

Zusammenfassung Projekt „Alternativlegierungen“

Ausführlicher Projekttitel:	Entwicklung neuer Alternativlegierungen für Musikinstrumente
Kurztitel/Akronym:	Alternativlegierungen
Projektlaufzeit:	01.01.2023 bis 31.08.2025

Projektbeteiligte Einrichtungen	Ansprechpartner
IfM – Institut für Musikinstrumentenbau e.V.	Dipl.-Ing. Holger Schiema
TU Bergakademie Freiberg – Institut für Metallformung (IMF)	Dr.-Ing. Sergey Guk/ Dipl.-Ing. Susanne Berndorf/ Prof. Dr.-Ing. U. Prah

Inhaltsverzeichnis

0	Abstract	2
1	Projektziele	3
2	Projektablauf	4
2.1	Auswahl und Berechnung , Simulation der Legierungsmöglichkeiten, Durchführung schwingungstechn. Simulationen (AP 1)	4
2.2	Legierungserzeugung/Probenanfertigung , Kleinschmelzen und Herstellung Probenmaterial, dyn. Kennwertermittlung (AP 2)	5
2.3	Bestimmung und Optimierung Werkstoffkennwerte , metallographische Kennwertbestimmung, Fertigungsprozessparameter, Einfluss auf akustische Eigenschaften (AP 3)	7
	Metallographische Gefügeanalyse	7
	Statisch-mechanische Eigenschaften (Zugversuche im Referenzvergleich)	8
	Fließverhalten bei Stauchversuchen	8
	Zerspanungsanalytik	9
2.4	Legierungsvergleich und Auswahl zur Musterfertigung , Schmelzen und Halbzeugentwicklung für Muster, schwingungstechn. Untersuchungen und Korrosionsversuche an Halbzeugen (AP 4)	10
	Korrosionsanalytik	10
2.5	Musterinstrumente, Entwicklung , Fertigung und Optimierung von Halbzeuggeometrien, messtechn. Untersuchung von Musterinstrumenten und Musikertests (AP 5)	12
2.6	Zusammenfassung und Katalogisierung , Eintragung in Materialdatenbank (AP 6)	14
3	Projektergebnisse	14
4	Potenzielle Nutzung der Projektergebnisse	15

0 Abstract

Angesichts restriktiver Verschärfungen der europäischen REACH-Verordnung steht der traditionelle Musikinstrumentenbau vor der Herausforderung, etablierte blei- und nickelhaltige Werkstoffe vollständig zu substituieren. Das Verbundprojekt vom IMF der TU Bergakademie Freiberg und des IfM Zwota widmete sich daher der Entwicklung sowie der material- und umformtechnischen Qualifizierung innovativer Alternativlegierungen für den Musikinstrumentenbau.

Der wissenschaftliche Kern des Vorhabens lag in der simulationsgestützten Konzeptionierung optimaler chemischer Zusammensetzungen mittels thermodynamischer Phasensimulationen (ThermoCalc). Ziel war die kontrollierte Bildung spanbrechender, intermetallischer Ausscheidungsphasen, um die toxische Funktion von Blei im Gefüge umweltschonend zu ersetzen. Auf dieser Basis wurden die bleifreien Messingvarianten CuZn39Fe0,8 und eZeebrass (CuZn41Mg), siliciumreiche Typen (CuZn21Si3P aus der Cuphine-Familie) sowie eine Mangan-Bronze-Variante (CuMn15Zn15Al1) als nickelfreier Neusilberersatz thermodynamisch ausgelegt, schmelzmetallurgisch erzeugt und erfolgreich zu Halbzeugen prozessiert.

In der anschließenden Validierung durch das IMF und das IfM Zwota wurden das mechanische Festigkeits- und Umformbarkeitsprofil, die Spanbruchmorphologie sowie die Korrosionsbeständigkeit im direkten quantitativen Vergleich zu klassischen Referenzwerkstoffen (CuZn40Pb2 und CuNi12Zn24) nachgewiesen. Die neu entwickelten Legierungen überzeugten durch ein exzellentes Kaltumformvermögen sowie einer erhöhten Korrosionsbeständigkeit gegen Speichel und Schweiß.

Die erfolgreiche technologische Umsetzung gipfelte in der praktischen Fertigung und Erprobung von vier Mustertrompeten durch einen beteiligten vogtländischen Instrumentenbauer. In akustisch-spieltechnischen Prüfungen (Klang, Ansprache, Stimmung), bei denen das IfM Zwota seine Expertise einbrachte, erzielten die Prototypen mit den neuen Alternativwerkstoffen eine zur Standardreferenz absolut gleichwertige und in Teilen überlegene Performance.

Sämtliche erarbeiteten Prozessfenster und technologischen Kennwerte wurden in die bündnisinterne digitale Werkstoffdatenbank überführt. Damit steht den regionalen KMU im Musikwinkel eine verifizierte, zukunftsichere Werkstoffbasis zur industriellen Umsetzung zur Verfügung, um ihre Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu sichern.

Der ausführliche Sachbericht beider Projektpartner wurde in der Technischen Informationsbibliothek (TIB) veröffentlicht.

1 Projektziele

Problemstellung und Ausgangslage

Im traditionellen Metallblasinstrumentenbau im Vogtland hängen Präzision, Klangqualität und Langlebigkeit maßgeblich von den eingesetzten Kupferlegierungen ab. In konventionellem Automatenmessing (z. B. CuZn39Pb3 bzw. CW614N) wirkt Blei als unlöslicher Spanbrecher an den Korngrenzen und stellt kurze Bruchspäne bei der automatisierten Zerspanung sicher. Nickel wiederum garantiert in Neusilberlegierungen (z. B. CuNi12Zn24 bzw. CW403J) die erforderliche Härte, Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit von hochbeanspruchten Instrumententeilen.

Aufgrund der restriktiven Verschärfungen der europäischen REACH-Verordnung müssen beide Elemente zwingend substituiert werden. Der einfache Verzicht auf diese Zusätze führt bei reinen, bleifreien Binärsystemen (Kupfer-Zink) jedoch zu extrem langen Wendelspanen und einem massiv erhöhten Werkzeugverschleiß, was eine wirtschaftliche Fertigung in den regionalen Werkstätten unmöglich macht.

Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Um die technologische und wirtschaftliche Existenz der regionalen kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) nachhaltig zu sichern, wurden im Verbundprojekt des Instituts für Metallformung (IMF) der TU Bergakademie Freiberg und des IfM Zwota folgende Arbeitsziele definiert und erfolgreich umgesetzt:

- **Thermodynamisches Legierungsdesign:** Durchführung computergestützter Phasensimulationen (ThermoCalc) zur exakten Identifikation materialspezifischer Phasengleichgewichte (α/β -Phasen). Ziel war die rechnerische Ermittlung des optimalen mol-%-Anteils spanbrechender Fremdphasen zur Vermeidung rissanfälliger Gefügezustände.
- **Gefügesteuerung durch Mikrolegierung:** Gezielter Einsatz kornfeinender Zusätze (wie Eisen in CuZn39Fe0,8) zur Erzeugung intermetallischer Ausscheidungen. Parallel dazu stand die gezielte Generierung von C15-Laves-Phasen (Cu₂Mg) in der Legierung eZeebrass zur mechanischen Spanbrechung im Fokus.
- **Prozessroutenoptimierung:** Entwicklung und Validierung einer geschlossenen verfahrenstechnischen Kette von der schmelzmetallurgischen Synthese (Kokillenguss unter Schutzgas) bis hin zur thermo-mechanischen Verarbeitung (Schmieden, Warm- und Kaltwalzen) zu fehlerfreien Stangen- bzw. Blechhalbzeugen.
- **Praxisnahe Bauteil- und Instrumentenerprobung:** Direkte Überführung der am IMF prozessierten Halbzeuge in die Fertigungsketten des vogtländischen Musikwinkels. Das Ziel umfasste die reale Herstellung kritischer Funktionskomponenten (Ventilbüchsen, Wechsel, Ventildeckel und Druckwerke) und deren Montage zu voll spielfähigen Mustertrompeten.
- **Wissenstransfer und Datensicherung:** Systematische Katalogisierung und Bereitstellung repräsentativer Werkstoffkennblätter (finale Gefügedokumentationen, aggregierte mechanisch-technologische Kernkennwerte, Korrosionsdaten) in der bündnisweiten I-Ma-Tech Materialdatenbank zur Nutzung für die Betriebe.

2 Projektablauf

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Projektarbeiten, die angewandte Methodik sowie die verfahrenstechnischen Arbeiten zur Qualifizierung der Alternativlegierungen detailliert dargestellt.

2.1 Auswahl und Berechnung, Simulation der Legierungsmöglichkeiten, Durchführung schwingungstechn. Simulationen (AP 1)

Unter Nutzung der Berechnungssoftware ThermoCalc wurden systematische Screening-Rechnungen für unterschiedliche Elementkombinationen auf einer CuZn39-Matrix durchgeführt (vgl. **Tabelle 1**). Ziel war es, die temperaturabhängigen Stabilitätsbereiche exakt zu bestimmen sowie die Bildung intermetallischer, spanbrechender Ausscheidungen quantitativ zu simulieren. Konkret wurde nach Legierungselementen gesucht, bei welchen eine zusätzliche Phase gebildet wird, analog zum Blei-Anteil in der Referenzlegierung CuZn39Pb3.

Tabelle 1: Durchgeführte Simulationen

Main Alloy Composition	SI	X=Element	mass %
CuZn39 X%	1	Pd	3
	2	Al	0.1 - 4.0
	3	Mn	0.1 - 4.0
	4	P	0.1 - 4.0
	5	Si	0.1 - 4.0
	6	Sn	0.1 - 4.0
	7	Mo	0.1-1.5
	8	Ca	0.1 - 4.0
	9	Mg	0.1 - 4.0
	10	Fe	0.1 - 4.0
	11	Nb	0.1 - 4.0
	12	Ti	0.1 - 4.0
	13	Zr	0.1 - 4.0
CuZn39Mo0.1 X%	14	O	0.1 - 4.0
CuZn21Si3 X%	15	P	0.1 - 0.4
CuZn23Al3Co0.5	16		
CuZn28Sn1P	17		
CuZn31Mn2SiAl	18		
CuZn34Mn2SiAlNi	19		
CuZn37Mn3Al2Si	20		
CuZn38As0.1	21		

Auf diese Weise wurden die Elementzugaben (wie: Mn, Sn, P, Al, Mo, Mg, Ca, Fe, Nb, Ti, Zr) evaluiert, um spröde, zu Rissbildung neigende Phasenstrukturen vorab auszuschließen. Die Ergebnisse der Simulationen sind in **Tabelle 2** zusammengefasst. Es ließ sich schließen, dass einige Systeme schmelzmetallurgisch nicht darstellbar sind. Eine vielversprechende **Alternative** bietet jedoch **Eisen** an. Laut Simulation kam CuZn39Fe0,8 in Frage. Als spanbrechende Phase wurde die kubisch-raumzentrierte Fe-Phase identifiziert, welche als mikrostrukturelle Schwachstelle die toxische Funktion des Bleis ersetzen soll.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

		Phasen				Härte	Kristallstruktur
Alloy Composition	α (fcc) β (bcc)	Phase	mol%	andere Phasen	mol%	GPa	
CuZn39Pb3	32,90 66,14	Pb	0,95			0,031-0,046	kfz
CuZn40 (Matrix)						1,18-1,96	
Mn CuZn39Mn0,4	41,84 57,21	CuMnZn	0,95			k.A.	kfz
Sn CuZn39Sn0,4	39,52 59,62	Cu3Sn	0,85			3,3-6,5	orthorhombisch
P CuZn39P0,1	44,33 55,14	P2Zn3	0,51			3,7-5,5*	tetragonal
P CuZn39P0,18	45,18 53,88		0,93				
Al CuZn39Al0,3	35,73 62,66	Gamma_D83(Au:Cu)	1,59			k.A.	kubisch
Al CuZn39Al3,8	72,82	Al5Cu4Zn	0,6	GAMMA_D83	26,56	k.A.	k.A.
Al CuZn39Al3,9	72,58		1,34				
Mo CuZn39Mo1,4	38,3 60,75	Mo	0,94			1,4-2,7	krz
Mg CuZn39Mg0,1	41,03 58,22	C15_laves	0,75			4,2-6,9*	kfz
Mg CuZn39Mg0,2	38,67 59,79	(Cu:Mg)/Cu2Mg	1,54				
Ca CuZn39Ca0,1	39,96 59,08	CaCu5_D2D	0,96			2,8-6,2*	hexagonal
Ca CuZn39Ca2,5	- 78,2	CaCu	0,95	CaCu5_D2D	20,86	k.A.	orthorhombisch
Fe CuZn39Fe0,8	40,28 58,8	Fe_BCC	0,92			0,6	krz
Nb CuZn39Nb1,3	92,14 6,97	Nb_BCC	0,90			0,87-1,32	krz
Nb CuZn39Nb1,4	92,05 6,98		0,97				
Ti CuZn39Ti0,3	40,71 58,51		0,79				
Ti CuZn39Ti0,4	39,83 59,11	CuTi_gamma	1,06			4,06	k.A.
Ti CuZn39Ti2,0	87,41 11,43		1,16				
Zr CuZn39Zr0,3	39,4 59,62	Cu51Zr14	0,98			3,23-11,6	hexagonal
Zr CuZn39Zr0,4	38,11 60,58		1,31				

Die simulationsgestützte Werkstoffauslegung lieferte die thermodynamische Grundlage für das Design des Stoffsystems CuZn39Fe0,8.

Für die Vorauswahl der Entwicklung und des späteren Einsatzes potenzieller Legierungen im Bereich der Baugruppen eines Metallblasinstrumentes wurden schwingungstechnische Simulationen auf der Basis von FEM durchgeführt. Als Referenz wurde das Metallblasinstrument Trompete mit Drehventilen gewählt. Durch die FEM-Simulation wurde die virtuelle Auswahl optimaler Eigenschaften für alle Baugruppen bzw. das Gesamtinstrument ermöglicht, indem mechanische Spannungen und Verformungen präzise berechnet und dargestellt wurden. Durch die Definition von Materialdaten (wie: E-Modul, Streckgrenze usw.), Lasten und Kontakten in der Simulation wurde das Bauteilverhalten simuliert, um die idealen Legierungen hinsichtlich Festigkeit und Gewicht im Vorfeld zu bestimmen.

Dabei erfolgte folgende Vorgehensweise bei der Simulation:

- Modellierung und Vernetzung
- Materialdefinition
- Festlegung der Randbedingungen und Lasten
- Berechnung und Analyse sowie Bewertung

Es erfolgte ein Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Legierungen zur Legierungsauswahl des neuen Werkstoffs. Die alternativen, in Frage kommenden Buntmetalllegierungen liegen in Bezug auf die Anzahl und Lage der Eigenfrequenzen vergleichbar mit bisher verwendeten Messinglegierungen und Neusilber. Es ist also im Ergebnis der Simulationen davon auszugehen, dass bezüglich des Schwingverhaltens der Baugruppen und des Gesamtinstrumentes am untersuchten Beispiel der Trompete keine Verschlechterungen auftreten werden.

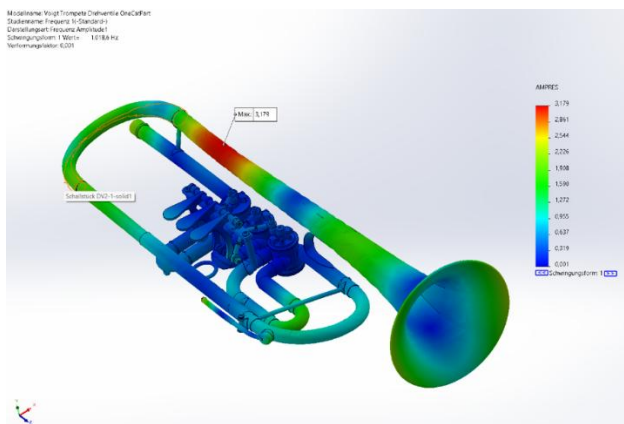


Abbildung 1: Ergebnis der Simulation Eigenfrequenz bei ca. 1018 Hz

2.2 Legierungserzeugung/Probenanfertigung, Kleinschmelzen und Herstellung Probenmaterial, dyn. Kennwertermittlung (AP 2)

Die schmelzmetallurgische Prozessierung der beiden Legierungskonzepte wurde im Labormaßstab realisiert und ist im Folgenden für jede Sondermessing-Legierung einzeln dargestellt. Die Herstellung und thermomechanische Bearbeitung der Sondermessing-Legierung CuZn39Fe0,8 erfolgte über eine dedizierte Prozessroute, um ein optimales Gefüge einzustellen. Die Erzeugung der Schmelze wurde im Kokillenguss unter einer Argon-Schutzgasatmosphäre durchgeführt. Als Ausgangsstoffe dienten eine CuFe20-Vorlegierung, CuZn40 sowie reines Zink. Der anschließende Abguss zu Gussbolzen ($\varnothing 105$ mm $\times$ 350 mm) erfolgte bei einer Gießtemperatur von 1100 °C in eine vorgewärmte Kokille. Die werkstoffanalytische Validierung mittels einer chemischen Ist-Analyse bestätigte eine finale Zusammensetzung von 63,0 Gew.-% Cu, 35,7 Gew.-% Zn und 0,7 Gew.-% Fe.

Damit wurde der angestrebte zweiphasige ($\alpha+\beta$)-Gefügebereich exakt getroffen, welcher die fundamentale Basis für die nachfolgende Warmumformung bildete. Die Bolzen wurden zunächst auf ein Vierkantformat umgeschmiedet und daraufhin abgedreht. Das anschließende Warmauswalzen zu Rundstäben ($\varnothing 20$ mm) erfolgte im gut verformbaren Temperaturbereich zwischen 650 °C und 750 °C. Den Abschluss der Prozessroute bildete das Weichglühen bei 500 °C für 60 Minuten mit anschließender Abkühlung an ruhender Luft. Das resultierende Endgefüge gewährleistet somit die angestrebte Synthese aus hoher mechanischer Festigkeit und ausgeprägter Zähigkeit.

Zur Untersuchung bleifreier Substitutionswerkstoffe wurden die Systeme eZeebrass (CuZn41Mg) und Cuphine (CuZn21Si3P) und die hochfeste, nickel- und bleifreie Neusilberalternative Mangan-Bronze (FX9) über den freien Markt in Form von geschmiedeten, stranggepressten bzw. gewalzten Halbzeugen bezogen. Das resultierende Gefüge der Legierungen zeichnet sich durch Homogenität und exzellente Kaltverformbarkeit aus.

Der systematische Ablauf von der schmelztechnischen Erzeugung der großformatigen Gussblöcke über die einzelnen Warmumformstufen bis hin zur finalen thermischen Konditionierung der anwendungsbereiten Halbzeuge ist in **Abbildung 2** schematisch dargestellt.

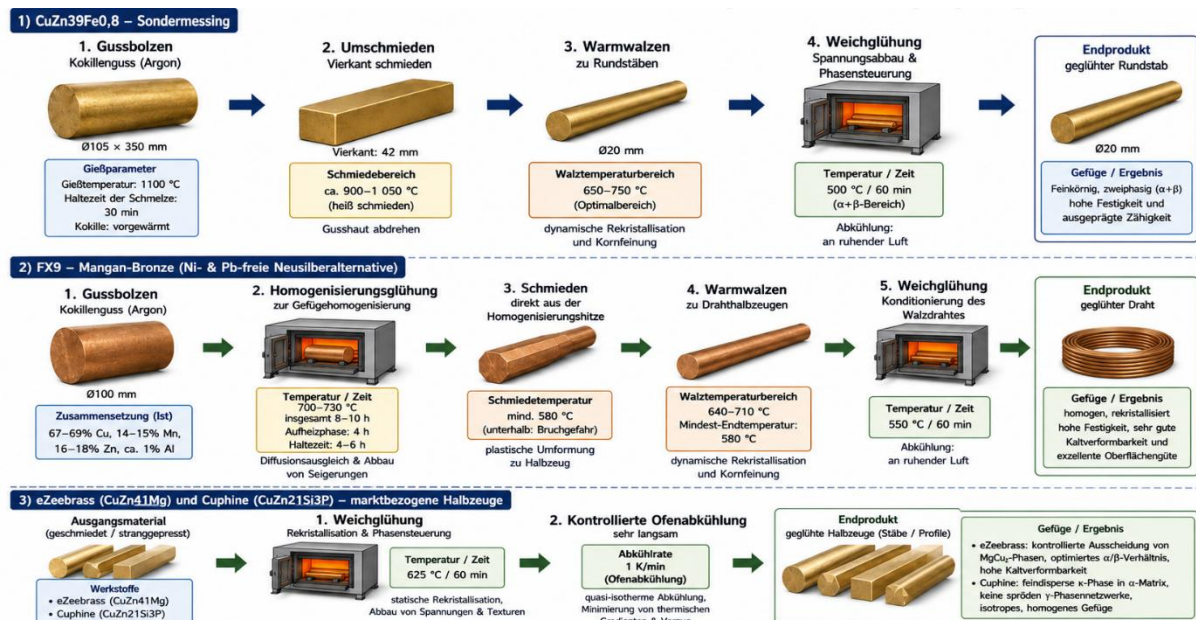


Abbildung 2: Prozesskette der thermomechanischen Bearbeitung der entwickelten Alternativlegierungen

Um die dynamischen Kennwerte zu ermitteln, wurden schwingungstechnische und akustische Untersuchungen an verschiedenen Buntmetalllegierungen und alternativen Legierungen durchgeführt. Zum einen wurden aktuell verwendete Materialien gemessen, um Standardwerte für die verwendeten Legierungen definieren zu können. Andererseits wurden die neuentwickelten Legierungen und verfügbare alternative Legierungen untersucht und die Messwerte verglichen.

Folgende Untersuchungen wurden an Probekörpern durchgeführt:

- Klangdauermessung (Modalanalyse)
- Ultraschallmessung

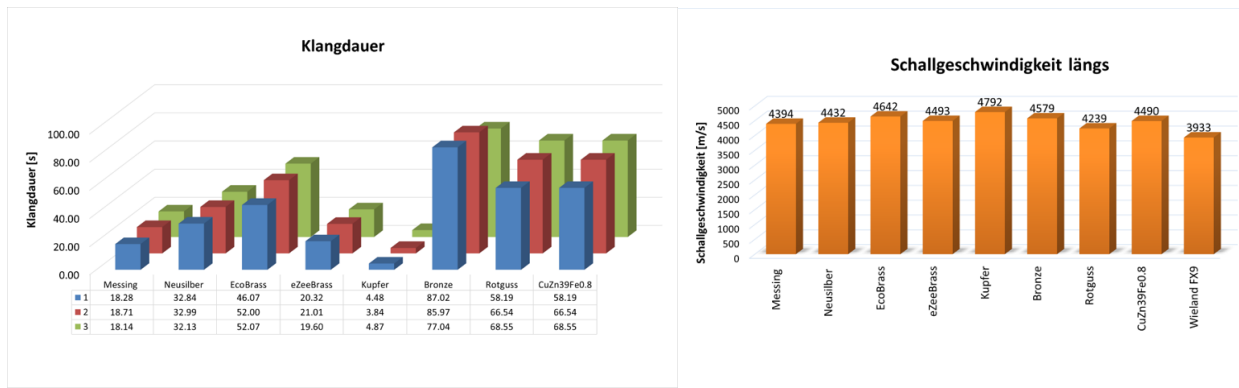


Abbildung 3: Ergebnisse der Klangdauermessung und Ultraschallprüfung an Probekörpern

Bisher verwendete Materialien und alle alternativen Metalllegierungen des Metallblasinstrumentenbaus wurden hinsichtlich Klangdauer und Schallgeschwindigkeit untersucht und ausgewertet. Im Ergebnis schneiden die alternativen Metalllegierungen bezüglich der Schallgeschwindigkeit und des dyn. E-Moduls im Vergleich zu bisher verwendeten Metalllegierungen gut ab. Die Klangdauern liegen ebenfalls im Bereich der Zielgrößen oder sogar etwas höher, dies ist aus akustischer Sicht positiv zu beurteilen.

Es kann somit gesagt werden, dass die neuen Alternativlegierungen aus der Sicht der Akustik ohne Einschränkungen für den Bau neuer Metallblasinstrumente empfohlen werden können.

2.3 Bestimmung und Optimierung Werkstoffkennwerte, metallographische Kennwertbestimmung, Fertigungsprozessparameter, Einfluss auf akustische Eigenschaften (AP 3)

Metallographische Gefügeanalyse

Es wurden lichtmikroskopische Gefügaufnahmen durchgeführt, welche bestätigen, dass die Wirksamkeit der gewählten thermomechanischen Prozessroute für die bleifreie Legierung CuZn39Fe0,8 geeignet ist. Das Realgefüge präsentiert sich als klassische, homogen verteilte zweiphasige $\alpha+\beta$ -Matrix. Die hellgelb glänzenden, globulitischen Gefügebestandteile repräsentieren die kubisch-flächenzentrierte α -Phase. Eingebettet sind diese Körner in ein orange-bräunlich geätztes Netzwerk der zinkreicheren β -Phase.

Die Partikel liegen in einer günstigen Größenordnung von ca. 0,5 bis 2 μm vor. Diese Eigenschaften garantieren die angestrebte Kurzspanigkeit des bleifreien Substitutionsmessings.



Abbildung 4: Lichtmikroskopische Gefügaufnahme der Legierung CuZn39Fe0,8 im weichgeglühten Zustand

Abbildung 5 zeigt die lichtmikroskopische Querschnittsaufnahme der bleifreien Siliciummessing-Legierung Cuphine 2.0. Die Mikrostruktur der Cuphine präsentiert sich in einem metallurgisch optimalen, vollkommen isotropen Zustand einer vollständig abgeschlossenen statischen Rekristallisation. Das heterogene Gefüge besteht primär aus zwei Phasen: der Matrix bildenden α -Phase und der siliciumreichen κ -Phase.

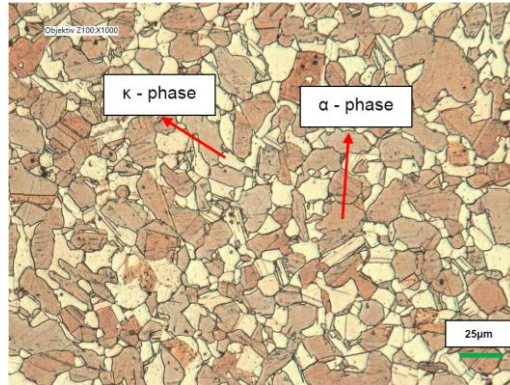


Abbildung 5: Lichtmikroskopische Gefügaufnahme der bleifreien Alternativlegierung Cuphine

Statisch-mechanische Eigenschaften (Zugversuche im Referenzvergleich)

Zur Charakterisierung des mechanischen Werkstoffverhaltens wurden die Probenchargen systematischen Kalt- und Warmzugversuchen unterzogen. Die experimentell ermittelten Festigkeits- und Verformungskennwerte der blei- und nickelfreien Entwicklungslinien sind in **Tabelle 3** zusammengefasst und den klassischen, weichgeglühten Referenzwerkstoffen gegenübergestellt.

Tabelle 3: Mechanische Kennwerte der blei- und nickelfreien Alternativlegierungen im Vergleich zu konventionellen Industriestandards bei Raumtemperatur

Legierung	0,2% Rp0,2 (MPa)	Dehngrenze	Zugfestigkeit Rm (MPa)	Bruchdehnung A (%)
CuZn39Fe0,8	205		420	47
CuZn39Pb3/ CW614N	320		360-400	15-20
CuZn41Mg8 eZeeBrass	185		410	38
FX9/ Neusilberersatz	154		390	53
CuNi12Zn24/ CW403J	200		380-450	30
CuZn21Si3P/ Cuphine1.0	265		540	18

Fließverhalten bei Stauchversuchen

Zur Charakterisierung des plastischen Umformwiderstands wurden an den Legierungsschmelzen zylindrische Stauchversuche (Probengeometrie $\varnothing 10 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$) durchgeführt.

Im direkten Vergleich zeigt sich bei (23 °C) ein signifikant differenziertes Fließverhalten zwischen der konventionellen Referenz und dem bleifreien Substitutionswerkstoff. Während das Automatenmessing CuZn39Pb3 (CW614N) aufgrund des schmierenden Effekts ein deutlich flacheres Verfestigungsniveau aufweist, erzwingt das Gefügedesign der Legierung CuZn39Fe0,8 eine steile Kaltverfestigung.

Die Fließspannung steigt kontinuierlich an und erreicht bei einem Umformgrad von 1,0 ein Spannungsmaximum. Aus fertigungstechnischer Sicht ist dies ideal, da es exakt im Parameterfenster konventioneller Warmpress- und Extrusionsanlagen liegt und somit eine direkte Substitution bleihaltiger Komponenten ohne energetische Mehraufwände ermöglicht.

Zerspanungsanalytik

Zur Validierung wurden standardisierte Drehprüfungen im Full-Factorial-Design bei Schnittgeschwindigkeiten bis 150 m/min, Vorschüben von 0,1 bis 0,225 mm/U und Schnitttiefen von 1,5 bis 3,0 mm durchgeführt. Der systematische Vergleich der Werkstoffe erfolgte entlang ihrer spezifischen Substitutionsprofile, um die technologische Eignung der Alternativen für den industriellen Einsatz zu bewerten. Traditionelles bleihaltiges Messing nutzt unlösliche, globulare Bleiphasen an den Korngrenzen als inneren Schmierstoff und Spanbrecher, was die Risszähigkeit in der Scherebene senkt und kontinuierlich kurze Späne liefert. Die Neuentwicklung CuZn39Fe0,8 nutzt eine kubisch-raumzentrierte Fe-Phase als Spanbrecher. Diese Partikel erzeugen künstliche mikrostrukturelle Sollbruchstellen im Gefüge, was beim Drehen zu kontrollierbaren Kurzwendelspänen führt. Die Mg-basierte Legierung eZeebrass setzt auf ein hartes α/β -Duplexgefüge, bei dem Magnesium das primäre α -Korn raffiniert und fein verteilte intermetallische C15_Laves-Phasen induziert. Diese Laves-Phasen blockieren den kontinuierlichen Materialfluss und generieren hervorragend beherrschbare, kurze Bröckelspäne. Beide Legierungsalternativen unterdrücken im Drehversuch das materialtypische Schmieren und Verhindern die Aufbauschneidenbildung, wodurch das Rauheitsniveau der bleihaltigen Referenzwerkstoffe erreicht oder übertroffen wird. Für die Produktion von Ventilbauteilen und mechanischen Komponenten bieten sie einen vollwertigen Ersatz.

Konventionelle Neusilberwerkstoffe weisen durch hohe Nickelanteile extreme Härte, Verschleißfestigkeit und Speichelresistenz auf und kommen bei der Fertigung hochwertiger Blasinstrumentenkomponenten zum Einsatz. Als Substitut wurde die modifizierte Mangan-Bronze FX9 erprobt, welche das Nickel vollständig durch Mangan ersetzt. Diese Legierung nutzt ein Mischkristallgefüge zur verlässlichen Stabilisierung der mechanischen Festigkeit und integriert ein Aluminium zur Mischkristallverfestigung sowie zur Angleichung des Farbspektrums an klassisches Neusilber. FX9 neigt bei niedrigen Vorschüben zu unvorteilhaften, langen Wendelspänen. Ein stabiler Spanbruch muss bei dieser Legierung mechanisch über erhöhte Vorschubraten erzwungen werden. Während die Cuphine und eZeebrass bereits bei geringen Vorschüben kurze Spanformen oder Bröckelspäne erzielen, ist bei der Mangan-Bronze eine prozessintegrierte Spanunterbrechung notwendig. Die erzeugten Oberflächenqualitäten sind jedoch akzeptabel.

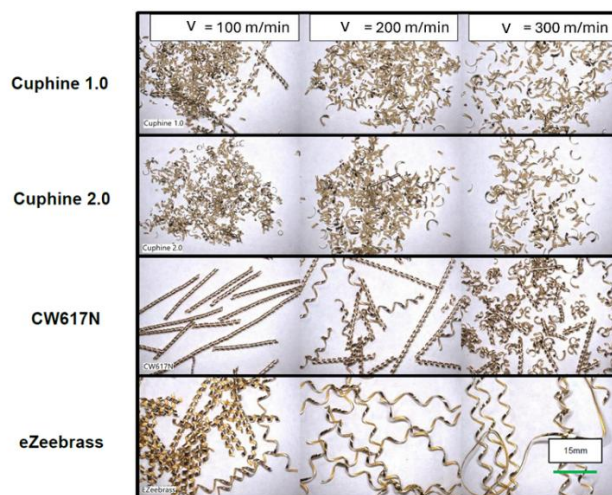


Abbildung 6: Reale Spanmorphologie entstanden bei unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten

In Zusammenarbeit mit einem assoziierten Partner aus dem Metallblasinstrumentenbau (Firma: Voigt Metallblasinstrumentenbau) wurden die Eigenschaften der Alternativlegierungen im Hinblick auf die Fertigungsparameter untersucht. Die neue Legierung (CuZn39Fe0,8) und weitere alternative Buntmetalllegierungen wie Phosphorbronze, EcoBrass, eZeeBrass und Wieland FX9 wurden umfangreichen Verarbeitungsversuchen zugeführt. An allen Materialien wurden folgende Verarbeitungsschritte durchgeführt: Sägen, Drehen, Fräsen, Feilen, Schleifen, Polieren, Löten und an einigen Biegen. Alle Verarbeitungsversuche wurden dokumentiert und bewertet.

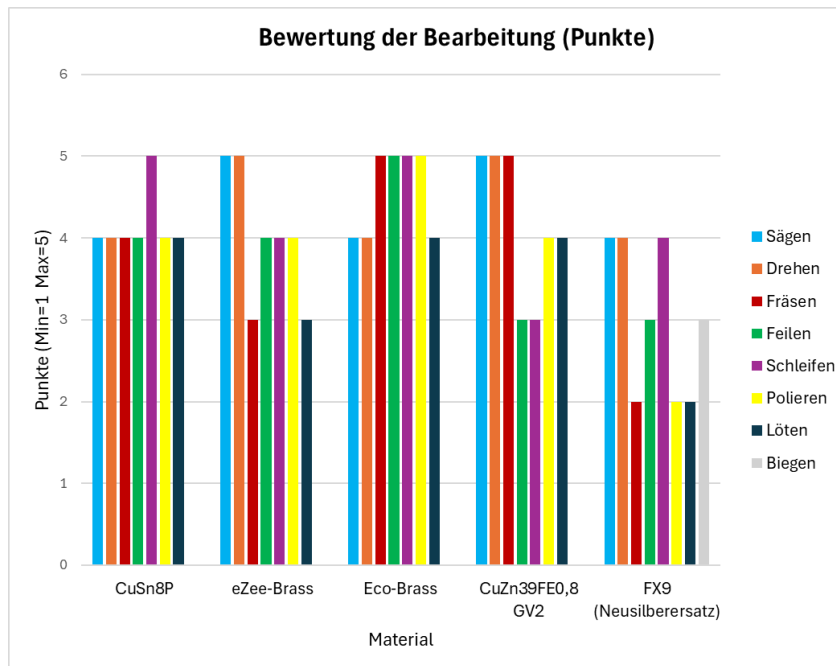


Abbildung 7: Bewertung der Verarbeitung alternativer Metalllegierungen

Eine gute Verarbeitbarkeit wurde für die Arbeitsschritte Sägen, Drehen und Fräsen für die Materialien Phosphorbronze und EcoBrass attestiert. Die Materialien eZeeBrass und FX9 lassen sich etwas schwieriger Fräsen, da sie sehr hart sind. Am besten schneidet für die Arbeitsschritte: Sägen, Drehen und Fräsen das neue Material CuZn39Fe0.8 ab. Die Materialien Phosphorbronze, eZeeBrass und EcoBrass lassen sich sehr gut Feilen, Schleifen und Polieren. Das neue Material CuZn39Fe0.8 lässt sich etwas schlechter Feilen und Schleifen, ist jedoch gut polierbar. Beim Löten schneiden Phosphorbronze, EcoBrass und CuZn39Fe0.8 gut ab, etwas schlechter schneidet hier eZeeBrass ab. Der Neusilbersatz FX9 ist schlechter lötbar, jedoch ist dies grundsätzlich möglich. Die Verarbeitungsversuche verliefen insgesamt für die alternativen Metalllegierungen zufriedenstellend bis gut. Der Nachweis der Verarbeitung für alternative Metalllegierungen konnte am Beispiel der Halbzeuge für die Herstellung von Bauteilen am Beispiel der Baugruppe der Drehventile für Trompeten erfolgreich nachgewiesen und optimiert werden.

2.4 Legierungsvergleich und Auswahl zur Musterfertigung, Schmelzen und Halbzeugentwicklung für Muster, schwingungstechn. Untersuchungen und Korrosionsversuche an Halbzeugen (AP 4)

Korrosionsanalytik

Die Umstellung auf REACH-konforme Legierungssysteme bedingt neben der zerspanungstechnischen Optimierung eine lückenlose Validierung des Korrosionsverhaltens.

Zur Ermittlung der Korrosionsmechanismen und Degradationsraten wurden standardisierte Untersuchungen in synthetischen Prüfmedien durchgeführt. Ergänzend wurden Auslagerungsversuche im Salzsprühnebeltest und Entzinkungsprüfungen realisiert, um die Langzeitstabilität der Gefügestrukturen zu bewerten. Die nachfolgende **Tabelle 4** fasst die korrosionschemischen Kennwerte ausgewählter Legierungsreihen im direkten Vergleich zusammen.

Tabelle 4: Korrosionschemische Kennwerte ausgewählter Legierungsreihen im Vergleich

Werkstoff	Mittlere Entzinkungstiefe (μm)	Rissinitiierung SCC (h)
Messing-Referenz CW617n/CW614N	280-340	<24
CuZn41Mg/ eZeeBrass	<40	>72
CuZn39Fe0.8	<100	>48
CuZn21Si3P/ Cuphine	<20	>96

Die Referenzwerkstoffe CW614N und CW617N zeigen eine mittlere Entzinkungstiefe von 280 bis 340 μm , die von starken lokalen Korrosionspfaden und einer ausgeprägten Entzinkungsfront begleitet wird. Die eisenhaltige Legierung CuZn39Fe0,8 neigt aufgrund der Kornfeinung zu einer sehr homogenen Korrosionsfront und drückt die mittlere Entzinkungstiefe auf unter 100 μm . Die Mg-basierte Legierung eZeebrass schneidet im Vergleich wesentlich stabiler ab. Das mikrolegierte Magnesium unterstützt die Ausbildung einer exzellenten, schützenden Mg-Mischkristall-Passivierungsschicht. Die mittlere Entzinkungstiefe sinkt auf einen hervorragenden Wert von unter 40 μm . Das homogene, einphasige Mischkristallgefüge von FX9 bildet eine dichte und stabile Mangan-Aluminium-Mischoxidschicht aus, die den Werkstoff vor anodischer Auflösung schützt. Die resultierenden Entzinkungstiefen verbleiben weit unterhalb der kritischen Grenzwerte.

Die für die Anfertigung von Bauteilen für Muster-Trompeten ausgewählten Legierungen wurden zur praxisnahen Tauglichkeit bezüglich der Korrosionsneigung getestet. Hierzu wurden diese in einer Speichellersatzlösung nach DIN über mehrere Tage in einem Klimaschrank bei ca. 40°C gelagert. Unter diesen Bedingungen wird ein mehrjähriger Einsatz im Blasinstrumentensektor simuliert. Durch die Ergebnisse lassen sich Aussagen zur Widerstandsfähigkeit der Metalle gegenüber der Korrosion in der Praxis treffen.

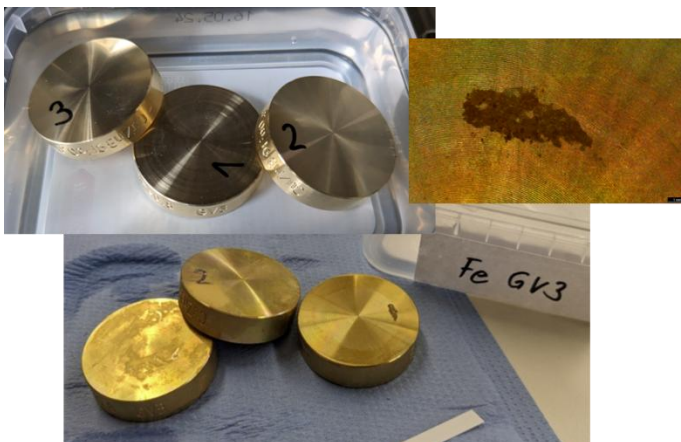


Abbildung 8: Korrosionsversuche, beispielhaft an der Alternativlegierung (CuZn39Fe0,8 GV3)

Die Korrosionsuntersuchungen wurden an allen verfügbaren bzw. neu entwickelten Legierungen durchgeführt. Die neu entwickelte Legierung CuZn39Fe0.8 konnte in den Tests überzeugend positiv abschließen, sie ist uneingeschränkt einsetzbar.

Die alternativen Legierungen EcoBrass und eZeeBrass schneiden insgesamt relativ gut ab, zeigen jedoch leichte Ablagerungen. Der Grund ist die Ausbildung einer Passivierungsschicht. Sie sind bedingt einsetzbar. Das alternative Material FX9 ist als Neusilberersatz uneingeschränkt nutzbar. Als weitere Alternativen schneiden Kupfer und Phosphorhaltige Bronze ebenfalls gut ab.

2.5 Musterinstrumente, Entwicklung, Fertigung und Optimierung von Halbzeuggeometrien, messtechn. Untersuchung von Musterinstrumenten und Musikertests (AP 5)

Die Praxistauglichkeit der am IMF charakterisierten und prozessierten blei- und nickelfreien Alternativlegierungen wurde im Arbeitspaket 5 durch die Prototypenfertigung und spieltechnische Validierung realer Musterinstrumente erfolgreich überprüft. Hierzu baute ein assoziierter Partner des Metallblasinstrumentenbaus fünf Mustertrompeten mit Drehventilen (T1 bis T5), bei denen bei vier Instrumente, blei- bzw. nickelhaltige Komponenten gezielt durch die REACH-konformen Legierungsalternativen substituiert wurden (T1-T4). Ein Instrument (T5) wurde aus konventionellen blei- und nickelhaltigen Komponenten aufgebaut und diente als Referenz. Während die konstruktive Basis aller Instrumente durch standardisierte Bauteile wie dem Schallstück aus CuZn28, Züge, Bögen und Knie aus CuZn30 sowie Mundrohren aus CuZn15 unverändert blieb, fokussierte sich die werkstofftechnische Substitution auf die mechanisch, tribologisch und akustisch-spieltechnisch beanspruchten Komponenten der Ventilbaugruppe und des Drückerwerks. Bei den massiven Ventilbüchsen ersetzen die bleifreien Sondermessinge ECO-Brass (CuZn21Si3P / Cuphine-Familie) bei den Prototypen T1 und T2, die magnesiumbasierte Variante eZeebrass (CuZn41Mg) bei T3 sowie das eisenmodifizierte Messing CuZn39Fe0,8 bei T4 das konventionell genutzte, nickelhaltige Neusilber CuNi12Zn24 bei T5.

Eine analoge Substitution wurde bei den Wechsellern der Ventile vollzogen, bei denen eZeebrass für die Instrumente T1 und T4, die Zinnbronze CuSn8P für T2 sowie CuZn39Fe0,8 für T3 zum Einsatz kamen, um das traditionelle, bleihaltige Automatenmessing CuZn39Pb3 bei T5 vollständig zu ersetzen. Die dazugehörigen Ventildeckel wurden komplementär aus CuZn39Fe0,8 bei den Prototypen T1 und T4 sowie aus eZeebrass bei T2 und T3 gefertigt. Das mechanisch hochbelastete Druckwerk wurde schließlich bei den Instrumenten T1-T4 einheitlich aus Blechen der nickelfreien Mangan-Bronze FX9 hergestellt, wodurch die klassischen Neusilberwerkstoffe CuNi18Zn20 und CuNi7Zn39Pb3Mn2, verwendet bei T5, substituiert werden konnten. Die anschließende spieltechnische und akustische Evaluierung umfasste sowohl subjektive Expertenbewertungen als auch objektive messtechnische Analysen des akustischen Impedanzverlaufs sowie der Intonationsabweichungen in Cent, um die Performance der Prototypen quantitativ abzusichern (siehe Abbildung 10 und Abbildung 11).



Abbildung 9: Mustertrompeten (T1 bis T4 aus alternativen Werkstoffen und T5-Referenz aus bisherigen Werkstoffen), von links nach rechts



Abbildung 10: Messung der Eingangsimpedanz der Mustertrompeten

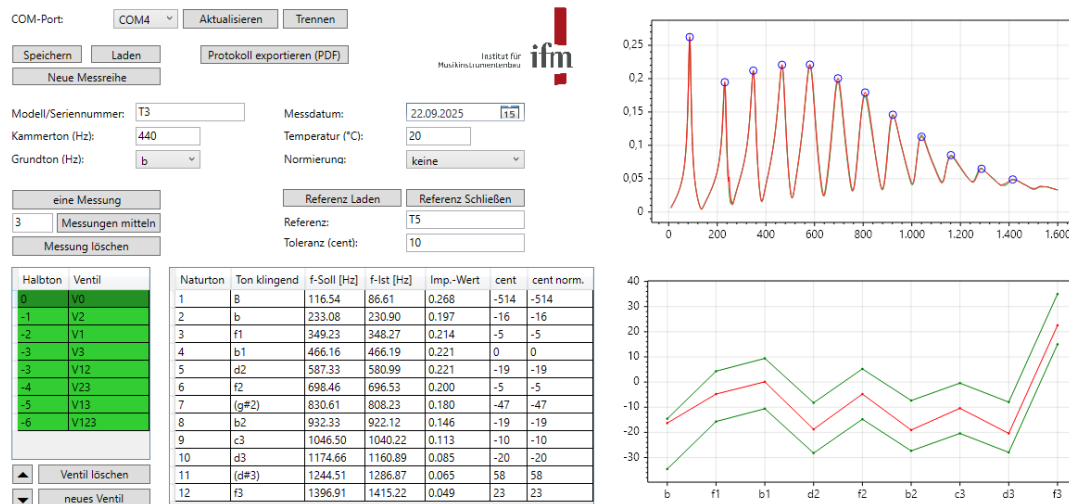


Abbildung 11: Messergebnis Mustertrompete T3 im Vergleich zur Referenz T5 (Ventil0).

Im Ergebnis der Musikerbefragungen schneiden die Musterinstrumente Trompete 1 bis Trompete 4 im Vergleich zur Referenztrompete vergleichbar gut ab. In einzelnen Attributen wie Klang, Volumen und Ansprache wurden für ein Musterinstrument T4 etwas niedrigere Bewertungen vergeben. Die Unterschiede lagen jedoch bei maximal 2 Punkten zum Referenzinstrument, was als sehr gering bezeichnet werden kann. Die Spielbarkeit und Intonation wurden jedoch durchweg mit hohen Punkten bewertet. Insgesamt kann man sagen, dass alle Musterinstrumente T1 bis T4 im Vergleich zum Referenzinstrument gut und teilweise für einige Attribute sogar höher bewertet wurden.

Im Bereich der Spielbarkeit wurden verbale Bewertungen in Form von: „niedriger Luftverbrauch, gute Ventilfunktion, geringe Ventilgeräuschneigung“ beschrieben. Im Bereich des Klangs und der Ansprache wurden verbale Bewertungen wie: „gute Klangformung im Vibrato, sehr dynamisches Verhalten über die Lagen, gute leichte Ansprache“ verwendet.

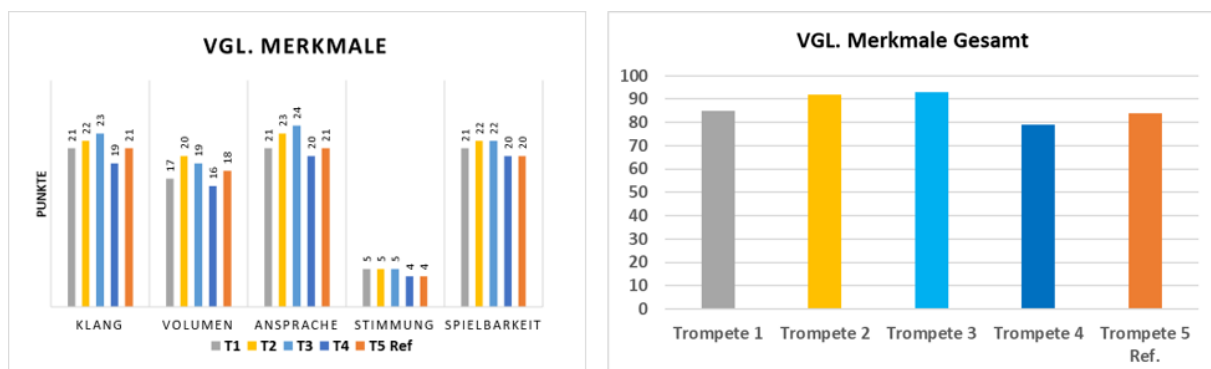


Abbildung 12: Vergleich der Einzelmerkmale und Gesamtbewertung

2.6 Zusammenfassung und Katalogisierung, Eintragung in Materialdatenbank (AP 6)

Die gemessenen Kennwerte und Parameter der alternativen Metalllegierungen wurden in die Materialdatenbank katalogisiert und stehen somit für weitere Forschungen in gesammelter Form zur Verfügung.

Eine Fortführung des Datenpools ist auch zukünftig geplant, um den Bündnismitgliedern die Informationen zur Verfügung stellen zu können.

Tabelle 5: Materialdatenbank (schwingungstechnische Kennwerte untersuchter Metalllegierungen)

Messungen Klangdauerproben			(Messpunkte bei 20mm, 95mm und 170mm)											
Bezeichnung	Zusatz	Masse [g]	Durchmesser [mm]				Länge [mm]	Volumen [mm ³]	Dichte [kg/m ³]	Klangdauer [s]	Schallgeschwindigkeit längs		E-Modul [kN/mm ²] = GPa	
			1	2	3	o					dt [µs]	v [m/s]		
Messing	CuZn39Pb3	407.86	18.00	17.99	17.99	17.99	190.05	48026.02	8.44	18.28	43.26	4393.20	162.89	
		407.84	17.99	17.99	17.98	17.99	190.07	48095.30	8.44	18.71	43.27	4392.65	162.94	
		407.88	17.99	17.98	17.99	17.99	190.05	48090.21	8.45	18.14	43.22	4397.27	163.32	
									8.44			4394	163.05	
Neusilber	CuNi7Zn99 Pb3Vn2	405.11	17.99	17.99	17.99	17.99	190.06	48010.66	8.39	32.84	42.88	4432.37	164.74	
		405.11	18.00	17.99	17.99	17.99	190.06	48028.56	8.38	32.99	42.88	4432.37	164.68	
		405.15	18.00	17.99	17.99	17.99	190.07	48031.10	8.38	32.13	42.88	4432.60	164.70	
									8.38			4402	164.71	
EcoBrass	CuZn21Si3P	399.04	17.97	18.03	18.03	18.01	190.11	48430.87	8.24	46.07	40.95	4642.49	177.58	
		399.15	17.98	18.02	18.03	18.01	190.10	48428.32	8.24	52.00	40.95	4642.25	177.62	
		400.53	18.03	18.04	18.06	18.04	190.07	48600.08	8.24	52.07	40.94	4642.65	177.64	
									8.24			4642	177.61	
eZeeBrass	CuZn41Mg	355.51	16.99	16.98	16.97	16.98	189.93	43008.95	8.27	20.32	42.26	4494.32	166.96	
		356.02	16.97	16.96	16.97	16.97	190.19	43000.21	8.28	21.01	42.28	4496.34	167.54	
		356.11	16.97	16.98	16.98	16.98	190.27	43069.03	8.27	19.60	42.42	4485.38	166.35	
									8.27			4493	166.96	

3 Projektergebnisse

Folgende wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse konnten im Projekt erreicht werden:

Die computergestützte Phasensimulation (Thermocalc) prognostizierte eine geeignete Verteilung des α und β -Phasenanteils für die bleifreie Matrix CuZn39Fe0,8. Als funktionale, spanbrechende Phase wurde eine kubisch-raumzentrierte Fe-Phase identifiziert. Somit lässt sich durch eine eisenhaltige Legierung Blei als Spanbrecher durch Eisen substituieren.

Die Ergebnisse der FEM-Simulation einer Trompete mit Drehventil zeigen keine Verschlechterung des Schwingungsverhaltens durch den Einsatz der neuen Alternativlegierungen. Die Anzahl und Lage der Eigenfrequenzen ist vergleichbar mit bisherigen verwendeten Buntmetalllegierungen.

Die Legierungserzeugung der Alternativ-Legierung CuZn39Fe0,8 konnte erfolgreich durchgeführt werden. Weitere Substitutionswerkstoffe wurden erfolgreich überprüft. Im Ergebnis schneiden die alternativen Metalllegierungen bezüglich der Schallgeschwindigkeit und des dyn. E-Moduls zu bisher verwendeten Metalllegierungen vergleichbar gut ab. Die Klangdauern liegen ebenfalls im Bereich der Zielgrößen oder sogar etwas höher, dies ist aus akustischer Sicht positiv zu beurteilen.

Es wurden die metallographischen und mechanischen Kennwerte der Alternativen Materialien ermittelt. Alle untersuchten Materialien lassen sich gut bis sehr gut bearbeiten, lediglich der Neusilbersatz FX9 lässt sich aufgrund der hohen Oberflächenhärte etwas schlechter fräsen und ist schlechter lötbar.

Im Bereich der Korrosionsuntersuchungen schneidet die neu entwickelte Legierung CuZn39Fe0,8 überzeugend positiv ab und ist uneingeschränkt einsetzbar. Die alternativen Legierungen EcoBrass und eZeeBrass schneiden insgesamt relativ gut ab, zeigen aber leichte Ablagerungen, der Grund ist die Ausbildung einer Passivierungsschicht. Sie sind dadurch bedingt einsetzbar. Das alternative Material FX9 ist uneingeschränkt nutzbar. Weitere Alternativen, wie Kupfer und Phosphorhaltige Bronze konnten ebenfalls überzeugen.

Es wurden 4 Mustertrompeten, bei denen die Ventilbaugruppe aus alternativen Legierungen gefertigt wurde, subjektiven, wie objektiven Tests unterzogen.

Im Ergebnis der Impedanzmessungen und Musikerbefragungen schneiden die Musterinstrumente Trompete 1 bis Trompete 4 im Vergleich zur Referenz Trompete T5 vergleichbar gut ab. In einigen Attributen werden die Mustertrompeten teilweise sogar etwas höher bewertet.

Die gemessenen Kennwerte und Parameter der alternativen Metalllegierungen wurden in die Materialdatenbank katalogisiert und stehen somit für weitere Forschungen in gesammelter Form zur Verfügung.

4 Potenzielle Nutzung der Projektergebnisse

Die im I-Ma-Tech-Projekt erzielten Ergebnisse und die erfolgreich validierten Werkstoffentwicklungen eröffnen signifikante wirtschaftliche, technologische und wissenschaftliche Nutzungsmöglichkeiten. Die Verwertungspotenziale gliedern sich in drei strategische Säulen:

- **Direkte Umsetzung in der Region des Musikwinkels Vogtland:** Durch die erfolgreiche Umsetzung der Werkstofffunktionalität in den angefertigten Mustertrompeten steht den regionalen kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) des Metallblasinstrumentenbaus eine praxistauglich verifizierte Werkstoffbasis zur Verfügung. Die im Projekt erarbeiteten verfahrenstechnischen Parameter – wie beispielsweise die definierten Walzfenster und Weichglühzyklen für die Mangan-Bronze FX9 sowie für die Blei-Substitutionsvarianten CuZn39Fe0,8 und eZeebrass – sichern die technologische Umstellbarkeit der handwerklichen und industriellen Betriebe. Dies mindert das Risiko von Produktionsausschuss bei der Umstellung und erhält die Wettbewerbsfähigkeit der regionalen Musikinstrumentenbauer unter den verschärften REACH-Bedingungen langfristig.
- **Datenpool:** Die wesentlichen, am IMF Freiberg und IfM Zwota ermittelten Kennwerte wurden in der Materialdatenbank zusammengefasst. Sie stehen den Bündnispartnern zur Verfügung. Dieser Wissenspool verkürzt zukünftige Entwicklungszeiten und dient als verlässliche Konstruktions- und Simulationsgrundlage auch für Folgeprojekte.
- **Branchenübergreifender Transfer:** Die Relevanz der Projektergebnisse reicht weit über den traditionellen Musikinstrumentenbau hinaus. Da die gesetzlichen Anforderungen an die Blei- und Nickelfreiheit sowie die Substitution konventioneller bleihaltiger Messinge in der Sanitär- und Trinkwassertechnik sowie in der Gebäudemestechnik identisch sind, besitzen die Neuentwicklungen ein enormes Transferpotenzial. Die am IMF Freiberg grundlegend erforschten thermo-mechanischen Prozessfenster, die Erkenntnisse zum Entzinkungsverhalten und die Strategien zur Spanlenkung über feinskalige Ausscheidungsphasen lassen sich direkt auf diese verwandten Industriezweige übertragen. Dies eröffnet den beteiligten Werkstoffherstellern und Zulieferern neue Absatzmärkte auch außerhalb der Musikbranche.