu mußte eine besondere Technik entwickelt werden, die sich daraus ergab, daß auf der Oberfläche der untersuchten Dolche oft nur hauchdünne Auflagen von Zinn, Arsen bzw. Silber lagen. Eine RFA, auch mit einer Aluminium-Maske, bestrahlte daher nur eine sehr dünne Oberflächenaufgabe und sehr viel Metall des darunterliegenden eigentlichen Dolches, so daß die in der Auflage erzeugte Strahlung in der Masse der emittierten Fluoreszenzstrahlung sozusagen unterging¹⁷⁾. Wir brachten daher auf einer kleinen Fläche Epoxyharz (außen durch Ton abgedichtet) zylinderförmig auf, indem wir die Mischung zunächst

¹⁴⁾ H.-J. Hundt in: A. Rieth, *Zur Herstellungstechnik der Eisendolche der späten Hallstattzeit*. *Jahrb. RGZM* 16, 1969, 18 ff.

¹⁵⁾ H.-J. Hundt, *Technische Untersuchung eines hallstattzeitlichen Dolches von Estavayer-le-Lac*. *Jahrb. RGZM* 10, 1963 (1965) 182–189 Abb. 1. — Ders., *Jahrb. Schweiz. Ges. Urgesch.* 52, 1965

(1966), 95–99 Abb. 1.

¹⁶⁾ H.-J. Hundt u. D. Ankner, *Die Bronzeräder von Haßloch*. *Mitt. Hist. Ver. Pfalz* 67, 1969, 14–34 Taf. 1–4.

¹⁷⁾ Vgl. dazu: Ch. Lahanier, *Détermination par élément chimique de l'épaisseur de la couche analysée en fluorescence X*. *PACT* 1, 1977, 31–40.

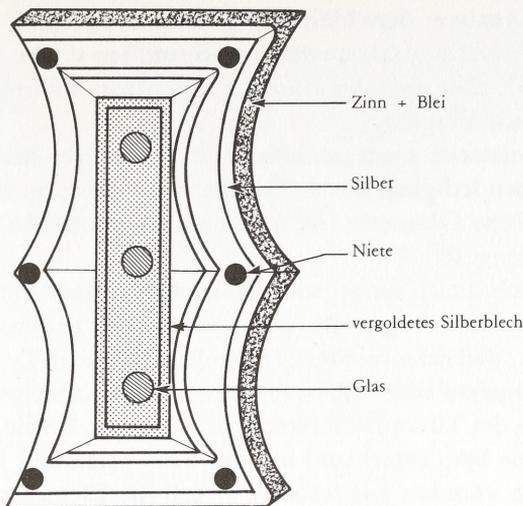


Abb. 1 Bornstein, Kr. Eckernförde, Grab 7. Rekonstruktion des Aufbaus eines kaiserzeitlichen Gürtelbeschlagteils.

schon etwas vorpolymerisieren ließen, um eine höhere Viskosität zu erreichen, und warteten die vollständige Aushärtung des Epoxyharz-Zylinders, den wir anschließend von der Metalloberfläche ablösten, ab. Wir konnten dabei oft beobachten, daß wir nur geringe Mengen der Arsenierung bzw. Verzinnung auf das Kunstharz übertragen hatten, was jedoch zur Analyse vollkommen ausreichte. Die Ergebnisse, die für die Dolche aus dem Finistère und von Gaubickelheim eine Arsenierung nachgewiesen haben, werfen ein neues Licht auf die Möglichkeiten der frühen Metallurgie¹⁸⁾.

Schließlich seien noch neuere Untersuchungen zu späthallstattzeitlichen Glasperlen beschrieben, bei denen wir uns allein die Anwendung der RFA vorstellen können, wenn man zum einen die absolute Forderung der Zerstörungsfreiheit¹⁹⁾ und zum anderen die

¹⁸⁾ H.-J. Hundt, *Der Dolchhort von Gau-Bickelheim in Rheinbessen. Jahrb. RGZM* 18, 1971, 1-43. — D. Ankner, *Röntgenfluoreszenzanalysen an bronzeitlichen Dolchen. Jahrb. RGZM* 18, 1971, 44-50. — Vgl. hierzu: H. McKerrell u. R. F. Tylecote, *The working of copper-arsenic alloys in the Early Bronze Age and the effect on the determination of provenance. Proc. Prehist. Soc.* 38, 1972, 209-218; E. R. Eaton u. H. McKerrell,

Near Eastern alloying and some textual evidence for the early use of arsenical copper. World Archaeology 8, 1976, 169-191; J. A. Kinnes, P. T. Craddock, S. Needham u. J. Lang, *Tin-Plating in the Early Bronze Age: the Barton Stacey axe. Antiquity* 53, 1979, 141ff.

¹⁹⁾ Es sei hier darauf hingewiesen, daß Verfärbungen an Gläsern, die durch die Einwirkung von Röntgenstrahlen entstehen, schon in we-

Notwendigkeit der Analyse der Mehrfarbigkeit an ein und derselben Glasperle berücksichtigt. Für mehrfarbige Glasperlen, wie sie um 500 v. Chr. rund ums Mittelmeer häufig vorkommen, die aber auch bis nördlich der Alpen verstreut gefunden werden, stellen sich uns folgende Fragen:

1. Ist das Grundmaterial einer mehrfarbigen Glasperle dasselbe, und sind die verschiedenen Farben lediglich durch Zugabe von färbenden Metalloxyden erreicht worden, oder ist diese Glasperle aus mehreren, vollkommen verschiedenen Glas-schmelzen zusammengesetzt?
2. Sind die äußerlich gleich aussehenden Glasperlen einer Perlenkette nach einem Rezept erschmolzen und hergestellt, oder sind solche Perlen in ihrer Herstellung bereits so normiert, daß man mehrere Hersteller für einen Typ annehmen kann?

Um diese Fragen wenigstens teilweise beantworten zu können, wurden verschiedenste Gläser aus Norditalien, der Türkei, von Nordafrika, Zypern, Sardinien, aus Jugoslawien, aus der UdSSR und aus Süddeutschland mit der RFA bestimmt. Im Rahmen größerer Reihenuntersuchungen konnten wir feststellen, daß die Elemente Antimon (Sb), Blei (Pb), Zinn (Sn) und Kobalt (Co) gewissermaßen den Charakter von Fingerabdrücken haben, so daß die Analysen nicht auf alle Elemente ausgedehnt werden mußten.

Für die steigenden Konzentrationen der jeweiligen Elemente haben wir Kennzahlen von Null bis Neun eingeführt, die den Überblick erleichtern und für unsere Untersuchungen, ob die Grund-Schmelzmasse der verschiedenen farbigen Anteile einer Perle übereinstimmt oder deutlich voneinander abweicht, vollkommen ausreichend sind. Bei den Resultaten hat sich herausgestellt, daß es sowohl Perlen gleicher Grundzusammensetzung gibt, wie auch solche Perlen, bei denen je nach Farbe offensichtlich verschiedene Schmelzmassen verwendet wurden. Eine Auswahl der Ergebnisse ist in den Tabellen 1–2 dargestellt.

Tabelle 1: Lediglich die blaugefärbten Glasperlen-Teile unterscheiden sich durch ihren Kobaltgehalt von allen anderen Teilen. Die sonstigen Unterschiede sind auf die verschieden starke Korrosion der Glasbestandteile im Boden zurückzuführen (vielleicht mit Ausnahme der Glasperle aus der Türkei, deren Sn-Gehalte etwas differieren).

Tabelle 2: Bei der Perle von Koban ist deutlich zu erkennen, daß die Teile c und f die gleiche Zusammensetzung aufweisen, die Teile b und d sich nur durch den Kobaltgehalt des hellblauen Teils unterscheiden, während sich die Teile a und e eindeutig abheben. Sonst sind die deutlichen Differenzierungen in hier wünschenswerter Klarheit ersichtlich.

Bei 75 mehrfarbigen Glasperlen, deren mindestens zwei verschiedenfarbige Anteile untersucht wurden, haben wir eine Ähnlichkeitsberechnung durchgeführt²⁰⁾ (wobei wir

nigen Monaten wieder verschwunden sind.
(Bei den untersuchten Gläsern von Novo Mesto traten keine solchen Verfärbungen auf).

Bei Edelsteinen können solche Verfärbungen allerdings irreversibel sein.

²⁰⁾ Die Ähnlichkeit der Glasanteile zueinander

Nr.	Fundort	Zeitstellung etwa	Farbe	Sb	Pb	Sn	Co
1741 a	Este, Capodoglio	5. Jh. v. Chr.	blau, klar	7	1	0	1
1741 b			„dunkel“, translucid	7	1	0	1
1741 c			weiß, opak	8	2	0	0
2925 a	Türkei	5. Jh. v. Chr.	hellblau, opak	8	3	2	0
2925 b			dunkelblau, klar	6	3	0	1
2925 c			weiß, opak	8	3	1	0
2957 a	Karthago	4.-3. Jh. v. Chr.	blau, durchsichtig	7	2	4	1
2957 b			meergrün, durchsichtig	6	2	4	0
1033 a	Vače, Slowenien	5. Jh. v. Chr.	braun, durchsichtig	3	0	0	0
1033 b			weiß, opak	4	0	0	0
1033 c			blau, translucid	4	0	0	1
2332 a	Dali, Zypern	5. Jh. v. Chr.	grünblau, opak	4	1	0	0
2332 b			weiß, opak	5	1	0	0
2383 a	Sardinien	5. Jh. v. Chr.	blau, klar	5	5	0	1
2383 b			gelb, opak	5	6	0	0

Tabelle 1 Mehrfarbige Glasperlen gleicher Grundzusammensetzung.

wurde dadurch berechnet, daß man die Differenzen der Kennzahlen der Glasanteile für ein Element (und dann für die zwei anderen Elemente) summierte und diesen Wert durch die Anzahl der Freiheitsgrade dividierte.

Beispiel für ein Glas mit 2 Glasanteilen: (Pitigliano Nr. 2889) Kennzahlen 4 3 1 und 1 0 0;

Differenzen:

Sb: $4-1=3$ Pb: $3-0=3$ Sn: $1-0=1$

Summe der Differenzen: 7, dividiert durch 3 Freiheitsgrade ergibt ein Ähnlichkeitsmaß von 2,33.

Beispiel für ein Glas mit 3 Glasanteilen: (Este Nr. 1741) Kennzahlen 7 1 0, 7 1 0 und 8 2 0:

Differenzen:

Sb: $7-7=0$ $8-7=1$ $8-7=1$

Summe_{Sb} = 2

Pb: $1-1=0$ $2-1=1$ $2-1=1$

Summe_{Pb} = 2

Sn: $0-0=0$ $0-0=0$ $0-0=0$

Summe_{Sn} = 0

Summe der Differenzen: 4, dividiert durch 9 Freiheitsgrade, ergibt ein Ähnlichkeitsmaß von 0,44.

Nr.	Fundort	Ungefähre Zeitstellung	Farbe	Sb	Pb	Sn	Co
2889 a	Pitigliano	7.-6. Jh. v. Chr.	grün, durchsichtig	4	3	1	0
2889 b			dunkelgrün, opak	1	0	0	0
1855 a	Castellvetro	5. Jh. v. Chr.	braun, klar	2	0	0	0
1855 b			gelb, opak	4	6	0	0
2633 a	Krickelsdorf, Bayern	4.-3. Jh. v. Chr.	grau, opak	4	5	0	0
2633 b			weiß, opak	5	1	0	0
2633 c			gelb, opak	4	6	0	0
2633 d			blau, klar	5	3	2	3
1823 a	Bologna, Benacci	8. Jh. v. Chr.	dunkelblau, klar	0	0	0	1
1823 b			gelb, opak	2	5	0	0
2640 a	Koban, UdSSR	4.-3. Jh. v. Chr.	braun, opak	0	0	0	0
2640 b			hellblau, klar	8	0	0	3
2640 c			hellgrau, translucid	6	0	0	0
2640 d			grünlichweiß, opak	8	0	0	0
2640 e			dunkelblau, klar	7	0	1	1
2640 f			dunkelblau, opak	6	0	0	0
1030 a	Vače, Jugoslawien	5. Jh. v. Chr.	blau, klar	5	5	0	0
1030 b			grünblau, translucid	4	4	4	0
1030 c			weiß, opak	7	6	0	0

Tabelle 2 Mehrfarbige Glasperlen, deren Zusammensetzungen sich je nach Farbe deutlich unterscheiden.

den Kobaltwert, der meist nur eine Unterscheidung der blauen Gläser ermöglicht, hierzu nicht berücksichtigt haben): 29 der Glasperlen haben eine annähernd gleiche Zusammensetzung der farbig verschiedenen Teile (Ähnlichkeitsmaß bis 0,5), 20 Gläser haben nur geringfügige Abweichungen in der Glasschmelze (Ähnlichkeitsmaß 0,51-1), 17 Gläser weichen schon deutlicher voneinander ab, wobei meist nur ein Anteil anders zusammengesetzt ist (Ähnlichkeitsmaß 1,01-1,5), und neun Gläser sind je nach Farbe in ihren Anteilen eindeutig voneinander abgehoben. Eine zeitliche oder geographische Unterteilung ist jedoch daraus nicht abzuleiten.

Aus den Ergebnissen ist zu schließen, daß die Mehrzahl der Perlenhersteller die Perlen jeweils aus einer Glasschmelze herstellten, wobei sie zur Erzielung der verschiedenen Farben und Abstufungen der Durchsichtigkeit mit Zuschlägen nachschmolzen. Es gab auch Hersteller, die dann einen bestimmten Glasanteil mit einer anderen Schmelze ausführten, und nur wenige Handwerker verwendeten für jede Farbe jeweils andere Schmelzen. Sonst kann aus den in den Tabellen 1–2 vorgelegten wie auch aus allen anderen hier nicht einzeln beschriebenen Analysen (also aus insgesamt 318 Analysen) geschlossen werden, daß etwa in der Zeit des 7. Jahrhunderts v. Chr. beginnend, in gleicher, neuer Weise Gläser produziert wurden, die jeweils relativ hohe Antimon- und Bleigehalte aufweisen.

Um der eingangs skizzierten Frage nachzugehen, inwieweit der Hersteller einer Perlenkette nach einem Rezept gearbeitet hat, und ob er Perlen mehrerer Hersteller für seine Kette verwendete, wurde eine Glasperlenkette aus Novo Mesto, Slowenien (Hügel 4, Grab 3), die aus 68 Perlen bestand, analysiert (Tabellen 3 und 4²¹). Zunächst wurden die Antimon- und Bleigehalte für die in der Perlenkette 24 mal auftauchenden gelbopaken Glasteile bestimmt; die Zinngehalte waren jeweils von der gleichen Größenordnung und werden daher nicht angeführt (s. Tabelle 3).

Bei der Beurteilung der Ergebnisse fällt zunächst auf, daß alle Perlen einen relativ hohen Blei- und Antimongehalt aufweisen. Betrachtet man darüberhinaus in Abb. 2 die Einzelwerte, so ist deutlich festzustellen, daß die Gläser Nr. 37–43 (Gruppe 1) sowohl beim Bleigehalt als auch beim Antimongehalt deutlich höher als alle anderen gelbopaken Gläser liegen. Beachtenswert erscheint, daß alle diese Gläser Eisen- oder Bronzeösen haben und keine Schichtaugenperlen sind. Das Glas Nr. 47, eine gelbopake einfache Ringperle ohne Schichtaugen, weist bei geringem Antimongehalt einen relativ hohen Bleigehalt auf. Schließlich sind bei den Gläsern Nr. 48–66 (Gruppe 2), sämtliche mit einer niedrigeren Sb- und Pb-Konzentration, alle Schichtaugenperlen zu verzeichnen.

Man könnte wohl daraus schließen, daß die Hersteller von Ösenperlen einen höheren Blei- und Antimongehalt als besonders wesentlich ansahen, wenn sie den gelbopaken Glasfluß herstellten, während die Produzenten der Schichtaugenperlen beim gleichen Farbton zwar ebenfalls Blei- und Antimonoxide zugaben, jedoch mit geringeren Mengen an diesen Zusatzstoffen auskamen. Es ist daher anzunehmen, daß die Hersteller von Ösenperlen und Schichtaugenperlen verschiedene waren, obwohl der gelbopake Farbton nach dem äußeren Anschein genau der gleiche ist. Man muß daraus schließen, daß es hier einen Hersteller für Ösenperlen und einen anderen für Schichtaugenperlen gab, wobei beide ihr Rezept für gelbopakes Glas hatten. Diese Hypothese läßt sich leicht überprüfen, wenn man die 16 Ösenperlen untersucht, deren Körper jeweils weißopak ist, deren

²¹) T. Knez, *Ein spätballstattzeitliches Fürstengrab von Novo Mesto in Slowenien*. *Germania* 56, 1978,

125–149 (Glasperlenkette Nr. 32, Abb. 12,2).

Perlen-Nr.	I_{Sb} (Imp/min)	Kenn-zahl Sb	I_{Pb} (Imp/min)	Kenn-zahl Pb	$\frac{I_{Pb}}{I_{Sb}}$	Perlenbeschreibung			
						Größe	Noppen	Schicht- auge	Öse
37	26381	4	32828	6	1,24	groß	weiß- opak	—	Eisen
38	27658	4	35211	6	1,27	groß	weiß- opak	—	Eisen
39	15231	3	20985	6	1,38	groß	weiß- opak	—	Eisen
40	46060	5	50478	6	1,10	klein	hellblau- opak	—	Bronze
41	35825	4	27132	6	0,76	klein	gelb- opak	—	Bronze
42	20259	4	32428	6	1,60	klein	gelb- opak	—	Bronze
43	56045	5	54809	6	0,98	klein	—	—	Eisen
47	4718	1	13294	5	2,82	klein	—	—	—
48	12134	3	10644	5	0,88	klein	—	+	—
51	10637	3	8952	4	0,84	klein	—	—	Eisen
52	11884	3	9295	4	0,78	klein	—	+	Eisen
54	11090	3	7504	4	0,68	groß	+ (auch gelb-opak)	+	—
55	11697	3	6004	4	0,51	groß	+ (auch gelb-opak)	—	—
56	12796	3	6904	4	0,54	groß	+ (auch gelb-opak)	+	—
57	5239	2	5255	4	1,00	groß	+ (auch gelb-opak)	+	—
58	17084	3	4701	3	0,28	groß	+	+	—
59	16833	3	5322	4	0,32	groß	+	+	—
60	7295	2	1317	2	0,18	groß	+	+	—
61	13096	3	7659	4	0,58	groß	+	+	—
62	13046	3	4395	3	0,34	groß	+	+	—
63	7546	2	6886	4	0,91	groß	+	+	—
64	10419	3	10449	5	1,00	groß	+	+	—
65	15851	3	7657	4	0,48	groß	+	+	—
66	14778	3	4830	3	0,33	groß	+	+	—

Tabelle 3 Antimon- und Bleigehalte von 24 gelbopaken Gläsern einer Glasperlen-Kette von Novo Mesto, Slowenien.

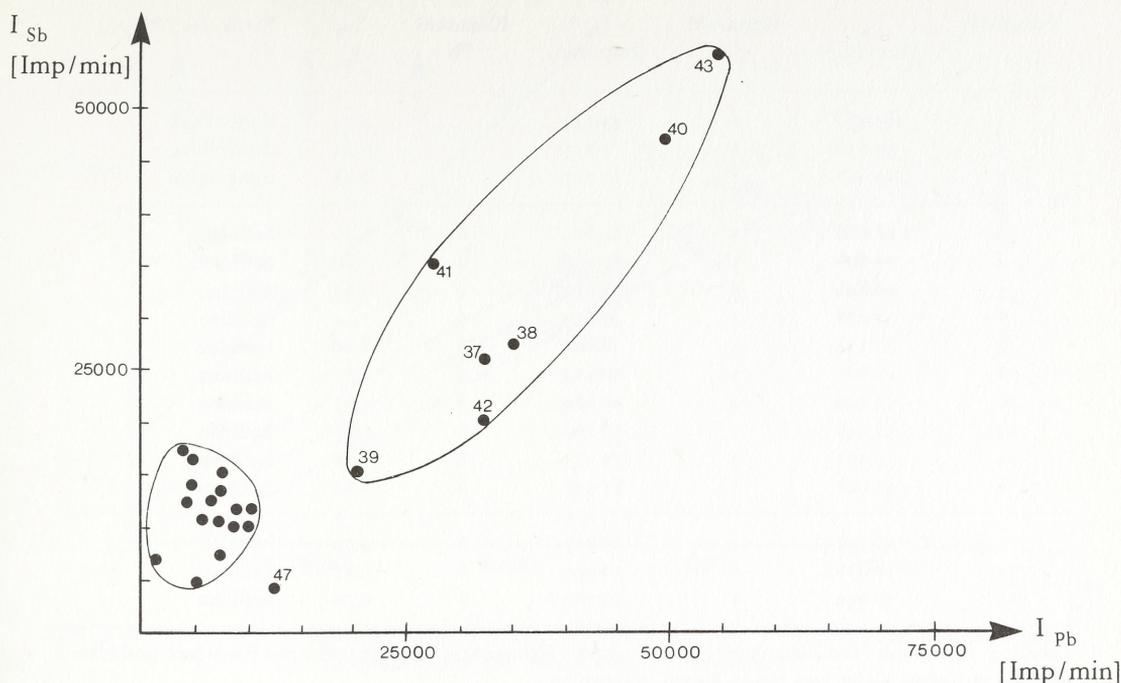


Abb. 2 Konzentrationen (Intensitäten) des Bleis und Antimons von 24 gelbopaken Gläsern einer Glasperlenkette von Novo Mesto, Slowenien.

Noppen jeweils blau sind, und die alle eine Eisenöse aufweisen. Wenn der Ösenperlen-Hersteller ein Grundrezept für das weißopake (oder das blaue) Glas gehabt hat, so müßten die Blei- bzw. Antimongehalte bzw. deren Verhältnisse zueinander annähernd gleich sein (wenn es nur einen Ösenperlenhersteller für diese Perlen gab!). Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

Bei der Beurteilung der Ergebnisse fällt zunächst auf, daß der Hersteller der Noppenperlen mit dunkelblauen Noppen (Perlen Nr. 1, 3 und 9) sehr viel mehr Antimonoxid und sehr viel weniger Bleioxid zur Glasschmelze verwendete, als dies der (oder die) Hersteller jener Glasperlen mit hellblauen Noppen tat(en).

Betrachtet man die Ergebnisse nur für die Noppen-Ösen-Perlen mit hellblauen Noppen, so ist die Einheitlichkeit des Verhältnisses der Bleiintensitäten zu jenen der Antimonintensitäten bei 10 Glasperlen frappierend. Die Intensitätsverhältnisse bewegen sich in dem engen Spielraum von 1,54 bis 2,09! Es ist weitgehend sicher anzunehmen, daß diese 10 Glasperlen aus einer Glasschmelze stammen. Auch die 3 Glasperlen Nr. 11, 13 und 15 sind untereinander mit Intensitätsverhältnissen von 0,73, 0,85 und 0,90 so ähnlich, daß

Perlen-Nr.	I_{Sb} (Imp/min)	Kennzahl Sb	I_{Pb} (Imp/min)	Kennzahl Pb	$\frac{I_{Pb}}{I_{Sb}}$	Farbe der Noppen
1	293 487	8	43 141	5	0,15	dunkelblau
3	93 816	6	1 755	3	0,02	dunkelblau
9	120 657	8	21 747	5	0,18	dunkelblau
2	48 010	5	81 603	6	1,70	hellblau
4	51 606	5	87 106	6	1,69	hellblau
5	66 820	5	108 610	6	1,63	hellblau
6	37 478	5	57 854	6	1,54	hellblau
7	37 374	5	78 101	6	2,09	hellblau
8	46 827	5	80 254	6	1,71	hellblau
10	32 249	4	58 880	6	1,83	hellblau
12	35 248	5	56 160	6	1,59	hellblau
14	39 502	5	75 173	6	1,90	hellblau
16	50 921	5	83 543	6	1,64	hellblau
11	26 729	4	19 453	6	0,73	hellblau
13	58 676	5	50 005	6	0,85	hellblau
15	37 699	5	34 002	6	0,90	hellblau

Tabelle 4 Antimon- und Bleigehalte der weißopaken Körper von Noppenperlen mit Eisenösen und blauen Noppen aus einer Kette von Novo Mesto, Slowenien.

hier offensichtlich eine zweite einheitliche Glasschmelze vorliegt (Abb. 3). Aus der Abb. 3 könnte man unter Umständen für die Gläser Nr. 11, 13 und 15 auch ablesen, daß zu einer vorhandenen Glasschmelze, deren Sb-Gehalt etwa 14 000 Imp/min entspricht, ein Blei-Antimon-Zusatz gegeben wurde, um den opakweißen Farbton zu erzielen. Man muß also davon ausgehen, daß die Noppen-Ösen-Perlen aus zwei verschiedenen Glasschmelzen stammen, die in sich sehr einheitlich sind. Es könnte natürlich nun angenommen werden, daß zwei Hersteller solche hellblau genoppten Ösen-Perlen geliefert haben. In gleicher Weise ist jedoch auch die Annahme berechtigt, daß der eine Hersteller zwei Glasschmelzen produzierte, wobei der Blei- bzw. Antimon Gehalt der in gleicher Menge zugesetzten Oxid-Mineralien variierte.

Die ursprüngliche Hypothese, wonach genoppte Ösenperlen und Schichtaugenperlen von zwei verschiedenen Herstellern nach einem jeweils einheitlichen Rezept für einen Glasfarbton produziert wurden, ist zwar durch die Ergebnisse der Untersuchung der weißopaken Grundkörper der genoppten Ösenperlen nicht sicher bewiesen. Eine große Wahrscheinlichkeit für diese Erklärung ist jedoch vorhanden, besonders wenn man bedenkt, daß die Zusammensetzung des weißopaken Glases deutlich differiert, je nachdem ob dieses hellblaue oder dunkelblaue Noppen trägt.

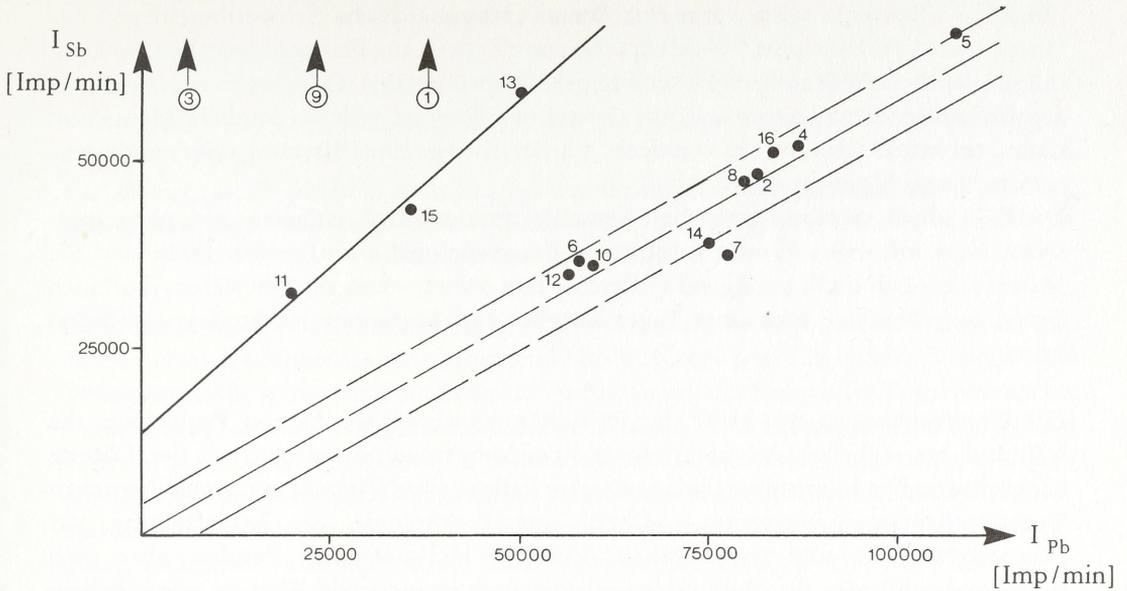


Abb. 3 Konzentrationen (Intensitäten) des Bleis und Antimons von 16 weißopaken Gläsern einer Glasperlenkette von Novo Mesto, Slowenien.

Eine weitere Bestätigung für das Vorliegen einheitlicher Rezepte bei dem Hersteller eines Perlentyps läßt sich aus der Untersuchung der *blauen* Noppen ableiten: die Verhältnisse der Intensitäten von Blei und Antimon zueinander haben für die drei dunkelblau genoppten Perlen Nr. 1, 3 und 9 die Werte 0,08; 0,04 und 0,09, während sie für die hellblauen Noppen (mit Ausnahme der Perle Nr. 11) einen Wert von $0,91 \pm 0,09$ haben. Durch die Röntgenfluoreszenzanalyse in kleinsten Bereichen (mit Masken aus Aluminium) läßt sich so mit einer großen Wahrscheinlichkeit nachweisen, daß die Lieferanten der Perlen einer Kette im hallstattzeitlichen Slowenien

1. nach relativ festgefügter Rezeptur gearbeitet haben,
2. je nach Typ der Perle verschiedene waren, und
3. bei gleichem Farbton der Gläser die Rezepte durchaus differieren konnten.

Herkunft der Materialien

Die Materialbestimmung archäologischer Funde und die Erforschung alter Herstellungstechniken kann in seltenen Fällen auch zur Feststellung ihrer Herkunft führen; dies muß jedoch nicht der Fall sein!

„Positive“ Beispiele seien vermerkt: Wenn „langobardische Schwertbeschlüge“ aus Italien oder „hellenistische“ Goldköpfchen aus Zypern aus Feingold bestehen, so kann mit großer Sicherheit auf eine Fälschung geschlossen werden. Oder wenn eine Fibel, die aus der Latène-Zeit stammen soll, mit einem Lot gelötet ist, welches deutliche Mengen an Cadmium enthält (das erst 1817 entdeckt wurde), so liegt eine Fälschung oder mindestens eine moderne Montage nahe.

Die RFA allein kann mit Sicherheit keine Bestimmung der zeitlichen oder geographischen Herkunft eines Fundes liefern, wie das manchmal erhofft wird. Dazu sind die Materialien noch nicht genügend erforscht; und selbst, wenn sie dies wären, muß man davon ausgehen, daß man eines Tages lediglich eine bestimmte Herkunft ausschließen kann.

Die Untersuchungen mit Hilfe der RFA können eine Vielzahl von Problemen, die während der täglichen Arbeit in einem Forschungsmuseum auftauchen, der Lösung nahebringen. Die Ergebnisse sind in unserem Falle in einer Vielzahl von archäologischen Veröffentlichungen versteckt — Details zur Technologie, zur Restaurierung, zur Handelsgeschichte und zur Echtheit oder zur Herkunft von Funden, aber auch manchmal Analysen, die ohne jeden archäologisch-historischen Wert zu sein scheinen und von denen wir lediglich hoffen, daß sie eines Tages in einem größeren Zusammenhang einen solchen erlangen.

Eine Kombination des archäologischen Grabungsbefundes und der archäologischen Einordnung der Funde, eine intensive Zusammenarbeit des Restaurators, des Archäologen und des Naturwissenschaftlers wird auf die gezielte RFA des Fundes nicht verzichten können, um auch die technologische Erforschung der Funde der Vor- und Frühgeschichte zu fördern.

Wenn im Verlauf dieser Arbeit die Publikationen des Jubilars häufig zitiert werden, so mag dies ein Beweis dafür sein, wie sehr er die naturwissenschaftlich-technische Forschung in der Archäologie beeinflusst hat. Gleichzeitig ist dies auch ein Zeichen dafür, wie sehr er mich in den Jahren der gemeinsamen Arbeit gefördert und beeinflusst hat, wofür ich ihm auch auf diesem Wege herzlich danke.