GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Sachbericht

zum Forschungsvorhaben

„WIR! – i-Ma-Tech – Grundlagen werkstatttauglicher Digitalmesstechnik für akustische und schwingungstechnische Untersuchungen im Musikinstrumentenbau“

Förderkennzeichen: 03WIR0409

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

iMaTech

wir! Wandel durch Innovation in der Region

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Forschungsvorhaben: **03WIR0409** WIR! – i-Ma-Tech - Grundlagen werkstatttauglicher Digitalmesstechnik für akustische und schwingungstechnische Untersuchungen im Musikinstrumentenbau

Teil I: Kurzbericht

Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand

Innovationskraft und Technologiebasis im Musikinstrumentenbau sind vor allem aufgrund vergleichsweise geringer Unternehmensgrößen stark eingeschränkt, da so kein eigenes technisches Entwicklungspersonal finanzierbar erscheint. Verfügbare messtechnische Hilfsmittel zur Unterstützung von Produktion und Entwicklung sind oft nicht ausreichend einsetzbar, da entweder die technischen Kompetenzen fehlen oder die fehlende Anpassung auf die individuellen Bedürfnisse der Instrumentenbauer eine Anwendung zu umständlich gestalten. Am Institut für Musikinstrumentenbau sind viele Labor-Messverfahren vorhanden, welche speziell auf die jeweiligen Musikinstrumente ausgerichtet wurden. Jedoch sind die Mess- und Beurteilungsverfahren nicht mit dem Ziel der Wirtschaftlichkeit (kurze Bearbeitungszeit) entstanden, sondern auf Basis einer flexiblen Anpassung vorhandener Technologien bzw. an am Markt verfügbare Standardgeräte. Dies ist zweifellos sinnvoll beim Einstieg in eine Problematik, gestaltet aber betroffene Messverfahren oft nicht attraktiv für die regelmäßige Nutzung. Die Einsparpotentiale durch die neuen Möglichkeiten der Digitalisierung in Form von eigenen Systemlösungen, welche Mess- und Auswertealgorithmen unter Ausnutzung offener Geräteplattformen zusammenfassen, sind hierbei enorm. Darüber hinaus sollen die Verfahren so gestaltet werden, dass sie in den Werkstätten der Instrumentenbauer einsetzbar sind, ohne umfangreiches zusätzliches Fachwissen oder sonstige Anforderungen erlangen zu müssen.

Das Kernziel des Vorhabens ist die grundlegende Modifikation von umfangreichen akustischen und schwingungstechnischen Labormessverfahren in leicht zu bedienende und werkstatttaugliche Digitalmessverfahren mit weitestgehend autonomen Bewertungsalgorithmen zur Gewähr von Messsicherheiten und der Möglichkeit zur Implementierung in vernetzte Produktionsabläufe. Für Ansätze, die dabei möglichst viele der regionalen Instrumentenbauer unterstützen, sollen schließlich im Projekt die Grundlagen geschaffen werden. Andere ggf. eine Grundlage für weitere Projekte bilden.

Ablauf des Vorhabens

Zur Erreichung der dargelegten Gesamtzielstellung ergaben sich folgende Arbeitsschritte:

- Auf Basis von Konsultationen bei den Musikinstrumentenbauern des Bündnisses wurde ein Umsetzungskonzept erstellt, wie digitale Mess- und Prüftechnik im Musikinstrumentenbau effizient eingesetzt werden können.

- Es wurden werkstatttaugliche Messverfahren entwickelt indem unter Laborbedingungen erprobte Messverfahren modifiziert wurden. Um einfache Messabläufe realisieren zu können, sind die Grundlagen für Mess- und Prüfhardware sowie neue Algorithmen zur Steuerung der Messung und Auswertung entwickelt worden, um möglichst viele Fehlerquellen auszuschließen und digital überwachen zu können.
- Es wurden die Grundlagen für eine spätere Integration der Mess- und Prüfverfahren in den Produktionsablauf entwickelt. Hierbei wurden mögliche digitale Datenschnittstellen ermöglicht, eine leicht verständliche Software-Oberfläche des Prüfverfahrens erstellt und implementiert sowie Peripherie entwickelt.
- Es wurde eine Übersicht aller akustischen und schwingungstechnischen Mess- und Prüfverfahren als Grundlage für spätere Anwendungen im Musikinstrumentenbau erstellt. Auch wurde hierfür der Entwicklungsstand jedes einzelnen Verfahrens hinterlegt.
- Um den Nachweis für die Funktionsweise der Mess- und Prüfverfahren zu dokumentieren und mögliche Einsatzgebiete für den Musikinstrumentenbau aufzuzeigen, wurde beispielhaft für ein repräsentatives Mess-/Prüfverfahren einer Instrumentengruppe ein Demonstrator entwickelt und gebaut.

<u>Wesentliche Ergebnisse</u> waren:

- Übersicht über Potenziale und Bedürfnisse der Instrumentenbauer im Bündnis
- Aufbau eines Funktionsmusters zur Messung der Eingangsimpedanz von Blasinstrumenten mit einer deutlichen Steigerung der Werkstatttauglichkeit ggü. früheren Verfahren
- Aufbau eines in sich geschlossenen Mess- und Bewertungsverfahrens für die Hals- und Stegkonduktanz von Streich- und Zupfinstrumenten mit Aufbau eines Demonstrators für sämtliche Gitarrentypen.
- Entwicklung einer Ansteuerungseinheit von bis zu 6 Schrittmotoren/Lineareinheiten und einem Elektromagneten für vielfältige Automatisierungsprozesse und Umsetzung als Funktionsmuster für Trommelstockmessungen.
- Entwicklung von Hardwarelösungen, welche eine kostengünstige Umsetzung von messtechnischen Verfahren zukünftig ermöglicht
- Aufbau einer Übersicht über alle bekannten Prüfverfahren an Musikinstrumenten

Zwota, den 26.08.2024

IfM – Institut für Musikinstrumentenbau e.V.

Christoph Gilbert
Projektleiter

Klingenthaler Straße 42
08267 Klingenthal, OT Zwota

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Forschungsvorhaben: **03WIR0409** WIR! – i-Ma-Tech - Grundlagen werkstatttauglicher Digitalmesstechnik für akustische und schwingungstechnische Untersuchungen im Musikinstrumentenbau

Teil II: Eingehende Darstellung

Inhalte des Vorhabens

Im ersten Arbeitsschritt wurden alle Firmen des Musikinstrumentenbaus aus dem Bündnis I-Ma-Tech kontaktiert und über das Vorhaben informiert. Das große Interesse einiger führte zu individuellen Konsultationen und Diskussionen rund um technische Möglichkeiten, tatsächlichem Bedarf und grundsätzlichem Potential durch neue werkstatttaugliche Messverfahren im Produktionsprozess. Von unternehmensübergreifenden Workshops musste pandemiebedingt Abstand genommen werden, dennoch kam in Einzelkonsultationen eine umfassende Sammlung potenziell hilfreicher Messverfahren zustande. Dabei kamen erwartungsgemäß auch Problemstellungen zur Diskussion, welche nicht mittels akustischer und schwingungstechnischer Messungen lösbar erscheinen. Im Folgenden sind daher nur die thematisch ins Projekt passenden Verfahren zusammengefasst:

- Vermessung und Optimierung des unbestückten Korpus im Streichinstrumentenbau
- Beseitigung von Wolfstönen (Halsadmittanz-/-konduktanzmessung)
- Bestimmung des klanglichen Einflusses von Bestandteilen im Streichinstrumentenbau
- Eingangsimpedanzmessung von Metallblasinstrumenten mit Mensurkorrekturberechnung
- Messung der tatsächlichen Schallabstrahlung von Metallblasinstrumenten
- Untersuchung von Wandschwingungen im Metallblasinstrumentenbau
- Vermessung von Rohlingen zur Bewertung der Holzqualität
- Automatisierung der Messung des Rückprallfaktors von Drumsticks
- Tastaturkalibrierung von Digitalpianos

Daraufhin wurden für alle diese Messverfahren Recherchen durchgeführt und Anforderungslisten erstellt, welche die zu erwartenden technischen Notwendigkeiten und den Umfang an zusätzlichen wissenschaftlichen Untersuchungen aufzeigen. Darauf aufbauend wurden die Verfahren hinsichtlich ihrer Werkstatttauglichkeit und Realisierbarkeit im Projektumfang bewertet und die geeigneten in einem Umsetzungskonzept genau beschrieben sowie deren Funktionsumfang einzeln priorisiert. Dabei wurden intensiv technische Überschneidungen betrachtet, die einen parallelen Lösungsweg mehrerer Verfahren über einen technischen Ansatz ermöglichen.

Ein von mehreren Unternehmen in der Werkstatt erbetenes Verfahren ist die Eingangsimpedanzmessung für Metallblasinstrumente mit Korrekturfunktion. Hierfür gibt es z.T. sehr konkrete Vorstellungen über den technischen Funktionsumfang, die Vernetzung und die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten vom Entwicklungs- bis zum Produktionsprozess. Dieses Verfahren stellt sowohl technisch als auch softwareseitig aufgrund des gewünschten Funktionsumfanges eine sehr hohe Herausforderung dar, welche im Projekt nicht vollends bearbeitet werden kann, sollte aber aufgrund des hohen Interesses dringend thematisiert werden, da es sehr im Sinne der Projektidee ist und auf die erreichte Grundlage in Folgeprojekten aufgebaut werden kann.

Ein zweites Verfahren, welches im Projekt thematisiert wurde, ist das der Halskonduktanzmessung von Streich- und Zupfinstrumenten. Dieses sollte auch die Stegkonduktanz mit einbeziehen. Auch sollte geprüft werden inwieweit, aufgrund der technischen Parallelität, mittels einer Stegimpedanzmessung Aussagen zum Klangverhalten von bestückten und unbestückten Korpussen möglich ist.

Das dritte Verfahren basiert auf der Rückprallmessung von Trommelstöcken, welches automatisiert wurde. Hintergrund hierbei ist die Notwendigkeit der komplexen Ansteuerung von mehreren Stellmotoren für die Realisierung. Auf diesem Weg wurde auch die Grundlage zur Durchführung einer Tastaturkalibrierung von Klavieren ermöglicht. Für beide Messverfahren ist als Sensorik im ersten Schritt nur ein Kraftaufnehmer und eine präzise Ansteuerung von Lineareinheiten notwendig, sodass hierbei eine weitreichende Überschneidung trotz grundlegend unterschiedlicher Anwendungen vorherrscht.

Auf Basis des Umsetzungskonzeptes war es möglich, jedem konsultierten Unternehmen für eine Anwendung die Grundlagen für ein werkstatttaugliches Messverfahren zu entwickeln. Die Darstellung der weiteren Projektinhalte erfolgt zur leichteren Übersicht auf Basis der drei benannten Verfahren.

Konduktanzmessung an Hals und Steg von Streich- und Zupfinstrumenten

Die Messung der Steg- und Halskonduktanz von Streich- und Zupfinstrumenten ist eine Methodik zur Bewertung der Schwingungsübertragung von der Saite in das Instrument. Jeweils an den Saitenauflagepunkten erfolgt dabei an gleicher Position sowohl die Anregung mittels Shaker als auch die Signalaufnahme mit Impedanzmesskopf. Physikalisch ausgedrückt, wird die Admittanz als Kehrwert der Impedanz beschrieben und als Nachgiebigkeit oder Schwingfreudigkeit eines mechanischen Systems angesehen. Sie ermittelt sich somit aus dem Quotienten von Schnelle durch Kraft. Ihr Realteil, die Konduktanz, zeigt die tatsächlich weitergeleitete Schwingungsenergie auf, der Imaginärteil, die Suszeptanz, hingegen die zurückgeleitete Blindenergie.

Im ersten Schritt wurden systematische Messreihen an Gitarren und Violinen mittels des vorhandenen Labormessaufbaus durchgeführt, mit dem Ziel eine Vereinfachung des

umfangreichen Messablaufes zu erreichen. Begonnen wurde mit Untersuchungen zur Instrumentenlagerung, da der Labormessaufbau eine Schwachstelle hat: Durch eine gegenüber der Spielhaltung veränderte Positionierung des Instrumentes ist dessen Gewicht unnatürlich auf den Auflagepunkten verteilt, was zu einer schwingungstechnischen Abweichung führen kann. Als Referenz zur Bewertung geeigneter Lagerungen wurden hierzu an ausgewählten Messpunkten auf Hals und Steg In-Situ-Messungen mit Konzertgitarre und Violine durchgeführt, wie Abbildung 1 zeigt.

Abbildung 1 - Messung der Konduktanz In-Situ als Referenz

Daraufhin wurde mittels der Labormessvorrichtung mit variierten Unterstützungen und Einspannungen versucht diesen Messwerten möglichst nahe zu kommen. Dabei zeigte sich, dass dies bei der Violine möglich ist, indem unter Verwendung einer Schulterstütze eine Einspannung am Kinnhalter erfolgt, welche das Gewicht vollständig von der Halsstütze nimmt, wie Abbildung 2 rechts zeigt. Die Halsstütze wird nur angelegt, um die Gegenkraft zum Shaker und Impedanzmesskopf aufzubauen. Da die Lagerung des Instrumentes in der Form sehr nahe an der Spielposition ist, wurde keine Notwendigkeit für eine weitere Steigerung gesehen.

Abbildung 2 - Bestehender Labormessaufbau für Konduktanzmessung mit optimierten Lagerungsbedingungen

Anders verhält es sich bei der Gitarre, bei der in dieser liegenden Position unweigerlich ein Teil des Gewichtes auf der Halsstütze liegt. In der klassischen Spielhaltung wird das Instrument diagonal auf dem Schenkel austariert, sodass idealerweise kein Gewicht auf der Greifhand liegt. Dies zeigte sich auch an den mittels Korrelation zur In-Situ-Messung bewerteten Konduktanzwerten, welche insbesondere in den ersten Bünden nennenswerte Abweichungen

offenbaren. Für die Gitarre wurde daher eine neue Apparatur konzipiert, welche die Spielhaltung näher nachbildet. Abbildung 3 zeigt einen Zwischenstand dieser.

Parallel wurden für beide Instrumentengruppen mit der bis dahin besten Lagerungsvariante Untersuchungen zur möglichen Reduzierung der Messpunkte durchgeführt. Ursprünglich ist für diese Untersuchung mindestens eine Messung pro Bund notwendig, aus welchen die notwendigen Informationen gewonnen werden können. Bei präzisen Untersuchungen erscheinen hierbei auch drei Messungen pro Bund sinnvoll. Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass mit einer deutlich reduzierten Anzahl an vermessenen Bünden gearbeitet werden kann, mit nur sehr geringem Informationsverlust. Bei der Gitarre reichte hierzu beispielsweise jeder 3. Bund aus, um in den Ergebnissen eine Korrelation von 0,96 mit der präzisesten Methode zu erreichen. Die für die Auswertung wichtigen Konduktanzwerte der dazwischenliegenden Bünde wurden hierfür mittels Interpolationsrechnung aus den Werten der umliegenden Bünde nachgebildet. Ein noch gröber aufgelöstes Messraster, bei welchem nur jeder 6. Bund analysiert wurde, zeigte hingegen nennenswerten Informationsverlust (Korrelation = 0,83), wobei dies immer noch für orientierende Messungen im Werkstattalltag ausreichend erscheint. Die Auswertealgorithmen wurden so gestaltet, dass eine flexible Anwendung möglich ist.

Abbildung 3 - Funktionsmuster der Messapparatur zur Konduktanzmessung an Gitarren

Zusätzlich zur tonspezifischen Konduktanz wurde anhand weiterer Messreihen überprüft, inwieweit das Messverfahren erweitert werden kann, um aus einer Stegkonduktanzmessung Aussagen zum Klangverhalten zu treffen. Dies konnte im Rahmen einer projektbegleitenden Bachelorarbeit umfangreich untersucht werden. Als Referenz wurden die Merkmale herangezogen, die im IfM entwickelt und genutzt werden, um die im reflexionsarmen Raum aufgenommenen Frequenzkurven zu bewerten. Es zeigte sich, dass dieses Verfahren mit entsprechender Anpassung bei der Gitarre gut funktioniert und somit ein nützliches Werkzeug im Werkstatteinsatz darstellt. Bisher problematisch ist die Bewertung der Violinen. Diese weichen deutlich vom Labormessverfahren ab, sodass dies noch nicht einsetzbar ist. Hier müssen noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Es wurde festgelegt, das Funktionsmuster der Prüfvorrichtung zunächst auf Gitarre auszurichten. Umfangreiche Planungen sahen im Vorfeld keine sinnvolle Verknüpfung von Zupf- und Streichinstrumenten bei der konstruktiven Umsetzung. Selbst innerhalb der Streichinstrumente erscheint dies aufgrund unterschiedlicher Spielpositionen problematisch. Die Vorrichtung ist jedoch innerhalb der Gitarrenfamilie universell einsetzbar konzipiert. So ist die Vermessung von Konzert-, Stahlsaiten-, Elektro- und Bassgitarren mit einem weiten Dimensionsspielraum möglich. Auch wurde die Vorrichtung dahingehend konzipiert, dass sowohl eine klassische Spielhaltung auf dem Oberschenkel als auch eine Lagerung am Gitarrengurt nachgebildet werden kann.

Die Software für das Funktionsmuster wurde mittels LabView erstellt. Da das Prüfverfahren ausgewählt wurde, um den vom Beirat geforderten Demonstrator zu erstellen, ist der zum Projektende finale Stand der Softwareentwicklung dargestellt. Um für den Musikinstrumentenbauer einfach verständlich zu sein, wurde in der obersten Strukturebene der Demonstrations-Software mit einfachem Vokabular klar unterteilt in „Auswahl Messreihe“, „Messung“ und „Auswertung“, zwischen welchen jederzeit gewechselt werden kann. Bei „Auswahl Messreihe“ kann entweder eine neue Messreihe für ein Instrument angelegt werden oder eine bestehende aus der integrierten Datenbank geladen werden. Unter „Messung“ kann zwischen Hals und Steg gewechselt werden.

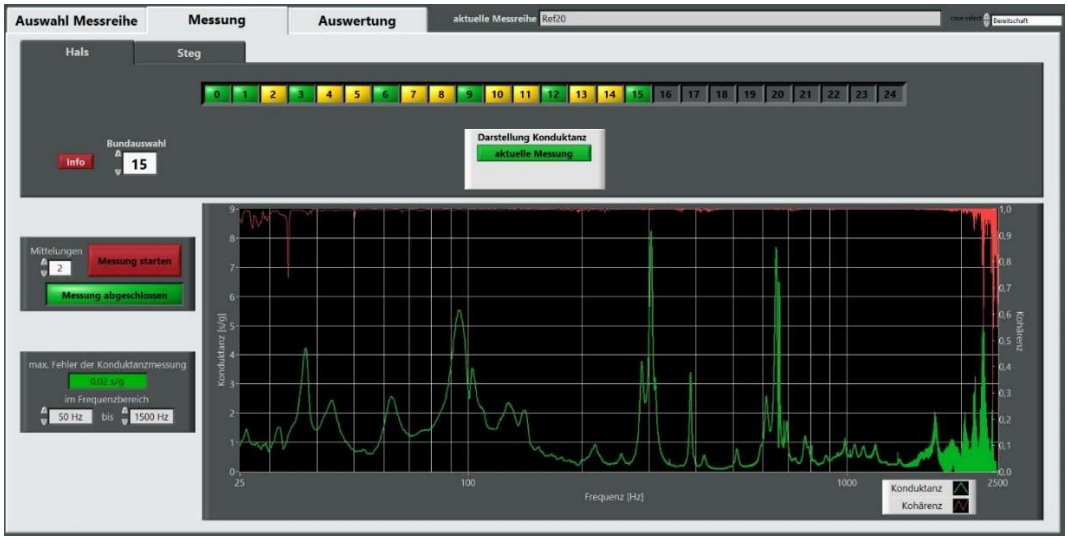

Abbildung 4 - Softwareoberfläche zur Halskonduktanzmessung

In der Halsmessung muss im einfachsten Fall lediglich der Bund ausgewählt werden, welcher als nächstes gemessen wird. Wird dabei ein Bund übersprungen wird dieser automatisch interpoliert und in der Messreihe gelb hinterlegt. Im Gegensatz dazu sind tatsächlich gemessene Bünde grün. Dabei kann jeder Bund jederzeit erneut gemessen werden. Für die Stegmessung wurde noch eine Saitenzuordnung ähnlich einer Kreuzschiene erstellt, mit welcher jeder Messung eine oder mehrere Saiten zugeordnet werden. Dabei gibt es für jede erklärungsbedürftige Funktion einen Info-Button, welcher unmittelbar die notwendigen

Informationen kurz darstellt. Um die Messqualität zu überwachen, wurde auf Basis der Kohärenz der Messreihe ein Parameter entwickelt, welcher als Einzahlwert den maximalen Fehler im relevanten Frequenzbereich darstellt. So ist unterstützt mit einer einfachen Ampelfarbgebung auch für den Laien sofort ersichtlich, ob die Messung fehlerfrei erfolgt ist.

In der Auswertung bestehen große Freiheitsgrade für Fortgeschrittene, zum Beispiel in Form einer freien Saitenkonfiguration für Instrumente bis 12 Saiten, welche jedoch durch entsprechende Vorlagen auch für den Laien keine Hürde darstellen. Auch ist der Einfluss auf die Obertöne oder alternative Stimmungen leicht einsehbar. Die ermittelten tonspezifischen Konduktanzwerte können nun tabellarisch betrachtet und separat exportiert werden oder anschaulich, als 3D-Grafik betrachtet werden, wie beispielhaft Abbildung 5 zeigt.

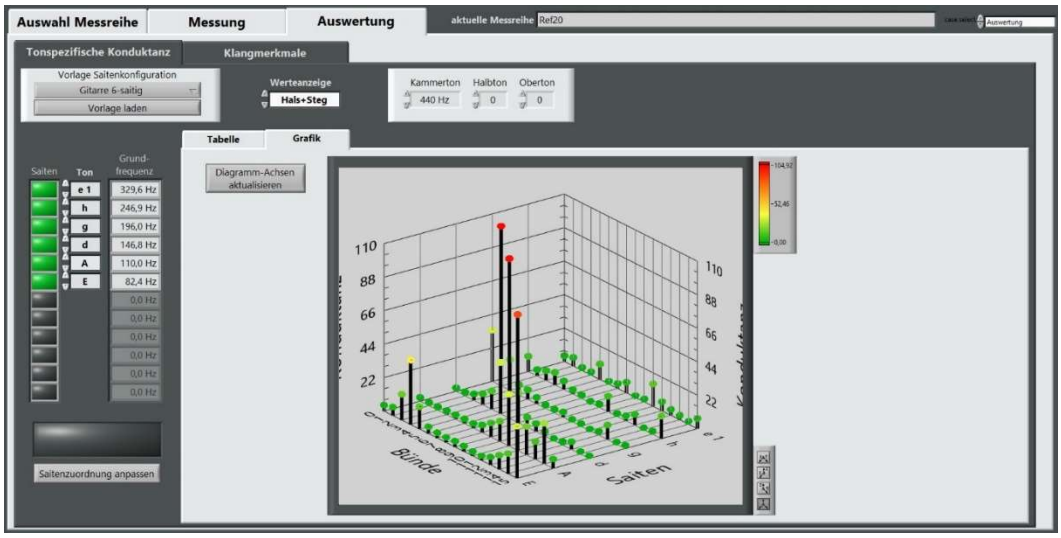

Abbildung 5 - Softwareoberfläche der tonspezifischen Konduktanzauswertung als Grafik

Für die klangliche Bewertung der Instrumente anhand der Stegmessung, steht ein separater Rider bereit, welche das Instrument mit einem weiteren aus der Datenbank anhand der gemittelten Konduktanzkurve sowie den errechneten Klangmerkmalen vergleichen lässt.

Im Gegensatz zum anfangs aufgebauten Funktionsmuster, wurden für den Demonstrator viele Positionierungs- und Einstellelemente überarbeitet, welche bei Testreihen als schlecht bedienbar festgestellt wurden. Es wurden zur besseren Sichtbarkeit Linienlaser integriert, welche die Ausrichtung der Lineareinheit mit der Messeinheit gegenüber dem Instrument abbilden. Fest integriert in den Demonstrator wurde ein Mini-PC mit Peripherie, sodass eine geschlossene Lösung für den Demonstrator erreicht wurde, welche gleichzeitig frei vernetzt werden kann. Bausteine zur Netzwerkübertragung von Messwerten oder Ergebnisprotokollen wurden hierfür entwickelt. Zusätzlich ist die Integration von Schrittmotoren zur Ansteuerung der Lineareinheiten vorbereitet, welche auf der später beschriebenen Steuerung basiert.

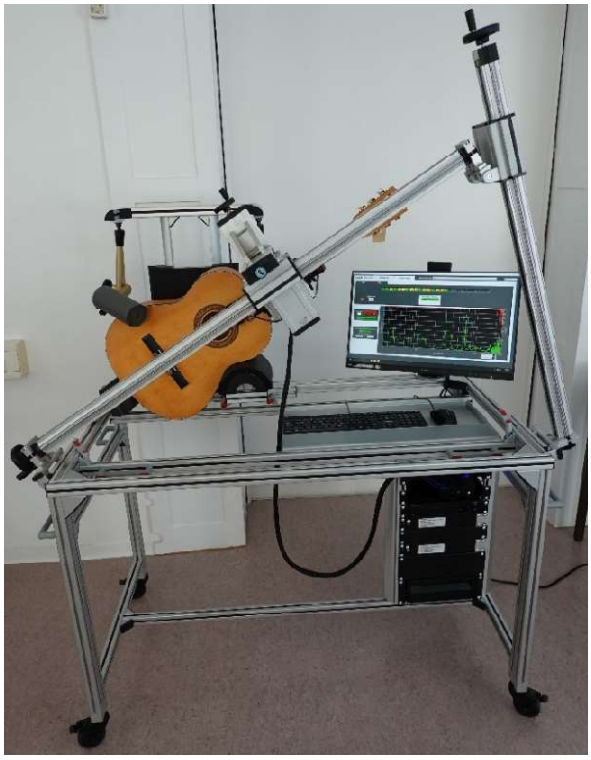

Abbildung 6 - Demonstrator für Konduktanzmessung

Eingangsimpedanzmessung von Metallblasinstrumenten

Ein von mehreren Unternehmen in der Werkstatt erbetenes Verfahren ist das der Eingangsimpedanzmessung für Metallblasinstrumente. Vorhandene Verfahren scheitern an der Störanfälligkeit in geräuschbelasteter Umgebung, sodass ein Werkstatteinsatz nur in isolierten Räumen möglich ist. Daher erschien zu Beginn sinnvoll, folgende drei grundlegende Stellschrauben zu betrachten:

- Hardwareseitig der Messkopf, speziell dessen Ausgangsleistung und Signalqualität,
- Softwareseitige Lösungen, die eine Aufbereitung des Messsignals ermöglichen,
- Akustische Lösungen, die eine Isolierung um das Schallstück aufbauen, um eine Reduzierung des störenden Schalls zu erzielen.

Bei der hardwareseitigen Betrachtung des Messkopfes teilt sich dies wiederum in zwei grundlegende Stellschrauben, den Anregelautsprecher und den für das Verfahren zwingend notwendigen akustischen Widerstand. Eng damit verknüpft zeigten sich jedoch auch die Mikrofone und die Elektronik. In früheren Messaufbauten kam ein Kopfhörerlautsprecher für die akustische Anregung zum Einsatz. Nicht zuletzt durch die eingeführten und zweifelsfrei sinnvollen Beschränkungen zur Lautstärke von Kopfhörern bzw. damit verbundenen Audiogeräten, sind Entwicklungen zu stärkeren Schallwandlern auf dem Markt ausgeblieben. Daher wurden für Vergleichsmessungen neben unterschiedlichen Kopfhörerlautsprechern auch weitere Kleinlautsprecher für Beschallungsanwendungen herangezogen. Nachteil dieser ist,

dass diese meist nicht auf die Tieftonwiedergabe hin optimiert sind, welche jedoch bei der Vermessung von tiefen Blasinstrumenten zwingend notwendig ist. Diesem soll mit angekoppelten Volumina entgegengewirkt werden. Untersucht wurden folgende Modelle:

- SICA 2 H 0,8 SL 8 Ohm (Hochtöner Studio/HiFi)
- Visaton BF 32 S (Breitbandlautsprecher)
- Beyerdynamic System 48 Ohm PRO X – Stellar 45 (Kopfhörer)
- AKG K371 (Kopfhörer)
- AKG K72 (Kopfhörer)
- Beyerdynamic DT48 5 Ohm (Kopfhörer) – bisher verwendet, aber nicht mehr verfügbar

Für die neuen Lautsprecher wurden Adapter konstruiert und mittels 3D-Druck angefertigt, um diese mit dem bisher verwendeten Modell im selben Außengehäuse vergleichen zu können.

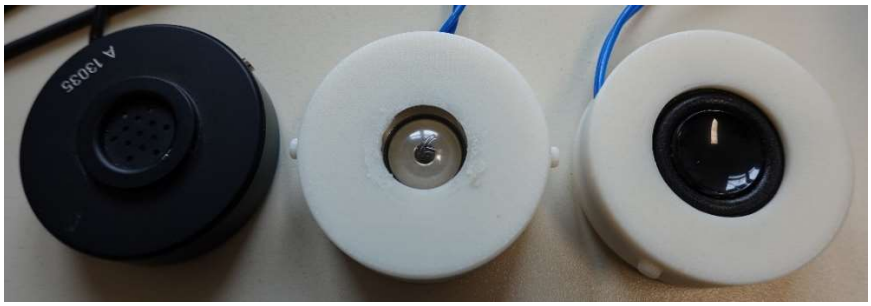

Abbildung 7 - Auswahl getesteter Lautsprechertreiber mit gedruckten Adaptern für gleiche Außenabmessungen wie bisherige Referenz (links)

Es wurden umfangreiche Testreihen durchgeführt und es zeigte sich, dass die für Lautsprecherboxen konzipierten Miniaturlautsprecher im geschlossenen Volumen nicht funktionierten, da deutliche Frequenzeinbrüche vorhanden waren. Diesem konnte auch nicht mit einer Vergrößerung des Volumens hinreichend entgegengewirkt werden. Bei den Kopfhörerlautsprechern zeigte sich schlussendlich, dass der Beyerdynamic Stellar 45 das beste Resultat erbrachte, besonders bei der Tieftonwiedergabe. Auch wenn der bisher verwendete DT48 bezüglich der Linearität noch etwas besser war, kommt dieser nicht in Frage, da er nicht mehr lieferbar ist. Nach Auswahl des Lautsprechers wurde sich dem Lautsprechergehäuse gewidmet. Da es sich beim Bauteil um ein 3D-Druck handelt, war eine freie Formgebung möglich. Durch akustische Untersuchungen wurden verschiedene Gehäusevarianten entwickelt und bewertet. Durch eine gezielte Geometrie konnten Defizite im Frequenzgang des Lautsprechers abgemildert und ein gleichmäßiger Frequenzgang unterstützt werden, was eine wichtige Grundlage für ein qualitativ hochwertiges Messergebnis bildet.

Im Weiteren wurde der akustische Widerstand betrachtet. Zielstellung war ein größerer Schalldurchfluss, um mehr Energie ins Instrument zu transportieren und so die Messung unempfindlicher gegenüber Störeinflüssen weiterzuentwickeln. Ebenfalls sollte die Qualität des Messignals verbessert werden, um qualitativ bessere Aussagen zum Messobjekt zu erlauben, wodurch eine höhere Detailgüte erreicht wird. Das Qualitätsmerkmal eines guten

akustischen Widerstands ist ein gleichmäßiger Pegelabfall über den gesamten relevanten Frequenzbereich von ca. 20 bis 3500 Hz bei gleichzeitig hohem Übertragungspegel. Die frühere Herangehensweise war ein Einschlitzen eines Kunststoffrohres mit einer Sägeblattstärke von 0,1 mm. Da dies, wie bereits bekannt war, nicht ausreichend reproduzierbar war, sollten zuerst andere Umsetzungen untersucht werden. So wurden mittels additiven Testdrucken Untersuchungen durchgeführt, wie Abbildung 8 zeigt. Hier wurden Kapillaren und Schlitze in unterschiedlicher Größe hergestellt und deren Qualität untersucht. Bei der geringsten Größe im Bereich der Schichtdicken waren diese nicht vollständig durchgängig, sodass sie nicht funktionieren können.

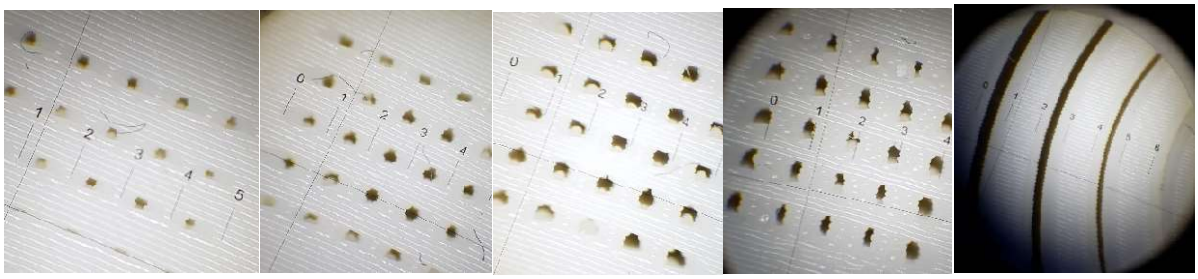

Abbildung 8 – Mikroskopie der Testdrucke für Kapillaren des akustischen Widerstands von 0,2 bis 0,5 mm sowie Schlitze in 0,05 bis 0,3 mm

Für den akustischen Widerstand sind daraufhin mehrere Einsätze konzipiert und gedruckt worden, um dessen Schalldurchfluss zu erhöhen, ohne andere negative Effekte, wie stehende Wellen, zuzulassen. Es wurde sich daraufhin eine Systematik zur Untersuchung überlegt und fortschreitend entwickelt.

Abbildung 9 - Untersuchte akustische Widerstände und Lautsprechergehäuse

Abbildung 9 zeigt neben einigen Versuchen zum Lautsprechergehäusevolumen einen Großteil der akustischen Widerstände. Hierbei wurden unterschiedlichste Dimensionen und Formen untersucht, aber auch die Druckqualität, -auflösung und dessen Reproduzierbarkeit. Als Hauptproblem bei den Versuchsmessreihen zeigte sich die akustische Abdichtung aller

Komponenten untereinander und nach außen hin, sodass für die optimale Widerstandsgeometrie eine einteilige Bauform für den akustischen Widerstand und die Lautsprecheraufnahme entwickelt wurde, welche schlussendlich auch in die finale Form des Funktionsmusters übertragen wurde, wie Abbildung 10 zeigt.

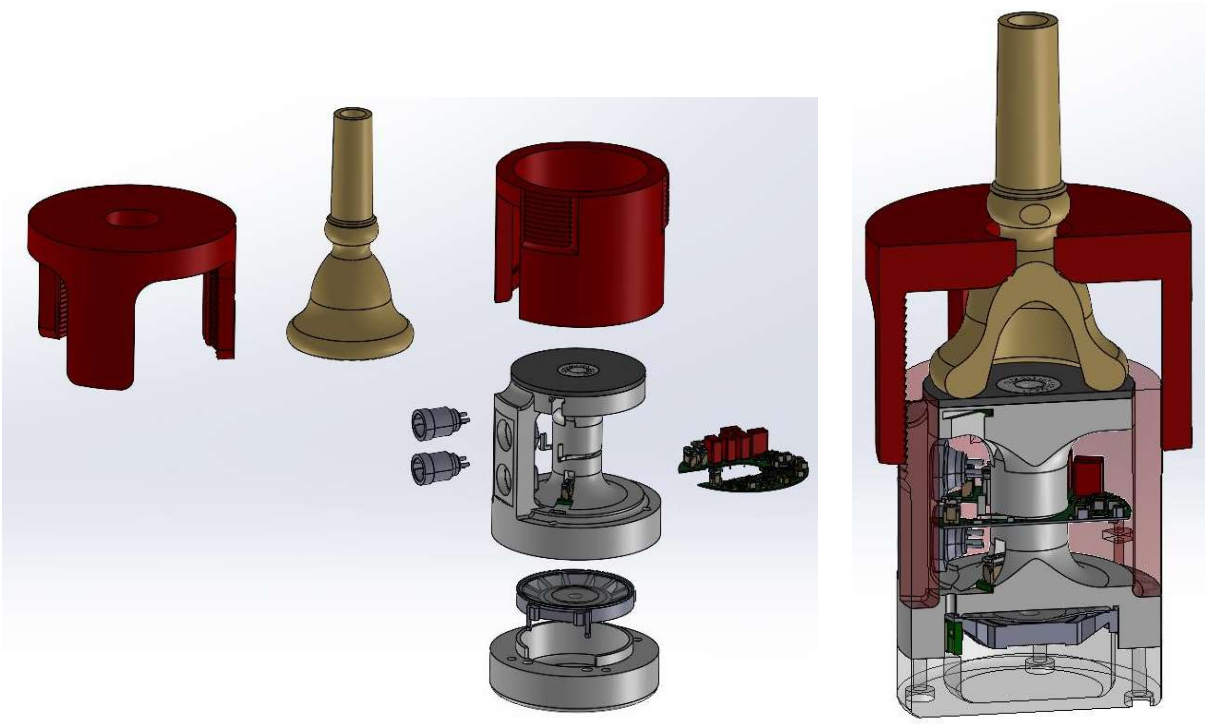

Abbildung 10 - Explosions- und Schnittzeichnung der analogen Version des Impedanzmesskopf-Funktionsmusters

Bei den verwendeten Mikrofonen, von denen eins vor und eins hinter dem akustischen Widerstand notwendig ist, wurden zuerst Versuche mit unterschiedlichen verfügbaren Elektretkapseln durchgeführt. Besonders in der Druckkammer herrschen Schalldrücke von ca. 135 dB, wodurch viele Modelle ungeeignet sind. Letztlich kam hierfür nur eine Kapsel von Sennheiser in Frage, welche jedoch einzeln nicht beschaffbar und als Lavaliermikrofon sehr kostenintensiv ist. Als Alternative kamen MEMS-Mikrofone in Betracht. Diese relativ neue Technologie ermöglicht sehr niedrige Herstellungskosten und damit niedrige Beschaffungskosten für Mikrofone, jedoch sind die verfügbaren Modelle nicht mit hohen Schalldrücken belastbar, vermutlich da es die bisherigen Einsatzzwecke nicht erfordern. Nach umfangreichen Recherchen konnte jedoch ein geeignetes Modell beschafft und erfolgreich getestet werden. Das Infineon IM73A135V01 erreicht die notwendigen 135 dB, die auch der Lautsprechertreiber bei minimalem Headroom noch erzeugen kann, hat einen linearen Frequenzgang und einen guten Signal-Rauschabstand. Der Beschaffungspreis liegt im Vergleich zum Elektretmikrofon bei ca. einem Hundertstel, wodurch ein zukünftiger Kaufpreis für die Musikinstrumentenbauer entsprechend geringer ausfallen kann.

Erst auf Basis all dieser Ergebnisse konnte die elektrische Schaltung schließlich final entwickelt und für das Funktionsmuster passend gestaltet werden. Dabei ist das Platinen-Layout so

aufgebaut worden, dass es sich in den Messkopf integrieren lässt und damit um den akustischen Widerstand herumlegt, wie Abbildung 11 zeigt.

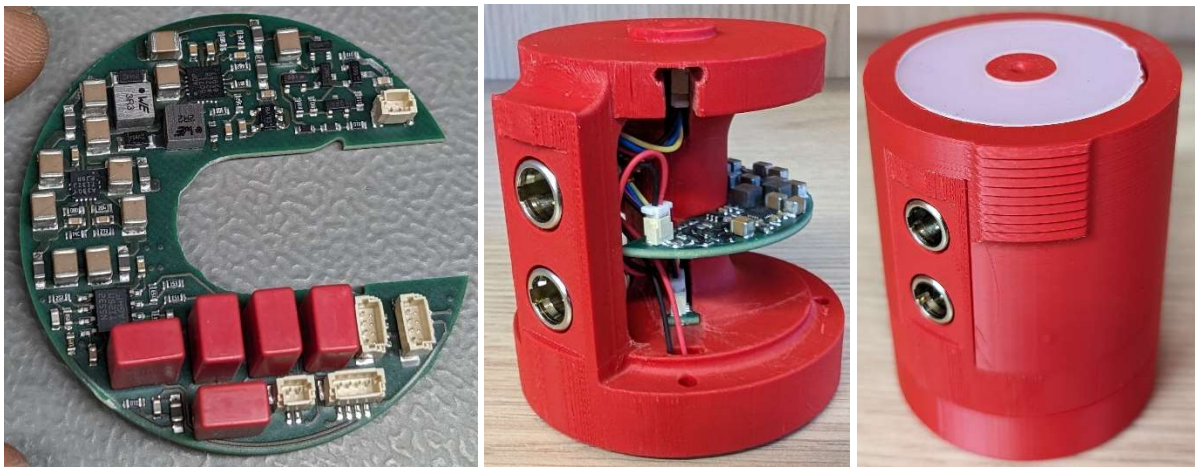

Abbildung 11 - Platine und deren Einbau im analogen Funktionsmuster

Konstruktive Zielstellungen bei der Entwicklung des Messkopfes waren ein geringes Gewicht, eine kompakte Bauform, die Integration des akustischen Widerstandes ins Gesamtgehäuse, eine robuste Bauweise (Werkstatteinsatz), die Integration der gesamten Elektronik, die optimale Anordnung der Mikrofone im Gehäuse, eine geeignete Abdichtung an der Schnittstelle zum Instrument, sowie die Adaptivität für alle Instrumentengruppen von der Trompete bis zur Tuba. Letzte Anforderung war eine Herausforderung hinsichtlich des Verschlusssystems, was einerseits eine große geometrische Variabilität aufweisen muss, aber auch andererseits ein leicht und schnell zu bedienendes Verschlusssystem werden sollte. Im Laufe der Entwicklung konnten alle Zielstellungen nach und nach eingearbeitet werden.

Abbildung 12 - Test des Funktionsmusters an Tuba und Referenzrohr

Im ersten Schritt ist ein Funktionsmuster entstanden, das die Signale analog aufnimmt und ausgibt und so mit bestehenden Messsystem genutzt werden kann. Dieser Schritt war zwingend erforderlich, um das komplexe Gesamtsystem testen zu können und eventuelle Fehlerquellen einzugrenzen. Wie Abbildung 12 zeigt, wurden Tests an unterschiedlichen

Metallblasinstrumenten (Trompete bis Tuba) sowie an Referenzrohren durchgeführt und zeigten bereits eine immense Verbesserung der Signalqualität gegenüber den alten Messköpfen. Um keine zusätzliche Peripherie für den Einsatz im Werkstattumfeld zu benötigen ist eine digitale Schaltung für das Funktionsmuster entwickelt worden, welche mittels einer USB-Verbindung arbeitet, worüber auch die Spannungsversorgung erfolgt. Um die umfangreiche Schaltung (ARM-Prozessor, Arbeitsspeicher, Operationsverstärker, ADC, DAC, Spannungsversorgung, usw.) im kompakten Gehäuse unterzubringen sind zwei gestackte Platinen notwendig, wie Abbildung 13 zeigt.

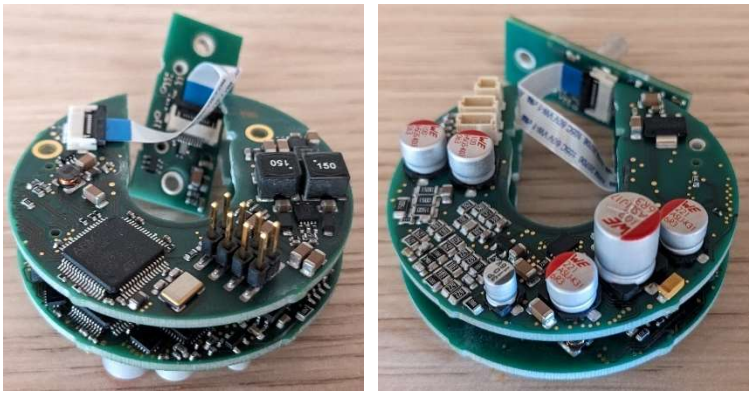

Abbildung 13 - Elektronikplatinen für digitales Messkopf-Funktionsmuster

Neben den zwei kleinen Platinen, welche als Träger für die MEMS-Mikrofone fungieren, kommt bei der digitalen Version noch eine Platine für die USB-Anschlussbuchse hinzu. Neben der Implementierung des Anregesignals im Flash-Speicher, wofür ein spezieller Sweep erstellt wurde, welcher Probleme der FFT minimiert, besteht nun auch die Option, die gesamte FFT-Signalanalyse im Messkopf zu berechnen. Abgesehen von den Anschlüssen unterscheiden sich die analoge und digitale Version äußerlich nicht.

Softwareseitig sind zwei Ansätze verfolgt worden, zum einen eine schrittweise Glättung des Signals, um kleinere Störungen zu beseitigen. Dies führt jedoch zu unvermeidbaren Verfälschung der Endergebnisse, sodass hier nur bedingt Abhilfe geschaffen werden kann. Inwieweit dies mit der hardwareseitig deutlich verbesserten Signalqualität überhaupt noch notwendig ist, wurde noch nicht abschließend geklärt. Zum anderen wurde eine Nachbildung der Impedanzkurven auf Basis von Polynomrechnungen betrachtet, wodurch auch bei relativ starker Störung der untersuchten Peaks eine reproduzierbare Messung möglich ist. Diese Berechnung benötigt jedoch aktuell noch erheblichen Rechenaufwand, wodurch sich ein hoher Anspruch an die Messsoftware ergibt. Eine Implementierung in eine endgültige Messsoftware für das Funktionsmusters ist jedoch vorgesehen.

Die akustische Optimierung des Werkstattumfeldes ist auch in der Konzeption aufgegriffen worden. Die Herausforderung ist hierbei, dass die akustisch wirksame Luftsäule bis aus dem Schallstück des Instruments herausreicht, sodass gewisse physische Abstände nicht unterschritten werden dürfen. Die Abschirmung darf dabei nicht schallhart sein, da sonst

unweigerlich Reflexionen dazu führen, dass das Ergebnis durch Phasenauslöschungen fehlerhaft wird.

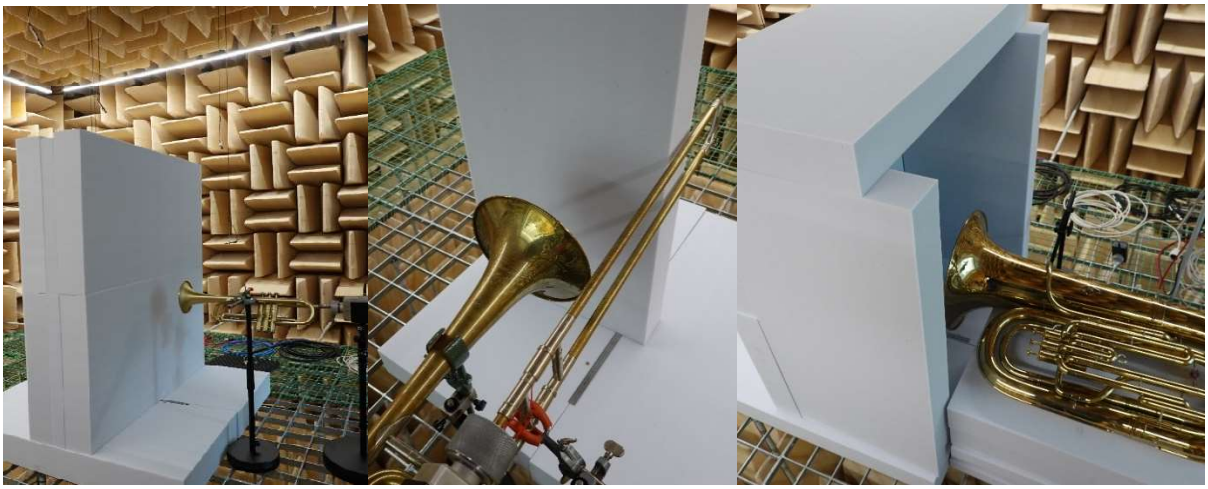

Abbildung 14 – Messaufbau zum Einfluss unterschiedlicher Absorberabstände, - dicken, -positionen anhand von Trompete, Posaune und Tuba

Mittels hochwirksamer Akustikschaumstoffe wurden systematische Messreihen durchgeführt, welche Anordnung zu keiner Beeinflussung der Messergebnisse führt, wie Abbildung 14 und beispielhaft als Ergebnis für eine Ventilstellung der Trompete Abbildung 15 zeigt.

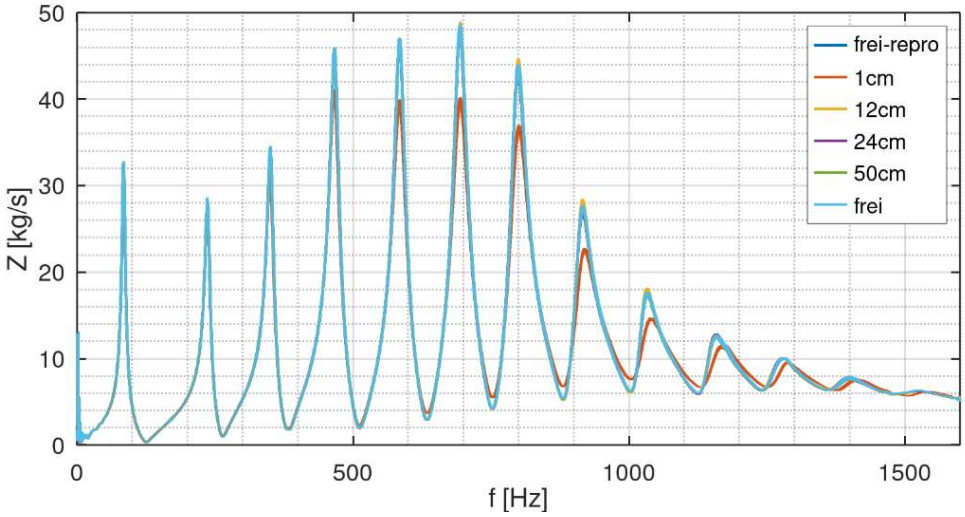

Abbildung 15 - Impedanzverlauf für Trompete bei ausgewählten Absorberabständen

Zur Pauschalisierung lässt sich sagen, dass die jeweiligen Schallstückdurchmesser als Abstand nicht unterschritten werden sollten. Aus den optimalen Bedingungen wurde eine Abschirmung für Trompete entwickelt, welche eine freie Aufstellung im Werkstattraum ermöglicht sowie eine Reduzierung des einfallenden Schalls verursacht.

Abbildung 16 - Entsprechend den Ergebnissen aufgebaute Isolationskammer für Trompete

Leider ist die Abschirmung zu den tieferen Frequenzen hin zu schwach, um als gemeingültige Lösung herhalten zu können, wie anhand von Vergleichsmessungen mit einer Störschallquelle (Abbildung 16) offenbart wurde. Der Mehraufwand bei der Messvorbereitung wäre hiermit in den meisten Fällen nicht gerechtfertigt.

Trommelstock-Anschlagvorrichtung zur Rückprallmessung

Das dritte Verfahren dient der automatisierten Rückprallmessung von Trommelstöcken. Dieses Verfahren untersucht anhand des Kraftverhältnisses eines Doppelschlages, wie stark der Stock zurückfedert. Im Auswertealgorithmus liegt hierbei ein maßgeblicher Schwerpunkt in der Bewertung des Doppelschlages. Da unterschiedliche Einflüsse des Sticks selbst dazu führen können, dass dieser nicht präzise durchgeführt wird, ist es zwingend notwendig fehlerhafte Anschläge zu erkennen und von der Auswertung auszuschließen. Hierfür wird beispielhaft das Zeitintervall zwischen den Einzelschlägen ermittelt. Fällt dies bei einem Schlag aus dem gewählten Toleranzbereich, wird die Messung verworfen. Des Weiteren wird das Kraftspektrum der Einzelschläge miteinander verglichen. Erreichen diese nicht die notwendige Korrelation, führt auch dies zum Ausschluss der Messung. Der Auswertealgorithmus zeigte daher in der manuellen Messdurchführung volle Funktionstüchtigkeit. Der Schwerpunkt lag daraufhin im Aufbau des Funktionsmusters der automatisierten Prüfapparatur.

Am Stickkopf ist für den Kraftsensor eine Vorrichtung entwickelt worden, welche sich im Drehwinkel und damit Aufschlagwinkel manuell einstellen lässt. Dieser zeigte sich bei früheren Untersuchungen als optimal bei ca. 15 Grad, kann jedoch je nach Kopfgeometrie etwas abweichen. Diese Sensoreinheit musste schrittweise überarbeitet werden, da sich bei Kontrollmessungen mittels Impulshammer zeigte, dass ein massiver Klotz mit entsprechender Masse notwendig ist, um ein ausreichend lineares Übertragungsverhalten zu erzeugen, indem Eigenschwingungen der Konstruktion unterbunden werden.

Bereits in der Konzeption zeigte sich die Herausforderung in der Berücksichtigung der Dimensionsvielfalt der relevanten Prüflinge. Es konnte ein Aufbau entwickelt werden, welcher

die notwendige Flexibilität aufweist. Für die Einstelloptionen wurden Lineareinheiten mit Schrittmotor integriert, sodass der vollständige Prüfablauf automatisiert durchgeführt werden kann. Den endgültigen Aufbau des Funktionsmusters zeigt Abbildung 17.

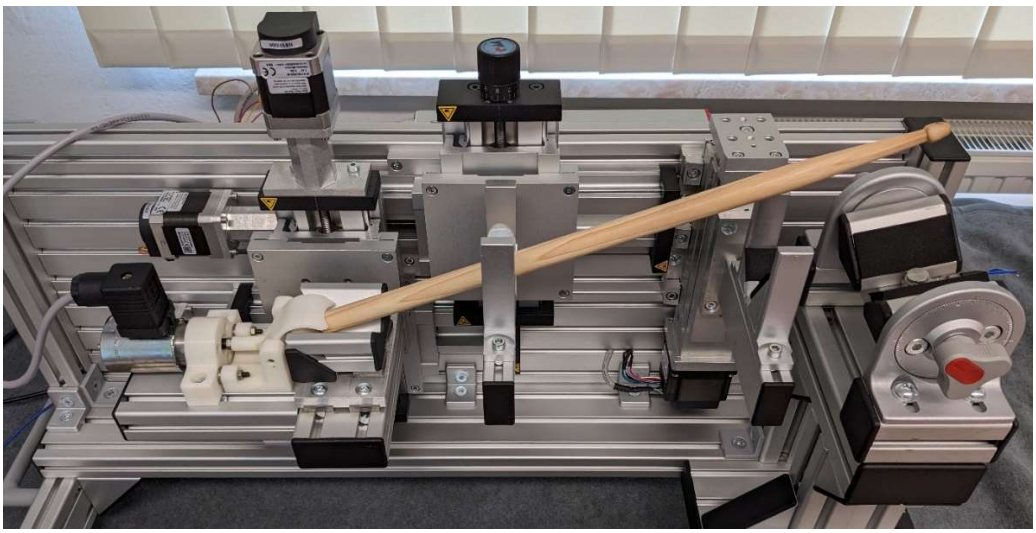

Abbildung 17 - Aufbau des Funktionsmusters für Anschlagvorrichtung

Für die Auflage des Drehpunktes wurden eine halbzylindrische Form aus flüssigem Silikon gegossen, wodurch eine optimale Kombination aus weicher Auflage und guter Haftung des Trommelstocks erreicht wurde. Die Position des Drehpunktes ist horizontal mittels Linear-einheit-Schrittmotor-Kombination elektrisch einstellbar, die vertikale Positionierung wurde vorerst manuell einstellbar belassen, da hier nur minimale Korrekturen bei unterschiedlichen Stickdurchmessern notwendig sind. Eine Elektrifizierung ist aber jederzeit möglich, falls sich die Notwendigkeit zeigt. Am Stockende sind zwei elektrisch einstellbare Lineareinheiten eingebaut, die den Auslösemechanismus präzise positionieren können.

Eine besondere Herausforderung lag in den zyklisch eingesetzten Elementen. Hierfür wurde zum einen eine Auslösevorrichtung mit Elektromagnet am Stockende entwickelt.

Abbildung 18 - Auslösemechanismus der Anschlagvorrichtung

Herausforderungen waren die Abdeckung der Geometrien aller zu prüfenden Trommelstöcke sowie eine ausreichende Dynamik in der Bewegung. Durch Letzteres muss gewährleistet werden, dass der Niederhalter aus dem Bewegungsbereich der Trommelstöcke verschwindet, um die Fallbewegung nicht zu beeinflussen. Durch diese Anforderung eignete sich nur ein

entsprechender Hubmagnet, welcher eine ausreichende Dynamik in der Bewegung ermöglicht. Weiterhin wurde eine spezielle Mechanik konstruiert und mittels 3D-Druck hergestellt, wie Abbildung 18 im geschlossenen und geöffneten Zustand zeigt.

Des Weiteren wurde eine zusätzliche, deutlich schnellere Lineareinheit mit Kugelgewindeantrieb und größerer Gewindesteigung sowie einem stärkeren Schrittmotor eingesetzt, die den Trommelstock nach erfolgtem Doppelschlag sofort abfängt und wieder anhebt, wie Abbildung 19 zeigt. Diese beschleunigt bis zu 15 m/s² und kann eine Geschwindigkeit von 0,6 m/s erreichen.

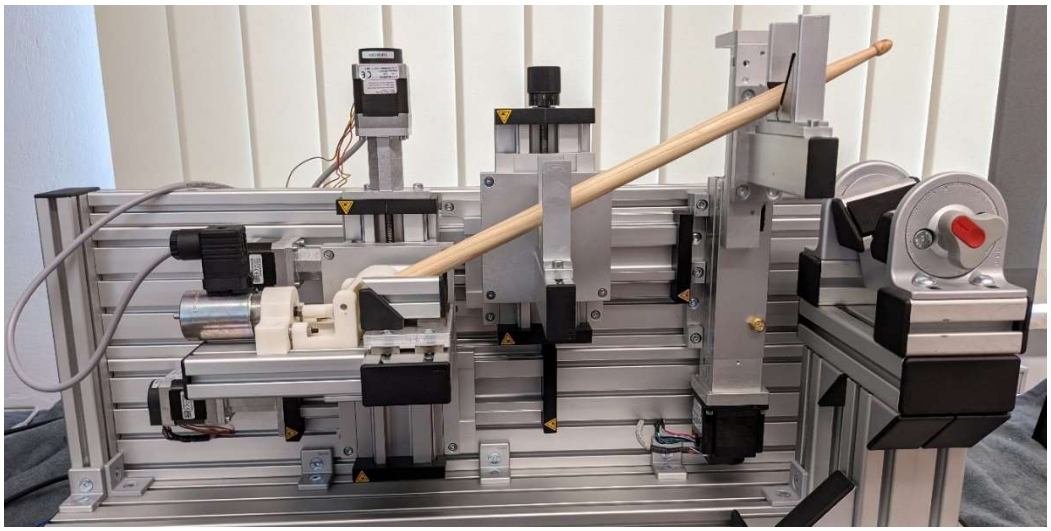

Abbildung 19 - Anschlagvorrichtung mit ausgelenktem Stickheber

Die V-Auflage im Heber wurde bewusst asymmetrisch gestaltet, um eine Drehbewegung vor jedem neuen Anschlag zu erzeugen, da der Stock je nach Ausrichtung des Faserverlaufs unterschiedliche Eigenschaften haben kann. Alternativ hierzu wurde eine aufwändigere Mechanik entwickelt, welche mittels eines zusätzlichen Hebels diese Drehbewegung erzwingt. Jedoch erwies sich die erste Lösung bei den abschließenden Dauertests als ausreichend funktional, sodass diese vorerst installiert bleibt.

Nachdem die Einzelkomponenten auf grundsätzliche Funktionstüchtigkeit überprüft wurden, war noch die Entwicklung der Ansteuerung notwendig. Um im Sinne des Projekts größtmögliche Flexibilität zu erreichen, wurde auf Basis der Schrittmotoren des Herstellers Nanotec eine Musterplatine entwickelt, welche bis zu 6 Motor-Controller-Karten, zum Ansteuern von Schrittmotoren mit jeweils zugehörigem Encoder, aufnehmen kann. Dazu wurde ein Microcontroller vorgesehen, welcher die Kommunikation zwischen Steuer-PC und Controller-Karten übernimmt. Außerdem musste die Steuerelektronik für den Elektromagneten implementiert werden. Abbildung 20 zeigt die Musterplatine, passend gelayoutet für ein Standardgehäuseprofil. Die Frontplatte mit herausgeführten Status-LEDs, USB-, und Netzteil-Anschluss wurde mittels 3D-Druck passend hergestellt.

Die Motor-Controller-Karten sind an den Microcontroller via SPI angebunden. Zur Kommunikation werden CANopen Nachrichten übermittelt, welche das SDO-Protokoll des CANopen-Standards verwenden. Der Microcontroller kann via USB mit dem Steuer-PC verbunden werden, hierbei wird die USB-Geräteklasse CDC verwendet um einen virtuellen Com Port (VCP) zu erzeugen. Dadurch erfolgt die Kommunikation auf Basis einer seriellen Schnittstelle und es sind keine speziellen Treiber notwendig.

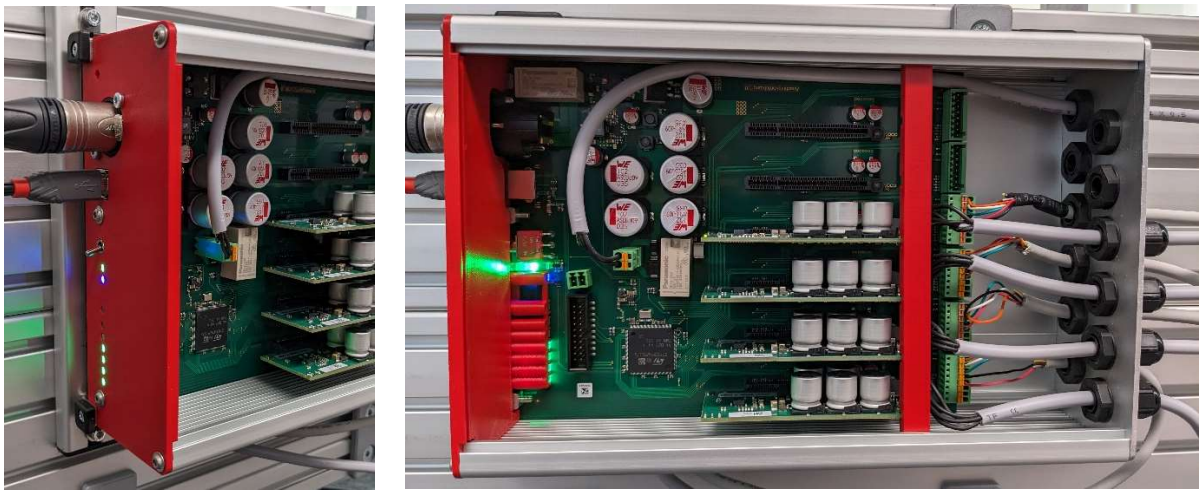

Abbildung 20 - Musterplatine zur Ansteuerung der Schrittmotoren und des Hubmagneten im Gehäuse

Softwareseitig kommt das Echtzeitbetriebssystem FreeRTOS zum Einsatz, somit ist es möglich für jede Controller-Karte einen eigenen Task anzulegen, welcher dann die gesamte Kommunikation für jede Karte übernimmt. Weiterhin wurde ein USB-Empfangs- und ein USB-Sende-Task eingerichtet. Um die Steuerung via PC zu vereinfachen, wurden Commandos implementiert, welche mit einem Befehl das Initialisieren des Motors ermöglichen und mit einem weiteren Befehl die Grundkonfiguration einer Lineareinheit erledigen. Es gibt weitere Befehle zur Nullpositionsfahrt (Homen) und zum Setzen einer neuen Position. Weiterhin wurde ein Plugin für LabView entwickelt, um einen schnellen und einfachen Austausch aller notwendigen Befehle und Daten in Echtzeit zu ermöglichen. Hierdurch ist nun eine vollständige Einbindung in die Prüfsoftware möglich. Durch die Synchronisation von Schrittmotorsteuerung und Messwertaufnahme, welche vom PCB-Kraftaufnehmer über ein ICP-USB-Interface PCB 485B39 erfolgt, ist nun eine effiziente Messzyklussteuerung möglich. Abbildung 21 zeigt die hierfür programmierte Softwareoberfläche. Es lassen sich für jedes Stockmodell individuelle Motorpositionen je Drehpunkt hinterlegen und automatisiert einstellen. Der Prüfzyklus lässt sich auf Millisekunden genau erstellen, wodurch seitens der Vorrichtung eine technische Zykluszeit unter einer Sekunde möglich ist. Praktische Test zeigten jedoch, dass eine 50 bis 100 % höhere Zykluszeit benötigt wird, da Ausschwingvorgänge des Trommelstocks abgewartet werden müssen, um reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen. Durch die Messung des Zeitintervalls zwischen den Doppelschlägen und dessen Übergabe in den Prüfzyklus, konnte jedoch wiederum die individuelle Zykluszeit je Stick optimiert werden. Final wurde ein vollständiger Messzyklus entwickelt, welcher automatisch alle für das Modell hinterlegten

Drehpunkte über die Positionsmotoren einstellt und jeweils eine definierte Messreihe (über z.B. 200 gemittelte Anschläge) durchführt und abspeichert. Auf diese Weise konnten Messreihen zur Ermittlung des positionsabhängigen Rückprallfaktors, welche je nach Drehpunkt- und Mittelungsanzahl eine Zeit von 30 bis 120 Minuten beanspruchen vollautomatisch bei sehr guter Reproduzierbarkeit realisiert werden. Die Vorbereitungszeit zur Erstellung der Motorpositionen für ein neues Trommelstockmodell beträgt dabei je nach Anzahl zu hinterlegender Drehpunkt maximal 15 Minuten.

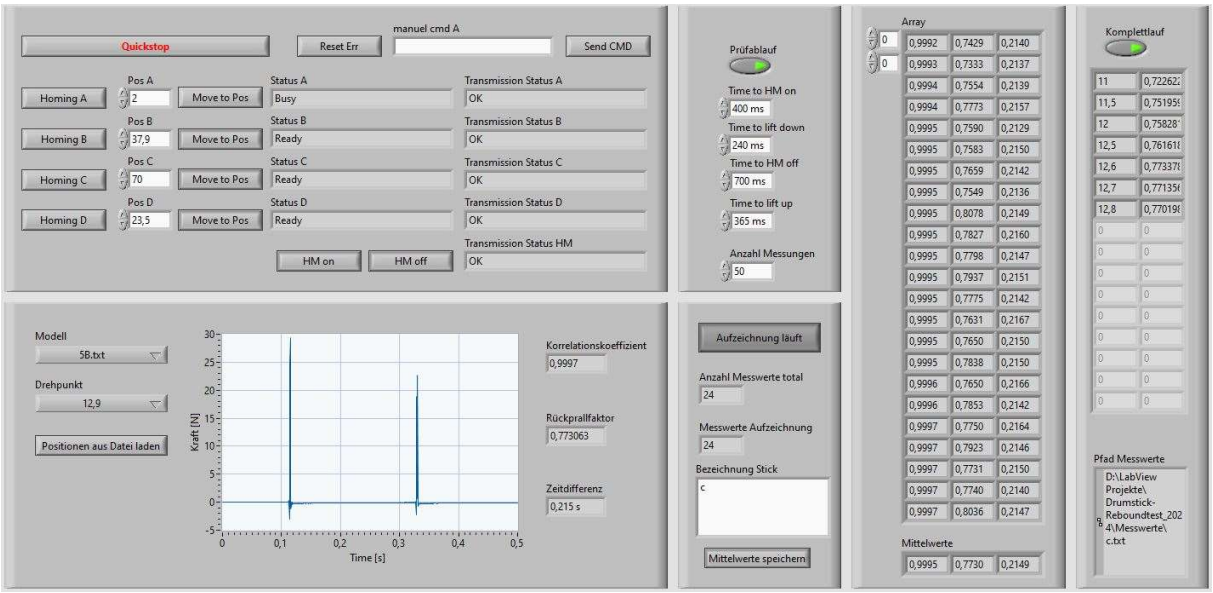

Abbildung 21 - Musterprüfsoftware für Anschlagvorrichtung

Dank der sorgfältigen Planung von Mechanik und Elektronik, verliefen die abschließenden Dauertests nahezu mängelfrei. Das Funktionsmuster soll im WIR!-Projekt DrumstickWood für die zerstörungsfreie Bewertung der Trommelstöcke genutzt und so tiefgründiger getestet und wenn notwendig optimiert werden.

Da die Ansteuerung modular für bis zu 6 Schrittmotoren für Lineareinheiten sowie einem Elektromagneten entwickelt wurde, kann sie für vielfältige Automatisierungsprozesse über das Funktionsmuster für die Trommelstockmessung hinaus genutzt werden. Es stellt damit einen wichtigen Baustein für automatisierte werkstatttaugliche Messverfahren dar. Das Platinenmuster wurde daher auch für den Demonstrator für die Konduktanzmessung vorgesehen, um die Lineareinheiten zu steuern und so Bundpositionen automatisiert anfahren zu können. Die Implementierung ist vollständig vorbereitet, konnte jedoch nicht mehr im Projektzeitraum abgeschlossen werden.

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Insgesamt wurden im Projekt Bundesmittel in Höhe von 310.027,42 € bewilligt. Während der Projektlaufzeit wurden davon 301.232,65 € ausgegeben. Die Gesamtausgaben verteilen sich wie folgt auf die jeweiligen Positionen des Gesamtfinanzierungsplanes:

Beschäftigte E12-E15	178.431,63 €
Beschäftigte E1-E11	42.747,96 €
sonst. Beschäf.-Entgelte	10.342,83 €
Weitere Sachausgaben	46.661,29 €
Dienstreisen	13,50 €
Gegenstände & andere Investitionen	23.035,44 €

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Im Vorhaben konnte exemplarisch anhand von drei Messverfahren das Potenzial für digitale Messverfahren im Werkstatteinsatz aufgezeigt werden. Es wurden die Grundlagen geschaffen nun mit einem kalkulierbaren Aufwand und Risiko neue Prüfvorrichtungen für den Musikinstrumentenbau zu entwickeln. Die geleisteten Projektarbeiten waren zwingend notwendig, um diesen Stand zu erreichen. Es wurde dabei auf Sparsamkeit geachtet. Nichtsdestotrotz beinhalten derart umfangreiche technische Entwicklungen nicht vorhersehbare Probleme und Herausforderungen sowie einen hohen Materialaufwand. Insgesamt können die erreichten Ergebnisse als großer Erfolg betrachtet werden, wovon das I-Ma-Tech-Bündnis profitiert.

Durch die Komplexität des Vorhabens entstand ein nicht unerheblicher Finanzierungsaufwand. Ohne Förderung wäre der Antragsteller nicht in der Lage gewesen das Risiko dieser Entwicklungen zu tragen.

Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit der Ergebnisse

Durch die entwickelten Grundlagen für werkstatttaugliche Messverfahren ist es für das Institut für Musikinstrumentenbau nun erreichbar, den Instrumentenbauern deutlich umfangreichere Prüfverfahren im Werkstattumfeld zu erstellen. Während die Verfahren der Konduktanz- und der Rückprallmessung mit einem kalkulierbaren Aufwand ausentwickelt werden können, ist für die Eingangsimpedanzmessung für Blasinstrumente insbesondere noch eine Softwareerweiterung notwendig, um den von Metallblasinstrumentenmachern geforderten Funktionsumfang hinsichtlich Mensurkorrekturberechnungen zu erreichen. Diese soll in einem bereits beantragten Nachfolgeprojekt entwickelt werden. Zusätzlich ist eine Integration von Holzblasinstrumenten anzustreben.

Auch ist es anzustreben, auf Basis der Prüfverfahren das Dienstleistungsportfolio des IfM zu erweitern, um die Instrumentenbauer bei gelegentlichen Messaufgaben zu unterstützen. Durch den hohen Automatisierungsanteil und den damit verbundenen niedrigeren

Personaleinsatz ist es möglich dies vergleichsweise kostengünstig anzubieten, wodurch alle Bündnispartner profitieren würden.

Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit sind seitens des Zuwendungsempfängers keinerlei Ergebnisse auf diesem Gebiet bei anderen Stellen bekannt geworden.

Die erfolgten und geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse

Auf folgenden I-Ma-Tech-Veranstaltungen wurde bisher über das Vorhaben und ausgewählte Ergebnisse berichtet:

- 9. Projektworkshop am 16.05.23 in Markneukirchen: C. Gilbert: Projektvorstellung Grundlagen werkstatttauglicher Digitalmesstechnik
- 11. Projektworkshop am 28.05.24 in Markneukirchen: A. Licht: Klangliche Bewertung von Saiteninstrumenten auf Basis der Stegkonduktanzmessung

Folgender wissenschaftlicher und frei zugänglicher Beitrag zu Inhalten des Projektes wurde bereits veröffentlicht und im I-Ma-Tech-Newsletter bekanntgegeben:

- C. Gilbert und A. Licht: Entwicklungen zur Konduktanzmessung am Beispiel von Konzertgitarren; Fortschritte der Akustik - DAGA 2024; Hannover; https://www.dega-akustik.de/publikationen/online-proceedings

Darüber hinaus sei auf zwei Studienarbeiten verwiesen, in welchen unterstützende Ergebnisse für das Vorhaben gewonnen wurden:

- A. Licht: Untersuchung und Bewertung des Admittanzverhaltens von Zupf- und Streichinstrumenten sowie des Vergleichs verschieden detaillierter Messmethoden; Praktikumsbericht TU Ilmenau, 2022
- A. Licht: Entwicklung eines Verfahrens zur klanglichen Bewertung von Saiten-instrumenten auf Basis der Stegadmittanzmessung; Bachelorarbeit TU Ilmenau, 2023

Geplant sind weitere Präsentationen innerhalb des I-Ma-Tech-Bündnisses, beispielsweise zur Summer School im September 2024, zur Beiratssitzung, zur Abschlussveranstaltung und auf der I-Ma-Tech-Website. Zusätzlich sind weitere wissenschaftliche Veröffentlichungen zu Projektinhalten vorgesehen.

Zwota, den 26.08.2024

IfM – Institut für Musikinstrumentenbau e.V.
Christoph Gilbert Klingenthaler Straße 42
Projektleiter 08267 Klingenthal, OT Zwota