



**WHZ** Westsächsische  
Hochschule Zwickau  
Hochschule für Mobilität

# **Musikinstrumentenbau**

## **zwischen Tradition und Innovation**

### Perspektiven aus Theorie und Praxis

Herausgegeben von Ya'qub Yonas N. El-Khaled, Enrico Weller und Hannes Vereecke



Fakultät Angewandte Kunst Schneeberg  
Studiengang Musikinstrumentenbau Markneukirchen

## **Musikinstrumentenbau zwischen Tradition und Innovation**

### Perspektiven aus Theorie und Praxis

Herausgegeben von Ya'qub Yonas N. El-Khaled, Enrico Weller und Hannes Vereecke

Der Tagungsband *Musikinstrumentenbau zwischen Tradition und Innovation* enthält Beiträge der gleichnamigen Tagung (07.–10.03.2024) und der Summer school *Musikinstrumentenbau* (02.–14.09.2024). Beide Veranstaltungen fanden am Studiengang *Musikinstrumentenbau* Markneukirchen der Fakultät Angewandte Kunst Schneeberg der Westsächsischen Hochschule Zwickau statt.

Umschlagabbildungen: Aufbau einer Abstrahlungsmessung bei einer Violine (© Luca Jost). Gitarre von Antonio de Torres (1886) aus der Sammlung Wolfgang Kieser (© Westsächsische Hochschule Zwickau).

Umschlaggestaltung, Satz und Layout: Alina Herzau  
Redaktion: Ya'qub Yonas N. El-Khaled, Enrico Weller  
Lektorat: Ya'qub Yonas N. El-Khaled, Enrico Weller  
Korrektorat: Friederike Philipson-Stöckel  
Druck: Druckerei Tiedemann, Markneukirchen

© Westsächsische Hochschule Zwickau (WHZ), 2024

1. Auflage 2024, Markneukirchen  
ISBN 978-3-9826887-0-1 (Druckausgabe)  
ISBN 978-3-9826887-1-8 (Onlineausgabe)

Alle Rechte liegen bei der Westsächsischen Hochschule Zwickau. Die Autorinnen und Autoren haben sich nach Kräften bemüht, alle Publikationsrechte einzuholen. Sollten dennoch Urheberrechte verletzt worden sein, werden die betroffenen Personen oder Institutionen gebeten, sich mit den Herausgebern in Verbindung zu setzen.

Der Tagungsband *Musikinstrumentenbau zwischen Tradition und Innovation. Perspektiven aus Theorie und Praxis* ist Teil des Forschungsprojekts „WIR! – iMaTech – SummerSchool für Fachkräfte der Region im Musikinstrumentenbau“ (03WIR0418), einem Projekt der Westsächsischen Hochschule Zwickau. Das diesem Tagungsband zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03WIR0418 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**wir!** Wandel durch  
Innovation  
in der Region

i M A T E c h



**WHZ** Westsächsische  
Hochschule Zwickau  
Hochschule für Mobilität

## Inhaltsverzeichnis

Grußwort	7
Vorwort der Herausgeber	9
<b>TRADITIONEN</b>	
SEBASTIAN STENZEL	13
Einige Gedanken zur Entwicklung von Saiteninstrumenten	
ANDREAS MICHEL	32
Zur Frühgeschichte des Gitarrenbaus in Sachsen und Thüringen: Eine fünfsaitige Gitarre von Jacob August Otto aus dem Jahre 1795	
KLAUS ARINGER	51
Musikinstrumentenbau, instrumentale Praxis und Komposition – musikhistorische Aspekte eines ambivalenten Verhältnisses	
ERICH TREMMEL	65
<i>Per aspera ad astra.</i> Über das Scheitern von Verbesserungen – Gedanken zu „Fortschritt“ und dessen „Verweigerung“	
ENRICO WELLER	75
„Identität – Namen – Region“ – Bausteine zum Aufbau eines geschichtsbasierten Images der Region: Ein Projekt der Bündnis- initiative I-Ma-Tech	
MARIO WELLER	99
Vogtland und Wien – Der Adorfer Metallblasinstrumentenmacher Robert Piering und einer seiner besten Kunden, Prof. Franz Dreyer	
BENEDIKT BRILMAYER	119
Musikinstrumente als materielle Überlieferung immateriellen Kulturguts?	
IRIS VERENA BARTH, SVEINUNG SØYLAND MOEN	147
Welche Rolle können Museen beim Bewahren von Musikinstru- mentenbautraditionen spielen	
STEWART CARTER	157
“Save the Python!” and Other Innovations in the Structure of Chinese String Instruments	

**INNOVATIONEN**

GREGOR WIDHOLM	171
Die musikalische Qualität von Blechblasinstrumenten – Fakten und Mythen	
SUSANNE BERNDORF, SERGEY GUK, ULRICH PRAHL	189
Legierungsentwicklung einer zinkfraßfreien Messinglegierung für die Herstellung von Metallblasinstrumenten	
D. KEITH BOWEN	199
Sounds of the past: insights from the quantitative acoustic modelling of historical bass clarinets	
LUCA JOST	213
Ein Universalmessplatz für die Instrumentenbauwerkstatt	
ROBERT MORES	227
Designing the signature modes in guitars	
JENS FELDHAUS	231
Akustische Analyse von Gitarren mittels Mikrofonarray, Drehteller und Impulshammer: Ein kostengünstiger Ansatz zum Aufbau eines automatisierten Mikrofonarrays	
CHRISTOPH REUTER	249
Audiosignalanalyse, KI und die 96 Ohren der akustischen Kamera	
YA'QUB YONAS N. EL-KHALED	265
Die verflixte siebte Gitarre – (Neue) Möglichkeiten der Instrumentenbeurteilung am Beispiel eines Hörtests	
JÜRGEN RUCK	291
Anforderungen an eine moderne Konzertgitarre – Perspektiven eines Spielers	
MICHAEL KOCH	299
30 Jahre Gitarrenbauwettbewerb der EGTA – Erreichtes, Erreichbares und scheinbar nicht zu Erreichendes	
ULRIKE DEDERER	305
Juryarbeit bei internationalen Geigenbauwettbewerben	
Autorinnen und Autoren	313

SUSANNE BERNDORF, SERGEY GUK, ULRICH PRAHL

## Legierungsentwicklung einer zinkfraßfreien Messinglegierung für die Herstellung von Metallblasinstrumenten

### 1. Einleitung

Im Musikinstrumentenbau treten in den vergangenen Jahren an Bauteilen von Metallblasinstrumenten vermehrt Entzinkungserscheinungen, bekannt als ‚Zinkfraß‘, auf. Dies führt nicht nur zu einem erheblichen wirtschaftlichen Schaden, sondern auch zu Imageschäden, da Metallblasinstrumentenbauer immer häufiger Gewährleistungsansprüche erfüllen müssen. Allerdings gibt es trotz einer Vielzahl an Hypothesen bisher keine Untersuchungen, welche die Ursachen für den Zinkfraß im Metallblasinstrumentenbau analysieren. Dies soll im Rahmen der vorliegenden Untersuchung genauer betrachtet werden.

Im Musikinstrumentenbau wird die Messinglegierung CuZn30 aufgrund ihrer Farbe sowie der guten akustischen Eigenschaften und der guten Umformbarkeit bevorzugt eingesetzt. Die Legierung besteht aus einem kfz- $\alpha$ -Mischkristall, in dem Zink vollständig in Kupfer gelöst ist.<sup>1</sup> Bei höheren Zinkgehalten (etwa 37 bis 46 Ma.%) entsteht eine zusätzliche krz- $\beta$ -Phase, die aufgrund ihrer krz-Kristallstruktur schlechter umformbar ist als die  $\alpha$ -Mischkristalllegierungen und zudem eine höhere Korrosionsanfälligkeit zeigt. Verschiedene Legierungselemente können die Bildung der  $\beta$ -Phase fördern oder verhindern und auch die Farbe des Messings beeinflussen.<sup>2</sup>

Zinkfraß bzw. selektive Entzinkung ist eine der am häufigsten auftretenden Korrosionserscheinungen in Messinglegierungen, welche unter dem Angriff eines Wirkmediums auftritt. Als Wirkmedien kommen menschlicher Halschweiß, Speichel sowie die Feuchtigkeit im Instrument in Betracht, welche einzeln oder in Kombination zu Korrosionserscheinungen an Musikinstrumenten führen können. Salzhaltige und zuckerhaltige Nahrung erhöht die Bildung chlorhaltiger Lösungen und senkt den pH-Wert.<sup>3</sup> Nach wenigen Minuten Spielzeit erreicht die relative Luftfeuchtigkeit im Instrument über 90 %, während es eine Stunde dauert, um die Luftfeuchtigkeit wieder auf 50 % zu senken.<sup>4</sup> Die Kombination von Speichelrückständen und hoher Luftfeuchtigkeit im Inneren der Instrumente kann zur Korrosionserscheinungen beitragen.<sup>5</sup>

1 Vgl. Bruno Predel: *Cu-Zn (Copper-Zinc)*, in: *Phase Equilibria, Crystallographic and Thermodynamic Data of Binary Alloys* of Landolt-Börnstein - Group IV Physical Chemistry, Vol. 5, hrsg. v. Otfried Madelung, Berlin 1994, S. 11.

2 Vgl. Deutsches Kupfer-Institut e. V.: *Messing: Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung*, Berlin 1953.

3 Vgl. Neha Gupta, Shirazi Mutreja, Shivalingesh Kamate et al.: *Evaluation of change in salivary pH, following consumption of different snacks and beverages and estimation of their oral clearance time*, in: *International Journal of Oral Care & Research*, Vol. 3/4 (2015), S. 25–31.

4 Vgl. Martin Ledergerber, Marion Alter, Emilie Cornet et al.: *Humidity in brass instruments and the prevention of corrosion*, in: *Proceedings of the Third Vienna Talk on Music Acoustics*, hrsg. v. Alexander Mayer, Vasileios Chatzioannou und Werner Goebel, Wien 2015, S. 103.

5 Vgl. L. Kenworthy und W. G. O'Driscoll: *The Dezincification of Brasses in Marine Environments*, in: *Journal of Naval Engineering*, Vol. 5/1 (1951), S. 16–22.

Zum Mechanismus der Entzinkung werden in der Literatur zwei Hypothesen<sup>6</sup> diskutiert: einerseits wird Entzinkung als selektive Auflösung des Zn<sup>7</sup> beschrieben. Eine andere Hypothese beschreibt den Prozess als Auflösen des Messings durch das Medium und die anschließende Reduktion des Kupfers an der Materialoberfläche.<sup>8</sup> Ebenso besteht die Möglichkeit, dass beide Mechanismen ablaufen.<sup>9</sup> Die Neigung einer Messinglegierung zu Entzinkung wird beeinflusst durch die Phasenzusammensetzung der Legierung sowie die enthaltenen Legierungselemente.<sup>10</sup> Hinsichtlich der Phasenzusammensetzung ist festzustellen, dass mit zunehmendem Zn-Anteil Messing anfälliger für Korrosion ist. Dies ist einerseits auf den höheren Anteil des unedleren Zn zurückzuführen, andererseits auf die Ausbildung der unedleren  $\beta$ -Phase bei höheren Zn-Gehalten.<sup>11</sup> Das  $\alpha$ -Messing besitzt ein edleres Potential mit 0,38 V als das  $\beta$ -Messings mit 0,56 V.<sup>12</sup> In zweiphasigen Legierungen tritt Korrosion daher bevorzugt an der unedleren  $\beta$ -Phase auf.<sup>13</sup> Diese Tatsache liegt in der hohen Löslichkeit des Zn begründet, welches bei der  $\beta$ -Phase schließlich angegriffen wird.<sup>14</sup>

- 6 Vgl. Kenworthy und O'Driscoll: *Dezincification*, 1951; Charles W. Stillwell und Edward S. Turnipseed: *Mechanism of Dezincification – Corrosion of Brass*, in: *Industrial & Engineering Chemistry*, Jg. 26 Nr. 7 (1934), S. 740–743; Terry S. Weisser: *The dealloying of copper alloys*, in: *Studies in Conservation*, Vol. 20 Nr. sup1 (1975), S. 207–214; Chenyang Xie: *Corrosion studies on Cu-based alloys*, Barcelona 2021; Robert H. Heidersbach und Ellis D. Verink: *The Dezincification of Alpha and Beta Brasses*, in: *CORROSION*, Vol. 28 Nr. 11 (1972), S. 397–418; Peng Zhou und Kevin M. Ogle: *The Corrosion of Copper and Copper Alloys*, in: *Encyclopedia of Interfacial Chemistry*, hrsg. v. Klaus Wandelt, Oxford 2018, S. 478–489.
- 7 Vgl. Yaofu Zhang: *Dezincification and Brass Lead Leaching in Premise Plumbing Systems: Effects of Alloy, Physical Conditions and Water Chemistry*, Blacksburg, VA, USA 2009.
- 8 Vgl. Deutsches Kupfer-Institut e.V.: *Messing: Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung*, Berlin 1953.; Ralph M. Horton: *New Metallographic Evidence for Dezincification of Brass by Redistribution of Copper*, in: *CORROSION*, Vol. 26 Nr. 6 (1970), S. 260–264.
- 9 Vgl. Kenworthy und O'Driscoll: *Dezinification*, 1951; Stillwell et al.: *Mechanism of Dezincification*, 1934; Weisser: *The dealloying of copper*, 1975; Heidersbach et al.: *The Dezincification*, 1972; Frederick W. Fink: *The Dezincification of Alpha Brass with Special Reference to Arsenic*, in: *Transactions of The Electrochemical Society*, Jg. 75 Nr. 1 (1939), S. 441; E. E. Langenegger und B. G. Callaghan: *Use of an Empirical Potential Shift Technique for Predicting Dezincification Rates of  $\alpha\beta$ -Brasses in Chloride Media*, in: *CORROSION*, Vol. 28 Nr. 7 (1972), S. 245–254.
- 10 Vgl. S. Selvaraj, S. Ponmariappan, Marippan Natesan et al.: *Dezincification of Brass and its Control - An Overview*, in: *Corrosion Reviews*, Jg. 21 Nr. 1 (2003), S. 41–74; D. D. Davies: *A note on the dezincification of brass and the inhibiting effect of elemental additions*, New York 1993; Fink: *The Dezincification of Alpha Brass*, 1939; Mouhsine Galai, Hanane Benqlilou, Mohamed EbnTouhami et al.: *Effect of phosphorus content of  $\alpha$ -brass on its corrosion resistance in aggressive soil: experimental and characterization studies*, in: *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, Jg. 6 Nr. 2 (2021), S. 1-16.
- 11 Vgl. Davies: *A note*, 1993.
- 12 Vgl. Vincent F. Lucey: *The mechanism of dezincification and the effect of arsenic. II*, in: *British Corrosion Journal*, Vol. 1 Nr. 2 (1965), S. 53–59.
- 13 Vgl. Michela Albano, Giacomo Fiocco, Daniela Comelli et al.: *X-rays investigations for the characterization of two 17th century brass instruments from Nuremberg*, in: *ACTA IMEKO*, Vol. 11 Nr. 3 (2022), S. 1-7; Maria V. Biezma, Susanne Strobl, Paul Linhardt, et al.: *Dezincification in cast and heat-treated alpha-beta brass samples*, in: *Practical Metallography*, Vol. 60 Nr. 10 (2023), S. 632–642.
- 14 Vgl. Lucey: *The mechanism of dezincification*, 1965; Seungman Sohn und Tak Kang: *The effects of tin and nickel on the corrosion behavior of 60Cu–40Zn alloys*, in: *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 335 Nr. 1-2 (2002), S. 9–14.

Aus der Literatur sind die Legierungselemente P, Sn, Ni, Al, Au, Si, As und Sb als entzinkungshemmend bekannt.<sup>15</sup> As und Sb werden aus Umwelt- und Gesundheitsschutzgründen nicht weiter betrachtet. Untersuchungen zeigen, dass Phosphor bereits in geringen Legierungsgehalten zwischen 0,00016 und 0,137 Ma.% die Korrosionsanfälligkeit von CuZn34Pb2-Legierungen reduziert, indem es die Zinkauflösung durch die Bildung einer Deckschicht hemmt.<sup>16</sup> Zinn wirkt entzinkungshemmend durch die Ausbildung einer SnO<sub>2</sub>Schicht auf der Oberfläche des Materials.<sup>17</sup> Die Zugabe von Nickel in geringen Mengen (< 1 Ma.%) verbessert die Korrosionsbeständigkeit der Messinglegierung nur geringfügig, zeigt jedoch in Kombination mit Zinn in CuZn40-Legierungen gute Ergebnisse.<sup>18</sup> Bei der Veränderung der Legierungszusammensetzung durch die Zugabe von entzinkungshemmenden Elementen ist allerdings zu beachten, dass einige Elemente die  $\beta$ -Phase stabilisieren,<sup>19</sup> wodurch wieder eine erhöhte Korrosionsneigung zu erwarten ist. Daher wird CuZn30 einphasig ausgelegt und durch minimale Zugaben anderer Elemente modifiziert, um unerwünschte Änderungen in Optik und Akustik zu vermeiden.

## 2. Legierungsentwicklung

Ziel dieser Untersuchung ist die Entwicklung einer entzinkungsbeständigen Legierung für den Musikinstrumentenbau. Die Legierungselemente sollen im Mikrolegierungsbereich zugegeben werden, um die akustischen Eigenschaften, die Farbe und die Bearbeitbarkeit des Materials nur geringfügig zu verändern und die Ansprüche der traditionsreichen Branche des Musikinstrumentenbaus zu erfüllen. Dazu wurden zunächst mögliche Modifikationen der Messinglegierung CuZn30 hinsichtlich der Phasen- und Ausscheidungsbildung simuliert. Auf Basis dieser Simulation konnte eine geeignete Legierungszusammensetzung ermittelt werden. Diese Legierung wurde anschließend abgegossen, gewalzt und hinsichtlich der mechanischen und korrosionshemmenden Eigenschaften untersucht.

15 Vgl. Fink: *The Dezincification of Alpha Brass*, 1939; Davies: *A note*, 1993; Mouhsine Galai, J. Ouassir, Mohamed Ebn Touhami et al.:  *$\alpha$ -Brass and ( $\alpha$  +  $\beta$ ) Brass Degradation Processes in Azrou Soil Medium Used in Plumbing Devices*, in: *Journal of Bio- and Triboro-Corrosion*, Vol. 3 Nr. 3 (2017), S. 1–15; Galai et al.: *Effect of phosphorus*, 2021; Ramji Karpagavalli und Rajeswari Balasubramaniam: *Development of novel brasses to resist dezincification*, in: *Corrosion Science*, Vol. 49 Nr. 3 (2007), S. 963–979; Selvaraj et al.: *Dezincification of Brass*, 2003.

16 Vgl. Galai et al.: *Effect of phosphorus*, 2021.

17 Vgl. Davies: *A note*, 1993; Karpagavalli et al.: *Development of novel brasses*, 2007.

18 Ebd.

19 Vgl. Imam Basori, Zalda Jura Nabila und Yunita Sari: *Influence of Thermomechanical Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Cu-28Zn-4Mn Alloys*, in: *Materials Science Forum*, Vol. 1057 (2022), S. 161–166; Imam Basori, Mahardika Sandy Ponco und Yunita Sari: *Effect of Thermomechanical Processing on the Microstructures and Mechanical Properties of Cu-28Zn-2Al Alloys*, in: *Broad Exposure to Science and Technology II 2022*, hrsg. v. Endarto Y. Wardhono, Baech 2022, S. 155–160.

## 2.1 Simulation der Phasen- und Ausscheidungsbildung verschiedener modifizierter Legierungen

Die Simulation der Phasenzusammensetzung verschiedener modifizierter Legierungen erfolgte mit dem Programm *ThermoCalc* Version 2021b, basierend auf der ‚CALPHAD-Methode‘ (Calculation of Phase Diagrams), welche experimentelle und theoretische Kennwerte nutzt.<sup>20</sup> Das mathematische Modell dieser Methode strebt die Minimierung der freien Gibbs-Energie an, um das Phasengleichgewicht zu erreichen. Ziel dieser Simulation war es, die Auswirkungen zusätzlicher Legierungselemente (Al, As, Au, B, Be, Bi, C, Ca, Cd, Co, Cr, Fe, Mg, Mn, Mo, Nb, Ni, O, P, Pb, Pt, Se, Si, Sn, Ti, Zr) auf die Messinglegierung CuZn30 und ihre Neigung zur Bildung der  $\beta$ -Phase zu untersuchen. Für die Simulation der Phasenzusammensetzungen bei Zugabe verschiedener Elemente im mikro- und im niedriglegierten Bereich ( $X = 0$  bis  $3,6$  Ma.%) wurde der Zinkgehalt konstant bei  $30$  Ma.% gehalten. Die Menge der zulegierten Elemente  $X$  wurde vom Kupfergehalt abgezogen:

### (70 - X)Cu + 30Zn + X (Legierungselement)

Im Mikrolegierungsbereich ( $x \leq 0,1$  Ma.%) wurden Phasenzusammensetzungen in  $0,01$  Ma.-%-Schritten simuliert, während bei höheren Legierungsgehalten ( $x > 0,1$ -Ma.%)  $0,1$  Ma.-%-Schritte verwendet wurden. Der Temperaturbereich für die Simulation erstreckte sich von  $1500$  bis  $400$  K ( $1227$  bis  $127$  °C). Alle Simulationen wurden unter Nutzung der Kupferdatenbank von *Thermo-Calc* und dem Zugriff über *Python* durchgeführt.

Generell sollten die Legierungselemente im Mikrolegierungsbereich zugegeben werden, um Änderungen der verarbeitungstechnischen Eigenschaften, Optik und Akustik gering zu halten.

Anhand der mittels *Thermo-Calc* ermittelten Phasenzusammensetzungen wurden geeignete Legierungselemente ausgewählt. Die Simulationen zeigten, dass nur wenige Elemente im untersuchten Legierungsbereich ein durchgehend reines  $\alpha$ -Gefüge bilden, darunter Au und Pt, die jedoch aufgrund ihres hohen Metallpreises nicht weiter betrachtet wurden. Aufgrund der erhöhten Anfälligkeit für Entzinkung wurden Legierungselemente, die die  $\beta$ -Phase stabilisieren, wie B, Be, C, Cr, Fe, Mo und Nb, ausgeschlossen. Ebenso wurden toxische Elemente wie As, Cd und Pb sowie Elemente, die die Verarbeitbarkeit negativ beeinflussen, nicht berücksichtigt. Beispielsweise verschlechtert Al die Löteigenschaften.<sup>21</sup>

Basierend auf den Simulationsergebnissen und der Literatur wurden P, Sn und Ni als Legierungselemente für eine modifizierte Legierung CuZn30X ausgewählt. Die Wirksamkeit von Phosphor im Mikrolegierungsbereich wurde

20 Vgl. Jan-Olof Andersson, Thomas Helander, Lars Höglund et al.: *Thermo-Calc & DICTRA, computational tools for materials science. Thermo-Calc Version 2021b*, in: *Calphad*, Vol. 26 Nr. 2 (2002), S. 273–312.

21 Vgl. Deutsches Kupfer-Institut e. V.: *Messing: Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung*, 1953.

durch die Forschung bestätigt.<sup>22</sup> Im Gegensatz dazu werden Nickel und Zinn in der Literatur in höheren Gehalten als im Mikrolegierungsbereich zugesetzt.<sup>23</sup> Da in der Forschungsliteratur ein synergistischer Effekt beider Legierungselemente gezeigt wird, der zu einer besseren Korrosionsbeständigkeit führt,<sup>24</sup> wurde in der vorliegenden Arbeit ein Zusatz von jeweils 0,1 Ma.% untersucht. Die Zusammensetzung der Legierung wurde auf 69,7Cu-30Zn-0,1P-0,1Ni-0,1Sn (Ma.%) festgelegt. Die Thermo-Calc-Simulation der Phasenbildung zeigt, dass keine  $\beta$ -Phase auftritt. Ni löst sich vollständig im  $\alpha$ -Messing, und es scheiden sich geringe Mengen an P2Zn3 (0,0076 Vol.%) und Cu3Sn (0,0024 Vol.%) aus.

## 2.2 Herstellung der modifizierten Legierung CuZn30X

Die aus den Simulationsergebnissen festgelegte Legierung 69,7Cu-30Zn-0,1P-0,1Ni-0,1Sn (Ma.%) (im Folgenden als CuZn30X bezeichnet) wurde mittels Kokillengussverfahren hergestellt. Es wurden drei Abgüsse an einer VC400-Gießmaschine durchgeführt, unter Verwendung eines Graphittiegels mit einem Tiegelvolumen von 170 ccm. Verwendet wurden Cu-OFE sowie die Vorlegierungen CuZn36, CuP15, CuNi9Sn6 und reines Sn. Der Guss erfolgte unter Vakuum in eine rechteckige Graphitkokille, welche auf 450 °C temperiert wurde. Jede Gussprobe wog 470 g. Die Zusammensetzung der Legierung wurde durch jeweils drei Messungen an jeder Gussprobe mittels optischer Emissionsfunkenspektrometrie ermittelt und ist in Tabelle 1 aufgeführt.

Element	Cu	Zn	Ni	Sn	P
Mittelwert	$66,97 \pm 0,92$	$32,63 \pm 0,95$	$0,15 \pm 0,04$	$0,09 \pm 0,01$	$0,17 \pm 0,07$
Standardwerkstoff <sup>1</sup>	$69,2 \pm 0,3$	$30,8 \pm 0,3$	-	-	-
Soll	69,7	30,0	0,1	0,1	0,1

<sup>1</sup> Messung mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX)

Tabelle 1: Mittelwerte Elementgehalte der Gussproben der Legierung CuZn30X in Ma.% ermittelt mittels OES im Vergleich zur Standardlegierung CuZn30 ermittelt mittels EDX-Messung in Ma.%.

Anschließend wurden die Gussproben mit der Länge von 200 mm, der Breite von 50 mm und der Dicke von 5 mm gewalzt. Das Kaltwalzen erfolgte in 10 Stichen auf eine Dicke von 0,97 mm ( $\phi = 1,64$ ). Für das Warmwalzen wurde der Gusszustand zunächst bei 700 °C geglüht und anschließend in 5 Stichen ohne Zwischenwärmern auf eine Dicke von 1,04 mm ( $\phi = 1,57$ ) gewalzt. Als Vergleichsmaterial für weitere Untersuchungen standen Proben einer CuZn30-Legierung der Firma Jürgen Voigt Meisterwerkstatt für Metallblasinstrumente mit der Dicke von 0,53 mm zur Verfügung, im Weiteren als Standardwerkstoff bezeichnet.

22 Vgl. Galai et al.: *Effect of phosphorus*, 2021.

23 Vgl. Davies: *A note*, 1993.

24 Vgl. Sohn et al.: *The effects of tin*, 2002.

Im nächsten Schritt wurden die Eigenschaften der modifizierten Legierung im Vergleich zur Standardlegierung getestet. Mittels Röntgenbeugung (XRD) mit Co-Strahlung ( $\lambda = 1,78897 \text{ \AA}$ ) wurde in allen drei Proben nur die  $\alpha$ -Phase des Messings nachgewiesen. Korrosionserscheinungen aufgrund des Auftretens der  $\beta$ -Phase des Messings sind somit nicht als Gefahr in Betracht zu ziehen. Quasistatische Zugversuche wurden bei Raumtemperatur mit Proben der Form E nach DIN 50125 an einer AG100 von Shimadzu mit einer Messlänge von 40 mm durchgeführt. Die mechanischen Eigenschaften der modifizierten Legierung CuZn30X im kalt- und warmgewalzten Zustand sind im Vergleich zum Standardmaterial CuZn30 aus Literaturdaten in Tabelle 2 dargestellt. Die 0,2-Dehngrenze  $R_{p0,2}$ , die Zugfestigkeit  $R_m$  und die Bruchdehnung  $A$  wurden für die modifizierte Legierung CuZn30X im kalt- und warmgewalzten Zustand gemessen. Die mechanischen Eigenschaften der kaltgewalzten modifizierten Legierung zeigen höhere Werte der 0,2-Dehngrenze und der Zugfestigkeit im Vergleich zum warmgewalzten Zustand, gleichzeitig ist die Bruchdehnung geringer. Die Werte für die 0,2-Dehngrenze und die Bruchdehnung der kaltgewalzten CuZn30-Legierung aus Literaturdaten<sup>25</sup> stimmen bei vergleichbarem Gesamtumformgrad gut mit den Werten für die kaltgewalzte modifizierte Legierung überein. Die Zugabe der Legierungselemente Ni, Sn und P hat somit keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der modifizierten Legierung. Die Bruchdehnung  $A$  der modifizierten Legierung ist für die Weiterverarbeitung der Bleche im Bereich des Musikinstrumentenbaus allerdings zu gering, daher muss das Material vor einer weiteren Verwendung lösungsglüht werden.

Legierung	$\varphi$	Härte [HV1]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A$ [%]
CuZn30X (kaltgewalzt)	1,64	229 $\pm$ 5	683 $\pm$ 9	736 $\pm$ 9	1,5 $\pm$ 0,3
CuZn30X (warmgewalzt)	1,53	233 $\pm$ 5	604 $\pm$ 7	647 $\pm$ 11	2,9 $\pm$ 0,4
CuZn30 (kaltgewalzt)	1,61		680		2,5

Tabelle 2: mechanische Eigenschaften der getesteten Legierungen.

### 2.3 Untersuchung der modifizierten Legierung CuZn30X im kalt- bzw. warmgewalzten Zustand

Die gewalzten Proben der Legierung CuZn30X sowie die Standardprobe aus CuZn30 wurden für weitere metallographische Untersuchungen im Längs- und Querschliff eingebettet und präpariert. Zur Überprüfung hinsichtlich der Ent-

<sup>25</sup> Vgl. Stanisław Ozgowicz Wojciech, Elzbieta Kalinowska-Ozgowicz und Barbara Grzegorczyk: *The microstructure and mechanical properties of the alloy CuZn30 after recrystallization annealing*, in: *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing*, Vol. 40 Nr. 1 (2010), S. 15–24.

zinkungsneigung aufgrund des Herstellungsprozesses kam das Rasterelektronenmikroskop (REM) ZEISS GeminiSEM 450 zum Einsatz. Im REM wurde mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) von Oxford Instruments untersucht, ob die modifizierte Legierung CuZn30X im kalt- bzw. warmgewalzten Zustand sowie die Standardlegierung CuZn30 Anzeichen von Entzinkung aufweisen. Dazu wurden EDX-Messungen der Elemente Kupfer und Zink entlang einer Linie (Line Scan) im Randbereich der Proben durchgeführt. Die Analyse zeigte, dass die Anteile von Kupfer und Zink in allen drei Proben auch im Randbereich konstant blieben. Es konnte kein Absinken des Zinkgehalts im Randbereich festgestellt werden. Somit weisen alle drei Proben keine Anzeichen von Entzinkung aufgrund des Herstellungsprozesses auf.

Nach den ersten vielversprechenden Ergebnissen der modifizierten Legierung wurden im nächsten Schritt Korrosionsuntersuchungen in Form von Entzinkungstests, Stromdichte-Potential-Kurven und einer Spannungsrißkorrosionsprüfung in Ammoniak durchgeführt. Die Stromdichte-Potential-Kurven zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen der modifizierten und der Standardlegierung. Die Spannungsrißkorrosionsprüfung in Ammoniak ergab, dass in beiden Legierungen keine kritischen Risse auftraten, was auf das Fehlen kritischer Zugspannungen hinweist. Der Entzinkungstest bestätigte die hohe Korrosionsbeständigkeit der modifizierten Legierung, deshalb soll nachfolgend näher darauf eingegangen werden.

Der Entzinkungstest wurde gemäß der Norm in einer 1-prozentigen wässrigen Kupfer(II)-Chloridlösung bei  $75\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$  für 24 Stunden durchgeführt. Anschließend wurden die Proben mit Wasser und Ethanol gereinigt. Schon der optische Vergleich der Proben nach dem Test (Abbildung 1) zeigt, dass die Standardlegierung (Abbildung 1 a) eine deutliche Kupferfärbung der Oberfläche aufweist, was auf Entzinkung hindeutet. Zur Bewertung der Entzinkung wurden die Proben senkrecht zur Prüffläche getrennt, eingebettet und metallografisch präpariert. Im polierten Zustand wurde die Entzinkung lichtmikroskopisch untersucht. Im Querschliff (Abbildung 1 d) ist der entzinkte Bereich deutlich zu erkennen, wobei die maximale Entzinkungstiefe 359 µm beträgt. Im Gegensatz dazu sind die Proben der modifizierten Legierung von einer dunklen Schicht (Abbildung 1 b und c) überzogen, was auf die Bildung einer schützenden Deckschicht hinweist.

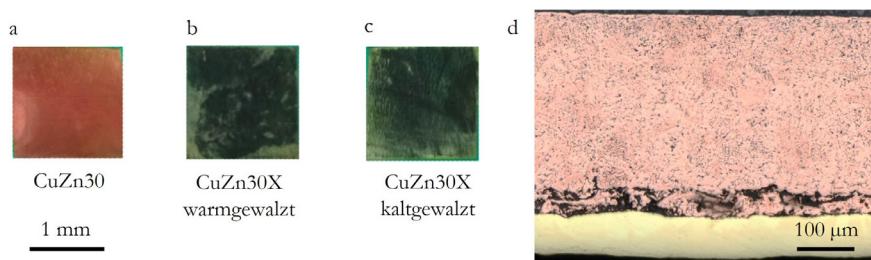


Abbildung 1: Versuchsproben nach dem Entzinkungstest in der Draufsicht der CuZn30X-Legierung im kaltgewalzten (a) und warmgewalzten (b) Zustand sowie der Standardlegierung CuZn30 (c) und im Querschliff (d).

Der Querschliff der modifizierten Legierung CuZn30X nach dem Entzinkungstest im kalt- und warmgewalzten Zustand wurde im REM im RückstreuElektronenkontrast (BSE) weiter untersucht (Abbildung 2). Damit ist die Ausbildung einer Oberflächenschicht auf den Proben der modifizierten Legierung CuZn30X zu erkennen. Im kaltgewalzten Zustand (Abbildung 2 a) beträgt die Schichtdicke ca. 20 – 30 µm und im warmgewalzten Zustand ca. 2 µm (Abbildung 2 b). Eine Abbildung der Schicht von oben ist in (Abbildung 2 c) dargestellt. Der gesamte Bereich, wie in Abbildung 2 c) dargestellt, wurde mittels EDX-Messung hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung untersucht. Es ist zu erkennen, dass die Probe eine unregelmäßige Oberfläche aufweist. Die modifizierte kaltgewalzte Legierung weist das gleiche Aussehen der Oberflächenschicht auf wie die modifizierte warmgewalzte Legierung in Abbildung 2 c).

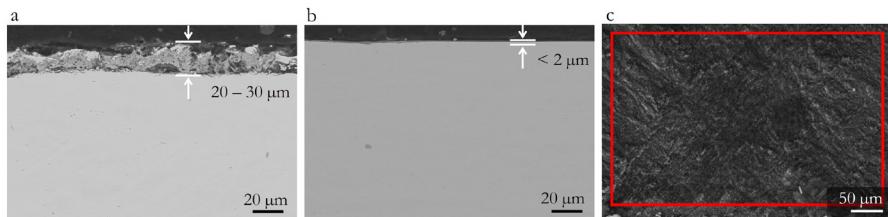


Abbildung 2: BSE-Abbildung des Querschliffes der modifizierten Legierung CuZn30X nach dem Entzinkungstest im kalt- (a) und warmgewalzten (b) Zustand sowie die Abbildung der Oberflächenschicht (c) im SE-Kontrast der warmgewalzten modifizierten Legierung CuZn30X mit der Kennzeichnung des Bereiches der EDX-Messung.

Weiterhin ist anhand der Messung der chemischen Zusammensetzung mittels EDX zu erkennen (Tabelle 3), dass der Zinkgehalt in der Oberflächenschicht, verglichen mit der Zusammensetzung des Gussmaterials (Tabelle 1), verringert ist. Die modifizierte Legierung CuZn30X weist niedrige Gehalte an Zinn und Phosphor (<1 Ma.%) bei einem Kupfergehalt von unter 68 Ma.% auf. Das nachgewiesene Vorhandensein von Zinn und Phosphor in der Schicht deutet auf

die Bildung schützender Deckschichten hin, die Cu<sub>2</sub>O<sup>26</sup> oder die Reaktionsprodukte der Legierungselemente<sup>27</sup> enthalten. Aufgrund der gewählten Messmethode ist Nickel in diesem Legierungssystem nicht detektierbar, da es zu einer Überlappung der Peaks zum Nachweis von Nickel und Zink kommt. Der Nachweis von Chlor in der Schicht wird auf die Rückhaltung von Elektrolyten innerhalb der porösen Struktur zurückgeführt. Diese Untersuchungen lassen darauf schließen, dass sich durch die Zugabe der Legierungselemente sowohl im kaltgewalzten als auch im warmgewalzten Zustand eine schützende Deckschicht auf der modifizierten Legierung CuZn30X bildet. Diese Oberflächenschicht verhindert die Disproportionierung von Kupfer und hemmt somit erfolgreich die Entzinkung. Ohne diese Legierungselemente kommt es jedoch zu erheblicher Korrosion.

Element	Cu	Zn	Ni	Sn	P	O	Cl
EDX-Messung	64,3	17,8	n.b.	0,9	0,8	8,5	7,7

Tabelle 3: Elementgehalte der Oberflächenschicht gemessen mittels EDX im gekennzeichneten Bereich der Abbildung 2 c in Ma.%.

## 2.4 Übertragung der entwickelten Legierung in den Musikinstrumentenbau

Im abschließenden Schritt wurde die modifizierte Legierung auf ihre Anwendbarkeit in der Musikinstrumentenindustrie getestet. Dazu wurde eine größere Menge von 40 kg dieser Legierung geschmolzen und im Stranggussverfahren zu Bolzen mit einem Durchmesser von 45 mm abgegossen. Im Anschluss wurde das Material zu Blechen und Stäben gewalzt. Dies erfolgte zunächst über einen Warmwalzprozess in 12 Stichen bei 800 °C und Nachwärmern bei 800 °C. Nach einem Beizprozess wurde das Material in 10 bzw. 11 Stichen bis zu den benötigten Enddicken von 0,5 mm, 0,6 mm und 0,7 mm für die verschiedenen Bauteile einer Trompete kaltgewalzt.

Aus der modifizierten Legierung wurden im Anschluss Bauteile für einen Prototyp einer Trompete hergestellt. Dazu wurden erfolgreich Schallstücke und Rohrmaterial aus den Blechen gefertigt. Bei den dabei anfallenden handwerklichen formgebenden Arbeiten wurde die Verarbeitbarkeit durch die technischen Mitarbeiter nicht weiter beanstandet. Ebenso wurden die Verarbeitungsschritte Drehen, Hartlöten und Schleifen getestet. Beim Drehen zeigte das Material, ähnlich wie die Standardlegierung CuZn30, schlechte Eigenschaften

26 Vgl. Galai et al.: *Effect of phosphorus*, 2021; Yiqi Zhou, Sultan Mahmood und Dirk Lars Engelberg: *Brass dezincification with a bipolar electrochemistry technique*, in: *Surfaces and Interfaces*, Vol. 22 (2021), S. 1–16; Peng Zhou, Michael J. Hutchison, Johann Wilhelm Erning et al.: *An in situ kinetic study of brass dezincification and corrosion*, in: *Electrochimica Acta*, Vol. 229 (2017) S. 141–154.

27 Vgl. Davies: *A note*, 1993.

und erzeugte Fließspäne, die sich um die Werkzeuge wickeln. Allerdings ist dieser Verarbeitungsschritt im Musikinstrumentenbau nicht entscheidend, da hier Materialien mit besserer Zerspanbarkeit, wie CuZn39Pb3, verwendet werden können. Beim Schleifen schmiert das Material, was zu schnellerem Abschärfen der Werkzeuge und höherer Hitzeentwicklung führt als bei CuZn30. Dieses Problem erfordert Lösungsansätze für eine zukünftige Anwendung der modifizierten Legierung. Das Hartlöten mit Silberlot funktionierte hingegen gut.

### **3. Zusammenfassung und Ausblick**

Ziel der Untersuchungen war die Legierungsentwicklung für Bauteile in Blechblasinstrumenten, welche eine verbesserte Korrosionsbeständigkeit aufweisen. Die Auswahl der Legierungselemente wurde durch Umweltverträglichkeit, Kosten und Auswirkungen auf die Verarbeitungseigenschaften eingeschränkt. Unter Beachtung dieser Aspekte entstand die modifizierte Legierung CuZn30X, bestehend aus 69,7 Ma.% Kupfer, 30 Ma.% Zink und jeweils 0,1 Ma.% Phosphor, Zinn und Nickel. Thermodynamische Simulationen wurden genutzt, um eine erste Auswahl der Legierungselemente hinsichtlich der Phasenzusammensetzung zu treffen. Die Legierung CuZn30X ist einphasig und enthält keine korrosionsanfällige  $\beta$ -Phase des Messings. Die modifizierte Legierung CuZn30X zeigt gute Voraussetzungen zum Kalt- sowie zum Warmwalzen.

Die Korrosionseigenschaften der modifizierten Legierung CuZn30X wurden im Vergleich zur Standardlegierung CuZn30 durch Entzinkungstests nach DIN 6509, Stromdichte-Potential-Kurven und einer Spannungsrißkorrosionsprüfung in Ammoniak untersucht. Die Entzinkungstests bestätigten die verbesserte Korrosionsbeständigkeit der Legierung CuZn30X und zeigten die Korrosionsanfälligkeit der Standardlegierung CuZn30 auf.

Zukünftig sollen Bauteile eines Blechblasinstruments aus der neuen Legierung hergestellt und im praktischen Einsatz getestet werden, um den realen Einsatz besser zu simulieren. Dabei sollen nicht nur die optischen und verarbeitungstechnologischen Eigenschaften, sondern auch die akustischen Eigenschaften des Instruments geprüft werden.

### **4. Danksagung**

Die vorgestellte Arbeit wurde vom BMBF im Rahmen der Programmlinie „WIR! – Wandel durch Innovation in der Region“ im Regionalen Bündnis „I-Ma-Tech“ gefördert. Wir danken Herrn Dr. Markus Kirschner für seine Unterstützung im Rahmen dieses Projekts. Das Gießen der modifizierten Legierung an einer VC400-Gießmaschine (Indutherm Blue Power Casting Systems, Walzbachtal, Deutschland) sowie die Messung der chemischen Zusammensetzung mittels optischen Emissionsfunken-Spektrometer (Spectrotest, SPECTRO Analytical Instruments GmbH, Kleve, Deutschland) wurden durch Frau Dr. Julia Dölling sowie Herrn Prof. Andreas Zilly durchgeführt. Weiterhin wurden die Messungen der Phasenzusammensetzung mittels XRD von Herrn Dr. Christian Schimpf bereitgestellt. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung.