

Angewandte Orgelforschung am Fraunhofer IBP in Stuttgart

Judit Angster

Musikinstrumente sind weltweit tief in den kulturellen Traditionen verwurzelt. Sie sind Teil unseres kulturellen Erbes und ihre Erhaltung und Weiterentwicklung verdient unsere größte Aufmerksamkeit. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) beschäftigt sich seit vielen Jahren mit der Erforschung und Weiterentwicklung europäischer Musikinstrumente, insbesondere der Pfeifenorgel. Die Erhaltung des Klangs, die Unterstützung beim Bau von Instrumenten sowie der Beitrag zur Weiterentwicklung durch die Integration moderner Technologien stehen im Mittelpunkt der gemeinsamen Forschung mit anderen Forschungseinrichtungen und einer Vielzahl von europäischen Orgelbauunternehmen.

In mehr als 25 Jahren wurden 9 gemeinsame europäische und mehrere andere Forschungsprojekte durchgeführt. Einige Beispiele für die Themen sind die Entwicklung von 1) verschiedenen Arten von neuen Windsystemen, Methoden und Softwaretools für die Planung, 2) Entwurfsmethoden, Tools und Softwaretools mit Computersimulationen für Lippen- (Labial) und Zungen- (Lingual) Orgelpfeifen, 3) innovative Jalousien, 4) Entwurfsmethoden und spezielle Werkzeuge zur Anpassung des Instruments an die Raumakustik. Das Forschungsverfahren, die Art der Kommunikation mit Instrumentenbauern, die Ausarbeitung von Projektanträgen, die Koordinierung bzw. Leitung der Teamarbeit bei der Durchführung von Europäischen Forschungsprojekten, die Methode der Demonstration und Verbreitung der Forschungsergebnisse werden auch kurz vorgestellt.

Einführung

Die Forschungsgruppe Musikalische Akustik des Fraunhofer IBP in Stuttgart beschäftigt sich hauptsächlich mit der Orgel. Die Herstellung von Orgeln ist ein traditioneller europäischer Industriesektor, der erhalten bleiben sollte. Dennoch können innovative Entwurfsmethoden und -technologien in der täglichen Praxis angewendet werden, ohne die wertvollen Traditionen zu gefährden. Da Judit Angster aus der bekannten Orgelbauerfamilie Angster stammt, entschied sie sich, den kleinen Orgelbauernfirmen in Europa bei der Überwindung ihrer praktischen Probleme zu helfen. Orgelbauer sind Handwerker, die nicht in der Lage sind ein Instrument als komplexes physikalisches System zu betrachten und

Applied pipe organ research at the Fraunhofer IBP in Stuttgart

Throughout the world, musical instruments are deeply rooted in cultural traditions. They are part of our cultural heritage, and their preservation and further development deserves our utmost attention. For many years, the Fraunhofer Institute for Building Physics IBP has been engaged in the research and development of European musical instruments, the pipe organ in particular. To preserve its sound, to give support in building instruments as well as to contribute to the further development by integrating modern technologies are the focus of the joint research with other research institutions and a multitude of European organ building enterprises. In 25 years 9 common European and several other research projects were carried out. Some examples of the topics will be mentioned like development of 1) different kinds of new wind systems, methods and software tools for the design, 2) design methods, tools and software applying computer simulations for flue and reed organ pipes, 3) innovative swell shutters, 4) design methods and comprehensive tools for matching the instrument to the acoustics of the room. Also the procedure of research, way of communication with instrument manufacturers, the preparation of project proposals, the coordination and leadership of teamwork in the implementation of European research works, the method of demonstration and dissemination of research results will be briefly presented.

zu behandeln, um besondere Probleme zu überwinden. Hauptziel der Forschungs- und Entwicklungsarbeit am IBP war es daher, angewandte Forschung zu betreiben, damit die Ergebnisse direkt in der Praxis genutzt werden können. Dennoch musste auch Grundlagenforschung betrieben werden, um sich dann auf die Anwendung konzentrieren zu können. Diese Veröffentlichung basiert teilweise auf dem Plenarvortrag am „International Symposium on Musical Acoustics“ in Detmold, 2019 [1].

Die Orgelbaufirma Angster

Die Orgelbaufirma Angster wurde im Jahr 1867 von Josef Angster (Urgroßvater von Judit) gegründet [2, 3]. Sie wurde später von Emil Angster (Großvater)



Abb. 1: links: Bild der Orgel- und Harmoniumbauwerkstätte Josef Angster und Sohn (Briefkopf); rechts: Angster-Orgel in der Basilika zu Pécs (Fünfkirchen) – Opus 100, 46 Register, 3 Manuale (1889).

und dann von Josef Angster Junior (Vater) übernommen. In den besten Zeiten arbeitete die Firma „Josef Angster und Sohn“ mit 120 Mitarbeitern. Sie war die größte Orgelbau firma in der Österreichisch-Ungarischen Monarchie (Briefkopf) und später in Ungarn (Abbildung 1). In acht Jahrzehnten wurden in der Firma 1.300 Orgeln und 3.600 Harmonien gebaut [4]. Die Orgelfabrik wurde Ende 1949 aus politischen Gründen verstaatlicht, ihre Geschäftsführer wurden verurteilt und die Fabrik wurde geschlossen.

Art der Kommunikation mit Instrumentenbauern

Die erste Herausforderung bei der Durchführung eines Forschungsprojektes in Zusammenarbeit mit Instrumentenbauern ist die „Übersetzung“ der praktischen Probleme in die „Sprache“ der wissenschaftlichen Forschung. Die Instrumentenbauer erklären ihre Probleme aus der Sicht der praktischen Arbeit. Akustische Phänomene werden durch künstlerische Ausdrucksformen beschrieben. Die Fragen müssen auf eine spezielle wissenschaftliche Weise formuliert werden, damit die Antworten auf die aufgeworfenen Fragen durch wissenschaftliche Forschung gegeben werden können. Dies ist immer eine ziemlich schwierige Aufgabe, die in einem Projektantrag zu realisieren ist. Darüber hinaus muss man bei der Durchführung der Arbeiten vorsichtig sein, damit die Instrumentenbauer-Partner verstehen können, wie Forschung betrieben werden muss. Andernfalls verlieren die Projektpartner – die in der Regel die Arbeit unterstützen und Teil des Projektes sind – den Sinn an der Teilnahme. Im Allgemeinen ist es „einfach“, physikalische Probleme zu lösen, z. B. durch die Lösung von Differenzialgleichungen. Dennoch kann man für einen Instrumentenbauer nie über solche theoretischen Lösungen berichten. Daher ist der nächste Schritt die Übersetzung der Forschungsergebnisse in die Sprache der Handwerker. Bei Meetings waren die Orgelbauer erstaunt, wie einfach und verständlich Physik sein kann. So ist es gelungen, mehrere Forschungs-

projekte mit zahlreichen europäischen Orgelbauunternehmen durchzuführen [5].

Ein Nachteil bringen solche anwendungsorientierte Forschungsprojekte mit sich: Die anwendbaren Ergebnisse sind Eigentum der Unternehmen und dürfen daher erst nach mehreren Jahren nach Abschluss der Arbeiten veröffentlicht werden. Aus diesem Grund ist es geplant, die wichtigsten Ergebnisse früherer vertraulicher europäischer Projekte in einem Buch zusammenzufassen. Dennoch wurde die Verbreitung des Wissens so schnell wie möglich in Form von Workshops für Orgelbauunternehmen durchgeführt. Diese Workshops waren international die einzige Möglichkeit für Orgelbauer, sich über die Akustik der Orgel zu informieren und sich in die Anwendung von Forschungsergebnissen, Entwurfsmethoden und Software einweisen zu lassen [6].

Der EU-Projektantrag

Die Anträge wurden meistens in den EU-Programmen gestellt, die die KMU (Klein- und Mittelständische Unternehmen) unterstützten (z. B. EU CRAFT, Research for SMEs – solche Programme stehen zurzeit bei der EU nicht mehr zur Verfügung). Die Ausarbeitung eines Antrags, die immer vom IBP entworfen wurden, hat meistens mehrere Monate gedauert, wobei auch viele Besprechungen mit den werdenden Partnern geführt wurden. Mit der investierten Arbeit und dem Zeitaufwand hätte ein Fachbuch geschrieben werden können. Die Wahrscheinlichkeit, um ein solches Forschungsprojekt bekommen zu können, betrug oft etwa 7%. Für die Unterstützung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in der Orgelbranche wurden keine anderen z. B. nationalen Möglichkeiten in Aussicht gestellt.

In den ausführlichen Projektanträgen mussten die Themen und die Aufgaben detailliert ausgearbeitet werden, die Messtechniken, die Arbeitsmethoden und die, für die Forschung benötigten Orgelteile, bzw. -modelle im Voraus bestimmt werden. In den einzelnen europäischen Projekten haben 11 bis 15

Partner aus 8 bis 10 Ländern zusammengearbeitet. Diese Europäischen Forschungsprojekte waren von Natur aus so aufgestellt, dass sie nur in sehr gut organisierter Teamarbeit durchgeführt werden konnten. Das größte Forschungsteam befand sich immer am Fraunhofer IBP in Stuttgart, jedoch gehörten auch Wissenschaftler anderer Institute/Universitäten mit verschiedenen Fachgebieten aus anderen europäischen Ländern dazu. Sobald die für mehrere Jahre vertraulichen Ergebnisse veröffentlicht werden durften, wurden sie im Allgemeinen auch im Team publiziert.

Beispiele für Forschungsthemen

Einige Forschungsthemen werden nachfolgend beispielhaft erwähnt, um damit zu zeigen, wie die praktischen Probleme angegangen und in die Forschung umgesetzt werden, um am Ende von den Instrumentenbauern anwendbare Ergebnisse zu erzielen.

Dimensionierung von Lippenorgelpfeifen

Im Orgelbau ist die Pfeifendimensionierung ein komplizierter Prozess. Alle geometrischen Abmessungen einer Lippen- (Labial)pfeife, wie Durchmesser, Kernspaltenbreite, Aufschnitt usw. (Abbildung 2), müssen so bestimmt werden, dass ihr Klang den

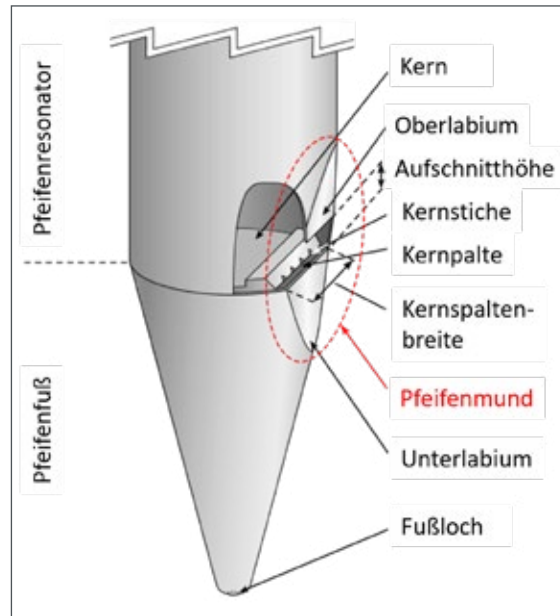


Abb. 2: Die Teile einer Lippenorgelpfeife.

vom Orgelbauer definierten Anforderungen entspricht: Jede Pfeifenreihe (bestehend aus bis zu 61 Pfeifen mit gleichem Klangcharakter, z. B. „Prinzipal“, „Rohrflöte“, „Salzional“) hat eine charakteristische Klangfarbe, die über den gesamten Tonumfang von tiefen bis hohen Tönen deutlich erkennbar und

Schallschutz- und Akustiklösungen weltweit



für Medizin und Gesundheit, Testeinrichtungen für die Industrie, Gebäudeakustik, Studios

deutschland@iac-gmbh.de
www.iac-gmbh.de

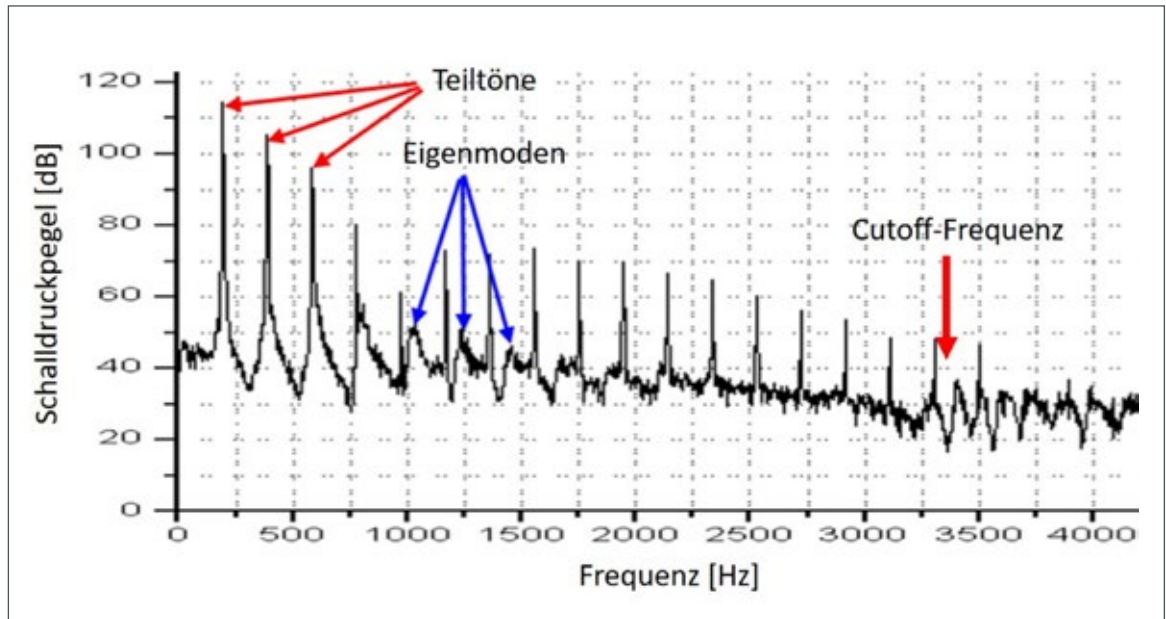


Abb. 3: Klangspektrum einer Lippenpfeife [25, 26].

ausgewogen sein sollte. Der Klang an der Zuhörerposition wird jedoch stark von der Raumakustik beeinflusst. Bei der Planung einer Orgel beurteilt der Orgelbauer die spezifischen Raumeigenschaften und bestimmt alle Pfeifendurchmesser, die für eine ausreichende Schallleistung erforderlich sind. Dann wird hoffentlich eine gleichmäßige Lautstärke- und Klangverteilung beim Orgelspielen erreicht. Verstärkt ein Raum beispielsweise tiefe und unterdrückt hohe Frequenzen, so müssen die Durchmesser von tiefen Pfeifen und damit ihre Schallleistung verringert und die von hohen Pfeifen erhöht werden, um den Einfluss des Raumes auszugleichen (mehr siehe unter „Anpassung der Pfeifenorgel an die Raumakustik“).

Lippenpfeifen – Funktionsweise, Spektren und Problemstellung

Die Funktionsweise von Lippenpfeifen wurde in mehreren Projekten ausgiebig untersucht und veröffentlicht (Grundlagenforschung). Ausführlich wurden der Schneidenton, die Kernstiche, die Kernspalte, die Aufschnittshöhe, die Pfeifenwand-Schwingung, die verschiedenen Stimmungs-methoden der Pfeifen, die Strömung im Pfeifenfuß, die Strömung am Labium, usw. untersucht [7–24]. Beim Aktivieren der Pfeife strömt Luft durch das Fußloch in den Pfeifenfuß. Beim Durchdringen der Kernspalte entsteht ein Luftband, welches periodisch schwingt und dadurch abwechselnd in den Resonator beziehungsweise nach außen gerichtet ist. Hierdurch bilden sich im Resonator stehende Wellen aus. Der hörbare Pfeifenklang entsteht schließlich durch Abstrahlung von Schallenergie am Labium und am Pfeifenende (bei offenen Pfeifen). Die

grundlegenden Eigenschaften des Klangspektrums einer solchen Pfeife sollen anhand von Abbildung 3 erklärt werden.

Die Teiltöne des stationären Pfeifenklangs sind ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz und treten in jedem Spektrum auf, obgleich deren Amplitude stark unterschiedlich sein kann. Die Eigenmoden sind die Eigenfrequenzen des Resonators. Im Allgemeinen sind diese aufgrund einer frequenzabhängigen Mündungskorrektur nicht harmonisch. Wenn die Eigenfrequenzen mit den Teiltönen zusammenfallen, werden diese verstärkt. Trifft jedoch ein Teilton auf eine Minimumposition der Resonanzkurve zwischen zwei Eigenresonanzen, so wird dieser stark abgeschwächt. Ab einer bestimmten Frequenz, der sogenannten „Cutoff-Frequenz“ treten neben den sonst üblichen Longitudinalmoden vom Resonator-Durchmesser abhängige Transversalmoden auf, deren Einsatz im Spektrum als ein Minimum in der Grundlinie klar erkennbar ist.

Sowohl Hilfe für ein besseres Verständnis der Physik der Lippenpfeifen als auch praktische Tools wurden im Laufe von 2 EU-Projekten ausgearbeitet [27, 28]. Als nächstes wird ein Beispiel für die Dimensionierung von Rohrflöten gezeigt.

Dimensionierung von Rohrflöten

Rohrflöten sind halboffene Lippenorgelpfeifen, deren Resonator aus zwei Hauptteilen besteht: einem geraden zylindrischen Hauptteil (Pfeifenkörper) und einem kürzeren und dünneren Röhrchen, das an seiner Oberseite befestigt ist (Abbildung 4a). An diesem Beispiel kann gut erklärt werden, mit welcher Methode die Dimensionierung von Lippenorgelpfeifen erfolgen kann.

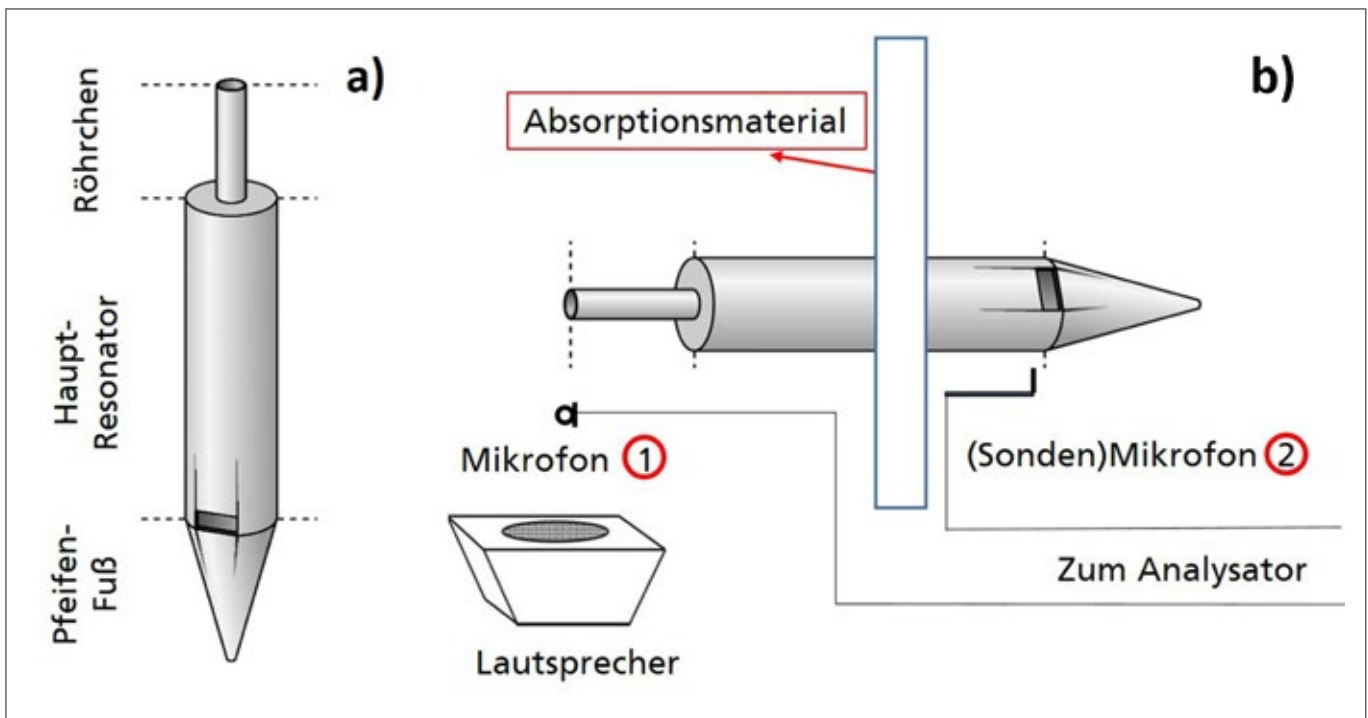


Abb. 4: a) Skizze einer Rohrflöte. b) Messung der Übertragungsfunktion: Der Pfeifenresonator wird durch einen Lautsprecher angeregt; das (Sonden)Mikrofon 2 befindet sich im Resonator dem Pfeifenmund gegenüber.

Die Länge und der Durchmesser des kleinen Rohres können variieren, so dass der Orgelbauer die Klangfarbe der Pfeife anpassen kann. Rohrflöten in barocken Pfeifenorgeln sollten einen Klang haben, der am stärksten an der reinen Quinte (dritte Harmonische) klingt, während romantische Instrumente mehr große Terz (fünfte Harmonische) im Klang erfordern. Um diese Anforderungen erfüllen zu können, bedarf es spezieller Konstruktionsregeln zur Bestimmung der Abmessungen der beiden miteinander gekoppelten Resonatoren (Pfeifenkörper und Röhrchen), damit der gewünschte Klangcharakter erreicht werden kann. Das Verfahren zur Bestimmung der geeigneten geometrischen Abmessungen von Orgelpfeifen mit dem Ziel, eine vordefinierte Klangfarbe zu erhalten, wird als „Sound Design oder Klanggestaltung“ bezeichnet. In den von den Orgelbauern initiierten und vom Team um die Autorin dieses Artikels durchgeführten Forschungsarbeiten wurde eine neuartige Methodik für die Klanggestaltung von Lippenorgelpfeifen, unter anderem von Rohrflöten, entwickelt und in einem Softwaretool implementiert. Dadurch kann das bisher komplizierte Dimensionierungs- und Intonationsverfahren (d.h. Einstellen von Tonhöhe und Klangfarbe) von Lippenorgelpfeifen (und damit auch von Rohrflöten) effektiver gestaltet werden. Akustische Messungen wurden im reflexionsarmen Raum des Fraunhofer IBP in Stuttgart durchgeführt (Abbildung 5). Die Idee des vorgeschlagenen Sound-Design-Ansatzes ist es also, die Eigenfrequenzen des Resonators mithilfe von Computersimulation so einzustellen,

dass sie mit den Frequenzen der vordefinierten harmonischen Teiltöne des Klangs übereinstimmen [29, 30]. Um die Richtigkeit der Simulation herzustellen, wurden die Eigenfrequenzen des Resonators durch eine Übertragungsfunktionsmessung, wie in Abbildung 4b dargestellt, aufgenommen. Wenn sich ein harmonischer Teiltone mit einer Eigenfrequenz überlappt, wird die entsprechende Eigenmode sehr effizient angeregt und somit ist die Verstärkung des Teiltöne zu erwarten. Durch Computersimulation wird die sogenannte Eingangsadmittanz (d.h. das

Abb. 5: Akustische Messungen im reflexionsarmen Raum des Fraunhofer IBP in Stuttgart.



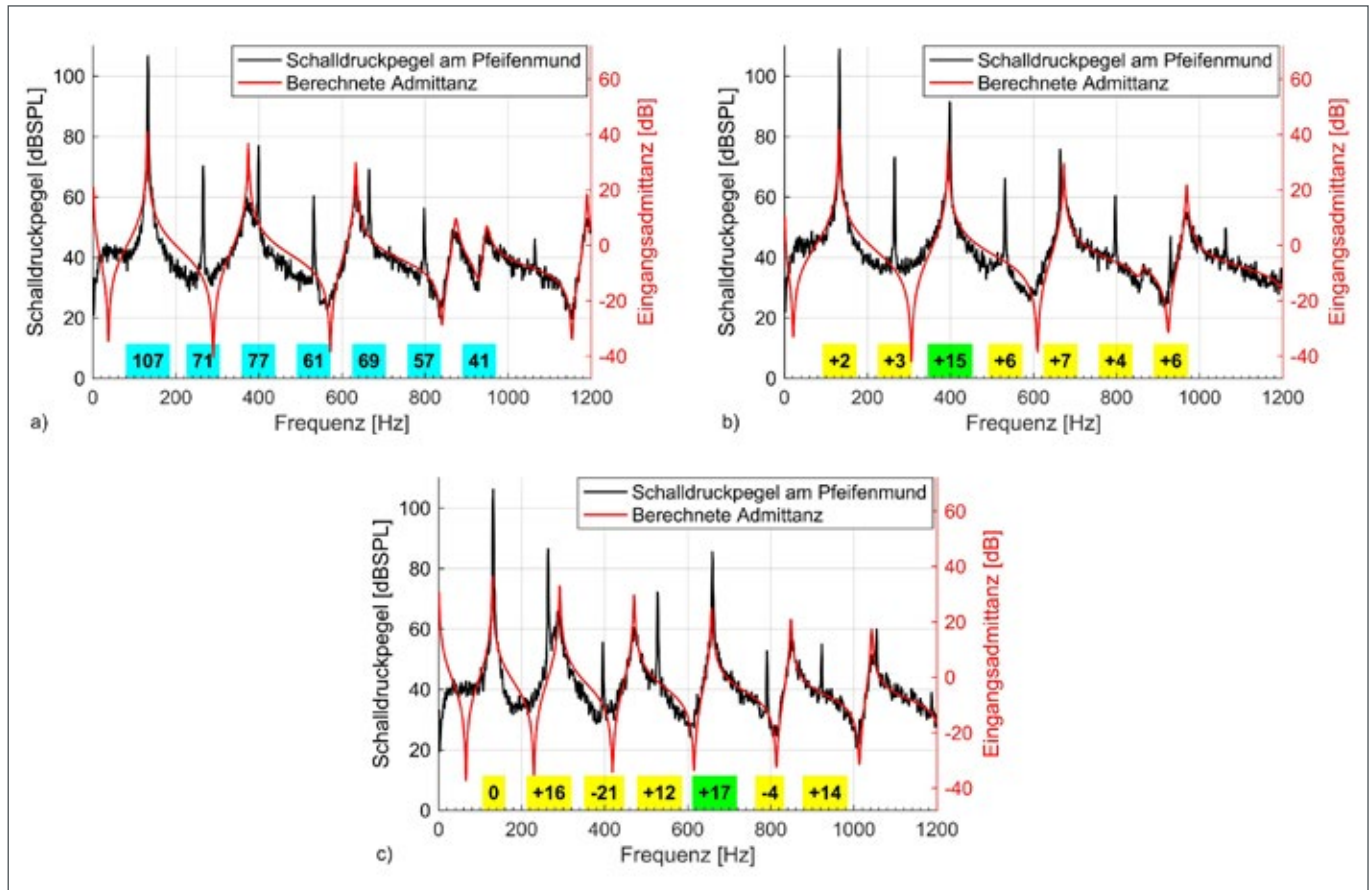


Abb. 6: a-c) Gemessene Spektren (schwarz) und berechnete Eingangsadmittanz (rot) der experimentellen Rohrflöten. a) Referenzpfeife; die Zahlen auf dem blauen Hintergrund sind die Amplituden der ersten sieben harmonischen Teiltöne. b) Optimiertes Design, das den dritten Teilton (reine Quinte) um 15 dB verstärkt. c) Optimiertes Design, das die Quinte (große Terz) um 17 dB verstärkt. Die Zahlen auf dem grünen und gelben Hintergrund zeigen die relativen Pegel der harmonischen Teiltöne im Vergleich zur Referenzpfeife.

Verhältnis von akustischer Volumengeschwindigkeit und Schalldruck am Pfeifenmund) berechnet [31]. Die Spitzen der Eingangsadmittanz entsprechen den Spitzen der Eigenresonanzen. Die Leistungsfähigkeit (Richtigkeit) des entwickelten Softwaretools wurde getestet, indem experimentelle Rohrflöten mit den von dem Softwaretool berechneten Abmessungen gebaut und deren gemessene Schallspektren mit den Ergebnissen der Computersimulationen verglichen wurden. Die gemessenen stationären Schallspektren und die berechneten Eingangsadmittanzen sind in Abbildung 6 dargestellt. In jedem Diagramm wird das am Pfeifenmund gemessene Schalldruckspektrum und die berechnete Eingangsadmittanz durch die schwarzen bzw. roten Linien angezeigt. Die breiten Spitzen in den Klangspektren entsprechen den natürlichen akustischen Resonanzen der Pfeife, während die scharfen Spitzen die harmonischen Teiltöne des Pfeifenklangs sind. Das Bemessungsverfahren ist erfolgreich, wenn einer der Spitzen der roten Kurven in Abbildung 6b–c mit dem zu verstärkenden Teilton übereinstimmt. Abbildung 6a zeigt das Klangspektrum der Referenzpfeife (eine Rohrflöte mit den üblichen Abmessungen) mit den Amplituden der ersten sieben Teiltöne,

angegeben durch die Zahlen auf dem blauen Hintergrund. Die Referenzpfeife hat einen starken Grundton im Klang, während die höheren Harmonischen sehr schwach sind. Abbildung 6b und c zeigen die Ergebnisse der für den dritten bzw. fünften Teilton optimierten Rohrflöten. Die Zahlen auf dem grünen Hintergrund zeigen die Verstärkung des angestrebten harmonischen Teils im Vergleich zu den gemessenen Pegeln bei der Referenzpfeife an. Die Zahlen auf dem gelben Hintergrund zeigen die gleichen Veränderungen in den Pegeln der anderen Harmonischen. Wie man sieht, können die optimierten Resonatoren die angestrebten Teiltöne um mehr als 15 dB verstärken und gleichzeitig den Grundton konstant halten. Diese Verstärkung kann als wesentlich angesehen werden, wenn man bedenkt, dass sich die Experimentierpfeifen nur in der Geometrie ihrer Resonatoren unterscheiden. Das entwickelte Softwaretool wird in der praktischen Arbeit der Orgelbauerpartner des Projekts eingesetzt [32].

Dimensionierung von Holzpfeifen

Die Forschungspartner in den europäischen Forschungsprojekten wollten die großen Holz-Pedalpfei-

fen schmäler als bisher bauen, ohne den Klangcharakter zu beeinflussen. Häufig gibt es nur wenig Platz für diese Pfeifen. Zudem könnte bei schmalere Pfeifen die Windlade in kürzerer Form und damit kostengünstiger gebaut werden. Holzpfeifen haben immer einen rechteckigen Querschnitt (Abbildung 7). Ihre Labienbreiten (= Pfeifenbreiten) entsprechen denen der Referenzpfeifen (runde Metallpfeifen mit gleicher Tonhöhe und ähnlicher Klangfarbe). Ihre Tiefen werden traditionell so berechnet, dass der rechteckige Querschnitt $A_{w,trad}$ gleich dem kreisförmigen Querschnitt A_{ref} der Referenzpfeifen ist (Abbildung 8a). Wie bereits erwähnt, werden die Pfeifen manchmal zu breit, so dass die Gesamtbreite eines ganzen Pfeifenregisters nicht in den verfügbaren Raum innerhalb der Orgel passt. Deshalb wurde eine neue Berechnungsmethode entwickelt [33]. Dabei verschmälert der Orgelbauer zunächst die Pfeifen, bis die Pfeifenreihe in den verfügbaren Raum passt. Um eine wesentliche Veränderung des Klangcharakters zu vermeiden, werden dann deren Tiefen so berechnet, dass anstelle der Querschnitte die Energieverluste bzw. Gütefaktoren Q (Abbildung 8b) der traditionellen und neuen Holzpfeifen gleich werden. Mithilfe der Berechnungen wurde ebenfalls ein Softwaretool entwickelt, womit die Orgelbauer die Holzpfeifen dimensionieren können (Abbildung 8c) [32, 33].

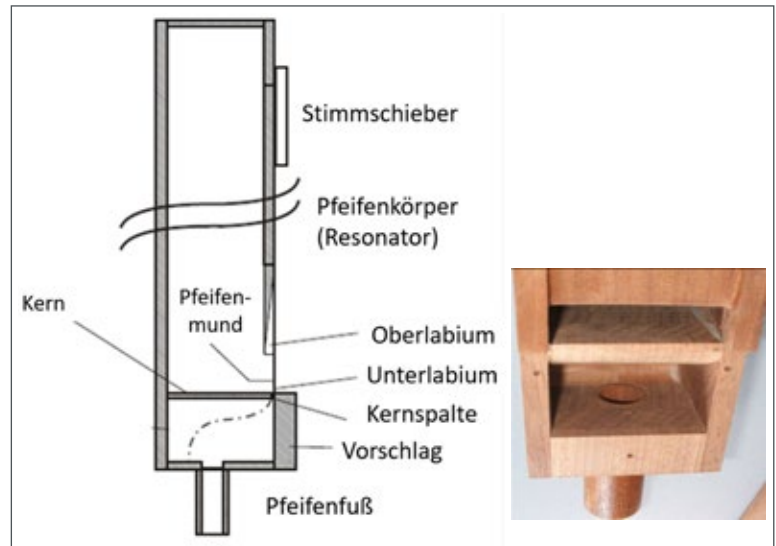
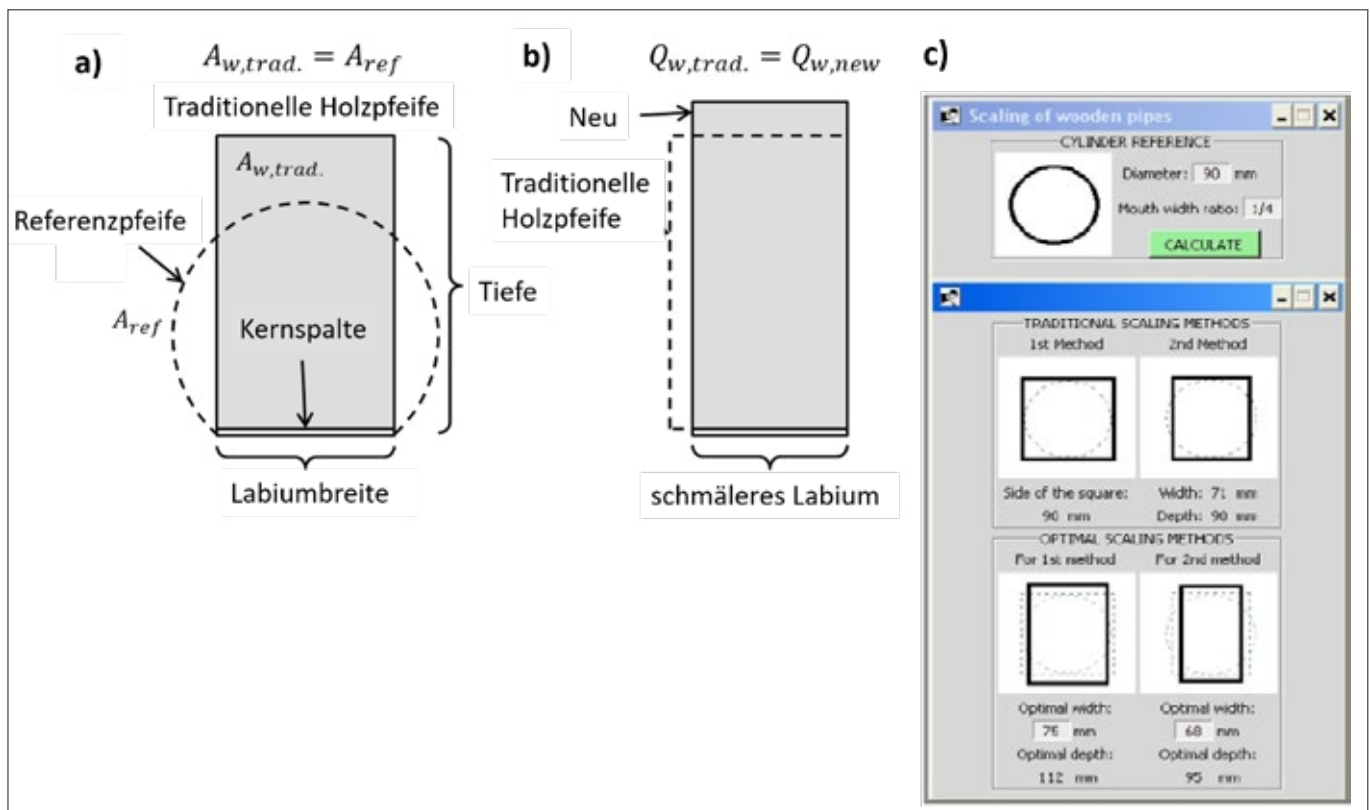


Abb. 7: Aufbau einer Holzpfeife.

Die neue Berechnungs- und Konstruktionsmethode wurde durch den Bau und die Messung von Versuchspfeifen getestet, wodurch die Anwendbarkeit der vorgeschlagenen Methode bewiesen wurde. So ist es nun möglich, schmalere Holzpfeifen zu bauen, die die Klangqualität der Pfeifen mit Standardabmessungen beibehalten.

Abb. 8: a) Traditionelle Dimensionierung von Holzpfeifen mit gleichen Querschnitten der runden Metall-Referenzpfeifen, b) innovative Dimensionierung von Holzpfeifen mit gleichen Verlusten (Gütefaktoren), c) Screenshot des entwickelten Softwaretools „Optimale Dimensionierung von Holzpfeifen“



Dimensionierung von Zungenorgelpfeifen

Zungenpfeifen – Funktionsweise und Problemstellung

Der Klangerzeugungsmechanismus von Zungenpfeifen ist ein komplexes physikalisches Phänomen. Die Zungenpfeife besteht aus drei Hauptteilen: dem Stiefel, der Nuss mit der Kehle und der Zunge und dem Resonator (siehe Abb. 9a). Bei der Kehle handelt es sich um ein hohles Metallröhrchen, das auf einer Seite abgeflacht und mit einem Schlitz versehen ist. Durch eine gebogene Stimmkrücke aus Metall wird die Zunge an einer Stelle auf die Kehle gedrückt, unterhalb dieser Kontaktstelle kommt es zu einem Abstand zwischen Zunge und Kehle aufgrund des Aufwurfes der Zunge, was in der Seitenansicht einer Trompetenkehle in Abbildung 9b zu erkennen ist [34].

Wenn die Zungenpfeife angeblasen wird, strömt die Druckluft (Wind) durch das Fußloch in den Stiefel und durch die Kehle. Das Auftreten des dynamischen Drucks, der den statischen Druck innerhalb der Kehle verringert (BERNOULLI-Effekt), sorgt dafür, dass die aufgeworfene Zunge an die Kehle herangezogen wird. Der Aufprall der Zunge auf die Kehle sowie die Rückstellkräfte der Zunge sorgen dafür, dass die Zunge zurückschwingt und der Vorgang von vorne beginnt [35–37]. Je nach Pfeifensorte schlägt dabei die Zunge auf die Kehle (aufschlagende Zunge, z. B. Trompetenpfeifen) oder wird – wenn der Schlitz breiter ist als die Zunge – in die Kehle hineingezogen (durchschlagende Zunge, z. B. Klarinettenpfeifen).

Die Tonhöhe der Pfeife wird durch die Kopplung von zwei schwingenden Systemen, der schwingenden Zunge und dem akustischen Resonator-Kehle-System [38, 39] bestimmt. Die Stärke der Kopplung variiert in einem weiten Bereich für verschiedene Sorten von Zungenpfeifen. Trompetenpfeifen zeichnen sich durch eine starke Wechselwirkung zwischen

Resonator und Zunge aus, während bei Registern wie dem Vox Humana die Kopplung typischerweise schwach ist. In beiden Fällen hat der Resonator einen großen Einfluss auf die Klangfarbe der Pfeife. Bei schwacher Kopplung wirkt der Resonator wie ein Filter, der bestimmte harmonische Teiltöne im Pfeifenklang verstärken oder unterdrücken kann.

Gespräche mit Orgelbauerpartnern im Rahmen eines europäischen Projekts [40] haben gezeigt, dass es keine gemeinsamen Regeln für die Auslegung von Zungenpfeifenresonatoren gibt. Auch Messungen belegen, dass die in der Praxis angewandten Faustregeln die Möglichkeiten des Resonators nicht voll ausschöpfen. Ziel unserer Forschung war es daher, eine optimale Dimensionierung der Zungenpfeifenresonatoren zu erreichen, was in der Praxis zu Kosten- und Aufwandsreduzierungen führen kann [41]. Daher wurde eine Methodik entwickelt, die ein eindimensionales analytisches Modell mit einer dreidimensionalen Finite-Elemente-Simulation kombiniert, um das akustische Verhalten von Zungenpfeifenresonatoren vorherzusagen. Die vorgeschlagene Methode wird durch Vergleiche mit Messungen validiert und es wird gezeigt, dass die Technik in der Lage ist, die Eigenfrequenzen des Resonators genau zu berechnen [42].

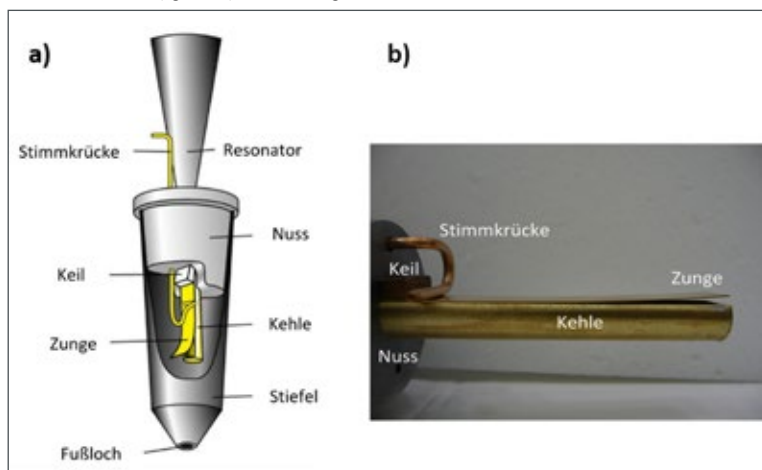
Als Beispiel wird die Dimensionierungsmethode für Zungenpfeifen auf einer „Vox Humana“-Pfeife vorgestellt, die die menschliche Stimme imitiert. Dies ist eine sogenannte aufschlagende Zungenpfeife, weil die Zunge – im gespielten Zustand der Pfeife – periodisch auf die Kehle schlägt. Bei einer durchschlagenden Zungenpfeife dagegen schwingt die Zunge frei durch die Öffnung der Kehle und erzeugt dadurch den Schall.

Der Resonator besteht aus drei Abschnitten (Abbildung 10a):

1. die Kehle setzt sich in einem geraden Hals fort, der eine Länge von $2/5$ des gesamten Resonators aufweist,
2. ein sich erweiternder Abschnitt, fast so lang wie der Hals, bei dem der Durchmesser stark zunimmt,
3. ein sich verjüngender Abschnitt, der am Ende offen ist.

Abbildung 10b zeigt den Aufbau der Übertragungsfunktionsmessung des Pfeifenresonators. Die Simulationsparameter wurden anhand der Messergebnisse optimiert, um realistische Ergebnisse zu erzielen. Die Simulationsanordnung und die Wellenformen bei den ersten vier Eigenfrequenzen des Vox Humana Resonators sind in Abbildung 11a und b dargestellt. Der Vergleich der gemessenen Übertragungsfunktion und der berechneten Eingangsdmittanzfunktion mit analytischen und FEM-Im-

Abb. 9: Der Aufbau einer Zungenpfeife a) und Seitenansicht einer Trompetenkehle mit aufgeworfener Zunge b).



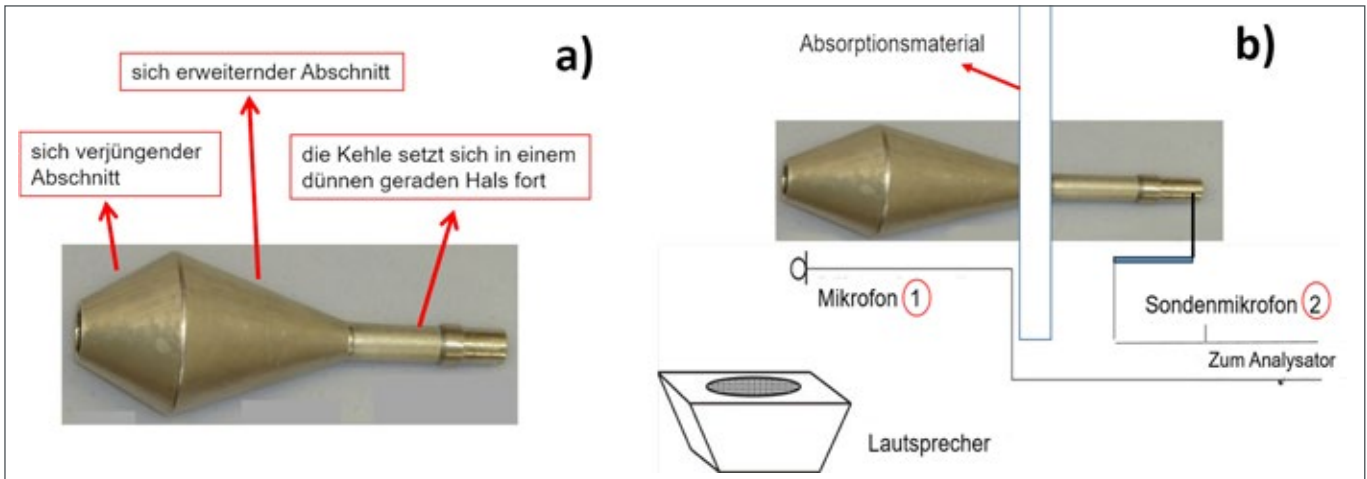


Abb. 10: a) Der Resonator einer Vox Humana Pfeife; b) Messung der Übertragungsfunktion: Der Pfeifenresonator wird von einem Lautsprecher mit einem Sweepsignal angeregt. Mikrofon 1 befindet sich am Ende des Resonators beim Lautsprecher, (Sonden-)Mikrofon 2 im Hals [42].

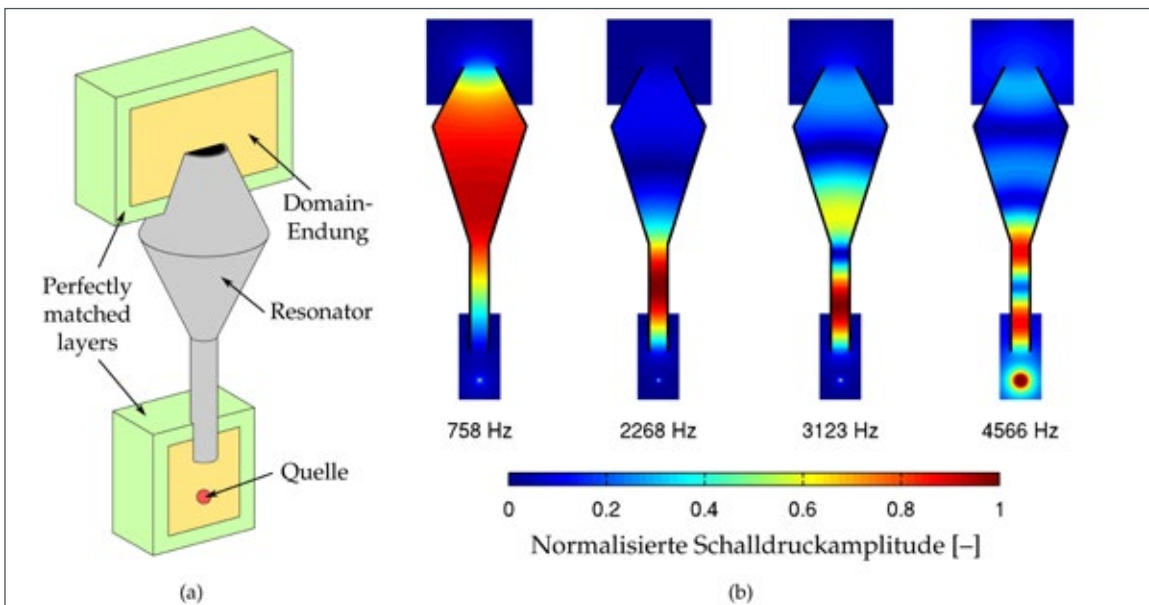
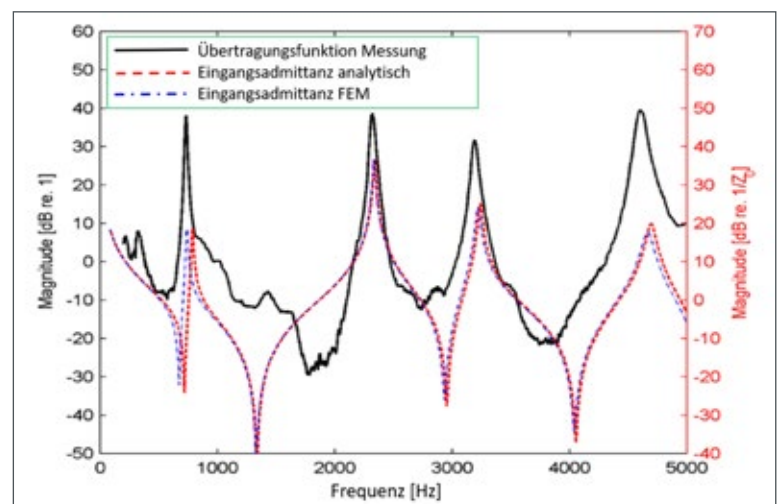


Abb. 11: a) Simulationsanordnung und b) die ersten vier Eigenmoden des Vox Humana Resonators.

pedanzmodellen (Finite-Elemente-Methode) einer Vox Humana Pfeife ist in Abbildung 12 dargestellt. Die beiden Simulationen erzeugen sehr ähnliche Ergebnisse. Weiterhin stimmen die berechneten Eigenfrequenzen gut mit den gemessenen Frequenzen überein.

Basierend auf den Mess- und Simulationsergebnissen wurde ein Softwaretool für die Auslegung von Zungenorgelpfeifen entwickelt. Mit der analytischen Methode wurden die Berechnungen innerhalb des Resonators mit sphärischen Wellen durchgeführt. Die Mündungskorrektur konnte jedoch nur mit der FEM-Methode bestimmt werden. Dadurch konnten in die Software verschiedene Berechnungsergebnisse eingefügt werden. So kann das Softwaretool unabhängig von der FEM-Simulation angewendet werden.

Abb. 12: Die gemessene Übertragungsfunktion und die sowohl analytisch als auch mit FEM simulierte Eingangsdmittanz eines Vox Humana Resonators.



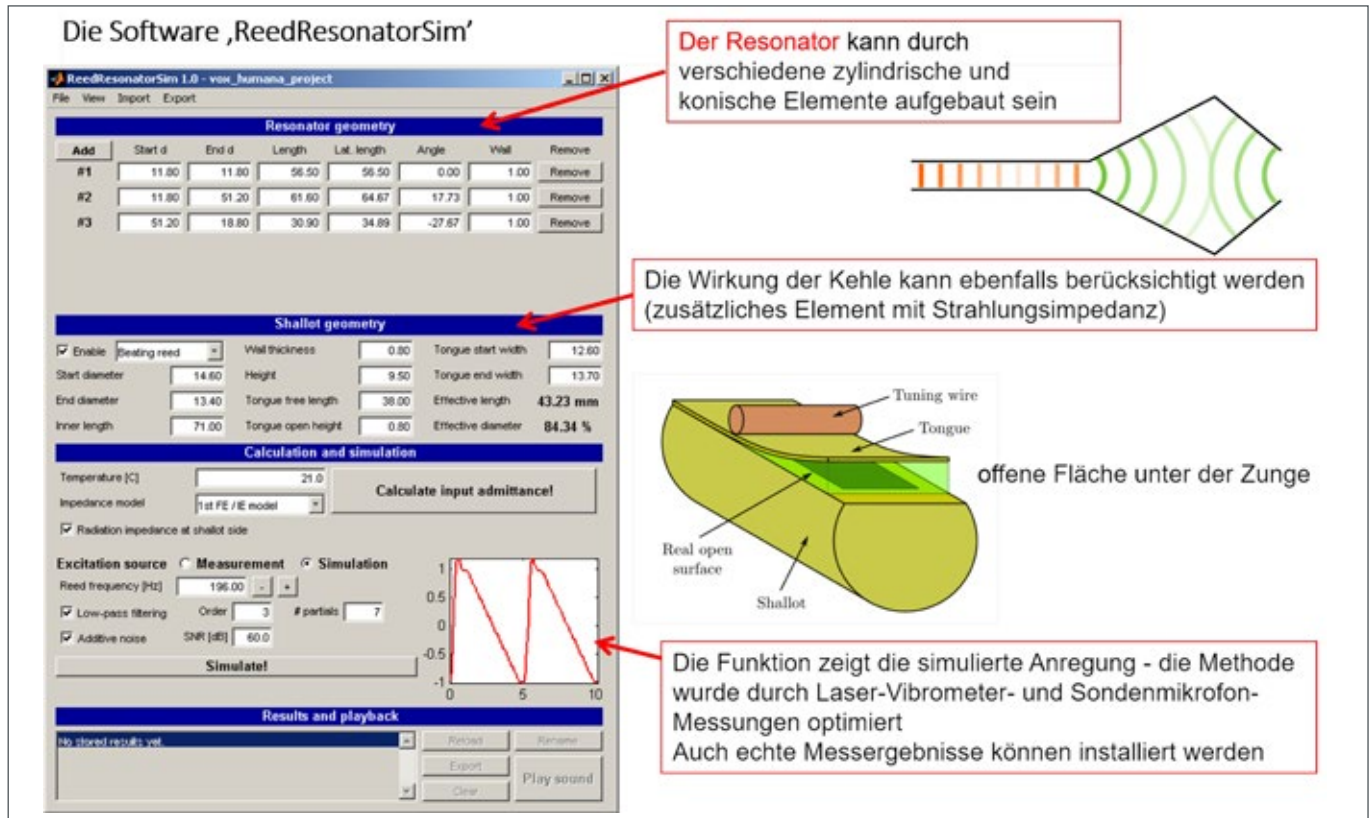


Abb. 13: Das Hauptfenster des Softwaretools und die wichtigsten Bedienelemente. Die Funktion zeigt die simulierte Anregung, die auf Basis von Laservibrometer- und Sondenmikrofonmessungen so eingestellt wurde, dass sie so realistisch wie möglich ist [42].

Im Folgenden wird gezeigt, wie Orgelbauer dieses Verfahren zur Dimensionierung von Zungenpfeifen einsetzen können. Das Hauptfenster des Softwaretools und die wichtigsten Bedienelemente sind in Abbildung 13 dargestellt. Der Resonator kann, wie aus der Abbildung ersichtlich wird, individuell aufgebaut werden. In unserem Beispiel zeigt Abbildung 14a, dass bei Verwendung der ursprünglichen Resonatorabmessungen der stärkste Teilton nicht der dritte ist, der gewünscht wäre. Durch Änderung der Resonatorabmessungen (der konische Teil in der Nähe des offenen Endes wurde verlängert) wird die Frequenz der ersten Eigenresonanz auf den dritten Teilton des Klangs abgestimmt (Abbildung 14b).

Anpassung der Pfeifenorgel an die Raumakustik

Die Qualität einer Orgel ist abhängig von ihrer Anpassung an die akustischen Eigenschaften des Raumes. Einerseits kann diese Anpassung über die Dimensionierungen der Pfeifen eingestellt werden. Andererseits müssen wegen den diskreten Tönen im tiefen Frequenzbereich die Raumresonanzfrequenzen berücksichtigt werden.

Die Problematik der Anpassung der Pfeifenorgel an die Raumakustik wurde ebenfalls in einem EU-Projekt angegangen [43]. Die Partner-KMU (Klein- und Mittelständische Unternehmen) wünschten sich

eine eigene Möglichkeit zur Untersuchung der akustischen Effekte der Kirche oder des Konzertsaals an den Orgelklang, in dem die Pfeifenorgel entworfen werden soll. Diese Entwicklungen waren nötig, da einerseits die Berichte von Akustikberatern für Orgelbauer nicht einfach zu deuten sind, andererseits liegen die untersten zweieinhalb Oktaven einer Orgel im tiefen Frequenzbereich von etwa 16 Hz bis 90 Hz, der mit üblichen raumakustischen Methoden nicht einfach untersucht werden kann.

Ansatz für die Raumprobleme im tieffrequenten Bereich

Das Problem besteht darin, dass im tiefen Frequenzbereich sehr starke Raumresonanzen auftreten können, die einen deutlichen Einfluss auf die Schallabstrahlung der tiefen Pfeifen haben. Falls eine Pfeife eine Raumresonanz anregt, kann ihr Klang zu stark relativ zu den anderen Pfeifen ausfallen. Steht die Pfeife in einer „Minimumposition“ der Raumresonanzen, kann sogar vorkommen, dass sie wegen der Raumrückwirkung überhaupt nicht erklingen kann. Es wurde ein neuartiger Ansatz zur tieffrequenten raumakustischen Messung entwickelt. Mit diesem Messverfahren können die tiefen Raumresonanzfrequenzen im Bereich von 15 Hz bis 150 Hz bestimmt werden. Demzufolge kann das System in Kirchen, Konzertsälen, usw. für die Bestimmung der

relativen Position der Raumresonanzfrequenzen zu den musikalischen Tönen eingesetzt werden. Für eine einfache Bedienung wurden eine Mess- und eine Signalverarbeitungssoftware entwickelt [44]. Dabei muss bestimmt werden, ob die Raumresonanzfrequenzen und die musikalischen Töne der geplanten Orgel zusammenfallen. Falls nicht, ist alles in Ordnung. Falls ja, muss nachgegangen werden, ob diese Pfeifen im Raum jeweils an eine adäquate Position gestellt werden. Würde eine Pfeife an einer „falschen Position stehen“, muss der Aufstellungsplan geändert werden.

System zur Simulation der Schallabstrahlung von Orgelpfeifen

Um die Pfeifen optimal zum jeweiligen Raum zu mensurieren (Anmerkung 1), versuchen die Orgelbauer die Pfeifen ähnlich zu dimensionieren, wie sie in ähnlichen Räumen dimensioniert sind. Eine andere Methode ist, eine kleine Windlade aufzubauen, einige Probepfeifen aus dem Prinzipalregister zu mensurieren (Anmerkung 2), dann im Raum anzuhören, um so die Mensurierung abzuschätzen. Die Anzahl der Pfeifen, welche zum Einsatz kommen, und die Möglichkeiten diese für eine bessere Anpassung zu verändern, sind jedoch beschränkt.

Anmerkung 1

Mensur:

Im Orgelbau bezeichnet Mensur vor allem die Maßverhältnisse bei Orgelpfeifen. Der Klangcharakter der Pfeifen wird wesentlich durch ihre jeweilige Mensur geprägt, die meist durch relative Längenverhältnisse ausgedrückt wird (relative Mensur). Der Begriff bezeichnet

- allgemein die Festlegung aller Maße der Einzelteile einer Pfeife und der Verlauf dieser Maße über eine Pfeifenreihe (Register) (im vorliegenden Artikel wird dies Dimensionierung genannt).
- im engeren Sinne die „Weitenmensur“, also das Verhältnis des Durchmessers zur Länge der Pfeife, das zwischen 1:5 und 1:30 variieren kann [45]. Die Weitenmensur ist die wichtigste Mensur im Orgelbau. Aus ihr ergibt sich die Einteilung in „eng“, „mittel“ oder „weit“ mensurierte Register. Weite Mensuren liefern einen eher weichen und grundtönigen, enge Mensuren einen schärferen und obertönigeren Klang [45, 46].

Anmerkung 2

Prinzipalpfeife:

Prinzipale sind wichtige Orgelregister, sie bilden bei fast jeder Orgel das klangliche Rückgrat und zieren den Orgelprospekt. Prinzipale bestehen aus zylindrisch offenen Labialpfeifen mittlerer Mensur [46].

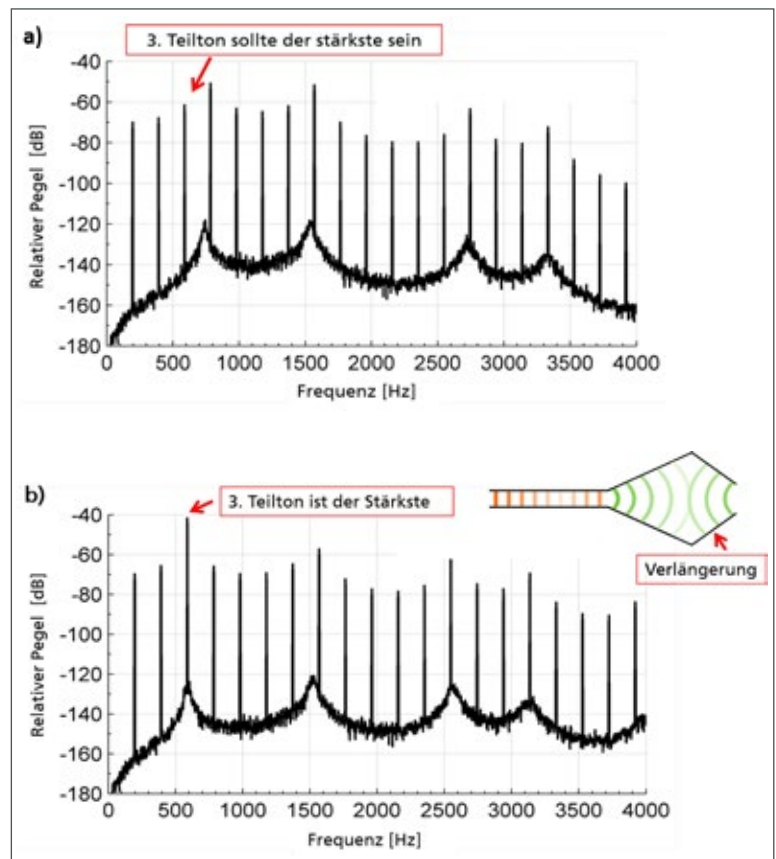


Abb. 14: Simulation des stationären Klangspektrums einer Vox Humana Pfeife a) mit den ursprünglichen Resonatorabmessungen b) mit optimierten Resonatorabmessungen [42].

Für die Unterstützung der Orgelbauern wurde ein System entwickelt, mit welchem die Schallabstrahlung von Orgelpfeifen simuliert werden kann. Das System besteht aus einem Notebook mit Programm und einer Klangbibliothek, einem Verstärker und zwei Lautsprechern, welche an einem Stativ angebracht sind. Aufgabe des Programms ist die Verwaltung, Wiedergabe und Anpassung der Aufnahmen der Orgelklänge. Für die Klangbibliothek wurden Aufnahmen an zylindrischen, metallenen, offenen Lippenorgelpfeifen des Prinzipalregisters der Tonhöhen c° und c' bei unterschiedlichen Dimensionierungen angefertigt. Alle anderen Register werden immer dem Prinzipalregister nach mensuriert. Die Weitenmensur variierte von +2 Halbton bis -6 Halbtöne bezogen auf die Normalmensur, die Labiierung von $1/3,75$ bis $1/4,5$ des Umfanges. Die Pfeifen wurden in drei Stufen mit zunehmender Aufschnittshöhe intoniert. Die Aufnahmen fanden jeweils bei 6 Winddrücken von 55 bis 105 mm WS zeitsynchron am offenen Ende und am Labium der Pfeife statt. Insgesamt besteht die Klangbibliothek aus 324 unterschiedlichen Aufnahmen je Tonhöhe. Die Phasentreue der Aufnahmen wurde sichergestellt, die Übertragungsfunktion der Wiedergabekette wurde analysiert und kompensiert.

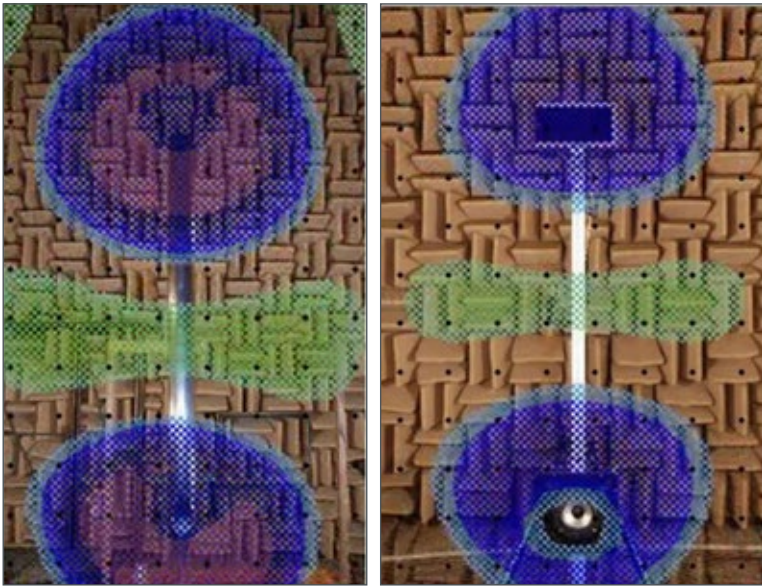


Abb. 15: Standbild (frontal) bei der dritten Harmonischen der Pfeife (links) und des Systems (rechts).

Das System gibt also Klangaufnahmen von Orgelpfeifen wieder. Zudem bietet diese Methode die Möglichkeit, dass die Klänge nach einigen Regeln der Mensurierung so verändert werden, als ob die Orgelpfeife selbst, von der die Aufnahme stammt, verändert wurde [47]. Weiterhin kann das System im

Raum in unterschiedliche Positionen geschoben und damit auch der Einfluss der Platzierung simuliert werden. Würde z. B. von den Prinzipalen eine Pfeife in einer für sie bestimmten Position schlecht erklingen, könnte dieses Problem voraussichtlich mit einer Veränderung ihrer Mensurierung gelöst werden. Das entwickelte System kann hierfür Hilfe leisten.

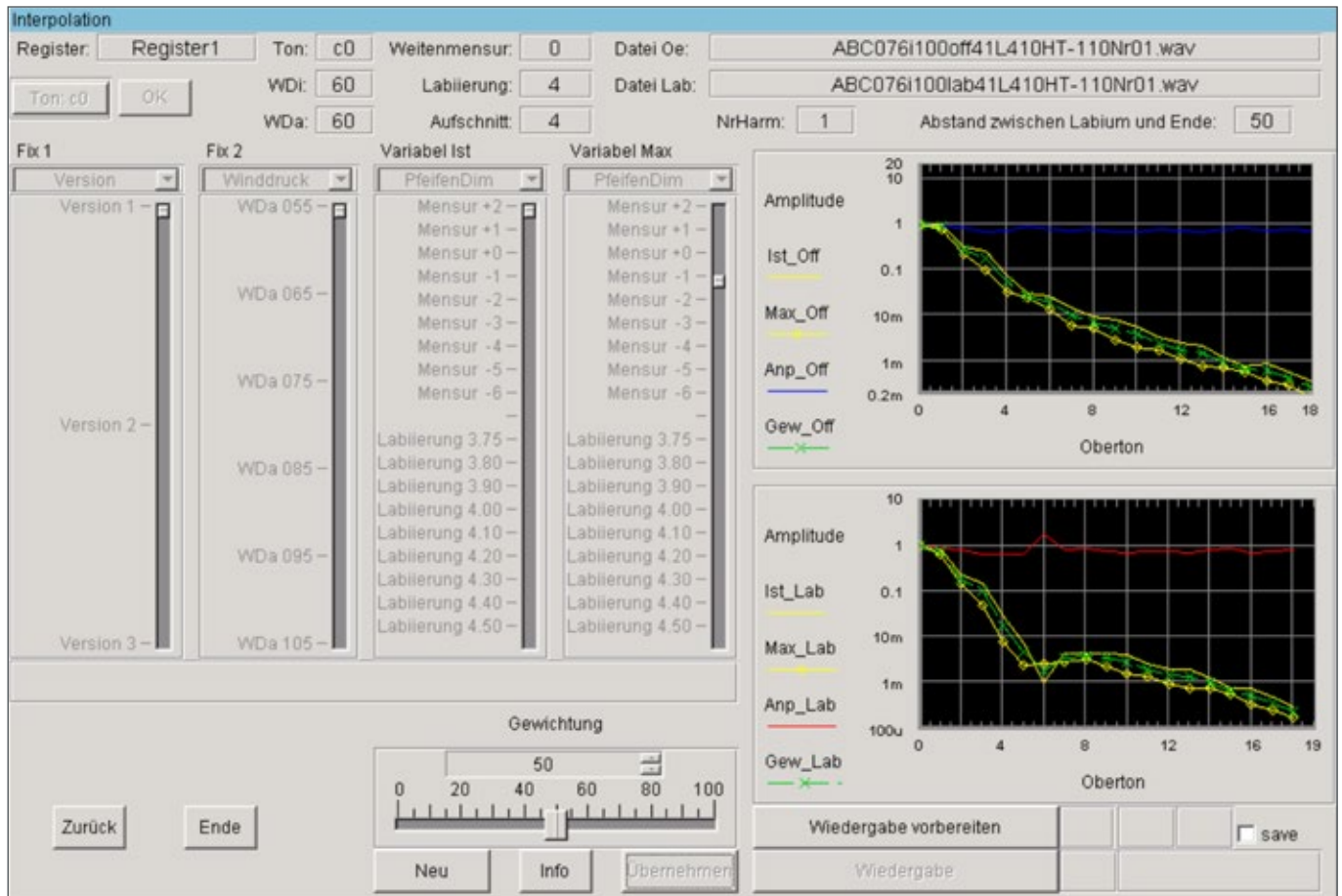
Die Überprüfung der Ähnlichkeit von System und Pfeife fand an Hand von vergleichenden Messungen der Spektren einzelner Messpunkte und Messungen mit einem Mikrofonarray im reflexionsarmen Raum statt (Abbildung 15). Klänge, die zwischen den aufgenommenen Klängen liegen, direkt jedoch nicht detektiert wurden, können mithilfe der Klangbibliothek und der Software interpoliert werden. Der Screenshot der Interpolations-Oberfläche wird in Abbildung 16 gezeigt.

Darüber hinaus wurde eine Mensurationssoftware entwickelt, die hier wegen der Komplexität nicht weiter vertieft wird. Mithilfe dieser können – ausgehend von der Normalmensur – die Dimensionen aller Pfeifen berechnet werden.

Berücksichtigung der Nachhallzeit bei der Mensurierung der Lippenpfeifen

Nachdem die Dimensionierung einer Prinzipalpfei-

Abb. 16: Screenshot der Interpolations-Oberfläche.



fe, die gut an den Raum angepasst ist, bestimmt ist, wird das ganze Prinzipalregister – wie gewöhnlich – mensuriert. Abbildung 17 a) präsentiert die Normalmensur-Kurve. Abbildung 17 b) zeigt einerseits die Nachhallzeitkurve des Raumes, wo die Orgel aufgestellt wird und andererseits die dementsprechend optimierte Mensurkurve. Der Orgelbauer kann diese Daten zusätzlich noch seiner Vorstellungen und Erfahrungen nach modifizieren (z. B. ob es sich um einen Solo- oder ein Begleitregister handelt), siehe Abbildung 17 c).

Am Ende der Prozedur werden die Dimensionen aller Pfeifen in einer Excel-Tabelle aufgelistet, was für die Orgelbauer eine sehr große Hilfe bedeutet. Die Tabellen können dann an die Pfeifenbauer weitergeleitet werden.

Die Forschungsorgel am Fraunhofer IBP

Im Jahr 2011 wurde am Fraunhofer IBP von der Werkstätte für Orgelbau Mühleisen, Leonberg, eine Forschungsorgel für die wissenschaftliche Forschung gebaut (Abbildung 18, siehe folgende Seite). Die Orgel wurde vom Land Baden-Württemberg finanziert. Ihr transparenter und einzigartiger Gestaltungsspielraum ermöglicht die Demonstration von Forschungsergebnissen, die Untersuchung technischer und klanglicher Fragen des Orgelbaus sowie die akustische Prüfung von Ideen zum Orgelklang [48]. In diesem Zusammenhang wird nun diskutiert, warum die Forschungsorgel notwendig war, welche Forschungsergebnisse demonstriert werden können, welche Besonderheiten die Orgel aufweist und welche Bedeutung dieses Instrument für die zukünftige Forschung hat.

Warum eine Forschungsorgel?

Die Forschungsorgel dient als Demonstrator für zahlreiche Forschungsergebnisse und ermöglicht die Untersuchung von Technologie- und Klangproblemen direkt an einem realen Instrument [49]. Darüber hinaus vereinfacht sie die Verbreitung des Wissens auf dem Gebiet der Orgelforschung. Früher mussten Neuentwicklungen an einer Kirchenorgel getestet werden. Es war schwierig, die Genehmigung für diese Messungen zu erhalten. In den meisten Fällen musste zunächst das Instrument von einem Orgelbauer modifiziert werden. So mussten beispielsweise mehrere Löcher für die verschiedenen für die Messungen notwendigen Detektoren gebohrt werden. Die meisten

Abb. 17: Berücksichtigung der Nachhallzeit bei der Mensuration. a) Normal-Mensurationskurve; b) Nachhallzeitkurve (schwarz) und angepasste Mensurationskurve (blau); c) den Vorstellungen der Orgelbauer nach zusätzlich modifizierter Kurve (grün).

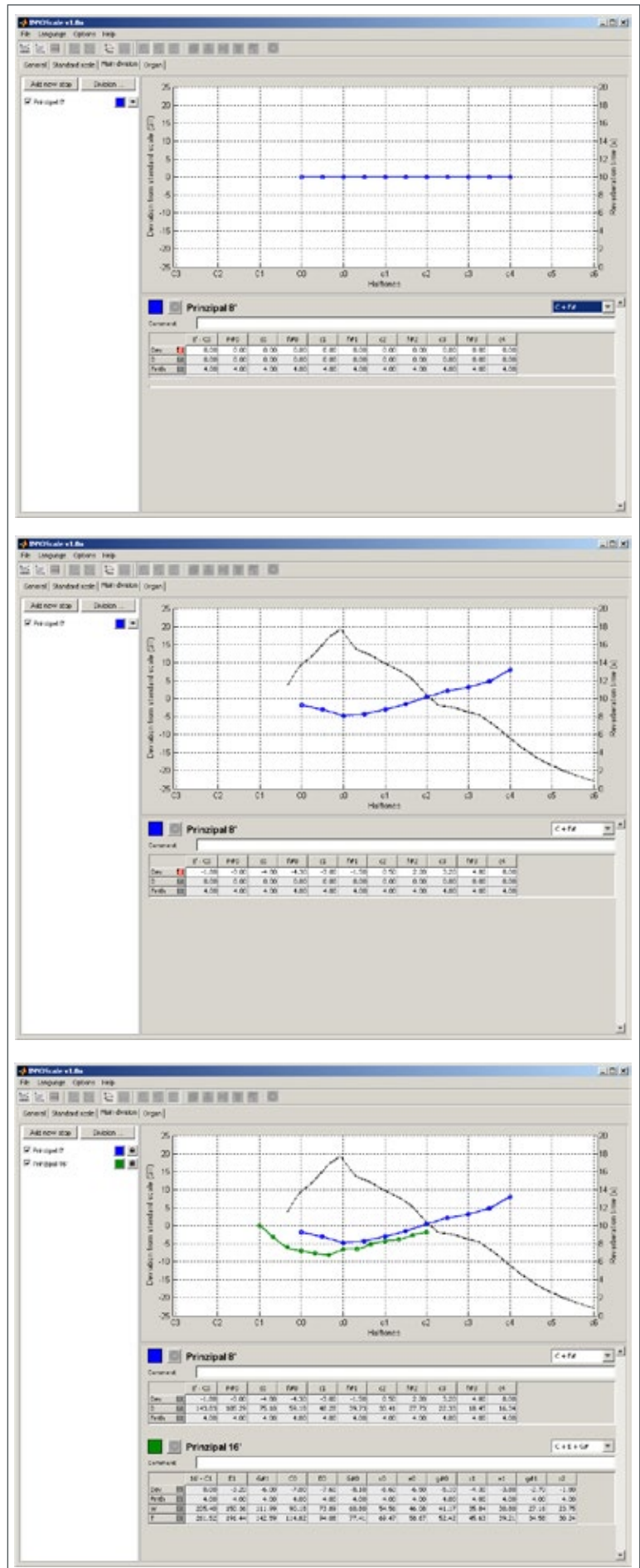




Abb. 18: Die Forschungsorgel des Fraunhofer IBP (gebaut 2011 von der Werkstätte für Orgelbau Mühleisen, Leonberg). Der rote Rahmen kennzeichnet die austauschbare Windlade. (Foto: Roman Wack, IBP)

Messungen konnten nur nachts durchgeführt werden, da die Umgebungsgeräusche tagsüber in der Kirche zu laut gewesen wären. Diese Geschäftsreisen waren immer mit Schwierigkeiten verbunden, da es häufig zu unerwarteten Problemen kam.

Die Details der Konstruktion dieser Pfeifenorgel können in dieser Publikation nur teilweise beschrieben werden. Sie stammen aus den Ergebnissen vieler Projekte, die die Orgelforscher des IBP in den letzten 27 Jahren durchgeführt haben. Die Symbiose von

wissenschaftlich-technischem Wissen und Instrumentenbau erweitert unser Klangwissen und schafft neue Verbindungen von Physik und Musik, Wissenschaft und Kunst.

Spezifische Eigenschaften (Beispiele)

- Eine Windlade kann ausgetauscht werden, um neue Windladen-, Ventilkonstruktionen sowie Pfeifenanordnungen zu testen (Abbildung 18).
- Die Pfeifenorgel ist weitestgehend transparent, um die Funktionsweise der Mechanik sichtbar zu machen und zu demonstrieren (Abbildung 19).
- Die Klaviatur ist für den Einbau von elektrischen Kontakten für elektrisch steuerbare Ventile vorbereitet.
- Im Hauptwerk gibt es eine Möglichkeit, komplette, neuentwickelte Register einzusetzen (Abbildung 20 a).
- Es stehen zwei verschiedene Windsysteme zur Verfügung: Ein traditionelles und ein innovatives Design mit Auslassventilsystem (Abbildung 20, rechts) [50, 51]. Das System kann zwischen traditioneller und innovativer Ausführung umgeändert werden.
- Die Gebläse werden von einem Frequenzumrichter zur stufenlosen Einstellung des Winddrucks gesteuert.
- Eine Kanzelle ist mit Vorbereitung eines CO₂-Anschlusses für die Sichtbarmachung der Luftbandbewegungen bei Lippenpfeifen versehen.

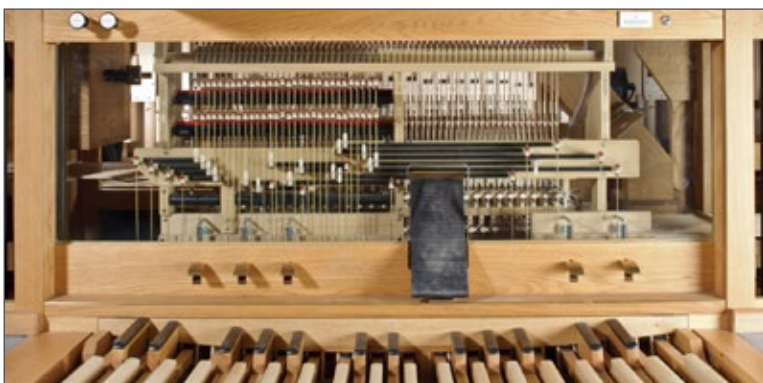


Abb. 19: Die Pfeifenorgel ist weitestgehend transparent, um die Funktionsweise der Mechanik sichtbar zu machen. (Fotos: Roman Wack, IBP)



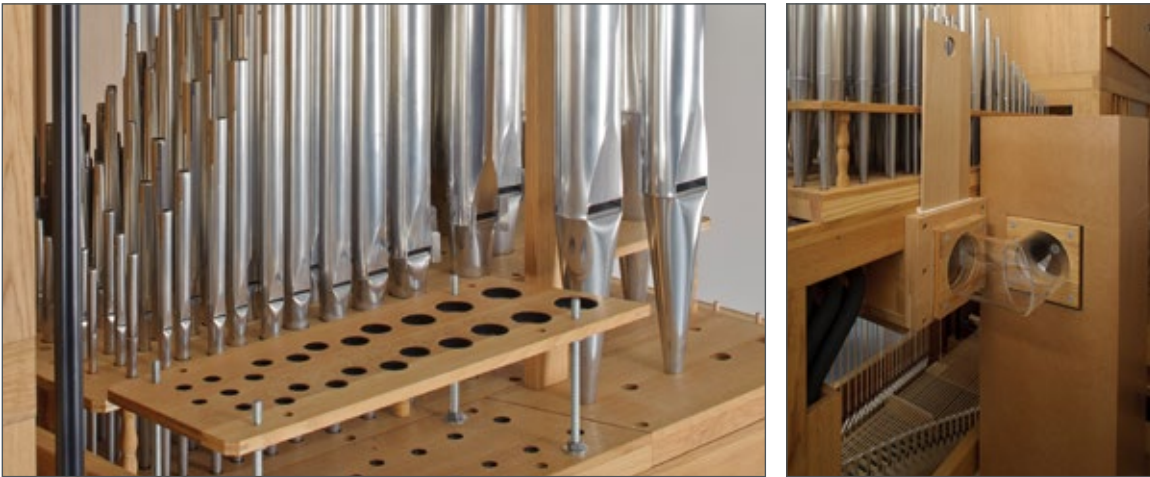


Abb. 20: Um neuartige Register testen zu können, steht eine Leerschleife zur Erprobung neu entwickelter Register mit in der Höhe regulierbarem Rasterbrett zur Verfügung (links); das Auslassventil mit Schalldämpfer, das als Teil des innovativen Windsystems montiert ist (rechts). (Fotos: Roman Wack, IBP)

- Mehrere Pfeifensorten wurden mit den neu entwickelten Pfeifen-Konstruktions-Softwaretools entworfen (Abbildung 21).
- Spezielle Windladen werden sowohl für Experimente als auch für Demonstrationen verwendet. Insbesondere eine transparente Windlade mit Tonventilen ist entweder manuell oder per Tastatur bedienbar (Abbildung 22 a). Eine Windlade mit Kegelventilen und mit Membranventilen ist ebenfalls erhältlich (Abbildung 22 b).
- Die Bewegung einer durchschlagenden sowie einer aufschlagenden Zunge kann mit Hilfe eines installierten Stroboskops visualisiert werden (Abbildung 22 b).
- Neben der Demonstration verschiedener Ventilsysteme können Untersuchungen an verschiedenen Windladen (Schleiflade, Kegellade, Taschenlade) durchgeführt werden. Sie können auch zur Demonstration innovativer Orgelpfeifen verwendet werden.
- Die Metall-Pedalpfeifen sind auf der linken Seite aus Orgelmetall (Zinn-Blei-Legierung) und auf der rechten Seite des Instruments aus Zink gefertigt. Dadurch kann direkt getestet werden, ob ein Einfluss des Materials auf den Pfeifenklang zu hören ist.
- Im Schwellwerk sind austauschbare, vom IBP entwickelte Jalousien montiert (siehe Details in Abschnitt „Beispiele für Innovationen in der Forschungorgel“, Abbildung 23).

Beispiele für Innovationen in der Forschungorgel

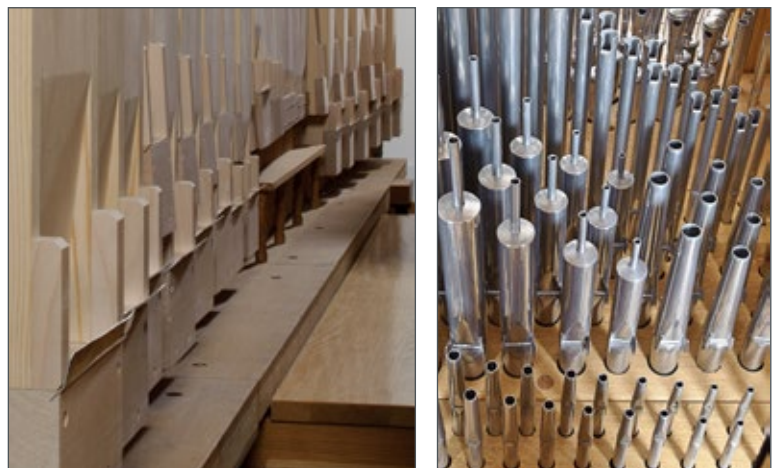
Mehrere Ergebnisse der Orgelforschung des IBP wurden in der Forschungorgel angewendet. So wurden beispielsweise das Auslegungsverfahren, die Konstruktion und der Steuermechanismus der Aus-

lassventile der innovativen neuen Windsysteme im Rahmen von aufeinander folgenden EU-Forschungsprojekten entwickelt [50,51] und teilweise veröffentlicht [52–54]. Die Abmessungen von großen Holz-Pedalpfeifen, darüber hinaus sowohl die Rohrflöten- als auch die Zungenpfeifen, wurden mit Hilfe eines am Fraunhofer IBP entwickelten Softwaretools entworfen und optimiert (Abbildung 21).

Neben den Innovationen aus der EU-geförderten Forschung wurden auch andere Neuentwicklungen eingesetzt. Die Anwendung verschiedener Materialien (Blei-Zinn-Legierung vs. Zink) für die Metall-Pedalpfeifen basiert auf den Ergebnissen eines früheren Forschungsprojektes, das von der Grillo-Werke Aktiengesellschaft in Auftrag gegeben wurde [55].

Orgeln haben normalerweise ein sogenanntes Schwellwerk: Einige Pfeifenregister stehen in einem „Orgelschrank“ hinter einer Jalousie (Schwellwerk), die geschlossen werden kann. Bei geschlossener Ja-

Abb. 21: Mehrere Pfeifensorten wurden mit den neu entwickelten Pfeifen-Konstruktions-Softwaretools entworfen: Pedal-Holzpfeifen (links), Rohrflöten (rechts). (Fotos: Roman Wack, IBP)



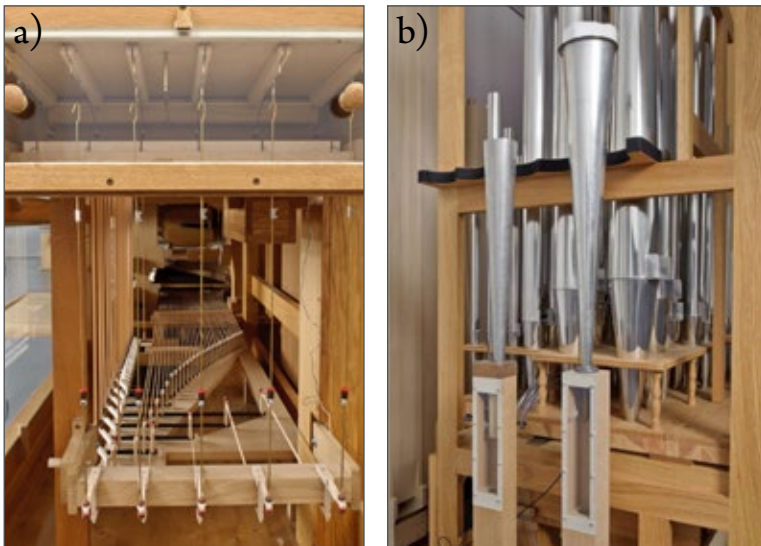


Abb. 22: a) Spezielle Windlade mit Tonventilen für Experimente und zur Demonstration (z. B. Vorführung von neuartigen Pfeifen). Sie ist entweder mit der Hand direkt oder von der Tastatur bedienbar. b) Eine Windlade mit Kegelventilen und mit Membranventilen. Die Bewegung einer durchschlagenden sowie einer aufschlagenden Zunge kann mit Hilfe eines installierten Stroboskops visualisiert werden (Die Zungenstiefel sind transparent). (Fotos: Roman Wack, IBP)

lousie hört man die Pfeifen leiser. Beim allmählichen Öffnen der Jalousie wird der Klang immer lauter. Die Orgel hat eine neuartige, vom IBP entwickelte Jalousie, die eine bessere Klangabstrahlung und eine höhere Dynamik der Orgelmusik ermöglicht.

Die traditionellen (a) und innovativen (b) Jalousien sind in Abbildung 23 dargestellt. Die Schwellwerkfront ist abnehmbar, daher können auch andere Jalousie-Konstruktionen getestet werden. Diese Jalousiekonstruktion wurde bereits früher im Rahmen einer bilateralen Zusammenarbeit zwischen IBP und Mühleisen entwickelt. Solange bei der traditionellen Version die Jalousie-Lamellen miteinander parallel aufgestellt sind (asymmetrische Schallabstrahlung),

öffnen sich die Jalousie-Lamellen bei der neuen Version trichterförmig um eine symmetrische Schallabstrahlung zu erreichen. Weiterhin ist die Innenseite der neuartigen Jalousien mit Absorptionsmaterial versehen. Damit klingt die Orgel beim geschlossenen Schwellwerk leiser und der Dynamikbereich wird vergrößert. Beim Öffnen der Jalousien drehen sich die Lamellen von innen nach außen, wobei die Schallabsorption sich bei offenem Schwellwerk verkleinert.

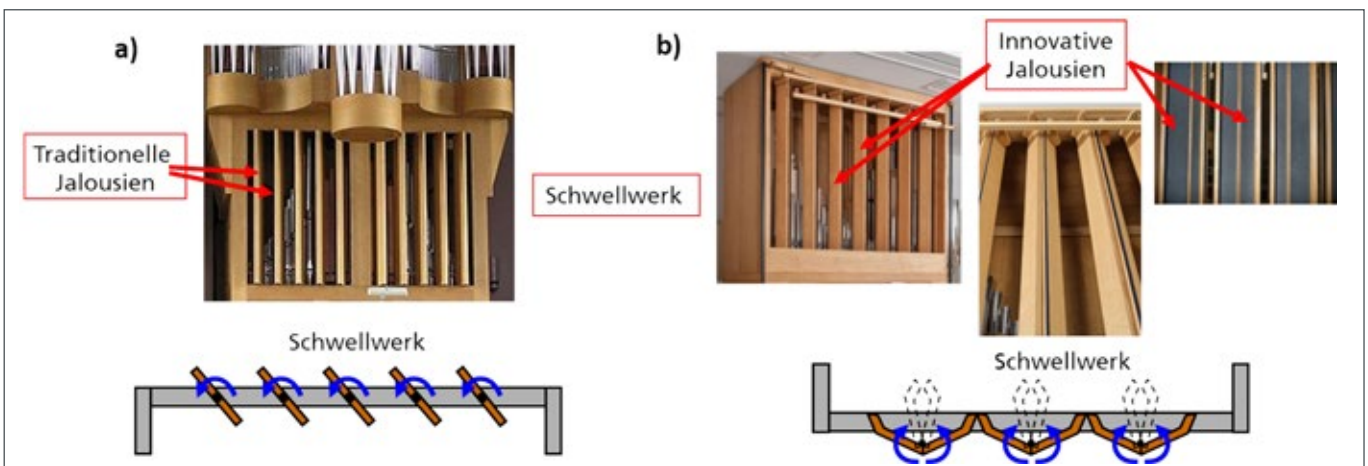
Im reflexionsarmen Raum des IBP wurden Modelle der traditionellen und innovativen Jalousiekonstruktionen untersucht. Als Schallquelle diente ein Lautsprecher mit rosa Rauschen. Die Richtcharakteristiken der beiden Konstruktionen sind in den Abbildungen 24a und b bei 2.500 Hz dargestellt. Die traditionellen Jalousien strahlen den Schall asymmetrisch ab. Die innovativen dagegen haben eine akustisch günstigere symmetrische Schallabstrahlung. Solange die Orgel bei der traditionellen Jalousie bereits nach einer geringeren Öffnung ziemlich schnell laut wird und demzufolge die Dynamik nicht sehr gut regelbar ist, verursacht die neuartige Version eine kontinuierliche Verstärkung des Klanges in einem größeren Dynamikbereich.

In Abbildung 24c ist die relative Schallverstärkung bezogen auf den geschlossenen Zustand der traditionellen und innovativen Schwellwerkverschlüsse bei 0 Grad in verschiedenen Frequenzbereichen dargestellt. Die innovative Konstruktion (Abb. 24d) erreicht eine deutlich (um ca. 5 dB) höhere relative Schallverstärkung. Darüber hinaus kann die Dynamik in kleineren Schritten (vor allem zu Beginn der Öffnung) beeinflusst werden als bei den herkömmlichen Jalousien.

Verbreitung der Forschungsergebnisse

Die Verbreitung von Forschungsergebnissen ist eine sehr wichtige Aufgabe des Fraunhofer IBP. Das entwickelte Softwaretool und die Ergebnisse der europä-

Abb. 23: Traditionelle (a) und innovative (b) Jalousien. Die innovativen, abnehmbaren Jalousien sind im Schwellwerk (b) montiert. Sie öffnen sich trichterförmig symmetrisch und sind von der Innenseite aus mit Absorbieren versehen (gefördert von Mühleisen, Leonberg).



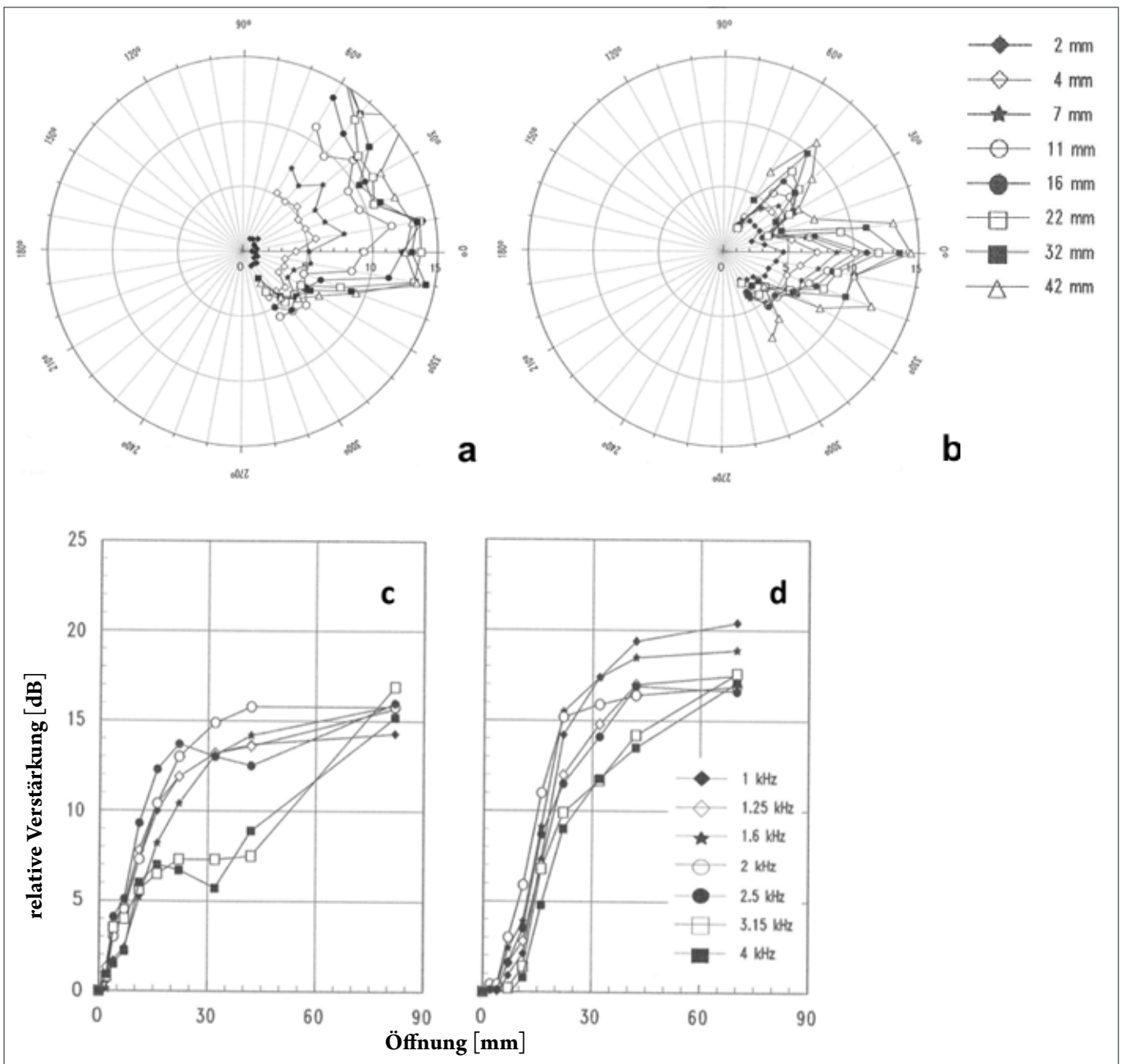


Abb. 24: a) Richtcharakteristik der traditionellen und b) der innovativen Jalousien in Abhängigkeit von der Öffnung in mm bei 2.500 Hz. Schallverstärkung der traditionellen (c) und innovativen (d) Schwellwerkverschlüsse bei 0 Grad in verschiedenen Frequenzbereichen.

ischen Forschungsprojekte werden in erster Linie an die an den Projekten beteiligten Orgelbauunternehmen in Form von Projektmeetings und Schulungen weitergegeben. Mehrere Jahre nach Projektabschluss wird das Recht zur Nutzung dieser Ergebnisse jedoch von den Partnern freigegeben und kann so durch mehrtägige Intensivkurse und Workshops an andere Orgelbauunternehmen weitergegeben werden. Diese Veranstaltungen werden unter Verwendung der Forschungsorgel organisiert. Dabei werden Orgelkonzerte sowie Konzerte mit Orgel und anderen Musikinstrumenten mit allgemein verständlichen Erklärungen zur Physik der vorgestellten Musikinstrumente aufgeführt.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde gezeigt, wie das Wissen über die Akustik der Orgel in die angewandte Forschung und Entwicklung zur Unterstützung der Orgelbauunternehmen übernommen wird. Die durch Vergleich mit Messergebnissen optimierte und verifizierte Computersimulation kann zur Unterstützung von Orgelbauunternehmen bei der Dimensionierung der Pfeifen eingesetzt werden. Es wurden je ein Softwaretool zur Optimierung des Windsystems, des Lippenpfeifenklangs (Mensurierung und Dimensionierung; hier beide nicht dargestellt) und des Zungenpfeifenklangs entwickelt. Es wurde erwähnt, dass bei

der Realisierung von Projekten der angewandten Forschung die verwertbaren Ergebnisse im Eigentum der Unternehmen stehen und daher erst mehrere Jahre nach Abschluss der Arbeiten veröffentlicht werden können. Aus diesem Grund ist geplant, die wichtigsten Ergebnisse früherer vertraulicher europäischer Projekte in einem Buch zusammenzufassen. Dennoch wurde die Wissensvermittlung so schnell wie möglich in Form von Workshops für Orgelbauunternehmen durchgeführt. Diese Workshops waren international die einzige Möglichkeit für Orgelbauer, sich über die Akustik der Orgel zu informieren und sich in die Anwendung von Forschungsergebnissen, Entwurfsmethoden und Software einzuarbeiten. Darüber hinaus können die umfangreichen Kenntnisse über die Klangerzeugung von Orgelpfeifen als Leitfaden zur Verbesserung der physikalischen Modelle der Klangerzeugung von anderen Blasinstrumenten dienen. Nicht zuletzt wird unsere Forschungsorgel hoffentlich dazu dienen, neue Kombinationen von Physik und Musik, Wissenschaft und Kunst zum Nutzen und zur Freude der Menschen beizutragen.

Anerkennungen, Danksagung

Die Autorin bedankt sich bei der Europäischen Kommission und bei den teilnehmenden Orgelbauern für die Unterstützung der verschiedenen Forschungsprojekte am Fraunhofer IBP:

Werkstätte für Orgelbau Mühleisen GmbH, Leonberg, Deutschland,
 Societé de Construction d'Orgues Muhleisen sarl, Straßburg, Frankreich,
 Fagmilia Artigiana Fratelli Ruffatti S.n.c., Padua, Italien,
 Orgelbau Schumacher GmbH, Baelen, Belgien,
 Blancafort, orgueners de Montserrat S. L., Collbato, Spanien,
 Oficina e Escola de Organaria, LDA, Esmoriz (Porto), Portugal,
 Pécsér Orgelbaumanufaktur GmbH, Pécs, Ungarn,
 Flentrop Orgelbouw B.V., Zaandam, Niederlande,
 Johannes Klais Orgelbau GmbH & Co. KG, Bonn, Deutschland,
 Orgelmakerij Boogaard, Rijssen, Niederlande,
 Marcussen & Son, Orgelbyggeri A/S, Aabenraa, Dänemark,
 Orgelwerkstatt Christian Scheffler, Sieversdorf (Frankfurt/Oder), Deutschland,
 Restaurierungwerkstatt für Orgeln Kristian Wegscheider, Dresden, Deutschland,
 Gerhard Grenzing S.A., Papiol, Spanien,
 Pels-D'Hondt Orgelbouw bvba, Herselt, Belgien,
 Mander Organs, London, Großbritannien,
 Marc Garnier Orgues Sarl, Morteau, Frankreich.

Literatur

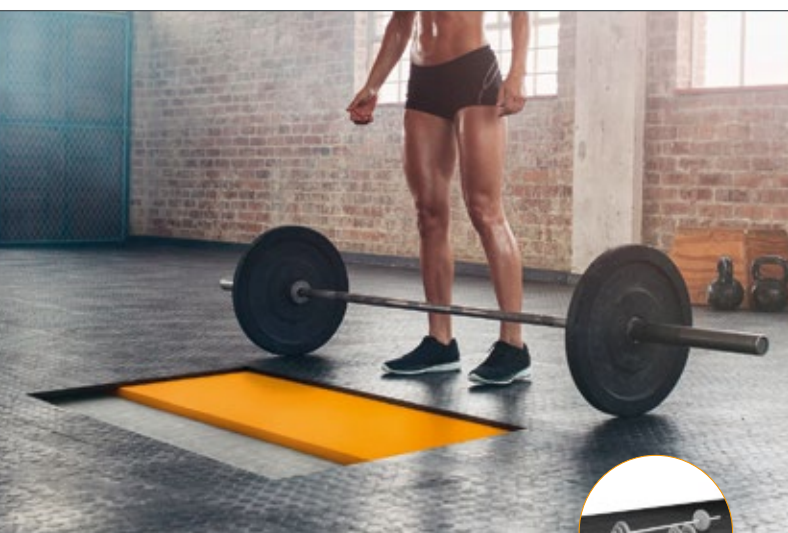
- [1] Angster, J.; Rucz, P.; Miklos, A.: 25 years applied pipe organ research at Fraunhofer IBP in Stuttgart (plenary lecture) In: Proc. of ISMA 2019, International Symposium on Music Acoustics, Detmold, Germany. ISBN 978-3-939296-16-4, p. 1–14, 2019.
<http://pub.dega-akustik.de/ISMA2019/data/index.html>.
- [2] Plitnik, G.: The Josef Angster Story. ISO Journal. Magazin of International Society of Organ Builders, No. 6, pp. 56–64, 1999.
- [3] Metz, F.: Josef Angster. Das Tagebuch eines Orgelbauers. Verlag der Donaueschinger Kulturstiftung, München, 2004.
- [4] Angster, Judit; Angster, Josef: On the history of the organ builder workshop of Josef Angster from the south-east European Pécs (Fünfkirchen). In: Bader, Rolf (Hrsg.): Concepts, experiments and fieldwork: Studies in systematic musicology and ethnomusicology. Lang: Frankfurt M., S. 181–184, 2010.
- [5] Ruffatti, F.; Angster, J.: Organbuilders and research: Two points of view. The Diapason, pp. 24–27, 2010.
<https://sgcweb.s3.wasabisys.com/thediapason/s3fs-public/webJan10p24-27.pdf>.
- [6] Intensivkurse – Orgelakustik, Workshops – Windsystem, Lippenpfeifen, Zungenpfeifen (auf Deutsch, Englisch, Französisch). Regelmäßige Veranstaltung am Fraunhofer IBP seit 1998.
- [7] Angster, J.; Rucz, P.; Miklós, A.: Acoustics of Organ Pipes and Future Trends in the Research. Acoustics Today. 13(1), pp. 10–18, 2017.
<https://acousticstoday.org/wp-content/uploads/2017/01/Acoustics-of-Organ-Pipes-and-Future-Trends-in-the-Research-Judit-Angster-1.pdf>
- [8] Miklos, A.; Angster, J.: Properties of the sound of labial organ pipes. Acust. Acta Acust. 86, pp. 611–622, 2000.
- [9] Rucz, P.: Determination of acoustic parameters of organ pipes by means of numerical techniques. Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Department of Telecommunications, prepared partly at the Fraunhofer IBP in Stuttgart. Master thesis, 2009.
- [10] Außerlechner, H.; Trommer, Th.; Angster, J.; Miklós, A.: Experimental jet velocity and edge tone investigations on a foot model of an organ pipe. J. Acoust. Soc. Am. 126(2), pp. 878–886, 2009.
<https://doi.org/10.1121/1.3158935>.
- [11] Außerlechner, H. J.: Strömungsakustische Untersuchungen des Schneidentons und Visualisierungen des Freistrahls mithilfe eines Orgelpfeifenfußmodells. Dissertation, Universität Stuttgart (angefertigt am Fraunhofer IBP), Fraunhofer Verlag, 2010
- [12] Trommer, Th.; Angster, J.; Miklós, A.: Roughness of organ pipe sound due to frequency comb. J. Acoust. Soc. Am. 131(1), pp. 739–748, 2012.
<https://doi.org/10.1121/1.3651242>.
- [13] Paál, Gy.; Angster, J.; Garen, W.; Miklós, A.: A combined LDA and flow-visualization study on flue organ pipes. Experiments in Fluids 46(6), pp. 825–835, 2006.
<https://doi.org/10.1007/s00348-006-0114-0>.
- [14] Rucz, P.; Augusztinovicz, F.; Angster, J.; Preukschat, T.; Miklós, A.: Acoustic behavior of tuning slots of labial organ pipes. In: Journal of the Acoustical Society of America 135.5, IF: 1.56, pp. 3.056–3.065, 2014. DOI: 10.1121/1.4869679.
<https://doi.org/10.1121/1.4869679>.
- [15] Rucz, P.; Augusztinovicz, F.; Angster, J.; Preukschat, T.; Miklós, A.: A finite element model of the tuning slot of labial organ pipes. In: Journal of the Acoustical Society of America 137.3, IF: 1.56*, pp. 1.226–1.237, 2015.
<https://doi.org/10.1121/1.4913460>.
- [16] Angster, J.; Miklós, A.: Documentation of the sound of a historical pipe organ. Applied Acoustics. 46, pp. 61–82, 1995.
- [17] Homepage Fraunhofer IBP Musical Acoustics:

- <http://www.ibp.fraunhofer.de/de/Kompetenzen/akustik/musikalische-akustik.html>
- [18] Traditioneller Orgelbau trifft auf moderne Wissenschaft. Film zur Erhaltung des „Transferpreises der Steinbeis-Stiftung – Lohn-Preis“ in Stuttgart, 2013. <https://www.steinbeis.de/de/steinbeis/transferpreis/preistraeger/2013-traditioneller-orgelbau-trifft-auf-moderne-wissenschaft.html>
- [19] Angster, J; Miklós, A.: Properties of the Sound of Flue Organ Pipes. Springer Handbook of systematic Musicology. Springer Handbooks 15558, pp. 141–155, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55004-5_8.
- [20] Angster, J.; Miklos, J.: Die Akustik der Orgel. In: Stefan Weinzierl (Hrsg.): Akustische Grundlagen der Musik. Laaber-Verlag, S. 291–318, 2014.
- [21] Angster, J.; Wik, T.; Taesch, Ch.; Miklós, A.; Sakamoto, Y.: Experiments on the influence of pipe scaling parameters on the sound of flue organ pipes. Forum Acusticum, Budapest, CD, Article 128_0, 603–609, 2005.
- [22] Angster, J.; Wik, T.; Täsch, Ch.; Sakamoto, Y.; Miklós, A.: The influence of pipe scaling parameters on the sound of flue organ pipes. J. Acoust. Soc. Am, Vol. 116, No. 4, Pt. 2, 2.513, 2004.
- [23] Angster, J.; Miklós, A.; Leistner, Ph.: Survey of the musical acoustics research at the Fraunhofer IBP in Stuttgart, Germany. Musical Acoustics: Xiangshan Science Conferences; the 401st session, pp. 80–85. Beijing, 2011.
- [24] Angster, J.: Musical Acoustics Research at the Fraunhofer IBP in Stuttgart, Germany (in Chinese). In: 2016' The Fifth Symposium of Musical Instrument of China, 3–5 December, Beijing. pp. 38–39, 2016.
- [25] Angster, J.; Wik, T.; Taesch, Ch.; Miklós, A.; Sakamoto, Y.: Experiments on the influence of pipe scaling parameters on the sound of flue organ pipes. Forum Acusticum, Budapest, CD, Article 128_0, 603–609, 2005.
- [26] Angster, J.; Wik, T.; Täsch, Ch.; Sakamoto, Y.; Miklós, A.: The influence of pipe scaling parameters on the sound of flue organ pipes. J. Acoust. Soc. Am, Vol. 116, No. 4, Pt.2, 2.513, 2004.
- [27] European research project – research for the benefit of SMEs (small and medium sized enterprises). CRAFT – Development of an innovative organ pipe design method. Contract No: G1ST-CT-2002-50267 (DEMORPIPE), 2003–2005.
- [28] Seventh Framework Program of the European Union; Research for SMEs (FP7-SME-2007-1): Innovative Methods and Tools for the Sound Design of Organ Pipes; (INNOSOUND). Contract No: INNOSOUND-222104, 2008–2010.
- [29] Rucz, P.; Trommer, Th.; Angster, J.; Miklós, A.; Augusztinovicz, F.: Sound design of chimney pipes by optimization of their resonators. J. Acoust. Soc. Am. 133 (1), pp. 529–537, 2013. <https://doi.org/10.1121/1.4770236>.
- [30] Angster, J.; Miklos, A.; Rucz, P.; Augusztinovicz, F.: The physics and sound design of flue organ pipes. J. Acoust. Soc. Am. 132(3), p. 2069, 2012. <https://doi.org/10.1121/1.4755627>.
- [31] Rucz, P.: Innovative methods for the sound design of organ pipes. PhD thesis. Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Electrical Engineering and Informatics, Doctoral School of Electrical Engineering and Fraunhofer IBP. 2014.
- [32] Pitsch, S.; Rucz, P.; Angster, J.; Miklós, A.; Kirschmann, J.: Scaling software for labial organ pipes. In: Fortschritte der Akustik – AIA-DAGA 2013, 39. Jahrestagung für Akustik, Meran, Italien, S. 299–302.
- [33] Fontestad Esteve, E.: Innovative method for the development of optimal scaling of the depth and width of wooden organ pipes. Institute for Telecommunication and Multimedia Applications (iTEAM). TU Valencia, prepared at the Fraunhofer IBP in Stuttgart, Master thesis, 2008.
- [34] Plitnik, G. R.; Angster, J.: The influence of pipe organ reed curvature on tone quality. J. Acoust. Soc. Am., pp. 3.502–3.511, 2012.
- [35] Angster, J.; Dolde, K.; Rucz, P.; Miklós, A.: Einfluss der Kehlenform auf den Klang der Trompeten-Zungenorgelpfeifen. Oral presentation at the DAGA2014 conference, Oldenburg, Germany, March 11th, 2014.
- [36] Angster, J.; Dolde, K.; Rucz, P.; Miklós, A.: The influence of the shallot shape on the sound of Trompete reed pipes. In: Journal of the Acoustical Society of America 135 (2014). Abstract of ASA meeting paper, p. 2.244. <https://doi.org/10.1121/1.4877348>.
- [37] Preukschat, T.: Untersuchung der Klangentstehung bei Zungenorgelpfeifen. Diplomarbeit. Universität Stuttgart, 1. Physikalisches Institut (angefertigt am Fraunhofer IBP), 2012.
- [38] Miklós, A.; Angster, J.; Pitsch, S.; Rossing, T.D.: Reed vibration in lingual organ pipes without the resonators. J. Acoust. Soc. Am. 113(2), pp. 1.081–1.091, 2003. <https://doi.org/10.1121/1.1534101>.
- [39] Miklós, A.; Angster, J.; Pitsch, S.; Rossing, T.D.: Interaction of reed and resonator by sound generation in a reed organ pipe. J. Acoust. Soc. Am. 119(5), pp. 3.121–3.129, 2006. <https://doi.org/10.1121/1.2188372>.
- [40] Seventh Framework Program of the European Union; Research for SMEs (FP7-SME-2007-1): Innovative Sound Design of Reed Organ Pipes (REEDDESIGN); Contract No: REEDDESIGN-286539, 2011–2013.
- [41] Angster, J., Miklos, A.: Die Wechselwirkung von Zunge und Resonator bei der Klangerzeugung in einer Zungenpfeife. ISO Journal Nr. 43, S. 27–45, April 2013.
- [42] Angster, J.; Rucz, P.; Miklós, A.: Detailed measurements on lingual organ pipes for developing innovative methods and software for the pipe design. 171st meeting of the Acoustical Society of America, Salt Lake City, USA, 2016. Special Session: Hot topics. <https://doi.org/10.1121/1.4950306> <https://www.youtube.com/watch?v=ct-wHcbRpyY>
- [43] European Research Project in the Sixth Framework Program of the European Union; GROWTH program; CRAFT: Innovative Design Method for Matching the Pipe Organ to the Acoustics of the Room (INNOPIPEORG); Contract No: COOP-CT-2005-017712, 2005–2008.
- [44] Matoses Ortiz, V.M.: Innovative Messmethode für die Bestimmung der raumakustischen Eigenschaften im tiefen Frequenzbereich zur Anpassung der Orgel an den Raum. Stuttgart, Universität Stuttgart, Institut für Systemtheorie und Bildschirmtechnik, angefertigt am Fraunhofer IBP, Diplomarbeit, 2008.
- [45] Wilibald Gurlitt, H.: Riemann Musik Lexikon. Heinrich Eggebrecht (Hrsg.): Sachteil, Mainz: Schott 1967, S. 560.
- [46] Wikipedia: [https://de.wikipedia.org/wiki/Mensur_\(Musik\)#cite_note-Riemann-1](https://de.wikipedia.org/wiki/Mensur_(Musik)#cite_note-Riemann-1)
- [47] Trommer, Th.: Entwicklung eines Systems zur Simulation der Abstrahlung von Orgelpfeifen. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik, angefertigt am Fraunhofer IBP, Diplomarbeit, 2007.
- [48] Verbindungen von Physik und Musik, von Wissenschaft und Kunst durch die Forschungsorgel am Fraunhofer IBP, Forschung im Fokus, Januar 2012. <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/presse-medien/forschung-im-fokus/koenigin-der-instrumente.html>
- [49] Angster, J., Pitsch, S., Dubovski, Z., Leistner, Ph.; Miklós, A.: Research organ for pipe organ research at the Fraunhofer IBP in Stuttgart. In: Fortschritte der Akustik – AIA-DAGA 2013, 39. Jahrestagung für Akustik, Meran, Italien, S. 295–298.
- [50] European research project – research for the benefit of SMEs (small and medium sized enterprises). CRAFT – Development and Modernization of the Wind Supply Sys-



**Dr. rer. nat.
Judit Angster**
Fraunhofer Insti-
tut für Bauphysik
(IBP), Stuttgart

- tem of Pipe Organs, EU CRAFT research project, Contract no: BRST-CT98-S247, 1998–2000.
- [51] European research project – research for the benefit of SMEs (small and medium sized enterprises). CRAFT – Advanced Computer Designed Open Wind Systems for Pipe Organs, EU CRAFT research project, COMPDESORG, Contr. No.: G1ST-CT2001-50139, 2002–2003.
- [52] Pitsch, S.: Entwicklung von neuartigen offenen Windsystemen für Kirchenorgeln, Dissertation, Universität Siegen (angefertigt am Fraunhofer IBP). Logos Verlag Berlin, 2004.
- [53] Angster, J., Pitsch, S., Miklós, A.: Design of new wind systems for pipe organs. CD-Rom: Int. Symp. On Musical Acoustics, ISMA2007, Barcelona, Spain, 3-S2-1, 2007.
- [54] Popov, A.: Entwicklung von Dämpfungsmöglichkeiten für Druckschwankungen in Orgelwindsystemen. Universität Stuttgart, Institut für Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium, angefertigt am Fraunhofer IBP, Diplomarbeit, 2007.
- [55] Angster, J.; Dubovski, Z.; Pitsch, S.; Miklós, A.: Impact of the Material on the Sound of Flue Organ Pipes (Acoustic and Vibration Investigations with Modern Measuring Techniques). In: Birnbaum, Clemens (Ed.): Analysis and description of music instruments using engineering methods. Halle (Saale): Stiftung Händel-Haus, 2011, pp. 34–41. ■



Effektiver Schallschutz für Hantelbereiche in Fitness Studios

Produkt Vorteile:

- Lösungen bis 29 dB(A) ohne zusätzliche Estrichmasse
- Geprüfte Standsicherheit
- Reduziertes Verletzungsrisiko durch Bekämpfung rückfedernder Gewichte
- Werterhalt der Räumlichkeiten, keine Schädigung des Bodens
- Langlebig und wartungsfrei über Jahrzehnte
- Einfache Implementierung ohne große Umbauarbeiten

www.getzner.com/g-fit

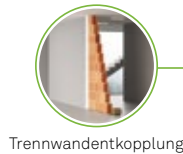
g-fit
by getzner

ACOUSTICORK

The sound of silence

Amorim Cork Composites entwickelt besondere Verbundmaterialien zur Schalldämmung und Schwingungsisolierung. Bei diesen Anwendungen sind besonders Dauerelastizität und Langlebigkeit unter starker mechanischer Beanspruchung gefragt. Dabei sorgt besonders Kork, als natürlich vorkommender Grundstoff, durch seine mikrozelluläre Wabenstruktur für einzigartige technische Eigenschaften, welche zur Kombination aus Isolierung und Dämpfung führen.

Trittschallisolierung unter Nutzböden



Trennwandentkopplung

Trittschallisolierung unter Estrich



Randdämmstreifen



AMORIM CORK COMPOSITES

amorimcorkcomposites.com