



# Die Leitfähigkeitsmessung

## Teil 1: Methoden der Echtheitserkennung in der Numismatik

Der folgende Artikel soll dem interessierten Sammler einen Einblick in die Methoden der Echtheitsprüfung geben. Die verschiedenen Methoden werden im Rahmen einer Artikelserie skizziert und an Hand von zahlreichen Beispielen vorgestellt. Die ausführliche Version dieser zusammenfassenden Artikel kann im Buch „Fälschungserkennung in der Numismatik mit naturwissenschaftlichen Methoden“ nachgeschlagen werden. Das Buch befindet sich in Vorbereitung und wird im Money Trend Verlag erscheinen. Ziel ist es den aufgeschlossenen Sammler sowie Fachmann zu informieren und gleichzeitig den selbstständigen Gebrauch zu schulen. Die beiden Autoren des Buches sind selbst Hochschullehrer sowie Wissenschaftler (Professor und Doktor) und sind als Gutachter für führende Auktionshäuser tätig. Es wird also auf einen reichen Erfahrungsschatz mit mehreren tausend Münzanalysen zurückgegriffen. Einige spannende Fälle werden als Fallbeispiele im Rahmen dieser Artikelserie vorgestellt.

### Die Leitfähigkeitsmessung (LFK)

Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit (LFK) stellt heutzutage eine etablierte Analysemethode für die schnelle Identifizierung von Metallen und Charakterisierung von Legierungen dar. Deshalb findet die Methode seit Jahren eine breite Anwendung bei Münzgutachtern als auch engagierten Sammlern.

Die Leitfähigkeit hängt vereinfacht gesagt von der Zusammensetzung, Dicke, Materialfehlern (Guss/Prägung), Herstellungstechnologie sowie dem Alter einer Münze ab. Diese Faktoren eröffnen ein breites Anwendungsfeld in der Numismatik, vor allem als Ergänzungsmethode zur Echtheitserkennung. Das Prinzip der Leitfähigkeitsmessung beruht auf der Messung

des elektrischen, spezifischen Widerstands. Hierfür wird vereinfacht formuliert mittels einer Sonde im zu untersuchenden Material ein Wirbelstrom induziert und der elektrische Widerstand des Materials gemessen.

Der geringe Aufwand an Technik und Messzeit, mobile Kleingeräte und die Möglichkeit der einfachen Automatisierung dieses Verfahrens führen dazu, dass diese Methode besonders in der Industrie weit verbreitet ist und die Leitfähigkeitswerte vieler Legierungen in die Normenwerke zahlreicher Industriezweige aufgenommen wurden. Bei modernen Geräten ist ein Kontakt zum Material nicht notwendig. Die Messung kann auch durch schlecht leitende Medien wie Luft oder Korrosionsschichten erfolgen. Damit ist eine zuverlässige Messung selbst von korrodierten Münzen möglich. Üblicherweise wird die Leitfähigkeit in Mega-Siemens pro Meter (MS/m) angegeben.

### Das Funktionsprinzip

Jedes Metall besitzt eine Leitfähigkeit für elektrischen Strom. Die Güte dieser Eigenschaft, Elektronen zu leiten, kann durch den Widerstand gemessen werden. Da jedes reine Metall einen eigenen, spezifischen Widerstand besitzt, hat es auch eine eigene, spezifische Leitfähigkeit (Abb. 1). Diese ist leicht zu messen. Im Folgenden wird die Leitfähigkeitsmessung mittels Wirbelstromprinzip erklärt (Abb. 2). Eine Sonde wird auf die zu prüfende Münze aufgesetzt. In der Sonde befindet sich eine Spule.

Beim Anlegen eines Stromes an diese Spule entsteht ein Magnetfeld. Dieses dringt in das Metall der Münze ein. Wenn jeder fließende Strom ein Magnetfeld erzeugt (induziert), dann muss auch jedes einwirkende Magnetfeld einen Stromfluss erzeugen. Deshalb wird in der Münze ein sehr schwacher Strom

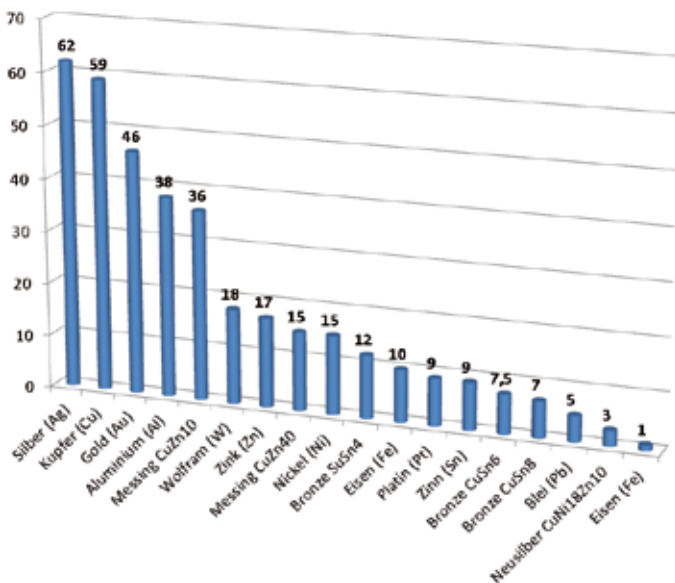


Abb. 1: Übersicht der Leitfähigkeiten in MS/m für die wichtigsten Münzmetalle. Alle Angaben gerundet. Zu erkennen ist, dass sich besonders die wichtigsten Münzwerkstoffe Silber, Kupfer und Gold für eine LFK-Messung eignen und sich eindeutig von den unedlen Metallen absetzen. Es wird auch deutlich dass Legierungen stets niedrige LFK-Werte als die Reinelemente ergeben.

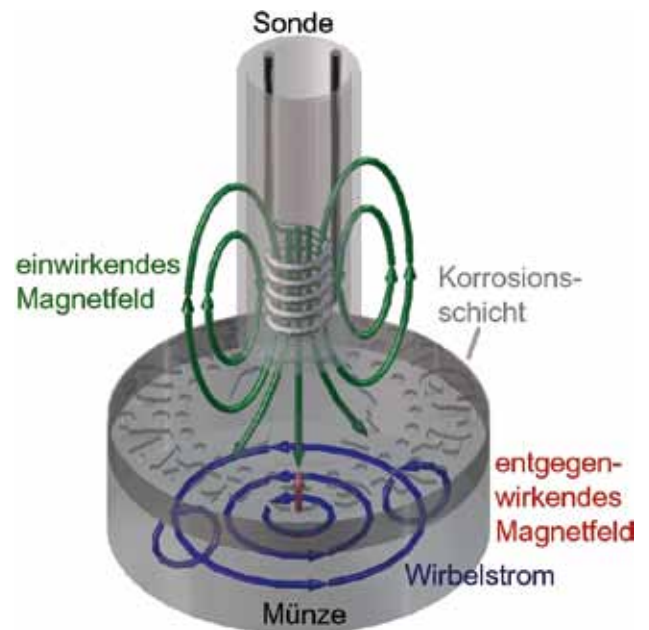


Abb. 2: Prinzip der Leitfähigkeitsmessung an einer Münze. Ein auf die Münze einwirkendes Magnetfeld induziert einen Wirbelstrom, welcher ein entgegen gerichtetes Magnetfeld erzeugt. Die Interferenz beider Magnetfelder kann gemessen und daraus der spezifische Widerstand und die Leitfähigkeit der Münze berechnet werden.

erzeugt (induziert). Dieser Strom ist jedoch sehr gering (wenige Nanoampere), so dass die Münze weder umgangssprachlich „unter Strom gesetzt wird“ noch sich messbar aufheizt. Die induzierten elektronischen Prozesse sind als haptisch nicht merkbar zu klassifizieren. Das angelegte Magnetfeld zwingt die fließenden Elektronen auf eine Ringbahn, es entsteht also ein Ringstrom. Dieser muss dann wieder als fließender Strom (bewegte Ladung) wie oben beschrieben ein neues Magnetfeld um sich herum erzeugen. Das Besondere an diesem Magnetfeld ist, dass dieses nun dem äußeren Magnetfeld entgegengesetzt ist und gegen dieses wirkt, das äußere Magnetfeld also abschwächt. Dieses Gegenspiel entsteht ganz nach dem allgemeingültigen Prinzip der Physik, dass eine Kraft eine Gegenkraft erzeugt. Im vorliegenden Fall werden Kraft und Gegenkraft durch je ein Magnetfeld erzeugt. Die Schwächung des von der Sonde einwirkenden Magnetfeldes wirkt sich auf den Fluss der Elektronen in der Sondenspule aus. Die erzeugte Stromänderung kann direkt gemessen werden und wird als Leitfähigkeit wiedergegeben. Streng genommen wird jedoch nicht die Leitfähigkeit der Münze gemessen, sondern ihr spezifischer Widerstand. Dieser lässt sich jedoch nach folgender Formel einfach in eine Leitfähigkeit umrechnen, was im Gerät passiert.

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{G}{s} = \frac{1}{R \cdot s}$$

$\gamma$  ist hierbei die elektrische Leitfähigkeit/Konduktivität (Sm<sup>-1</sup>),  $\rho$  der spezifische elektrische Widerstand (Ωm),  $G$  der elektrischer Leitwert, gemessen in Siemens (S),  $s$  die Strecke, gemessen in Meter (m) und  $R$  der Widerstand, gemessen in Ohm (Ω).

Da der Widerstand, also das Vermögen einer Münze Strom zu leiten, jedoch auch von der Temperatur der Münze abhängt, ist eine Temperaturkorrektur notwendig. Ebenso muss darauf geachtet werden, dass die Münze sich nicht in kurzer Zeit erwärmt, wie dies durch das Halten in der Hand schnell passiert.

Mit Hilfe der Frequenz lässt sich bei modernen Geräten die Informationstiefe einstellen und so ebenfalls eine Unterscheidung von Schichten oder beschichteten Münzen ermöglicht. Als Beispiel beträgt die Informationstiefe des Messsignals in reinem Silber etwa 2 mm und in reinem Gold etwa 1 mm. Wird die Frequenz erhöht, sinkt die Informationstiefe des Messsignals. Die Möglichkeit der Einstellung der Informationstiefe/Messtiefe erlaubt es jedoch auch unterschiedlich dicke Metallbeschichtungen zu identifizieren, was bei gefütterten Münzen (subaerati, subferrati) oder Barren von besonderem Interesse ist.

## Praktische Anwendung

Die praktische Anwendung der Leitfähigkeitsmessung ist denkbar einfach. Alle Geräte sind heutzutage klein und mobil, teilweise im Handyformat. An das kleine Gerät wird eine Messsonde angeschlossen. Diese gibt es in verschiedenen Größen, Standardgrößen rangieren um 10 und 6 mm. Beide sind für Münzen geeignet. Vor dem Einschalten ist darauf zu achten, dass zwischen Messgerät/Sonde und der zu messenden Münze kein zu großer Temperaturunterschied besteht. Das ist wichtig, weil der elektrische Widerstand und damit die Leitfähigkeit auch von der Temperatur abhängen. Es empfiehlt sich das Gerät zunächst am Messort auszupacken und etwas zu warten bis keine großen Temperaturunterschiede zwischen Messraum, Gerät und Münze herrschen. Zu beachten ist, dass Münzen stets kälter erscheinen als sie sind. Dies hängt damit zusammen, dass Metalle eine hohe Wärmeleitfähigkeit haben und die Wärme der Hand schnell abgeleitet wird. Dieser Effekt sollte den Anwender also nicht täuschen.

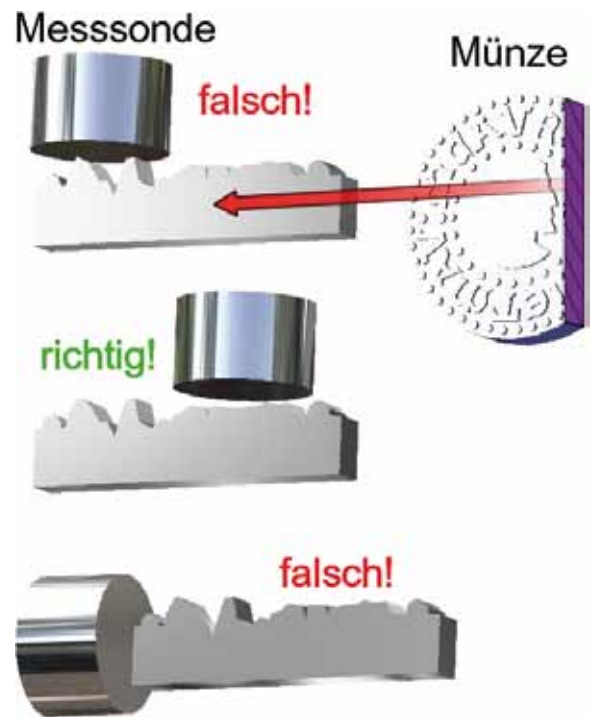


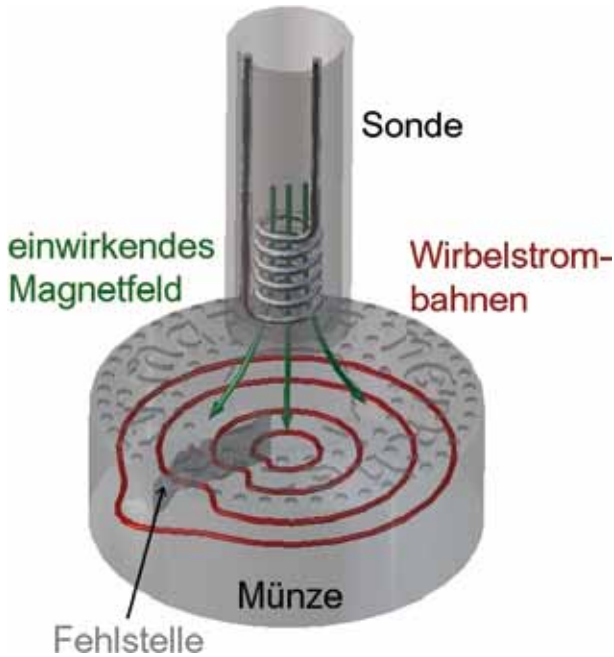
Abb. 3: Beschreibung der richtigen und falschen Handhabung der Messsonde an Hand des Querschnitts einer Münze. Wichtig ist es zu gewährleisten, dass die Sonde vollständig auf der Münze aufliegt und möglichst großen Kontakt zur Oberfläche hat. Messungen ohne vollständigen Kontakt zur Sonde oder auf zu hohem Relief verursachen zu niedrige Messwerte.

Nach dem Einschalten des Gerätes muss die Sonde zunächst kalibriert werden. Dafür wird die Sonde in der Regel auf einen Kupferstandard gelegt und so kalibriert. Wenn der Wert um 58,3-58,8 MS/m rangiert, stimmt die interne Kalibrierung. Abweichungen ergeben sich meist bei starken Temperaturunterschieden zwischen Gerät und Probe/Münze sowie bei sehr feuchten Messbedingungen. Bei manchen Geräten muss auch an Messing oder folienüberschichtetem Kupfer kalibriert werden. Die Folienüberschichtung stellt dabei eine nicht leitfähige Korrosionsschicht dar und darf bei der Kalibrierung keinen relevanten Einfluss auf den Messwert haben. Eine Absenkung von 0,3 Ms/m kann jedoch vorkommen und ist als tolerierbar anzusehen. Nach der erfolgreichen Kalibrierung wird die Sonde einfach auf der Münze platziert. Hierbei muss laut folgender Abbildung darauf geachtet werden, dass die Sonde möglichst kompletten Kontakt zur Oberfläche hat. Hohes Relief führt zur geringeren Kontaktfläche und damit zu einer geringeren gemessenen Leitfähigkeit. In der Regel lässt sich ein 100%-iger Kontakt von Sonde und Münze nicht realisieren. Das ist aber auch nicht notwendig, da geringes Relief die Leitfähigkeit nur wenig absenkt. Dennoch muss das richtige Auflegen der Sonde geübt werden (Abb. 3).

Beim Anfänger sind auf Grund ungünstigen Auflegens der Sonde die gemessenen Werte manchmal durchweg zu niedrig. In Form einer schnellen Schulung durch einen fortgeschrittenen Anwender lässt sich die korrekte Anwendung jedoch schnell erlernen. Wichtig ist im Grunde nur, dass die Sonde ohne Wackeln an die Münze gelegt wird, so dass sich ein konstanter Leitfähigkeitswert einstellen kann. Schwankt der Wert, so wird gewackelt oder die Temperatur ändert sich zu schnell, weil z.B. die Münze zu kalt ist und nicht die Temperatur der Sonde hat oder sich das Messgerät noch nicht auf die Raumtemperatur eingestellt hat. Die Sonde sollte nicht zu fest angepresst werden, da sie die Münze beschädigen kann, wenn man abrutscht und so Kratzer verursacht. Bewährt hat es sich durch eine dünne Folie hindurch zu messen. So können Sonde und

Münze geschont werden. Als Folie eignet sich die von Verschlussbeuteln aus dem Küchenbereich. Frischhaltefolie ist für die Praxis zu dünn. Hartplastiktaschen für Münzen sind dagegen manchmal zu dick.

### Einsatzgebiet Münzen



**Abb. 4:** Einfluss eine Fehlstelle auf das Magnetfeld bei der Messung. Die Fehlstelle kann dabei eine Gusspore oder ein winziger Riss im Material sein. Die Störung des induzierten Wirbelstroms erzeugt einen höheren Widerstand, was in einer geringeren Leitfähigkeit resultiert. So lassen sich Guss und Prägung unterscheiden und sogar die Güte des Gusses beurteilen.

### Guss- oder Prägung

Ein Paradebeispiel für die Anwendung der LFK ist die Unterscheidung von Guss und Prägung. Diese Frage stellt die häufigste in der Echtheitsbestimmung von Münzen dar. Das Prinzip der Unterscheidungsmöglichkeit liegt darin, dass beim Guss zahlreiche Gussporen entstehen, welche die LFK der Münze absenken. Im direkten Vergleich zu einem echten geprägten Stück lässt sich an Hand der Größe der Messwertabsenkung sogar die Qualität des Gusses abschätzen.

Jede Fehlstelle, wie z.B. eine Gusspore oder ein Riss, verändern den induzierten Wirbelstrom in der Münze. Abbildung 4



**Abb. 5:** Gegossene Fälschung von 2 Reichsmark von 1905. Rechts Rasterelektronenmikroskopaufnahme (REM) der rot markierten Umrandung. Deutlich sind die Gussporen erkennbar. Diese senken die LFK der Münze auf unter 30 MS/m. Originale geprägte 2 RM und 5 RM Münzen weisen dagegen eine LFK i.d.R. von 37-45 MS/m auf. In diesem Fall lässt sich der Guss also mittels LFK leicht erkennen. Ein Vergleich mit Werten aus dem Buch „Weege 2 – Münzfälschungen Deutsches Kaiserreich“ verschafft hier schnell Klarheit.

veranschaulicht die Störung durch eine Fehlstelle. Auf Grund des erhöhten Widerstandes für den Stromfluss sinkt die LFK des Materials. Dieses Absenken kann bei groben Güssen über 50 % des Gesamtmesswertes ausmachen.

Es gibt jedoch eine Art von Guss, welche sich mit der herkömmlichen LFK nicht identifizieren lässt. Es handelt sich um Schleudergüsse. Diese sind qualitativ so hochwertig und die Poren so mikroskopisch klein und selten, dass diese wenigen Fehlstellen keinen merklichen Einfluss auf die LFK haben. Folgend wird ein Beispiel für die simple Erkennung eines Gusses vorgestellt (Abb. 5).

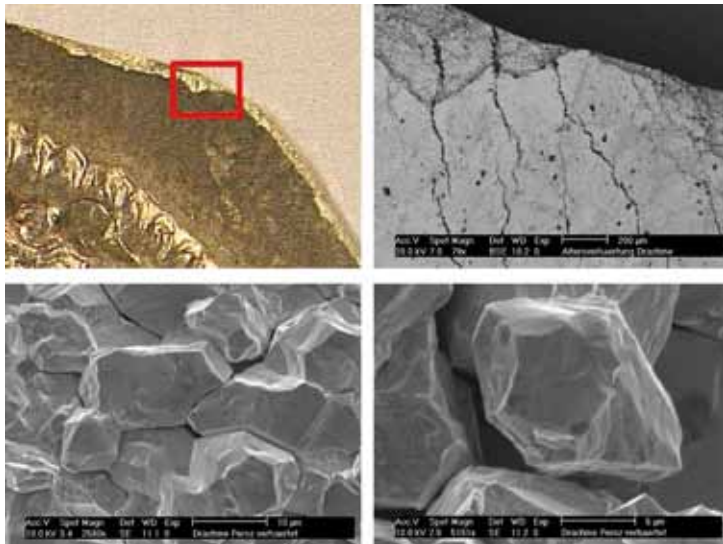
### Einsatzgebiet Barren

Eine der ersten kommerziellen Anwendungen der LFK in der Numismatik betraf den Edelmetallhandel. Darunter fällt auch der Handel mit Barren. Da durch eine Veränderung der Messfrequenz die Eindringtiefe geregelt werden kann, können so in wenigen Sekunden elegant gefälschte Barren mit dicker oder dünner Beschichtung erkannt werden. Allerdings funktioniert dies bei Edelmetallbarren i.d.R. nur mit Beschichtungen unter 2 mm Stärke, da dieser Wert oft die maximale Informationstiefe darstellt. Ein Problem bei der Messung von dicken Goldbarren (z.B. 1 Kg) ist ein störender Effekt, welcher die LFK erhöht. In der Literatur ist für reinstes Gold eine maximale LFK von 45,5 MS/m angegeben. An modernem reinem Barrengold kann jedoch eine LFK knapp über 46 MS/m gemessen werden. Eine höhere LFK von Gold als die in der Literatur als maximal mögliche erscheint zunächst unsinnig für einen Goldbarren. Dieser erhöhte Wert würde theoretisch auf eine drunter liegende Schicht von besser leitendem Kupfer oder Silber hindeuten, also einen unedleren Barrenkern mit einem Feingoldüberzug. Allerdings ist diese Interpretation deshalb falsch, weil die Feststellung der maximalen LFK viele Jahrzehnte her ist und damals wegen anderen Herstellungsverfahren das reinstes Gold im Schnitt schmutziger war als heute. Deshalb ist bei modernen Feingoldbarren eine leicht höhere LFK als die in der Literatur als maximal möglich angegebene möglich. Die Literaturangaben sind also oft überholt. Eine Korrektur in Nachschlagewerken braucht jedoch lange Zeit. Im Fälschungsbuch werden deshalb die aktuellen Vergleichswerte gelistet. Auf diese Weise lassen sich moderne von alten Goldbarren (50-er Jahre) unterscheiden. Diese Beobachtung wird im vorliegenden Artikel zum ersten Mal beschrieben.

### Alterszuordnung

Wenn eine antike Münze heute eingeschmolzen wird und dann die LFK-Änderung betrachtet wird, so ergeben sich deutliche Unterschiede. Bei Silber und Kupfer kann dies weit über 50 % sein. Bei Gold ist die Differenz jedoch oft deutlich unter 20 %. Zwar haben Verunreinigungen im Münzmetall i.d.R. den größten Einfluss auf die LFK, jedoch kommt noch der Faktor Alter hinzu. Der Grund im Abfall der LFK bei antiken Münzen, trotz identischer Zusammensetzung zu neu eingeschmolzenen antiken Münzen, liegt im Verhärten bzw. Umkristallisieren der Münze sowie tief gehenden Korrosionseffekten. Jedes Metall verändert sich im Laufe der Zeit. Dieser Faktor lässt sich bis heute nicht fälschen. Ein Alterungseffekt kann in der Regel nur bei Münzen älter als 200 Jahre festgestellt werden. Ein typisches Alterungsmerkmal ist, dass sich die Atome in der Münze neu strukturieren, was sehr lange Zeiträume benötigt. Die Atome sind in großen Paketen angeordnet, den sogenannten Kristalliten. Diese Kristallpackungen sind i.d.R. nur wenige millionstel Meter groß. Im Laufe der Jahrhunderte und Jahrtausende wandern die Atome langsam und strukturieren sich so neu, dass größere Kristallpackungen entstehen. Diese Kris-





**Abb. 6: Altersverhärtung einer antiken Silbermünze. Zunehmende Vergrößerung mit einem Rasterelektronenmikroskop bis zu über 5000-fach. Deutlich sind die großen Kristallite erkennbar, welche das Gefüge sprengen und sich langsam ablösen. Sowohl das Anwachsen der Kristallite als auch die Gefügezerstörung senken die LFK deutlich (teilweise Halbierung der LFK!), es kann von einem Alterungseffekt gesprochen werden. Aus dem hier gezeigten Grund werden Münzen auch spröde, so dass besonders antike Münzen leicht brechen können.**

tallite wachsen auf Größen von bis zu über 20 millionstel Meter. Sie werden also dutzende Male größer. Dadurch sinkt jedoch die Summe aller Oberflächen aller Kristallite in der Münze. Dies erfolgt nach dem Prinzip, dass das Verhältnis Oberfläche zum Volumen mit steigendem Volumen eines Körpers sinkt. Da der indizierte Strom jedoch hauptsächlich an der Oberfläche der Kristallite fließt, senkt eine kleinere Gesamtoberfläche der Kristallite die LFK deutlich ab. Dadurch spiegelt ein Teil der LFK-Absenkung indirekt den Umkristallisationsgrad wieder, welcher eine Altersinformation trägt. Da die Umkristallisation jedoch auch von den Lagerungsbedingungen im Boden abhängt und von Korrosionseffekten (z.B. tief gehende Spannungsrisskorrosion/Verhärtung) überprägt wird, ist nur eine sehr grobe Altersabschätzung möglich. Zumindest die Unterscheidung antik-modern funktioniert, wenn keine der zahlreichen anderen Einflussfaktoren die LFK stark verändern.

### Vergleichswerte mit der Datenbank

Seit langer Zeit verlangen die Anwender nach der Veröffentlichung von Datenbanken mit Referenzwerten für LFK-Messungen. An den Universitäten werden solche Datenbanken für Münzen verschiedenster Epochen erhoben. Bisher wurde die Veröffentlichung stets mit der Begründung abgelehnt, dass eine Fehlinterpretation vorprogrammiert ist, da gern Münzkategorien über einen Kamm geschoren werden. Dies ist tatsächlich die größte Gefahr bei solchen Datenbanken. Es dürfen bis auf Ausnahmefälle nur gleiche Prägungen verglichen werden. Natürlich gibt es jedoch grundsätzliche Prinzipien, welche auch Analogieschlüsse erlauben. Dies braucht jedoch eine tiefe Kenntnis der Materie. Ein grundsätzliches Prinzip wäre z.B. dass bei echten antiken Silbermünzen noch nie ein LFK-Wert über 50 MS/m gemessen wurde oder bei echten Aes Grave kaum ein Wert über 12 MS/m. Demnach sollte jede Münze genauer geprüft werden, welche diese Werte überschreitet. Eine Erklärung für die Überschreitung dieser experimentell bestimmten Grenze wäre z.B. die Feuerreduktion. Dabei wird eine Korrosionsschicht durch starkes Erhitzen

in der Flamme reduziert, was zur Rekristallisation der Münze führt, wenn etwa 2/3 der Schmelztemperatur erreicht werden (bei Gold bereits 400°C ausreichend). Dies erhöht die LFK.

Im angekündigten Fälschungsbuch werden zusammengefasste Gruppen der Datenbank mit mehreren tausend Münzanalysen veröffentlicht und angemahnt nur gleiche Prägungen zu vergleichen. So lassen sich venezianische Dukaten wegen des sehr hohen Goldgehaltes und sehr wenigen Verunreinigungen nicht mit Dukaten deutscher Regionen vergleichen. Das Gold war hierzulande zwar oft von gleichem Feingehalt, jedoch in den Spurenelementen viel schmutziger. Deshalb unterscheiden sich auch die LFK-Werte deutlich. Während im Mittelalter die venezianischen Zecchinen LFK-Werte um 36-41 MS/m zeigen, weisen z.B. ungarische Goldgulden Werte um 20-33 und die deutschen Gulden schlechteren Feingehaltes teilweise sogar unter 10 MS/m auf. Römische Aurei aus reinem Gold reichen dagegen nahe an die Zecchinen, erreichen die Werte jedoch selten. Kein Wunder, liegen doch trotz ähnlichem Feingehalt hunderte Jahre dazwischen.

Folgend wird ein kurzer Auszug aus dieser Datenbank gegeben. Zu beachten ist, dass die Werte bei 60 kHz mit einer 11,5 mm Sonde ermittelt wurden. Bei manchen Geräten bedarf es zum Vergleich mit der Tabelle einer Umrechnung der Einheiten, was im Buch mit Umrechnungstabellen erklärt wird. Heutzutage sind die verschiedenen Sonden jedoch meist geeicht und liefern identische Werte. Bei den genannten Parametern beträgt die Informationstiefe (Tiefe aus welcher das Messsignal noch detektiert werden kann) in Silber knapp 2 mm, in Gold knapp 1 mm und in Platin knapp 0,6 mm.

Münztyp	LFK in MS/m
Alle historischen Silbermünzen Mittelalter/Antike	< 50
Alle historischen Goldmünzen Mittelalter/Antike	< 41
Venezianische Zecchinen/Dukaten	~ 36-41
Karolingische Denare (typische)	um 15
Merowingische Tremissis (typische)	um 8
Frühes Elektron (typisch griechisch/anatolisch)	< 10
Aes Grave	< 12
Kaiserreich 5 Reichsmark Au	~ 5-8
Platinrubel aus Sinterplatin	~ 8-12

Hunderte weitere Werte für Münzen aller Epochen und Länder mit den Schwankungsintervallen aus der Analyse tausender Münzen sowie genauer Erläuterung können dem Fälschungsbuch entnommen werden. Besonders die Schwankungsintervalle sind sehr wichtig um eine Zuordnung machen zu können.

Im zweiten Teil des Artikels über die Leitfähigkeitsmessung werden die Möglichkeiten und vor allem Grenzen der Methode vorgestellt und an Hand zahlreicher Fallbeispiele und deren Interpretationsmöglichkeiten verdeutlicht. Hier werden insbesondere Bestandsprüfungen von karolingischen Denaren, Aes Grave, griechischen Mehrfachstateren, Platinrubeln, Keltenstateren und Kaiserreichsmünzen vorgestellt.

*Alle Bilder wurden von Artur und Robert Lehmann erstellt.*

Anzeige