

Zusammenfassung Projekt „Digitalmesstechnik“

Ausführlicher Projekttitle:	03WIR0409 WIR! – i-Ma-Tech - Grundlagen werkstatttauglicher Digitalmesstechnik für akustische und schwingungstechnische Untersuchungen im Musikinstrumentenbau
Kurztitel/Akronym:	Digitalmesstechnik
Projektlaufzeit:	01.03.2021 - 28.02.2024

Projektbeteiligte Einrichtungen	Ansprechpartner
IfM – Institut für Musikinstrumentenbau e.V.	Christoph Gilbert

Inhaltsverzeichnis

0	Abstract	2
1	Projektziele	2
2	Projekttablauf	3
2.1	Konduktanzmessung an Hals und Steg von Streich- und Zupfinstrumenten	4
2.2	Eingangsimpedanzmessung von Metallblasinstrumenten	6
2.3	Trommelstock-Anschlagvorrichtung zur Rückprallmessung.....	9
3	Projektergebnisse	12
4	Potentielle Nutzung der Projektergebnisse	12

0 Abstract

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 Auswertelgorithmen unter Ausnutzung offener Geräteplattformen zusammenfassen, sind hierbei enorm.

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 Instrumentenbauer unterstützen, sollten schließlich im Projekt die Grundlagen geschaffen werden. Andere ggf. eine Grundlage für weitere Projekte bilden.

Wesentliche Ergebnisse 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

1 Projektziele

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.

2 Projektablauf

Im ersten Arbeitsschritt wurden alle derzeitigen 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. Daraufhin wurden für alle diese Messverfahren Recherchen durchgeführt, Anforderungslisten erstellt und diese darauf aufbauend hinsichtlich ihrer Werkstatttauglichkeit und Realisierbarkeit im Projektumfang bewertet. Im Umsetzungskonzept wurde deren Funktionsumfang einzeln priorisiert, wobei intensiv technische Überschneidungen betrachtet wurden, 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 Funktionsumfangs 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 Korpusen 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. So war es möglich, jedem konsultierten Unternehmen für eine Anwendung die Grundlagen für ein werkstattdaugliches Messverfahren zu entwickeln. Die Darstellung der weiteren Projektinhalte erfolgt zur leichteren Übersicht auf Basis der drei benannten Verfahren.

2.1 Konduktanzmessung an Hals und Steg von Streich- und Zupfinstrumenten

Die Konduktanzmessung ist eine Methodik zur Bewertung der Schwingungsübertragung von der Saite in das Instrument. Jeweils an den Saitenauflegepunkten erfolgt dabei an gleicher Position sowohl die Anregung mittels Shaker als auch die Signalaufnahme mit Impedanzmesskopf.

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. 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 1 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 1 - 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 Bündeln nennenswerte Abweichungen offenbaren. Für die Gitarre wurde daher eine neue Apparatur konzipiert, welche die Spielhaltung näher nachbildet.

Parallel wurden für beide Instrumente mit der bis dahin besten Lagerungsvariante Untersuchungen zur möglichen Reduzierung der Messpunkte erfolgreich durchgeführt. Um dies an dieser Stelle kurz zu halten, soll auf den frei zugänglichen, wissenschaftlichen Beitrag zur DAGA verwiesen sein:

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

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 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 Demonstrator zu erstellen, ist der zum Projektende finale Stand der Softwareentwicklung dargestellt. Die Nutzeroberfläche wurde möglichst klar und einfach strukturiert.

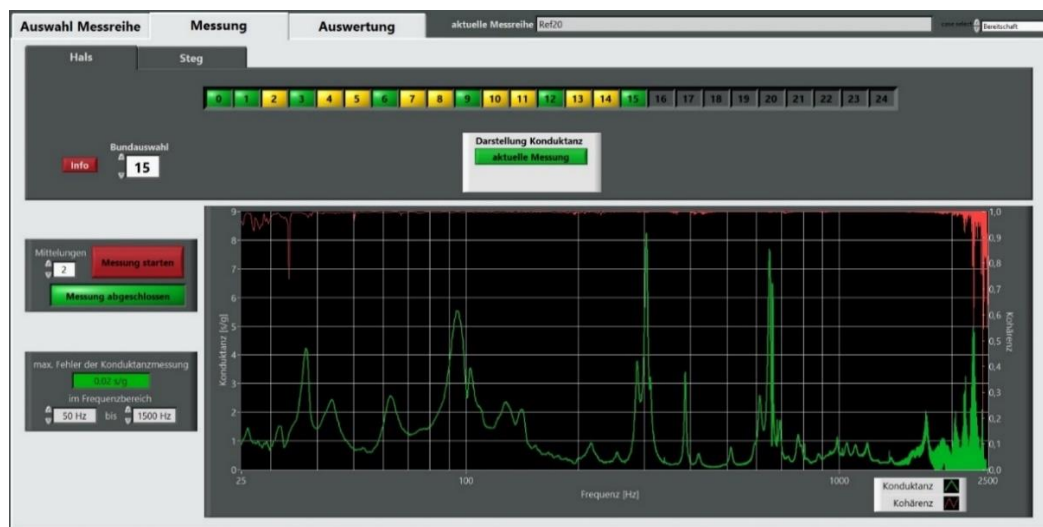


Abbildung 2 - Softwareoberfläche zur Halskonduktanzmessung

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.

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.

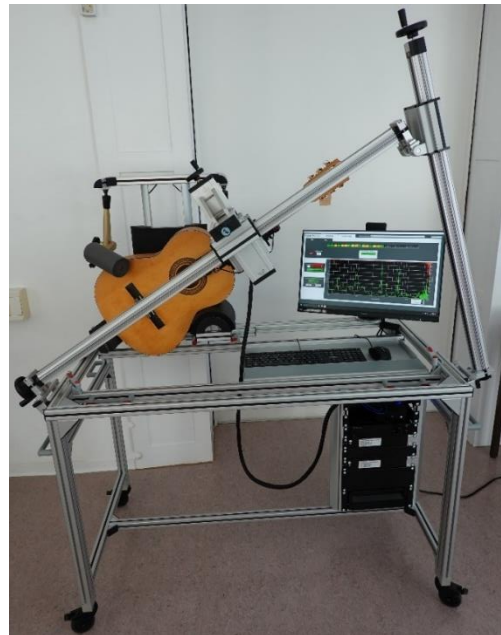


Abbildung 3 - Demonstrator für Konduktanzmessung

2.2 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. Es wurden Vergleichsmessungen mit unterschiedlichen Kopfhörerlautsprechern und weiteren Kleinlautsprechern für Beschallungsanwendungen durchgeführt. Für diese wurden Adapter konstruiert und mittels 3D-Druck angefertigt, um diese mit dem bisher verwendeten Modell im selben Außengehäuse vergleichen zu können. Es wurden umfangreiche Testreihen durchgeführt und es zeigte sich schlussendlich, dass der Beyerdynamic Stellar 45 das beste Resultat erbrachte, besonders bei der Tieftonwiedergabe. 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. Das Qualitätsmerkmal eines guten akustischen Widerstands ist ein gleichmäßiger Pegelabfall über den gesamten relevanten Frequenzbereich bei gleichzeitig hohem Übertragungspegel. Die frühere Herangehensweise war ein Einschlitzen eines Kunststoffrohres mit einer Sägeblattstärke von ca. 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 4 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 auch nicht funktionieren können.

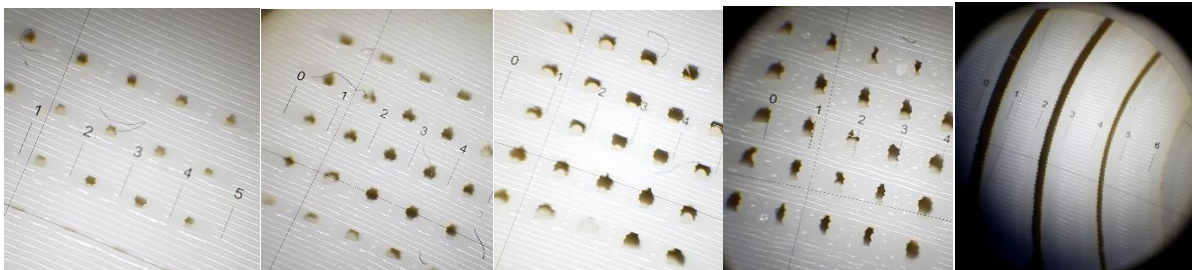


Abbildung 4 – Mikroskopie der Testdrucke für Kapillaren des akustischen Widerstands von 0,2 bis 0,5 mm sowie Schlitze in 0,05 bis 0,3 mm

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 iterativ an schlussendlich ca. 50 untersuchten akustischen Widerständen fortschreitend entwickelt. 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 5 zeigt.



Abbildung 5 - 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 als Lavaliermikrofon sehr kostenintensiv ist. Als Alternative kamen MEMS-Mikrofone in Betracht. Diese relativ neue Technologie ermöglicht sehr niedrige Herstellungskosten für Mikrofone, jedoch sind die verfügbaren Modelle nicht mit hohen Schalldrücken belastbar, vermutlich da es die bisherigen Einsatzzwecke in der Industrie (z.B. in Handys) nicht erfordern. Nach umfangreichen Recherchen konnte jedoch ein geeignetes Modell beschafft und erfolgreich getestet werden. 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 6 zeigt.

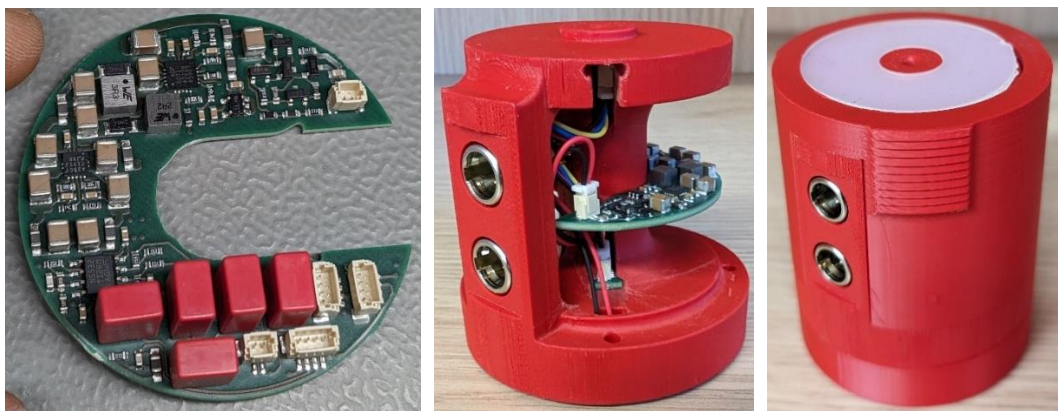


Abbildung 6 - Platine und deren Einbau im analogen Funktionsmuster

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. Im Laufe der Entwicklung konnten alle Zielstellungen nach und nach eingearbeitet werden.

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. Es 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.

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 spätere Messsoftware für das Funktionsmuster 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. Mittels hochwirksamer Akustikschaumstoffe wurden systematische Messreihen durchgeführt, welche Anordnung zu keiner Beeinflussung der Messergebnisse führt, wie Abbildung 7 zeigt.

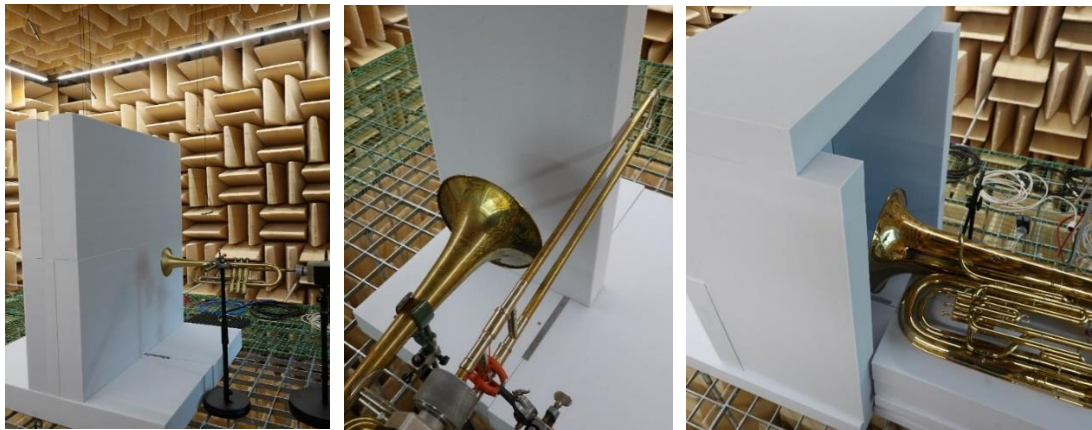


Abbildung 7 – Messaufbau zum Einfluss unterschiedlicher Absorberabstände, -dicken, -positionen anhand von Trompete, Posaune und Tuba

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

2.3 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 zurückprallt. Im Auswertalgorithmus 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. Beispielhaft wird das Kraftspektrum der Einzelschläge miteinander verglichen. Erreichen diese nicht die notwendige Korrelation, führt dies zum Ausschluss der Messung. Der Auswertalgorithmus zeigte daher in der manuellen Messdurchführung volle Funktionsfähigkeit. 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. Diese Sensoreinheit musste schrittweise

überarbeitet werden, da sich bei Kontrollmessungen mittels Impulshammer zeigte, dass eine größere 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 8.

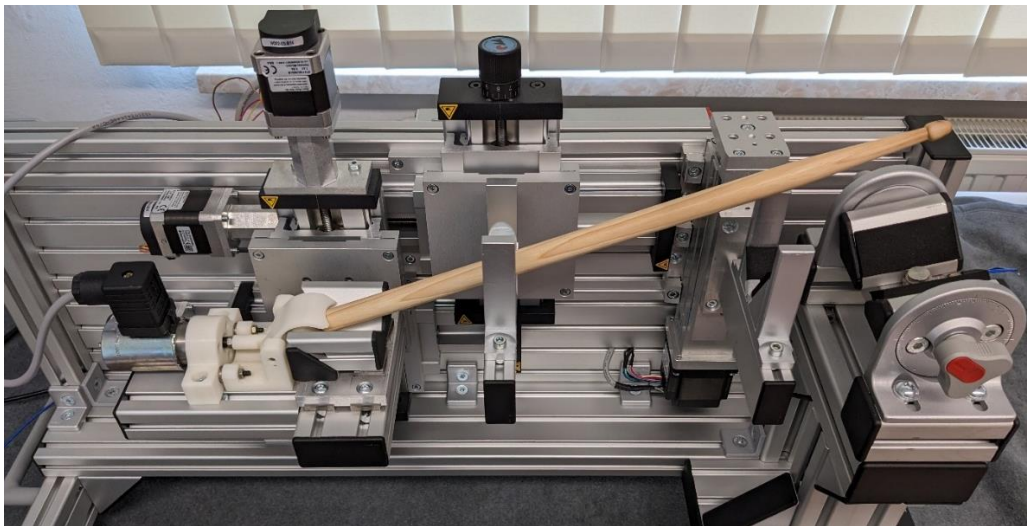


Abbildung 8 - Aufbau des Funktionsmusters für Anschlagvorrichtung

Eine besondere Herausforderung lag in den zyklisch eingesetzten Elementen. Hierfür wurde zum einen eine Auslösevorrichtung mit Elektromagnet am Stockende entwickelt. 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. 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. Diese beschleunigt bis zu 15 m/s^2 und kann eine Geschwindigkeit von $0,6 \text{ m/s}$ erreichen. 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.

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 9 zeigt die Musterplatine, passend gelayoutet für ein Standardgehäuseprofil. Die Frontplatte mit herausgeführten Status-LEDs, USB-, und Netzteil-Anschluss wurde mittels 3D-Druck passend hergestellt.

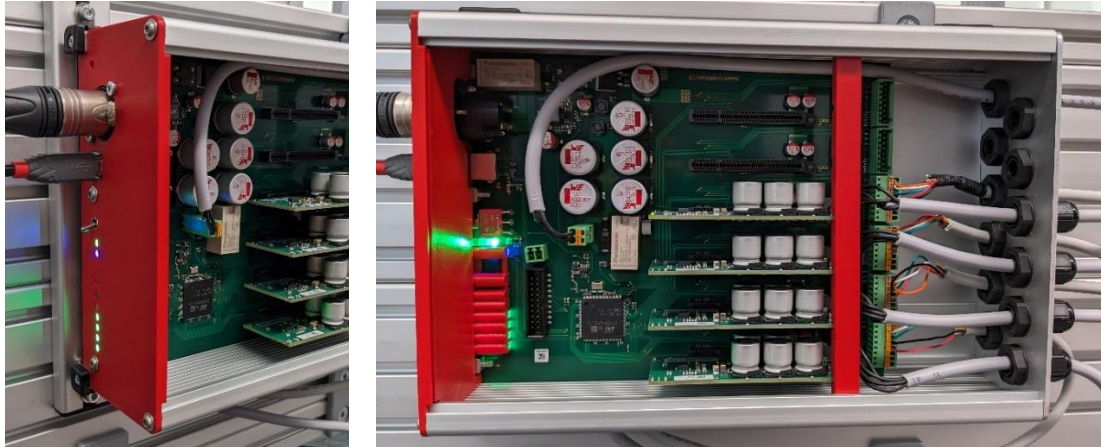


Abbildung 9 - Musterplatine zur Ansteuerung der Schrittmotoren und des Hubmagneten im Gehäuse

Weiterhin wurde ein Plugin für LabView entwickelt, um einen schnellen und einfachen Austausch aller notwendigen Befehle und Daten zwischen Steuerplatine und PC in Echtzeit zu ermöglichen. Hierdurch ist nun eine vollständige Einbindung in die Prüfsoftware und so die Synchronisation von Schrittmotorsteuerung und Messwertaufnahme möglich. Es lassen sich für jedes Stockmodell individuelle Motorpositionen je Drehpunkt hinterlegen und automatisiert einstellen. Der Prüfzyklus lässt sich präzise erstellen, wodurch seitens der Vorrichtung eine technische Zykluszeit unter einer Sekunde möglich ist. Final wurde ein vollständiger Messzyklus entwickelt, welcher automatisch alle für das Modell hinterlegten Drehpunkte über die Positionsmotoren einstellt und jeweils eine definierte Messreihe über zahlreiche 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. Dank der sorgfältigen Planung von Mechanik und Elektronik, verliefen die abschließenden Dauertests nahezu mängelfrei. Das Funktionsmuster wird 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.

3 Projektergebnisse

Das Vorhaben diente der Entwicklung von Grundlagen für werkstattdaugliche Messverfahren, welche auf Basis von digitalen und automatisierten Prüfbläufen möglichst einfach und vielseitig einsetzbar sind. Dies wurde vollumfänglich erreicht. Konkrete Ergebnisse, welche auf Basis neu erworbener wissenschaftlicher Erkenntnisse umgesetzt werden konnten, sind:

- Entwicklung eines umfangreichen Konduktanzmessplatzes und Umsetzung als Demonstrator für Gitarren (Konzert-, Stahlsaiten-, Elektro-, Bass-Gitarre) zur Ermittlung der frequenz-abhängigen Hals- und Stegkonduktanzen, sowie einer klanglichen Bewertung akustischer Instrumente;
- Entwicklung eines Messkopfes zur Eingangsimpedanzmessung von Metallblasinstrumenten und Umsetzung jeweils als Funktionsmuster zur analogen und digitalen Systemintegration;
- Entwicklung einer Steuerelektronik für Schrittmotoren für flexible Automatisierungsprozesse zur Integration in akustische und schwingungstechnische Prüfsoftwarelösungen und exemplarische Umsetzung als Funktionsmuster zur Rückprallmessung von Trommelstöcken;

Durch die Arbeiten wurden im IfM umfangreiche Erfahrungen in den Bereichen Elektronik, Konstruktion, Akustik, Schwingungstechnik, Automation, Digitalisierung, Programmierung und Messtechnik gesammelt und das eigene Know-How in diesen Bereichen ausgebaut. Von diesem Wissenszuwachs profitieren nachfolgende Projekte sehr stark, bzw. konnten auch weitere Forschungsthemen dadurch ermöglicht werden. Insbesondere ist hervorzuheben, dass durch die Automatisierungsprozesse in den Messverfahren deutlich mehr Messungen bei einer gleichzeitig reproduzierbareren Anregung durchgeführt werden können, wodurch auch eine Qualitätssteigerung neuer Ergebnisse möglich ist. Dies zeigte sich beispielsweise stark bei der Rückprallmessung.

4 Potentielle Nutzung der Projektergebnisse

Das genannte Projekt lieferte Informationen über die Bedürfnisse und Notwendigkeiten der Musikinstrumentenbauer hinsichtlich Digitalisierung sowie die Grundlagen zu deren Lösung. Gerade die Möglichkeiten moderner digitaler Mess- und Prüfverfahren sind im traditionellen Musikinstrumentenbau bisher kaum verbreitet. Die neuen Methoden der Messtechnik sowie die modernen Auswerteverfahren ermöglichen dem Musikinstrumentenbauer seine Produkte deutlich effizienter zu entwickeln und zu fertigen. Neue Erkenntnisse ergänzen das traditionelle Wissen und Fachkräfte werden weitergebildet. Die Ergebnisse werden sich zum einen direkt in der Produktentwicklung und Fertigung äußern, zum anderen kann somit die Qualität der Produkte verbessert werden bzw. der hohe Qualitätsanspruch „Made in Germany“ sowie der Produktionsstandort durch den zunehmenden Teil an Automatisierungen sichergestellt werden.