

Im Schein der Elektronen – ein unkonventionelles Abbildungsverfahren am Beispiel keltischer Münzen

Ein Zwischenbericht

Michael Koch, Marcus Koch

Zusammenfassung

Dieser Artikel nimmt Bezug auf unsere Posterpräsentation während der Archäologentage 2018. Darin stellten wir unsere seit 2017 durchgeführten Studien zur Methode der Bildanalyse und Dokumentation von keltischen Münzen vor. Durch die unübliche Verwendung eines modifizierten Rasterelektronenmikroskops als „gewöhnliche“ Bild-Kamera gelingen Aufnahmen von neuer Qualität mit hohem Informationsgehalt. Sie zeigt Dinge, die man üblicherweise nicht oder kaum wahrnehmen kann, z.B. Werkzeugspuren, Stempelcharakteristika, Kratzer und Merkmale von Abnutzung, Transport, Verwendung oder Beschädigung und Ähnlichem. Diese mikroskopischen Spuren sind in der keltischen Numismatik (s. unten) größtenteils vernachlässigt und es existieren hierzu weder eine systematische Studie noch routinemäßig erfasste Bilder in den staatlichen Sammlungen. Aus unserer Sicht stellt dies eine beträchtliche Informationslücke, aber auch ein weitgehend unerforschtes Untersuchungsgebiet dar. Wir hoffen, mit der Präsentation unserer Methode das Interesse im Kollegenkreis zu wecken.

À la lueur des électrons – un processus d’imagerie non conventionnel utilisant l’exemple des pièces celtiques. Un rapport préliminaire.

Cet article fait référence à la présentation de notre poster lors des Journées archéologiques 2018, au cours desquelles nous avons présenté nos études sur la méthode d’analyse d’images et de documentation des pièces celtiques réalisées depuis 2017. L’utilisation inhabituelle d’un microscope électronique à balayage modifié comme caméra « ordinaire » permet d’obtenir des images d’une nouvelle qualité avec un contenu d’information élevé. Elle montre des éléments qui ne sont généralement pas ou à peine perceptibles, par exemple des marques d’outils, des caractéristiques des matrices de frappe, des rayures et des signes d’usure, de transport, d’utilisation ou de dommages et autres. Ces traces microscopiques sont largement négligées dans la numismatique celtique et il n’y a ni étude systématique de celles-ci ni des images prises systématiquement dans les collections de l’État. De notre point de vue, cela représente une lacune considérable en matière d’information, mais aussi un domaine d’étude largement inexploré. Nous espérons susciter l’intérêt de nos collègues avec la présentation de notre méthode.

In the glow of the electrons – an unconventional imaging process using the example of Celtic coins. A preliminary report.

This article refers to our poster presentation during the 2018 Archaeology Days, when we presented our studies on the method of image analysis and documentation of Celtic coins carried out since 2017. The unusual use of a modified scanning electron microscope as an “ordinary” camera allows to obtain images of a new quality with a high information content. It shows elements that are usually not or hardly noticeable, e.g. tool marks, stamp characteristics, scratches and signs of wear, transport, use or damage and the like. These microscopic traces are largely neglected in Celtic numismatics and there is neither a systematic study of them nor a routine image acquisition in the state collections. From our point of view, this represents a considerable information gap, but also a largely unexplored area of study. We hope to arouse interest among colleagues with the presentation of our method.

Projektgenese und Problembeschreibung

Die von den Autoren betriebene Studie nahm ihren Anfang in der Gemeinde Nonnweiler in Kooperation mit dem INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien Saarbrücken. Bisherige Arbeiten wurden in Zusammenarbeit mit dem Landesdenkmalamt des Saarlandes, der Staatlichen Altertümersammlung des Saarlandes, dem Rheinischen Landesmuseum in Trier sowie dem Hunsrück-Museum in Simmern durchgeführt.

Diese Methodik-Studie wurde als interdisziplinäre und länderübergreifende Forschungsarbeit angelegt und von Michael Koch 2017 im Rahmen des Bildungsprojektes „Archäologie in der Großregion“ an der Europäischen Akademie Otzenhausen initiiert. Sie wurde ermöglicht durch das Leitprojekt II der KulturLandschaftsinitiative St. Wendeler Land (KuLanL) im Landkreis Sankt Wendel: „Belebung Keltenpark und Nationalpark Otzenhausen“ (2016-2020). In diesem Leitprojekt ist sie Bestandteil des zweiten Teilprojektes, bei dem es ursächlich um die Visualisierung der Beigaben aus den keltischen Fürstengräbern von Schwarzenbach geht.

Um dies zu bewerkstelligen, wurden bzw. werden verschiedene Methoden auf ihre Anwendungsfähigkeit erprobt und Möglichkeiten der Umsetzung eruiert. Zunächst wurde das Abbildungsverfahren für archäologische Kleinfunde hinterfragt. Denn eine zuvor erfolgte altertumswissenschaftliche Studie zum gesamten publizierten Fundmaterial durch den Erstverfasser ergab, dass die Qualität der Abbildungen sehr stark schwankt. Dies erschwert in beträchtlichem Maß die wissenschaftliche Aufarbeitung unter kunsthistorischen Fragestellungen. So können durch qualitativ „minderwertige“ Fotos, z.T. falsche Umzeichnungen sowie als Folge falsche Aussagen zur Kunstgeschichte entstehen.

Dies liegt nicht primär an der Druckqualität von Fotos in gedruckten Publikationen, sondern ursächlich an der Methode der Lichtfotografie. Auf nicht-glänzenden Oberflächen kann die Licht-Fotografie sehr gute Ergebnisse liefern. Bei glänzenden Oberflächen, wie z.B. Goldobjekten, ist es für den Fotografen eine Herausforderung, eine möglichst gleichmäßig ausgeleuchtete Abbildung zu erzielen. Bei Goldobjekten, die keine Verzierung tragen, ist dies nicht so schwerwiegend. Hingegen bei komplex und kurvilinear gestaltetem Dekor ist es sehr schwer bis unmöglich, eine exakte Fotografie anzufertigen. Vor allem dann, wenn der Dekor plastisch angelegt ist. Also sind Fotos insbesondere von den Preziosen der keltischen Kunst, wie der „Goldschale“ von Schwarzenbach, aber auch von anderen Funden, nur sehr schwer herzustellen. Oft müssen mehrere Bilder mit nur leicht veränderter Beleuchtung gemacht werden, damit man die Objekte visuell „verstehen“ kann.

Die Schwierigkeit setzt sich bei fortschreitender Vergrößerung fort, da die zu beobachtenden Details häufig durch Reflexionen überblendet werden oder kaum bis gar nicht mehr erkennbar sind. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn man auf der Suche nach Werkzeugspuren des antiken Goldschmiedes und Indizien für den Herstellungsprozess ist.

Das hat zur Folge, dass Aussagen zur Chronologie anhand von Werkzeugmarken und ihrer relativen Abhängigkeit auf goldenen Objekten sehr erschwert oder gar unmöglich zu beurteilen sind. Gerade die Fragestellung der möglichen Verkettung von keltischem Goldschmuck bzw. Kleinfunden ist hinsichtlich von „Meisterschulen“ und „Werkstattkreisen“ von historisch-archäologischer Bedeutung.

Im Gegensatz zu vielen Kunstobjekten aus dem Bereich der klassischen Archäologie sind die Werke der keltischen Kunst nicht fest datiert. Denn in der Regel

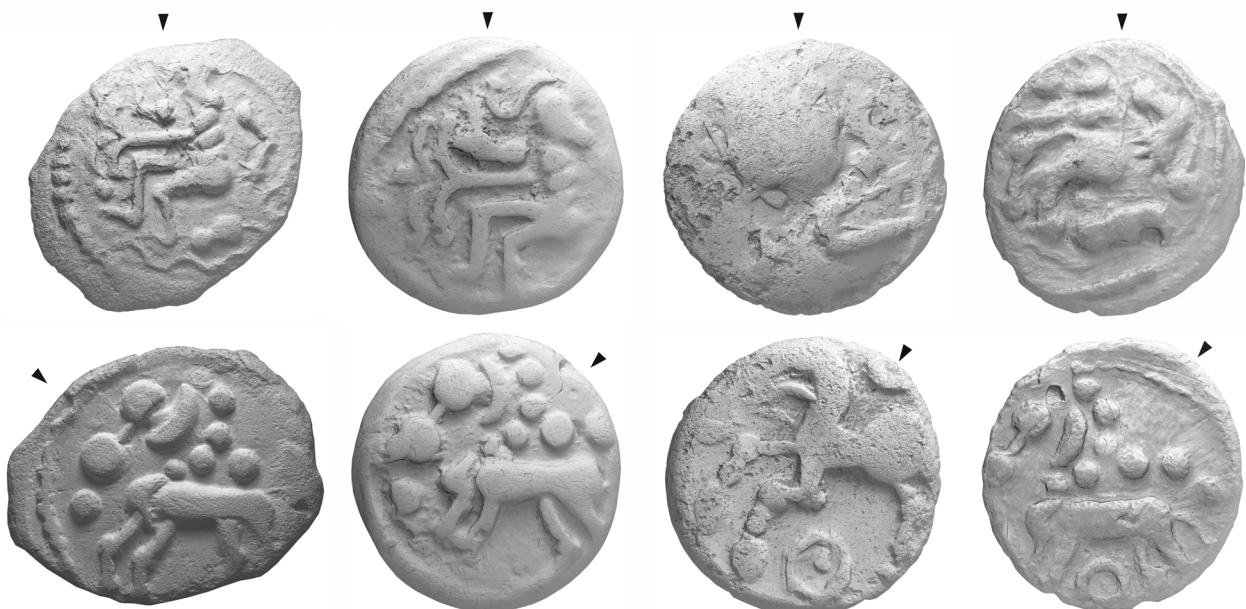


Abb. 1: Verschiedene Silbermünzen im REM. Otzenhausen, Quinare. Von I.n.r Scheers 55 Var. ohne Ringel (Kat. 17 und 20), De La Tour 5128? mit Ringel (Kat. 26), Scheers 55 Var. mit Ringel (Kat. 15) (Foto: Marcus Koch).

wurden sie ohne die gut zu datierende Begleitkeramik in die Fürstengräber beigegeben, und so muss eine Datierung anhand von Einschätzungen zum Kunststil und einem vermuteten Entwicklungstempo vorgenommen werden. Diese Problematik betrifft nicht nur die frühkeltischen Prunkgräber (ca. 550-250 v. Chr.), sondern auch eine andere, nur schwer zu greifende Fundgattung: die Münzen. Die keltische Numismatik (ca. 280-40 v. Chr.) birgt das Potential von großer historischer Relevanz in sich. Beide Fundgattungen leiden unter demselben Problem: Die Qualität des Bildmaterials ist eingeschränkt.

Durch die oben beschriebenen Fragestellungen wurde unsere Studie ausgelöst und in knapp 100 Laborstunden zu einer Untersuchungsmethode entwickelt. Diese Methode setzt sich aus einer Reihe von verschiedenen Mess- und Abbildungsverfahren zusammen und versteht sich als Beitrag zur (digitalen) Objektdokumentation. Sie bietet ein großes Potenzial zur Verwendung in weiteren Projekten und anderen Anwendungen.

Der Weg ist das Ziel: die Methode

Die Methode orientiert sich an der systematischen, naturwissenschaftlichen Dokumentation von antiken Kleinobjekten mit einer Größe von bis zu 10 Zentimetern. Im visuellen Bereich werden hierzu ein Rasterelektronenmikroskop (REM) mit Röntgenspektroskop (EDX), ein computergestütztes Stereo-Mikroskop sowie ein Reflexionsspektroskop (Kolorimetrie zur objektiven Farbbestimmung) eingesetzt. Mittels einer Feinwaage und der Volumenbestimmung kann die Dichte der Objekte bestimmt werden.

Ziel ist es, einen detaillierten digitalen Katalog und eine systematische Übersicht der aufgenommenen Objekte zu erstellen, um so eine wissenschaftliche Auswertung zu ermöglichen. Im Fokus steht die Erfassung von Eigenheiten und Charakteristika, z.B. die Ermittlung von individuellen Marken im Münzstempel.

Ein wichtiges Kriterium war für uns, dass die gemessenen Objekte nicht eigens präpariert werden sollten. Oberstes Gebot ist die nicht-invasive Vorgehensweise. Bei unseren Überlegungen stießen wir auf Objekte in unterschiedlichem Zustand. Die Objekte bzw. Münzen können aus staatlichen Museumsbeständen, Archiven oder privaten Sammlungen stammen.

Insbesondere die Numismatik ist ein interessantes Betätigungsfeld, da sich Münzen wegen ihrer geringen Größe sehr gut für derartige Untersuchungen eignen und zugleich ihre serien- und massenhafte Herstellung vielfältige Vergleichsmöglichkeiten bietet. Die Lesbarkeit von nur schlecht erhaltenen Fundmünzen wird deutlich verbessert (Abb. 1).

Rasterelektronen-Fotografie

Im Fokus unserer bisherigen Arbeiten stand die deutliche Verbesserung der Abbildungsqualität gegenüber der üblichen Lichtfotografie, insbesondere auf metallischen Objekten. Die REM-Fotografie hat den Vorzug,

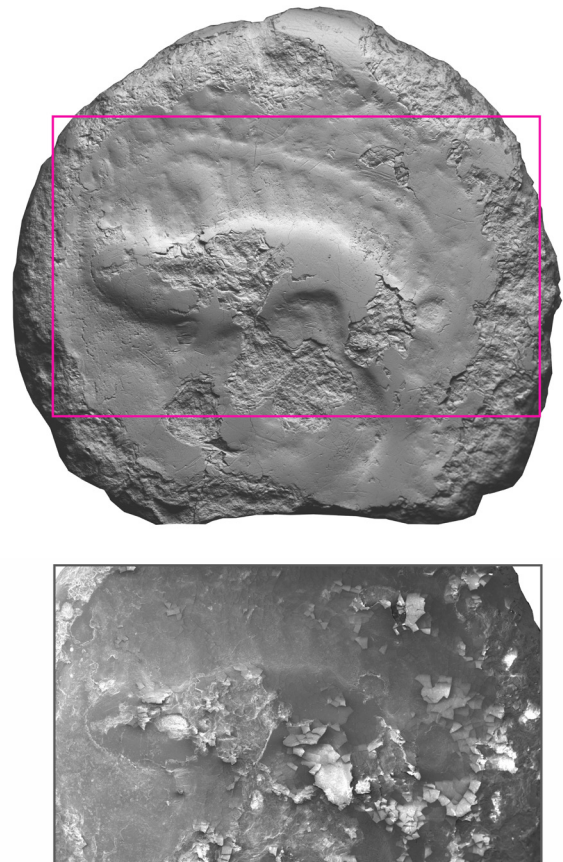


Abb. 2: Uhler, Potin-Münze. Oben: Darstellung im Rückstreuungselektronenkontrast. Unten: Im Ausschnitt eine Aufnahme im Sekundärelektronenkontrast. Die hellen Stellen weisen auf die drohende Abplatzung hin, da hier die Korrosion unter die Patina vorgedrungen ist (Foto: Marcus Koch).

‘reflexionsfrei’ zu arbeiten und so dem menschlichen Auge Details zu zeigen, die man in einem Lichtmikroskop bei gleicher Vergrößerung sowohl aufgrund der Reflexion als auch der Tiefenunschärfe nicht wahrnehmen kann. Somit können Details dargestellt werden, die bislang kaum oder gar nicht sichtbar waren.

Ferner beinhaltet die REM-Fotografie das Potenzial, die Objekte unter einem anderen naturwissenschaftlichen Aspekt zu sichten, und zwar hinsichtlich ihrer Materialzusammensetzung. Dies geschieht mit einem zusätzlichen Instrument, das eine energiedispersive Röntgenspektroskopie ermöglicht (EDX). Damit ist es u.a. möglich, ein Objekt zerstörungsfrei auf seine Gehaltsanteile von Gold, Silber, Kupfer usw. zu untersuchen. Freilich bilden solche Materialanalysen lediglich die meist oxidierte Oberfläche ab und können nur Informationen bis in eine Tiefe von wenigen tausendstel Millimetern liefern. Diese methodische Schwäche ist jedoch nur scheinbar. Wenn man sich z.B. für den Erhaltungszustand oder die Oberflächenqualität interessiert, sind diese Analysen nahe der Oberfläche wertvoll. So kann u.a. sichtbar gemacht werden, ob die Oberfläche der Münze abzuplatzen droht (Abb. 2).

Entscheidend sind dabei Beobachtungen, die Aussagen zum Oxidationsvorgang und der Reduzierung der anti-



Abb. 3: Mittelstrimmig, Augenstater Typ Scheers 30-5 „POTINA“, Rückseite, Mitte 1. Jahrhundert v. Chr. Beispiele unterschiedlicher Bildgebungsverfahren bei 10 kV Beschleunigungsspannung aufgenommen im Hochvakuum-Modus – 1.) Sekundärelektronenkontrast (SE) mit Everhart-Thornley-Detektor (ETD) und +300 V Absaugspannung – 2.) Rückstreuелеktronenkontrast (BSE) mit Solid-State-Detektor (SSD) – 3.) Rückstreuелеktronenkontrast (BSE) mit Everhart-Thornley-Detektor (ETD) und -150 V Absaugspannung – 4.) Gemischt 30% invers SE mit 70% BSE (Foto: Marcus Koch).

ken Oberflächenqualität treffen können. Ferner ergeben sich daraus Fragestellungen, die sich z.B. mit der grundsätzlichen Beschaffenheit des Objektes und seiner makroskopischen Zusammensetzung befassen.

Die Rasterelektronen-Fotografie bietet mehrere Möglichkeiten der Bildgebung an. Wir verwenden einen Everhart-Thornley-Detektor (ETD) zur Erfassung des Sekundärelektronenkontrastes und einen Solid-State-Detektor (SSD) zur Erfassung des Rückstreuелеktronenkontrastes. Je nach verwendeter Absaugspannung, Position des Polschuhs, des Detektors und der Ausrichtung des Objekts werden unterschiedliche Kontraste und Oberflächeninformationen sichtbar. Die Stärke, Abtastdichte und Dauer des Elektronenstrahls regulieren die Eindringtiefe und beeinflussen somit die Informationen zur Beschaffenheit der Oberfläche. Die korrekte Einstellung dieser und anderer Variablen ist in hohem Maße von der Erfahrung und den wissenschaftlichen Fertigkeiten des Operators abhängig. Die gewonnenen Bilder können miteinander verknüpft werden und so mehrere Ergebnisse kombinieren (Abb. 3).

Instrumentarium

Das verwendete Rasterelektronenmikroskop ist ein FEI Quanta 400, ausgestattet mit einem Schottky-Emitter (FEG) als Elektronenquelle und einem Röntgenspektrometer vom Typ EDAX Genesis V 6.02, das elektronenmikroskopische Untersuchungen bis in den Nanometerbereich sowohl von elektrisch leitfähigen als auch von nichtleitfähigen Proben ohne jegliche Präparation ermöglicht. Das bedeutet, dass es im Gegensatz zur klassischen REM-Untersuchung nicht nötig ist, das zu untersuchende Objekt mit einer leitfähigen Schicht aus Metall oder Kohlenstoff zu bedampfen.

Bei nichtleitfähigen Proben wird der Probenkammer etwas Wasserdampf zugeführt, der bei Aufladung ionisiert wird und sie damit neutralisiert, so dass praktisch alle Proben (auch feuchte, nasse, tiefgefrorene) bis zu einer Größe von 15 cm x 15 cm x 8 cm (Länge x Breite x Höhe) untersucht werden können. Als Signalträger können sowohl Sekundärelektronen, die die Morphologie

der Oberfläche abbilden, als auch Rückstreuелеktronen und Röntgenstrahlung detektiert werden, die ein Abbild der Materialzusammensetzung an der Probenoberfläche ermöglichen. Standardmäßig wird ein solches Gerät für die Oberflächen- und Materialanalyse vieler Untersuchungsgegenstände aus nahezu allen Bereichen von Industrie und Forschung eingesetzt.

Für unsere Anwendung war der Umbau des REM notwendig, denn üblicherweise werden Aufnahmen mit mikroskopischem Sichtfeld gewünscht. Diese waren jedoch nicht das primäre Ziel unserer Studie, da wir bildfüllende Gesamtaufnahmen mit möglichst gleichmäßiger Ausleuchtung erzeugen wollten. Um dies zu bewerkstelligen, muss der Untersuchungsgegenstand möglichst weit weg von der Austrittsöffnung des Elektronenstrahls (sog. „Polschuh“) platziert werden. Dazu wird der Probentisch des REM ausgebaut und der Rückstreuелеktronendetektor seitlich oberhalb der Münze platziert. Um den Weitwinkel zu vergrößern, wurde ein eigener Probentisch in der Werkstatt entworfen und seitlich eingebaut, quasi tiefer gelegt (Abb. 4). In dieser Konfiguration können Sekundär-, Rückstreu- und Gemischtelektronenaufnahmen mit bis zu 11.5 MPixel Größe erzeugt werden.

Mit Hilfe des angebauten Röntgenspektrometers (= EDX) können die rasterelektronenmikroskopisch untersuchten Bereiche sowohl punktförmig als auch flächig bezüglich ihrer Elementzusammensetzung (ab $Z > 5$ = Bor) analysiert werden. Als Ergebnis können z.B. keltische Goldmünzen auf ihren Gehalt an Gold, Silber und Kupfer bestimmt werden. Da diese Analyse nur bis zu einer Tiefe von einigen Mikrometern eindringt, sind die Untersuchungsergebnisse hinsichtlich Oberflächenveränderung, wie z.B. Korrosionsprozessen, sehr empfindlich. Die Messungen können jedoch nur Auskunft über diese dünne oberflächenschicht geben. Hinsichtlich der Zusammensetzung respektive eines so oft angefragten „Goldgehaltes“ eines Artefakts lässt sich mit dieser Methode keine realistische Auskunft geben. Jedoch bezieht sich die Analyse auf die obere ‚Haut‘ der Korrosion und liefert so unverfälschte Informationen über den Oxidations- bzw. chemischen Zustand der Objektoberfläche.

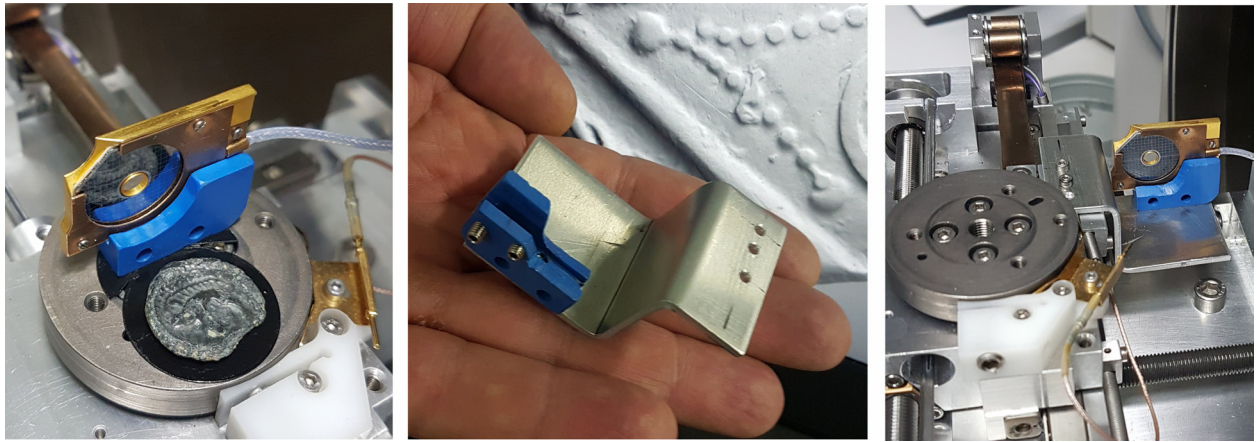


Abb. 4: Detektorkonfiguration und Umbauten am Probenstisch für einen größeren Weitwinkel (Foto: Michael Koch).

Stereo-Mikroskopie

Die Arbeiten mit der REM-Fotografie werden ergänzt durch lichtmikroskopische Makroaufnahmen mit unterschiedlichen Belichtungswinkeln, so dass eine aussagekräftige Abbildungsreihe entsteht. Eine Software zum Fokus-Stacking ermöglicht Schrägaufnahmen von Details mit großer Tiefenschärfe (Abb. 5). Auf diesem Wege lassen sich auch Distanzen messen, z.B. die Höhe eines Münzbildes und somit die Eindringtiefe des Münzstempels. In der Schrägperspektive sind Details des Münzstempels bzw. bestimmte Ausführungstechniken zur Erzeugung des Münzstempels deutlich besser erkennbar als in der Vertikal-Fotografie. Die Fotografie sollte wegen der Abschattung aus mindestens vier verschiedenen Belichtungsrichtungen geschehen.

Heúrēka – die Dichtemessung

Das sog. archimedische Prinzip beschreibt das Verhältnis des statischen Auftriebs eines Körpers im Verhältnis zu seiner Gewichtskraft in einem vom Körper verdrängten Medium. Die Entdeckung geht in der von Vitruv (1. Jh. v. Chr.) beschriebenen Legende auf den griechischen Mathematiker Archimedes von Syrakus in Sizilien (ca. 287-212 v. Chr.) zurück. Ihm zufolge war der Anlass eine Prüfung auf den Goldgehalt einer Weihegabe und die Fragestellung, ob der Handwerker Gold unterschlagen habe. Sizilien und der westliche Mittelmeerraum waren insbesondere im 4. und 3. Jahrhundert v. Chr. Marschgebiete keltischer Söldner (vgl. Beitrag R. Echt in diesem Band). Vermutlich waren in dieser Zeit die Techniken der Goldprüfung z.B. bei Soldzahlungen von hohem Interesse. Die Legende des Archimedes kann daher hierauf anachronistisch Bezug nehmen.

Wie oben dargelegt, eignen EDX-Messungen sich nicht für die Zusammensetzungsanalyse einer Münze, da die Oberflächen inhomogen oxidiert bzw. angereichert sind. In unseren Studien erschien die Dichtemessung als interessanter Ansatz zur zerstörungsfreien, alternativen Materialprüfung. Schließlich standen den Kelten kaum andere Mittel zur Verfügung, und sich ge-

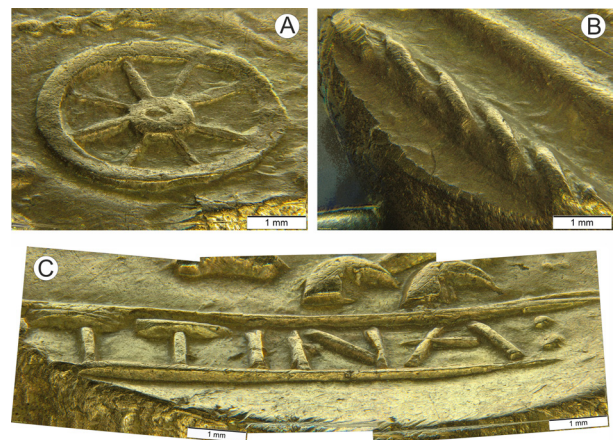


Abb. 5: Mittelstrimmig, Augenstater, 45-Grad-Schrägaufnahmen von Details mit Fokus-Stacking. A = „Auge“; die Felge ist höher als die Speichen, in der hervorstehenden Radnabe ist das Achsloch erkennbar. B = Strickband; die beabsichtigte Torsion wird sichtbar. C = Inschrift [P](o)TTINA; zu sehen ist die Anlage der Buchstaben sowie die Wölbung des Stempels (Foto: Marcus Koch).

danklich in die Lage eines eisenzeitlichen Münzmeisters zu versetzen, ist reizvoll und inspirierend zugleich.

Freilich verlangt die Dichtemessung einer einzelnen Münze einen erheblichen Aufwand hinsichtlich der Messgenauigkeit und Verfahrensweise, die zweifellos dem keltischen Goldschmied nicht zur Verfügung stand. Wir verwendeten destilliertes, entspanntes Wasser, welches zuvor abgekocht und mit Ultraschall entgast wurde. Mit einer Feinwaage maßen wir das Gewicht mit einer Genauigkeit bis in die vierte Nachkommastelle. Nach einigen Testläufen waren wir in der Lage, die Dichte abzüglich einer kleinen Toleranz bis auf die zweite Nachkommastelle genau zu ermitteln. Im Fall des Augenstaters von Mittelstrimmig maßen wir eine Masse von 5,4464 g, ein Volumen von 0,4793 cm³ und errechneten eine Dichte von 11,36 g/cm³.

Dabei fiel uns auf, dass bei Hinzunahme anderer mit der Laserablations-Methode gewonnener Werte desselben Münztyps (Bendall 2003, vgl. Sillon et al. 2011) eine

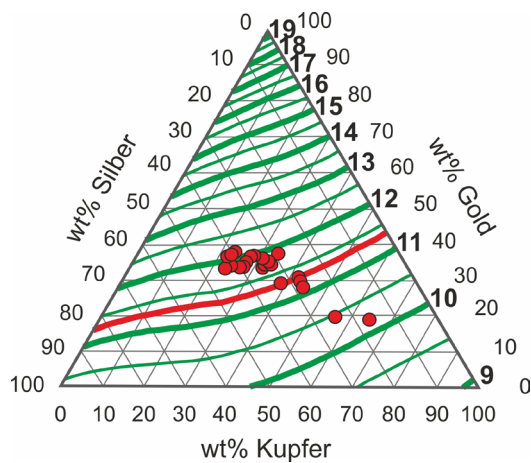


Abb. 6: Ternäres Diagramm mit Eintrag der archimedischen Dichte (grün) [Kraut/ Stern 2000]. Die rote Linie gibt die Messung des Goldstaters von Oberstimmig mit 11,36 g/cm³ an. Die roten Punkte markieren gemessene Werte desselben Münztyps Scheers 30-5 [Bendall 2003]. Offensichtlich orientieren sich die Werte an den Dichtelinien und deuten auf die Kenntnis des archimedischen Prinzips bei den Kelten (Grafik: Michael Koch).

Beziehung zu den Dichtekurven zu bestehen scheint (Abb. 6). Wir erklären dies vorläufig damit, dass der keltische Münzmeister bei der Zusammenstellung der Münzmetalle das archimedische Prinzip verwendete. Oder respektive seine Arbeit mit diesem Prinzip kontrolliert wurde.

Mit Hilfe der bisher bekannten Messungen, z.B. von Chris Bendall, ist es in diesem Zusammenhang möglich, eine recht genaue Prognose der Metallzusammensetzung auszusprechen.

Anwendungsbeispiel: keltische Münzen

Folgende Beobachtungen lassen sich zusammenfassen:

- Die ursprünglich von den Kelten hergestellte Gold-Silber-Kupfer-Legierung hat sich im Lauf von 2100 Jahren deutlich verändert. Die Silber- und Kupferanteile oxidierten und sind an der Oberfläche abgereichert. Somit gibt die Goldmünze in der EDX-Analyse einen beträchtlich höheren Goldgehalt an, als im Inneren der Münze tatsächlich vorhanden ist (vgl. Bendall et al. 2008 Fig. 1).
- Da Kupfer und Silber über einen weiten Konzentrationsbereich unmischbar sind, kommt es durch die Oxidation dieser weniger edlen Metalle zu Ausscheidungsprozessen, die zu skelettförmigen Strukturen führen. (Abb. 7).
- Die Abreicherung findet nicht gleichmäßig auf der Oberfläche statt, sondern vollzieht sich in netzförmig-zerlaufenen Strukturen. Messungen mit EDX zeigen, dass diese Bereiche eine relativ homogene Zusammensetzung haben und sich von ihrer Nachbarschaft durch einen deutlichen Kontrast unterscheiden. Diesen Kontrast kann man mit dem bloßen Auge durch unterschiedliche Goldfärbung sehen (Abb. 8).



Abb. 7: Mittelstrimmig, Augenstater. Skelettförmige Ausscheidungsprodukte (Foto: Marcus Koch).

- Am Münzrand sind die mechanischen Kräfte, die durch den Prägevorgang auf den Münzschrotling eingewirkt haben, sichtbar. Sie zeigen sich durchgängig im Auseinanderreißen der Kristallstruktur in Gestalt von „Körnchen“ und insbesondere dort, wo die maximale mechanische Kraft einwirkte, durch einen kräftigen Spalt. Diese Verletzungen sind bei keltischen Münzen charakteristisch und kommen im Vergleich zu den Goldmünzen der griechisch-römischen Antike sehr häufig vor. Allerdings ist dieser Prägespalt nicht bei allen keltischen Münzen (auch in derselben Münzserie) zu finden. Es handelt sich also um eine handwerkliche Fertigkeit, die unterschiedlich effektiv angewendet wurde. Dadurch lassen sich altertums-wissenschaftlich Erkenntnisse über den Münzmeister erschließen. Einerseits existierte der Kundenwunsch, der eine Dehnungsspalte duldet (oder auch nicht). Andererseits gab es den Handwerker (und seine Gesellen?), der den Schrotling vor dem Prägen noch erhitze, um diese Material-Ermüdung möglichst klein zu halten. Dabei musste er die Erwärmung in einem bestimmten Bereich halten (nicht zu warm und nicht zu kühl). Diese Fertigkeit kann dem Numismatiker die Chance bieten, verschiedene Handwerker in einer Münzserie zu identifizieren.
- Des Weiteren bietet sich der Münzrand an, um den Schrotling noch vor dem Prägevorgang durch Feilen zu normieren. Dies ist notwendig, falls der Schrotling zu viel Material bei seiner Herstellung erhielt und man sein Gewicht korrigieren wollte (Abb. 9).
- Schon im Lichtmikroskop sind zahlreiche Kratzer und Abnutzungspuren feststellbar. Mit dem REM werden sie klar und reflexionsfrei abgebildet und können leicht zugeordnet werden. Dabei stellt sich zwangsläufig die Frage nach der Zeitstellung der Kratzer. Sind sie

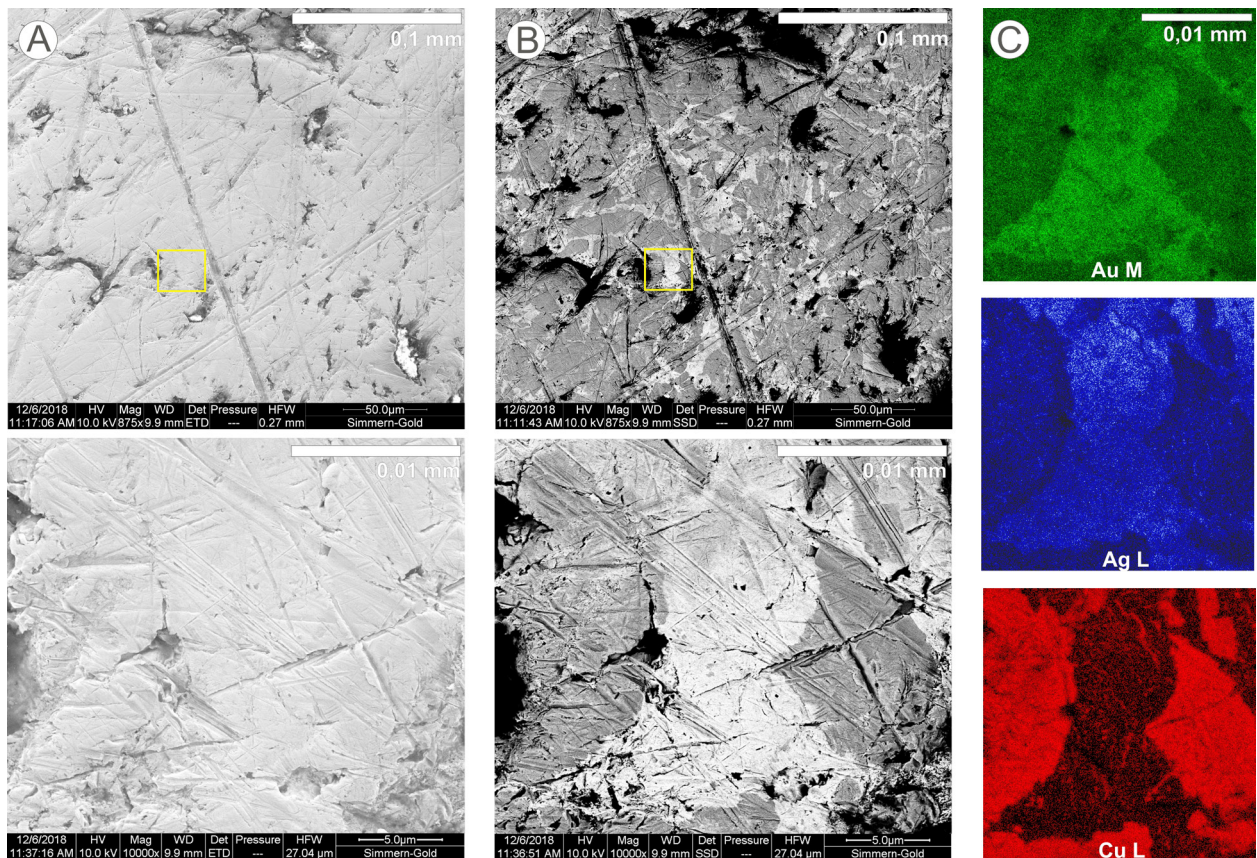


Abb. 8: Mittelstrimmig, Augenstater. A = Sekundärelektronenkontrast mit ETD. B = im Rückstreuелеktronenkontrast mit SSD werden unterschiedlich abgereicherte Stellen mit scharfer Abgrenzung sichtbar. C = das Plotten „Mapping“ der Elemente Gold, Silber und Kupfer zeigt, dass Kupfer in den hellen Flecken weitestgehend fehlt. In den Flecken sind Gold und Silber nicht homogen gemischt. (Foto: Marcus Koch).



Abb. 9: Mittelstrimmig, Augenstater. Die Münze ist nicht kreisförmig und wirkt „geschnitten“. Wurde sie vor dem Prägen abgefeilt? (Foto: Marcus Koch).

in der Antike bei der Prägung, bei Verwahrung oder ihrer Nutzung entstanden? Lassen sich Kratzer jüngerer Zeitstellung identifizieren, etwa jene, die bei der Bergung und der archivarischen Handhabung entstanden sind?

- Die REM-Aufnahmen ermöglichen eine genaue Lokalisierung und Charakterisierung von Stempelstellen. So konnte während der Studie eine Stempelkopplung in Otzenhausen erstmalig identifiziert werden (Abb. 10).
- Abgesehen von Stempelfehlern und technischen Details der Münzbilder sind manche Darstellungen von



Abb. 10: Otzenhausen, Stempelkopplung von zwei Augenstateren Typ Scheers 30-4. Während die Rückseiten durch einen in allen Details übereinstimmenden Stempel geschlagen wurden, unterscheidet sich das Stempelbild auf der Vorderseite erheblich. Offensichtlich tauschte man während der Emission den Vorderseitenstempel aus. Die gleiche Stempelrichtung bei 9:00 Uhr spricht für denselben ausführenden Handwerker, ebenso das beinahe identische Gewicht von 5,6 und 5,7 Gramm (Foto: Marcus Koch).



Abb. 11: Otzenhausen, Augenstatere, Typ Scheers 30-5 (Kat. 32c und Kat. 1). Die linke Münze ist stark abgenutzt und ist mit sekundären Silberanlagerungen bedeckt. Die Münze rechts ist kaum abgegriffen. Das Münzbild weist winzige Details von hoher künstlerischer Qualität auf, wie z.B. die Muskulatur des Pferdes. Hier wird Bewegung und Plastizität dargestellt. Die 45°-Ansicht verdeutlicht die künstlerische Leistung, die großplastische Werke als Vorbild gehabt haben muss; vgl. z.B. die Brunnenfiguren aus der Viereckschanze von Fellbach-Schmidlen (Foto: Marcus Koch).

hoher künstlerischer Qualität. Zwar sind viele Münzen sehr grafisch und abstrakt angelegt, doch ein Beispiel aus Otzenhausen zeigt schlaglichtartig einen unerwarteten Realismus (Abb. 11). Hier haben wir das Werk eines Meisters vor uns, der sich auch auf die Gestaltung großplastischer Kunstwerke verstand.

Dank

Unser Dank gilt Herrn Alexander Domprobst, Staatliche Altertümersammlung des Saarlandes. Er ermöglichte uns anhand einer Auswahl von Münzen, die „ersten Schritte“ bei den Münzuntersuchungen zu gehen, und ermunterte uns, weitere Methoden auszuprobieren. Insbesondere Herrn Dr. Fritz Schellack (Hunsrück-Museum Simmern) gilt unser Dank für sein großzügiges Entgegenkommen, die keltische Gold- und Kupfermünze für weitergehende Untersuchungen ausleihen zu dürfen. So war es uns möglich, die Messmethoden zu verfeinern und ausreifen zu lassen. Herrn Robert Drumm vom INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien danken wir herzlich für die präzisen Dichtemessungen und intensiven Diskussion. Frau Kerstin Adam danken wir für die Durchsicht des Manuskripts und die Übersetzungen.

Literatur

- Kupfermünze Uhler: Axel von Berg, Erfassung von 109 römischen Münzen und einer keltischen Münze. Hunsrücker Heimatblätter 124, 2004, 155.
- Goldmünze Mittelstrimmig: Axel von Berg, Keltische und römische Münzen im Hunsrück. In: G.M. Forneck / F. Schellack / R. Zimmer (Hrsg.), Geld im Hunsrück. Münzprägung und Geldumlauf zwischen Rhein, Mosel und Nahe (Simmern 2004) 12.

Münzen Otzenhausen: Thomas Fritsch, Keltische Münzfunde des Schwarzwälder Hochwaldes mit Schwerpunkt Oppidum Hunnenring bei Otzenhausen. Landesarchäologie Saar 2010-2015. Denkmalpflege im Saarland 9, 67-92.

Bendall 2003 = C. Bendall, The Application of Trace Element and Isotopic Analyses to the Study of Celtic Gold Coins and their Metal Sources (Dissertation Frankfurt 2003).

Bendall et al. 2008 = C. Bendall/ D. Wigg-Wolf/ Y. Lahaye/ H.-M. von Kaenel/ G.P. Brey, Detecting changes of celtic gold sources through the application of trace element and Pb isotope Laser Ablation Analyses of celtic gold coins. Archaeometry 51, 4 (2009) 598-625.

Kraut/ Stern 2000 = J.C. Kraut/ W.B. Stern, The Density of Gold-Silver-Copper Alloys and its Calculation from the Chemical Composition. Gold Bulletin 2000, 33 (2), 52-55.

Sillon et al. 2011 = C. Sillon/ S. Nieto-Pelletier/ J.-M. Doyen, Archéologie et numismatique gauloise : une contribution du Cabinet des Médailles de Bruxelles à l'Histoire des Rèmes et des Trévires. In Monte Artium. Journal of the Royal Library of Belgium 4, 2011, 129-151.

Adresse der Autoren

Michael Koch
Europäische Akademie Otzenhausen und
Projekt Keltenpark und Nationalparkotor Otzenhausen
(Gemeinde Nonnweiler)
D-66620 Nonnweiler
koch@eao-otzenhausen.de

Dr. Marcus Koch
INM – Leibniz-Institut für Neue Materialien
Campus D2 2
D-66123 Saarbrücken
marcus.koch@leibniz-inm.de