

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Sachbericht

zum Forschungsvorhaben

## **„WIR! – iMATECH – Alternativlegierungen – Entwicklung neuer Alternativlegierungen für Musikinstrumente; TP2: Akustische und schwingungstechnische Auslegung und Charakterisierung von Alternativlegierungen im Musikinstrumentenbau“**

### TEIL I

Förderkennzeichen: **03WIR0415B**

ausführende Stelle: IfM – Institut für Musikinstrumentenbau e.V.  
Klingenthaler Straße 42  
08267 Klingenthal, OT Zwota

Laufzeit: 01.01.2023 bis 31.08.2025

**i M A T E C H**

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

**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.**

## **Teil I: Kurzbericht**

### Ursprüngliche Aufgabenstellung

Gesamtziel des Projektes bestand darin, die Metalle Blei, Nickel und Chrom als reine Metalle bzw. als Legierungsbestandteil für Bauteile im Musikinstrumentenbau zu substituieren.

Kernziel war hierbei das Entwickeln gleichwertiger Metalllegierungen, welche alle Vorteile der ursprünglichen Metalle aufweisen und dabei deren Nachteile für die Gesundheit beseitigen.

Ziel des Teilvorhabens war es die Eigenschaften von potenziellen Alternativlegierungen im Musikinstrumentenbau genau zu analysieren und zu bewerten. Wichtig war hier die Ermittlung der Grenzen der Streubreiten der Materialparameter in Hinblick auf die Gut-Schlecht-Bereiche der Akustik.

Hierzu wurden unterschiedliche Muster von Halbzeugen bis hin zu kompletten Musikinstrumenten aus Alternativlegierungen akustisch untersucht und anhand ihrer Materialwerte charakterisiert. Weiterhin wurden vollständige Instrumente aus Alternativlegierungen mit konstruktiv baugleichen Instrumenten aus Standardlegierungen akustisch verglichen.

Mit Hilfe einer eigens geschaffenen Materialdatenbank für den Musikinstrumentenbau können somit die Alternativlegierungen genau auf die für die akustischen Eigenschaften der jeweiligen Instrumentenbaugruppe angepasst werden.

Ein weiteres Ziel des Teilvorhabens war es, den Nachweis einer guten Akustik bzw. Spielbarkeit der aus Alternativlegierungen gefertigten Instrumente beispielhaft für Holz- bzw. Metallblasinstrumente zu erbringen. Hierzu sollten die Musikinstrumente aus den favorisierten Alternativlegierungen gefertigt und anschließend durch Profi-Musiker angespielt werden. Begleitet wurden diese Tests durch Befragungen, aufgezeichnete Anspiele, subjektive Hörtests durch Probanden und objektive Messungen der Instrumente hinsichtlich der Schallabstrahlung.

### Ablauf des Vorhabens

Zur Realisierung der Gesamtzielstellung wurde folgender Ablauf definiert:

#### **Auswahl und Berechnung, Durchführung schwingungstechnischer Simulationen**

In diesem Arbeitspaket wurden die potenziellen Legierungen in Bezug auf akustische Eigenschaften vorab berechnet. Die akustische Optimierung war ein iterativer Prozess über das komplette Projekt hinweg und erfolgte im ständigen Wechsel von Vorabsimulation, Versuch, Legierungsänderung bzw. Änderung des Fertigungsverfahrens. Die Etablierung eines Simulationsablaufs verkürzte somit die vorher beschriebene Entwicklungskette deutlich. Zum Einsatz kam ein FEM-Tool aus dem CAD-Programm „Solid Works“ mit dem die Eigenfrequenzen, Eigenschwingformen vorab bewertet werden konnten. Im Weiteren fand

darauf aufbauend eine Vorabauswahl für die Weiterverfolgung der anstehenden praktischen Untersuchungen statt.

### **Legierungserzeugung/Probenanfertigung, mechanisch-dynamische Kennwertermittlung im Labormaßstab**

Hier wurden die konkreten schwingungstechnisch-akustischen Kennwerte der ersten Materialprobekörper aus Alternativlegierungen experimentell bestimmt. Nach der Bestimmung der Kennwerte wurden diese analysiert und mit den Standardwerten verglichen. Die Alternativlegierungen wurden dabei ebenfalls untereinander verglichen und priorisiert.

### **Bestimmung und Optimierung der Werkstoffkennwerte**

Hier erfolgte eine Optimierung der schwingungstechnisch-akustischen Eigenschaften der Alternativlegierungen. Hierbei wurde der Fokus nicht nur auf die reine Anpassung der Legierung, sondern vielmehr auf die Einflüsse von Fertigungsparametern der Halbzeugfertigung auf die akustischen Eigenschaften gelegt. Mit dem gewonnenen Wissen über diese Zusammenhänge, wurden die Halbzeuge weiter optimiert. Auch hier wurden durch messtechnische Untersuchungen Halbzeuge untersucht.

### **Legierungsvergleich und -auswahl zur Musterfertigung**

In diesem Arbeitspaket wurden die Halbzeuge, basierend auf den vorherigen Erkenntnissen fertigt entwickelt, so dass aus diesen Musterbauteile und Musterinstrumente gefertigt werden konnten. Neben den schwingungstechnischen Untersuchungen wurden ebenfalls Untersuchungen zum Korrosionsverhalten durchgeführt. Es erfolgt eine Zuordnung der Kombination der Legierungen zum späteren Instrumentenbauteil.

### **Musterinstrumente**

In diesem Arbeitspaket wurden die gefertigten Musterinstrumente objektiv und subjektiv bewertet. Zur objektiven Bewertung zählen Vergleichsmessungen mit baugleichen Musterinstrumenten aus Standardlegierungen. Hierzu wurden Untersuchungen am Gesamtinstrument im reflexionsarmen Raum ausgeführt. Die subjektive Bewertung erfolgte durch vergleichende Spiel- und Hörtests mit Musikern.

## **Funktions- und verfahrensspezifische Katalogisierung in Form einer digitalen Datenbank**

In diesem Arbeitspaket wurden alle schwingungstechnisch-akustischen Ergebnisse dokumentiert und in der Datensammlung eingepflegt., um den Zugriff auf die relevanten Materialparameter zu ermöglichen.

### Wesentliche Ergebnisse sowie ggf. die Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Wesentliche Ergebnisse waren:

- Ermittlung der Eigenfrequenzen und Schwingformen von Legierungen und Legierungsentwürfen mit Hilfe von Simulationen verliefen erfolgreich
- Die Kennwerte der Legierungen konnten ermittelt werden
- Es erfolgte ein Ranking der favorisierten möglichen alternativen Metalllegierungen
- Die alternativen Legierungen (blei- und nickelfrei) lassen sich im Labormaßstab (in überschaubaren Mengen) herstellen, dies konnte erfolgreich umgesetzt werden
- Die Skalierung vom Labormaßstab auf Bauteile für Instrumente ist möglich
- Die Legierungen wurden **spanbaren Verarbeitungstests** unterzogen, sie **schneiden insgesamt positiv ab**.
- Die Untersuchungen an den Alternativlegierungen bezüglich des Verhaltens zur Korrosion wurde im Labor untersucht, die Tests verliefen ohne wesentliche Auffälligkeiten, die **Korrosionsuntersuchungen** waren **insgesamt positiv**
- Aus den neuen Legierungen wurden **Bauteile und Muster-Instrumente hergestellt**
- Die fertigen **Musterinstrumente (Trompeten mit Drehventil)** wurden **akustisch bewertet** und durch **Spieltests mit Musikern im Vergleich** zu bisherigen Referenzinstrumenten aus traditionellen Materialien bewertet, sie **schneiden** insgesamt **positiv ab**
- alle Ergebnisse wurden dokumentiert und in die vorhandene Datensammlung eingepflegt

Zwota, den 30.01.2026

Dipl.-Ing. (FH) Holger Schiema  
Projektleiter

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# Sachbericht

zum Forschungsvorhaben

## „WIR! – iMATECH – Alternativlegierungen – Entwicklung neuer Alternativlegierungen für Musikinstrumente; TP2: Akustische und schwingungstechnische Auslegung und Charakterisierung von Alternativlegierungen im Musikinstrumentenbau“

### TEIL II

Förderkennzeichen: **03WIR0415B**

ausführende Stelle: IfM – Institut für Musikinstrumentenbau e.V.  
Klingenthaler Straße 42  
08267 Klingenthal, OT Zwota

Laufzeit: 01.01.2023 bis 31.08.2025

**i M A T E C H**

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

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei

## **Teil II: Eingehende Darstellung**

Nachfolgende Arbeiten wurden im Rahmen des Projektes durchgeführt:

### **Arbeitspaket 1**

Im Arbeitspaket 1 sollten für die Vorauswahl der Entwicklung und des späteren Einsatzes potenzieller Legierungen im Bereich der Baugruppen eines Metallblasinstrumentes auf der Basis von FEM-Simulationen durchgeführt werden. Zur näheren Auswahl kam das Metallblasinstrument: Trompete mit Drehventilen, da dies auch als potenzielles Instrument für weitere Untersuchungen (akustische Untersuchungen und Musikertests) benutzt werden sollte.

Durch die FEM-Simulation (Finite-Elemente-Methode) 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 des Gewichts im Vorfeld zu bestimmen.

Dabei erfolgte folgende Vorgehensweise bei der Simulation:

#### **Modellierung und Vernetzung:**

Das Instrument mit allen Bauteilen wurde zu Beginn mittels 3D-Laserscanner geometrisch digitalisiert und alle Bauteile in der CAD-Software in Form eines 3D-Modells nachkonstruiert.

Das 3D-Modell der jeweiligen Baugruppe wurde in ein finites Netz unterteilt.

#### **Materialdefinition:**

Für verschiedene Legierungen wurden die spezifischen Materialdaten (z.B. Messing, Bronze und alternative Buntmetalllegierungen) in der Simulationssoftware hinterlegt.

#### **Randbedingungen und Lasten:**

Es wurden die Lagerungen und die Kontaktbedingungen zwischen den Teilen und den wirkenden Kräften festgelegt.

#### **Berechnung und Analyse:**

Schlussendlich wurde die Simulation ausgeführt, um kritische Verformungen und die Eigenfrequenzen zu identifizieren.

#### **Auswertung:**

Es erfolgte ein Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Legierungen zur Legierungsauswahl des neuen Werkstoffs.

Alle Untersuchungen zur Substitution der kritischen Metalle wurden anhand der Trompete mit Drehventilen durchgeführt. Zu Beginn der Arbeiten wurde eine Bestandsaufnahme der Bauteile der Trompete unter Absprache mit den Herstellern durchgeführt. Alle betroffenen Bauteile wurden aufgenommen.

Als Voraussetzung für die Simulationen der unterschiedlichen Legierungen war die messtechnische Erfassung eines Instrumentes mittels 3D-Laserscannern notwendig. Auf Grundlage der digitalisierten Geometrie des Instruments konnten verschiedene Simulationen mit unterschiedlichen Legierungen durchgeführt werden. Durch umfangreiche Untersuchungen konnte ein „Gut-Bereich“ definiert werden.

Dieser diente in den folgenden Arbeitsschritten als Vorgabe in denen sich auch die neuen Legierungen bewegen müssen.

Um den Bereich der Metalle besser eingrenzen zu können, wurden Aluminium als weiches und Stahl als hartes Material in die Untersuchungen mit aufgenommen. Diese beiden Metalle zeigen mit der unteren und oberen Grenze den Streubereich der verschiedenen Metalle auf. Beide Materialien wären neben ihrer schwierigen Verarbeitbarkeit für Metallblasinstrumente auch vom Verhalten bezüglich der Schwingungen eher ungeeignet.

Im betrachteten Frequenzbereich weisen Metalle wie Stahl und Aluminium wesentlich weniger Moden auf, im Ergebnis sind diese Materialien weniger schwingfähig als zum Beispiel Messing und Neusilber. (siehe Abb. 2)

Abb. 2 zeigt die Lage und Anzahl der Eigenmoden der verschiedenen Legierungen im Ergebnis der Simulation.

Modellname: Voigt Trompete Drehventile OneCatPart  
Studiename: Frequenz 1(-Standard-)  
Darstellungsart: Netz Qualität1



Abb. 1: FEM-Vernetzung des Modells

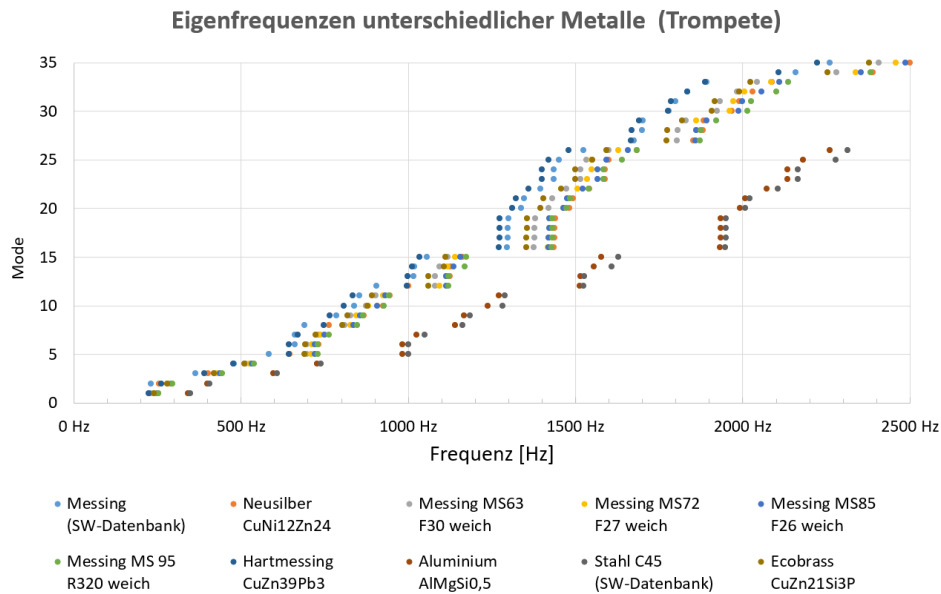


Abb. 2: Ergebnisse der Legierungssimulationen

Die alternativen 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.**

Modellname: Voigt Trompete Drehventile OneCatPart  
 Studienname: Frequenz 1(-Standard-)  
 Darstellungsart: Frequenz Amplitude1  
 Schwingungsform: 1 Wert= 1,018,6 Hz  
 Verformungsfaktor: 0,001

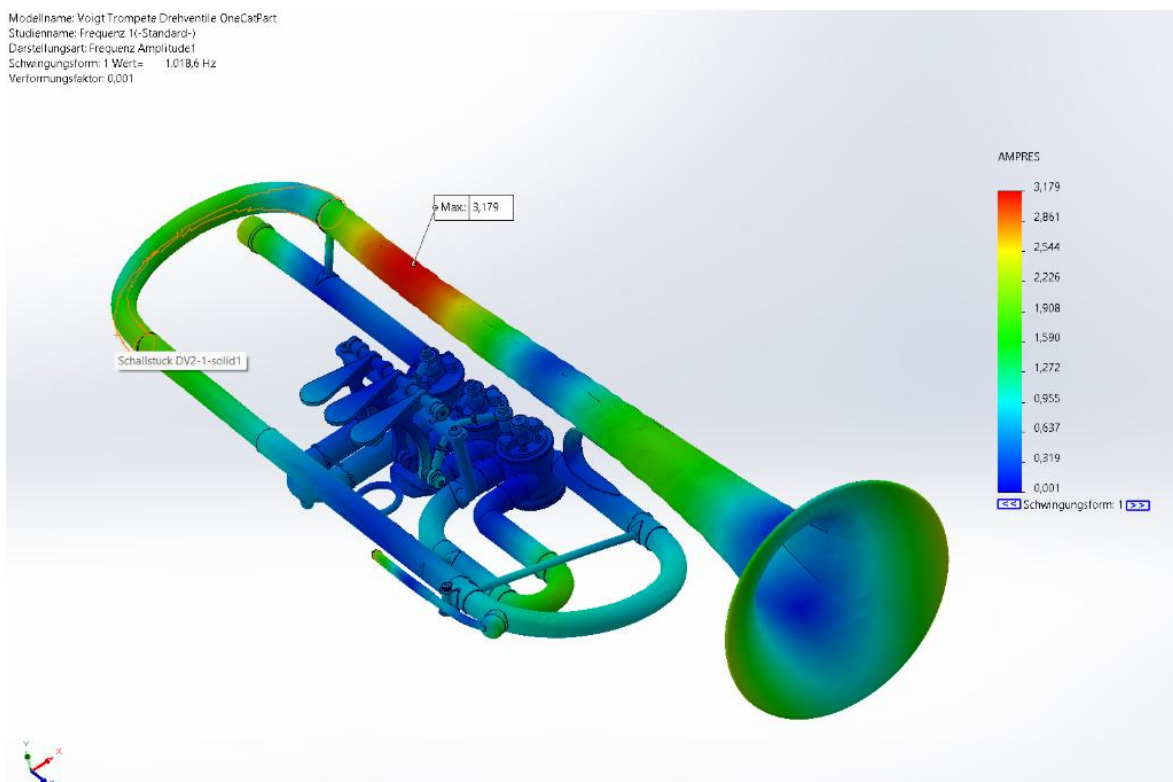


Abb. 3: Ergebnis der Simulation Eigenfrequenz bei ca. 1018 Hz (Messing MS63)

Folgende wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse konnten im **Arbeitspaket 1** erreicht werden:

- Als Modell wurde eine Trompete mit Drehventilen vollständig digitalisiert und ein vernetztes Modell für die FEM-Simulation erstellt
- Es wurde ein Datensatz aller möglichen Legierungen erstellt, dies stellte die Basis der Eingangsdaten für die Simulationen dar
- Es wurden alle bisher eingesetzten Buntmetalllegierungen und alternativen Metalllegierungen in der Simulation untersucht
- Die Simulationsergebnisse wurden katalogisiert und ausgewertet
- Es wurde der „Gut-Bereich“ für neue Alternativlegierungen ermittelt und festgelegt
- Die **neuen alternativen Werkstoffe** befinden sich **im Bereich** der Anzahl und Lage der Eigenfrequenzen **der bisherigen Buntmetalllegierungen**
- Aus der schwingungstechnischen und akustischen Sicht sind die **Schwingformen und die Lage der Eigenfrequenzen** von alternativen Metalllegierungen **ähnlich, wie die von bisherigen Legierungen**
- Eine **Verschlechterung des Schwingungsverhaltens ist** durch den Einsatz der neuen Alternativlegierungen **nicht zu erwarten**

Die Arbeitsteilung zwischen den Partnern bestand hier in der Trennung der Legierungssimulation seitens der TU Freiberg und der Simulation der schwingungstechnischen und akustischen Parameter seitens des Instituts für Musikinstrumentenbau Zwota.

### **Arbeitspaket 2**

Im **Arbeitspaket 2** wurden die schwingungstechnischen und akustischen Eigenschaften 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.

Wie sich in den Untersuchungen zeigte, bewegen sich die neuen Legierungen im vergleichbaren Wertebereich wie die herkömmlich verwendeten. Somit kann gesagt werden, dass die neuen Alternativlegierungen aus der Sicht der Akustik ohne Einschränkungen für den Bau neuer Metallblasinstrumente empfohlen werden können.

Folgende Untersuchungen wurden an Probekörpern durchgeführt:

### **Klangdauermessung (Modalanalyse)**

Mit dem Messplatz (siehe Abb. 4) wurden die Klangdauern von Probekörpern in Form von Metall-Rundstäben mit den Abmessungen (190mm x ca. 18mm) gemessen. Hierzu wurden die Probestäbe auf den Knotenpunkten der 1. Schwingungsmode gelagert und mit Hilfe eines automatisch betätigten Impulshammers angeregt und die Antwortfunktion mit einem Mikrofon erfasst. Über eine eigens im IfM entwickelte Software wurde die Frequenz und die Bandbreite der 1. Schwingungsmode ermittelt, somit lässt sich auch die Materialdämpfung und das dynamische E-Modul berechnen.



*Abb. 4: Modalanalyse zur Ermittlung der Dämpfung und der Klangdauer*

Die Ergebnisse der Klangdauermessungen sind in Abbildung 5 für jeweils 3 Probekörper dargestellt. Insgesamt kann man sagen, dass die Klangdauern von Messing im Bereich von ca. 18 Sekunden liegen, die alternativen Buntmetalle liegen hier im Vergleich bei Klangdauern zwischen 20 und 70 Sekunden. Eine längere Klangdauer ist aus Sicht der Akustik eher positiv. Im Vergleich hat Kupfer mit 4 bis 5 Sekunden eine eher sehr kurze Klangdauer, Bronze hat mit ca. 80 bis 90 Sekunden eine eher lange Klangdauer. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die meisten alternativen Buntmetalllegierungen eine für die Anwendung ausreichende Klangdauer besitzen.

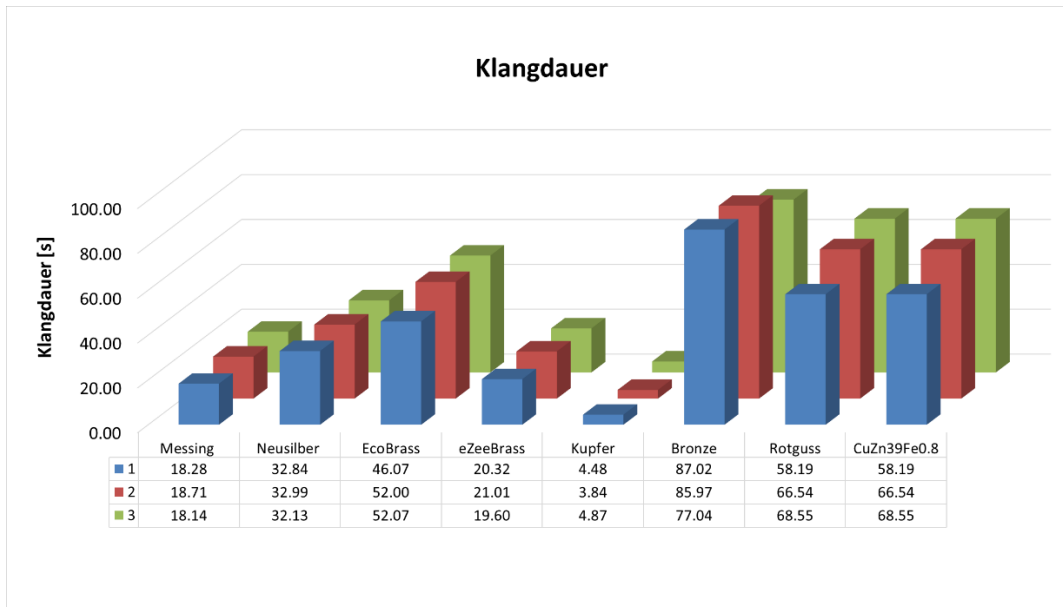


Abb. 5: Klangdauer untersuchter Metalle

### Ultraschallmessung

Mit dem in Abb. 6 dargestellten Messplatz zur Ultraschallmessung an Probekörpern wurde die Schallgeschwindigkeit an Standardprobekörpern ermittelt.

Als Messgerät kam ein Ultraschallmessgerät „Sonowall 70“ der Firma „SONOTEC GmbH“ und Messköpfe im Frequenzbereich 500kHz und 1MHz zum Einsatz. Zur Ankopplung an die Probekörper wurden Koppelfolien verwendet, um eine hohe Reproduzierbarkeit zu erreichen. Die Vorrichtung fand auch bereits im Projekt „Materialtypisierung“ erfolgreichen Einsatz.



Abb. 6: Ultraschallprüfung an Proben

Um den Prüfstand auch für lange Metallproben nutzen zu können, wurde ein Umbau notwendig. Für die Durchschallung der langen Metallproben sind niedrigere Frequenzen (500kHz) günstiger als bei Hölzern oft verwendete Frequenz von 1MHz. Beide Sensorvarianten waren aus dem Projekt „Materialtypisierung“ bereits nutzbar. Für die Untersuchungen standen unterschiedliche Geometrien

der Probekörper zur Verfügung, diese konnten auf dem aktuellen Prüfstand nicht eingespannt werden. Deshalb war eine Überarbeitung des Prüfstandes notwendig, um auch Probekörper bis 1m Länge messen zu können.

Weiterhin wurde der Prüfstand durch zusätzliche Probenhalter erweitert, um biegekritische Materialien sicher einspannen zu können. Im Folgenden ist ein Bild des fertig umgebauten Prüfstands für Metallproben zu sehen.



Abb. 7: Ultraschallprüfstand nach dem Umbau auf große Metallproben

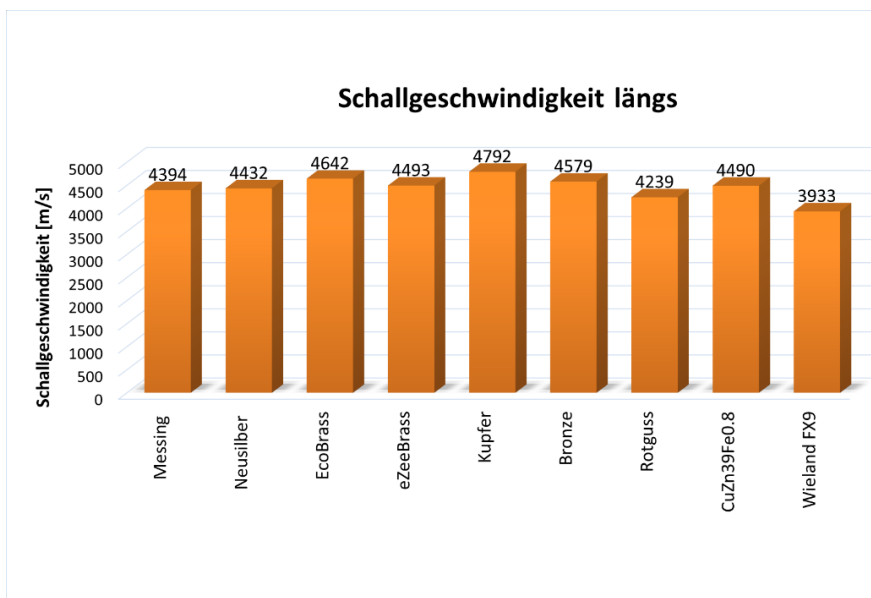


Abb. 8: Schallgeschwindigkeit untersuchter Metalle

Die Schallgeschwindigkeit von Materialien bildet über die Dichte des Materials einen eindeutigen Zusammenhang zum dynamischen Elastizitätsmodul. Sie ist also ein Indiz für die Elastizität des Materials, die aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen (z.B. Schallwellen) abgeleitet wird. Metallblasinstrumente sollen in gewisser Weise mitschwingen, um dem Musiker neben dem direkten Höreindruck auch ein „Feedback“ zum erzeugten Klang zu vermitteln. Dieses Schwingverhalten kann der Musiker über den direkten Handkontakt zum Instrument empfinden. Er nutzt dies unterbewusst zum genauen Intonieren beim Spiel.

Die Messungen der untersuchten Buntmetalle liefern eine Übersicht über die Größenordnung der Schallgeschwindigkeit und damit indirekt auch zum dyn. E-Modul. Die Schallgeschwindigkeit liegt bei allen untersuchten Materialien im Bereich zwischen ca. 4000 bis 4800 m/s. Die alternativen Metalllegierungen liegen im vergleichbaren Bereich mit bisher traditionell verwendeten Buntmetalllegierungen. Ein negativer Einfluss auf das Klang- und Spielverhalten von Metallblasinstrumenten aus alternativen Buntmetalllegierungen ist aus unserer Sicht nicht zu erwarten.

Folgende wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse konnten im **Arbeitspaket 2** erreicht werden:

- Der Schallgeschwindigkeitsprüfstand wurde umfangreich überarbeitet, um auch sehr lange metallische Probekörper (bis 1m Länge) auf ihre Eigenschaften hin zu untersuchen zu können
- Bisher verwendete Materialien und alle alternativen Metalllegierungen, welche im Metallblasinstrumentenbau zum Einsatz kommen bzw. kommen sollen, wurden hinsichtlich Klangdauer und Schallgeschwindigkeit untersucht und ausgewertet
- 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.

Die Arbeitsteilung zwischen den Partnern bestand hier in der Entwicklung möglicher Legierungen seitens der TU Freiberg und akustischen Untersuchungen der Materialien an ersten Halbzeugen seitens des Instituts für Musikinstrumentenbaus. Bei der Legierungsfindung handelte es sich um einen iterativen Prozess, der mehrere wiederkehrende Arbeitsschritte umfasste. Hierbei wurden die neuen Erkenntnisse zwischen dem IfM und dem IMF ausgetauscht, um die Legierungen Schritt für Schritt zu verbessern.

Für das Arbeitspaket 2 zuständig waren die Partner TU-Freiberg und das IfM.

**Arbeitspaket 3:**

Im Arbeitspaket 3 wurden die Eigenschaften der Alternativlegierungen im Hinblick auf die Fertigungsparameter von Halbzeugen, in unserem Fall von Bauteilen der Ventilbaugruppe von Drehventilen später gefertigter Mustertrompeten untersucht.

Hierzu wurden im Vorfeld Kalt- und Warmbehandlung der neuen Alternativlegierungen durch die TU-Freiberg untersucht und die Fertigungsparameter hinsichtlich der späteren Verarbeitung auf Dreh- und Fräsmaschinen optimiert.



*Abb. 9: Warmumformung von Halbzeugen alternativer Metalllegierungen (TU-Freiberg)*

Im Ergebnis entstanden Halbzeuge der neuen Legierung CuZn39Fe0.8 (siehe Abb. 9).

Die neue Legierung und weitere alternative Buntmetalllegierungen wie Phosphorbronze, EcoBrass, eZeeBrass und Wieland FX9 wurden umfangreichen Verarbeitungsversuchen bei der Firma: Voigt Metallblasinstrumentenbau (Leistung Dritter/Vergabe von Aufträgen) zugeführt.

An allen Materialien wurden folgende Verarbeitungsschritte durchgeführt: Sägen, Drehen, Fräsen, Feilen, Schleifen, Polieren, Lötten und an einigen Biegen. Alle Verarbeitungsversuche wurden dokumentiert und bewertet.

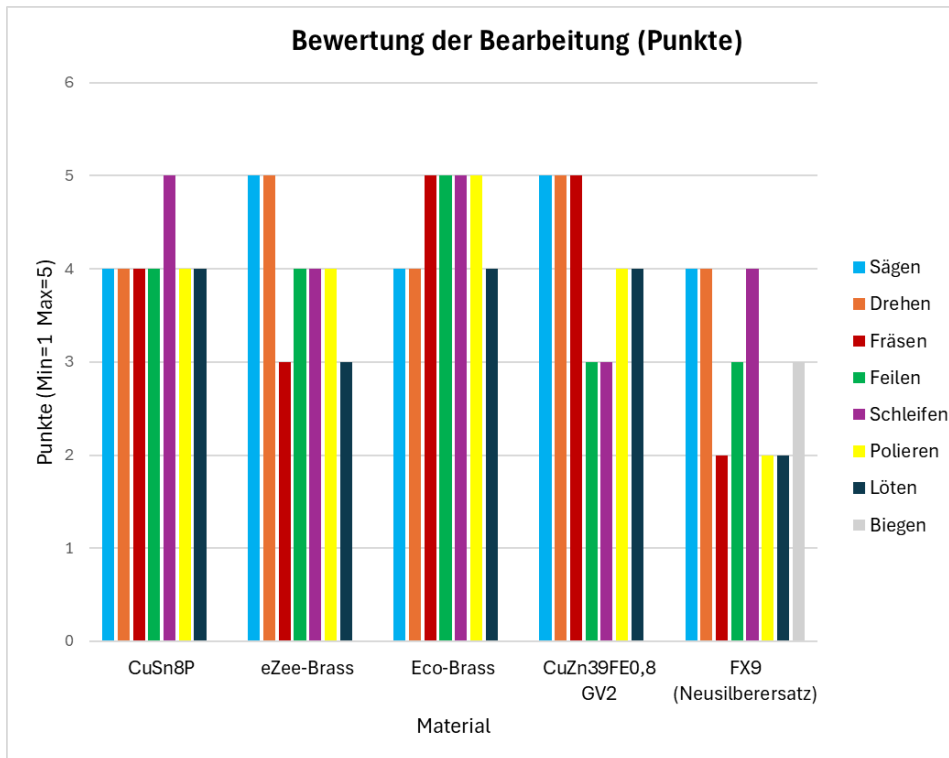


Abb. 10: Bewertung der Verarbeitung alternativer Metalllegierungen

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 schneiden insgesamt für die alternativen Metalllegierungen zufriedenstellend bis gut ab. 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.

Folgende wissenschaftlich-technische Ergebnisse konnten im Arbeitspaket 3 aus Sicht der Bearbeitbarkeit erreicht werden:

- die **Fertigung von Halbzeugen** für Musikinstrumenten bzw. -instrumentenbauteilen **konnte erfolgreich** am Beispiel der Drehventile von Trompeten **nachgewiesen werden**

- der **Einfluss von Halbzeug-Fertigungsparametern und Prozessparametern** auf die akustisch relevanten Eigenschaften der Halbzeuge **ist als positiv zu beurteilen** (keine Verschlechterung) durch die Bearbeitung
- die **Bearbeitung** ist bei Anpassung einiger Bearbeitungsparameter **grundsätzlich möglich**

Die Arbeitsteilung zwischen den Partnern bestand in der Trennung zwischen der Verfahrensoptimierung und der mechanisch/akustischen Eignungsfeststellung der erstellten Probekörpern (Halbzeugen). Die TU-Freiberg war dabei die Nachbehandlungs- und Fertigungsprozesse durchführen, während das IfM die Probekörper (Halbzeuge) auf ihre mechanische Bearbeitbarkeit und Eignung für den Einsatz in später akustisch relevanten Baugruppen überprüfte.

Für das Arbeitspaket 3 zuständig waren die Partner TU-Freiberg und IfM.

#### **Arbeitspaket 4:**

Im **Arbeitspaket 4** wurden mehrere alternative Legierungen und bisher verwendete auf ihre Tauglichkeit hinsichtlich ihrer Korrosionsneigung getestet. Hierzu wurden diese in einer Speichersatzlösung 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 Widerstandfähigkeit der Metalle gegenüber Korrosion treffen.

#### **Durchführung**

Die Korrosionstests im IfM sind an die Versuchsdurchführung der DIN 53160 angelehnt. Nach DIN wird mithilfe eines Klebebands Substrat auf den Probekörper aufgebracht. Im Institut werden die Probekörper jedoch vollständig in der Flüssigkeit eingebettet untersucht, wodurch sich bessere Aussagen zur Korrosionsneigung treffen lassen, da die komplette Oberfläche benetzt wird. Zum Einsatz kamen zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 18mm und einer Höhe von 20mm (soweit verfügbar). Von jedem Material wurden je 3 Zylinder untersucht. Diese wurden in einer Glasschale mit der Testflüssigkeit über mehrere Tage (insgesamt 10 Tage) in einem Klimaschrank bei einer Temperatur von ca. 40°C gelagert. An jedem Versuchstag wurden die Proben auf Veränderungen untersucht und ihr Zustand fotografisch dokumentiert. Nach Abschluss der Tests wurden die Prüfkörper unter dem Mikroskop untersucht. Dies wurde ebenfalls dokumentiert.

In der nachfolgenden Tabelle ist die Zusammensetzung der Speichersatzlösung aufgeführt.

Reagenzien	CAS-Nr. <sup>a</sup>	Massenanteil g/l
Magnesiumchlorid ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )	7791-18-6 (Hexahydrat)	$0,17 \pm 0,01$
Calciumchlorid ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )	10035-04-8 (Dihydrat)	$0,15 \pm 0,01$
Dikaliumhydrogenphosphat ( $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )	16788-57-1 (Trihydrat)	$0,76 \pm 0,01$
Kaliumcarbonat ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ )	584-08-7 (wasserfrei)	$0,53 \pm 0,01$
Natriumchlorid (NaCl)	7647-14-5	$0,33 \pm 0,01$
Kaliumchlorid (KCl)	744-40-7	$0,75 \pm 0,01$
Salzsäure (1 %, Massenanteil)	7647-01-0 (Chlorwasserstoff)	Zugabe bis pH-Wert von $6,8 \pm 0,1$
<sup>a</sup> Chemical Abstracts Service Registry Number.		

Tab. 1: Zusammensetzung der Speichlersatzlösung DIN 53160

Während der Tests waren die Glasschalen nicht abgedeckt, wodurch zweimal Testflüssigkeit nachgefüllt werden musste.

Folgende Ergebnisse zeigten die Korrosionsuntersuchungen:

### Ecobrass (Werkstoffdatenblatt Fa. Wieland)

#### Korrosion über Testverlauf

Tag 1 – Tag 6	Keine sichtbaren Veränderungen
Tag 7	2 - 3 Stellen, mit leicht roten und weißen Ablagerungen, Ausprägung von Schlieren, sehr geringe Breite, bis 15mm Länge
Tag 8 - Tag 10	Ablagerungen nehmen etwas zu, Breite nicht über 1mm, Ausmaß ist eher gering

#### Versuchsauswertung

Das Material Ecobrass zeigt keine nennenswerte Korrosionsneigung während des Versuchs. Eine Beständigkeit gegenüber Speichel ist zuverlässig gegeben. Über die Versuchsdauer kommt es zu leichten roten und weißen Ablagerungen. Diese müssten in der Praxis weiter untersucht werden, um eine Beeinträchtigung von beweglichen Baugruppen untereinander ausschließen zu können (Wechsel).



Abb. 11: Korrosionsversuche (EcoBrass CuZn21Si3P)

**eZeeBrass (Werkstoffdatenblatt Fa. Diehl):****Korrosion über Testverlauf**

Tag 1	erste, winzige, weiße Ablagerungen (2 Punkte, 0,5mm)
Tag 2	kleine weiße Ablagerungen wachsen geringfügig (2mm)
Tag 3	weiteres Wachstum kleiner weißer Flecken (bis 4mm)
Tag 4 – Tag 7	Flecken wachsen kontinuierlich bis auf 10mm x 2mm
Tag 8 – Tag 10	pro Prüfkörper 1 – 2 Stellen, sichtbar als weiße Ablagerungen

Bei den weißen Flecken handelt es sich um oberflächliche Ablagerungen aus der Testflüssigkeit. Diese haften sehr stark an der Oberfläche der Prüfsylinder. Eine Korrosion an den Zylindern kann jedoch nicht festgestellt werden.

**Versuchsauswertung**

Das Material eZeeBrass zeigt keine nennenswerte Korrosionsneigung während des Versuchs. Eine Beständigkeit gegenüber Speichel ist zuverlässig gegeben. Allerdings kommt es zu Ablagerungen auf der Oberfläche der Prüfkörper. Diese müsste in der Praxis weiter untersucht werden, dass es nicht zur Beeinträchtigung von beweglichen Baugruppen untereinander kommt (Wechsel).



Abb. 12: Korrosionsversuche (eZeeBrass CuZn41Mg)

**Messing**

## Korrosion über Testverlauf

Tag 1 – Tag 5	Keine Auffälligkeiten
Tag 6	Erste weiße Ablagerung in Form eines winzigen fadenförmigen Flecks
Tag 7	winzige weiße fadenförmige Flecken auf jedem Prüfzylinder
Tag 8 – Tag 10	Winzige fadenförmige Flecken auf jedem Zylinder, kaum Wachstum

**Versuchsauswertung**

Das Material Messing zeigt keine Korrosionsneigung während des Versuchs. Eine Beständigkeit gegenüber Speichel ist zuverlässig gegeben. Auf der Oberfläche der Prüfzylinder kommt es zu minimalen Ablagerungen, welche sich als weiße dünne Fäden ausbilden. Weiterhin sieht man unter dem Mikroskop weiße Punkte auf der Oberfläche des Messings. Das Material wird seit Jahren im Instrumentenbau ohne Einschränkungen eingesetzt, wodurch diese als unkritisch bewertet werden können. Im Gegensatz zum eZeeBrass ist die Bildung von Ablagerungen deutlich geringer.



Abb. 13: Korrosionsversuche (Messing CuZn39Pb3)

**Neusilber**

## Korrosion über Testverlauf

Tag 1 – Tag 6	Keine Auffälligkeiten
---------------	-----------------------

Tag 7	winzige punktuelle Anhaftungen, mit bloßem Auge fast nicht erkennbar
Tag 8 – Tag 10	Keine weitere Verschlechterung

### Versuchsauswertung

Das Material Neusilber zeigt keine Korrosionsneigung während des Versuchs. Eine Beständigkeit gegenüber Speichel ist zuverlässig gegeben. Unter dem Mikroskop sieht man nach der Testdauer winzige, weiße, punktuelle Anhaftungen, welche mit bloßem Auge fast nicht zu erkennen sind. Das Material wird seit Jahren im Instrumentenbau eingesetzt und kann als Standard für korrosionsbeständige Legierungen angesehen werden.



Abb. 14: Korrosionsversuche (Neusilber  $\text{CuNi7Zn39Mn5Pb3}$ )

## Bronze

Korrosion über Testverlauf

Tag 1 – Tag 3	Keine Auffälligkeiten
Tag 4	Erste leichte Ablagerungen (minimal)
Tag 5 – Tag 10	Leichte Ablagerungen bleiben, wachsen jedoch kaum weiter

## Versuchsauswertung

Das Material Bronze zeigt keine Korrosionsneigung während des Versuchs. Eine Beständigkeit gegenüber Speichel ist zuverlässig gegeben. Es kommt zwar zu leichten vereinzelt Ablagerungen auf der Oberfläche, jedoch zeigt das Material selbst keine Veränderungen. Der Einsatz von Bronze im Instrumentenbau kann somit ohne Einschränkungen empfohlen werden.



Abb. 15: Korrosionsversuche (Bronze CuSn8)

**Kupfer**

Korrosion über Testverlauf

Tag 1 – Tag 10

Keine Auffälligkeiten

**Versuchsauswertung**

Das Material Kupfer zeigt keine Korrosionsneigung während des Versuchs. Eine Beständigkeit gegenüber Speichel ist zuverlässig gegeben. Auf den Oberflächen der Prüfcylinder gibt es keine Veränderungen. Nur auf den Schnittflächen der Zylinder kommt es zu geringen Ablagerungen, welche aber teilweise schon vor den Tests aufgrund des Trennverfahrens vorhanden waren. Somit eignet sich Kupfer ebenfalls uneingeschränkt für den Einsatz im Instrumentenbau.



Abb. 16: Korrosionsversuche (Kupfer)

**FX9 – (Neusilberersatz, CuMn15Zn15Al1)**

**Korrosion über Testverlauf**

Tag 1 – Tag 10

Keine Auffälligkeiten

**Versuchsauswertung**

Das Material FX9 zeigt keine Korrosionsneigung während des Versuchs. Eine Beständigkeit gegenüber Speichel ist zuverlässig gegeben. Das Material zeigt keine Ablagerungen und ist von allen Metallen der Korrosionsuntersuchungen, das mit den besten Ergebnissen.

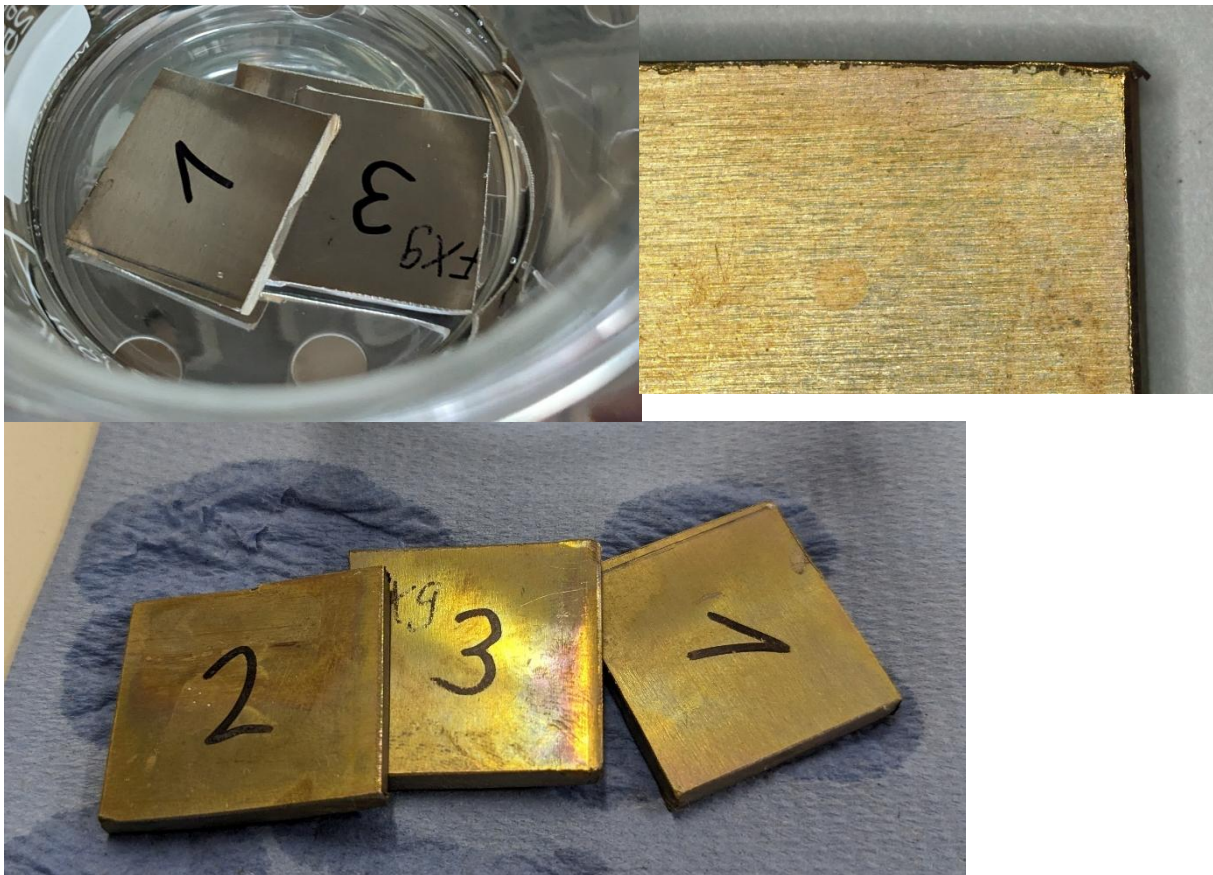


Abb. 17: Korrosionsversuche (Neusilberersatz Wieland-FX9)

**Eisenhaltige Legierung (CuZn39Fe0.8)****Korrosion über Testverlauf**

Tag 1 – Tag 3	Keine Auffälligkeiten
Tag 4 – Tag 10	Minimale weiße Ablagerungen an 3 Stellen

**Versuchsauswertung**

Vom neu entwickelten Material der eisenhaltigen Legierung gab es 2 verschiedene Gießversuche. Diese wurden in Gießversuch 2 und Gießversuch 3 unterteilt. In den Korrosionstest verhielten sich beide Legierungen identisch. Unterschiede gab es nur durch den Gießprozess. Im Gießversuch 2 gab es im Inneren mehrere kleine Lunker (Luft einschüsse), was auf den Bildern ersichtlich ist. Diese sind durch die Herstellung bedingt und keine Resultate der Korrosionstests. GV3 zeigt auf einem Prüfkörper rötliche Ablagerungen. Hierbei handelt es sich vermutlich nicht um Rost. Um welche Elemente es sich im Einzelnen handelt konnte jedoch nicht festgestellt werden. Das Licht des Mikroskops lässt die Stelle rötlich erscheinen. Im Tageslicht wirkt die Ablagerung eher grau.

Hinsichtlich der Korrosionsneigung **konnten beide Varianten überzeugen**, woraus sich eine uneingeschränkte **Eignung für den Metallblasinstrumentenbau** ergibt.

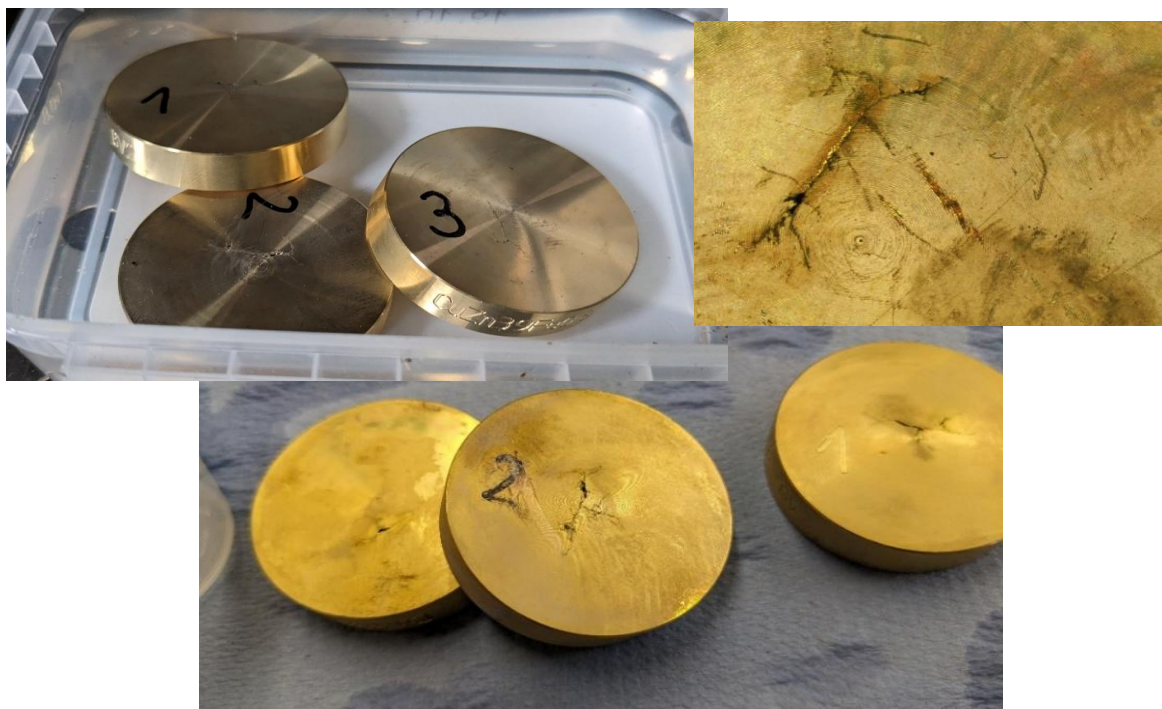


Abb. 18: Korrosionsversuche Alternativlegierung (CuZn39Fe0,8 GV2)

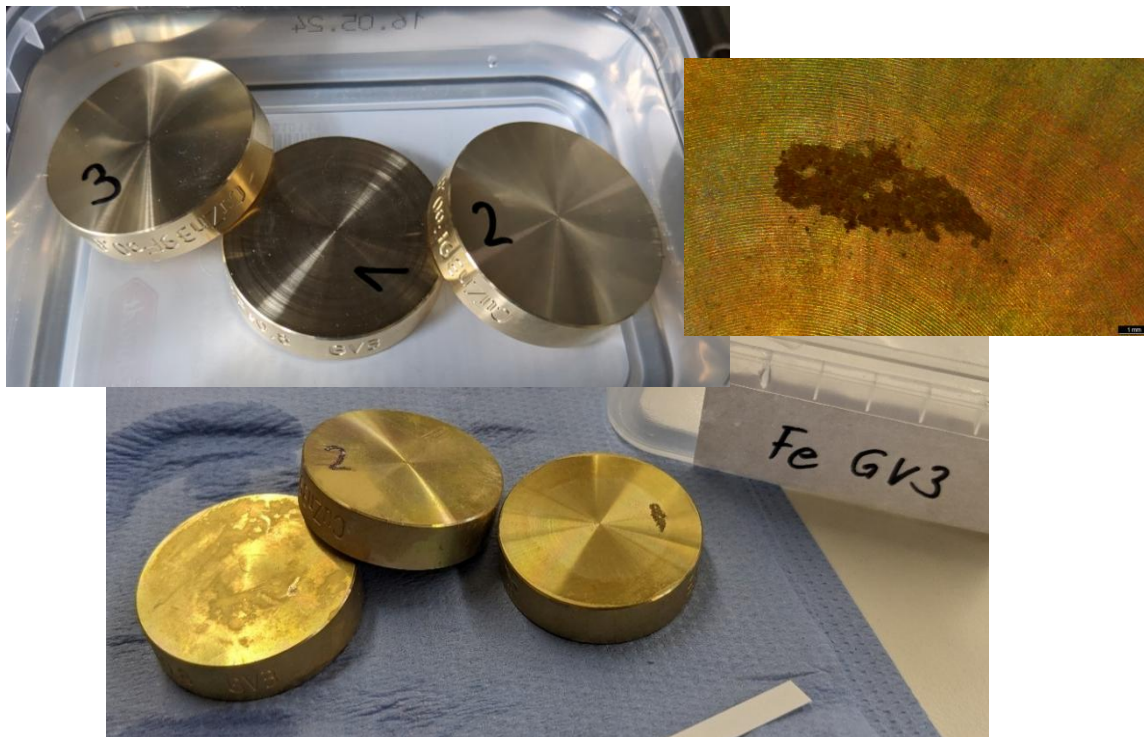


Abb. 19: Korrosionsversuche Alternativlegierung (CuZn39Fe0,8 GV3)

**Ermittlung des dyn. E-Moduls:**

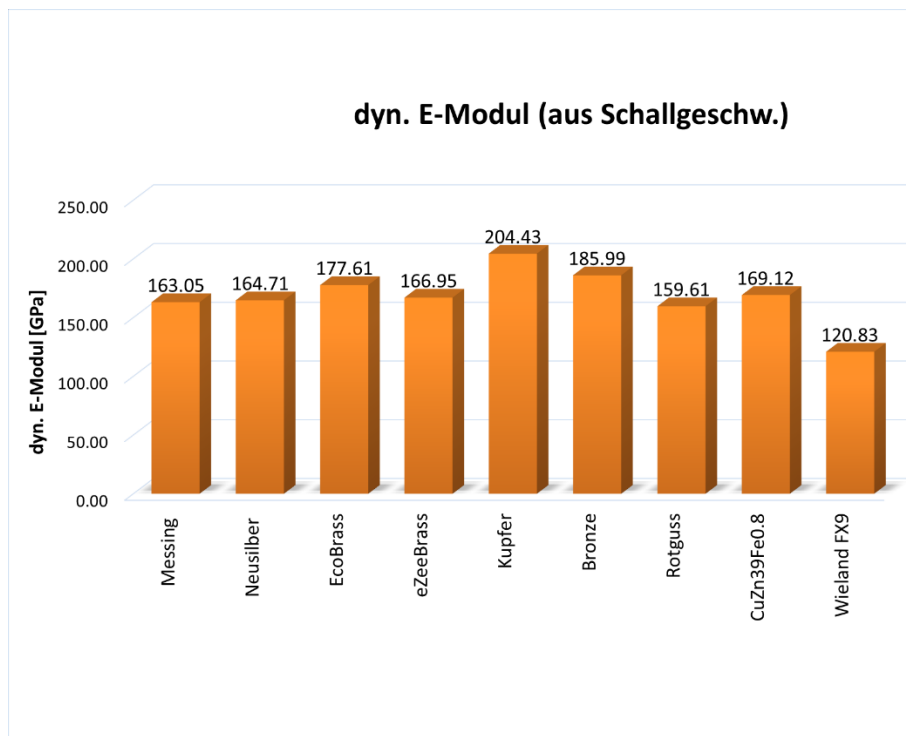


Abb. 20: dyn. E-Modul altern. Metalle im Vergleich zu bisherigen

Zur Bewertung der mechanischen Kennwerte wurde das dynamische Elastizitätsmodul, welches aus den Schallgeschwindigkeiten der Ultraschallmessung an Probekörpern ermittelt wurden, dargestellt.

Die alternativen Legierungen, welche als Ersatz für Messing bzw. Messinglegierungen eingesetzt werden sollen, liegen im vergleichbaren Wertebereich der bisher verwendeten Materialien.

Das neue Material Wieland-FX9 zeigt zwar etwas niedrigere Werte als bisheriges Neusilber, die Verarbeitbarkeitsversuche und die Verwendung in der Drückermechanik von Muster-Trompeten zeigte jedoch, dass das Material durchaus sehr gut als Ersatz verwendet werden kann.

Folgende wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse konnten im **Arbeitspaket 4** aus Sicht der Korrosionsuntersuchungen erreicht werden:

- Korrosionsuntersuchungen wurden an allen verfügbaren bzw. neu entwickelten Legierungen durchgeführt
- Die **neu entwickelte Legierung** CuZn39Fe0.8 konnte in den Tests überzeugend **positiv** abschließen, **es ist uneingeschränkt einsetzbar**
- Die alternativen Legierungen **EcoBrass** und **eZeeBrass** schneiden zwar insgesamt relativ gut ab, zeigen jedoch **leichte Ablagerungen** und **sind bedingt verwendbar**
- Das alternative Material **FX9 ist als Neusilberersatz** uneingeschränkt **nutzbar**
- Als **weitere Alternativen schneiden** Kupfer und Phosphorhaltige Bronze **ebenfalls gut ab**

Die Arbeitsteilung zwischen den Partnern bestand hier in der Abstimmung der Prozessparameter zur Erreichung der Zielparameter, dies übernahm die TU-Freiberg. Der Nachweis der Erreichung der Parameter und die Korrosionsuntersuchungen waren Aufgabe des IfM.

Für das Arbeitspaket 4 waren beide Partner zuständig.

**Das Arbeitspaket 5:**

Im Arbeitspaket 5 wurden mehrere Baugruppen und Musterinstrumente angefertigt und daran Untersuchungen zur Eignung und akustischen Eigenschaften durchgeführt. Zur Auswahl kamen aufgrund der begrenzten Menge an Ausgangsmaterialien (Alternativlegierungen) Trompeten mit einer Drehventilbaugruppe. Es entstanden insgesamt 5 Trompeten, eine aus bisher verwendeten Metalllegierungen (nicht blei- und nickelfrei) und 4 Mustertrompeten aus bleifreien Messinglegierungen und Ventilbaugruppen aus alternativen (blei- und nickelfreien) Legierungen. Auf die Anfertigung von Mechaniken für Holzblasinstrumente wurde wegen der zu geringen verfügbaren Menge an Neusilberersatzmaterial verzichtet. Die Mechaniken (Hebel und Klappen) von Holzblasinstrumenten werden üblicherweise gegossen bzw. geschmiedet und danach weiterbearbeitet.

Die Drückermechanik der Mustertrompeten konnte aus dem Neusilberersatzmaterial FX9 gefertigt werden. Somit konnten die Verarbeitbarkeit und der Einsatz des neuen Materials ausreichend getestet und bewertet werden.

Die Auswahl der zum Vergleich kommenden Alternativmaterialien wurde mit erfahrenen Metallblasinstrumentenbauern der Firma: „Voigt Metallblasinstrumentenbau“ abgestimmt.

Folgende Materialien kamen zur weiteren Untersuchung zum Einsatz:

<b>Aufgabenstellung Anfertigung Muster-Trompeten</b>					
<b>Bauteile</b>	<b>Trompete 1</b>	<b>Trompete 2</b>	<b>Trompete 3</b>	<b>Trompete 4</b>	<b>Referenz-Trompete 5</b>
Schallstück	CuZn28	CuZn28	CuZn28	CuZn28	CuZn28
Bogen und Knie	CuZn30	CuZn30	CuZn30	CuZn30	CuZn30
Züge	CuZn30	CuZn30	CuZn30	CuZn30	CuZn30 + CuNi12Zn24
Mundrohr	CuZn15	CuZn15	CuZn15	CuZn15	CuZn15
Wasserklappe	CuZn37	CuZn37	CuZn37	CuZn37	CuNi7Zn39Pb3Mn2
Stützen	CuZn37 + CuZn 28	CuZn37 + CuZn 28	CuZn37 + CuZn 28	CuZn37 + CuZn 28	CuNi12Zn24 + CuNi7Zn39Pb3Mn2
Ventilbüchse	ECO-Brass	ECO-Brass	eZee-Brass CuZn41Mg	CuZn39Fe0,8 GV2	CuNi12Zn24
Wechsel	eZee-Brass CuZn41Mg	CuSn8P	CuZn39Fe0,8 GV3	eZee-Brass CuZn41Mg	CuZn39Pb3
Ventildeckel	CuZn39Fe0,8 GV2	eZee-Brass CuZn41Mg	eZee-Brass CuZn41Mg	CuZn39Fe0,8 GV2	CuNi7Zn39Pb3Mn2
Druckwerk	Wieland-FX9	Wieland-FX9	Wieland-FX9	Wieland-FX9	CuNi18Zn20 + CuNi7Zn39Pb3Mn2
Hinweis:	Büchsen mit Ms Ohren CuZn30				

Tab. 2: Materialauswahl für Anfertigung von Mustertrompeten und Ventilbaugruppen

Bei den 4 Mustertrompeten kamen im Bereich der Rohre, Züge und des Schallstücks blei- und nickelfreies Messing mit 70 bis 85% Kupferanteil zum Einsatz. Bei den Stimmzügen wurde auf Neusilber verzichtet. Das Druckwerk wurde aus dem alternativen Material FX9 gefertigt.

Für die Ventilbaugruppen (Wechsel und Büchsen sowie Ventildeckel kamen in verschiedenen Kombinationen: **Eco-Brass**: CuZn21Si3P, **eZeeBrass**: CuZn41Mg, **Phosphorbronze**: CuSn8P und die **neue Alternativlegierung**: (CuZn39Fe0.8) zum Einsatz.

Das Referenzinstrument (Trompete5) wurde aus bisher verwendeten Materialien (nicht blei- und nickelfrei) hergestellt.



Abb. 21: Mustertrompeten (T1 bis T5-Referenz), von links nach rechts

### Objektive Untersuchungen:

Zur objektiven Beurteilung der Instrumente wurden die Eingangsimpedanzmessungen und deren Bewertung [1] für alle Ventilstellungen der Mustertrompeten durchgeführt. Die genutzten Bewertungskriterien berechnen sich aus den Resonanzfrequenzen und -amplituden für jede Ventilstellung und lassen sich wie folgt beschreiben:

- Betrag des Mittelwertes der Cent-Abweichung innerhalb der Ventilstellungen (mittlere Stimmung)
- Standardabweichung der Cent-Abweichung innerhalb der Ventilstellungen

**Ergebnisse der akustischen Messungen:**

Die Mustertrompeten wurden zur Bewertung der akustischen Eigenschaften zunächst mit Hilfe der Eingangsimpedanzmessung gemessen und im Vergleich bewertet.



Abb. 22: Messung der Eingangsimpedanz der Mustertrompeten

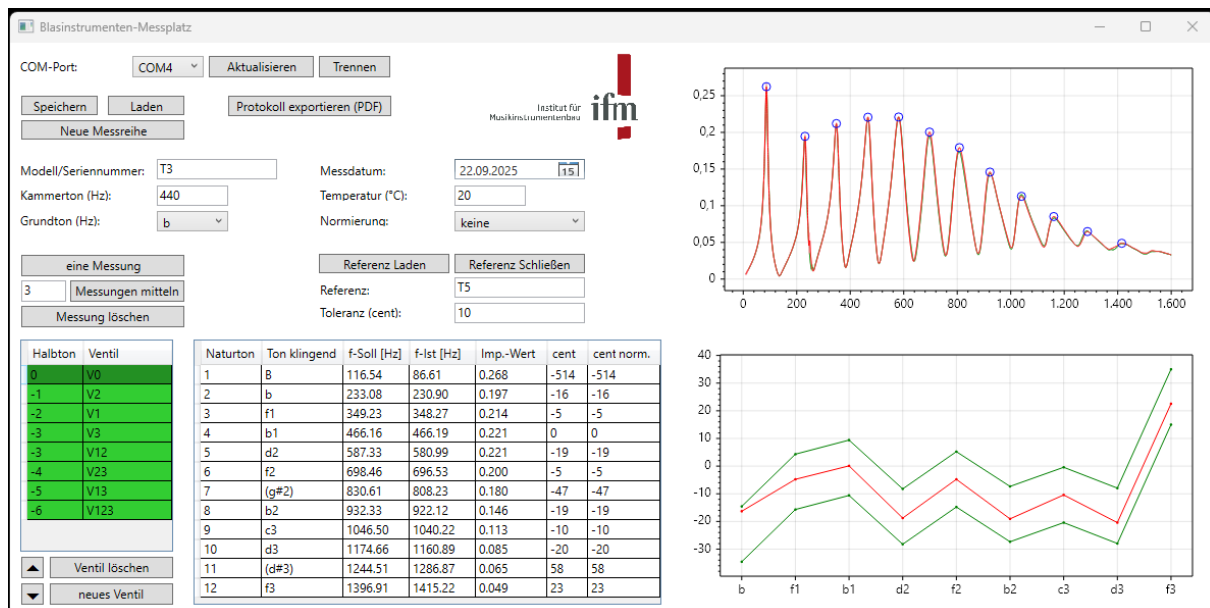


Abb. 23: Messergebnis Mustertrompete T3 im Vergleich zur Referenz T5(Ventil0)

Im Ergebnis der Untersuchungen zeigte sich, dass die mittlere Stimmung aller Trompeten im Bereich zwischen -17 bis ca. 5 Cent liegt. Die Standardabweichungen der mittleren Stimmung innerhalb der Ventilstellung liegen im Bereich zwischen 9 bis ca. 18 Cent für alle Trompeten.

Trompete 4 zeigt dabei die höchsten Abweichungen der mittleren Stimmung und Standardabweichung.

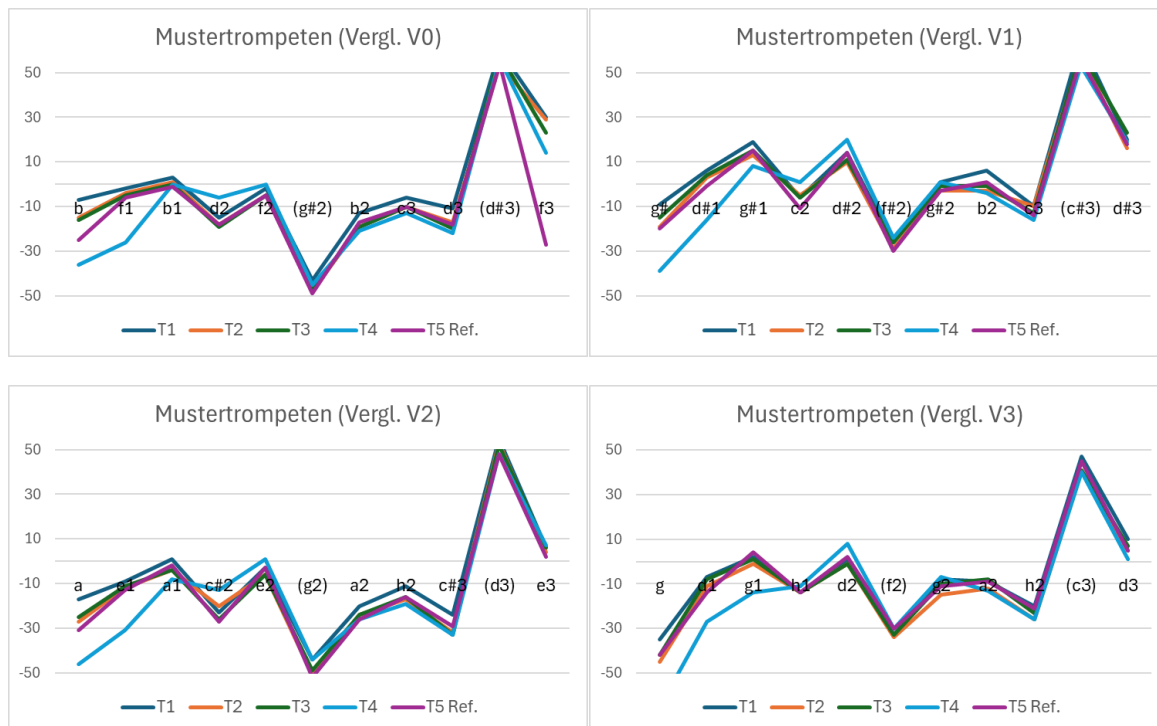


Abb. 24: Vergleich der Mustertrompeten (Ventilstellung V0 bis V3)

Dies ist jedoch nicht auf das eingesetzte Material, sondern vielmehr auf geringe geometrische Abweichungen in der händischen Fertigung zurückzuführen. Die Streuung ist erwartungsgemäß etwas höher als bei Serieninstrumenten.

Insgesamt kann aus Sicht der akustischen Messungen gesagt werden, dass alle Mustertrompeten vergleichbar gut abschneiden. Es gibt ebenfalls bezüglich der Ansprache der Instrumente keine Verschlechterungen aus messtechnischer Sicht.

### Subjektive Untersuchungen

Der subjektive Spieltest wurde auf der Basis der Verfahrensweise des Deutschen Musikinstrumentenpreises (DMIP) angelehnt, welcher für Trompeten zuletzt 2019 durchgeführt wurde. Der Spieltest wurde im Konferenzraum des IfM durchgeführt. Der Raum weist ein Nachhallzeitspektrum nach DIN 18041:2016-03 auf. Viele musikalische Gutachter bestätigten uns in der Vergangenheit, dass dies für die Beurteilung von Instrumenten günstig ist, da Details gut wahrgenommen werden können und dabei genügend räumlicher Klang vorhanden ist.

Bei den subjektiven Tests handelt es sich um Fragebogen gestützte Beurteilungen. Der entsprechende Fragebogen wurde im IfM auf der Basis von Erkenntnissen der Musikalischen Akustik und unter Berücksichtigung der Ergebnisse und Erfahrungen bei der Durchführung des DMIP der vergangenen Jahrzehnte erstellt.

Zusätzlich wurden entsprechend der Fragestellungen im Projekt weitere Vertiefungen eingearbeitet. Im Fragebogen werden gezielt Fragen zur Spielbarkeit und Funktionsweise der Baugruppe der Ventile abgefragt.

Der Test erfolgte unter abgedunkelter Atmosphäre ohne Zurücklegen der Instrumente. Die Instrumente wurden für jeden Musiker zufällig ausgewählt. Der Testleiter reichte den Testpersonen die Instrumente jeweils einzeln. Die Vorgehensweise dient dazu, die Sichtbarkeit der eigentlichen Neuerungen, in diesem Fall die Materialauswahl, zu verhindern. Die Musiker sollen sich auf die akustischen und spieltechnischen Aspekte konzentrieren. Zur subjektiven Bewertung wurden professionelle Trompeter des ansässigen Blasorchesters einbezogen.

### **Ergebnisse der Musikertest:**

Der auf der Basis des DMIP erstellte Fragebogen enthielt neben Fragen zu klanglichen Attributen auch Fragen zur Spielbarkeit, der Ergonomie, diese Tests erfolgten bei abgedunkelter Atmosphäre. Die Bewertung der optischen Erscheinung und der Verarbeitung erfolgte bei angeschaltetem Licht.



*Abb. 25: Musikertest im IfM*

Der Fragebogen beinhaltet folgende Fragen:

### Fragebogen b-Trompete (Drehventil)

Nummer des Instrumentes:

Datum:

Name Testperson:

Name Testleiter:

#### Licht aus!

sehr schlecht ⇒ sehr gut

<b>Klangfarbe</b>	tiefe Lage	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	Mittellage	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	hohe Lage	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	Ausgeglichenheit	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	Variabilität des Klanges	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<b>Klangvolumen (Lautstärke, Klangfülle)</b>	tiefe Lage	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	Mittellage	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	hohe Lage	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	Ausgeglichenheit	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<b>Dynamik</b>	Möglichkeiten	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<b>Ansprache</b>	tiefe Lage	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	Mittellage	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	hohe Lage	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	Ausgeglichenheit	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<b>Stimmung</b>	Gesamteindruck	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
<b>Spielbarkeit/Handhabung</b>	Luftbedarf	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	akust. Ventilfunktion	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	mech. Ventilfunktion	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	Funktion Stimmzüge	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
	Balance / Gewicht	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

#### Licht an!

sehr schlecht ⇒ sehr gut

<b>Erscheinungsbild</b>	optischer Eindruck	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
-------------------------	--------------------	--

Abb. 26: Musiker Fragebogen (Trompete)

Im Ergebnis der Musikerbefragungen schneiden die Musterinstrumente Trompete 1 bis Trompete 4 im Vergleich zur Referenz Trompete vergleichbar gut ab.

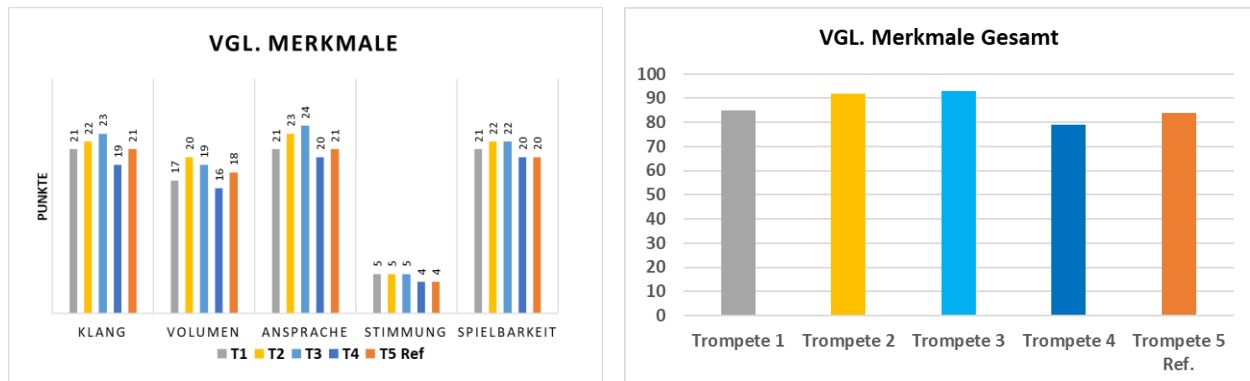


Abb. 27: Vergleich der Einzelmerkmale und Gesamtbewertung (in Punkten)

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 Unterschied 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.

Folgende wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse wurden erreicht:

- Die **Musterinstrumente aus alternativen Metallegierungen schneiden** im Vergleich zum Referenzinstrument (aus traditionell verwendeten blei- und nickelhaltigen Legierungen) **vergleichbar gut ab**.
- In den messtechnischen Untersuchungen (objektive Tests) ist die **Intonation und Ansprache vergleichbar mit dem Referenzinstrument**
- Die **Musikertest bestätigten die gute Spielbarkeit** der Musterinstrumente im Vergleich zum Referenzinstrument
- In den meisten Attributen schnitten die Musterinstrumente vergleichbar gut ab, in einigen wenigen Merkmalen sogar etwas besser als das Referenzinstrument
- Insgesamt waren alle **akustischen Tests und die Musikerbewertungen positiv**

- Die Funktionsweise und Eignung der Materialien konnte erfolgreich am Beispiel der Trompete mit Drehventilen nachgewiesen werden

Die Arbeitsteilung zwischen den Partnern bestand in der Fertigung von Bauteilen für Instrumente (Unteraufträge durch TU-Freiberg) bzw. der Herstellung von Musterinstrumenten (Unteraufträge durch IfM). Die Optimierung der Herstellung bzw. der dem Hersteller zur Verfügung gestellten Halbzeuge erfolgt durch die TU Freiberg. Die objektive messtechnische Untersuchung an Musterinstrumenten und die subjektive Untersuchung erfolgen durch das IfM bzw. im Auftrag des IfM (Musikertests).

Für das Arbeitspaket 5 zuständig sind die Partner TU Freiberg, IfM und im Unterauftrag Herstellung von Musterinstrumenten (Leistung Dritter).

**Arbeitspaket 6:**

Im **Arbeitspaket 6 „Katalogisierung“** wurden sämtliche gemessenen Kennwerte und Parameter der alternativen Metalllegierungen in die Materialdatenbank katalogisiert und stehen somit für weitere Forschungen in gesammelter Form zur Verfügung. Der Datensatz der erfassten Metalle erweiterte sich von über 20 Legierungen auf derzeit ca. 40 Legierungseinträge.

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

Messungen Klangdauerproben		(Messpunkte bei 20mm, 95mm und 170mm)										Schallgeschwindigkeit längs			E-Modul
Bezeichnung	Zs.setzung	Masse [g]	Durchmesser [mm]				Länge [mm]	Volumen [mm³]	Dichte [kg/m³]	Klangdauer [s]	Schallgeschwindigkeit längs			[kN/mm²] = Gpa	
			1	2	3	ø					dt [µs]	v [m/s]			
Messing	CuZn39Pb3	407.86	18.00	17.99	17.99	17.99	190.05	48326.02	8.44	18.28	43.26	4393.20	162.89		
		407.84	17.99	17.99	17.98	17.99	190.07	48295.30	8.44	18.71	43.27	4392.65	162.94		
		407.88	17.99	17.98	17.99	17.99	190.05	48290.21	8.45	18.14	43.22	4397.27	163.32		
#								8.44			4394	163.05			
Neusilber	CuNi7Zn39Pb3Mn2	405.11	17.99	17.99	17.99	17.99	190.06	48310.66	8.39	32.84	42.88	4432.37	164.74		
		405.11	18.00	17.99	17.99	17.99	190.06	48328.56	8.38	32.99	42.88	4432.37	164.68		
		405.15	18.00	17.99	17.99	17.99	190.07	48331.10	8.38	32.13	42.88	4432.60	164.70		
#								8.38			4432	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	48428.52	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	16.97	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	4498.34	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	166.95			
Aluminium	AlMgSi0.5	132.87	18.18	18.19	18.20	18.19	189.90	49349.21	2.69	24.41	30.05	6319.47	107.52		
		133.02	18.19	18.18	18.17	18.18	190.04	49331.31	2.70	17.17	30.09	6315.72	107.56		
		133.03	18.17	18.19	18.17	18.18	190.16	49344.36	2.70	24.03	30.10	6317.61	107.60		
#								2.69			6318	107.56			
Baustahl	S235JR+C+S/H	377.73	17.98	17.98	17.97	17.98	189.94	48208.61	7.84	22.54	32.08	5920.82	274.68		
		377.34	18.00	18.00	17.97	17.99	190.07	48313.30	7.81	17.22	32.17	5938.30	272.64		
		378.22	17.99	17.98	17.98	17.98	190.30	48335.82	7.82	23.41	32.15	5919.13	274.15		
#								7.82			5916	273.82			
Stahl C45 - C	1.0503	377.66	17.99	18	18.01	18.00	189.99	48346.57	7.81	8.99	32.26	5889.34	270.94		
		377.68	17.98	17.97	17.99	17.98	190	48241.73	7.83	8.79	32.26	5889.65	271.57		
		377.35	17.98	17.97	17.98	17.98	189.84	48183.23	7.83	8.88	32.24	5888.34	271.54		
#								7.82			5889	271.35			
VZA	X5CrNi18-10	381.92	17.98	17.99	17.99	17.99	190.36	48368.98	7.90	2.80	33.36	5706.24	257.10		
		381.22	17.98	17.99	17.98	17.98	190.07	48277.40	7.90	2.79	33.33	5702.67	256.80		
		381.42	17.99	17.98	18	17.99	190.17	48338.62	7.89	2.77	33.35	5702.25	256.57		
#								7.89			5704	256.82			
Federstahl	EN 10270-1 Typ SH	387.31	18.25	18.23	18.22	18.23	190.18	49657.73	7.80	15.11	32.23	5900.71	271.57		
		387.32	18.23	18.22	18.23	18.23	190.1	49600.55	7.81	16.08	32.21	5901.89	272.00		
		388.42	18.25	18.24	18.23	18.24	190.43	49759.37	7.81	17.07	32.22	5910.30	272.68		
#								7.80			5904	272.08			
Kupfer	E-Cu	425.27	17.91	17.89	17.91	17.90	189.74	47765.75	8.90	4.48	39.61	4790.20	204.29		
		425.82	17.89	17.9	17.92	17.90	189.97	47823.65	8.90	3.84	39.65	4791.17	204.39		
		425.74	17.91	17.9	17.9	17.90	189.91	47808.54	8.91	4.87	39.62	4793.29	204.60		
#								8.90			4792	204.43			
Bronze	CuSn8	427.95	18	17.99	17.99	17.99	189.92	48292.96	8.86	87.02	41.49	4577.49	185.68		
		428.67	17.98	17.98	17.98	17.98	190.26	48307.74	8.87	85.97	41.55	4579.06	186.06		
		428.75	17.98	17.99	17.98	17.98	190.28	48330.74	8.87	77.04	41.53	4581.75	186.23		
#								8.87			4579	185.99			
Rotguss	CuSn7Zn4Pb7-C	507.57	19.55	19.58	19.57	19.57	189.82	57077.58	8.89		44.21	4293.60	163.94		
		507.17	19.59	19.58	19.6	19.59	189.68	57174.59	8.87		44.89	4225.44	158.39		
		506.52	19.55	19.58	19.59	19.57	189.53	57029.22	8.88		45.15	4197.79	156.51		
#								8.88			4239	159.61			
Eisenhaltige Legierung	CuZn39Fe0.8	4487.1	39.96	40	40.02	39.99	425.40	534395.23	8.40		94.78	4488.29	169.15		
		5455.2	39.19	39.14	39.1	39.14	541.2	651273.31	8.38		120.45	4493.15	169.10		
#								8.39			4491	169.12			
Wieland FX9	CuMn15Zn15Al1	164.79	29.9	28.89	29.65	29.48	198.73	21110.35	7.81		50.52	3933.69	120.79		
		162.98	27.44	29.98	29.88	29.10	198.74	20858.56	7.81		50.53	3933.11	120.87		
#											3933	120.83			

Tab. 3: Materialdatenbank (schwingungstechnische Kennwerte untersuchter Metalllegierungen)

Folgende wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse wurden erreicht:

- Die akustischen und schwingungstechnischen Kennwerte wurden ermittelt und in der Datenbank aufgenommen
- 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.

Die Arbeitsteilung zwischen den Partnern im Arbeitspaket 6 bestand in der Dokumentation der verfahrenstechnischen und metallurgischen Parameter (TU-Freiberg) und der Dokumentation der akustischen Kennwerte (IfM) in der Materialdatenbank.

Für das Arbeitspaket 6 waren beide Partner zuständig.

#### Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die erreichten Ergebnisse des Projektes können insgesamt, als großer Erfolg betrachtet werden.

Der Musikinstrumentenbau ist nach wie vor eher konservativ geprägt, jedoch öffnet sich das Interesse in der Branche aufgrund der immer stärkeren Verschärfung der REACH- Verordnung und der strengeren Arbeitsschutzbestimmungen beim Umgang mit Blei, Nickel und Chrom.

Die Akzeptanz für den Einsatz alternativer Metalllegierungen im Musikinstrumentenbau steigt zunehmend. Dies zeigten auch die Befragungen der Musiker in unseren Musikertests und das Interesse für die Ergebnisse des Projektes bei der Vorstellung auf der Fachtagung „Zukunft Musikinstrumentenbau“ im September 2025 in Markneukirchen.

Da bei allen technischen Arbeiten im Zusammenhang mit Musikinstrumenten das wesentliche wissenschaftlich-technische Risiko zum einen in der teilweise noch fehlenden Akzeptanz der Kunden für den Einsatz neuer Legierungen liegt und zum anderen einige Materialien nicht oder nur mit erheblichem zeitlichem und finanziellem Aufwand ersetzt werden können, besteht ein erhebliches technisches und finanzielles Risiko für solche Forschungsarbeiten. Die Komplexität des Vorhabens führt zu einem nicht unerheblichen Finanzierungsaufwand. Die Finanzierung stellt ein großes Risiko dar. Ohne die Förderung wäre der Antragsteller nicht in der Lage gewesen, das Risiko dieser Entwicklungen zu tragen.

#### Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der direkte Nutzen der Ergebnisse des Projektes liegt in der langfristigen Sicherung der Materialbasis für nickel- und bleifreie Metalllegierung im Musikinstrumentenbau. Zu nennen sind hier die beiden Bereiche Holz- und der Metallblasinstrumentenbau. Aber auch angrenzende Bereiche, wie der Zupf- und Streichinstrumentenbau sind bei einigen Baugruppen (Bundstäbe und Saiten) davon betroffen.

Auch der Bereich der Zubehörteile (Notenständer, Instrumentenständer und Hardware für Schlaginstrumente) partizipiert von den Ergebnissen des Projektes.

Im Projekt konnten alle spanbar zu bearbeitende Bauteile einer Trompete beispielhaft aus neuen alternativen Metalllegierungen hergestellt werden. Somit konnte die generelle Eignung der neuen Alternativlegierungen am Beispiel der Trompete für Metallblasinstrumente nachgewiesen werden.

Durch das weitere einpflegen von Daten in der Materialdatenbank, welche allen Bündnismitgliedern zur Verfügung steht, ist es auch in Zukunft möglich alternative Ersatzmaterialien entweder herzustellen bzw. zu verwenden.

Hiermit sind auch gezielte Auswahlmöglichkeiten für die Instrumentenbauer möglich. Die Datenbasis soll auch in der Zukunft weitergeführt und ständig aktualisiert werden.

#### Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Von der Firma Diehl Brass Solutions Stiftung & Co. KG wurde zwischenzeitlich eine neue bleifreie spanbare Messinglegierung „eZeeBrass“ (CuZn41Mg) vorgestellt. Die Firma Wieland-Werke AG stellt das alternative Material „Wieland-FX9“ (CuMn15Zn15Al1) als nickelfreier Ersatz für Neusilber her. Diese Materialien wurden im Rahmen des Projektes für die Eignung im Musikinstrumentenbau (speziell im Metallblasinstrumentenbau) untersucht. Erste Bearbeitungsversuche zeigten eine grundlegend gute Eignung. Abschließende Untersuchungen zur Bearbeitbarkeit und Anwendung in Form von Baugruppen an Musterinstrumenten bestätigten die positiven Voruntersuchungen.

Darüber hinaus sind keine weiteren Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, die für das Projekt relevant gewesen wären.

#### Die erfolgten und geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse

Während der Projektlaufzeit sind in regelmäßigen Abständen Vorträge zu dem Thema auf Bündnisveranstaltungen erfolgt. In den regelmäßigen Newslettern des Bündnisses wurde über die Ergebnisse berichtet.

Ein umfassender Überblick der Ergebnisse wurde zur Fachtagung „Zukunft Musikinstrumentenbau am 26. und 27. September 2025 in Markneukirchen in Form eines Fachvortrags und in einer Fachausstellung anhand von Mustern und Musterinstrumenten einem breiten Fachpublikum dargestellt. Im Anschluss wurden die Ergebnisse auf der I-Ma-Tech Webseite und in der Presse veröffentlicht.

Nach Projektende werden die Ergebnisse auf der IMAtech Webseite und in der Fachpresse in zusammengefasster Form und weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen zu Projektinhalten veröffentlicht.

Zwota, den 30.01.2026

Dipl.-Ing. (FH) Holger Schiema  
Projektleiter

Literatur:

[1] Ziegenhals, G.: **Subjektive und objektive Beurteilung von Musikinstrumenten. Eine Untersuchung anhand von Fallstudien**

Dissertation TU Dresden 2010; Studentexte zur Sprachkommunikation Band 51  
TUDpress 2010 (ISBN 978-3-941298-71-2)