

## Problemstellung/Arbeitsprogramm/Stand von Forschung und Entwicklung im Unternehmen

Musiker und Instrumentenbauer diskutieren häufig darüber, welche Materialien für den Instrumentenbau geeignet sind. Speziell die Wahl des Wandmaterials von Musikblasinstrumenten ist immer wieder Gegenstand von Debatten zwischen Berufsmusikern, Instrumentenbauern und Wissenschaftlern [Ang98] [Ben65] [BM89] [Bor91] [Col71] [SHW97] [Jae02] [Jae04].

Aus diesem Grund ist die Klärung der Frage, inwieweit das Material das Klangverhalten bestimmt und welche Folgen daraus für die Produktion entstehen, von höchster wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedeutung. Im Rahmen dieses Projektes ist geplant, dass sich die Herstellung und Reproduzierbarkeit von Querflötenmundstücken durch Messungen der Einflüsse, die sich aufgrund unterschiedlicher Materialien und Bearbeitungsmethoden ergeben, verbessert und schließlich überprüfen lässt.

Die Querflöte ist ein weit verbreitetes Musikinstrument. Weltweit werden jährlich mehr als 250.000 Instrumente erzeugt. Die Verkaufszahlen weltführender Firmen zeigen, dass die Hochkonjunktur der Querflöte ungebrochen anhält.

Damit die Produktion gesteigert werden kann, wird durch verschiedenste Konstruktionen versucht das Aussehen und den damit verbunden Klang zu ändern. All diese Veränderungen beruhen auf empirischen Arbeiten, die sich seit Theobald Böhms System von 1831 [Boe71] kaum geändert haben. Die folgende Tabelle der Inhouse GmbH der Wirtschaftskammer Österreich zeigt, dass der Großteil der Blasinstrumente importiert wird. Vor allem die führenden Großkonzerne können durch Verbindung von Wissenschaft und Forschung neue Konzepte zur Herstellung, Neugestaltung und Verbesserung von Blasinstrumenten hervorbringen und so qualitativ hochwertigere Instrumente produzieren.

### 9205 -And Blasinstrumente - Gliederung nach HS/KN-Positionen

	Einfuhr in Euro			Ausfuhr in Euro		
	Jän.-Dez. 2003 (E)	Jän.-Dez. 2004 (E)	Verä. in %	Jän.-Dez. 2003 (E)	Jän.-Dez. 2004 (E)	Verä. in %
Blechblasinstrumente	3.962.149	3.740.079	-5,6	780.832	494.197	-36,7
And Blasinstrumente	3.898.151	3.733.005	-4,2	224.891	406.921	80,9
<b>9205 And Blasinstrumente</b>	<b>7.860.300</b>	<b>7.473.084</b>	<b>-4,9</b>	<b>1.005.723</b>	<b>901.118</b>	<b>-10,4</b>

Durch das erwartete Herstellungsverfahren in diesem Impulsprojekt ergeben sich vielseitige Möglichkeiten zur Qualitäts- und Produktionssteigerung. Bisher verwendete Materialien können durch neue Metalllegierungen ersetzt werden. Die Produktion von Querflötenmundstücken wird bei gleichbleibendem Arbeits- und Zeitaufwand gesteigert werden können. Die im Projekt entwickelte Messmethode garantiert gleichbleibende Klangqualität bei Musikblasinstrumenten; somit kann erstmals sichergestellt werden, dass der Künstler als Endverbraucher mit klanglich homogenen Instrumenten ausgestattet wird.

Langfristiges Ziel ist es mit dem entwickelten Verfahren Querflötenmundstücke herzustellen, deren Klangeigenschaften beliebig oft reproduziert werden können. Es wird möglich sein, durch diese innovative Qualitätskontrolle Klangfarben systematisch zu untersuchen. Die dabei gewonnenen Ergebnisse können dem gesamten Querflötenbau zur Qualitätssicherung und für weitere Forschungsaufgaben im akustischen Bereich dienen. Materialien können durch innovativere ersetzt und typische Klangverhalten beliebig oft reproduziert werden.

Das im Impulsprojekt weiter entwickelte Interferometer ist für das Messen von Oberflächenvibrationen an Querflötenmundstücken geeignet. Die Messgenauigkeit befindet sich im Pikometerbereich (1/10 eines Atomdurchmessers) und somit auf diesem Sektor unerreichbar. Dieser könnte überall dort eingesetzt werden, wo Vibrationsmessungen im genannten Bereich, wie zum Beispiel dem Musikinstrumentbau, von Vorteil wären. Durch die kompakte Bauform und der damit verbundenen völlig neu überarbeiteten, preislich erschwinglichen Messtechnik, kann dieses Vibrationsmessgerät von jedem Musikinstrumentenbauer zur Qualitätsverbesserung und Sicherung benutzt werden [Jae02] [Jae04].

Die hier vorgestellte Prüfmethode kann im gesamten Musikinstrumentenbau eingesetzt werden. Qualitätssicherung, Produktionssteigerung und neue wissenschaftliche Erkenntnisse auf dem Gebiet der Musikinstrumentenforschung als Ergebnis dieses Projektes, würden die empirische Arbeit von Instrumentenherstellern stark beeinflussen. Dies würde Veränderungen, wie der Beseitigung sämtlicher bis jetzt vermarkteten Geheimnisse (Klangfarben, Ansprache, Bauweise, Materialwahl), rund um den Blasinstrumentenbau herbeiführen.

Weiters könnten die innovativen Werkzeuge zur Herstellung von reproduzierbaren Querflötenmundstücken auch fertigungstechnische Probleme führender Hersteller beheben.

Durch den Bau von Querflötenmundstücken erzielt die Wiener Flötenwerkstatt derzeit einen Jahresumsatz von EUR 50.000. Durch die Kooperation mit dem Marktführer Sankyo, der ab 2005 den Flötenkorpus für Querflötenmundstücke der Wiener Flötenwerkstatt liefert, wird die Produktion in Zukunft deutlich gesteigert werden. Die Folgekosten für die Vermarktung und Entwicklung passender Querflötenmundstücke für Sankyo-Flöten werden sich mit der beantragten Prüfmethode stark reduzieren. Es könnten sich für den Querflötenbau völlig neue Perspektiven ergeben: die neuentwickelte Fertigungstechnik verspricht eine schnellere, exaktere wie auch qualitativ hochwertigere Herstellung sowie eine wissenschaftlich untermauerte Verbesserung im akustischen Bereich.

Alle für dieses Vorhaben erforderlichen Querflötenkopfstücke werden von der Werner Tomasi GmbH fabriziert. Für Querflötenkopfstücke werden Edelmetalle in legierter Form wie Platin, Gold, und Silber verwendet. Mit den momentan zur Verfügung stehenden Herstellungsverfahren im Instrumentenbau kann die Form und Klangqualität eines Querflötenmundstückes nicht reproduziert werden, da nach dem Zusammenlöten und dem damit verbundenen Erhitzen die Metallstruktur stark verändert wird [Jae02]. Die letzten Arbeitsschritte müssen in der Endfertigung eines Querflötenkopfes wegen der nicht ausgereiften Prozesse in Handarbeit getätigt werden. Dieser nicht kontrollierbare Produktionsschritt verändert sowohl den Klang als auch die äußeren Maße des Querflötenkopfes erheblich.

Von dem hier beantragten Projekt wird erwartet, dass Untersuchungsergebnisse und die daraus resultierenden Herstellungsverfahren einen optimierten Klang bzw. eine schnellere, exaktere sowie reproduzierbare Fertigungstechnik ermöglichen. Diese neuen Produktionsmethoden können unmittelbar wirtschaftlich verwertet werden. Mit derart innovativen Querflötenmundstücken können die spezifischen Klangeigenschaften der oben genannten Edelmetalle wissenschaftlich erarbeitet und belegt werden.

Werner Tomasi, ist Gründer und Besitzer der Wiener Flötenwerkstatt. An der Hochschule für Musik und darstellende Kunst in Wien hat Werner Tomasi bei Frau Prof. Barbara Gisler-Haase Querflöte studiert. Er ist Preisträger der WANAS-Stiftung der Wiener Philharmoniker. Er hat regelmäßig bei Konzerten verschiedener Ensembles und Orchester mitgewirkt. Seit der Gründung der Wiener Flötenwerkstatt im Jahr 1986 (als Tomasi Gisler OHG) wurden folgende Forschungsprojekte erfolgreich abgeschlossen:

- ***Kristalline Metallstrukturen bei Gold und Silber:*** in Zusammenarbeit mit dem Institut für Metallkunde und Werkstoffprüfung Montanuniversität Leoben (ord. Univ.-Prof. DI Dr. mont. Franz Jeglisch).
- ***Entwicklung neuer Dichtelemente für Blasinstrumente:*** gefördert vom FFF der gewerblichen Wirtschaft Daraus entstanden folgende Patente: USA Patent Nr.4 798 122 Österreich-Patent Nr.384318 Österreich-Patent Nr.393752.
- ***Der Bau von Goldquerflötenmundstücken:*** gefördert vom FFF der gewerblichen Wirtschaft.
- ***Analyse sehr kleiner Klangunterschiede bei Querflöten:*** in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wiener Klangstil der Hochschule für Musik und darstellende Kunst Wien (DI Gerald Sonneck).
- ***Interferometrische Messungen an modernen Querflötenmundstücken – Der Einfluss des Materials auf den Klang:*** Dissertation von Michael Jäger in Zusammenarbeit mit dem Institut für Musiktheorie der Universität Mozarteum Salzburg, dem Institut für Experimentalphysik der Universität Innsbruck und dem Institut für Wiener Klangstil der Universität Wien.

Werner Tomasis Weg zum Flötenkopfbau führte nicht über eine Ausbildung bei einem der großen Flötenhersteller, er näherte sich zuerst als Spieler diesem Thema. Die logische Konsequenz für ihn war, mit Hilfe von wissenschaftlicher Forschung zu versuchen, das Geheimnis verschiedener Flötenklänge zu lüften. So lernte er die Auswirkungen der einzelnen Parameter wie die Form von Konus, Mundloch, Mundplatte und Metallbeschaffenheit (speziell Legierung und Metallgefüge) auf die Klangeigenschaften gezielt einzusetzen.

Da er selbst über ausreichend Konzerterfahrung verfügt, ist er sich der spezifischen Ansprüche des Flötisten, technischer sowie musikalischer Natur, genauestens bewusst. Die Konstruktion seiner Querflötenkopfstücke ist das Ergebnis intensiver Forschung: Präzisionsmaschinen, wie Kopierfräsen, Drehmaschinen und Präzisionswerkzeuge für die Edelmetallverarbeitung werden für die Erstellung der Basisform verwendet. Das ständig wachsende wissenschaftliche Interesse im Querflötenmundstückbau hat Werner Tomasi dazu ermutigt, neue Erkenntnisse aufgrund wissenschaftlicher Ergebnisse mit zu beeinflussen. Sein großes Know-how im Querflötenbau hat nicht nur in der Diplomarbeit sowie in der Dissertation von Michael Jäger zu neuen Erkenntnissen geführt, auch in diesem Projekt wird neben der Querflötenmundstückproduktion auch die Ausarbeitung der neuen Produktionsmethode übernehmen.

In 200m<sup>2</sup> großen Geschäftsräumen wird Hobbyspielern und Profimusikern ein reiches Angebot an Quer- und Blockflöten und größte Kompetenz im Querflötenkopfbau geboten. Im angeschlossenen Konzertsaal können die Instrumente unter realistischen Bedingungen getestet werden. Aufgrund der ständigen Kooperation mit Wissenschaft und Technik konnte der Umsatz jährlich gesteigert werden. Die Wiener Flötenwerkstatt ist weit über die nationalen Grenzen bekannt, wie auch Generalimporteur weltführender Marken!

Für das beantragte Projekt bietet der Inhaber Werner Tomasi alle zur Verfügung stehenden Ressourcen für eine bestmögliche Verwirklichung der Projektziele an. Ein Maschinenpark für den Bau von Musikblasinstrumenten, Lager und Poliermöglichkeiten, Konzertsaal für diverse Hörtests mit professionellem Aufnahmeequipment, wie auch Büro und Computerräumlichkeiten werden zu einem positiven Projektabschluss beitragen.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Experimente über die Abhängigkeit des Materials vom Klang an Aerophonen durchgeführt [ANG98/Col71/CT98/Hur99/Kum90/Whi89/WLKB01/WSH02]. Diese Experimente konnten den Einfluss des Wandmaterials auf den Klang nicht feststellen. Dies steht im Widerspruch zu den Erfahrungen der Künstler, die im verwendeten Material den wesentlichen Charakter des Flötenklanges sehen. Die Forschung hat zwar moderne Instrumente und professionelle Künstler miteinbezogen, dabei aber Unterschiede in der Bauweise und die subjektive Verfassung des Künstlers ignoriert.

Die am Institut für Experimentalphysik der Universität Innsbruck in Zusammenarbeit mit der Werner Tomasi GmbH bereits durchgeführten Experimente konnten erstmals Verschiedenheiten im Schwingungsspektrum von Querflötenmundstücken unterschiedlicher Materialien einwandfrei belegen [Jac04].

In den nun folgenden Absätzen werden die aktuellsten wissenschaftlichen Abhandlungen, die sich mit dem Materialaspekt bei Blasinstrumenten auseinandersetzen, kurz erläutert. Weiterführende Literatur findet sich im Anhang.

Die Autoren der Arbeit über Messungen von künstlich angeregten Vibrationen an Metallröhren mittels LDV (Laser Doppler Velocimetry) [WSH02] gehen der Frage nach, ob Wanderschütterungen an Blasinstrumenten, die aus ungleichen Materialien gefertigt sind, für unterschiedliche Klangfarben verantwortlich sind.

Dazu wurde ein Experiment entworfen, das es gestattet, die Schwingung der Oberfläche eines angeregten Blasinstruments zu studieren. Die Anregung erfolgte sowohl mechanisch als auch über einen künstlichen Bläser. Mit diesem Experiment wurde bestätigt, dass sich das LDV-Verfahren zur Bestimmung von Wandvibrationen an Röhren eignet. Es wurden Moden gefunden, die mit theoretisch vorhergesagten gut übereinstimmen. Messungen haben gezeigt, dass mechanische Wandresonanzen auftreten, wenn ein einfaches Blasinstrument, bestehend aus einem Mundstück mit Messingrohr, künstlich angeregt wird. Die Stärke dieser Wandvibrationen ist davon abhängig, wie nah sich die Frequenz des Luftspalts und die der strukturellen Resonanzen sind.

Diese Arbeit konnte aber nicht klären, warum Blasinstrumente aus unterschiedlichen Materialien verschiedene Klangfarben hervorbringen. Mit der alleinigen Messung von Oberflächenerschütterung konnte keine Aussage über die Auswirkung auf den Klang erbracht werden. Außerdem werden Daten durch die nicht reproduzierbare Anregung mittels eines künstlichen Bläasers zusätzlich verfälscht.

Eine weitere Arbeit über das Schwingungsspektrum von Flötenmodellen wurde von C. M. Hurtgen [Hur99] am Institut für Physik an der Duke Universität durchgeführt. Ein Satz von vier Rohr- Modellen wurde wegen der einfachen Herstellungsweise und der niedrigen Kosten aus rostfreien Standardröhren konstruiert. Die Modelle sind jenen echter Querflötenröhren ähnlich und wurden entworfen, um den Effekt der Tonbohrungen auf die Wanderschütterung zu überprüfen.

Auch hier erfolgte die Anregung wie bei Whitehouse [WSH02] mittels eines künstlichen Bläasers. Allerdings wurde das Vibrationsverhalten nur durch Berühren der in Schwingung versetzten Röhre abgetastet. Es wurden zwar elliptische Schwingungsmuster um die Tonlöcher von Flötenröhren gefunden, doch reicht diese Messmethode wiederum nicht aus, um Unterschiede im Klang zwischen Silber und Goldflöten zu finden, da die verschiedenen Röhren nicht reproduzierbar angeregt werden konnten. Überdies wurden die Röhren während der Messung berührt, was wiederum zu einem Verfälschen der Daten führt [WSH02].

Die Diplomarbeit von R. Linortner [WLKB01] umfasst die Resultate einer Umfrage unter 111 in Österreich tätigen QuerflötistInnen zur Frage des Materialeinflusses auf den Klang von Querflöten. Diese beinhaltet auch Ergebnisse eines Experimentes bei dem sieben Querflöten gleichen Modells aus unterschiedlichen Materialien gefertigt und Daten in einem schalltoten Raume aufgezeichnet wurden. Hörtests zeigten, dass unterschiedliche Flöten von den Versuchspersonen nicht unterschieden werden können.

Bei diesem Versuch konnte allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass der Mittelungsprozess aller aufgezeichneten Daten die Unterschiede im dynamischen Klang- und Anschlagverhalten verwischt hat, insbesondere, da z.B. Whitehouse [WSH02] bereits Unterschiede im Schwingungsverhalten verschiedener Materialien festgestellt hat. Zusammenfassend konnten

auch die von R. Linortner durchgeführten Experimente den Zusammenhang zwischen Wandmaterial und Klangfarbe nicht befriedigend klären.

Im beantragten Projekt beschäftigt sich Michael Jaeger [Jae02/Jae04] damit, mit einer physikalisch etwas anderen Methode, Schwingungsmuster von Querflötenmundstücken zu messen. Die Beschreibung dieser wissenschaftlichen Methode ist Gegenstand des nächsten Abschnitts.

## **Projektziel(e)/ Gewählte Methodik**

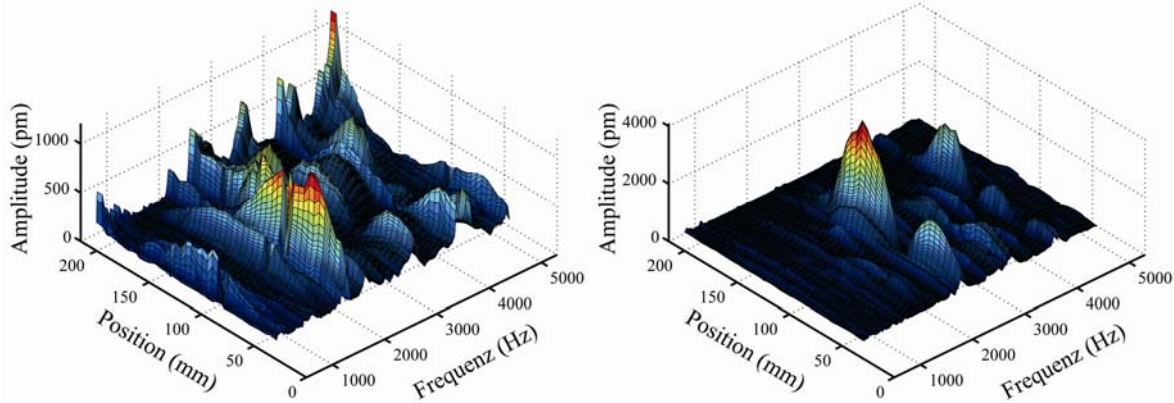
Im Rahmen der Dissertation „Interferometrische Messungen an Querflötenköpfen - Der Einfluss von Wandvibrationen auf den Klang“ von Michael Jäger [Jae04] wurden Querflötenmundstücke mit einem Lautsprecher angeregt und mittels Interferometrie zu einer reproduzierbaren Auswertung gebracht. Es wurde hierbei beachtet, dass die Anregung sowohl berührungslos als auch reproduzierbar vorgenommen werden konnte. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Experimentalphysik der Universität Innsbruck und der Werner Tomasi GmbH entwickelte Michael Jäger im Rahmen seiner Dissertation eine Methode, Vibrationen an Oberflächen zu messen, damit objektive Untersuchungen einen Zusammenhang von Wandmaterial und Flöten-Timbre liefern konnten.

Hierzu wurde ein Michelson-Interferometer aufgebaut. Anstatt des beweglichen Spiegels wurde ein in Schwingung versetzter Querflötenkopf eingesetzt. Das Interferenzsignal der beiden zusammengeführten Strahlen wird über einen Umlenkspiegel auf eine Photodiode gelenkt. Dort wird die auftreffende Lichtintensität in einen Photostrom gewandelt. Das Signal von der Photodiode enthält langsame und schnelle Amplituden. Die schnelle Schwingung wird durch die Oberflächenerstöße der Flöte verursacht, die Aufschluss über das Schwingungsverhalten geben. Das langsame Signal wird durch Temperaturschwankungen und anderen Störfaktoren, wie Luftdruckschwankungen und mechanischen Erschütterungen vom Gebäude, gebildet.

Langsame Veränderungen werden durch einen für dieses Experiment entwickelten Regelkreis gemittelt und durch einen an einem Spiegel befestigten Piezokeramischen Modulator (PZT) ausgeregelt.

Dieser PZT verschiebt die Position des Spiegels, der folglich den Bezugsstrahl des Interferometers verlängert oder verkürzt. Durch diese Methode wird das Signal bei 50 Prozent des Streifenkontrastes beibehalten. Die Spannung  $U_{\text{gleich}}$  am PZT wird über einen PI Regler so geregelt, dass das beobachtete Photodiodensignal  $I_{\text{PD}} = \frac{1}{2} I_{\text{max}}$  ist. Hier ist die Abhängigkeit des PD-Signals von der akustischen Auslenkung des Querflötenkopfes maximal und daher die Empfindlichkeit des Aufbaus optimal. Mit dieser Methode ist es möglich geworden, das Schwingungsspektrum von Querflötenmundstücken verschiedenster Dimensionen und unterschiedlichster Metallbeschaffenheit aufzuzeichnen und auszuwerten. Selbst Schwingungsamplituden von wenigen Picometern können so verlässlich charakterisiert werden.

Obwohl die Stichprobe der untersuchten Querflötenmundstücke mit einer Gesamtzahl von drei Querflötenmundstücken aus Silber, drei Querflötenmundstücken aus Gold und zwei einfachen Rohrmodellen relativ gering blieb, lässt sich aus den Messungen eine generelle Tendenz im Schwingungsverhalten ableiten.



Die oberen beiden Abbildungen stellen die Messung eines Silber- (links) und eines Goldkopfes (rechts) entlang der Rückseite eines Querflötenmundstückes (180° vom Mundloch verschoben) dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass das Spektrum des Goldkopfes im Vergleich zu einem Silberkopf reiner ist und weniger Frequenzen enthält.

Diese gemessenen Schwingungsmuster zeigen, dass ein Unterschied im Vibrationsverhalten zwischen Querflötenmundstücken aus Gold und Silber existiert und mit diesem Experiment klar physikalisch nachgewiesen werden können. Wir wissen nun, dass Oberflächenschwingungen bei bestimmten Frequenzen verstärkt auftreten und wo diese am Flötenkopf zu messen sind. So ergibt sich, für jedes im Querflötenmundstückbau verwendete Material, eine Art „Fingerabdruck“. Mit diesem Fingerabdruck wird es erstmals möglich, die Fertigungsverfahren auf ihre Reproduzierbarkeit hin zu prüfen, und diese gegebenenfalls dahingehend zu verbessern.

Ziel ist auch die Entwicklung neuer Herstellungsverfahren im Querflötenkopfbau, mit denen sichergestellt werden kann, dass Instrumente mit hervorragenden Klangeigenschaften analysiert und reproduziert werden können. Auch die bereits genannten Probleme im wissenschaftlichen Bereich, wie der unterschiedlichen Abmessungen der Querflötenmundstücke und der nicht kontrollierbaren Herstellungsverfahren, könnten stark reduziert werden können.

### Detaillierter Arbeits- und Zeitplan

Phase	Beschreibung	Jahr 1	Jahr 2
Phase I	Planung und Konstruktion der neuen Produktionsmethoden	■	
Phase II	Ausarbeitung der neuen Produktionsmethode		■
Phase III	Fertigung und Testreihe		■
Phase IV	Ausarbeitung der interferometrischen Messmethode		■
Phase V	Weiterentwicklungen (Produktion/Messmethode)		■
Phase VI	Vorbereiten von Publikationen und eventuellen Patentanmeldungen		■

#### Phase I:

Phase I beinhaltet die Planung und Konstruktion der neuen Produktionsmethoden am Computer. Daten von 3D-Vermessungen (Skizze 01) und Laserhohlraummessverfahren werden erfasst. Anschließend werden die Konstruktionszeichnungen auf Cad-Programmen überarbeitet, damit ein schnellstmögliches Ändern jederzeit möglich ist.

Konische Röhren werden im Blasinstrumentenbau in einem Ziehverfahren hergestellt. Der Vorgang des Ziehens von nahtlosen Querflötenröhren kann in [\(Skizze 02\)](#) eingesehen werden. Da bei dieser Verarbeitungsmethode durch das Ziehen per Hand (die Ziehgeschwindigkeit kann nicht genügend kontrolliert werden), unterschiedliche Wandstärken auftreten und somit die Reproduzierbarkeit gleichmäßiger Rohrwandstärken nicht sichergestellt werden kann, muss dieser Arbeitsschritt verbessert werden.

Die Wiener Flötenwerksatt wird eine für dieses Projekt notwendige CNC-HSC Fräse anschaffen. Mit dieser Fräse wird es möglich sein die Werkzeuge für den Flötenkopfbau zu optimieren. Da diese CNC-HSC Fräse über eine hohe Spindelumdrehung (bis zu 54.000 Umdrehungen) verfügt und mit einer Genauigkeit im Nm-Bereich arbeitet, können die bis jetzt in Handarbeit gefertigten Kamine, Röhren und Mundplatten maschinell und damit verbunden auch reproduzierbar hergestellt werden. Der Antragsteller Michael Jäger konnte während seiner Tätigkeit am Institut für Experimentalphysik der Universität Innsbruck große Erfahrung im Bereich CNC-Herstellungsverfahren an Drei- und Fünfachsenfräsmaschinen sammeln. Er wird sowohl die Software für die Flötenkopferstellung (Hyper-Mill, Pro-Engineer) programmieren als auch die Automation dieser CNC-HSC Fräse übernehmen.

### **Phase II:**

Phase II, die sich mit der Ausarbeitung der neuen Produktionsmethode beschäftigen wird, kann in der neuen feinmechanischen Werkstätte des Institutes und den Produktionsräumen der Wiener Flötenwerkstatt realisiert werden. Alle nötigen Bearbeitungsmaschinen für den Querflötenkopfbau stehen in den oben genannten Institutionen zur Verfügung.

Die nötigen Passteile werden in einem so genannten Pressverfahren gefertigt. Dies hat den Vorteil, dass trotz großer Stückzahlen ein Höchstmaß an Präzision sichergestellt werden kann. Vorarbeiten zu Pressapparaturen für den Querflötenkopfbau sind bereits für dieses Forschungsvorhaben getätigt worden und können im Anhang [\(Skizze 03\)](#) eingesehen werden.

Der nächste Schritt ist die Konstruktion eines Presswerkzeuges, mit dem es möglich wird, einen Kamin mit bester Oberflächenbeschaffenheit aus Gold oder Silber zu fertigen. Dieser für den Flötenton maßgeblich verantwortliche Bauteil sollte nach dem Pressverfahren nicht mehr nachbearbeitet werden. Geplant ist eine polierte, gehärtete Oberflächengüte, höchste Passgenauigkeit bzw. eine beliebig oft wiederholbare Produktion. Die komplexe Form eines Querflötenkamins kann in [\(Skizze 04\)](#), in verschiedenen Positionen dargestellt, betrachtet werden.

Da es nicht möglich ist, ein derart kompliziertes Bauteil aus einem Stück Rohmaterial zu pressen, wird ein bereits im Schleuder- bzw. Feingussverfahren hergestelltes Rohteil mit zwei Prozent Aufmass gefertigt. Dieses Rohteil wird dann mit dem bereits beschriebenen Presswerkzeug auf die endgültigen Maße gepresst.

### **Phase III:**

Die Fertigung der Querflötenmundstücke erfolgt in Phase III. Mit den in Phase II entwickelten Werkzeugen werden Querflötenmundstücke aus unterschiedlichsten Materialien hergestellt. Hier ist zu beachten, dass sämtliche Handarbeiten, die den Klang verfälschen können, ausgeschlossen werden. Die neuentwickelten Querflötenmundstücke werden nun einer Testreihe unterzogen. So werden z.B. Spielversuche, Hörtests und eine anschließende Analyse bzw. Befragung durchgeführt. Weiters werden diese Querflötenmundstücke auf ihre Maße von der Firma Zeiss [\(Skizze 01\)](#) mit einem 3D-Messplatz analysiert, damit gewährleistet werden kann, dass trotz unterschiedlicher Materialien wie Gold, Silber oder Neusilber keine Abweichungen auftreten. 3D-Messapparaturen sind sehr teuer, deshalb wird die Firma Zeiss (billigster und bester Anbieter) diesen Arbeitsschritt erledigen.

**Phase IV:**

Der Aufbau der interferometrischen Messmethode wird von den Wissenschaftlern rund um Rainer Blatt gestützt werden. Alle Mitarbeiter am Institut für Experimentalphysik der Universität Innsbruck verfügen über breite Erfahrung in optischen Messverfahren. So wird das bereits bestehende Interferometer des Antragstellers für die Untersuchung hoher Stückzahlen (~100 Stück) an Querflötenmundstücken erweitert. Dieses Interferometer hatte bisher den Nachteil dass nach dem Bewegen des Querflötenkopfes zu einem neuen Messpunkt ein Strahlarm abgelenkt wurde und so das Interferometer wiederholt justiert werden musste. Spiegelhalter mit Picomotoren und 0,7  $\mu$ rad Auflösung der Firma Thorlabs bzw. im Messsystem integrierte Mikrometerlinearmotoren zum exakten Bewegen der Querflötenmundstücke werden bei verkürzten Messzeiten gleichsam die Messgenauigkeit erhöhen. Bei der Anregung über einen Lautsprecher muss beachtet werden, dass der Frequenzgang des Lautsprechers bei den gewählten Frequenzen (bis 5 kHz) berücksichtigt wird, da sonst keine gleichmäßigen Bedingungen möglich und die Ergebnisse verfälscht werden könnten. Damit eine Resonanz gefunden werden kann, muss häufig im Hz-Bereich variiert werden können. Dafür sollten mit dem Interferometer Resonanzen der Querflötenmundstücke gesucht und bei Anregung ausgemessen werden.

Außerdem ist zu klären ob die sehr geringen Vibrationen des Flötenkörpers zur Tonbildung beitragen, oder ob das Wesentliche aus dem strömungsmechanisch generierten Schall kommt.

Mit dem Lautsprecher sollte auch eine Chirp-Anregung (Als Chirp [von engl. chirp = Zwitschern] bezeichnet man in der Signalverarbeitung ein Signal, dessen Frequenz sich zeitlich ändert) getestet und dabei mit dem Interferometer eine Frequenzanalyse im gesamten Audibereich durchgeführt werden.

Das ganze System wird über eine eigens für diese Zwecke programmierte Lab-View-Steuerung geregelt. Somit entsteht ein einfach zu handhabendes System für die Untersuchung von Oberflächenvibrationen an Röhren.

**Phase V:**

Phase V und die damit verbundene Weiterentwicklung der Produktions- und Messmethode wird den wirtschaftlichen wie auch den wissenschaftlichen Teil eng miteinander verknüpfen. Hier wird versucht werden, aus den Ergebnissen der Testreihen die Herstellung mit Hilfe der Messergebnisse (ggf. in Zwischenmessungen) zu kontrollieren und damit zu einem reproduzierbarem Herstellungsergebnis zu kommen. Die Verbindung Messung-Herstellung und Qualitätssicherung mittels optischem Messverfahren ist die Aufgabe in diesem Abschnitt.

Mit der in Phase IV beschriebenen Messmethode wird es nicht nur möglich sein, die Auswirkungen des Materials auf den Farbton von Querflötenmundstücken aus unterschiedlichen Materialien zu erforschen. Vielmehr kann auch das Anwenden neuer Materialien und deren Auswirkungen auf den Klang kontrolliert werden. Deshalb ist es von größter Wichtigkeit diese Art der Produktionsmethode in Verbindung mit der Messmethode bzw. Qualitätssicherung für die Serienreife vorzubereiten.

**Phase 6:**

Das Ergebnis dieser Forschung wird in einschlägigen Zeitschriften publiziert und etwaige Patente angemeldet.

**Ein detaillierter Zeitplan zu den oben beschriebenen Abschnitten ist im Anhang angefügt.**



# Literaturverzeichnis

- [Ang98] J. Angster: „*The Effect of Wall Vibrations on the Timbre of Organ Pipes*“, Proceedings of the 16th. Int. Congress on Acoustics and 135th JASA Meeting (1998) 3, S. 753-754.
- [Ben65] A. H. Benade: „*Analysis of Flute Head Joint*“, The Journal of the Acoustical Society of America (1965) 4, S. 679-691.
- [BM88a] I. Bork und J. Meyer: „*Die Tonerzeugung bei den Flöten*“, Naturwissenschaften. (1988), S. 27-34, PTB-Braunschweig.
- [BM88b] I. Bork und J. Meyer: „*Zum Einfluß der Spieltechnik auf den Klang der Querflöte*“, Tibia (1988) 3, S. 179-184, Moeck, Celle.
- [BM89] I. Bork und J. Meyer: „*Zum Einfluß der Form des Mundloches auf die Tonerzeugung bei den Querflöten*“, Tibia (1989) 5, S. 358-368, Moeck, Celle.
- [Boe71] T. Boehm: „*Die Flöte und das Flötenspiel*“, (1871), Leipzig/Berlin.
- [Bor87] I. Bork: „*Impedanzmessungen an Böhmflöten, Fortschritte der Akustik*“, DAGA '87 (1987), S. 713, DPG-GmbH, Bad Honnef.
- [Bor90] I. Bork: „*Klang und Schallabstrahlung der Querflöte*“, Vortrag bei der 16. Tonmeistertagung in Karlsruhe (1990).
- [Bor91] I. Bork: „*Modalanalyse von Schallfeldern*“, Acoustica 75 (1991), PTB-Braunschweig.
- [CI68] L. Cremer und H. Ising: „*Die selbsterregten Schwingungen von Orgelpfeifen*“, Acustica (1967/1968) 19, S. 143-153.
- [Col68] J. W. Coltman: „*Acoustics of the Flute*“, Physics Today (1968) 11, C. 25-32.
- [Col71] J. W. Coltman: „*Effect of Material on Flute Tone Quality*“, The Journal of the Acoustical Society of America (Februar 1971) 2, S. 520-523.
- [Col76] J. W. Coltman: „*Jet drive mechanisms in edge tones and Organ pipes*“, The Journal of the Acoustical Society of America (1976) 60, S. 725-733.
- [Col79] J. W. Coltman: „*Acoustical analysis of the Boehm flute*“, The Journal of the Acoustical Society of America (1979) 65, S. 499-506.
- [Col85] J. W. Coltman: „*The role of the head-joint in flute intonation*“, Flute Notes (1985), S. 5-7, London.
- [CT98] A. Cocchini und L. Tronchin: „*Material and obsolence on flute quality*“, ICA/ASA 98 (1998), Seattle, USA.
- [Die29] F. Diebners: „*Werkstattbuch für die Praxis*“, Rühle-Diebner Verlag Leipzig, 1929.
- [Dul89] G. Dullat: „*Metallinstrumentenbau*“, Verlag Erwin Bochinsky, 1989.
- [Für0j] A. B. Fürstenau: „*Die Kunst des Flötenspiels in theoretisch -praktischer Beziehung*“, Leipzig, 0.J.

- [Fri87] A. Erischherz: „*Metall Grundkenntnisse*“, Verlag Handwerk und Technik, Hamburg 1987.
- [Fri93] J. Friedrich: „*Tabellenbuch Metall- und Maschinentechnik*“, Ferd. Dümmers Verlag, Bonn 1993.
- [Hal91] D. E. Hall: „*Musikalische Akustik*“, Schott Verlag, Mainz 1991.
- [HRW01] D. Halliday, R. Resnick und J. Walker: „*Fundamentals of Physics*“, John Wiley and Sons, Inc., 2001.
- [Hur99] C. M. Hurtgen: „*Body Vibrational Spectra of Metal Flute Models*“, Senior thesis, Physics Department, Duke University, 1999.
- [Jae02] M. Jaeger: „*Die Querflöte, Geschichte, Fertigungstechnik, Querflötenkopfbau*“, Diplomarbeit Universität Mozarteum Salzburg, 2002.
- [Jae04] M. Jaeger: „*Interferometrische Messungen an modernen Querflötenköpfen – Die Abhängigkeit des verwendeten Materials vom Klang*“, Dissertation, Universität Mozarteum Salzburg, 2004.
- [Kuc95] H. Kuchling: „*Taschenbuch der Physik*“, Fachbuchverlag, Köln 1995.
- [Kum90] P. T. Kumar: „*Flute vibrations by holographic interferometry*“, Applied Optics (1990) 19, S. 2841-2842.
- [Mey91] J. Meyer: „*Flötenklang und Vibrato*“, Kurs-Postille II (1991), S. 25-27.
- [Mey95] J. Meyer: „*Akustik und musikalische Aufführungspraxis*“, Erwin Bochinsky Verlag, Frankfurt am Main, 1995.
- [Qua83] J. J. Quantz: „*Versuch einer Anweisung, die Flöte traversiere zu spielen*“ (Berlin 1752), Bärenreiter, Basel/London/Kassel (Nachdruck), 1983.
- [Ray45] L. Rayleigh: „*The Theory of Sound*“, Macmillan, Reprinted by Dover, New York 2 (1945), S. 376-414.
- [Sch52] H. P. Schmitz: „*Querflöte und Querflötenspiel in Deutschland während des Barockzeitalters*“, Bärenreiter, Kassel, 1952.
- [Sch75] G. Scheck: „*Die Flöte und ihre Musik*“, Schott, Mainz, 1975.
- [SHW97] J. R. Smith, N. Henrich und J. Wolfe: „*The Acoustic Impedance of the Boehm Flute: Standard and some Non-Standard Fingerings*“, Proc. Inst. Acoustics (1997) 19, S. 315-330.
- [Tay94] C. Taylor: „*Exploring Music*“, Institut of Physics Publishing, Bristol, 1994.
- [Tip94] P. A. Tipler: „*Physik, Spektrum Lehrbuch*“, Heidelberg, 1994.
- [Tof79] N. Toff: „*The development of the modern flute*“, University of Illinois Press, 1979.
- [Tro73] J. G. Tromlitz: „*Über die Flöte mit mehreren Klappen; deren Anwendung und Nutzen*“, Reprint der Originalausgabe von 1800, Leipzig 1973.

- [VCF94]** M. P. Verge, R. Caussk, B. Fabre, A. Hirschberg, A. P. J. Wijnands und A. van Steenbergen: „*Jet oscillations and jet drive in recorder-like instruments*“, *Acoustica* (1994) 2, S. 403-419.
- [Whi80]** J. L. White: „*A Spectral Analysis of Tones Produced on Five Flutes Constructed of different Metals*“, University of North Carolina-Greensboro, 1980.
- [Whi89]** J. L. White: „*Flute Tone Quality: Does the Metal Make a Difference?*“, *The Instrumentalist* (1989), S. 72-73.
- [WLKBO1]** G. Widholm, R. Linortner, 11.: Kausel und M. Bertsch: „*Silver, Gold, Platinum-and the sound of the flute*“, Schriftliche Hausarbeit, Institut für Wiener Klangstil, 2001.
- [WSH02]** J. W. Whitehouse, D. B. Sharp und N. D. Harrop: „*The use of Doppler Velocimetry in the measurement of artificially induced wall vibrations in a wind instrument*“, *Proc. of the Institute of Acoustics* (2002) 2, Open University Milton Keynes.