

Zusammenfassung Projekt „WIR! - iMATECH Vermeidung von Zinkfraß im Metallblasinstrumentenbau“

Ausführlicher Projekttitle:	Vermeidung von Zinkfraß im Metallblasinstrumentenbau
Kurztitel/Akronym:	Zinkfraß
Projektlaufzeit:	01.12.2020 – 31.10.2023

Projektbeteiligte Einrichtungen	Ansprechpartner
TU Bergakademie Freiberg, Institut für Metallformung (IMF)	Prof. Ulrich Prahl
Instrumentenbau Jürgen Voigt GmbH & Co. KG	Frau Kerstin Voigt

Inhaltsverzeichnis

0	Abstract	3
1	Projektziele	4
2	Projektablauf	5
2.1	Analyse von historischen Instrumenten.....	5
2.2	Legierungsentwicklung.....	5
2.2.1	Legierungserzeugung.....	6
2.2.2	Korrosionsuntersuchungen	7
2.3	Entwicklung der Umformtechnologie am Beispiel des Biegens eines Posaunenzugbogens ..	7
2.4	Übertragung der ermittelten Daten auf die Anwendbarkeit in der Instrumentenbauindustrie	8
3	Projektergebnisse.....	9
3.1	Analyse von historischen Instrumenten.....	9
3.2	Legierungsentwicklung.....	9
3.2.1	Legierungserzeugung.....	9

3.2.2	Korrosionsuntersuchungen	9
3.3	Entwicklung der Umformtechnologie am Beispiel des Biegens eines Posaunenzugbogens	10
3.4	Übertragung	11
3.5	Zusammenfassung.....	12
3.6	Danksagung	13
3.7	Literatur	13
4	Potentielle Nutzung der Projektergebnisse	15

0 Abstract

Das vorliegende Projekt zielte darauf ab, die Ursachen des Zinkfraßes im Metallblasinstrumentenbau zu ermitteln, verschiedenen Lösungsansätze zu dessen Vermeidung zu entwickeln und diese hinsichtlich der Anwendbarkeit im Musikinstrumentenbau zu untersuchen. Das Projekt wurde unter Leitung des Instituts für Metallformung (IMF) zusammen mit der Firma „Instrumentenbau Jürgen Voigt GmbH & Co. KG“ durchgeführt und gliederte sich thematisch in zwei Teile auf.

Im ersten Teilprojekt wurde der Einfluss der Legierungszusammensetzung auf die Entzinkungsneigung untersucht. Hierbei konnte festgestellt werden, dass verschiedene Elemente in den Legierungen historischer Instrumente entzinkungshemmende Eigenschaften aufweisen. Diese Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die Entwicklung einer neuartigen entzinkungshemmenden Legierung. Hierzu erfolgte zunächst eine umfassende Literaturrecherche mit anschließenden Phasensimulationen verschiedener potentieller Legierungszusammensetzungen. Daraus wurde eine modifizierte Legierung entwickelt, die jeweils 0,1% Phosphor, Zinn und Nickel enthält. Entzinkungstests zeigten die Beständigkeit der modifizierten Legierung gegenüber der Standardlegierung. Die technische Umsetzbarkeit der modifizierten Legierung wurde durch erfolgreiche Gieß- und Walzversuche bestätigt.

Im zweiten Teil des Projektes wurde das Auftreten von Mikrorissen an von Zinkfraß betroffenen Bauteilen erforscht. Darauf aufbauend wurden besonders kritische Prozesse im Metallblasinstrumentenbau durch numerische Simulationen analysiert und modifiziert, mit dem Ziel, die Mikrorissbildung zu verhindern. Die durchgeführten Prozesssimulationen lieferten Erkenntnisse über mögliche Verbesserungspotentiale bei der Umformtechnologie. Ein Beispiel hierfür stellte die Simulation vom Biegeprozess eines Posaunenzugbogens dar, bei dem durch eine Verringerung der Umformgeschwindigkeit eine Reduzierung des Schädigungsparameters vom untersuchten Werkstoff festgestellt werden konnte. Allerdings konnten nur geringfügige Unterschiede im Schädigungsparameter gezeigt werden, sodass keine signifikanten Auswirkungen im tatsächlichen Produktionsprozess erzielbar sind. Besonders hervorzuheben ist die erfolgreiche Herstellung von Bauteilen einer Trompete (Stimmbögen und Mundrohre), welche vollständig aus der modifizierten Legierung bestehen. Dies unterstreicht nicht nur die technische Umsetzbarkeit, sondern auch die Anwendbarkeit der entwickelten Legierung in der Praxis, insbesondere im Bereich der Musikinstrumentenherstellung.

1 Projektziele

Im modernen Metallblasinstrumentenbau stellt das Auftreten von Entzinkungserscheinungen, sogenannter „Zinkfraß“, die Hersteller vor neue Herausforderungen. Dieser Korrosionsprozess, vor allem bei Messinglegierungen mit einem höheren Zinkanteil (> 20 % Zink), hat in jüngerer Zeit vermehrt zu Gewährleistungsfällen und damit zu wirtschaftlichen Schäden aber auch zu Imageschaden geführt. Vor diesem Hintergrund zielte das vorliegende Projekt darauf ab, die Ursachen dieser Entzinkungserscheinung zu identifizieren und Lösungsansätze durch die Erprobung neuer Technologien und Legierungen zu entwickeln, um die Wirtschaftlichkeit der Unternehmen im Metallblasinstrumentenbau zu erhalten.

Aus dem Stand der Technik konnten zwei Hauptursachenkategorien für Zinkfraß identifiziert werden: einerseits Korrosionsneigung aufgrund von Mikrorissen, eingebracht durch die Umformung, und andererseits die anfällige chemische Zusammensetzung des Legierungssystems. Eine detaillierte Untersuchung der Umformgrade und Mikrorissbildung sowie die Entwicklung historisch nachahmender Legierungskonzepte wurden daher als potenzielle Lösungen genauer betrachtet.

2 Projektablauf

Das Projekt verfolgte eine systematische Vorgehensweise, um den Zinkfraß in Metallblasinstrumenten zu verringern bzw. zu vermeiden. Zunächst sollte die Übertragbarkeit der entzinkungshemmenden Eigenschaften historischer Metallblasinstrumente auf moderne Legierungen geprüft werden. Dazu wurden Legierungselemente, welche Entzinkung verhindern, identifiziert, ein geeignetes mikrolegiertes Messingsystem bestimmt und Probeschmelzen hergestellt. Parallel dazu wurde das Auftreten von Mikrorissen an von Zinkfraß betroffenen Bauteilen untersucht. Darauf aufbauend wurden besonders kritische Prozesse im Metallblasinstrumentenbau durch numerische Simulationen analysiert und modifiziert, mit dem Ziel, die Mikrorissbildung zu verringern. Die Ergebnisse dienten als Grundlage für experimentelle Versuche, woraus schließlich erfolgreich Bauteile der entzinkungshemmenden Legierung hergestellt werden konnten.

2.1 Analyse von historischen Instrumenten

Im ersten Schritt wurden historische Instrumente, bereitgestellt vom Musikinstrumenten-Museum in Markneukirchen, hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung untersucht. Hierfür wurden historische Instrumente aus dem 19. Jhd. (Abbildung 1) analysiert. Hierbei handelt es sich um zwei Klappentrompete und ein chromatisches Basshorn. Auffällig an allen diesen Instrumenten ist, dass diese keine Entzinkungserscheinungen in Form von Zinkfraß zeigen. Daher sollte in diesem Schritt überprüft werden, ob eine andere chemische Zusammensetzung der Legierungen im Vergleich zu aktuell im Metallblasinstrumentenbau genutzten Legierungen dafür verantwortlich sein kann. Die chemische Zusammensetzung wurde mittels energiedispersiver/wellenlängendispersiver Röntgenspektroskopie (EDS/WDS) im Rasterelektronenmikroskop (REM) (GeminiSEM 450, Zeiss) untersucht. Weiterhin wurden Literaturrecherchen zur Legierungszusammensetzung historischer Instrumente zwischen dem 16. und dem 19. Jhd. durchgeführt.



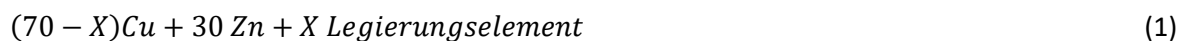
Abbildung 1: Analyse der chemischen Zusammensetzung verschiedener historischer Instrumente mittels EDS und WDS im REM: zwei Klappentrompeten und ein chromatisches Basshorn (19. Jhd.)

2.2 Legierungsentwicklung

Aktuell wird im Musikinstrumentenbau die Messinglegierung CuZn30 genutzt. Ziel des Projektes war es, eine entzinkungsbeständige Legierung für den Musikinstrumentenbau zu entwickeln. Dabei sind die sehr spezifische Anforderungen an das Material im Musikinstrumentenbau hinsichtlich Verarbeitung, Optik und Akustik zu beachten. Daher wurde der Ansatz verfolgt, die Standardlegierung CuZn30 im niedrig- und mikrolegierten Bereich zu verändern, um die Veränderungen der Eigenschaften möglichst gering zu halten.

Die Phasenzusammensetzung möglicher modifizierter Legierungszusammensetzung wurde mit dem Programm "Thermo Calc" simuliert [1]. Dieses Simulationstool ermöglicht die thermodynamische Modellierung von Mehrkomponentenlegierungen, wie z. B. die Zusammensetzung und die Gefügeanteile von Phasen und Ausscheidungen. Die Berechnungsmethode basiert auf experimentellen und theoretischen Kennwerten, die in die Berechnungen der "CALPHAD-Methode" (Calculation of Phase Diagrams) einfließen. Das Berechnungsprinzip der mathematischen Modelle basiert auf dem Bestreben, ein Phasengleichgewicht zu erreichen (Minimierung der Gibbs'schen freien Energie) [1]. Ziel war es, modifizierte Legierungen mit zusätzlichen Legierungselementen auf die Tendenz zur Bildung der β -Phase von Messing zu simulieren. Die kubisch-raumzentrierte (krz) β -Phase des Messings tritt bei höheren Zn-Gehalten (ca. 37 bis 46 % Zn) auf, aber durch die Zugabe von verschiedenen Legierungselementen kann die Entstehung β -Phase begünstigt oder verhindert werden. Aufgrund der krz-Kristallstruktur zeigt die β -Phase eine schlechtere Umformbarkeit. Gleichzeitig führt der erhöhte Zinkanteil zu einer wesentlich schlechteren Korrosionsbeständigkeit im Vergleich zur α -Phase [2]. Daher ist die Ausbildung der β -Phase in einer modifizierten entzinkungsbeständigen Legierung zu vermeiden.

Der Ausgangspunkt für die Simulationen ist die Messinglegierung CuZn30. Für die Simulation der Phasenzusammensetzungen nach Zugabe verschiedener Elemente im Bereich x bis 3,6 Ma.% wurde der Zinkgehalt konstant bei 30 Ma.% gehalten, während die Menge des zugesetzten Legierungselements vom Kupfergehalt abgezogen wurde:



Im Mikrolegierungsbereich ($x \leq 0,1$ Ma.%) wurden die Legierungselemente in 0,01 Ma.% Schritten zugegeben und 0,1 Ma.% für höhere Legierungsanteile ($x > 0,1$ Ma.%). Die Phasenzusammensetzung wurde in einem Temperaturbereich von 1500 bis 400 K (1227 bis 127 °C) bestimmt. Simuliert wurden Legierungssysteme mit den Elementen 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 hinsichtlich der Phasen- und Ausscheidungsbildung. Im Anschluss wurden die Legierungselemente X hinsichtlich ihrer Eignung zur Herstellung einer entzinkungsresistenten Legierung für den Musikinstrumentenbau bewertet. Aufgrund der Korrosionsanfälligkeit der β -Phase wurden die Elemente B, Be, Cr, Fe, C Mo und Nb nicht weiter für die Legierungsentwicklung in Betracht gezogen. Ebenso wurden gesundheitsschädliche und kostenintensive Legierungselemente aussortiert. Weiterhin ist zu beachten, dass Al negative Auswirkungen auf die Lötbarkeit und Färbung hat und Si die Neigung zur Spannungsrisskorrosion herabsetzt [3].

2.2.1 Legierungserzeugung

Im Anschluss an die Simulation wurde eine ausgewählte modifizierte Legierungszusammensetzung CuZn30X mittels Kokillengussverfahren mit einer VC400-Gießmaschine an der DHBW Stuttgart abgegossen. Als Ausgangsmaterial diente Cu-OFE sowie die Vorlegierungen CuZn36, CuNi9Sn6, CuP15 und Sn als reines Element. Der Abguss erfolgte unter Vakuum in eine rechteckige Graphitkokille von 200 x 50 x 5 mm³. Die tatsächliche Legierungszusammensetzung wurde mittels optischen Emissionsfunken-Spektrometer ermittelt. Die Gussproben wurden anschließend einem Kalt- bzw. Warmwalzprozess unterzogen. Das Kaltwalzen erfolgte in 10 Stichen auf 0,97 mm ($\phi = -1,64$). Für das Warmwalzen wurde der Gusszustand zunächst bei 700 °C gegläut und anschließend in 5 Stichen ohne Zwischenwärmern auf 1,04 mm ($\phi = -1,57$) gewalzt. Als Vergleich für die weiteren Untersuchungen standen Proben einer CuZn30-Legierung des Projektpartners „Instrumentenbau Jürgen Voigt GmbH & Co. KG“ mit einer Dicke von 0,53 mm zur Verfügung, im weiteren als Standardwerkstoff bezeichnet. Die gegossene und gewalzte Legierung wurde hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht. Anhand von XRD-Messungen (X-ray diffraction analysis) mittels Co-Strahlung ($\lambda = 1,78897 \text{ \AA}$) im 2θ -Bereich von 20 bis 150° mit einer Schrittweite von 0,01° wurde die Phasen-

zusammensetzung bestimmt. Die mechanischen Eigenschaften 0,2-Dehngrenze $R_{p0,2}$, die Zugfestigkeit R_m und die Bruchdehnung A der modifizierten Legierung CuZn30X im kalt- und warmgewalzten Zustand wurden ermittelt. Im Rasterelektronenmikroskop wurde mittels EDS-Messung der Elemente Cu und Zn nachgeprüft, ob die modifizierte Legierung CuZn30X im kalt- bzw. warmgewalzten Zustand und die Standardlegierung CuZn30 Anzeichen von Entzinkung im Randbereich zeigen.

2.2.2 Korrosionsuntersuchungen

Im nächsten Schritt wurden Korrosionsuntersuchungen durchgeführt. Zunächst wurde die Prüfung auf Spannungsrisskorrosion gemäß DIN 50916 (Teil 1) [4] in 25%-iger Ammoniaklösung durchgeführt. Die Versuchsmuster bestanden aus je drei Stücken der kalt- und warmgewalzten CuZn30X-Proben sowie aus fertigen Rohrbauteilen bereitgestellt von Instrumentenbau Jürgen Voigt GmbH & Co. KG. Weiterhin wurden Stromdichte-Potential-Kurven nach DIN 50918 [5] aufgenommen. Diese können genutzt werden, um die Geschwindigkeit der Metallauflösung oder Passivierung anhand der gemessenen Stromdichte in Abhängigkeit von der angelegten Spannung zu quantifizieren. Zur Untersuchung der Korrosionsbeständigkeit hinsichtlich des Entzinkungsverhaltens diente der Entzinkungstest nach DIN EN ISO 6509 [6]. Zur Bewertung der Entzinkung wurden die Proben senkrecht zur exponierten Prüffläche getrennt und zur weiteren metallographischen Untersuchung eingebettet und präpariert. Die Entzinkungstiefe wurde im polierten Zustand am Keyence VHX 6000 Mikroskop im Längsschliff qualitativ bewertet. Zur weiteren Untersuchung der dünnen Oberflächenschicht der modifizierten Legierung wurden abbildende Verfahren (SE-Kontrast) und die Analyse der chemischen Zusammensetzung mittels EDS im REM genutzt.

2.3 Entwicklung der Umformtechnologie am Beispiel des Biegens eines Posaunenzugbogens

Der Fokus des ersten Teils des Projektes lag auf der Entwicklung einer entzinkungsbeständigen Legierung. Im zweiten Teil des Projektes wurden die Umformprozesse im Musikinstrumentenbau näher betrachtet. Ziel war die Überprüfung der These, dass Mikrorisse bei bestimmten Umformverfahren bei der Herstellung von Blechblasinstrumenten auftreten und ob diese dafür verantwortlich sind, dass in diesen Rissen über einen ausreichend langen Zeitraum Korrosion stattfinden kann. Im ersten Schritt wurden von Zinkfraß betroffene Stellen im Lichtmikroskop (LiMi) und im REM untersucht.

Das Biegen des Posaunenzugbogens ist als besonders kritischer Prozess zu betrachten, da es sich um einen manuellen Hohlbiegeprozess mit großen Umformgraden handelt. Der Posaunenzugbogen ist auch häufig von Zinkfraß betroffen. Den Ausgangszustand bildet ein CuZn30-Rohr mit einem Außendurchmesser von 15,95 mm und einer Wanddicke von 0,45 mm. Das Biegen erfolgt in einem manuellen Prozess mit einer geschätzten Gesamtdauer von ca. 3 s. Die Simulation des Biegeprozesses erfolgte mittels SimufactForming 2021.1 von Hexagon (SF) über das Cockcroft-Latham-Kriterium der Schädigung [7] mit CuZn30 für das Rohrmaterial und Werkzeugstahl für das Biegewerkzeug aus der Simufact Material Datenbank. Dazu wurden aus der gegebenen gebogenen Rohr-CAD-Datei Werkzeuge erstellt, die das Rohr festhalten, ebenso wie eine der Funktionsweise entsprechenden Presse als Werkzeug, die das Rohr in seinen Endzustand zwingt. Die Reibung wurde aus der Reibdatenbank von Simufact zwischen Kupfer und Stahl kalt (Mischreibung) genutzt.

Zur Auswertung und Betrachtung der Schädigung des Prozesses wird das Schädigungskriterium nach M. G. Cockcroft und D. J. Latham (CLK) [7] verwendet. Es handelt sich um ein makromechanisches Modell, welches werkstoffunabhängig ist und sowohl eine lokale Abschätzung der Materialschädigung als auch eine kumulierte Schädigung über die Prozessdauer ermöglicht. Die Auswertung

der Simulation wird mit Hilfe von Post-Partikeln durchgeführt. Der Prozess wird als annähernd symmetrisch angesehen.

Zur Validierung der Simulation mit dem Prozess wurde auf das Rohr im Ausgangszustand durch einen Laser ein Raster mit definierter Geometrie aufgebracht. Anschließend wurden die Rohre bei „Instrumentenbau Jürgen Voigt GmbH & Co. KG“ gebogen. Für Auswertungen wurde ein optisches 3D-Messsystem „AutoGrid“ genutzt, welches die Verzerrung der Muster nach der Belastung ausgewertet und mit den Ergebnissen der Simulation verglichen.

2.4 Übertragung der ermittelten Daten auf die Anwendbarkeit in der Instrumentenbauindustrie

Im letzten Schritt wurde die modifizierte Legierung auf ihre Anwendbarkeit in der Musikinstrumentenindustrie hin geprüft. Hierzu wurde erneut eine größere Menge der modifizierten Legierung erschmolzen und im Stranggussverfahren an einer Stranggießanlage VCC 400 von Indutherm bei 1060 °C abgegossen. Die Temperatur der Kokille betrug 950 °C. Es wurden Bolzen mit einem Durchmesser von 45 mm abgegossen. Im Anschluss wurde das Material zu Blechen und Stäben ausgewalzt. Dies erfolgte zunächst über einen Warmwalzprozess in 12 Stichen, wobei das Material zunächst bei 800 °C lösungsgeglüht und auch zwischendurch bei 800 °C nachgewärmt wurde. Anschließend wurde das Material gebeizt, gefolgt von einem Kaltwalzprozess 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. Nachfolgend wurden Bauteile aus der modifizierten Legierung für den Prototypen einer Trompete hergestellt. Aus den Blechen wurden Schallstücke und Rohrmaterial hergestellt. Des Weiteren wurden die Verarbeitungsschritte Drehen, Hartlöten und Schleifen getestet.

3 Projektergebnisse

3.1 Analyse von historischen Instrumenten

Anhand der EDS/WDS Untersuchungen an Teilen von historischen Instrumenten und den Literaturrecherchen zur Legierungszusammensetzung historischer Instrumente [8–10] sowie hinsichtlich bekannter entzinkungshemmende Legierungselemente [11; 2; 12; 13] konnten die Elemente As, Al, Si, Sn und Ni als entzinkungshemmende Legierungsbestandteile identifiziert werden. Die entzinkungshemmende Wirkung der Legierungselemente As und P beruht auf der Hemmung der Disproportionierung von Kupfer(II)-chlorid [14; 15; 2; 13], sodass sich Kupfer nicht erneut auf der korrodierten Oberfläche absetzt. Dadurch wird zwar nicht das Auflösen des Messings verhindert, stattdessen bilden sich Schutzschichten, in die Verbindungen der Legierungselemente eingebaut sind und deren Potential so hoch ist, dass keine Kupferabscheidung stattfinden kann. Dagegen wirken Ni und Sn entzinkungshemmend durch die Bildung einer oxidischen Schutzschicht, die zur Passivierung der Legierung beiträgt [14; 15].

3.2 Legierungsentwicklung

Auf Grundlage der thermodynamischen Simulationen und der Literaturstudien [2; 16; 13; 17; 11] wurden die Elemente Ni, P und Sn ausgewählt. Als Zusammensetzung der modifizierten Legierung wurde 69,7Cu-30Zn-0,1P-0,1Ni-0,1Sn (Ma.%) festgelegt. Die Thermo-Calc-Simulation der Phasenausbildung bestätigte, dass keine β -Phase auftritt.

3.2.1 Legierungserzeugung

Beim Abgießen der Legierung ist darauf zu achten, dass das im Messing enthaltene Zink nicht abdampft. Dies kann erreicht werden durch eine Schmelztemperatur von 1050 °C, welche nicht überschritten werden sollte. Außerdem ist die Nutzung einer Stickstoffatmosphäre empfehlenswert. Die modifizierte Legierung wies gute Kalt- und Warmwalzeigenschaften auf.

Anhand der XRD-Messungen wurde bestätigt, dass alle drei Legierungen eine einphasige Zusammensetzung aus der α -Phase des Messings aufweisen, wodurch keine Korrosionsgefahr aufgrund des β -Messings zu erwarten ist. Die mechanischen Eigenschaften der modifizierten Legierung CuZn30X im kalt- und warmgewalzten Zustand nach dem Glühen (500 °C, 5 min) lassen sich im Bereich der Werte von R350 der Norm [18] einordnen. Anhand von EDS-Untersuchungen wurde festgestellt, dass weder in der Standardlegierung CuZn30, noch in den modifizierten Legierungen CuZn30X im kalt- und warmgewalzten Zustand Anzeichen von Entzinkung zu erkennen waren.

3.2.2 Korrosionsuntersuchungen

Das Ergebnis dieser Untersuchung der Spannungsrissskorrosionsprüfung ergab, dass weder bei der modifizierten Legierung CuZn30X noch bei der Standardlegierung CuZn30 kritische Risse festgestellt wurden, obwohl die Prüfung im Ammoniakdampf stellt eine äußerst aggressive Umgebung darstellt [19]. Anhand der Stromdichte-Potentialkurven wurde zwischen der modifizierten Legierung CuZn30X und der Standardlegierung CuZn30 keine signifikanten Unterschiede ersichtlich. Dagegen wies der Entzinkungstest deutlich die entzinkungshemmenden Eigenschaften der modifizierten Legierung nach. Die Standardlegierung CuZn30 zeigt deutlich die kupferrote Färbung aufgrund von gleichmäßiger Entzinkung mit einer maximalen Entzinkungstiefe von 359 μm . Die modifizierte Legierung CuZn30X zeigte sowohl im kalt- als auch im warmgewalzten Zustand dunkle Anlaufschichten unmittelbar nach dem Versuch auf der Oberfläche, die auf eine schützende Deckschicht bestehend aus $\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}$ [20] hindeuten. Diese dünne Oberflächenschicht hat im kaltgewalzten Zustand eine Schichtdicke von ca. 20 – 30 μm und im warmgewalzten Zustand von ca. 2 μm . Die Oberflächenschichten wurden mittels SE-Kontrast und EDS im REM analysiert. In der Schicht wurden niedrige Gehalte an Sn und P (<1 Ma.%) gefunden. Die Bildung einer Deckschicht, welche die

Reaktionsprodukte der Legierungselemente [2] enthält, wird in der Literatur beschrieben. Die Legierungselemente in der Schicht bewirken, dass die Disproportionierung von Kupfer(II)-Chlorid nicht stattfinden kann und somit die Entzinkung gehemmt wird.

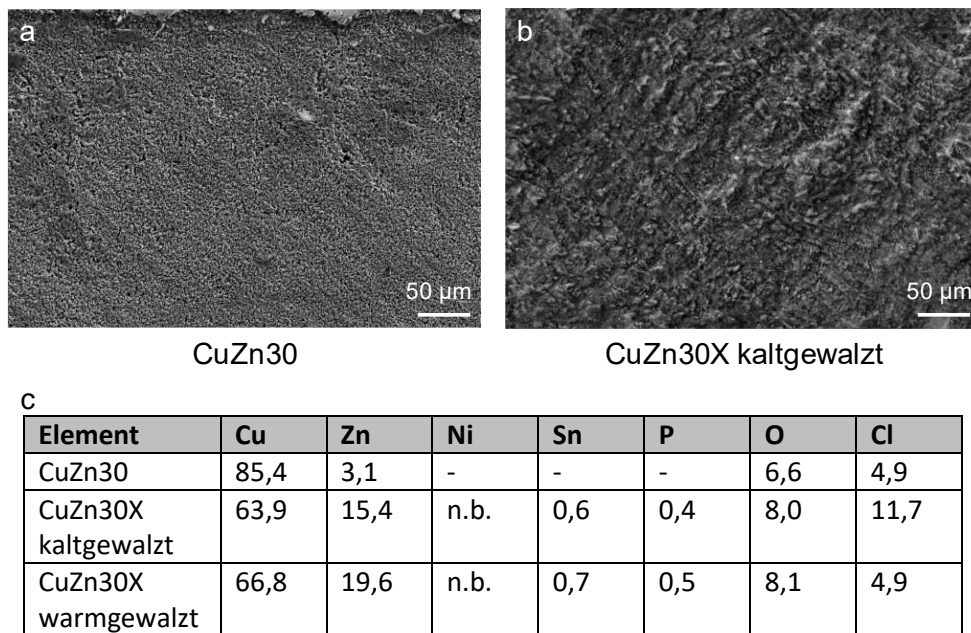


Abbildung 2: REM-Aufnahme im SE-Kontrast der Oberflächenschichten der Standardlegierung CuZn30 (a) im Vergleich zur modifizierten Legierung CuZn30X im kaltgewalzten Zustand (b) sowie die chemische Zusammensetzung der Schicht ermittelt mittels EDS

3.3 Entwicklung der Umformtechnologie am Beispiel des Biegens eines Posaunenzugbogens

Anhand LiMi- und REM-Aufnahmen konnte keine Ursache für die Entstehung des Zinkfraßes festgestellt werden. Weiterhin ist keine Lokalisierung der von Zinkfraß betroffenen Stellen in bestimmten Rohrbereichen erkennbar. Ebenso wurden keine Mikrorisse gefunden, an denen die Entzinkung starten könnte. Daher wurden im nächsten Schritt exemplarisch besonders stark umgeformte Bauteile näher betrachtet.

Die Auswertung der numerischen Simulationen zeigte, dass die größte Schädigung an der äußersten Faser auftritt, wo neben der Biegung zusätzlich auch Streckung stattfindet. Daher werden nachfolgend die ausgewählten Partikel weiter betrachtet, bei denen der größte Schädigungswert d auftritt (Abbildung 3 b). Im Vergleich der Simulation mit dem Prozess bei „Instrumentenbau Jürgen Voigt GmbH & Co. KG“ konnte nachgewiesen werden, dass der Bereich mit dem maximalen Umformgraden mit dem Bereich, in dem die höchsten Schädigungswerte auftreten, übereinstimmt. Der maximal erreichte Umformgrad beträgt 0,3.

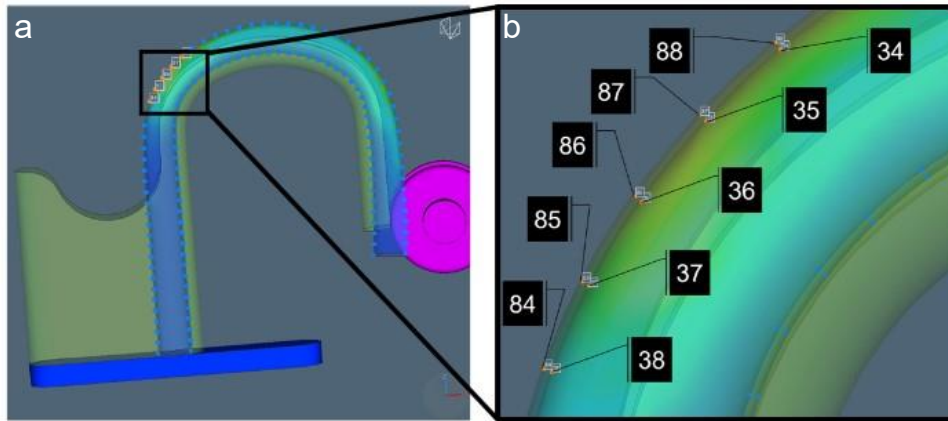


Abbildung 3: Positionierung der Post-Partikel mit markierten Partikeln für die Auswertung

Mit Hilfe der Simulation wurde eine Variation der Biegegeschwindigkeit mit Gesamtdauern von 1,4 s bis 28 s durchgeführt. In Abbildung 4 sind die Maxima der Schädigungswerte über die Gesamtdauer des Prozesses aufgetragen, wobei die y-Achse auf den Bereich von $d = 0,24$ bis $0,29$ beschränkt ist, um Unterschiede zwischen den Simulationen deutlicher hervorzuheben. Der Unterschied zwischen den verschiedenen Geschwindigkeiten ist daher als sehr gering zu bewerten. Die Variation der Biegegeschwindigkeit führt also nur zu einem geringen Unterschied in der finalen Schädigung.

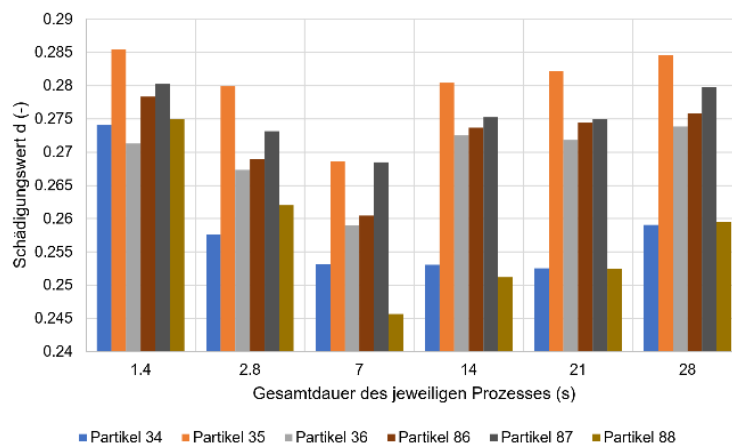


Abbildung 4 Vergleich der Schädigungsmaxima aufgetragen über die Gesamtdauer des jeweiligen Prozesses

Aktuell wird der Biegeprozess in ca. 3 s durchgeführt. Aus der Simulation ergibt sich ein Minimum des resultierenden Schädigungswertes d für den Werkstoff und das Rohr bei 7 s Gesamtdauer des Vorgangs. Daraus kann die Empfehlung abgeleitet werden, das Rohr entsprechend im Bereich dieses Optimums umzuformen. Für das Partikel mit der größten Schädigungsgefahr können etwa 4 % Reduzierung mit Hilfe der Geschwindigkeitsänderung im Vergleich zur aktuellen Prozessgeschwindigkeit herbeigeführt werden. Abschließend wurde die Veränderung der Geschwindigkeit des Biegens des Posaunenzugbogens bei „Instrumentenbau Jürgen Voigt GmbH & Co. KG“ getestet. Mittels LiMi und REM wurden keine Hinweise auf Mikrorisse im Bereich der größten Umformgrade festgestellt.

3.4 Übertragung

Im Anschluss wurden Bauteile aus der modifizierten Legierung für den Prototypen einer Trompete hergestellt (Abbildung 5). Bei der Herstellung der Schallstücke und Rohrmaterial aus den Blechen (Abbildung 5 a,b und e) kam es zunächst zu Problemen, da das Material beim vorangelernten Glühprozess ein anderes Verhalten zeigte. Die bisher verwendete Glühbehandlung für das

Standardmaterial konnte nicht direkt auf die modifizierte Legierung übertragen werden, wodurch es im nachfolgenden Umformprozessen zu Problemen kam. Hier ist anzustreben in einem nachfolgenden Projekt den Glühprozess angepasst an die neue Legierungszusammensetzung genauer zu betrachten. Diese Probleme konnten behoben werden, sodass Bauteile, wie Schalltrichter (Abbildung 5 c) erfolgreich hergestellt werden konnten. Des Weiteren wurden die Verarbeitungsschritte Hartlöten und Schleifen getestet. Beim Schleifen schmiert das Material, wodurch das Werkzeug schneller stumpf wird und die Hitzeentwicklung größer ist als bei CuZn30. Für dieses Problem sollten bei einem Einsatz der modifizierten Legierung Lösungsansätze gefunden und erprobt werden. Das Hartlöten mit Silberlot funktioniert gut (Abbildung 5 d). Abschließend konnte erfolgreich ein Prototyp einer Trompete (Abbildung 5 f) hergestellt werden, bei welchem Das Mundrohr, das Schallstück und der Hautstimmbogen aus der modifizierten Legierung hergestellt wurden. Diese Bauteile wurden ausgewählt, da sie normalerweise besonders stark von Zinkfraß betroffen sind. Musikertests sollen nun das Spielverhalten und die Zinkfraßneigung über einen längeren Zeitraum zeigen.

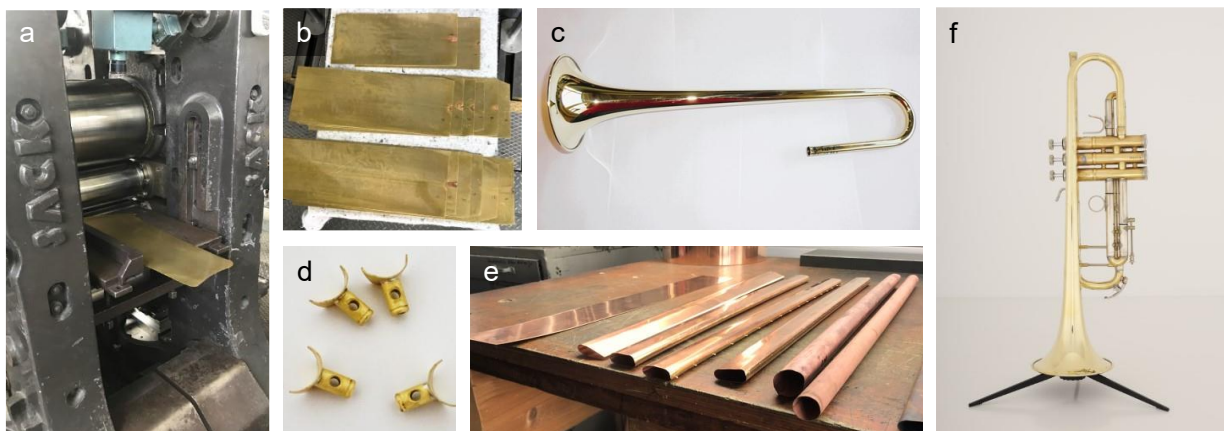


Abbildung 5: Fertigung von Instrumentenbauteilen für die Herstellung eines Prototyps einer Trompete aus der modifizierten Legierung CuZn30X: (a) Walzen der Bolzen; (b) warm- und anschließend kaltgewalzte Bleche (c) Herstellung eines Schalltrichters; (d) Hartlöten mit Silber und (e) Rohrherstellung aus den Blechen

3.5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine entzinkungshemmende Legierung CuZn30X für den Musikinstrumentenbau entwickelt. Die erlangten Forschungsergebnisse tragen zu einem besseren Verständnis der Zusammenhänge zwischen Legierungszusammensetzung, Korrosionsbeständigkeit und den technologischen Eigenschaften von Sondermessinglegierungen bei.

Im Projekt wurden zunächst Legierungen historischer Instrumente hinsichtlich der enthaltenen Legierungselemente und Verunreinigungen untersucht und hinsichtlich der entzinkungshemmenden Eigenschaften bewertet. Diese Erkenntnis bildete die Grundlage für die gezielte Entwicklung einer entzinkungsbeständigen Legierung. Hierzu wurden umfassende Literaturrecherche sowie Phasensimulation mittels ThermoCalc durchgeführt und daraus eine modifizierte Legierung konzipiert, die jeweils 0,1% Phosphor, Zinn und Nickel enthält. Anschließend wurde die modifizierte Legierung erfolgreich abgegossen und durch Walzprozesse zu Blech weiterverarbeitet. Das Material wurde verschiedenen Untersuchungen hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, der Phasenzusammensetzung und der Korrosionseigenschaften unterzogen. Besonders wichtig ist die im Entzinkungstest nachgewiesene Beständigkeit der modifizierten Legierung gegenüber der Standardlegierung zu betonen. Dagegen zeigte die Durchführung von Prozesssimulationen wenig Verbesserungspotential zur Reduzierung des Schädigungsverhaltens im Biegeprozess eines Posaunenbugbogens. Weiterhin konnten keine Mikrorisse aufgrund der Umformung festgestellt

werden, welche dafür verantwortlich sind, dass in diesen über einen ausreichend langen Zeitraum Korrosion stattfinden kann.

Abschließend ist die erfolgreiche Herstellung von Bauteilen für Trompeten hervorzuheben, die vollständig aus der neuen Legierung gefertigt und in eine Trompete eingebaut wurden. Dies unterstreicht nicht nur die technische Realisierbarkeit des Lösungsweges, sondern auch die praktische Einsatzfähigkeit der entwickelten Legierung, insbesondere im Bereich der Herstellung von Musikinstrumenten.

3.6 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. Das Gießen an einer VC400-Gießmaschine (Indutherm Blue Power Casting Systems, Walzbachtal, Deutschland) der modifizierten Legierung sowie die Messung der chemischen Zusammensetzung mittels optischen Emissionsfunken-Spektrometer (Spectrotest, SPECTRO Analytical Instruments GmbH, Kleve, Deutschland) wurde 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.

3.7 Literatur

- [1] J. Andersson, T. Helander, L. Höglund, P. Shi und B. Sundman, *Calphad* **2002**, 26, 273–312, DOI: 10.1016/S0364-5916(02)00037-8.
- [2] D. D. Davies, *A note on the dezincification of brass and the inhibiting effect of elemental additions*, **1993**.
- [3] *Messing: Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung*, Deutsches Kupfer-Institut e.V, Berlin, **1953**.
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e. V, *Prüfung von Kupferlegierungen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [5] DIN Deutsches Institut für Normung e. V, *Korrosion der Metalle*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [6] DIN Deutsches Institut für Normung e. V, *Korrosion von Metallen und Legierungen*, Beuth Verlag GmbH.
- [7] *Simufact Forming - well formed*, MSC Software Company.
- [8] A. L. Bacon, *A technical study of alloy compositions of "brass" wind musical instruments (1651-1867) utilizing non-destructive X-ray fluorescence*, University of London, **2003**.
- [9] M. Senn, H. J. Leber, M. Tuchschnid und N. Rizvic **2016**.
- [10] K. Hachberg, *Brass in Central European instrument-making from the 16th through the 18th centuries*, **1992**.
- [11] S. Selvaraj, S. Ponmariappan, M. Natesan und N. Palaniswamy, *Corrosion Reviews* **2003**, 21, 41–74, DOI: 10.1515/CORREVE.2003.21.1.41.
- [12] F. W. Fink, *Trans. Electrochem. Soc.* **1939**, 75, 441, DOI: 10.1149/1.3498425.
- [13] M. Galai, H. Benqlilou, M. EbnTouhami, H. Nassali, T. Belhaj, K. Berrami, I. Mansouri und B. ouaki, *Euro-Mediterr J Environ Integr* **2021**, 6, DOI: 10.1007/s41207-021-00244-9.
- [14] P. Zhou und K. Ogle, in: *Encyclopedia of Interfacial Chemistry* (Hrsg.: Klaus Wandelt), Elsevier, Oxford, **2018**, 478–489.
- [15] *Vorlesungen über Korrosion und Korrosionsschutz von Werkstoffen*, TAW-Verl., Wuppertal, **1996**.
- [16] M. Galai, J. Ouassir, M. Ebn Touhami, H. Nassali, H. Benqlilou, T. Belhaj, K. Berrami, I. Mansouri und B. Oauki, *J Bio Tribo Corros* **2017**, 3, DOI: 10.1007/s40735-017-0087-y.
- [17] R. Karpagavalli und R. Balasubramaniam, *Corrosion Science* **2007**, 49, 963–979, DOI: 10.1016/j.corsci.2006.06.024.

- [18] DIN Deutsches Institut für Normung e. V, *Kupfer- und Kupferlegierungen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [19] F. Arslan, N. Cansever und P. F. DUBY, *Practical Metallography* **2001**, 38, 175–188, DOI: 10.1515/pm-2001-380402.
- [20] DIN Deutsches Institut für Normung e. V, *Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe_ - Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und speichersystemen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

4 Potentielle Nutzung der Projektergebnisse

Die Ergebnisse des Projektes haben einen direkten Nutzen in der langfristigen Sicherung der Materialgrundlage für Blechblasinstrumente im Musikinstrumentenbau. Durch die Entwicklung einer zinkfraßhemmenden Legierung, welche allen Bündnismitgliedern zur Verfügung steht, wird den Herstellern die Möglichkeit geschaffen, weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben. Durch verringerten Zinkfraß müssen weniger Bauteile ausgetauscht werden, sowohl innerhalb der Garantiezeit als auch darüber hinaus, was wiederum zum Erhalt des Ansehens der regionalen Instrumentenbauer beiträgt. Insgesamt wird damit ein bedeutender Beitrag zur Sicherung und Förderung des Musikinstrumentenbaus in Deutschland, insbesondere in der Region des vogtländischen Musikwinkels, geleistet.

Gemeinsam mit den Sächsisches Metallwerk Freiberg GmbH und der Profilzieherei Krüger in Freiberg wird aktuell an neuen Ideen für Forschungsvorhaben als Weiterführung für das vorliegende Projekt gearbeitet. Hierbei geht es besonders um die Thematik der Optimierung der modifizierten Legierung hinsichtlich verbesserter Umformbarkeit bei guter Korrosionsbeständigkeit. Grundlage dafür bilden die im Projekt begonnene Legierungsentwicklung der entzinkungshemmenden Sondermessinglegierung, da diese Legierung großes Potential sowohl hinsichtlich der Umformbarkeit als auch bezüglich der Korrosionseigenschaften aufweist.