

Marianne Senn / Hans J. Leber / Martin Tuchs Schmid / Naila Rizvic<sup>1</sup>

## **Blechblasinstrumentenbau in Frankreich im 19. Jahrhundert. Analysen von Legierung und Struktur des Messings zugunsten eines historisch informierten Instrumentenbaus**

**Zusammenfassung** Dieser Beitrag fasst die materialwissenschaftlichen Untersuchungen zusammen, die notwendig waren, um die französischen Blechblasinstrumente aus dem 19. Jahrhundert zu charakterisieren. Sie basiert auf energiedispersiven Röntgenfluoreszenz-Analysen (ED-XRF) von über 40 Instrumenten (siehe Liste auf Seite 382 f.) aus Frankreich an allen interessierenden Bauteilen. Diese Datenbank ermöglichte es, eine durchschnittliche französische Legierung für die 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts zu bestimmen ( $\text{CuZn}_{32-34}\text{Pb}_1$ ). Aus dieser Legierung sollten historisch informiert gebaute Instrumente hergestellt werden. Es gelang einem asiatischen Produzenten, entsprechende Bleche herzustellen, die heute bei Blechblas-Instrumentenbau Egger in Basel Verwendung finden. Metallographische Untersuchungen zeigen die speziellen Eigenschaften auf, die das Messing durch die Verarbeitung im Instrumentenbau erhält. Es wandelt sich vom weichen Ausgangsblech in ein etwas härteres Endprodukt, bei dem vor allem die leicht härteren Oberflächen auffallen. Es bleibt aber möglichst spannungsfrei. Bei Blechblas-Instrumentenbau Egger nachgebaute Instrumente unterscheiden sich nur geringfügig von den historischen.

**1. Beiträge zur Erforschung von Messing-Legierungen der Neuzeit** Wie der Artikel von Jean-Marie Welter in diesem Band aufzeigt (Seite 384–397), ist Messing aus dem 19. Jahrhundert das erste Messing, welches modernem Messing vergleichbar ist. Bereits im 18. Jahrhundert stellt die Messingherstellung von im Zementierverfahren hergestelltem, zinkarmem Messing auf im direkten Verfahren hergestelltes, zinkreiches Messing um. Diese technische Neuerung macht es möglich, Messing-Legierungen mit einem Zinkgehalt von über 30 % herzustellen. Moderne Kupfer-Zink-Legierungen enthalten 5–45 % Zink. Man unterscheidet zwischen reinen Kupfer-Zink-Legierungen, solchen mit Blei-Zusatz zur besseren Zerspanbarkeit sowie Mehrstofflegierungen oder Sondermessing, die weitere Legierungselemente wie beispielsweise Aluminium, Eisen, Mangan, Nickel, Silizium, Phosphor und Zinn enthalten. Die in den Mehrstofflegierungen beigemischten Legierungselemente kommen mit Ausnahme von Zinn und Nickel im Messing des 19. Jahrhunderts noch nicht vor. Beim modernen Messing unterscheidet man zwischen

<sup>1</sup> Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, CH-Dübendorf (Marianne Senn, Martin Tuchs Schmid), PSI, Paul Scherrer Institut, CH-Villigen (Hans J. Leber), IWR, Institut für Werkstofftechnologie, CH-Wallisellen (Naila Rizvic).

Guss- und Knetlegierungen. Knetlegierungen haben entweder keinen oder einen geringen Bleigehalt und eignen sich für die bildsame Formgebung (Ziehen, Hämmern, Drücken, Treiben). Gusslegierungen können einen erheblichen Blei-Zusatz enthalten. Am besten geeignet für die Kaltumformung, die ein wichtiger Bestandteil des Instrumentenbaus ist, sind aus heutiger Sicht Werkstoffe mit der Zusammensetzung CuZn<sub>30</sub>, was einem Zinkgehalt um 30 % entspricht.<sup>2</sup> Doch wie verhält es sich mit Messing aus dem 19. Jahrhundert?

Die wohl größte Arbeit zur Erforschung von historischen Messing-Legierungen stammt aus dem letzten Jahrhundert und wurde von Otto Werner an deutschem Material erarbeitet.<sup>3</sup> Allerdings untersuchte er gegossene Objekte, meist aus religiösem Umfeld (Kruzifixe, Leuchter, Reliquiare et cetera). Unter ihnen befinden sich über dreißig Objekte aus dem 19. und 20. Jahrhundert. In deren Legierung spielt Zinn und Blei eine nicht unerhebliche Rolle, die Zinkgehalte sind teilweise eher gering (10 % und weniger), nur in zwei Fällen liegen sie über 30 %. Eine weitere gut erforschte Gruppe aus Messing sind Rechenpfennige, die zwischen 1475 und 1888 in Nürnberg hergestellt wurden.<sup>4</sup> Ihre chemische Zusammensetzung wurde nach einer örtlichen Reinigung der Analysenstelle mittels ED-XRF untersucht. Rechenpfennige sind zweiseitig geprägte Schrötlinge. Die Prägung erfolgt im kalten Zustand. Ihre chemische Zusammensetzung unterscheidet sich stark von den von Werner untersuchten Objekten, denn es handelt sich vorwiegend um Messing mit eher hohem Zinkgehalt und Blei- und Zinngehalten meist unter 1 %. Ende 15. bis Mitte 16. Jahrhundert wiesen die Rechenpfennige einen mittleren Zinkgehalt von 19 % (12–27 %) auf, der Bleigehalt lag in der Regel unter 1 %. In der Zeit zwischen 1550 und 1580 ist dann eine Verschlechterung des Ausgangsmaterials fassbar, die sich in höheren Blei- und Zinngehalten und tieferen Zinkgehalten äußert. Die Autoren werten das als Anzeichen für die Verwendung von rezykliertem Kupfer oder Messing als Ausgangsmaterial. Gleichzeitig beginnt die Zeit, da die Rechenpfennige bestimmten Münzmeistern zugeordnet werden können. Es sind nur einige, die rezykliertes Ausgangsmaterial verwenden, andere zielen auf eine Zusammensetzung mit 80 % Kupfer und 20 % Zink und einen Bleigehalt unter 1 %. Gleichzeitig werden erste Rechenpfennige mit tiefem Zinkgehalt (um 4 %) hergestellt und solche aus reinem Kupfer. In der ersten Hälfte des 17. Jahrhunderts wird diese Materialauswahl beibehalten, einzelne Familien verwen-

- 2 Kupfer-Zink-Legierungen (Messing und Sondermessing), hg. vom Deutschen Kupferinstitut, Düsseldorf 2007 (Informationsdruck I5), S. 6.
- 3 Otto Werner: Analysen mittelalterlicher Bronzen und Messinge I, in: *Archäologie und Naturwissenschaften* 1 (1977), S. 144–220; ders.: *Analysen mittelalterlicher Bronzen und Messinge II und III*, ebd., 2 (1981), S. 106–170.
- 4 M.B. Mitchener, C. Mortimer und A. M. Pollard: Nuremberg and its Jetons, c. 1475 to 1888. Chemical compositions of the alloys, in: *The Numismatic Chronicle* 147 (1987), S. 114–155.

den Messing mit einem Zinkgehalt um 25%. Die Rechenpfennige aus Messing mit geringem Zinkgehalt und Kupfer sind nur von marginaler Bedeutung. In der 2. Hälfte des 17. Jahrhundert findet man dann Zinkgehalte bis 29% in den Rechenpfennigen, ein Hinweis, dass granuliertes Kupfer zur Herstellung von Messing verwendet wurde, welches eine stärkere Zinkanreicherung im zementierten Messing erlaubt. In der ersten Hälfte des 18. Jahrhundert verändert sich nur wenig an der Legierung der Rechenpfennige, aber ab Mitte des 18. Jahrhunderts trifft man auf Messing mit einem mittleren Zinkgehalt um 35%, das zweifelsohne im direkten Verfahren hergestellt wurde. Zementiertes Messing und Messing aus dem direkten Verfahren werden nebeneinander verwendet. Das im direkten Verfahren hergestellte Messing hat einen deutlich höheren Bleigehalt (1–2%) als das im Zementierverfahren hergestellte. Im 19. Jahrhundert sinkt der Bleigehalt im direkt hergestellten Messing wieder unter 1% und es werden Legierungen verwendet, die entweder ein Viertel (um 25%) oder ein Drittel (um 33%) Zink enthalten. Einzelne Familien verwenden auch Legierungen mit bis zu 37% Zink. Anfang des 19. Jahrhunderts sind die verwendeten Legierungen variabler als zuvor und danach, möglicherweise als Folge einer unsicheren Versorgung mit Rohmaterialien während der Napoleonischen Kriege, aber auch weil die Rechenpfennige nun teilweise mit Silber plattiert wurden.

Diese Arbeit zeigt sehr gut, dass bereits ab Ende des 16. Jahrhunderts Werkstätten mit einer großen Produktion (Rechenpfennige wurden nach ganz Europa verhandelt) wohldefinierte Legierungen benutzten und wann sich welche Herstellungstechniken wie im Material spiegeln.

Hachenberg führte 2002 eine Untersuchung an Blechblasinstrumenten aus Nürnberg durch.<sup>5</sup> Er weist darauf hin, dass gegossene Objekte andere Materialqualitäten haben und eben oft mehr Zinn und Blei enthalten als geschmiedete. Auch stellt er klar, dass ein Instrumentenbauer ein Instrument nicht aus Metall eines Herstellers baut, sondern aus den passenden Metallstücken, die er in seiner Werkstatt gerade hat. Es handelt sich ja hierbei um eine eher kleine Produktion. Deshalb muss es nicht verwundern, wenn sich die verschiedenen Instrumententeile in ihrer chemischen Zusammensetzung leicht unterscheiden. Der Unterschied wird noch grösser, wenn gegossene (Mundstück) und geschmiedete Teile (Rohre) miteinander verglichen werden. Hachenberg handelt die Entwicklung des Nürnberger Messings vergleichend zu obiger Untersuchung an Nürnbergschen Rechenpfennigen aus der Themse bei London ab. Er wählt dieses Beispiel, weil er annimmt, dass für den Instrumentenbau in Nürnberg vergleichbare Materialien verwendet wurden. Die Zusammensetzung der Rechenpfennige vergleicht er mit Nürn-

5 Karl F. Hachenberg: Nürnberger Musikinstrumente aus Messing, in: *Anzeiger des Germanischen Nationalmuseums* (2002), S. 201–211.

berger Instrumenten (7 Stück) aus dem 17. Jahrhundert und Instrumenten aus Deutschland und Österreich aus dem 18. Jahrhundert (8 Stück). Generell ist die chemische Zusammensetzung der Rechenpfennige und der Instrumente vergleichbar, da die Instrumente effektiv aus Messing mit einem hohen Zinkgehalt und einem geringen Bleigehalt gefertigt sind. Der Zinkgehalt schwankt bei denjenigen aus Nürnberg aus dem 17. Jahrhundert zwischen 20 und 33 %, der Bleigehalt erreicht in einem Fall fast 2 %, liegt aber sonst unter 0,7 %. Das Instrument mit dem Zinkgehalt über 30 % wirft Rätsel auf (Datierung um 1680), da zu dieser Zeit erst die Granulationstechnik aufkommt, die Zinkgehalte bis knapp unter 30 % zulässt. Da nur wenige Analysen von verschiedenen Herstellern zur Verfügung stehen, lassen sich die Resultate nicht weiter interpretieren. Die Instrumente aus dem 18. Jahrhundert unterscheiden sich vor allem durch ihre höheren Bleigehalte von denjenigen des 17. Jahrhunderts (bis 5 % Blei). Dies stellt eine Parallele zur Entwicklung bei den Rechenpfennigen dar, auch wenn für die Instrumente ein Messing mit geringeren Zinkgehalten als für die Rechenpfennige verwendet wird (12 beziehungsweise 23–30 %). Hachenberg lehnt es ab, aus der chemischen Zusammensetzung Rückschlüsse auf die Herkunft der Metalle zu ziehen. Diese Ansicht wird von Pernicka teilweise unterstützt.<sup>6</sup> Er bezieht sich auf die riesigen Datenbanken mit Analysen archäologischer Objekte aus Kupfer-Legierungen und weist darauf hin, dass es wohl möglich ist, mit Hilfe der chemischen Zusammensetzung Werkstätten und Werkstattkreise zu definieren, nicht aber die Herkunft. Um diese zu bestimmen, wäre es nötig, Blei-Isotope kombiniert mit Spurenelementen zu messen und diese mit den Daten der Ausgangserze zu vergleichen.

Einen weiteren Zugang zu Messing aus dem 17.–19. Jahrhundert (1624–1880) bietet die Untersuchung von etwa dreißig Orgelzungen aus ganz Europa.<sup>7</sup> Deren Legierung ist den Blechblasinstrumenten und Rechenpfennigen ähnlich. Die zusammengerechneten Konzentrationen weiterer Elemente in den Orgelzungen wie zum Beispiel Eisen, Mangan, Nickel und Zinn waren tief, sie lagen im 17. Jahrhundert unter 1 % und im 19. Jahrhundert unter 0,3–0,5 %. Die Zinkkonzentration war erstaunlich konstant: in der Zeit zwischen 1629 und 1790 schwankte sie um 26 %. Um 1750 tauchte dann eine zweite Legierung auf mit einem Zink-Gehalt um 32,5 %. Die beiden Legierungen existierten während 40 Jahren nebeneinander. Dann setzte sich die zweite Legierung durch, die heute noch in Gebrauch ist. Der Bleigehalt geht von 7–8 % im 17. Jahrhundert auf 2 % Mitte 18. Jahrhundert zurück. Die ersten bleifreien Messing-Orgelzungen erscheinen

6 Ernst Pernicka: Gewinnung und Verbreitung der Metalle in prähistorischer Zeit, in: *Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums* 37 (1990), Teil 1, S. 21–129, hier S. 67.

7 Birgitte Baretzky, Milan Friesel und Boris Straumal: Reconstruction of Historical Alloys for Pipe Organs brings true baroque music back to life, in: *MRS Bulletin* 32 (2007), S. 249–255.

dann um 1750. Nach 1820 enthalten die Orgelzungen kein Blei mehr. Dieselbe Abnahme im Blei-Gehalt über den gleichen Zeitraum findet sich erstaunlicherweise auch in Kanonen-Bronze (Kupfer-Zinn-Legierung). Die Glühtemperatur während der Bearbeitung (Hämmern auf die gewünschte Dicke) der Orgelzungen wurde basierend auf der Untersuchung der Zwillingstrukturen im Metallgefüge auf 600 °C geschätzt. Mit Hilfe der neuen Erkenntnisse war es möglich, alte Orgeln sachgerecht zu renovieren und wieder in Betrieb zu nehmen.

2003 erschien die Doktorarbeit von Louise Bacon, in der sie zahlreiche englische Blechblasinstrumente aus der Zeit von 1651 bis 1867 vorstellte.<sup>8</sup> In ihrem Katalog zeigt sie Aufnahmen aller Instrumente mit einer Beschreibung, begleitet von chemischen Analysen an verschiedenen Teilen der Instrumente und von sechs metallographischen Untersuchungen. Als Analyse-Technik benutzt sie ED-XRF, die Analysen wurden an der Luft an stationären Geräten in verschiedenen englischen Museen ausgeführt. In ihrer Arbeit sind alle Instrumente mit Hersteller-Inschrift aus dem England des 17. Jahrhunderts zusammengestellt. Aus dem 19. Jahrhundert stellt sie Instrumente der Familie Pace aus London vor, solche von Charles und Frederick Pace, von Charles Pace sowie von Charles Pace und Söhne. 83 Instrumente können der Familie Pace zugeordnet werden. 40 von 68 Instrumenten, die von Pace erhalten sind, wurden analysiert. Die Instrumente bestehen vorwiegend aus leicht bleihaltigem Messing, aber auch aus Kupfer (Kupferinstrumente waren damals beim englischen Militär beliebter). Gewisse Instrumententeile bestehen aus Neusilber, einer Kupfer-Zink-Nickel-Legierung, und wenige aus silberreichen Legierungen. Die Resultate der metallographischen Untersuchungen beziehen sich auf Instrumente aus dem frühen 20. Jahrhundert<sup>9</sup> und werden sehr zurückhaltend präsentiert. Das Messing zeigt überall ein einphasiges  $\alpha$ -Messing-Gefüge mit polygonalen Körnern und Glühwillingen. Dies lässt darauf schließen, dass die Instrumente in einem letzten Arbeitsgang gegläht wurden. Unter den Messing-Legierungen dominieren solche mit einem Zinkgehalt zwischen 33 und 35%, eine kleinere Gruppe variiert zwischen 29 und 32%. Nur wenige Instrumente haben einen geringeren (9–28%) oder höheren Zinkgehalt (36–37%). Einzig der Bleigehalt zeigt eine klare Entwicklung im 19. Jahrhundert. Er sinkt von anfänglich über 3% unter 1% in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts.

Hannes Vereecke, Bernadette Frühmann und Manfred Schreiner befassen sich in einer 2012 publizierten Untersuchung mit den an Posaunen des 16. Jahrhunderts aus

8 Alice Louise Bacon: A technical study of the alloy compositions of »brass« wind musical instruments (1651–1867) utilizing non-destructive X-ray fluorescence, PhD thesis, London 2003.

9 Ebd., Bd. I, S. 127.

Nürnberg festgestellten Messing-Legierungen.<sup>10</sup> Sie bestätigen die Feststellungen von Hachenberg<sup>11</sup> zu typischen Legierungen im Musikinstrumentenbau und diskutieren Einschränkungen beim Einsatz von Röntgenfluoreszenzanalysen für Oberflächen, die durch Patina oder Behandlungen beschichtet sind.

**2. Die Messing-Legierungen französischer Blechblasinstrumente im 19. Jahrhundert** Die Untersuchungen im hier vorgestellten Projekt wurden unternommen, um es der Firma Blechblas-Instrumentenbau Egger in Basel zu ermöglichen, Instrumente aus der Mitte und der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts aus Frankreich nachzubauen. Als grundlegendes Element für dieses Ziel mussten die Legierungen der Instrumente aus dem Frankreich des 19. Jahrhunderts erarbeitet werden. Als Methode wurde wie bei den Rechenpfennigen und Posaunen aus Nürnberg und den Blechblasinstrumenten aus England ED-XRF gewählt, und zwar mithilfe eines mobilen Geräts, wie es an der Empa sonst für Analytik vor Ort bei Schadenfällen genutzt wird. Die Analysen wurden alle von Martin Tuchschnid ausgeführt.

Die energiedispersive Röntgenfluoreszenzanalyse basiert auf dem Prinzip der Anregung der Probe mittels Röntgenstrahlen. Als Reaktion sendet jedes chemische Element spezifische Röntgenfluoreszenzstrahlung aus. Die Intensität dieser Wellen kann abhängig von der Wellenlänge beziehungsweise Energie gemessen beziehungsweise detektiert werden. So können alle natürlichen Elemente mit einer Ordnungszahl  $Z$  grösser als 12 (Magnesium) im Periodensystem bis hinab zu Uran gemessen werden. Zur Analyse verwendet wurde ein Gerät des Typs NITON XL3T GOLDD+ des Herstellers Thermo Scientific. Auf Abbildung 1 sieht man die Handhabung dieses Geräts an einem Instrument. Zur Untersuchung der Instrumente wurde der *alloy-mode*, der Messmodus für Metalle, verwendet. Die Nachweisgrenze variiert von 0,01 bis 0,1 Massenprozent, je nach Element und Matrix. Die relative Standardabweichung des Analysenwerts beträgt elementabhängig 1–5%. Als einziges wesentliches Element wurde Arsen nicht gemessen. Das Gerät zeigt die Anwesenheit dieses Elements in den Spektren wohl an, es kann aber mit der eingesetzten Konfiguration nicht quantifiziert werden.

An jedem Mess-Tag wurde zuerst eine interne Gerätekalibrierung ausgeführt, anschließend wurde eine Anzahl Messing-Standardmaterialien gemessen. Dann erfolgte

- 10 Hannes W. Verecke, Bernadette Frühmann und Manfred Schreiner: The Chemical Composition of Brass in Nuremberg Trombones of the Sixteenth Century, in: *Historic Brass Society Journal* 24 (2012), S. 61–75.
- 11 Karl F. Hachenberg: Der Werkstoff Messing im Musikinstrumentenbau vom 16. bis zum Ende des 18. Jahrhunderts, in: *Jagd- und Waldhörner. Geschichte und musikalische Nutzung*, 25. Musikinstrumentenbau-Symposium Michaelstein, 8. bis 10. Oktober 2004, hg. von Boje E. Hans Schmuhl und Monika Lustig, Augsburg 2006 (Michaelsteiner Konferenzberichte, Bd. 70), S. 433–448, hier S. 439.

die Analyse der Instrumente. Jede Messstelle wurde zwei- bis dreimal analysiert. Das Resultat ist ein daraus berechneter Mittelwert mit der entsprechenden Standardabweichung. Die Messzeit pro Analyse betrug meistens 20–30 Sekunden, manchmal 60 Sekunden. Die kurze Messzeit ermöglichte es, zahlreiche Instrumente und Instrumententeile in den Museen in begrenzter Zeit zu analysieren. Systematisch aufgeführt in den Datenblättern zu jedem

Instrument wurden die Elemente Kupfer Cu, Zink Zn, Blei Pb, Zinn Sn, Antimon Sb, Nickel Ni, Eisen Fe, Mangan Mn und Cobalt Co, die in einer Messzeit von 20–30 Sekunden erhoben werden konnten. Etwas weniger oft wurden zusätzlich Silicium Si, Aluminium Al und Phosphor P während einer Messzeit von 60 Sekunden bestimmt. Silicium und Aluminium sind keine Legierungselemente dieser Instrumente, sondern können von Korrosion, Verunreinigungen der Oberfläche oder von Lacken auf dem Metall stammen. Mangan und Phosphor als moderne Legierungselemente von Sondermessing konnten in keinem Instrument nachgewiesen werden. Alle weiteren, nicht aufgezählten Elemente mit Ausnahme von Arsen waren nicht nachweisbar. Ein Analysen-Satz, wie er für ein untersuchtes Instrument typisch ist, ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Analysenwerte werden folgendermaßen gelesen (Beispiel Pos 1-A und darunter SA): Kupfer 66,8 ± 0,4% et cetera. Es wurden 53 Instrumente aus dem 19. Jahrhundert analysiert, von denen 41 aus Frankreich stammen (siehe die Auflistung der Instrumente auf Seite 382f. in diesem Band). Die französischen Instrumente stammen vorwiegend von Instrumentenbauern aus Paris, aber auch aus anderen Städten. Es wurden immer mehrere Instrumententeile analysiert (Kranz, Schall, Anstoß, Mundrohr et cetera), im Minimum jedoch Schall und Kranz.

Die chemische Zusammensetzung der französischen Instrumente aus dem 19. Jahrhundert zeigt folgende Schwankungsbreite: die Hauptelemente Kupfer und Zink variieren zwischen Gehalten von Cu 64–72% und Zn 21–35%. Die Nebenelemente Blei und Zinn schwanken zwischen Pb <0,05–3,5% und Sn <0,05–0,7%. In den wenigen analysierten Mundstücken treten vereinzelt höhere Blei- und Zinngehalte auf. Als Spurenelemente konnten Eisen, Nickel und Antimon festgestellt werden. Ihre Gehalte variieren zwischen Fe 0,05–0,5%, Ni <0,05–0,3% und Sb <0,05–0,1%. Davon erreicht Eisen vereinzelt in Mundstücken höhere Gehalte. Die wichtigsten chemischen Eigenschaften betreffend Zink- und Bleigehalte sowie das Verhältnis Kupfer/Zink wurden in chronologischen Grafiken ausgewertet (Abbildungen 3–5). Die Symbole (Raute, Quader, Dreieck und Kreis)



ABBILDUNG 1 Das mobile NITON-Gerät im Einsatz am Horn Nr. 2

Blechblasinstrumente Strasbourg 1812	ED-XRF Analysen, zerstörungsfrei NITON XL3t: <i>Alloy-mode</i> , Messzeit 60 s (30 <i>main</i> + 30 <i>low</i> , ohne He-Spülung)											
Horn Kretschmann, Nr. 2, Mürner Bern	Cu	Zn	Pb	Sn	Sb	Ni	Fe	Mn	Co	Si	Al	P
	Massen%											
Pos. 1-A, Kranz blank	<b>66,8</b>	<b>29,8</b>	<b>2,6</b>	0,07	<0,05	0,08	<b>0,25</b>	<0,05	<0,05	n.a.	n.a.	n.a.
SA	0,4	0,3	0,1	0,01		0,01	0,03					
Pos. 2-A, Schall blank	<b>67,5</b>	<b>30,8</b>	<b>0,99</b>	<b>0,16</b>	<0,05	0,06	<b>0,28</b>	<0,05	<0,05	n.a.	n.a.	n.a.
SA	0,2	0,3	0,02	0,01		0,02	0,02					
Pos. 3-A, Anstoß blank	<b>67,3</b>	<b>30,1</b>	<b>1,9</b>	<0,05	<0,05	<b>0,16</b>	<b>0,25</b>	<0,05	<0,05	n.a.	n.a.	n.a.
SA	0,3	0,2	0,2			0,01	0,02					
Pos. 4-A, Mundrohr blank	<b>67,3</b>	<b>30,0</b>	<b>2,0</b>	(0,05)	<0,05	<b>0,20</b>	<b>0,21</b>	<0,05	<0,05	n.a.	n.a.	n.a.
SA	0,1	0,1	0,1			0,01	0,01					
Pos. 5A, Mundrohrhülse blank	<b>67,0</b>	<b>31,0</b>	<b>0,96</b>	<b>0,31</b>	<0,05	0,06	0,11	<0,05	<0,05	n.a.	n.a.	n.a.
SA	0,2	0,2	0,06	0,03		0,01	0,01					

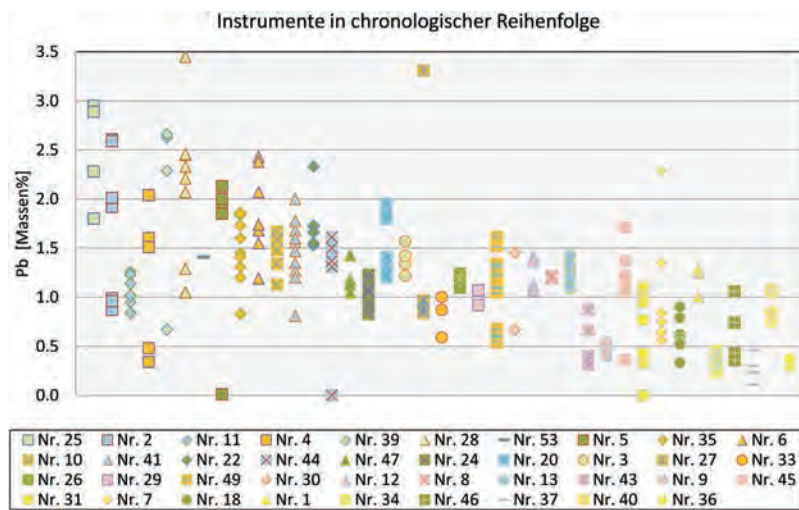
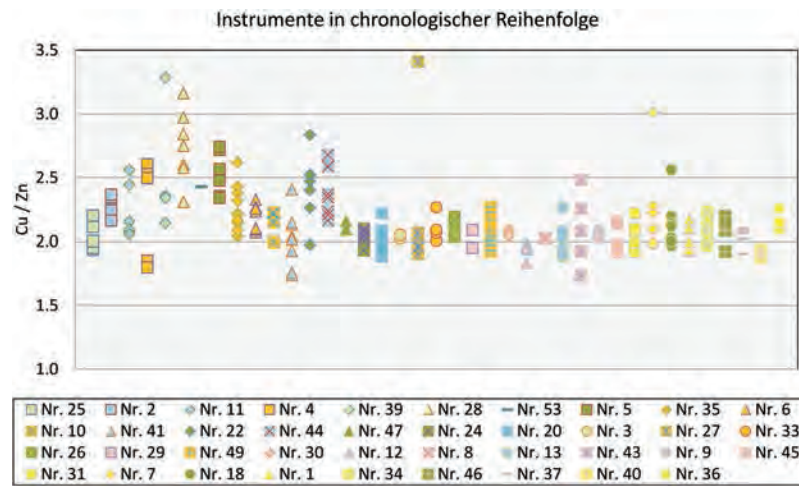
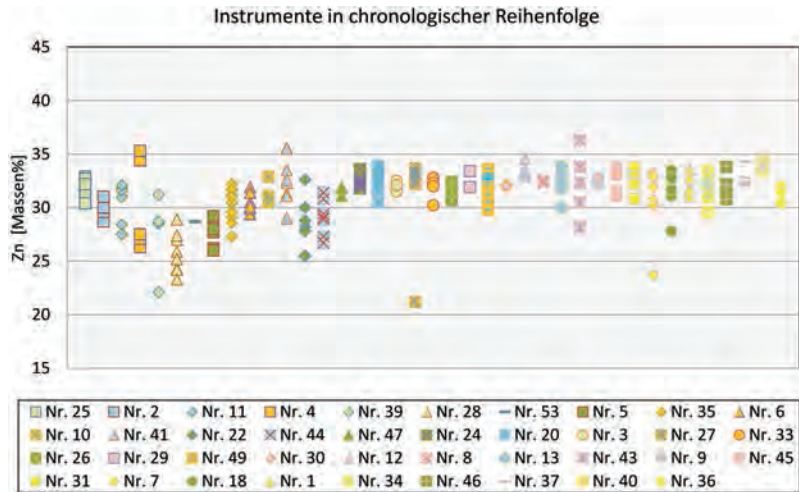
**ABBILDUNG 2** ED-XRF-Analyse eines Instrumentes wie sie im Datenblatt des Instrumentes 2 aufgeführt ist, SA Standardabweichung, n. a. nicht analysiert

dienen der Unterscheidung der jeweiligen Instrumente in der Grafik und sind in der Legende mit der Nummer des entsprechenden Instruments aus der Instrumentenliste ergänzt (Instrumentenliste auf Seite 382 f.). Die Resultate der Messungen der verschiedenen Bauteile jedes Instruments sind vertikal angeordnet. Die Farben stehen für die einzelnen Hersteller: hellgelb bezeichnet Millereau, orange Courtois, dunkelgrün Raoux und hellgrün andere, kleine Pariser Instrumentenbauer wie Halary und Périnet, rosa steht für die großen Pariser Instrumentenbauer Sax, Gautrot und Besson, blau für Produzenten aus dem restlichen Frankreich wie Kretschmann aus Straßburg und Müller aus Lyon.

Bis 1840 weist der Zinkgehalt große Schwankungen auf und liegt oft unter 30% (Abbildung 3). Anschließend stabilisiert er sich zwischen 31 und 34%. Dementsprechend beginnt sich das Verhältnis Cu/Zn ab 1850 ebenfalls zu stabilisieren und variiert mehrheitlich nur noch zwischen 2 und 2,3 (Abbildung 4). Der Bleigehalt liegt in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts über 1,5% und fällt erst nach 1860 darunter (Abbildung 5). Die Mehrzahl der Instrumente hat noch vor Mitte des 19. Jahrhunderts keine messbaren Gehalte an Spurenelementen mehr, mit Ausnahme von Eisen. Ebenso verhält es sich mit dem Nebenelement Zinn. Der Eisengehalt sinkt nach 1840 mit wenigen Ausnahmen auf höchstens 0,1%. Vergleicht man diese Ergebnisse mit den Rechenpfennigen so fällt auf, dass hier ebenfalls Anfangs des 19. Jahrhunderts größere Variationen fassbar werden. Allerdings dauern die Variationen bei den Instrumenten viel länger an als die Napoleonischen Kriege. Der Bleigehalt in den französischen Instrumenten ist weit höher als in den Nürnberger Rechenpfennigen und etwas höher als in den von Bacon untersuchten englischen Instrumenten. Er ist ebenfalls höher als in den deutschen Instrumenten, die im Rahmen dieses Projekts untersucht wurden. Generell variieren die französischen Daten stärker als die aus England und Nürnberg. Das liegt hauptsächlich daran, dass in Frankreich Instrumente von zahlreichen Herstellern untersucht wurden, während in



ABBILDUNG 3–5 Entwicklung des Zinkgehalts (oben), des Kupfer-Zink-Verhältnisses (Mitte) und des Bleigehalts (unten) in französischen Blechblasinstrumente im 19. Jahrhundert. Die Nummern beziehen sich auf die Instrumentenliste, gleiche Farben markieren gleiche Hersteller.



England ein Hersteller und seine Familie untersucht wurden und in Nürnberg sich einige wenige Familien die Herstellung aufteilten. Im Gegensatz dazu gibt der Datensatz einen guten Eindruck über die Bandbreite der französischen Messing-Legierungen von Blechblasinstrumenten im 19. Jahrhundert.

Als typische Legierung der zweiten Hälfte des 19. Jahrhundert für den Nachbau französischer Blechblasinstrumente wurde ausgehend von den hier vorgestellten Resultaten die Legierung  $\text{CuZn}_{32-34}\text{Pb}_1$  festgelegt.

Nr.	Instrumententeil	Cu	Zn	Pb	Sn	Sb	Ni	Fe	Cu/Zn
28	Einsteckbogen	73,7	23,3	1,3	<b>0,69</b>	<0,05	0,07	<b>0,50</b>	3,2
27	Mundstück	72,3	21,2	3,3	<b>1,8</b>	0,12	0,12	<b>0,68</b>	3,4
7	Mundstück	71,4	23,7	2,3	<b>1,0</b>	<0,05	0,21	<b>0,70</b>	3,0

**ABBILDUNG 6** Instrumententeile mit erhöhtem Zinn- und Eisengehalt: Nr. 28 (Raoux-Horn, Paris 1820), Nr. 27 (Courtois-Trompete, Paris um 1853) und Nr. 7 (Millereau-Cornet, Paris 1866–1876)

Eine weitere Frage bezüglich der Interpretation der chemischen Zusammensetzung ist sicher die, ob noch Material verwendet wurde, das aus zementiertem Messing hergestellt wurde. Zementiertes Messing zeichnet sich durch seine höheren Eisengehalte aus, enthält aber oft auch mehr Zinn. Abbildung 6 zeigt die Instrumententeile mit den höchsten Zinn- und Eisengehalten im gesamten Datensatz. Einzig beim Einsteckbogen des Raoux-Hornes kann vermutet werden, dass es sich hier um ein Teil handelt, welches noch aus zementiertem Messing hergestellt wurde. Für die gegossenen Mundstücke ist diese Schlussfolgerung nicht zwingend, denn gegossenes Messing kann auch im 20. Jahrhundert noch über ein Prozent Zinn enthalten und einige Zehntelprozent Eisen.<sup>12</sup> Die sechs analysierten Mundstücke enthalten im Vergleich zu den restlichen Instrumententeilen auch mehr Blei (1–6%).

**3. Die Struktur des Messings einiger Blechblasinstrumente: alt versus modern** Mit der Bestimmung der Durchschnittslegierung der französischen Blechblasinstrumente in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts war die Frage nach dem Material geklärt. Für den Nachbau war aber eine zweite Frage genauso wichtig: welche Materialeigenschaften hat ein solches Instrument? Um dies zu verstehen, bedarf es einer kurzen Einführung in die historisch informierte Fertigung solcher Instrumente.

In einem ersten Schritt wird das gewünschte Teil aus einem Blech zugeschnitten (Schallstück, Rohr et cetera). Dann wird beim Schallstück die gezackte Lötstelle geschnitten und anschließend mit einem Hartlot bei Temperaturen um 800 °C verschlossen. Daraufhin beginnt die Formgebung. Diese besteht aus 5 bis 10 Arbeitsschritten, zwischen

<sup>12</sup> Werner: Analysen mittelalterlicher Bronzen und Messinge I, S. 197.

denen das Teil immer wieder bei Temperaturen um 600 °C gegläht wird. Ist die Formgebung abgeschlossen, muss sich das Instrument in einem genügend harten Zustand befinden, der es dem Spieler erlaubt, es zu benutzen, ohne es zu zerdrücken. Als letzter Schritt findet das Polieren des fertigen Instruments statt. Eine Fotoserie auf der Projektwebsite gibt diesen Prozess wieder.<sup>13</sup>

Die folgenden Untersuchungen dienen dazu, festzustellen, welche im Messing feststellbaren Spuren diese Fertigung hinterlässt und ob Unterschiede bestehen zwischen dem heute praktizierten historisch informierten Instrumentenbau und effektiv im Frankreich des 19. Jahrhunderts gefertigten Instrumenten. Diese Fragen können nur mit metallographischen Untersuchungen geklärt werden. Sie ermöglichen es, die Kornstruktur des Metalls zu beobachten und daraus den oder die letzten Verarbeitungsschritte abzulesen. Das Aussehen der Körner im Metall verändert sich nämlich, je nachdem ob sie gegossen, kalt verarbeitet, gegläht oder gehärtet worden sind. Dementsprechend kann aus der Kornstruktur des Messings die letzte erfolgte Bearbeitung abgelesen werden.

Eine metallographische Untersuchung ist in der Regel nicht zerstörungsfrei. Es macht keinen Sinn, sehr kleine Proben zu nehmen, da diese durch die Probenahme meist am Rand deformiert und so in ihrer Aussagekraft eingeschränkt werden. Auch schränken sehr kleine Proben die Übersicht ein, denn die meisten Metalle sind heterogen in ihrem Aufbau, im Speziellen auch bleihaltiges Messing, wovon es hier geht. Die Herausforderung bei den Probenahmen war, mitten aus einem gewölbten Körper eine Probe herauszuschneiden. Dies konnte gelöst werden, indem mit einem Hohlfräs-Aufsatz Rondellen aus den in Frage kommenden Instrumenten herausgeschnitten wurden. So konnte die Verformung am Probenrand auf ein Minimum beschränkt werden.

Von den metallographischen Untersuchungen an den englischen Instrumenten war bereits bekannt, dass der Endzustand der Instrumente in der Regel ein geglähtes Metall ist.<sup>14</sup> Einen Schritt weiter geht eine Untersuchung von Rémy Gug an französischen Messing-Orgelzungen aus dem 18. und 19. Jahrhundert. Härtemessungen zeigen, dass die Orgelzungen in der Mitte weich und außen hart sind (innen 85–130 HV 0,025, außen 130–230 HV 0,025). Sie wurden aus weich geglähten Blechen hergestellt.<sup>15</sup> Die Härte der alten Orgelzungen wurde nicht etwa nur durch die Endpolitur erreicht, sondern dadurch, dass das in Form geschnittene Metall einseitig oder zweiseitig durchgehend mit einem kleinen Hammer bearbeitet wurde. Als Quelle zur Herstellung von Orgelpfeifen dient Gug das Werk des französischen Orgelbauers und Benediktinermönchs Dom François

13 [www.hkb-interpretation.ch/projekte/blechblasinstrumentenbau](http://www.hkb-interpretation.ch/projekte/blechblasinstrumentenbau) (27. Februar 2015).

14 Bacon: A technical study of the alloy compositions of »brass« wind musical, Bd. 1, S. 130.

15 Rémy Gug: Historische und experimentelle Untersuchungen an Messing für Zungenstimmen, in: 150 Information (1988), Nr. 28, S. 27–58, hier S. 50.

Bédos, der 1766 ein umfassendes Werk über den Orgelbau verfasst hat. Durch das Hämmern entsteht eine dreischichtige Struktur im Metall, mit zwei harten Außenschichten und einem weichen Kern, was auch an einem Bruchversuch erläutert wird.

Diese Materialeigenschaften wurden durch Härtemessungen nach Vickers bestimmt, einem Verfahren, das bei metallographischen Untersuchungen oft zur Anwendung kommt. Bacon verzichtete aus konservatorischen Gründen auf Härtemessungen, da diese zu Eindrücken im Metall führen. Die Härtemessung nach Vickers funktioniert nach folgendem Prinzip: ein Eindringkörper in der Form einer Pyramide wird während einer bestimmten Zeit mit einer bestimmten Kraft ins Metall gedrückt. Dadurch entsteht ein Abdruck im Metall, der bei weichen Metallsorten grösser und bei harten kleiner ist. Die Diagonalen des Abdrucks werden ausgemessen und daraus die Härte berechnet. Resultate werden immer mit dem berechneten Wert und der Einheit HV, Härte nach Vickers, angegeben (zum Beispiel 0,05 = Masse in kg beziehungsweise Kraft in kp, die aufgewendet wird). Härtemessungen mit geringer Kraft (<0,2 kp) werden als Mikrohärtungen bezeichnet, jene zwischen 0,2 und 5 kp als solche im Kleinlastbereich, ab 5 kp handelt es sich um Makrohärtungen.

Für die Untersuchung wurde ein Metallographie-Konzept entwickelt, das neueste Untersuchungsmethoden miteinbezieht. Es teilt sich in folgende Methoden beziehungsweise Arbeitsschritte auf:

- Proben in Kunstharz einbetten, schleifen und polieren;
- optische Auflichtmikroskopie im ungeätzten und geätzten Zustand des Metalls;
- Mikrohärtmessungen nach Vickers;
- chemische und morphologische Untersuchung von Einschlüssen, Phasen und Lötstellen am Rasterelektronenmikroskop gekoppelt mit energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse (REM/EDX);
- ausbetten und elektrolieren der Proben;
- chemische, morphologische und kristalline Untersuchung mittels Rückstreuungselektronen-Beugung am Rasterelektronenmikroskop (REM/EBDS electron backscattered diffraction).

Die metallographischen und REM/EDX-Untersuchungen wurden von Marianne Senn an der Empa ausgeführt, während Hans J. Leber die Härtemessungen und REM/EBDS-Analysen am PSI ausführte.

Mittels der metallographischen Untersuchung, die am optischen Auflichtmikroskop erfolgt, sollen im ungeätzten Zustand größere Einschlüsse, Lötstellen und Schweißnähte beobachtet werden, während im geätzten Zustand die Form der Körner beziehungsweise das Metallgefüge untersucht wird. Kleinere Einschlüsse können mittels REM/EDX beobachtet werden, wo es gleichzeitig möglich ist, die chemische Zusammen-

setzung von Einschlüssen, Lot und Phasen des Metalls festzustellen. Die Mikrohärtemessungen ergänzen diese Beobachtungen um die Härte des Metalls beziehungsweise um einen Härteverlauf, falls Unterschiede auftreten. Die EBDS-Messungen ermöglichen es, Korngrößen und kornbezogene Verformungen, Phasen und Texturen im Metall anhand der abweichenden Kristallstruktur zu erfassen. Texturen sind bevorzugte Orientierungen der Metallkörner, wie sie etwa durch wiederholte Kalt- oder Warmformgebung im Metall entstehen. Eine Rekristallisation des Metalls während des Weichglühens hebt die Textur weitgehend auf. Kornbezogene Verformungen sind dagegen lokal beschränkt und treten zum Beispiel als Folge eines nur partiellen Weichglühens auf.

Für die metallographischen Untersuchungen wurden zwei historische Instrumente mit einem sehr schlechten Erhaltungszustand sowie ein missratener Becher eines historisch informiert gefertigten, modernen Instruments von Instrumentenbau Egger in Basel zur Beprobung freigegeben. Es handelt sich um die Instrumente Nr. 2 und 34, ersteres ein Horn, das von Kretschman (sic) um 1812 in Straßburg hergestellt wurde, und letzteres, ebenfalls ein Horn, das von Raoux-Millereau gegen Ende des 19. Jahrhunderts in Paris gefertigt wurde. Die Instrumente wurden nach der Probenahme wieder restauriert. Von Instrument Nr. 2 wurde eine Probe im Schall genommen, die direkt auf der Schweißnaht liegt. Von Instrument Nr. 34 wurden vier Proben genommen, eine vom Kranz, die ausgesägt wurde, und drei Rondellen, eine vom Schall, eine vom Schall auf der Lötstelle und eine vom Anstoß. Grund für die zahlreichen Proben war die chemisch abweichende Zusammensetzung des Metalls im Instrument und natürlich auch die Frage, ob es Unterschiede in den Materialeigenschaften der unterschiedlichen Instrumententeile gibt. Vom Egger-Becher wurden drei Rondellen ausgeschnitten, eine im Schall, eine im Schall auf der Lötstelle und eine im Rohr.

In einem ersten Schritt wird nun die chemische Zusammensetzung der Instrumente vorgestellt und diskutiert (Abbildung 7). Die Interpretation der metallographischen Untersuchung baut auf einer bekannten Chemie des Metalls auf.

Instrument Nr. 2 besteht aus einem bleihaltigen Messing mit einem Zinkgehalt zwischen 29 und 31% und einem Bleigehalt zwischen 0,9 und 2,6%. Der gemessene Siliziumgehalt wird auf eine Lackierung oder Politur des Instruments zurückgeführt und ist nicht Teil der Legierung. Die Mehrfachmessungen der verschiedenen Teile (Kranz, Anstoß, Schall) zeigen, dass im Zinkgehalt der Legierung eines Instrumententeils größere Schwankungen möglich sind (bis 1,4%). Daneben zeigt sich, dass die verschiedenen Teile aus verschiedenen Metallsorten hergestellt wurden.

Kranz	CuZn <sub>29</sub> Pb <sub>3</sub>	Spuren von Fe, Sn und Ni
Schallstück	CuZn <sub>30</sub> Pb <sub>1</sub>	Spuren von Fe, Sn und Ni
Anstoß und Mundrohr	CuZn <sub>30</sub> Pb <sub>2</sub>	Spuren von Fe, Ni (Sn)
Mundrohrhülse	CuZn <sub>31</sub> Pb <sub>1</sub>	Spuren von Sn, Fe und Ni

Instrument mit Teil	Cu	Zn	Pb	Sn	Sb	Ni	Fe	Si	Al
	Massenprozent								
Nr. 2, Kranz blank	67,2	28,9	2,6	<b>0,07</b>	<0,05	<b>0,08</b>	<b>0,22</b>	<b>0,6</b>	<0,1
Nr. 2, Kranz blank	66,8	29,6	2,6	<b>0,07</b>	<0,05	<b>0,08</b>	<b>0,25</b>	n.a.	n.a.
Nr. 2, Schall blank	67,9	29,5	0,87	<b>0,16</b>	<0,05	<b>0,05</b>	<b>0,27</b>	<b>0,9</b>	<0,3
Nr. 2, Schall blank	67,5	30,8	0,99	<b>0,16</b>	<0,05	<b>0,06</b>	<b>0,28</b>	n.a.	n.a.
Nr. 2, Anstoß, blank	67,9	28,7	1,9	<0,05	<0,05	<b>0,15</b>	<b>0,20</b>	<b>0,8</b>	<0,1
Nr. 2, Anstoß blank	67,3	30,1	1,9	<0,05	<0,05	<b>0,16</b>	<b>0,25</b>	n.a.	n.a.
Nr. 2, Mundrohr	67,3	30,0	2,0	<b>0,05</b>	<0,05	<b>0,20</b>	<b>0,21</b>	n.a.	n.a.
Nr. 2, Mundrohrhülse	67,0	31,0	0,96	<b>0,31</b>	<0,05	<b>0,06</b>	<b>0,11</b>	n.a.	n.a.
Nr. 34, Kranz blank	65,9	33,4	0,42	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,1	<0,3
Nr. 34, Schall blank	67,5	31,7	0,45	<0,05	<0,05	<0,05	<b>0,06</b>	<0,1	<0,3
Nr. 34, Schall Patina	65,4	32,6	0,42	<0,05	<0,05	<0,05	<b>0,05</b>	<0,1	<b>2,5</b>
Nr. 34, Anstoß blank	67,0	32,0	0,40	<0,05	<0,05	<b>0,21</b>	<0,05	<0,1	<0,3
Nr. 34, Pistonhülse Patina	66,0	29,6	0,33	<0,05	<0,05	<b>0,15</b>	<0,05	<0,1	<b>3,7</b>
Nr. 34, Bogenaufnahme blank	67,0	32,4	0,30	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,1	<0,3
Nr. 34, Aufsteckbogen blank	68,4	31,0	0,24	<0,05	<0,05	<0,05	<b>0,07</b>	<0,1	<0,3
Egger-Becher	63,0	36,7	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,1	<0,3

**ABBILDUNG 7** Chemische Zusammensetzung der metallographisch untersuchten Instrumente (ED-XRF-Analysen). Alle Werte sind Mittelwerte, n. a. nicht analysiert.

Die in der Formel kurzgefasste Legierungszusammensetzung des Kranzes wird folgendermaßen gelesen, wenn man sie liest wie eine moderne Legierung:<sup>16</sup> 67–69% Kupfer, 2,5–3,3% Blei, Rest Zink. Diese Lesart zeigt klar, dass auch in modernen Legierungen von Schwankungen ausgegangen wird. Für den Kranz wurde ein bleireicheres Messing bevorzugt, vielleicht weil es ein etwas helleres Aussehen hat und sich so dekorativ absetzt. Im restlichen Instrument (Schall, Mundrohrhülse) überwiegt ein gelberes Messing mit 1% Blei, wahrscheinlich mit unterschiedlichen Kupferquellen (Unterschiede im Eisen- und Zinngehalt). Anstoß und Mundrohr hingegen bestehen aus einem Messing, dessen Bleigehalt mit 2% zwischen Kranz und Schall steht und sich in seiner Färbung dem Kranz annähert. Das Kupfer in diesen Teilen hat eine andere Herkunft als alle vorhergehenden, da es nickelreich ist. Maßgebend für die nachfolgende metallographische Untersuchung ist die Zusammensetzung des Schallstücks.

Instrument 34 besteht ebenfalls aus einem bleihaltigen Messing. Der Zinkgehalt schwankt zwischen 32 und 33%, der Bleigehalt zwischen 0,2 und 0,4%. An diesem Beispiel zeigt sich, dass das Vorhandensein von Patina größere Schwankungen in der Legierungszusammensetzung zur Folge hat und im Aluminiumgehalt fassbar wird. Sicher ist auch Sauerstoff vorhanden, dieser kann jedoch mit ED-XRF nicht gemessen werden.

16 Hermann Schumann: *Metallographie*, Leipzig 1991, S. 642.

Kranz	CuZn <sub>33</sub>
Schall, Anstoß, Bogenaufnahme	CuZn <sub>32</sub>
Aussteckbogen	CuZn <sub>31</sub>

Dieses Instrument ist mehr oder weniger aus einer Legierung gefertigt (Zn<sub>32±1</sub>), mit Blei als Verunreinigung. Für Anstoß und Pistonhülse wurde eine Kupfersorte mit höherem Nickelgehalt verwendet. Sie hat deshalb eine andere Herkunft.

Vergleicht man die chemische Zusammensetzung von Instrument 2 und 34 miteinander, so fällt auf, dass 2 noch einiges an Spurenelementen enthält, während 34 fast keine Spuren mehr aufweist. Dies widerspiegelt die Entwicklung bei den Spurenelementen im 19. Jahrhundert.<sup>17</sup> Beide Instrumente sind jedoch zweifelsohne aus direkt hergestelltem Messing produziert.

Das moderne Instrument besteht aus CuZn<sub>37</sub>, einer weit zinkreicheren Legierung als die alten, die bei Egger nur gelegentlich eingesetzt wird.

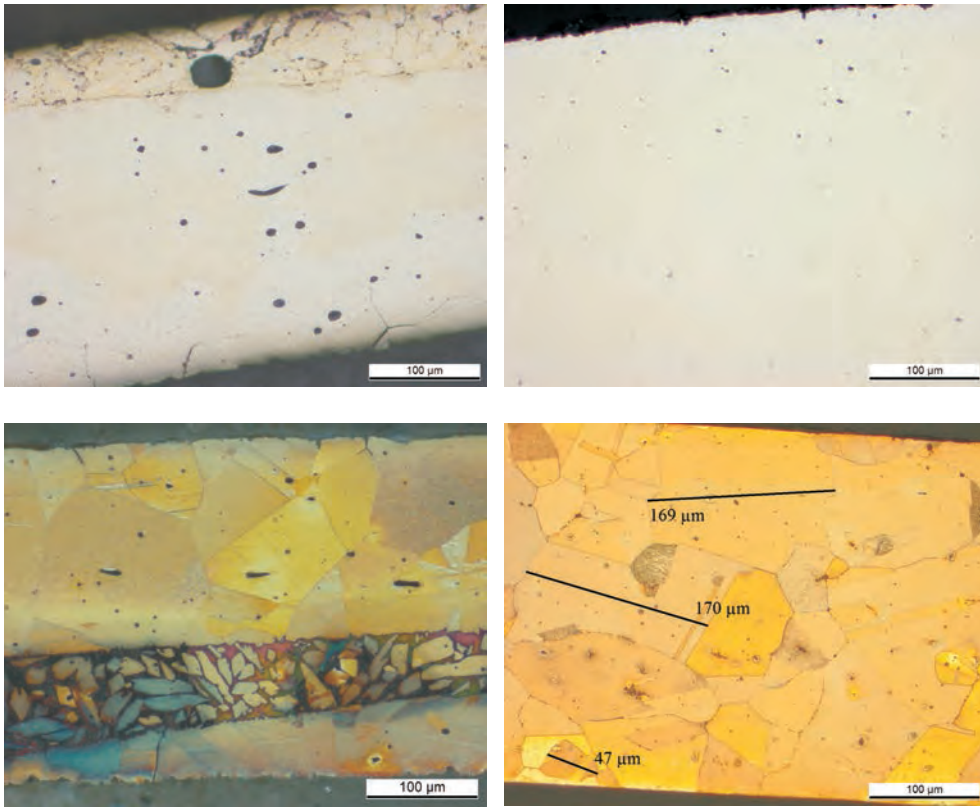
Alle diese Messingsorten, die historischen wie die moderne mit mehr Zink, kristallisieren bei langsamer Abkühlung als  $\alpha$ -Messing-Mischkristalle oder -Phase aus. Der  $\alpha$ -Mischkristall weist ein kubisch-flächenzentriertes Gitter auf, der zinkreichere  $\beta$ -Mischkristall ein kubisch-raumzentriertes. Einzig die moderne Legierung CuZn<sub>37</sub> liegt im Phasendiagramm bereits im Grenzbereich zwischen  $\alpha$ - und  $\alpha/\beta$ -Messing.<sup>18</sup> Sie verlangt deshalb besondere Aufmerksamkeit bei der Temperaturführung in den Verarbeitungsprozessen. Bei schneller Abkühlung nach dem Überschreiten einer Temperatur von um 650 °C beim Glühen verläuft die  $\beta/\alpha$ -Umwandlung nicht vollständig und ist Ursache für das Auftreten von unterkühlten  $\beta$ -Kristallen im Gefüge, die bei dieser Legierung in den meisten Fällen unerwünscht sind.

Das Blei ist im Messing wegen seiner viel tieferen Schmelztemperatur (327 °C) nicht löslich beziehungsweise es ist immer noch flüssig, wenn das Messing längst fest ist, und bildet deshalb Einschlüsse (Abbildung 8). Bei qualitativ gutem Messing sind diese Einschlüsse regellos fein im Metall verteilt. Wird es unsachgemäß eingeschmolzen, sammelt es sich bandförmig entlang der Korngrenzen.

Die metallographischen Untersuchungen des ungeätzten Metalls der Instrumente erlauben es, Einschlüsse und Lötstellen zu beobachten. So sieht man auf Abbildung 8 links oben den Beginn der Lötstelle, die sich schräg durch den Anschliff der Probe vom Schall des Instruments Nr. 2 zieht. In dieser Lötstelle konnte mit Hilfe von REM/EDX-Analysen Silber festgestellt werden, so dass wir nun wissen, dass ein silberhaltiges Hartlot verwendet wurde. Der Schall von Instrument Nr. 34 wurde hingegen verschweißt.

17 Siehe oben, S. 405.

18 Schumann: Metallographie, S. 631.



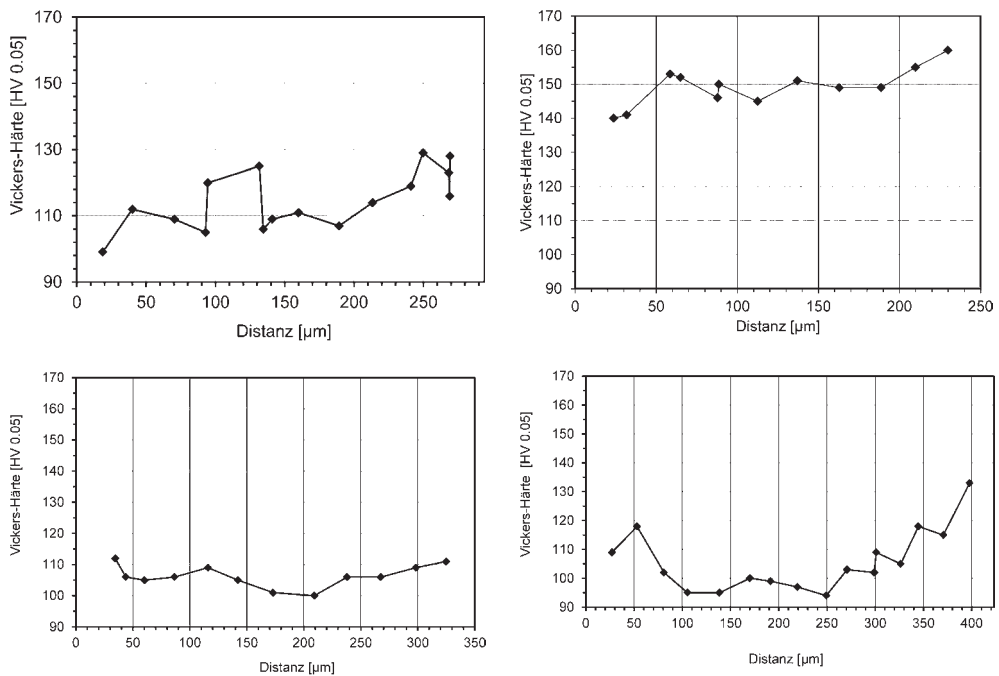
**ABBILDUNG 8** Mikrographie. Blei-Einschlüsse, dunkel, im ungeätzten Metall. Links oben Probe Schall mit Lötstelle von Instrument Nr. 2, rechts oben Probe vom Anstoß von Instrument Nr. 34

**ABBILDUNG 9** Mikrographien. Polyedrische Körner von  $\alpha$ -Messing mit Zwillingen (parallele Linien) und dunklen Blei-Einschlüssen geätzt nach Klemm. Unten links Probe von Schall mit Lötstelle von Instrument Nr. 2 mit Lötstelle im unteren Bild Drittel, unten rechts Probe von Schall mit Lötstelle (nicht sichtbar im Bild) von Instrument Nr. 34

Weitere REM/EDX-Analysen von sehr kleinen Einschlüssen im Schallstück und im Anstoß von Instrument Nr. 34 haben gezeigt, dass es sich um Zinksulfide mit einigen Prozent bis 30 % Selen und um ein bis einigen Prozent Tellur handelt. Selen und Tellur sind durchaus Spuren-Elemente, die man in französischem Kupfer des 19. Jahrhunderts findet.<sup>19</sup> Welter weist darauf hin, dass Kupfer gegen Ende des 19. Jahrhunderts nach Frankreich importiert wurde. Während erhöhte Spuren von Tellur typisch sind für Kupfer aus den Rocky Mountains und aus den Anden,<sup>20</sup> ist es unklar, wie dieses Kupfer mit den weit höheren Selengehalten zu beurteilen ist.

- 19 Jean-Marie Welter: Laboratoire-Recherches. La couverture en cuivre en France, une promenade à travers les siècles, in: *Monumental* (2007), Nr. 2, S. 104–111, hier S. 110.  
 20 Ders.: Understanding the copper of the Statue of Liberty, in: *JOM* 58 (2006), Nr. 5, S. 30–33.

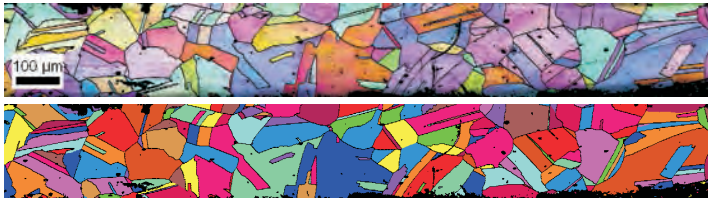




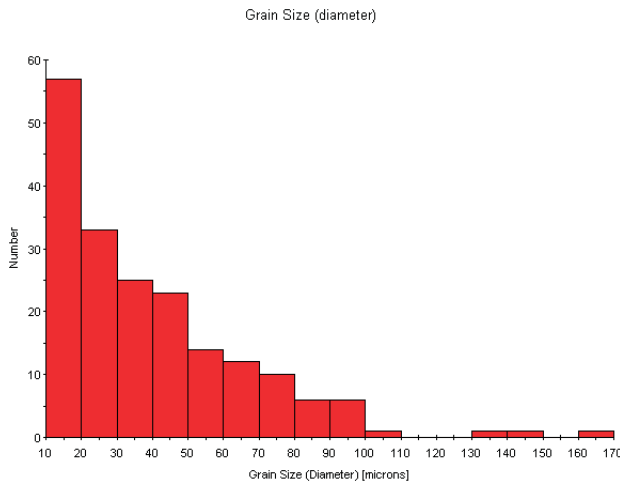
**ABBILDUNG 10** Härteverlauf im Blech vom Schall des Instruments Nr. 2 oben links, vom Kranz (oben rechts), vom Schall (unten links) und vom Anstoß (unten rechts) des Instruments Nr. 34; Härtemessungen nach Vickers

Das geätzte Metall zeigt ein Gefüge aus großen und kleinen polyedrischen Körnern mit Glüh-Zwillingen und Blei-Einschlüssen (Abbildung 9), die im Anschliff von Instrument Nr. 2 teilweise längs gestreckt sind. Ein solches Gefüge mit sehr großen und auch kleinen Körnern entsteht als Folge einer Sekundär-Rekristallisation. Es wird deshalb erwartet, dass dieses Gefüge weich ist. Die Härtemessungen zeigen dann aber ein überraschendes Resultat: es gibt einen Härteverlauf mit einer oder sogar zwei härteren Blech-Oberflächen (Abbildung 10). Bei Instrument Nr. 2 findet sich rechts eine etwas härtere Oberfläche. Besonders ausgeprägt ist der Härteverlauf im Anstoß von Instrument Nr. 34, wo beide Oberflächen härter sind. Der Kranz von Instrument Nr. 34 zeigt im Gefüge Kaltverformung an, was sich in einer generell höheren Härte als in den anderen Instrumententeilen niederschlägt. Mikrohärtmessungen wie diese sind sehr empfindlich auf alle Veränderungen im Gefüge (großes Korn, kleines Korn, Korngrenze). Wegen dieser überraschenden Resultate der Härtemessungen stellt sich die Frage, ob es nicht doch Anzeichen von Verformung oder eine Textur im Gefüge gibt. Diese Frage konnte mit den EBSD-Untersuchungen beantwortet werden.

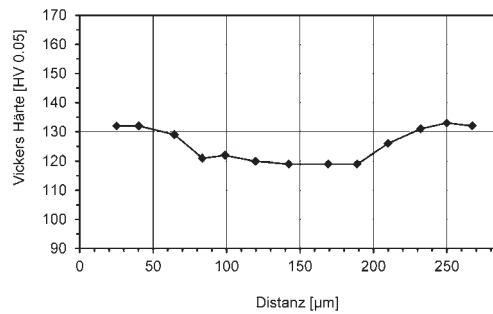
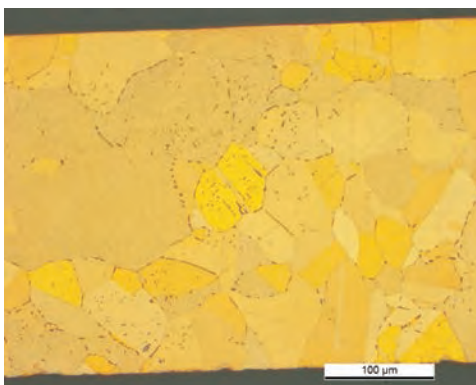
Einige Resultate der EBSD-Untersuchungen von Instrument Nr. 2 sind in Abbildung 11 dargestellt. Die inverse Polfigur in Abbildung 11 oben gibt darüber Auskunft, ob die Metallkörner eine Textur (Vorzugsrichtung) aufweisen. Hier konnte keine Textur



ABBDUNG 11 Resultate der EBSD-Untersuchung vom Schall von Instrument Nr. 2. Oben Überlagerung von inverser Polfigur und REM-Bild. Mitte individuelle Färbung der Körner mit Korngrenzen, darunter Korngrößenverteilung und Statistik

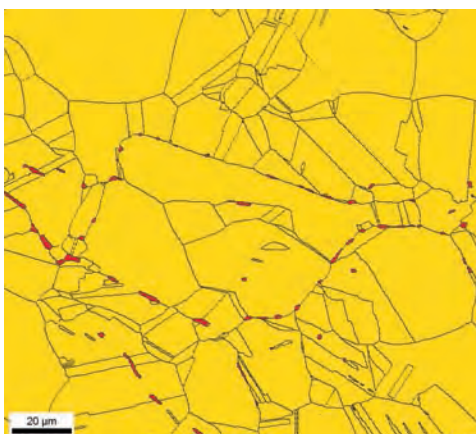


Durchmesser (µm)	Anzahl
15	57
25	33
35	25
45	23
55	14
65	12
75	10
85	6
95	6
105	1
135	1
145	1
165	1



ABBDUNG 12 Mikrographie und Härteverlauf im Schall des modernen Bechers aus der Werkstatt Egger. Links Blech geätzt nach Klemm mit polyedrischen Körnern von α-Messing und vereinzelt Zwillingen, dunkel β-Messing. Rechts Härteverlauf im Schall, Härtemessung nach Vickers

ABBDUNG 13 EBSD-Untersuchung. Unten Bild mit Korngrenzen und Phasenbestand, rechts Legende. In Gelb α-Messing, in Rot das zinkreichere β-Messing



---

Gray Scale Map Type: <none>

---

Color Coded Map Type: Phase

Phase	Total Fraction	Partition Fraction
Copper	0.993	0.993
Copper Zinc	0.007	0.007

---

Boundaries: Rotation Angle

Min	Max	Fraction	Number	Length
7°	180°	0.285	29576	5.12 mm

\*For statistics - any point pair with misorientation exceeding 2° is considered a boundary  
total number = 103696, total length = 1.80 cm)

festgestellt werden, auch weil der Bildausschnitt zu wenig Körner enthält. Ein anderes Resultat kann aber aus dieser Abbildung herausgelesen werden: Die Zwillingslinien sind teilweise leicht gekrümmt. Dies ist die Folge einer leichten Kaltverformung. Etwas schwieriger zu beurteilen ist die Korngrößenverteilung, denn wie die Einfärbung im mittleren Bild von Abbildung 11 zeigt, fasst das Zähl-System durch Zwillingslinien unterteilte Körner als mehrere unabhängige Körner auf, was zu einem zu hohen Anteil an kleinen Körnern in der Zählstatistik führt. Trotzdem bleibt das Resultat eindeutig: eine kleine Anzahl großer Körner steht einer größeren Anzahl kleiner Körner gegenüber, was typisch für ein sekundär rekristallisiertes Gefüge ist.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass folgender Endzustand der Instrumente vorliegt: die Teile wurden im zweitletzten Arbeitsschritt gegläht und zwar solange oder bei so hohen Temperaturen, dass eine Sekundär-Rekristallisation stattfand. Die Oberflächen der Bleche sind leicht verfestigt, wahrscheinlich als Folge der fortwährenden Bearbeitung während der Formgebung. In Instrument Nr. 2 lässt sich als letzter Arbeitsschritt eine leichte Kaltverformung feststellen.

Noch ein paar Bemerkungen zur Rekristallisation: ein verformtes Metall weist Spannungen auf. Um diese Spannungen zu entfernen, wird es gegläht. Dafür stehen unterschiedliche Temperaturen zur Verfügung. Erfolgt das Glühen von Messing bei Temperaturen zwischen 250 und 300 °C, spricht man von Spannungsfreiglühen. Dieser Vorgang verändert die Form der Körner im Gefüge nicht, hebt aber ihre innere Spannung auf. Erfolgt das Glühen bei Temperaturen zwischen 500 und 600 °C, erfolgt eine Rekristallisation. Rekristallisation meint, dass sich die Körner neu auskristallisieren, zuerst als kleine regelmäßige Körner, bei höheren Temperaturen werden sie größer und man spricht von Kornwachstum. Erfolgt der Glühvorgang während einer bestimmten Zeit an der Obergrenze der Rekristallisationstemperatur, beginnen einzelne Körner auf Kosten von anderen zu wachsen und man spricht von Sekundär-Rekristallisation.

Vergleicht man nun die Fertigung der untersuchten französischen Instrumente mit der eines historisch informiert gebauten Bechers aus der Werkstatt des Instrumentenbauers Egger in Basel, so findet man Ähnlichkeiten: Auch hier herrscht ein sekundär rekristallisiertes Gefüge vor, mit leichten Spuren der Kaltverformung und leicht härteren Oberflächen im Becher (Abbildung 12). Die EBSD-Untersuchung zeigt, dass entlang der Korngrenzen  $\beta$ -Messing auftritt. Damit tritt ein, was als häufigster Verarbeitungsfehler bei Messing mit so hohem Zinkgehalt bekannt ist: Bei schneller Abkühlung nach dem Überschreiten einer Temperatur von um 650 °C beim Glühen verläuft die  $\beta/\alpha$ -Umwandlung unvollständig und ist Ursache für das Auftreten von unterkühlten  $\beta$ -Kristallen im Gefüge, die unerwünscht sind. Als zweiter Fehler konnte innerhalb des Rohres eine Entzinkung und Oxidation der Oberfläche festgestellt werden. Der Herstellungsfehler,

der bereits in der Werkstatt bemerkt wurde, wurde durch die metallographische Untersuchung bestätigt.

Für den Nachbau von französischen Instrumenten aus der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts ist die Instrumentenbaufirma Egger also auf gutem Weg: Die historischen und die durch Egger nachgebauten Instrumente haben ähnliche Materialeigenschaften. Am größten ist noch der Unterschied bei der chemischen Legierung. Es wurde deshalb ein Produzent gesucht, der ein Messingblech mit der Legierung  $\text{CuZn}_{32-34}\text{Pb}_1$  herstellen kann.

#### 4. Materialtechnische Grundlagen zum Messing für den historisch informierten Nachbau

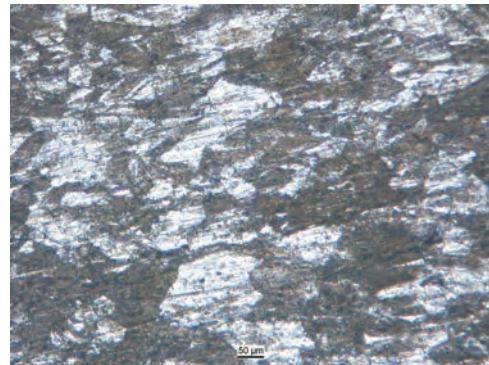
Wie erfolgreiche Versuche durch verschiedene Produzenten im Rahmen des vorliegenden Projekts zeigten, ist es gar nicht selbstverständlich, mit modernen Produktionsmitteln eine Legierung wie die gewünschte für den Nachbau der französischen Instrumente zu gießen und Bleche daraus zu walzen. Trotzdem war es möglich, in Asien einen Produzenten zu finden, dem das gelungen ist. Seine Bleche aus bleihaltigem Messing wurden auf Legierung und Gefüge untersucht, um sicherzustellen, dass sie die nötigen Qualitätsmerkmale erfüllen.

ED-XRF-Untersuchungen zeigen, dass es sich um einen Werkstoff mit der gewünschten Legierung  $\text{CuZn}_{32-34}\text{Pb}_1$  handelt, der Spuren von Zinn, Eisen und Silicium enthält. Die Blei-Einschlüsse sind regellos im Gefüge fein verteilt, die Ausgangshärte der weich geglühten Bleche beträgt 70–80 HV 0,05.

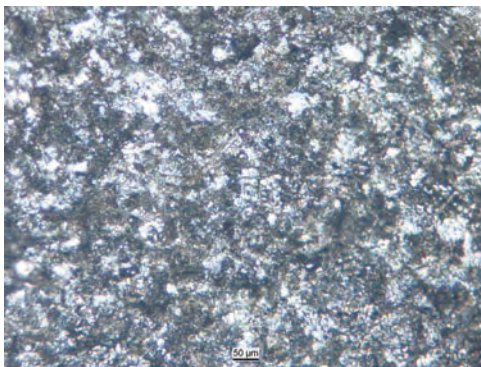
Um Voraussagen zum Verhalten des Metalls während der Verarbeitung zu treffen, insbesondere was die Rekristallisation betrifft, wurden am Institut für Werkstofftechnologie in Wallisellen unter der Leitung von Naila Rizvic Keilzugversuche mit anschließendem Glühen ausgeführt. Der Zugversuch steht dabei für die maximale Verformung (Dehnung bis zum Bruch), während das Glühen das Rekristallisationsverhalten bei unterschiedlichen Temperaturen zeigt. Die Bruchstellen der Keile werden nach den Tests für die metallographische Untersuchung ohne Probenahme direkt geschliffen und geätzt. Diese Art Ätzung nennt man Makro-Ätzung. Da die Objekte nur angeschliffen und nicht poliert sind, ergeben sie weniger klare Gefüge-Bilder als die oben diskutierten Untersuchungen an polierten und eingebetteten Anschliffen.

Abbildung 14 zeigt einen Keil, der aus dem asiatischen Blech ausgeschnitten wurde, nach dem Zugversuch. Als Resultat des Zugversuchs weiß man nun, dass die Bruchdehnung dieser Legierung eingeschränkt ist und nur leicht über 40 % liegt im Vergleich zu 60 % bei vergleichbaren, reinen Kupfer-Zink-Legierungen.<sup>21</sup> In Abbildung 14 rechts sieht man die als Folge des Zugversuchs leicht längs gestreckten Körner. Der Zugversuch

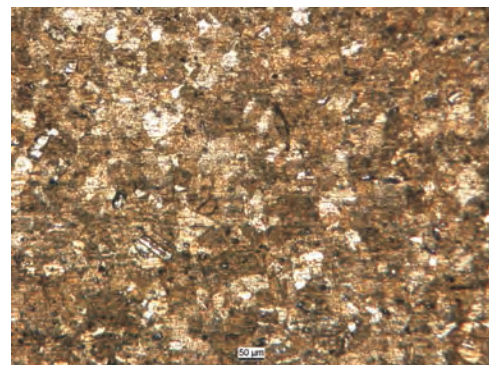
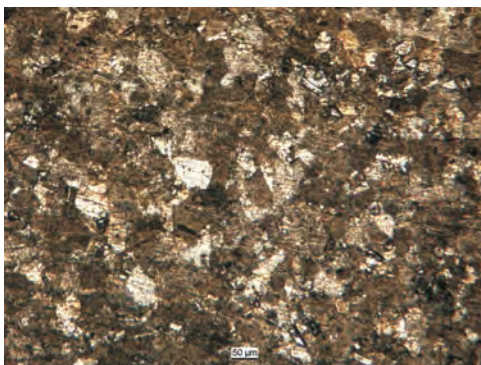
21 Kupfer-Zink-Legierungen (Messing und Sondermessing), S. 7.



**ABBILDUNG 14** Links gerissener Keil nach Zugversuch, oben Mikrographie: Gefüge des mit Ammoniumpersulfat makrogeätzten Keils mit leicht längs gestreckten Körnern



**ABBILDUNG 15** Mikrographien. Mit Ammoniumpersulfat makrogeätzte Keile nach Glühen bei 500 °C (links), darunter bei 550 °C und rechts daneben bei 600 °C. Das Gefüge entwickelt sich von feinkörnig zu grobkörnig.



steigert die Härte der Bleche auf mehr als das Doppelte (160–180 HV 0,05), abhängig von der Blechdicke. Die Keile wurden anschließend fünf Minuten bei 500, 550 und 600 °C geglüht. Dies führte bei 500 °C zur Ausbildung eines feinkörnigen Gefüges (Abbildung 15 links oben) mit wiederum einer geringen Härte (90–95 HV 0,05). Bei 550 und 600 °C stellte sich ein Kornwachstum ein und einzelne Körner wurden größer. Allerdings sind die größten Körner (um 110 µm) kleiner als in den Instrumenten. Die Härte geht nochmals leicht zurück (80–90 HV 0,05). Es tritt kein Bleiverlust in der Legierung ein, wie Kontrollmessungen mittels ED-XRF ergaben. Im Vergleich zu den Instrumenten sind die Bleche nach den Zugversuchen zu weich und zu feinkörnig. Da im Instrumentenbau aber nicht bloß ein Arbeitsschritt aus Verformen und Glühen erfolgt, sondern bis zu 20 am selben Bauteil, darunter das Hartlöten bei weit höherer Temperatur, ist es durchaus nachvollziehbar, warum die Instrumente im Endzustand abweichen.

So steht nun mit den asiatischen Blechen ein adäquates Material für den Nachbau von französischen Instrumenten zur Verfügung. Dass dies für die Instrumentenbauer eine große Herausforderung bedeutet, zeigt der Beitrag von Gerd Friedel in diesem Band.

## Inhalt

**Vorwort** 7

**Cyrille Grenot** La facture instrumentale des cuivres dans la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle en France 11

**Claude Maury** Les cors omnitoniques 103

**Daniel Allenbach** Französische Ventilhornsschulen im 19. Jahrhundert 154

**Daniel Lienhard** Werke für mehrere Hörner aus Frankreich 1800–1950 172

**Anneke Scott** Jacques-François Gallay. Playing on the Edge 198

**Martin Mürner** Meifred und die Einführung des Ventilhorns in Frankreich 223

**Jean-Louis Couturier** Aperçu historique de la pratique du cor naturel en France et de son emploi dans les ensembles à vent 234

**Vincent Andrieux** L'univers sonore d'Henri Chaussier. Perspectives sur le jeu des instruments à vent en France au début de l'ère de l'enregistrement (circa 1898–1938) 258

**Michel Garcin-Marrou** L'École française du cor. Fondements historiques, cornistes, facteurs, orchestres et questions de style 303

**Edward H. Tarr** The Genesis of the French Trumpet School 316

**Jeroen Billiet** Belgium, France and the Horn in the Romantic Era. Tradition, Influences, Similarities and Particularities 328

**Martin Skamletz** »... und gar nichts, wodurch sich der eigene schöpferische Geist des Komponisten beurkundete«. Cherubini, Hummel, Konzerte, Opern, Quodlibets und Trompeten in Wien zu Beginn des 19. Jahrhunderts. Teil 2: Aus dem Repertoire der Kaiserin 340

**Ulrich Hübner** Das Cor Chaussier. Ein Praxisbericht 363

**Adrian von Steiger** Historisch informierter Blechblasinstrumentenbau. Ein Projekt zur Erforschung der Handwerkstechniken im Blechblasinstrumentenbau in Frankreich im 19. Jahrhundert 377

**Jean-Marie Welter** The French Brass Industry during the 19<sup>th</sup> Century 384

**Marianne Senn / Hans J. Leber / Martin Tuchschnid / Naila Rizvic** Blechblasinstrumentenbau in Frankreich im 19. Jahrhundert. Analysen von Legierung und Struktur des Messings zugunsten eines historisch informierten Instrumentenbaus 398

**Hans-Achim Kuhn / Wolfram Schillinger** Herstellung bleihaltiger Messingbleche mit modernen industriellen Verfahren 420

- Adrian von Steiger** Zur Vermessung von Wandstärken historischer Blechblasinstrumente 431
- David Mannes / Eberhard Lehmann / Adrian von Steiger** Untersuchung von historischen Blechblasinstrumenten mittels Neutronen-Imaging 439
- Martin Mürner** Blechblasinstrumentenbau im 19. Jahrhundert in Frankreich. Historische Quellen zur Handwerkstechnik 446
- Gerd Friedel** Von der Information zum Instrument 463
- Rainer Egger** Zur Frage der Wandvibrationen von Blechblasinstrumenten. Wie wirkt sich das Vibrationsmuster der Rohrkonstruktion auf die Spielcharakteristik eines Blechblasinstruments aus? 469
- Namen-, Werk- und Ortsregister** 480
- Die Autorinnen und Autoren der Beiträge** 496



ROMANTIC BRASS. FRANZÖSISCHE HORNPRAXIS  
UND HISTORISCH INFORMIERTER BLECH-  
BLASINSTRUMENTENBAU • Symposium 2  
Herausgegeben von Daniel Allenbach, Adrian  
von Steiger und Martin Skamletz

MUSIKFORSCHUNG DER  
HOCHSCHULE DER KÜNSTE BERN

Herausgegeben von Martin Skamletz  
und Thomas Gartmann

Band 6



Dieses Buch ist im Juli 2016 in erster Auflage in der Edition Argus in Schliengen/Markgräflerland erschienen. Gestaltet und gesetzt wurde es im Verlag aus der *Seria* und der *SeriaSans*, die von Martin Majoor im Jahre 2000 gezeichnet wurden. Hergestellt wurde der Band von der Firma Bookstation im bayerischen Anzing. Gedruckt wurde er auf *Alster*, einem holzfreien, säurefreien und alterungsbeständigen Werkdruckpapier der Firma Geese in Hamburg. Ebenfalls aus Hamburg, von Igepa, stammt das Vorsatzpapier *Caribic cherry*. *Rives Tradition*, ein Recyclingpapier mit leichter Filznarbung, das für den Bezug des Umschlags verwendet wurde, stellt die Papierfabrik Arjo Wiggins in Issy-les-Moulineaux bei Paris her. Das Kapitalband mit rot-schwarzer Raupe lieferte die Firma Dr. Günther Kast, Technische Gewebe und Spezialfasererzeugnisse, aus Sonthofen im Allgäu. Im Internet finden Sie Informationen über das gesamte Verlagsprogramm unter [www.editionargus.de](http://www.editionargus.de). Zum Forschungsschwerpunkt Interpretation der Hochschule der Künste Bern finden Sie Informationen unter [www.hkb.bfh.ch/interpretation](http://www.hkb.bfh.ch/interpretation) und [www.hkb-interpretation.ch](http://www.hkb-interpretation.ch). Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar. © Edition Argus, Schliengen 2016  
Printed in Germany ISBN 978-3-931264-86-4