

Zusammenfassend läßt sich das Prinzip dieses Verfahrens wie folgt darstellen. Geschmolzenes Edelmetall wird langsam in nicht zu dickem Strahl aus genügender Höhe in ein Gefäß gegossen. Dies ist entweder mit Wasser oder mit Holzkohlepulver gefüllt. Das geschmolzene Metall wird beim Auftreffen auf diese Medien zerteilt. Verbessert wird der Herstellungsprozeß, wenn das Wasser durch einen Besen, ein Holzstück o. ä. bewegt wird oder ein flacher Stein hineingelegt ist. Die winzigen Metallteilchen ziehen sich beim Erkalten zu Kügelchen zusammen: Flüssigkeiten und damit auch geschmolzenes Metall besitzen eine größere Oberflächenspannung, d. h. die Oberfläche wird schneller kalt und hart als der Kern, und die Teilchen formen sich auf diese Weise kugelig.¹⁹²

Im Ergebnis sind die Kügelchen zwar regelmäßig rund, aber nicht von gleicher Größe, da das Zerteilen des Metalls beim Ausgießen nicht zu kontrollieren ist.¹⁹³ Rosenberg folgerte daraus, daß dieses Verfahren keine zufriedenstellenden Ergebnisse gebracht habe und daher in der Antike und im Mittelalter nicht praktiziert worden sei.¹⁹⁴ Dagegen zeigt ein Hinweis bei Plinius,¹⁹⁵ daß das Ausgießen geschmolzenen Metalls in Wasser spätestens seit der Römischen Kaiserzeit ein bekanntes Verfahren war. Im Zusammenhang mit dem sog. Campanischen Erz, einer Bronze, heißt es, daß man das Metall im Holzfeuer schmilzt und reinigt, indem man es durch Holzsiebe gießt und in Wasser auffängt.¹⁹⁶ Plinius spricht zwar nicht ausdrücklich davon, daß auf diese Weise Kügelchen herzustellen sind. Dennoch ist nur diese Form aufgrund der Oberflächenspannung als Ergebnis möglich, zumal das Holzsieb die gleiche Funktion erfüllt wie etwa ein Besen oder ein Stein. Da das Verfahren außerdem leicht durchzuführen ist, wird es vermutlich schon vor dem 1. Jahrhundert n. d. Z. praktiziert worden sein.

Die unterschiedliche Größe der Kügelchen erfordert abschließend ein sorgfältiges Sortieren. Dieser Arbeitsschritt ist jedoch überflüssig, wenn

ein Verfahren angewendet wird, bei dem kleine Blechpartikel oder Drahtteile geschmolzen werden. Die Teilchen sind in einen mit Asche gefüllten Behälter geschichtet, wobei die Asche eine isolierende Funktion ausübt, so daß die Blech- oder Drahtstückchen beim Erhitzen nicht aneinanderkleben. Sind sie geschmolzen, bewirkt auch hier die Oberflächenspannung beim Erkalten das Zusammenziehen zu kleinen Kügelchen. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, daß die Metallteilchen ohne Mühe gleichmäßig groß abgeschnitten werden können und so Kügelchen einheitlicher Größe ergeben.¹⁹⁷ Dieses Verfahren ist ebenfalls bei Biringuccio für das 16. Jahrhundert erwähnt.¹⁹⁸ Weitere schriftliche Hinweise gibt es dann wieder im 19. Jahrhundert.¹⁹⁹ Da beim Schmelzen der Metallteilchen gleichmäßig große und runde Kügelchen herzustellen sind, und zudem die gleichzeitige Produktion einer großen Zahl möglich ist, wird dies vermutlich das in Antike und Mittelalter bevorzugte Verfahren gewesen sein.²⁰⁰ Auf einigen wikingerzeitlichen nordischen Schmuckstücken läßt es sich eindeutig nachweisen.²⁰¹

III.3. Das Löten

Die Befestigung der Kügelchen und Drähte erfolgt in zwei Arbeitsschritten. Zuerst gilt es, die Ornamente auf dem Objekt vorläufig festzukleben. Im nachfolgenden Arbeitsschritt werden die Verzierungselemente dann durch unterschiedliche Bindungsverfahren im Feuer endgültig befestigt. Für die hier dargestellten Verfahren gilt, daß sie nicht ausschließlich für Granulations- und Filigranarbeiten verwendet wurden. Vielmehr waren sie allgemein in der Metallverarbeitung und -bearbeitung üblich. Daher werden sie in den schriftlichen Quellen nicht immer ausdrücklich

¹⁹⁷ Ebd. 46.

¹⁹⁸ Biringuccio Buch 4, Kap. 3 in: Johannsen 1925, 435.

¹⁹⁹ Wolters 1986, 46.

²⁰⁰ Rosenberg 1918, 11. — Zum gleichen Schluß kommt Wolters 1986, 47. Seiner Bemerkung, daß Drahtteilchen erst seit dem 6. Jahrhundert n. d. Z., also seit der mutmaßlichen Einführung des Zieheisens, verwendet wurden, ist jedoch nicht zuzustimmen.

²⁰¹ Duczko 1985, 24 f. fig. 94 konnte mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops an einer Perle feststellen, daß sich zwischen den Kügelchen einzelne Drahtstückchen befanden, die nicht stark genug erhitzt worden waren und so ihre ursprüngliche Form behalten hatten.

¹⁹² Wolters 1986, 45.

¹⁹³ Ebd.

¹⁹⁴ Rosenberg 1918, 11.

¹⁹⁵ G. C. Wittstein (Hrsg.), Die Naturgeschichte des Cajus Plinius Secundus, 6 Bde. [Plinius Secundus, *Naturalis Historia*] (Leipzig 1881/82) 84.

¹⁹⁶ Wolters 1986, 277 Nr. 8.

im Zusammenhang mit Granulation und Filigran genannt. Für beide Techniken können dieselben Verbindungsverfahren angewendet werden, was auch durch ihr gemeinsames Auftreten auf einem Objekt nahegelegt wird. Neben der Auswertung schriftlicher Quellen sind naturwissenschaftliche Analysen des archäologischen Materials für den heutigen Kenntnisstand der Forschung von Bedeutung. Chemische Analysen liegen jedoch für frühmittelalterliche Objekte mit Filigran- und/oder Granulationsdekor bisher nur vereinzelt vor.²⁰² Daher sollen hier die Untersuchungsergebnisse an antiken Objekten kurz dargestellt werden. Inwieweit die gewonnenen Resultate auch auf das frühe Mittelalter übertragen werden können, muß vorläufig Vermutung bleiben.

III.3.1 Das vorläufige Befestigen der Verzierungselemente

Die komplizierten geometrischen und figuralen Muster machen es notwendig, die Kügelchen und Drähte auf dem Objekt vorläufig zu befestigen. Dies ist teilweise sehr schwierig, da die Ornamente nicht nur auf planem, sondern häufig auf reliefiertem Untergrund angebracht sind. Man benötigte daher Klebstoffe, die zum einen eine genügend große Haftung ermöglichten, sich zum anderen aber während oder nach dem Löten auflösen. Ein Klebstoff, der in einer Quelle des ersten Jahrhunderts für das Kleben von Metallen beschrieben wird, ist Tragant, ein geruchloses Gummiharz.²⁰³ Erstmals erwähnt wird es bereits um 300 v. d. Z. von dem griechischen Schriftsteller Theophrast.²⁰⁴ Cellini nennt es im 16. Jahrhundert ausdrücklich als geeignetes Klebmittel für Kügelchen und Drähte.²⁰⁵ Theophilus empfiehlt einen sehr einfach herzustellenden Klebstoff: Weizenmehlkleister, der aus Weizenmehl mit Wasser angerührt wird. Die Drähte werden in das feuchte Mehl eingetaucht und auf dem Objekt angeordnet. Abschließend wird es kurz ins Feuer

gehalten, damit das Mehl antrocknet.²⁰⁶ Biringuccio beschreibt 1540 sowohl die Verwendung von Gummi Arabicum, einem aus tropischen Akazienarten gewonnenen Harz,²⁰⁷ als auch einen Kleister aus Quitten.²⁰⁸ Neben diesen aus Pflanzen gewonnenen Stoffen erwähnen die schriftlichen Quellen auch solche tierischen Ursprungs. Dazu gehören sog. Haut- oder Ochsenleim, der bevorzugt aus Rinderhäuten hergestellt wird,²⁰⁹ Fischleim, gewonnen aus Schwimmblasen, Köpfen, Flossen und Häuten,²¹⁰ sowie eine Seife, die in der Antike aus Ziegenfett und Pottasche gemischt, im Mittelalter durch Verseifung von Olivenöl gewonnen wurde.²¹¹ Einige dieser Klebstoffe, z. B. Fischleim, sind so gut geeignet, daß sie noch heute für moderne Granulationsarbeiten verwendet werden.²¹² Andere Substanzen sind Gelantine und Knochenmehl,²¹³ und sogar mit Speichel lassen sich bei sorgfältigem Arbeiten die Kügelchen und Drähte fest genug kleben.²¹⁴ Die letztgenannten Substanzen sind in den schriftlichen Quellen nicht erwähnt. Ihre Verwendung ist aber anzunehmen, da es sich bei allen um leicht herzustellende und verfügbare Naturprodukte handelt. Rosenberg verwies zusätzlich auf Wachs und Honig als Kleber.²¹⁵ Beide Stoffe sind aber vollkommen ungeeignet, da sie selbst bei schwacher Hitze sofort schmelzen und die Kügelchen und Drähte sich verschieben.²¹⁶

Das Auftragen des Klebstoffs geschieht entweder mit einem Pinsel, oder die Dekorelemente

²⁰² Auch Duczko 1985, 26 f. unterscheidet an Verfahren nur „metallisches“ und „chemisches“ Lot; Analysen, die differenziertere Ergebnisse ermöglichen, wurden für das Material aus Birka anscheinend nicht vorgenommen.

²⁰³ Im sog. Traktat über die Goldschmiedekunst; vgl. Wolters 1986, 48.

²⁰⁴ Ders. 1987, 1140.

²⁰⁵ Ders. 1986, 48; 280.

²⁰⁶ Theophilus beschreibt das Verfahren im Zusammenhang mit der Herstellung eines verzierten Kelchhenkels: „Nimm auch Mehl von Weizen oder Roggen, das du mit Wasser in einem kleinen Gefäß anrührst, und stelle es über Kohlen, damit es leicht angewärmt wird. (...) Hast du sie [die Filigranelemente, HE] mit einer feinen Zange geformt, tauche sie in feuchtes Mehl und so setze sie auf, einen jeden an seinen Platz.“ Brepohl 1987, Kap. 52, 152.

²⁰⁷ Wolters 1986, 49.

²⁰⁸ Biringuccio in: Johannsen 1925, 435.

²⁰⁹ Nach Wolters 1987, 1141 zuerst erwähnt in einer syrischen Quelle des 6./7. Jahrhunderts n. d. Z.

²¹⁰ Theophilus erwähnt im Zusammenhang mit dem Befestigen von Blattgold, daß dafür ein Leim hergestellt werden solle, „der aus der Blase des Fisches, der ‚Hausen‘ genannt wird, gewonnen wird“. Vgl. Brepohl 1987, Kap. 93, 293.

²¹¹ Wolters 1986, 49, 278 Nr. 14.15; 279 Nr. 19.22.

²¹² Treskow 1959, 34.

²¹³ Wolters 1986, 49.

²¹⁴ Treskow 1959, 34.

²¹⁵ Rosenberg 1918, 13.

²¹⁶ Treskow 1959, 34.

werden direkt in den Klebstoff eingetaucht, wie es Theophilus für den Weizenmehlkleister beschreibt. Entweder wird der Klebstoff allein aufgetragen oder er wird mit Flußmitteln und bereits mit Lot vermischt.²¹⁷ Im Zusammenhang mit dem Kleben der Drähte und Kügelchen sei auf eine Besonderheit frühmittelalterlicher Filigranarbeiten hingewiesen. Die Drähte scheinen häufig zusätzlich mit metallenen Klammern auf dem Träger und untereinander verbunden zu sein. Wolters verwies auf fränkische Scheibenfibeln des 6. und 7. Jahrhunderts, deren Einfassungsdrähte durch kleine Drahringe am äußeren Rand der Fibeln befestigt sind.²¹⁸ Spätere Filigranarbeiten des 8.–10. Jahrhunderts besitzen vom äußeren Rand des Objekts abgespannte Klammern, die über die Rand- oder Einfassungsdrähte gebogen sind.²¹⁹ Diese haben offenbar das Kleben einzelner Elemente teilweise ersetzt. So heißt es bei Theophilus, der Goldschmied solle, wenn er Drähte auf einem Blech angeordnet habe, in dessen Außenkante feine Einschnitte machen, mit denen die Drähte festgehalten werden, bis sie angelötet sind.²²⁰ Da diese Klammern häufig sehr fein sind, haben sie den Gesamteindruck anscheinend nicht zu sehr gestört, und man beließ sie auf dem Objekt. Innerhalb des nordischen Filigran-/Granulationsmaterials sind sie häufiger zu beobachten (z. B. Taf. 2,3.10; 3,32.33; 13,185; 14,186.189; 18,200). Eine andere Funktion hatten aber wohl U-förmige Metallklammern, die ab dem 9. Jahrhundert auf der Fläche einiger Objekte innerhalb des Musters angebracht wurden und neben dem konstruktiven auch einen dekorativen Zweck erfüllten.²²¹ Nicht mit den genannten Randklammern zu verwechseln sind solche aus Eisen, die Theophilus ebenfalls erwähnt.²²² Diese dienten ähnlich modernen Schraubzwingen dem Zusammenhalten einzelner Teile eines Schmuckstückes u. a. während des Lötvorgangs. Anschließend wurden sie wieder entfernt.

²¹⁷ Wolters 1986, 49.

²¹⁸ Wolters 1987, 1141 f.; Rademacher 1940, Taf. 12; 14; 22.

²¹⁹ Wolters 1987, 1142. — S. dazu auch die Anmerkungen und eine sehr gute Abb. bei Foltz 1979, 219 Taf. 31,3.

²²⁰ Brepohl 1987, Kap. 52, 151.

²²¹ Diese Form der Klammern steht immer im Zusammenhang mit dem Spiral- oder Spiralrankenornament, z. B. auf der Kleeblattfibel aus Kirkoswald, Cumberland, GB; vgl. Wilson 1964, no. 28 pl. XIX.

²²² Brepohl 1987, Kap. 52, 153 Abb. 52:1,4.

Die Anordnung der Drähte und Kügelchen wird, besonders bei komplizierten Mustern, durch die unebene Oberfläche des Rezipienten erschwert. Eine weitere Schwierigkeit liegt in der Tatsache, daß sich die Metallkügelchen aufgrund ihrer Form von selbst nach dem „Prinzip der dichtesten Kammerfüllung“, d. h. auf Lücke, zusammenlegen.²²³ Linien- und Dreiecksmuster ergeben sich dadurch leicht, andere Muster bedürfen dagegen eines zusätzlichen Hilfsmittels bei ihrer Gestaltung. Ein solches wurde erstmals in den 30er Jahren für moderne Granulationsarbeiten benutzt. Der englische Goldschmied Littledale entwickelte ein Verfahren, bei dem das gewünschte Muster in Kupfer eingraviert und die Kügelchen in die Linien gelegt werden. Dies wird dann auf einen lackbestrichenen Papierzylinder übertragen, die Kügelchen werden mit Klebstoff bestrichen und das Ganze auf dem zu verzierenden Objekt abgerollt.²²⁴ Ähnliche Übertragungsverfahren sind auch für antike Granulationsarbeiten anzunehmen, da ohne sie die Gestaltung komplizierter Muster aus tausenden von Metallkügelchen kaum denkbar ist.

III.3.2 Die Lötverfahren

Bevor die einzelnen Lötverfahren beschrieben werden, seien einige Bemerkungen zur Terminologie vorangestellt. Der Vorgang des Lötens bezeichnet die Verbindung metallischer Werkstoffe mittels eines Lotes. Lote sind Metallegierungen, die als zusätzliche Werkstoffe eingesetzt werden. Diese verbinden sich mit den zu befestigenden Teilen unterhalb deren Schmelztemperatur.²²⁵ Die Lötvorgänge lassen sich hinsichtlich der benötigten Schmelztemperatur in sog. Hartlöten und Weichlöten unterscheiden. Beim Hartlöten werden Legierungen als Lote verwendet, deren Schmelztemperatur nur wenig niedriger ist als die des Materials der zu verbindenden Teile. Im Gegensatz dazu werden beim Weichlöten Legierungen mit sehr niedrigem Schmelzpunkt benutzt wie z. B. Blei und Zinn.²²⁶ Das Schweißen ist gegenüber dem Löten ein Verfahren, bei dem

²²³ Wolters 1986, 49.

²²⁴ Ebd. 50.

²²⁵ Ebd. 56.

²²⁶ P. M. Roberts, Gold brazing in Antiquity. Gold Bulletin 6.4, 1973, 112–119, hier 113.

kein zusätzlicher Werkstoff benutzt wird. Die Verbindung der Metallteile wird statt dessen mittels Wärme und/oder Druck hergestellt. Die Teile werden so lange erhitzt, bis sie anfangen zu schmelzen und sich verbinden.²²⁷ Dieses Verfahren sei hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Für das Befestigen von Gold- und Silberkügelchen und -drähten ist es schon deshalb völlig ungeeignet, weil die Metallelemente bei Erreichen ihres Schmelzpunkts anfangen zu verlaufen und damit ihre Form verlieren.

Rosenberg hatte 1918 ein Verfahren postuliert, bei dem sich durch das Glühen der Goldkügelchen im Holzkohlenstaub deren Oberfläche mit Kohlenstoff anreichere. Dieser Überzug von Goldcarbid bewirke eine Senkung des Schmelzpunkts von ca. 1064°C auf etwa 900°C. So schmelze beim Erhitzen des Werkstücks die Oberfläche der Kügelchen eher als der Kern und auf diese Weise erfolge die Haftung auf der Unterlage.²²⁸ Rosenbergs These hat in der Literatur verbreitet Eingang gefunden,²²⁹ und erst vor wenigen Jahren wurde ihr durch Wolters energisch widersprochen. Eine physikalische Eigenschaft der Metallcarbide sei, daß sie einen sehr viel höheren Schmelzpunkt besitzen als das Metall, das sie umgeben. Zudem sei es unmöglich, in dem zur Verfügung stehenden Temperaturbereich eines Holzkohlefeuers Goldcarbid zu erzeugen, da Gold selbst bei mehrstündigem Erhitzen kurz unterhalb seines Siedepunkts von 2700°C nur wenig Kohlenstoff aufnehme.²³⁰ Diese Richtigstellung durch Wolters wurde vor kurzem von R. Echt und W.-R. Thiele bestätigt,²³¹ obwohl die zugrundeliegende Beobachtung Rosenbergs — das Fehlen jeglicher Lötspuren — durchaus korrekt war. Die im folgenden beschriebenen Lötverfahren zeigen, wie solche scheinbar lotfreien Produkte herzustellen waren.

Bis ins 17. Jahrhundert wurden sämtliche Metallarbeiten, für die Wärme benötigt wurde, mittels eines Holzkohlefeuers durchgeführt.²³² Damit waren Temperaturen um 800°C erreichbar, die mit Hilfe eines einfachen Gebläses auf etwa 1300°C, mit einem Doppelgebläse und entsprechend kontinuierlicher Luftzufuhr auf etwa 1650°C erhöht werden konnten.²³³ Da die Schmelzpunkte von Gold (ca. 1064°C), Silber (ca. 963°C) und Kupfer (ca. 1084°C) oberhalb von 800°C liegen,²³⁴ mußte zumindest mit einem einfachen Gebläse gearbeitet werden, um auf die nötigen Temperaturen zu kommen. Diese waren nicht nur für das Löten wichtig, sondern z. B. auch zur Herstellung der Granulationskügelchen. Der Vorteil eines Holzkohlefeuers ist, daß es in reduzierender Atmosphäre, also ohne Sauerstoff, glüht. Dieser würde dazu führen, daß die Metalllegierungen, besonders wenn sie Kupfer enthalten, oxydieren.²³⁵ Zusätzlich wurden den Klebstoffen und Loten sog. Flußmittel beigemischt, die einen möglichen Oxydationsprozeß verhinderten. In den schriftlichen Quellen sind solche Flußmittel zahlreich überliefert. Soda ist darunter das älteste. Es wird bereits in einem ägyptischen Papyrus von 3000 v. d. Z. erwähnt.²³⁶ Daneben gehören Alaun, aus Pflanzenasche oder durch das Brennen von Weinstein gewonnene Pottasche, Weinstein selbst, Borax und Salmiak zu den gebräuchlichsten Flußmitteln.²³⁷ Ein wesentlicher Nachteil bei der Arbeit mit einem Holzkohlefeuer ist, daß dessen Wärme nicht gezielt, z. B. nur für eine Stelle am Werkstück, genutzt werden kann. Lötverfahren, die eine genaue Kontrolle des Objekts in einem sehr engen Temperaturbereich erfordern, sind also gar nicht oder nur sehr schwer durchzuführen. Die folgenden Verfahren sind jedoch unter den genannten Bedingungen praktikabel.

²²⁷ Wolters 1986, 65. Ein dem Schweißen ähnliches Verfahren ist das sog. Sintern, für das ebenfalls kein Lot verwendet wird; ebd. 66. Dieses Verfahren konnte bisher nur an wenigen, ausschließlich etruskischen Granulationsarbeiten nachgewiesen werden. Vgl. dazu ausführlich Carroll 1974 und Echt/Thiele 1987.

²²⁸ Rosenberg 1918, 13.

²²⁹ So noch bei J. Riederer, *Archäologie und Chemie — Einblicke in die Vergangenheit* (Berlin 1987) 88.

²³⁰ Wolters 1986, 66.

²³¹ Echt/Thiele 1987, 213.

²³² Nach Wolters 1986, 50 war Buchen- oder Steineichenholz am besten geeignet.

²³³ Duczko 1985, 26.

²³⁴ Die Schmelztemperaturen sind nur Annäherungswerte, da die Metalle selten in reiner Form zur Verfügung standen. Gold und Silber sind z. B. oft mit einem geringen Anteil Kupfer legiert, wodurch der Schmelzpunkt insgesamt reduziert wird. Eine Silber-Kupfer-Legierung im Verhältnis 970/1000 hat nur noch einen Schmelzpunkt zwischen 900°C und 940°C; ebd. 26.

²³⁵ Ebd.

²³⁶ Wolters 1986, 54.

²³⁷ Ebd. 55.

Bei diesem Verfahren werden natürliche oder künstlich gewonnene Kupferverbindungen in Pulverform an der Lötstelle fein verteilt aufgetragen, entweder mit einem Klebstoff vermischt oder erst in einem zweiten Arbeitsschritt nach dem Festkleben der Dekorelemente.²³⁸ Beim Erhitzen des Werkstücks verwandelt sich Kupferhydroxyd bei etwa 100°C in schwarzes Kupferoxyd. Bei weiterem Temperaturanstieg auf 600°C verbrennt der organische Klebstoff; zurück bleibt nur Kohlenstoff. Letzterer bewirkt, daß sich bei ca. 850°C das Kupferoxyd zu metallischem Kupfer reduziert. Knapp über 850°C bzw. bei 900°C diffundiert das nun reine Kupfer mit den Silber- bzw. Goldlegierungen und verbindet so die Auflage mit dem Rezipienten.²³⁹ Der Vorteil dieses Verfahrens ist, daß das Lot an den Verbindungsstellen einerseits die notwendige niedrige Schmelztemperatur aufweist, andererseits das verbliebene Restlot vollständig in die Grundfläche eindringt. Im Ergebnis sind die Lötstellen nur als winzige Metallpunkte sichtbar oder besser unsichtbar.

Dieses Phänomen konnte vor allem an etruskischen Objekten beobachtet werden. Vor wenigen Jahren ließ sich erstmals mit Hilfe chemischer Analysen nachweisen, daß die Etrusker wirklich mit derartigen Kupferverbindungen gearbeitet haben.²⁴⁰ Bis zu diesem Zeitpunkt war die Anwendung des Reaktionslötens für die Antike und das Mittelalter nur vermutet worden, da in den schriftlichen Quellen der Gebrauch von Kupfer im Zusammenhang mit dem Löten von Metallen beschrieben wird. Spuren von Kupferkonzentrationen, in diesem Fall von Malachit, einer natürlich vorkommenden mineralischen Kupferverbindung, ließen sich am irischen Ardagh-Kelch aus dem 8. Jahrhundert feststellen.²⁴¹ Malachit war in der Antike auch unter dem griechischen Begriff Chrysokolla gebräuchlich, der wörtlich

Goldleim und sinngemäß wohl Goldlot meint. Malachit wird im Zusammenhang mit dem Löten bereits um 300 v. d. Z. bei Theophrast erwähnt.²⁴² Ab der Zeitenwende läßt sich der Begriff Chrysokolla immer häufiger nachweisen. Er steht allgemein für Kupferverbindungen, die zum Löten verwendet wurden.²⁴³ Ein anderes mineralisches Kupferkarbonat ist Azurit.²⁴⁴ Weitere natürliche Kupferverbindungen in Form von Kupferchloriden und Kupfersilikaten sind anzunehmen, aber in den schriftlichen Quellen nicht explizit unterschieden.²⁴⁵ Kupferverbindungen lassen sich auch künstlich herstellen, etwa durch Verbrennen von Kupfer, oder sie fallen als Abfallprodukt beim Kupferschmieden an.²⁴⁶ Geläufig war anscheinend auch die Verwendung von Kupferoxyd (Grünspan), das durch Einlegen von Kupfer in Essig gewonnen wird.²⁴⁷ Theophilus stellte ein Pulver her, indem er Kupfer mit Salz bestrich und dieses mehrfach glühte.²⁴⁸

Abschließend sei auf einen weiteren Vorteil des Reaktionslötens verwiesen, der dieses Verfahren — neben den fehlenden Lötspuren — vor allen anderen Verbindungstechniken auszeichnet. Durch das Eindringen des Lötmaterials in die zu verbindenden Teile ist ein wiederholtes Löten möglich, ohne daß sich bereits befestigte Verzierungs-elemente wieder lösen.²⁴⁹ Dies könnte m. E. besonders nützlich gewesen sein, wenn auf einem Objekt unterschiedliche Elemente befestigt werden sollten, z. B. Granulationskügelchen und Filigrandrähte, aber auch Zellenstege, Fassungen oder andere Dekorelemente.

²³⁸ Ebd. 57.

²³⁹ Roberts 1973, 117. — So auch Riederer 1987, 88; Wolters 1986, 57; Ders. 1987, 1143.

²⁴⁰ P. Parrini, E. Formigli, E. Melli, Etruscan granulation: analysis of orientaling jewelry from Marsiliana D'Albegna. *Am. Journal Arch.* 86, 1982, 118–121.

²⁴¹ Wolters 1986, 60.

²⁴² Ebd. 57 f.

²⁴³ Vgl. ebd. die Zusammenstellung der schriftlichen Hinweise auf Chrysokolla und deren Bedeutung in den Quellen Nr. 7–18; 21. Dazu ausführlich: H. Jüngst, Wesen und Wandlungen des „Chrysokolla“-Begriffs. *Studien zur Geschichte und Technologie antiker und mittelalterlicher Reaktionslote* (Diss. Frankfurt a. M. 1981).

²⁴⁴ Wolters 1986, 58.

²⁴⁵ Riederer 1987, 83.

²⁴⁶ Wolters 1986, 58 f.

²⁴⁷ Duczko 1985, 27.

²⁴⁸ Brepohl 1987, Kap. 51, 149. Das Pulver wird zusammen mit einer Seife aus Pottasche und tierischem Fett erhitzt. Die entstandene Masse entwickelt den für die Reduktion des Kupfers nötigen Kohlenstoff; ebd. 150.

²⁴⁹ Wolters 1986, 60.

Im Gegensatz zum Reaktionslöten hinterläßt das Löten mit Edelmetallelegierungen sehr deutliche Spuren, die sich als Reste der Lötmasse zwischen den aufgelegten Elementen und ihrer Unterlage zeigen. Dies läßt sich vor allem an Objekten seit dem 1. Jahrhundert n. d. Z. nachweisen.²⁵¹ Die Lotlegierungen lassen sich grob unterscheiden in Goldlote mit überwiegendem Goldanteil neben Anteilen anderer Metalle und in Silberlote.²⁵² Gemeinsame und notwendige Voraussetzung der verschiedenen Legierungen ist, daß ihr Schmelzpunkt unter dem der zu verbindenden Metalle liegt.²⁵³ Im Mittelalter wurden bevorzugt einfache Mischverhältnisse angewendet, wie sie Theophilus an mehreren Stellen beschreibt. Zwei Teile Gold und ein Teil Kupfer ergeben ein Lot, dessen Schmelzpunkt zwischen 900°C und 920°C liegt.²⁵⁴ Ein Lot aus zwei Teilen Silber und einem Teil Kupfer hat sogar nur einen Schmelzpunkt von etwa 800°C.²⁵⁵ Neben der niedrigen Schmelztemperatur ist außerdem wichtig, daß die Lote in ihrer Mischung etwa dem Farbton des Schmuckstücks entsprechen. Aufgetragen werden sie in

Form von Pulver, meist mit einem Flußmittel vermischt, oder als Blechstückchen.²⁵⁶

Die schriftlichen Quellen belegen die Verwendung solcher Lotlegierungen für die Befestigung der Filigrandrähte seit dem 11. Jahrhundert.²⁵⁷ Der Lötvorgang ist einfach zu beschreiben. Wenn Lot und Flußmittel aufgelegt sind, wird das Werkstück ins Feuer gehalten, bis das Lot schmilzt. Etwas Lot dringt in die Oberfläche des Rezipienten ein, das übrige Lot läuft in die Räume zwischen Auflage und Rezipient und verbindet beim Erkalten die beiden Teile.²⁵⁸ Da im Holzkohlefeuer die Wärme kaum auf einen Punkt gerichtet werden kann und auch ein Löt- oder Blasrohr keine genau zu steuernde Flamme ermöglicht,²⁵⁹ kann das Lot sehr schnell verlaufen und bleibt auf dem Objekt sichtbar. Ein Phänomen, das sich häufig am archäologischen Material beobachten läßt und immer wieder zu Fehlinterpretationen führt, ist der stellenweise rötlich schimmernde Überzug einzelner Schmuckstücke. Dieser stellt nicht unbedingt einen Hinweis auf eine Vergoldung des Objekts dar, sondern resultiert vielmehr aus den Kupferanteilen der Lotlegierungen.²⁶⁰

²⁵⁰ Gebräuchlich ist auch der Begriff Schlag-Lot; vgl. Brepohl 1987, Kap. 51, 150.

²⁵¹ Wolters 1986, 57 differenziert zwischen Objekten ohne Lotspuren überwiegend bis zum 1. Jahrhundert n. d. Z. und solchen mit Lotspuren zwischen dem 1. Jahrhundert und dem 11. Jahrhundert n. d. Z.

²⁵² Wolters 1986, 62–65 listet die Legierungen auf.

²⁵³ Riederer 1987, 88.

²⁵⁴ Brepohl 1987, 156.

²⁵⁵ Duczko 1985, 25.

²⁵⁶ Wolters 1986, 65.

²⁵⁷ Wolters 1987, 1144 f.

²⁵⁸ Roberts 1973, 115.

²⁵⁹ Wolters 1986, 50.

²⁶⁰ Duczko 1985, 29.