



## **Fachausschuss Musikalische Akustik in der DEGA**

# **Musikalische Akustik zwischen Empirie und Theorie**

Januar 2016

**Tagungsband zum Seminar des FAMA in der DEGA**  
Hamburg, 23.-24.10.2014

# **Musikalische Akustik zwischen Empirie und Theorie**

## **Seminar des Fachausschusses musikalische Akustik in der DEGA**

Hamburg, 23.-24.10.2015

Tagungsleitung: Robert Mores

Tagungsort: Mediencampus Finkenau an der HAW Hamburg

Bezug: Elektronische Version über die Internetseite der DEGA  
[www.dega-akustik.de/fachausschuesse/ma/dokumente](http://www.dega-akustik.de/fachausschuesse/ma/dokumente)

Herausgeber: Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.  
Voltastraße 5  
13355 Berlin  
[dega@dega-akustik.de](mailto:dega@dega-akustik.de)  
<http://www-dega-akustik.de>

Kontakt: Prof. Dr. Robert Mores  
Hochschule für Angewandte Wissenschaften  
Fakultät Design Medien Information  
Finkenau 35  
22081 Hamburg  
[robert.mores@haw-hamburg.de](mailto:robert.mores@haw-hamburg.de)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen  
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter  
<http://dnb.d-nb.de> abrufbar.  
Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), Berlin, 2016  
ISBN: 978-3-939296-09-6

## Vorwort

Der 1990 gegründete Fachausschuss Musikalische Akustik (FAMA) in der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA) veranstaltet in loser Folge Veranstaltungen verschiedener Formen mit dem Ziel, neben Mitgliedern des Fachausschusses und DEGA-Mitgliedern auch Herstellern von Musikinstrumenten, Musikern und anderen interessieren Gruppen Inhalte und Ergebnisse der Musikalischen Akustik nahe zu bringen. Die Organisation übernehmen typischerweise einzelne Mitglieder in Verbindung mit den Institutionen in denen sie tätig sind.

Das entsprechende Herbstseminar 2015 fand in Hamburg statt. Veranstaltungsorte waren das Institut für Systematische Musikwissenschaft der Universität Hamburg (Prof. Dr. habil. Rolf Bader) sowie der Mediencampus Finkenau der HAW Hamburg (Prof. Dr. Robert Mores).

Mit den ca. 40 Teilnehmern und dem regen fachlichen Austausch war dies ein gut besuchtes und erfolgreiches FAMA Seminar. Ich danke allen Teilnehmern und Vortragenden für die Beiträge. Ich danke der Fakultät DMI für die Bewirtung.

Robert Mores

## Thema

Zu den aktuellen Fragestellungen der musikalischen Akustik finden sich naturgemäß viele empirische Arbeiten aber zunehmend auch theoriegeleitete Arbeiten. Das Seminar soll den Diskurs hierzu anregen. Zudem forschen im Hamburger Umfeld verschiedene Personen zu Fragen der musikalischen Akustik, ohne dabei den einschlägigen Instituten oder dem FAMA anzugehören. Diese Personen sollten ebenfalls zu einem Beitrag aufgerufen werden können.

Unter dem Motto

### **Musikalische Akustik zwischen Empirie und Theorie**

konnten 16 Vorträge und 4 Präsentationen/Interaktionen mit der gewünschten inhaltlichen Breite aufgerufen werden.

## Programm

### Exkursionen

Freitag, den 23. 10. 2015

#### **Betriebsbesichtigung bei Steinway & Sons, Hamburg**

Begehung und Erläuterungen zu allen Schritten der Fertigung von Konzertflügeln, einschließlich Materialauswahl und -lagerung, Fertigung von Komponenten, Saitenherstellung, Montage, Lackierung, Intonation. Etwa 20 Teilnehmer.

#### **Instrumentensammlungen, insbes. Tasteninstrumente (Prof. Beuermann) im Museum für Kunst und Gewerbe, Hamburg**



Eine ausführliche instrumentenkundliche Führung insbesondere zu den Cembali und Hammerklavieren wurde begleitet durch ein fachkundiges Anspiel der Instrumente. Zu den verschiedenen Epochen und Innovationen an den Instrumenten wurden spezifische Kompositionen angespielt. Etwa 15 Teilnehmer.

#### **Arp-Schnitger-Orgel in der Hauptkirche St. Jacobi, Hamburg**



Erläuterungen zu der für manche Teile der Orgel über 400 Jahre alten Geschichte durch den ehemaligen Organisten Herrn Zimmermann sowie fachkundiges Anspiel der über 60 Register, darunter auch solche mit besonderer Klang-Raum-Wirkung. Etwa 30 Teilnehmer.

# Programm

## Fachseminar

Freitag, den 23. 10. 2015

Institut für Systematische Musikwissenschaft, Universität Hamburg

Chair: Rolf Bader

<p><b>Microphone array measurements of the grand piano</b></p> <p>Niko Plath, Florian Pfeifle, Christian Koehn, Rolf Bader</p>	<p>In an on-going project a series of measurements is taken on four concert grand pianos in seven different stages of production. A noninvasive microphone array method is utilized, impulse responses are obtained through the SineSweep technique, the measured sound pressure is back-propagated to the radiating soundboard surface using a minimum energy method. First results are presented.</p>	8
<p><b>Die Relevanz der Körperschallentkopplung für die Mikrofonierung</b></p> <p>Rasmus Leuschner, Martin Schneider, Malte Kob</p>	<p>Muss nur über Körperschallentkopplung nachgedacht werden, wenn Störgeräusche an das Mikrofon gelangen könnten, oder macht es unter bestimmten Bedingungen einen klanglichen Unterschied, ob man das Mikrofon gegen Körperschall entkoppelt oder nicht? Gelangt beispielsweise bei der Aufnahme eines Flügels ein bedeutender Teil des vom Mikrofon aufgenommenen Schalls nicht auf dem Luftweg, sondern über den Boden zum Mikrofon, wenn das Mikrofonstativ auf demselben Boden steht wie das Instrument und keine Maßnahmen zur Körperschallentkopplung ergriffen werden?</p>	10
<p><b>Virtual Acoustics Tools Applied to the Study of Music Performance</b></p> <p>Sebastià V. Amengual, Tapiro Lokki, Malte Kob</p>	<p>Tools such as auralization, spatial measurements and virtual acoustic sources can be applied to the study of music performance in an attempt to provide a better understanding on the effects of room acoustics on musicians and audience. The presentation gives an overview on different methods as well as an introduction to some projects in progress.</p>	13
<p><b>Spatial Sound Impression and Precise Localization by Psychoacoustic Sound Field Synthesis</b></p> <p>Tim Ziemer</p>	<p>A psychoacoustic sound field synthesis system is presented which recreates the radiation patterns of musical instruments for an extended listening area. By applying a “precedence fade” it even allows wave fronts arriving from angles opposing to the virtual source position. The result is a precise source localization together with a spatial sound impression.</p>	17
<p>Live-Demo Spatial Sound Impression</p>		

# Programm

## Fachseminar

Samstag, den 24. 10. 2015

Mediencampus Finkenau, HAW Hamburg

Chair: Robert Mores

<b>Numerische Simulation der Synchronisation von Orgelpfeifen</b>  Jost Leonhardt Fischer Rolf Bader	Wir präsentieren einen neuen Ansatz zur Untersuchung der wechselseitigen Kopplung zweier Orgelpfeifen durch numerische Simulation. Durch Lösung der kompressiblen Navier-Stokes Gleichungen mit geeigneten Rand- und Anfangsbedingungen lässt sich so das gegenseitige Wechselspiel der nichtlinearen Kopplung zweier Orgelpfeifen über die Luft, welches zu Synchronisation führt, nachzeichnen. Wir geben einen detaillierten Einblick in die Implementation und die Analyse solch komplexer CFD/CAA Simulationsrechnungen.	23
<b>Maßnahmen zur Verbesserung des Klangs von Saxophonen</b>  Jan-Mark Batke	Um den Klang eines Saxophons zu verbessern, wird oft der S-Bogen ausgetauscht. Andere Maßnahmen sind das Anbringen einer Phase an der S-Bogen-Mündung, das Einlegen einer Folie im S-Bogen oder auch ein Aufsteckring am Mundstück. Ziel des Vortrags ist die Diskussion, ob sich Veränderungen theoretisch begründen und ggf. andere als empirische Maßnahmen finden lassen.	31
<b>Physics of playing the bluesharps</b>  Alfred Förttsch	Bend notes are the trademark of traditional harmonica blues. Overbends are the spice of modern bluesharps playing. We review physical models and explore their limits by confronting them with playing experience. Live demonstrations by the author will feature the instrument and its characteristics.	35
<b>Studying the Sound Generation in the Bassoon</b>  Timo Grothe	Ein Minimalmodell der Rohrblatt-Resonator-Interaktion wird angewendet um die Schallentstehung beim Fagott zu simulieren. Für gemessene quasistationäre Werte von Lippenkraft und Blasdruck wird der instationäre Druckverlauf im Rohrblatt berechnet und mit experimentellen Beobachtungen verglichen. Die Modellergebnisse für die klingende Frequenz werden empirischen Abschätzungen aus der Eingangsimpedanzkurve des Resonators ("Summenprinzip") gegenübergestellt.	39
<b>The Stroh violin and the phonograph</b>  Polina Pirch Malte Kob	The principle of sound generation and propagation in the Stroh violin and the phonograph is in the focus of this contribution. Particularly the construction, the mechanical sound amplification of the horn, and acoustical profiles of the Stroh violin and the phonograph are investigated. Results of the phonograph indicate a coincidence of formant-like coloration of the voice with resonances of the transfer path. Also, sound transfer functions and radiation patterns of three Stroh violins are compared to two reference violins. Listening examples are presented.	44
<b>Altern Geigen? Tonholz aus Sicht des Anwenders und des Wissenschaftlers</b>  Heinz Dimigen Eva Dimigen	Tonholz wird von den Anwendern an Hand von Kriterien wie Wachstumsmerkmale, Alter, Resonanzverhalten etc. empirisch beurteilt. Messungen wichtiger akustischer Parameter wie Schallgeschwindigkeit und Dämpfung an Tonholz sowie an Decken einfacher und erstklassiger Streichinstrumente ergeben ein differenzierteres Bild; insbesondere Untersuchungen zur langzeitigen Alterung führen zu überraschenden Ergebnissen.	47

<b>Die Entwicklung der Frequenzkurvenmess-technik im Institut für Musikinstrumentenbau</b>  Gunter Ziegenhals	Der Vortrag schildert die einzelnen Etappen der Entwicklung der Frequenzkurvenmesstechnik im IfM von den Arbeiten Hermann Meinels in den 1930er Jahren bis zur Gegenwart. Dabei geht es insbesondere darum zu begründen, warum gerade die angewandten Methoden, Verfahren und Parameter ausgewählt wurden. Die Motivation des Vortrages geht auf eine Diskussion zwischen R. Mores und G. Ziegenhals auf der DAGA 2012 in Darmstadt zurück.	51
<b>Vergleichende Untersuchungen an Wolftötern für Celli</b>  Susanne Puchelt	Ausgangspunkt des Vortrages bildet eine Zusammenfassung verschiedener Auftrittsformen des Wolfes. Darauf aufbauend berichtet der Beitrag über Untersuchungen an handels-üblichen Wolftötern hinsichtlich ihrer Funktionsweise und ihrer Wirkung. Es handelt sich letztlich ausnahmslos um Resonatoren. Ihre Wirksamkeit wird entscheidend von der Abstimmbarkeit auf die störenden Resonanzen und vom Befestigungsort geprägt. Es verbleiben aber auch offene Fragen.	58
<b>Sound, Pitch(es) and Tuning of a Historic Carillon</b>  Albrecht Schneider Marc Leman  <i>(nur Abstract)</i>	The City of Bruges in Flanders owns one of the finest carillons in Europe. Of its 47 bells, 26 are historic specimens, cast by Joris Dumery between 1742 and 1748. From sound recordings of each bell, we analyzed the spectrum and calculated virtual pitches according to two methods. To check the precision of the inner tuning of a single bell, the impulse response of the largest bell was measured. From the physical data of the bells (weight, diameter) and the fundamental frequencies, functional correspondences between these parameters were calculated. From the fundamental frequencies, the tuning of the 26 Dumery bells to a musical scale is derived, and a matrix of all intervals (26 x 26 fundamental frequencies) was established which further illuminates the tuning as reflected by objective (physical) data. A second parameter relevant for tuning is the so-called strike note (a virtual pitch). Pitch perception of the bell sounds and recognition of intervals realized with these bell sounds was studied in some (preliminary) experiments. Data underpin the ambiguity of pitch(es) in single bell sounds as well as in intervals presented in succession (sound A : sound B). Findings are evaluated in regard to perception and musical issues.	./.
<b>Preliminary results of the effect of reverberation and sound delay on organ playing</b>  Sebastià V. Amengual, Winfried Lachenmayer, Dominik Kisic, Malte Kob	A study on the influence of different reverberation on the musical performance of organ players is presented. Using a room enhancement system the acoustics of the room are modified in real time while different musicians are performing on an organ with MIDI interface. The experiment is recorded and the performance variations are analyzed.	64
<b>Das Klangobjekt und seine Wirkung</b>  Thomas Görne  <i>(nur Abstract)</i>	Der Vortrag gibt einen Überblick über den Stand der Forschung zur Klangwahrnehmung von Helmholtz bis heute. Bei der Suche nach den Mechanismen der Wirkung von Klang kommen Aspekte der Hörphysiologie und der Wahrnehmungspsychologie ebenso zum Tragen wie Überlegungen zur Informationshaltigkeit von Klang, zur Tonhöhenempfindung, zu Konsonanz und Harmonie.	./.

<i>Kurzvortrag und Interaktion</i> <b>Der Körper als Werkzeug zum Musikverständnis und -lernen in einer unbekannten Dimension.</b> Viktoria von Kirschbaum	Lernen mit dem Körper: Jeder kann Geige spielen, wenn er ein Matchboxauto mit einem Taschenspiegel koordinieren kann.  Musik mit dem Körper erfahren: Unser Körper mit seinen Bewegungen ist der Schlüssel zu unserem Verständnis der Musik in einer unbekannten Dimension.	68
<i>Kurzvortrag und Interaktion</i> <b>Virtuelle Violine</b> Robert Mores	Die virtuelle Violine ist ein Werkzeug für Geigenbauer, um feinste Modelljustagen vorab zu auralisieren - in Samplingqualität. Kein Vortrag, sondern vor allem die Gelegenheit, selbst zu spielen.	70

## Microphone Array Measurements of the Grand Piano

Niko Plath<sup>1</sup>, Florian Pfeifle, Christian Koehn, Rolf Bader

*Institute of Systematic Musicology, University of Hamburg, Germany, <sup>1</sup>Email: niko.plath@uni-hamburg.de*

### Abstract

In an on-going project a series of measurements is taken on four concert grand pianos in seven different stages of production. A noninvasive microphone array method is utilized, impulse responses are obtained through the SineSweep technique, the measured sound pressure is back-propagated to the radiating soundboard surface using a minimum energy method. First results are presented.

### Introduction

The majority of the sound energy radiated by a grand piano originates from the soundboard, which amplifies the vibrations of the strings via the bridge. Due to the large size of the soundboard as well as its irregular shape, measuring deflection shapes is a nontrivial task. Paul Bilhuber was one of the first to systematically describe the impact of slight design variations to the vibrational behavior of a piano soundboard [1]. Common ways of exciting the Soundboard are loudspeakers [2], impact hammers [3] and acoustic shakers [4]. Traditionally vibrational responses are measured with piezoelectric transducers which are glued to the soundboard [5]. A laser speckle pattern interferometry method is used by Moore to visualize deflection shapes up to 3 kHz, experimentally confirming a transition frequency of approx. 1 kHz, from which on the soundboard motion is governed by the ribs [6]. Chaigne uses a scanning laser vibrometer to measure the transverse velocity of an upright piano soundboard, showing the influence of irregular rib spacing on the higher frequency operating deflection shapes [7]. Piezoelectric accelerometers can affect the acoustic vibrations of the soundboard due to the added mass. Optics based methods have other disadvantages such as the need of averaging over longer time spans, thus without great effort being able only to measure stationary behavior. To this end, a noninvasive microphone array method is utilized for the present work. A series of measurements is taken on four concert grand pianos in seven different stages of production, starting with the glue-laminated soundboard planks and ending with the completely assembled piano in concert tuned state. Comparable measurements of an unmounted grand piano soundboard are published by Berthaut [8]; therein measurements on the vibrational characteristics of a baby grand soundboard with free boundary conditions are presented.

### Experimental Arrangement

Figure 1 shows the experimental configuration: The array consists of 105 microphones successively placed in 18 positions parallel to the piano soundboard, resulting in a

total number of 1890 recordings (48 kHz, 24 bit) of which 1289 microphones cover the actual surface. A distance of 40 mm between each microphone yields a theoretical spatial resolution of up to approx. 4 kHz. The Soundboard is excited using an acoustic vibrator (Brüel & Kjaer model 4809) at 15 positions associated with string termination points on the bass and main bridge. Sensors at the driving points measure the input force (PCB 208C01) and the resulting acceleration (PCB 352C23) for input mobility calculations. For the excitation an exponential sine sweep is used:

$$f(t) = \sin \left[ \frac{T\omega_1}{\ln(\frac{\omega_2}{\omega_1})} \left( \exp \frac{t}{T} \ln(\frac{\omega_1}{\omega_2}) - 1 \right) \right] \quad (1)$$

with  $\omega_1 = 2\pi * 1$  (rad/s),  $\omega_2 = 2\pi * 24000$  (rad/s) and  $T = 24$  (s).

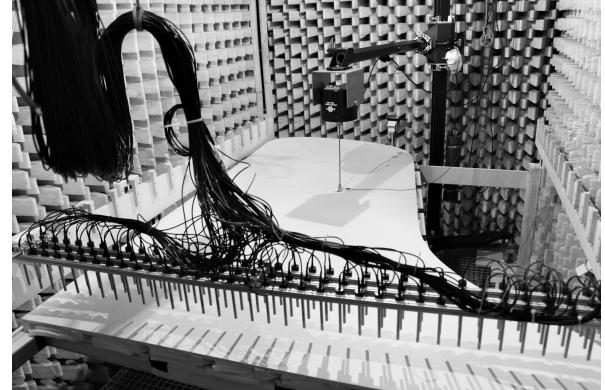


Figure 1: Experimental arrangement

### Analysis

To obtain impulse response functions the so called *Sine sweep technique* is utilized [9]. The method - originally proposed for impulse response measurements in room acoustics - is successfully utilized for piano soundboard measurements by Ege [10].

The deconvolution process is realized by a linear convolution of the measured output  $y(t)$  with the temporal reverse of the excitation sweep signal  $f(t)$  (1):

$$h(t) = y(t) \otimes f^{-1}(t) \quad (2)$$

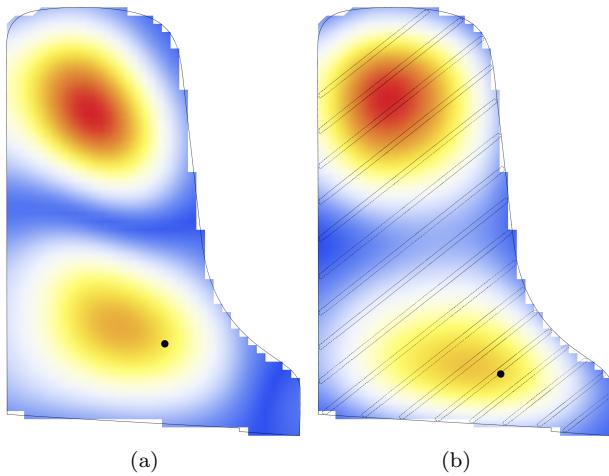
If  $T$  is large enough the linear part of an impulse response of a weakly non-linear system is temporally separated from several non-linear parts, representing the harmonic distortion of various orders. As a consequence it is possible not only to calculate the linear impulse response of

a mildly non-linear system but also to gain information about the systems level of non-linearity.

The measured sound pressure is back-propagated to the radiating soundboard surface using the minimum energy method proposed by Bader [11, 12].

## Results

Figure 2 shows operating deflection shapes of the soundboard driven at resonance peaks (a) 24 Hz and (b) 25 Hz in two different stages of production. Gluing the ribs to the back of the soundboard increases the stiffness and thus increases the resonance peak frequencies.



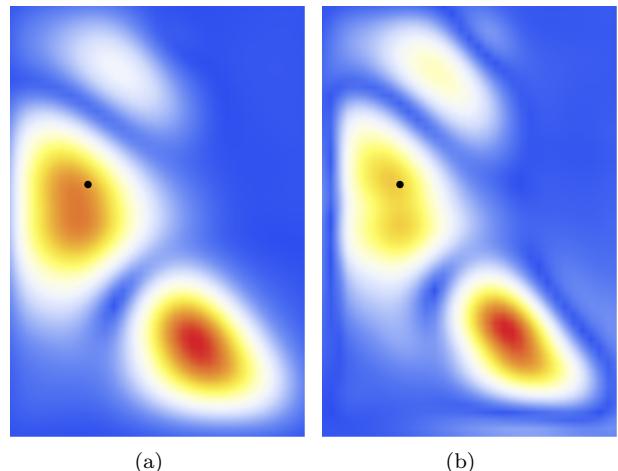
**Figure 2:** Operating deflection shapes at (a) 24 Hz in production stage 1 and (b) 25 Hz in production stage 2. Application of the ribs raises the resonance peak frequencies due to increased stiffness.

Figure 3 shows an exemplary result of propagating the recorded sound pressure back to the soundboard surface. The reconstruction even shows the boundary of the soundboard where no radiation can take place and which is not visible in the measurement data.

The empirical findings will contribute to the formulation of a real-time physical model to help piano makers estimate the impact of design changes on the generated sound.

## References

- [1] P. H. Bilhuber, “The Influence of the Soundboard on Piano Tone Quality,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 11, no. 3, pp. 311–320, 1940.
- [2] K. Ege and X. Boutillon, “Vibrational and acoustical characteristics of the piano soundboard,” in *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics*, pp. 1–7, 2010.
- [3] R. Corradi, P. Fazioli, and S. Marforio, “Modal analysis of a grand piano soundboard,” in *Proceedings of ISMA2010*, pp. 59–72, 2010.
- [4] N. Giordano, “Sound production by a vibrating piano soundboard: Experiment.,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 104, no. 3, pp. 1648–1653, 1998.
- [5] H. Suzuki, “Vibration and sound radiation of a piano soundboard,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 80, no. 6, pp. 1573–1582, 1986.
- [6] T. R. Moore and S. A. Zietlow, “Interferometric studies of a piano soundboard,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 119, no. 3, pp. 1783–1793, 2006.
- [7] A. Chaigne, B. Cotté, and R. Viggiani, “Dynamical properties of piano soundboards,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 133, no. 4, pp. 2456–2466, 2013.
- [8] J. Berthaut, M. N. Ichchou, and L. Jézéquel, “Piano soundboard: Structural behavior, numerical and experimental study in the modal range,” *Applied Acoustics*, vol. 64, pp. 1113–1136, 2003.
- [9] A. Farina, “Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique,” in *Audio Engineering Society Convention 108*, pp. 1–24, 2000.
- [10] K. Ege, *La table d’harmonie du piano-Études modales en basses et moyennes fréquences*. PhD thesis, 2009.
- [11] R. Bader, “Reconstruction of radiating sound fields using minimum energy method.,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 127, no. 1, pp. 300–308, 2010.
- [12] R. Bader, “Microphone Array,” in *Springer Handbook of Acoustics* (T. D. Rossing, ed.), pp. 1179–1207, Springer New York, 2014.



**Figure 3:** Advantage of the back propagation method. (a) shows the recorded radiation (all 1890 microphones) at 41 Hz. The microphones have a distance to the soundboard of  $\Delta z=40$  mm. (b) the recorded sound pressure is back-propagated to the surface with  $\alpha=1$ . The black dot indicates the driving point position.

*the Acoustical Society of America*, vol. 104, no. 3, pp. 1648–1653, 1998.

- [1] P. H. Bilhuber, “The Influence of the Soundboard on Piano Tone Quality,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 11, no. 3, pp. 311–320, 1940.
- [2] K. Ege and X. Boutillon, “Vibrational and acoustical characteristics of the piano soundboard,” in *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics*, pp. 1–7, 2010.
- [3] R. Corradi, P. Fazioli, and S. Marforio, “Modal analysis of a grand piano soundboard,” in *Proceedings of ISMA2010*, pp. 59–72, 2010.
- [4] N. Giordano, “Sound production by a vibrating piano soundboard: Experiment.,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 104, no. 3, pp. 1648–1653, 1998.
- [5] H. Suzuki, “Vibration and sound radiation of a piano soundboard,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 80, no. 6, pp. 1573–1582, 1986.
- [6] T. R. Moore and S. A. Zietlow, “Interferometric studies of a piano soundboard,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 119, no. 3, pp. 1783–1793, 2006.
- [7] A. Chaigne, B. Cotté, and R. Viggiani, “Dynamical properties of piano soundboards,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 133, no. 4, pp. 2456–2466, 2013.
- [8] J. Berthaut, M. N. Ichchou, and L. Jézéquel, “Piano soundboard: Structural behavior, numerical and experimental study in the modal range,” *Applied Acoustics*, vol. 64, pp. 1113–1136, 2003.
- [9] A. Farina, “Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique,” in *Audio Engineering Society Convention 108*, pp. 1–24, 2000.
- [10] K. Ege, *La table d’harmonie du piano-Études modales en basses et moyennes fréquences*. PhD thesis, 2009.
- [11] R. Bader, “Reconstruction of radiating sound fields using minimum energy method.,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 127, no. 1, pp. 300–308, 2010.
- [12] R. Bader, “Microphone Array,” in *Springer Handbook of Acoustics* (T. D. Rossing, ed.), pp. 1179–1207, Springer New York, 2014.

# Die Relevanz der Körperschallentkopplung für die Mikrofonierung

Rasmus Leuschner<sup>1</sup>, Martin Schneider<sup>2</sup>, Malte Kob<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hochschule für Musik, Detmold, E-Mail: rasmusleuschner@googlemail.com

<sup>2</sup> Georg Neumann GmbH, Berlin, E-Mail: martin.schneider@neumann.com

<sup>3</sup> Hochschule für Musik, Detmold, E-Mail: kob@hfm-detmold.de

## Einleitung

Für den Tonmeister stellt sich häufig die Frage, ob eine Körperschallentkopplung von Haupt- und Stützmikrofonen notwendig ist. Bei stark vibrierenden Böden sorgt eine Entkopplung durch z. B. elastische Aufhängungen für eine effiziente Unterdrückung von Trittschall. In einer Bachelorarbeit [1], von der hier Auszüge dargestellt werden, wurde untersucht, inwiefern auch die Anregung des Bühnenbodens durch Instrumente zu einem wahrnehmbaren Körperschalleintrag in die Mikrofone führt.

## Grundlagen

Die Bewegung einer Mikrofonmembran kann vereinfacht durch ein gedämpftes Feder-Masse-System beschrieben werden. Wird der Mikrofonkorpus nun durch Körperschall angeregt, erhält man ein Feder-Masse-System auf bewegtem Fundament (Abb. 2) [2, Kap. 2.1][3, Kap. 5].

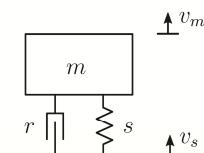


Abbildung 1: Feder-Masse-System auf bewegtem Fundament

Die zumeist verwendeten Kondensatormikrofone sind Auslenkungsempfänger. Druckempfänger mit Kugelcharakteristik werden dabei mit hoher Membranspannung konstruiert, Druckgradientenempfänger mit mittig abgestimmter Membran [4, Kap.7]. Die Auslenkung der Membran im Verhältnis zur Beschleunigung des Mikrofonkorpus ergibt sich [1] zu

$$H(\omega) = \left| \frac{\xi}{a_s} \right| = \frac{1}{\omega_0^2} \frac{1}{\sqrt{\left( \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right)^2 + \left( 2\zeta \frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}}.$$

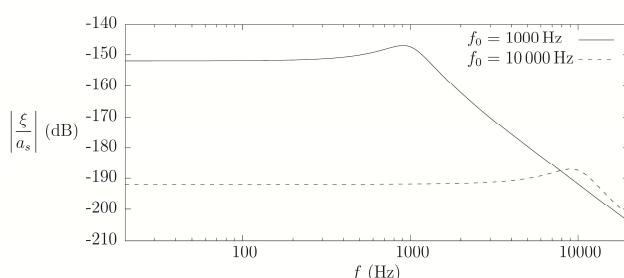


Abbildung 2: Körperschallempfindlichkeit von Mikrofonen für verschiedene Resonanzfrequenzen  $f_0$  der Membran.

Die Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz, die sich aus der Membranspannung ergibt, ist in Abb. 2 dargestellt. Dies entspricht dem Erfahrungswert, dass Druckempfänger mit hoch abgestimmter Resonanzfrequenz weitaus weniger körperschallempfindlich sind als Druckgradientenempfänger.

## Übertragungswege

Bei Betrachtung einer typischen Aufnahmesituation ergeben sich mindestens vier Übertragungswege vom Instrument zur Mikrofonmembran [Abb.3]:

1. Direktschall vom Instrument ins Mikrofon
2. Direktschallanregung des Stativs und Körperschalleintrag in das Mikrofon
3. Körperschalleintrag in den Bühnenboden und Schallabstrahlung des Bodens in das Mikrofon
4. Körperschalleintrag über den Bühnenboden in das Stativ und darüber in das Mikrofon

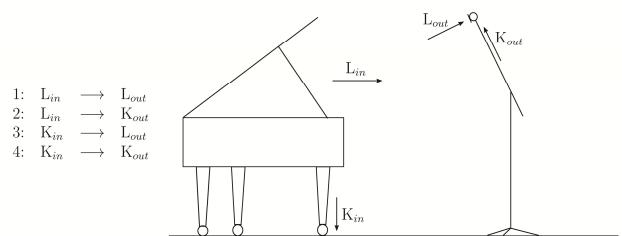


Abbildung 3: Schematische Darstellung der möglichen Übertragungswege von Instrument zum Mikrofon

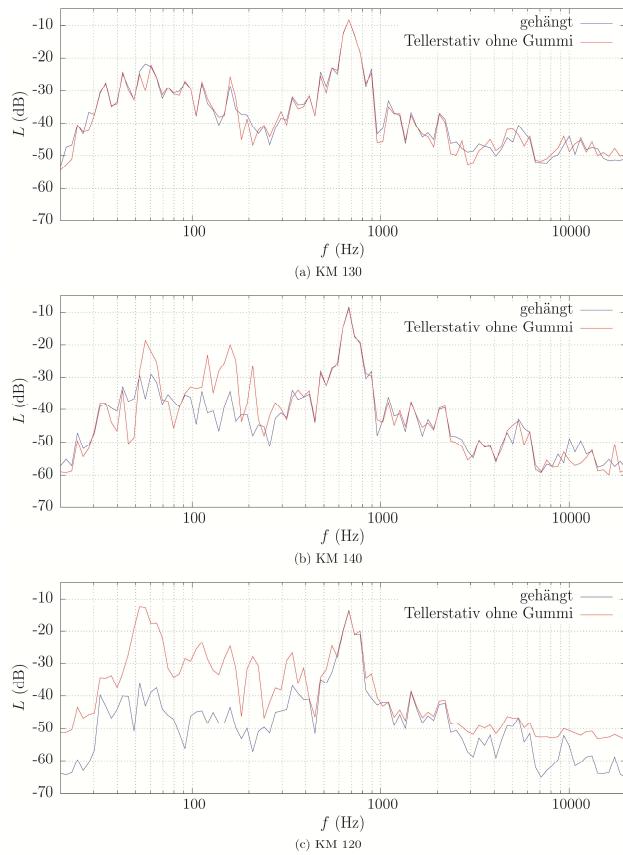
In Vorversuchen wurde die Relevanz des Übertragungswegs 2 ausgeschlossen; Übertragungsweg 3 konnte nicht untersucht werden, da der Direktschall des Instruments schwerlich unterdrückt werden kann und bei weitem überwiegt.

## Vorversuche

Für alle Versuche wurden gepaarte Kleinmembran-Kondensatormikrofone mit den Richtcharakteristiken Kugel, Niere und Acht verwendet.

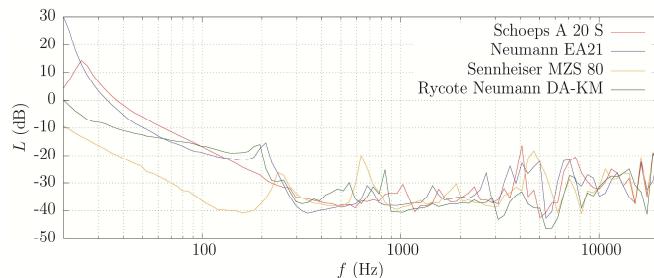
In einem Vorversuch wurden die theoretischen Ergebnisse aus Abb. 2 überprüft. Dazu wurde jeweils ein Mikrofon abgehängt, das andere auf einem Stativ befestigt. Der Bühnenboden wurde mit einem Shaker angeregt. Das Mikrofonsignal, als Summe des Direktschalls des Shakers und des Körperschalleintrags in das Mikrofon, wurde aufgezeichnet und spektral analysiert. In Abb. 4 wird deutlich, dass die Körperschallempfindlichkeit in

Abhängigkeit von der Richtcharakteristik von Kugel zu Niere zu Acht zunimmt.



**Abbildung 4:** Mikrofonsignale mit und ohne Entkopplung bei Anregung mit dem Shaker. (oben: Kugel, mitte: Niere, unten: Acht)

In einem weiteren Vorversuch wurden u. a. unterschiedliche elastische Aufhängungen untersucht und deren Wirksamkeit bei hohen Frequenzen bestätigt. Im tiefen Frequenzbereich ist die Körperschalldämpfung u. a. abhängig von der Abstimmung des Mikrofongewichts auf das spezifische Mikrofon und der resultierenden Resonanzfrequenz des Gebildes.

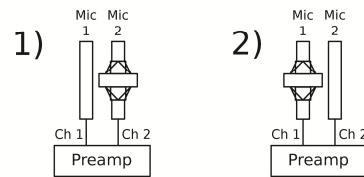


**Abbildung 5:** Übertragungsfunktion der Beschleunigung für verschiedene elastische Aufhängungen.

## Hauptversuch

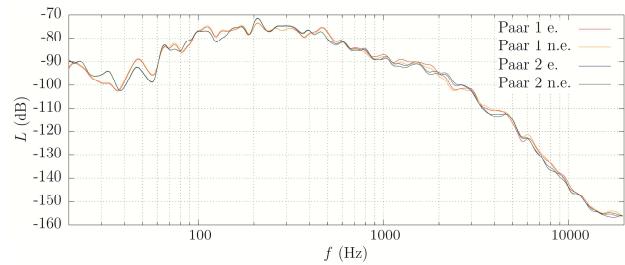
Um verbleibende Differenzen zwischen Mikrofonen auch nach der Paarung sowie mögliche Einflüsse des leicht unterschiedlichen Aufstellungsorts zu berücksichtigen, wurde das Prinzip des doppelten Paarvergleichs verwendet [Abb. 6]. Dabei tauschen die beiden Mikrofone im zweiten Versuchsteil die Rolle, d. h. das vorher entkoppelte Mikrofon wird nun durch Körperschall angeregt und

umgekehrt. Bei idealer Paarung und gleichwertigen Mikrofonaufstellungsorten sollten in der Auswertung die Unterschiede allein durch die Entkopplung verursacht sein.



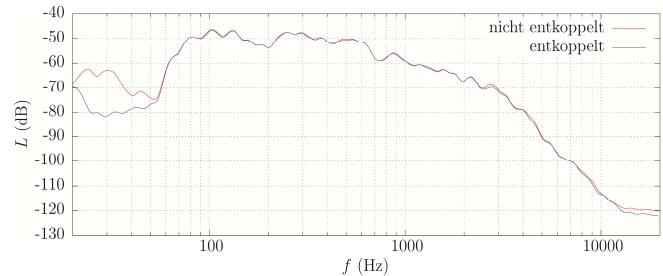
**Abbildung 6:** Darstellung des Prinzips des doppelten Paarvergleichs

Im in-situ Versuch wurden auf einer Konzertbühne Aufnahmen mit Klavier und Cello durchgeführt. Dabei war jeweils ein Mikrofon vom Bühnenboden entkoppelt. Beim Druckempfänger zeigen sich deckungsgleiche Kurven mit und ohne Entkopplung (Abb. 7).



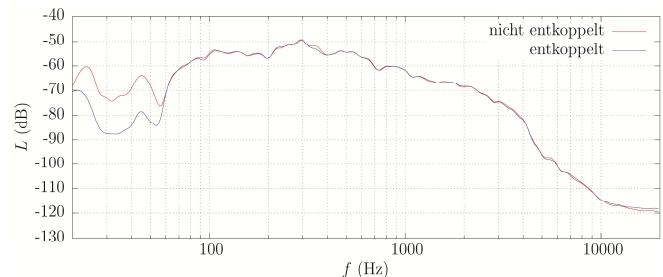
**Abbildung 7:** Hörversuch Beispiel 4: KM 130 (Kugel), Hauptmikrofon. (e. = entkoppelt; n.e. = nicht entkoppelt)

Bei der Nierencharakteristik (Abb. 8) und der Achtercharakteristik (Abb. 9) hat der Körperschalleintrag im tiefen Frequenzbereich einen messbaren Einfluß.

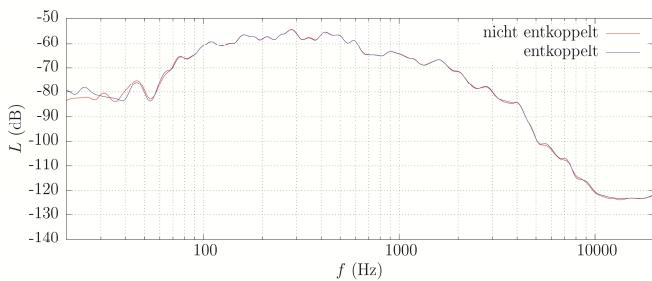


**Abbildung 8:** KM 184 (Niere) Klavier Bühne Stütze, Körperschall gemittelt

Dass die Relevanz des Körperschalleintrags erwartungsgemäß mit der Entfernung zum Instrument abnimmt, zeigt Abb. 10 im Vergleich zu Abb. 8.

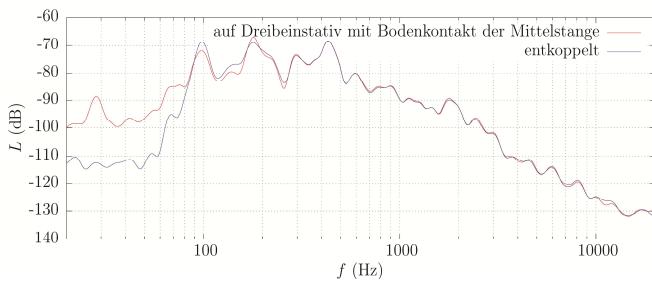


**Abbildung 9:** MK8 (Acht) Klavier Bühne Stütze, Körperschall gemittelt.



**Abbildung 10:** KM 184 (Niere) Klavier Bühne Haupt, Körperschall gemittelt.

In Abb. 11 ist ein Ergebnis für das Cello dargestellt. Hierbei sind Unterschiede bis zu 300 Hz zu erkennen.



**Abbildung 11:** KM 184 (Niere) Cello Vorbühne Stütze.

## Hörversuch

In einem ersten Hörversuch wurde die Wahrnehmbarkeit der meßtechnisch ermittelten, vornehmlich tiefstfrequenten Differenzen überprüft. Dabei stellte sich heraus, dass die Versuchsteilnehmer nicht in der Lage waren, in einer breitbandigen Instrumentalaufnahme zwischen entkoppelten und nicht entkoppelten Mikrofonen relevante Differenzen wahrzunehmen.

Bei separaten Vorversuchen mit fokussiertem Hören und auch mit tiefpassgefilterten Signalen können die Differenzen im tieffrequenten Bereich allerdings wahrgenommen werden, insbesondere bei Tritschall (z. B. Pedalgeräusche) sowie impulsiven, breitbandigen Signalen (z. B. kräftiger Tastenanschlag; starker Anstrich beim Cello).

## Fazit

Die Untersuchung bestätigt den Erfahrungswert, dass Druckempfänger mit Kugelcharakteristik nur geringe Körperschallempfindlichkeit aufweisen und häufig auf Körperschallentkopplung verzichtet werden kann. Bei Druckgradientenempfängern hingegen ist der Körperschall-eintrag insbesondere von tieffrequenten Störungen und Anschlägen meßbar und wahrnehmbar. Bei diesen Mikrofonen ist Körperschallentkopplung bei mitschwingenden Bühnenböden sinnvoll.

Ein Einfluss durch nicht-impulshaft angeregte mitschwingende Bühnenböden auf das Mikrofonsignal konnte in ersten Hörversuchen hingegen nicht nachgewiesen werden.

## Literatur

- [1] Leuschner R., Die Relevanz der Körperschallentkopplung für die Mikrofonierung, Bachelorarbeit, HfM Detmold, 2015
- [2] Cremer, L., Heckl, M., Petersson, B.A.T.: Structure Borne Sound. 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [3] Möser, M.: Technische Akustik 9. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012
- [4] Weinzierl, S. (Hrsg.), Schneider, M.: Handbuch der Audiotechnik. daraus: Kapitel 7: Mikrofone, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008

## Virtual acoustics tools applied to the study of music performance: an overview

Sebastià V. Amengual Gari<sup>1</sup>, Tapio Lokki<sup>2</sup> and Malte Kob<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Erich-Thienhaus-Institut, Hochschule für Musik Detmold, 32756 Detmold, Deutschland, Email: {amengual; kob}@hfm-detmold.de

<sup>2</sup> Department of Computer Science, Aalto University, 00076 Aalto, Finland, Email: tapio.lokki@aalto.fi

## Introduction

The creation of virtual environments allow the exhaustive study of music performance under changing acoustics conditions without the necessity of a physically available concert hall or performance space.

This article provides an overview of the methodology used for auralization of concert halls as well as an introduction to some ongoing projects at the University of Music Detmold.

## Methodology

The methodology presented by Lokki *et al.* [1] focuses on the perceptual and objective analysis of concert halls by creating, capturing and reproducing realistic acoustic scenes in different rooms.

### Creating virtual acoustic scenes

In [2, 3], Pätyinen *et al.* presented the implementation of a virtual loudspeaker orchestra composed by 34 loudspeakers arranged as a real orchestra on stage (see Fig. 1). This loudspeaker orchestra allows the reproduction of symphonic music with high realism and repeatability in different rooms.

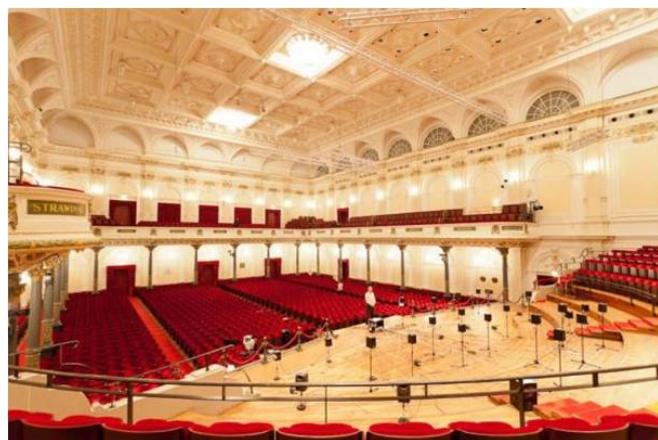


Figure 1: Virtual loudspeaker orchestra on stage

Other techniques for the implementation of virtual acoustic scenes are based on sound field synthesis methods, such as wave field synthesis [4] or the use of sound sources with variable directivity mimicking the radiation characteristics of music instruments [5].

## Capturing acoustic scenes

Spatial acquisition techniques can be used to capture impulse responses of the virtual acoustic scenes that will serve for subsequent analysis and auralization. The Spatial Decomposition Method for impulse responses (SDM) [6] provides an accurate analysis of the direction of arrival of the different acoustic events based on the time difference or arrival (TDOA) of successive wavefronts in a microphone array.

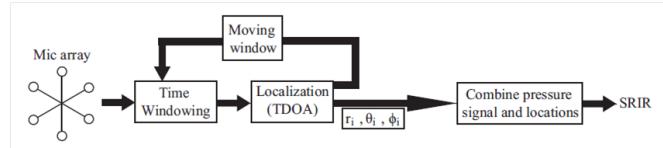


Figure 2: Spatial Decomposition Method (SDM)

After the analysis, the result is one single room impulse response with associated spatial information. A schematic block diagram of the analysis process is shown in Fig. 2

## Representing acoustic scenes

The analyzed room impulse responses can be represented in spatial plots giving an intuitive view of the direction of arrival of the energy doing a forward integration of the analyzed impulse responses and plotting the spatial energy content of different time windows [7] (see Fig. 3).

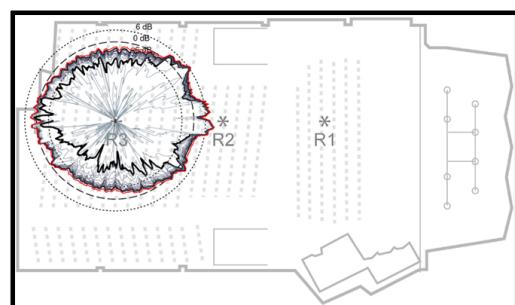


Figure 3: Broadband spatial representation of the impulse responses generated by 8 loudspeakers on stage.

## Reproducing acoustic scenes

Once the spatial information of the room impulse response is available every sound event has an associated

direction of arrival. With this information it is possible to decode the impulse response for reproduction with several methods (VBAP, direct loudspeaker panning, wave field synthesis...). A proposed decoding method based on loudspeaker panning is described in [1, 6]. The decoded impulse responses are convolved with anechoic recordings in a listening room with a surrounding loudspeaker setup. The reproduction has to be done in a room with appropriate characteristics (quasi-anechoic conditions and absence of accentuated room modes).

## Applications

### Studying listener's preferences

The main applications of the presented methods until the moment have been mostly related with the study of listeners' preferences in different performance and listening rooms.

### Study of concert hall acoustics

An extensive study including objective and perceptual analysis of several European concert halls has been completed by Lokki *et al.* using the described methodology. The loudspeaker orchestra is placed in different halls to obtain room impulse responses [8] that are then analyzed using SDM [6]. The analyzed responses are finally convolved with anechoic recordings [9] and reproduced in a listening room with a surround setup composed by 24 loudspeakers. A block diagram of the process is shown in Fig. 4.

Several listening tests have been conducted describing and classifying individual preferences of concert hall acoustics [10, 11, 1].

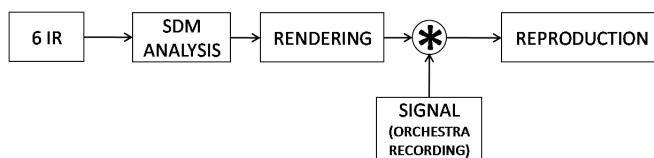


Figure 4: Schematic process of the auralization of symphonic music in a concert hall

### Sound engineers preferences in a studio

In [12, 13], 9 different studio control rooms are measured, analyzed with SDM and auralized in listening tests to study the room acoustics preference of sound engineers. The outcome of the study is that mixing engineers prefer dry environments with high clarity, while mastering engineers prefer slightly more reverberant environments for their tasks.

## Study on effect of room acoustics on music performance

At the moment there are a number of projects that use auralization and virtual acoustics tools to study the live music performance, but they use different methodologies than the presented in this article.

### Binaural environments

Using binaural resynthesis of simulated rooms, Schärer *et al.* analyzed the effect of room acoustics on solo players. The study includes 14 simulated rooms with different acoustic characteristics and 12 players playing 6 different instruments - violin, cello, clarinet, bassoon, trumpet and trombone.



Figure 5: A player performing during an experiment with binaural resynthesis. The image is reproduced from [15] with express permission from the author.

### Auralization with loudspeakers

A system composed by 6 directional microphones and 6 loudspeakers reproducing a measured soundfield [16] is used by Kato, Ueno *et al.* in different studies with solo performers [17, 18]. This auralization method is very straightforward and consists on the obtention of 6 impulse responses that are then equalized and directly assigned to every loudspeaker. Finally, the impulse responses are with the sound produced by the musicians. In these studies 5 different players are analyzed in 5 virtual environments that have been previously measured.

### Virtual acoustic space at HfM Detmold

At the moment of writing this article, a virtual acoustic space is under implementation at the University of Music Detmold (HfM Detmold). The main purpose of the environment is to provide variable and controllable acoustics for the study of live music performance. The

methodology proposed by Lokki, Pätynen, Tervo *et al.* and presented in this article is followed in a great extent. However, the creation of musical scenes consists on placing a single loudspeaker on stage simulating a music instrument and placing a microphone array at the musicians' ears position (see Fig. 6a).

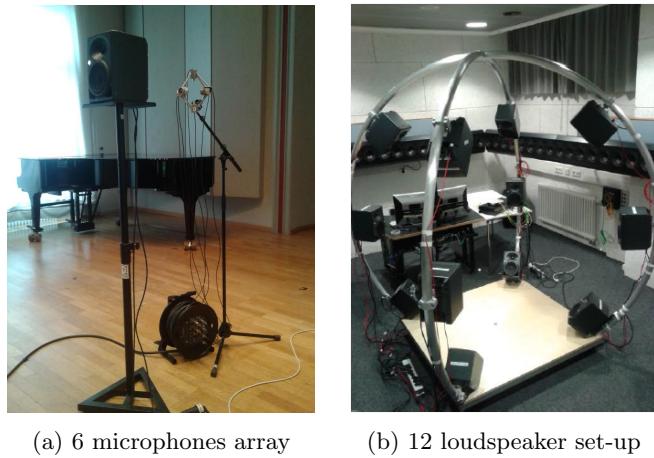


Figure 6

The captured impulse responses are modified so that the direct sound is removed. After that, they are analyzed and individual impulse responses for every loudspeaker are rendered. The direct sound from the instrument is convolved in real time with the impulse responses and the auralized sound field is played back from the loudspeakers (see set-up in Fig. 6b). A schematic block diagram of the procedure is included in Fig. 7.

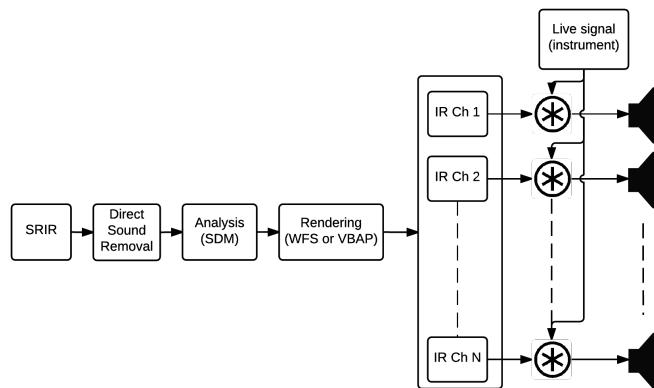


Figure 7: Block diagram of the operations performed to auralize room acoustics in real time.

## Conclusion

A well tested methodology for analysis and auralization of sound scenes is reviewed, describing the main steps and applications in previous projects. Projects that use alternative auralization methods for the study of live music performance are briefly introduced, as well as a vir-

tual acoustic space currently under development at the University of Music Detmold.

## Acknowledgements

The work presented in this article has been funded by the European Commission within the ITN Marie Curie Action project BATWOMAN under the 7th Framework Programme (EC grant agreement no. 605867).

## References

- [1] T. Lokki, "Tasting music like wine: Sensory evaluation of concert halls", Physics Today 67(1), pp. 27, 2014
- [2] J. Pätynen *et al.*, "A loudspeaker orchestra for concert hall studies", Proceedings of the Institute of Acoustics, 2008, Vol.30, pt.3, pp 45-52
- [3] J. Pätynen, "A virtual symphony orchestra for studies on concert hall acoustics", PhD Dissertation, Aalto University, 2011.
- [4] S. V. Amengual *et al.*, "Perceptual evaluation of focused sources in a concert hall", Proceedings of DAGA 2015, pp 502-505, Nürnberg.
- [5] F. Zotter, "Analysis and Synthesis of Sound-Radiation with Spherical Arrays", PhD Dissertation, University of Music and Performing Arts Graz, 2009.
- [6] S. Tervo *et al.*, "Spatial Decomposition Method for Room Impulse Responses", J. Audio Eng. Soc, vol. 61(1), pp 1-13, 2013.
- [7] J. Pätynen *et al.* "Analysis of concert hall acoustics via visualizations of time-frequency and spatio-temporal responses", J. of the Ac. Soc. of America 133(2) pp. 842-857, 2013
- [8] S. Tervo *et al.* "Spatio-temporal energy measurements in renowned concert halls with a loudspeaker orchestra", Proceedings of the Meetings on Acoustics (Ac. Soc. America), Vol. 19, 2013
- [9] J. Pätynen *et al.*, "Anechoic Recording System for Symphony Orchestra", Acta Acustica United with Acustica, vol. 94, pp. 856-865, 2008
- [10] T. Lokki *et al.*, Concert hall acoustics assessment with individually elicited attributes, J. Acoust. Soc. America, vol. 130, pp.835, 2011
- [11] T. Lokki, "Disentangling preference ratings of concert hall acoustics using subjective sensory profiles", The Journal of the Acoustical Society of America 132(5):3148-3161. November 2012
- [12] P. Laukkanen, "Evaluation of Studio Control Room Acoustics with Spatial Impulse Responses and Auralization", MSc. Thesis, Aalto University, 2014

- [13] S. Tervo et al., "Preferences of Critical Listening Environments Among Sound Engineers", *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 62, No. 05, 2014 May, pp. 300-314.
- [14] Z. Schärer et al., "Room acoustics viewed from the stage: Solo performers' adjustments to the acoustical environment", *Proceedings of ISRA 2013*, Toronto, Canada
- [15] Z. Schärer, "The Influence of Room Acoustics on Solo Music Performances. An Empirical Study", PhD Dissertation, TU Berlin, 2015
- [16] S. Yokoyama et al. "6-channel recording/reproduction system for 3-dimensional auralization of sound fields", *Acoustical Science and Technology*, Vol. 23 (2), pp. 97-103 2002
- [17] K. Ueno et al. "Effect of Room Acoustics on Musicians' Performance. Part I: Experimental Investigation with a Conceptual Model", *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 96, pp. 505-515, 2010.
- [18] K. Kato et al. "Effect of Room Acoustics on Musicians' Performance. Part II: Audio Analysis of the Variations in Performed Sound Signals", *Acta Acustica United with Acustica*, Vol. 101, pp. 743-759, 2015.
- [19] S. Amengual et al., "Study on the influence of room acoustics on organ playing using room enhancement", *Proceedings of Third Vienna Talk*, Vienna, 2015

# Spatial Sound Impression and Precise Localization by Psychoacoustic Sound Field Synthesis

Tim Ziemer

*University of Hamburg, 20354 Hamburg, Germany, Email: tim.ziemer@uni-hamburg.de*

## Abstract

In this paper a psychoacoustic sound field synthesis (pSFS) system for musical applications is presented. It recreates the radiation patterns of musical instruments for an extended listening area. For this purpose several psychoacoustic effects are utilized: Considering the critical bandwidth, the amount of data to be processed can be reduced massively. Applying a “precedence fade” allows for wave fronts to arrive from angles opposing to the virtual source position when regarding the integration time of the auditory system and phenomena known from the field of auditory scene analysis. A listening test demonstrates that the approach results in a precise source localization together with a spatial sound impression which is known to be the most crucial aspect of the subjective acoustical quality of concert halls. This is achieved even in a reverberant room and with a relatively large distance between loudspeakers compared to other wave field synthesis systems. Implementations in audio systems such as 5.1 or wave field synthesis systems with a large number of loudspeakers are possible.

## 1 Introduction

Commonly, sound field synthesis formulations and implementations aim at creating wave fronts of virtual monopole sources or plane waves [1, 2, 3]. The focus lies on direct sound and the horizontal plane. Such a wave front synthesis has the advantage that it delivers precise localization cues in an extended listening area. For musical performances, a drawback is that monopole sources sound very narrow. Natural musical instrument, in contrast, have rather complicated direction- and frequency-dependent sound radiation characteristics creating the impression of a certain source extent. Several authors proposed methods to overcome this drawback [4, 5, 6] by either implementing higher order radiators or a distribution of monopole sources in wave front synthesis applications. They report an improved perceived naturalness and an influence on perception of spatial and timbral character as well as a recognition of the orientation of the source. However, they discovered artifacts which could only partly be compensated with high computational demands. In this paper a psychoacoustic sound field synthesis (pSFS) approach is presented, implementing the radiation characteristics of musical instruments. Its aim is to create a natural and pleasurable sound impression for musical applications rather than a physically precise replication of the original sound field. Many researchers see the potential of psychoacoustics in auralization and sound field synthesis applications [7, 8]. The

method presented in this paper utilizes a number of psychoacoustic effects to achieve a precise localization and a spatial sound impression. A more detailed description of the signal processing and a more comprehensive listening test can be found in [9].

This paper is structured as follows: First, the fundamentals of spacious sound impressions in music are outlined. Against this background, a method to measure the radiation characteristics of musical instruments is presented. Then it is described how such radiation characteristics are implemented in a sound field synthesis system. Finally, it is discussed how the psychoacoustics are utilized to reduce the computational demands and to compensate physical synthesis errors. Strengths and weaknesses of this psychoacoustic sound field synthesis system are illuminated based on a comparison with mono playback in a listening test. In the prospects potential improvements of the system are discussed as well as potential implementations in other existing audio setups such as 5.1 surround systems and wave front synthesis systems with a much higher number of loudspeakers.

## 2 Spaciousness

In the field of subjective room acoustics the degree of spaciousness is one of the most distinct indicators concerning quality judgment of concert halls [10]. A rather large apparent source width (ASW) and a high level of listener envelopment (LEV) are ideal conditions for a pleasurable listening experience. Furthermore, a precise source localization is desirable for a clear and natural auditory image.

Spaciousness is especially a matter of interaural differences of direct sound and early reflections, often quantified by the interaural cross correlation (IACC) [10, 11]. The term, however, is comprehensive, comprising aspects such as “liveness/Halligkeit”, “spatial impression/Räumlichkeit”, “Ambience”, “Spatial Responsiveness” [11] as well as “intimacy”, ASW and LEV [10]. Most of these terms are not used consistently throughout the literature. Still, subjects agree to a large degree on how “spatial” a sound scene is, as will be seen in the results of the listening test in sec. 6. Therefore, the term is not defined more distinctly at this point but is believed to be understood intersubjectively in a listening situation, especially in a direct comparison. Localization is also a matter of direct sound and very early reflections. It is affected, among others, by interaural level and time differences within critical frequency bands [12]. In the case of several wave fronts the *precedence effect* plays a

crucial role in localization[12, 24]. Both source localization and the ASW are subject to auditory scene analysis principles. In music production practice a large number of recording and mixing strategies exists to increase the perceived spaciousness by recording instruments several times and/or from different angles, applying complementary comb filters or individual compressors or reverb effects on the channels etc., to create decorrelated stereo channels to increase IACC [13, 14]. This is, however, not a systematic approach. If we ask the question how musical instruments create the psychological impression of spaciousness, we can focus on those aspects of the sound field in a pSFS system.

### 3 Radiation characteristics of musical instruments

The radiation characteristics of musical instruments have been investigated with circular or spherical microphone arrays by [15] and more recently by [16, 17]. Even under anechoic conditions the radiation patterns of musical instruments create interaural signal differences which lead to the impression of a certain source extent as demonstrated e.g. in [18]. This is especially true in the near field. In the far field a wavefront more and more resembles a narrow sounding plane wave. For this pSFS system a method is chosen to record and recreate interaural signal differences for listeners up to distances of 3 meters. The radiated sound of musical instrument is recorded simultaneously by 128 microphones which are distributed equidistantly along a circle with a radius of 1 m, yielding  $M = 128$  time series

$$p(t, \mathbf{r}_m), m = 0, \dots, M - 1 \quad (1)$$

where  $\mathbf{r}_m$  is the position vector of the  $m$ th microphone in polar coordinates consisting of the horizontal angle  $\varphi = \frac{2\pi m}{128}$  and the distance  $r = 1$  m. Fig. 1 is a photo of the measurement setup. A discrete Fourier transform (DFT [ ]) over one second of quasi-stationary sound of each microphone recording yields 128 complex spectra

$$P(\omega, \mathbf{r}_m) = \text{DFT}[p(t, \mathbf{r}_m)] . \quad (2)$$

When considering each musical instrument as complex point source  $Q$  originated at the center of the microphone array, i.e. ignoring its actual extent and geometry, the measured spectra  $P(\omega, \mathbf{r}_m)$  equal the (unknown) source spectrum at the origin  $P(\omega, r_0)$  modified by a complex transfer function which consists of a function of distance  $G(\omega, r)$  and a function of angle  $\Gamma(\omega, \varphi)$ :

$$P(\omega, \mathbf{r}_m) = P(\omega, r_0) G(\omega, r) \Gamma(\omega, \varphi) \quad (3)$$

Here,  $G(\omega, r)$  is the well-known free field Green's function for point sources describing a spherical wave front propagation

$$G(\omega, r) = \frac{e^{-i\omega r}}{r} , \quad (4)$$

where  $i$  is the imaginary unit. From eq. 3 we can see that the recorded spectra  $P(\omega, \varphi_m, 1 \text{ m})$  are directly proportional to  $\Gamma(\omega, \varphi)$ , which is the only direction-dependent



**Figure 1:** Photo of the measurement setup. The white ring contains 128 microphones, the instrumentalist is placed in the center.

function and thus fully characterizes the sound radiation characteristics of the complex point source. This way we simplify musical instruments to point sources while maintaining their complex sound radiation characteristics to a certain extent. Any arbitrary source spectrum can be propagated to all measured angles at all distances by eq. 3. The interaural signal correlation is important for the ASW, as mentioned in section 2, so both amplitude and phase need to be considered. 128 microphones at a distance of 1 m yields one microphone every 0.05 m. Propagating the wave front to a radius of 1.5 m the wave front is sampled every 0.075 m and at 3 m every 0.15 m. The complex sound pressure in between the measured angles need to be gained in terms of interpolation. Note that assuming a distance of 0.15 m between a listener's ears, we have gained interaural information for distances up to three meters away from the source. The setup and equipment, the exact mathematics as well as some exemplary results of measured radiation patterns and propagated sound fields will be available soon in detail in [19].

### 4 Sound Field Synthesis

In general, the presented sound field synthesis works in two steps: First, it is calculated how the sound field would be within a listening area if a complex point source with a chosen position and orientation radiated an arbitrary source spectrum. This is achieved by propagating the source spectrum by means of eq. 3 to discrete listening points which sample the listening area. The result is the complex amplitudes at the listening points, the desired sound field. According to the Nyquist-Shannon theorem for a band-limited signal the sound field is reconstructed correctly within the whole listening area up to the critical wavelength which is twice the distance of the listening points. The approach is similar to the "sound field reconstruction" principle presented in [20]. As a second step, loudspeaker spectra are calculated which create the desired sound field by superposition of their signals. This step can be written as simple matrix equation:

$$\mathbf{K}_{\mathbf{Y}_l - \mathbf{X}_n} \mathbf{P}_{\mathbf{Y}_l} = \mathbf{P}_{\mathbf{X}_n}, \quad n = 1, \dots, N, \quad l = 1, \dots, L \quad (5)$$

Here,  $\mathbf{P}_{\mathbf{X}_n}$  are the calculated complex spectra at the chosen listening points  $\mathbf{X}_n$ .  $\mathbf{Y}_l$  are the loudspeaker posi-

tions,  $\mathbf{P}_{\mathbf{Y}_l}$ , the (yet unknown) loudspeaker spectra needed to create the desired sound field.  $\mathbf{K}_{\mathbf{Y}_l - \mathbf{x}_n}$  is the propagation matrix containing the complex transfer function which describes the sound propagation from each loudspeaker to each listening point. The linear equation system, eq. 5, has a unique solution if as many listening points as loudspeakers are chosen, i.e. if  $L = N$ . Eq. 5, however, is ill-posed. Furthermore, assuming the loudspeakers to be monopole sources, the propagation matrix may be ill-conditioned: If listening points lie close to another and if loudspeakers have similar distances to the listening points, compared to the considered wavelengths, the contribution of each individual speaker to the sound field at one listening point is very similar and thus the rows of the linear equation system are not independent of one another. A badly conditioned matrix could cause extremely high amplitudes and strong variations of the solution even when listening points, source position, orientation or radiation pattern are only altered slightly. To prevent from these undesired cases the loudspeakers are not considered as monopoles. Instead, they are considered as complex point sources just as the musical instruments. This means the measurements described in sec. 3 are also performed for the used loudspeakers. This does not guarantee for a robust solution but in practice it has proven to deliver good results. Naturally, an inverse Fourier transform of the calculated spectra is necessary for driving the loudspeakers.

## 5 Psychoacoustics

The sound field synthesis approach described above is formulated in frequency domain and could thus be called *spatial sound spectrum synthesis*. It is valid for stationary signals, i.e. stationary sound of motionless sources. The approach neglects transients in the audio signal and the propagation times of wave fronts. For music audio files the linear equation systems is solved for overlapping time blocks, assuming the sound to be quasi-stationary during one block. Furthermore, the sound field synthesis approach needs to be adapted based on the following psychoacoustic considerations.

### Critical Bands

Human listeners are mostly not able to perceive all frequencies of instrumental sound or even a complex musical piece. Rather, frequencies within one critical band are processed together. Critical bands are assumed to have a width of about 20 % of a center frequency and somewhat more towards lower frequencies [21]. The loudest frequency within a critical band either masks the others or they are perceived as one tone with a beating or as narrow band noise. Also, frequencies within one frequency band are localized together. Therefore, the audible frequency region is divided into 25 critical bands for the presented sound field synthesis approach. Only one radiation pattern per critical band is recorded and stored. In the sound field synthesis process, the measured radiation pattern is reconstructed only for the loudest frequency of each critical band. This is a good compromise be-

tween synthesis precision and computational costs. Several notes need to be played by each instruments so one radiation pattern per critical band can be stored. As the radiation pattern of a frequency may depend on the played fundamental, fingering etc. [16, 22], the stored patterns are only exemplary and do not deliver a full description of the radiation characteristics.

### Auditory Scene Analysis

Auditory scene analyses (ASA) [23] is the perceptual organization of sound. It is the attempt of the auditory system to group those parts of sound which originated in the same physical happening into one auditory stream, the pendant to the visual object. Parts of sound simultaneously reaching the listener are segregated into individual auditory streams. This is called simultaneous grouping. These streams are sustained over time in terms of sequential grouping. From all sounds reaching the listener within a short time window, those parts are likely integrated into a stream which are similar in terms of harmonicity (i.e. tones are harmonics of a common fundamental) and synchrony (e.g. of note onset or offset). Sequential sounds are likely to be integrated into a common auditory stream if they are related in terms of timbre, proximity (of frequency, pitch, and/or location), continuity (like pitch glides or smooth spatial motions) and common fate (e.g. modulations of amplitude, frequency or beat rate).

Simultaneous grouping is necessary to understand a number of frequencies as being one complex tone, sequential grouping to understand a sequence of complex tones as being a melody. Streams belong together and are likely to get one perceived group location, source extent etc. Another aspect which increases the probability of one common group location is that all wave fronts arrive within the integration time of the auditory system.

### Integration Time

The integration time  $T = 50$  ms is a threshold which is well-known in the field of psychoacoustics [24]. Successive acoustical events happening quicker than that are not discriminated but perceived as one sound or noise.  $T$  is also the echo threshold: Reflections arriving within the first 50 ms after a direct sound have an amplifying effect whereas later arriving reflections are heard as echoes [11, 12, 24]. Even if a reflection, arriving with a delay of 5 to 30 ms, is 10 dB louder than the first arriving wave front, it won't affect the localization.

As propagation time is neglected in the sound field synthesis approach, all loudspeaker signals start at the same time. Only amplitudes and initial phases of the 25 loudest frequencies are altered according to the solution of eq. 5. To arrive at all potential listening positions within the integration time of the auditory system, the listening area must not have dimensions larger than  $Tc \approx 17$  m, where  $c$  is the sound velocity. Furthermore, the distance between the loudspeakers closest and farthest to any potential listening position must not exceed 17 m.

## Precedence Effect

Those parts of sound belonging to the same auditory stream and arriving at the listener within the integration time are likely to have one common group location. This location is largely determined by the precedence effect [24], i.e. the location of the first wavefront which arrives at the listener. This is even true if later arriving wave fronts have a largely deviant origin and a higher amplitude.

Considering the above mentioned perception principles—ASA, the integration time and the precedence effect—it is obvious that with the sound field synthesis principle every listener will localize the virtual source at the position of the nearest loudspeaker. However, these principles can also be utilized to create the perception of a distinct source location which is the same for all listeners: If only one loudspeaker actively plays the onsets of all notes, the perceived source position will coincide with this loudspeaker position. The signal amplitudes of the other loudspeakers are faded in after this *precedence loudspeaker*. The fading duration has to be chosen in a way that the signals are completely faded in after the first wave front emanating from the precedence speaker has reached every listening point. This *precedence fade* at the note onset directs the perceived source position towards the precedence loudspeaker for all listeners. Again, the fading duration must not exceed the integration time of the auditory system.

## 6 Comparison with Mono

A listening test reveals if the implementation of the psychoacoustic principles results in a proper localization and a natural sound that is not corrupted by the fading. The subjective impression of the presented psychoacoustic sound field synthesis approach is investigated in a listening test with 24 subjects.

### Test setup

A loudspeaker setup consisting of 15 loudspeakers with a distance of  $\Delta Y = 0.65$  m between them is installed in a reverberant room of dimensions 2.5 m/4.8 m/4.3 m (h/w/d). The discrete listening points which sample the listening area have a distance of 0.17 m, so the aliasing frequency lies around 1 kHz. Compared to that, a wave front synthesis would have a worst-case aliasing frequency of  $f_{\max} = \frac{c}{2\Delta Y} \approx 264$  Hz. The speaker setup surrounds a listening area from three sides. In groups of 2 to 3, subjects stand in the listening area. They are free to turn around to improve localization performance. 40 seconds of a fugue are played first in mono and then by means of the pSFS including the measured radiation characteristic of a violin. During playback subjects mark the perceived source location on a “map” which shows the loudspeaker setup and a straight line every 10°. These lines help the subjects to orientate on the map. They are advised to mark the source position with a cross, if the source is perceived as very narrow, or with a line or

curve, if the source sounds broad or cannot be localized more precisely. Subjects were explicitly allowed to mark several source positions when localizing sources in different directions. The loudspeaker setup, the lines and the listening area are illustrated as background of the test results in fig. 2 and 3. Subjects furthermore judge, on a scale from 1 to 7, how well the source can be localized (localizability), how natural it sounds (naturalness) and how spatial the sound impression is (spaciousness). These terms were not further described to not draw the attention of the listeners to specific sound features. Finally, the subjects judge whether they heard one or several source point(s) or region(s).

## Results

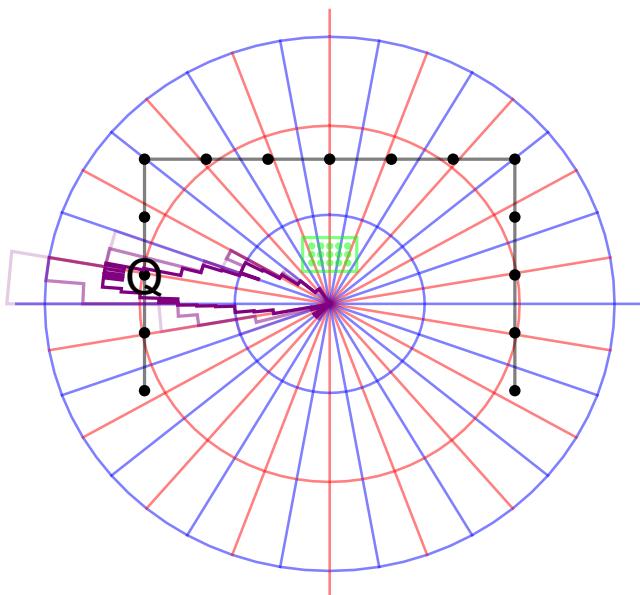
The subjective impressions of the subjects are listed in tab. 1. The mono playback is localized more distinctly and reported as sounding similarly natural but less spatial than the pSFS. Most subjects had the impression that the source location was one point in the mono playback and one region in the pSFS. Eight listeners heard more than one source point or region in the pSFS. Apparently, some notes or some spectral components seemed to be localized separately by these subjects. The reported evaluations are in good agreement with the marked perceived source angles which are plotted in fig. 2 and 3. The polar plots show the number of subjects who marked an angle as source position or region in steps of 0.5°. The two additional plots with a lower opacity show the cumulated number of subjects within steps of 5° and 10°. Concentric circles indicate 5, 10 and 15 subjects. The Q marks the source position which is the only active loudspeaker at 170.5° (mono) and the virtual source position at 9.5° (pSFS). The right hand side is considered as 0°. It can be seen that the presented pSFS approach is localized almost as good as the mono source; the lobe is only slightly broader. It is conspicuous that in this test even the mono source is localized much worse than reported in the literature, e.g. [12]. Possible causes are the parallel plane walls creating strong room modes. Furthermore, the distance between loudspeaker membranes and walls is about 0.45 m, so the first reflection can corrupt the localization. It can be observed throughout most listening test that perceived sources are shifted towards the room corners which is probably due to the fact that most early reflections arrive from there [25].

## Discussion

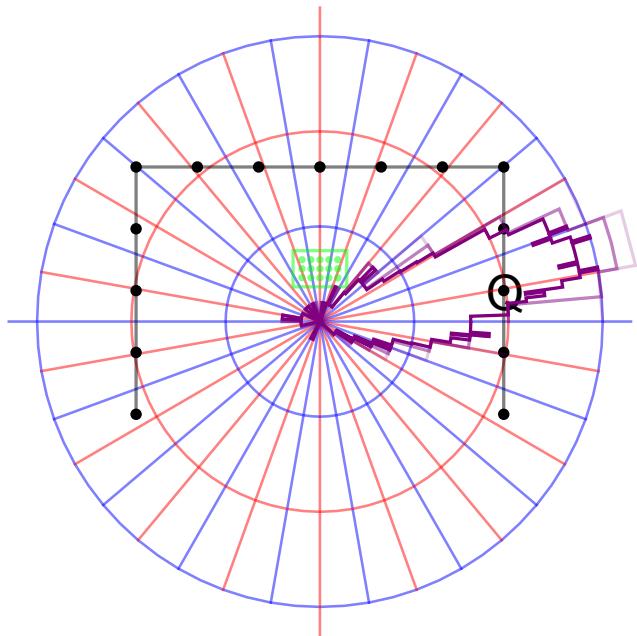
The virtual complex point source created by the pSFS system is rated as sounding about as natural and more spatial than mono playback but localizable with a lower precision. The localization task confirms this subjective impression. Most listeners report to hear an extended source region rather than a narrow point source. Introducing the precedence fade, a fairly precise localization is possible although loudspeaker sounds from 15 directions arrive at the listeners. With the present listening test conditions it remains uncertain if the increased spaciousness results from including the radiation characteristics of the instrument, from the distributed wave fronts arriving

	Mono	pSFS
$\emptyset$ Localizability	6.33	5
$\emptyset$ Naturalness	4.5	4.62
$\emptyset$ Spaciousness	3.125	4.75
1 Point	<b>17</b>	2
>1 Point	2	6
1 Region	5	<b>14</b>
>1 Region	0	2

**Table 1:** Mean values (ar. mean  $\emptyset$ ) of perceived source localizability, naturalness and spaciousness of mono and the presented psychoacoustic sound field synthesis (pSFS) system and absolute number of subjects who had the impression of 1 or several (>1) source point(s) or region(s).



**Figure 2:** Number of subjects who marked the specific angle as source location or area in the mono presentation.



**Figure 3:** Number of subjects who marked the specific angle as source location or area in the presented sound field synthesis approach.

at the listeners, or from the more decorrelated reverberation due to the higher number of unequal loudspeaker signals. Although reflections from the walls and the wave shadow created by listeners are not considered in the calculation, the principle still works for several listeners in a reverberant room.

## 7 Conclusion

A sound field synthesis approach has been introduced. Its core is a linear equation system whose solutions are loudspeaker spectra which together create a desired sound spectrum in an extended listening area by means of superposition of radiated sounds. The calculation for the desired sound field includes the measured radiation characteristics of musical instruments which are simplified as complex point sources. This way interaural signal differences resemble those of natural instruments rather than of monopole sources. For the synthesis to be correct, audio signals need to be stationary. At transients the superposition of the loudspeaker signals does not create the desired sound field as arrival times of the wave fronts may deviate. The different arrival times also prohibit a correct localization of the virtual source. These shortcomings are compensated by regarding psychoacoustics. Calculating new complex amplitudes only for the 25 loudest frequencies, it is likely that the loudspeaker signals fall into the same auditory stream as long as their radiated wave fronts arrive within the integration time of the auditory system. Finally, the precedence fade ensured that all listeners localize the virtual complex point source at the same position. The result is a natural sound with a precise source location and a spatial sound impression.

## 8 Prospects

In principle, the described pSFS can be applied directly on conventional and widespread loudspeaker setups such as 5.1 system. The only requirements are that the radius of the circular loudspeaker arrangement is known as well as the radiation characteristics of the speakers. In an informal listening test on a 5.1 system in a studio with heavy damping, the results were very much the same as the results in the listening test: The source could be localized well even beyond the listening area, which was of course rather small due to the limited number of loudspeakers. The spatial sound impression remained despite the damping of the room. Different orientations of the source especially lead to different spectral colorations. The pSFS principle can also be applied on wave front synthesis systems above the aliasing frequency to increase spaciousness and decrease aliasing artifacts. Setting up and solving an over-determined linear equation system with more listening points than available loudspeakers may even increase the extent of the listening area or increase the aliasing frequency. So far, the pSFS approach has been tested for static virtual sources at the loudspeaker positions only. Further research may concentrate on sources beyond the loudspeaker positions and moving sources. Listening tests under anechoic conditions may reveal to what degree the radiation pattern influences the perceived spaciousness.

## References

- [1] A.J. Berkhout, "A Holographic Approach to Acoustic Control", in: *J. Audio Eng. Soc.* 36, 1988, 977–995.
- [2] E. Verheijen, *Sound Reproduction by Wave Field Synthesis* (PhD Thesis), Delft University of Technology, 1997.
- [3] S. Spors, R. Rabenstein and J. Ahrens, "The Theory of Wave Field Synthesis Revisited", in: *Audio Engineering Society Convention 124*, 2008.
- [4] E. Corteel, "Synthesis of Directional Sources Using Wave Field Synthesis, Possibilities, and Limitations", in: *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2007.
- [5] R. Jacques, B. Albrecht, F. Melchior and D. de Vries, "An approach for multichannel Recording and Reproduction of Sound Source Directivity", in: *Audio Engineering Society Convention 119*, 2005.
- [6] M. Baalman, *On Wave Field Synthesis and electro-acoustic music, with a particular focus on the reproduction of arbitrarily shaped sound sources* (PhD Thesis), VDM 2008.
- [7] H. Fastl, "Praktische Anwendungen der Psychoakustik", in: *DAGA 2010 – Berlin*, 2010, 5–10.
- [8] J. Blauert, "3-D-Lautsprecher-Wiedergabemethoden", in: *DAGA 2008 – Dresden*, 2008, 25–26.
- [9] T. Ziemer and R. Bader, "Implementing the Radiation Characteristics of Musical Instruments in a Psychoacoustic Sound Field Synthesis System", in: *Audio Engineering Society Convention 139*, 2015.
- [10] L.L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*, Springer 2004.
- [11] W. Kuhl, "Räumlichkeit als Komponente des Raumeindrucks", in: *Acustica* 40, 1978, 167–181.
- [12] J. Blauert: *Spatial Hearing. The Psychophysics of Human Sound Source Localization*, MIT University Press 1997.
- [13] C. Kaiser: *1001 Recording Tipps*, mitp, Heidelberg et al. 2012.
- [14] C. Kaiser: *1001 Mixing Tipps*, mitp, Heidelberg et al. 2012.
- [15] J. Meyer, *Acoustics and the Performance of Music*, 5th ed., Springer 2009.
- [16] J. Pätynen and T. Lokki, "Directivities of Symphony Orchestra Instruments", in: *Acta Acustica United With Acustica* 96, 2010, 138–167.
- [17] F. Zotter, *Analysis and Synthesis of Sound Radiation with Spherical Arrays* (PhD Thesis), University of Music and Performing Arts Graz, 2009.
- [18] T. Ziemer, "Sound Radiation Characteristics of a Shakuhachi with different Playing Techniques", in: *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics*, 2014.
- [19] T. Ziemer and R. Bader, "Complex point source model to calculate the sound field radiated from musical instruments", in: *Proceedings of Meetings on Acoustics* 24, 2015.
- [20] M. Kolundzija, C. Faller, and M. Vetterli, "Sound Field Reconstruction: An Improved Approach For Wave Field Synthesis", in: *Audio Engineering Society Convention 126*, 2009.
- [21] E. Zwicker and H. Fastl: *Psychoacoustics. Facts and Models*, 2nd updated ed., Springer 1999.
- [22] F. Hohl and F. Zotter, "Similarity of musical instrument radiation-patterns in pitch and partial", in: *Fortschritte der Akustik, DAGA*, 2010.
- [23] A. S. Bregman, *Auditory Scene Analysis*, MIT Press 1990.
- [24] H. Haas, "Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache", in: *Acustica* 1, 1951, 49–58.
- [25] T. Ziemer, "A Psychoacoustic Approach to Wave Field Synthesis", in: *Audio Engineering Society Conference: 42nd International Conference: Semantic Audio*, 2011, pp. 191–197.

## Numerische Simulation der Synchronisation von Orgelpfeifen

Jost Leonhardt Fischer<sup>1,a)</sup>, Rolf Bader<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Systematische Musikwissenschaft, Universität Hamburg, Neue Rabenstr. 13, D-20354 Hamburg, Deutschland

Wir präsentieren einen neuen Ansatz zur Untersuchung der wechselseitigen Kopplung zweier Orgelpfeifen durch numerische Simulation. Durch Lösung der kompressiblen Navier-Stokes Gleichungen mit geeigneten Rand- und Anfangsbedingungen lässt sich so das gegenseitige Wechselspiel der nichtlinearen Kopplung zweier Orgelpfeifen über die Luft, welches zu Synchronisation führt, nachzeichnen. Wir geben einen detaillierten Einblick in die Implementation und die Analyse solch komplexer CFD/CAA Simulationsrechnungen.

Die Schallentstehung in der Orgelpfeife, die Wechselwirkung zwischen Windfeld und akustischem Feld und die Schallausbreitung werden in originärer Weise durch die kompressiblen Navier-Stokes Gleichungen beschrieben [4]. Reine Schallausbreitung ist zwar durch die lineare Wellentheorie beschreibbar, doch die Schallentstehung und die der Wechselwirkung zugrunde liegenden physikalischen Mechanismen sind nichtlinear. Inkompressible Lösungsansätze unterdrücken massiv die Dissipation im System. Bei den sehr populären Methoden des Ray-Tracing werden Phaseninformationen nicht mit simuliert. Numerische Simulationen die die Wechselwirkung von Strömungsfeld (Windfeld) und akustischem Feld berücksichtigen, müssen deshalb vollständig kompressibel gerechnet werden. Das bedeutet, dass die kompressiblen Navier-Stokes Gleichungen mit vorgegebenen Anfangs- und Randbedingungen auf einem entsprechenden Rechengitter gelöst werden. Das Rechengitter bildet den numerischen Raum, auf dem gerechnet wird.

Im Folgenden wird die Möglichkeit dokumentiert, das Phänomen der gegenseitigen Synchronisation zweier Orgelpfeifen durch numerische Simulation abzubilden. Dazu wurden zwei baugleiche, gedackte Labialpfeifen, zur Verfügung gestellt durch die Firma Alexander Schuke Orgelbau Potsdam GmbH [7], in ein numerisches pseudo-3D-Rechengitter übertragen. Das Rechengitter hat 1251412 Punkte und 2492959 Flächenelemente. Das erzeugte Rechengitter ist in Abbildung 1 gezeigt. Die Orgelpfeifen P1 und P2 stehen sich mit den Aufschnitten einander gegenüber und haben einen Pfeifenabstand von  $d = 288.4$  mm, gemessen von Labiumsspitze zu Labiumsspitze.

Die Pfeifen P1 und P2 sind leicht gegeneinander verstimmt, haben also unterschiedliche Resonatorlängen von  $l_{res,P1} = 106$  mm bzw. von  $l_{res,P2} = 100$  mm. Die Frequenzen für gedackte Labialpfeifen lassen sich mit der Formel

$$f_G = \frac{2n-1}{4} \frac{c_0}{l_{res}} - k \quad \text{mit} \quad k = \frac{5}{3} \cdot d_{res} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

---

<sup>a)</sup>e-mail: jost.leonhardt.fischer@uni-hamburg.de

berechnen. Dabei ist  $n$  der Index der Harmonischen,  $k$  die Mündungskorrektur und  $d_{res}$  der Durchmesser der Orgelpfeife. Die Berücksichtigung der Mündungskorrektur, im Allgemeinen nur für offene Pfeifen wichtig, ist für diese Art von Orgelpfeifen notwendig, weil die Aufschnittshöhe von  $h_A = 5.5$  mm in Relation zu den Resonatorlängen verhältnismäßig groß ist und somit der stehenden Welle mit dem Aufschnitt etwas mehr Raum zur Verfügung steht [7].

Die Mündungskorrektur ist ein empirischer Wert, der auf den französischen Orgelbauer Aristide Cavaillé-Coll [1] zurückgeht. Für die hier betrachteten Orgelpfeifen, die einen quadratischen Innenquerschnitt mit der Kantenlänge  $d_{res} = 9.6$  mm haben, berechnet man die Frequenzen  $f_{1H,P1} = 703.73$  Hz und  $f_{1H,P2} = 740.13$  Hz. Diese Werte wurden durch Messung an den realen Orgelpfeifen P1 und P2 überprüft. Die Messwerte betragen  $f_{1H,P1} = 732.50$  Hz und  $f_{1H,P2} = 751.56$  Hz. Der Unterschied zu den theoretisch ermittelten Werten zeigt, dass die Mündungskorrektur stark vom jeweiligen Pfeifensatz abhängt. Der empirische Wert  $k = \frac{5}{3}d_{res}$ , kann im Falle der Labialpfeifen mit quadratischem Querschnitt also nur ein Richtwert sein. Orgelbauer verfügen meist über speziellere, den Pfeifensätzen angepasste Korrekturtabellen.

Die vorgestellten Simulationen sind auf je 15 Kernen zweier HP DL380p Gen 8-SFF CTO Servermaschinen mit je zwei Prozessoren des Typs E5-2690 2.7 GHz verteilt gerechnet worden. Die Problemstellung wurde dabei vollständig kompressibel gerechnet. Verwendet wurden Teile der unter der GNU Public Licence stehenden C++ Bibliothek OpenFOAM 2.1 [5]. Trotz der Parallelisierung und der hohen Qualität der verwendeten Hardware sind diese Rechnungen extrem zeitaufwendig. Für die Berechnung von realen 50 ms wurden ca. 87000 min benötigt, was etwa 60 1/2 Tagen entspricht. Dabei wurden pro Simulationslauf ca 1.5 TB Daten erzeugt. Hier zeigen sich die Grenzen des Rechnens auf CPU's. Für eine noch bessere Performance müsste auf Clustern oder auf GPU's (Grafikprozessoren) gerechnet werden.

Die Anfangsbedingungen des Setups wurden so gewählt, dass beide Orgelpfeifen zeitgleich angeblasen werden. Die Anfangsgeschwindigkeiten der in die Orgelpfeifen P1 und P2 einströmenden Luft, welche die sogenannten Jets ausbilden, wurden auf  $U_{y,jet,P1} = U_{y,jet,P2} = 18$  m/s gesetzt. Die Simulationsdauer beträgt  $t_{sim} = 90$  ms. Hier wäre eine längere Laufzeit wünschenswert.

## Methodik

Die numerische Behandlung kompressibler Problemstellungen ist sehr kompliziert. Allgemein lässt sich eine sinnvolle Vorgehensweise in vier Abschnitte gliedern. (O) Physikalische Vor betrachtungen, (A) Pre-Processing, (B) Processing und (C) Post-Processing. Die Abschnitte beinhalten die folgenden Arbeitsschritte:

- O 1. Was sind die zu lösenden Grundgleichungen?
- O 2. Welche fluidynamischen Kennzahlen charakterisieren das zu lösende Problem?
- O 3. Welche Skalen überspannt die Problemstellung?
- O 4. Hardware-Entscheidungen
- O 5. Software-Entscheidungen

- A 1. Erstellung des Rechengitters (Mesh) entsprechend der Geometrie der Orgelpfeifen und des Raumes

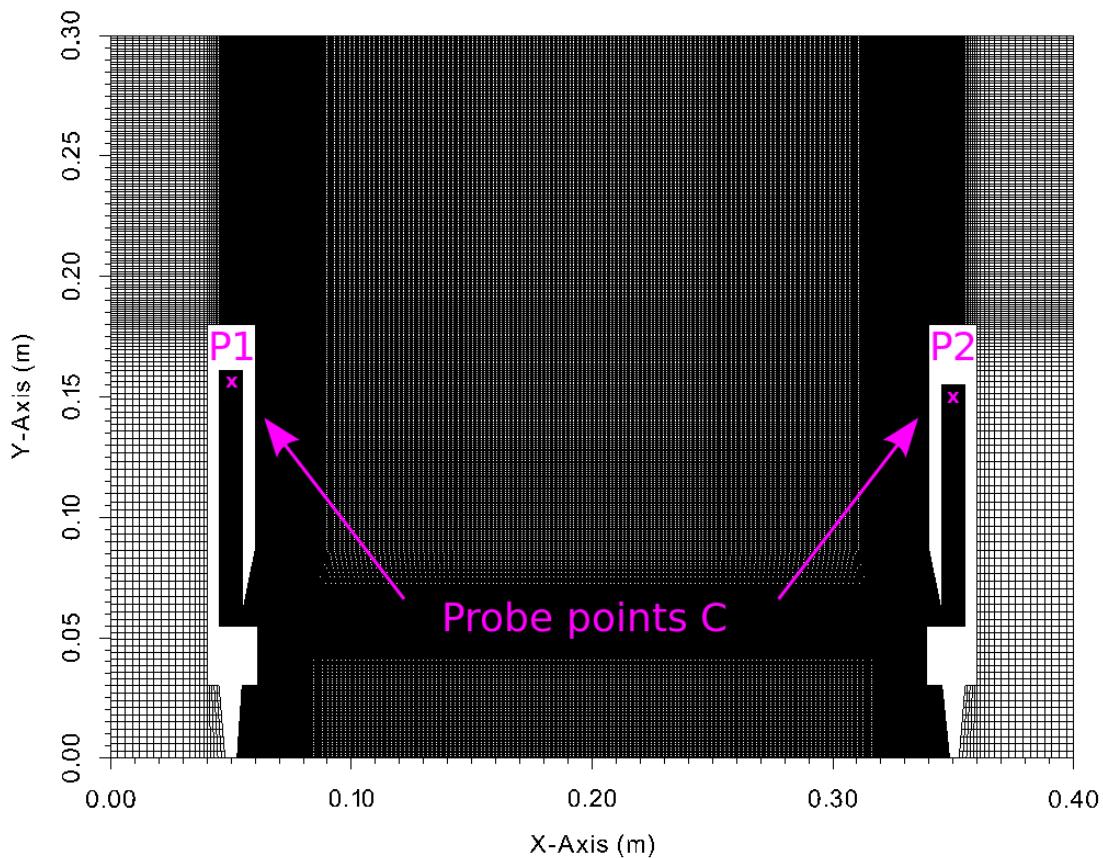


Abbildung 1: Erzeugtes Rechengitter für die numerische Simulation des gekoppelten Zwei-Pfeifen Systems. Eingetragen sind die Positionen der Probenpunkte C der Pfeifen P1 und P2. Der Probenpunkt C befindet sich 5 mm unterhalb des jeweiligen Resonatoren des der Pfeifen. Der Pfeifenabstand, gemessen von Labiumsspitze zu Labiumsspitze, beträgt  $d = 288.4$  mm.

- A 2. Konfiguration der thermo-physikalischen Randbedingungen
- A 3. Implementierung der Anfangs- und Randbedingungen von physikalischen Größen wie Druck  $p$ , Geschwindigkeit  $U$ , Temperatur  $T$ , Dichte  $\rho$ , turbulente kinetische Energie  $k$ , etc.
- A 4. Geeignete Diskretisierungsschemata für die einzelnen Operatoren, inklusive Korrektoren
- A 5. Identifikation eines geeigneten Turbulenzmodells
- A 6. Geeigneter Löser für kompressible Probleme, Festlegung numerischer Schemata und Toleranzen
- A 7. Geeignete Löser für Matrizenoperationen
- A 8. Konfiguration numerischer Parameter, wie z. B. der zeitlichen Schrittweite, der Simulationszeit, der Schreibpräzision, etc.
- A 9. Definition von Probenpunkten und geeigneten Schnitten (Samples) durch das Rechengitter für die anschließende Analyse

- B 1. Parallelisierung und Start der Simulation
- B 2. Numerische Stabilität
- B 3. Kontrolle während der Laufzeit
- B 4. Berechnung zusätzlicher physikalischer Größen aus den Simulationsdaten

- C 1. Visualisierung
- C 2. Analyse

## Ergebnisse

Die Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine Visualisierung der Druckdaten der durchgeführten numerischen Simulation bei  $t = 0.75$  ms. Dieser Zeitpunkt ist Teil des initialen Anblasprozesses. Die Farbkodierung ist linear und stellt die Amplitude des Druckes  $p$  dar.

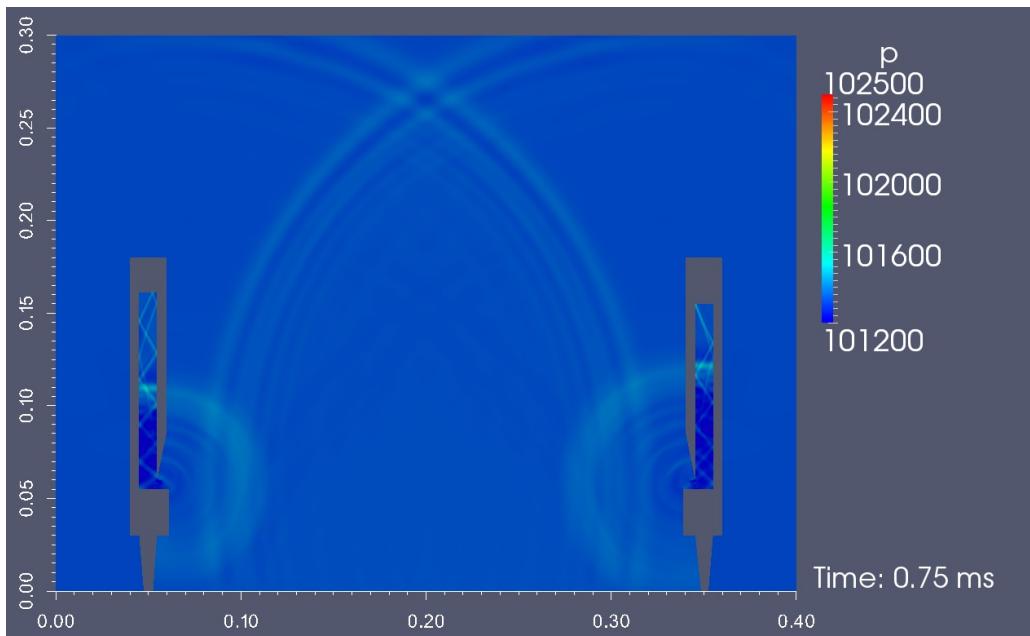


Abbildung 2: Signale des Druckes  $p$  gesampled an den Probenpunkten  $C$  der Pfeifen P1 und P2.

In der Visualisierung des Druckes ist sehr gut zu erkennen, wie die sphärischen Schallwellen in den Außenraum abgestrahlt werden. In den Resonatoren von P1 und P2 sind die propagierenden Druckschwankungen der Fundamentalschwingung sichtbar. Auch die zu Beginn des Anblasprozesses stark ausgeprägten hochfrequenten Quermoden sind als schmale, an den Innenwänden der Resonatoren reflektierende Druckschwankungen deutlich erkennbar.

Die Drucksignale gesampled an den Probenpunkten C der Pfeifen P1 und P2 sind in Abbildung 3 dargestellt. Man erkennt den initialen, Einschwingvorgang im Zeitraum von  $0 \text{ ms} < t < 10 \text{ ms}$ , in dem die Pfeifen ihren Ton finden. Dieser Prozess wird im Folgenden als der akustische Einschwingvorgang bezeichnet um ihn vom Einschwingvorgang bezüglich der Synchronisation zu unterscheiden. Der akustische Einschwingvorgang geht mit einem Anstieg der Amplituden

einher. Dabei wird deutlich, dass P2 aufgrund der kürzeren Resonatorlänge eine höhere Frequenz hat als P1. Das führt dazu, dass die Signale bei etwa  $t = 10$  ms eine Phasendifferenz von  $\Delta\phi \approx \pi$  zueinander haben. Die Jets der Pfeifen schwingen gegenphasig. Daraus resultiert am Ende des akustischen Einschwingvorgangs eine Abnahme der Amplituden des Drucksignals von P1. Auffällig sind die dabei auftretenden Nebenmaxima im Signal von P1, die eine Periodenverdopplung darstellen. Wenig später erfolgt auch die Abnahme der Amplituden von P2. Das ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass die Pfeifen bereits miteinander interagieren, sich gegenseitig durch ihre abgestrahlten Schallsignale beeinflussen. Die gegenseitige Beeinflussung ist auch tief im Resonatorinnenraum der Orgelpfeifen nachweisbar. Sie hat Auswirkungen auf die Tonentstehung beider Pfeifen.

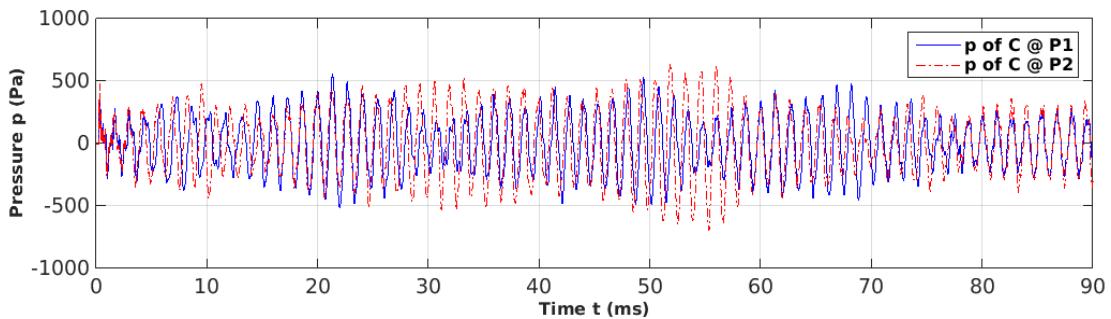


Abbildung 3: Snapshot der numerischen Simulation des gekoppelten Zwei-Pfeifen Systems. Visualisiert ist der Druck  $p$  zur Zeit  $t = 0.75$  ms, also unmittelbar nach dem initialen Anblasvorgang der Pfeifen. Zu erkennen ist, wie die ersten zwei Schallwellen der Fundamentalschwingung in den Außenraum abgestrahlt werden.

Im weiteren zeitlichen Verlauf zwischen  $10 \text{ ms} < t < 17 \text{ ms}$  kommt es zu einem Angleichen der Phasenbeziehung der Schwingungen. Im Zeitintervall von ca.  $17 \text{ ms} < t < 19 \text{ ms}$  schwingen die Jets nun gleichphasig ( $\Delta\phi \approx 0$ ). Die Amplituden beider Pfeifen wachsen signifikant. Das System synchronisiert. Im Intervall  $20 \text{ ms} < t < 25 \text{ ms}$  bleibt die Phasendifferenz nahezu konstant bei  $\Delta\phi \approx 26^\circ$ . Das Zwei-Pfeifen System schwingt mit gleicher Frequenz, was als Modenkopplung bekannt ist. Das beobachtete gleichphasige Schwingen stimmt mit den Resultaten durchgeführter Synchronisationsexperimente [2] sehr gut überein. Der Pfeifenabstand  $d = 288.4 \text{ mm}$  entspricht  $0.64 \cdot \lambda_{1H,P2}$  der Fundamentalschwingung der höherfrequenteren Pfeife P2. Das heißt, es gilt  $\lambda/2 < d < \lambda$ . Der Pfeifenabstand der Simulation liegt in einen Abstandsbereich, in dem auch im Experiment Hinweise auf gleichphasiges Schwingen gefunden wurde [2]. Auch dort wird eine signifikante Pegelerhöhung in diesen Abstandsbereich beobachtet. Im weiteren Verlauf – gemeint ist das Zeitintervall  $25 \text{ ms} < t < 50 \text{ ms}$  – ist erkennbar, dass die höherfrequenteren und also schneller schwingende Pfeife P2 bestrebt ist, aus der Synchronisation auszubrechen. Die Phasendifferenz wächst zunächst. Bei P1 kommt es dabei zu den schon genannten Amplitudenabsenkungen und zu der Ausbildung von Periodenverdopplungen. Dies führt dazu, dass P2 in seinem Schwingungsverhalten verlangsamt wird. Dieser Mechanismus ist Gegenstand aktueller Forschung. Als Folge wird die Phasendifferenz der Oszillationen wieder kleiner und es kommt zur Ausbildung einer (mehr oder weniger) festen gemeinsamen Phasenbeziehung von  $\Delta\phi \approx 26^\circ$ .

Von nun an ist das System bestrebt, die feste Phasenbeziehung aufrecht zu erhalten. Das Zeitintervall, in dem das System Hinweise auf Synchronisation zeigt ist  $20 \text{ ms} < t < 90 \text{ ms}$ . Hier beträgt die mittlere Phasendifferenz  $\Delta\phi = 44^\circ$ , also etwa  $\Delta\phi \approx \pi/4$ . Die Mittelung trägt dem

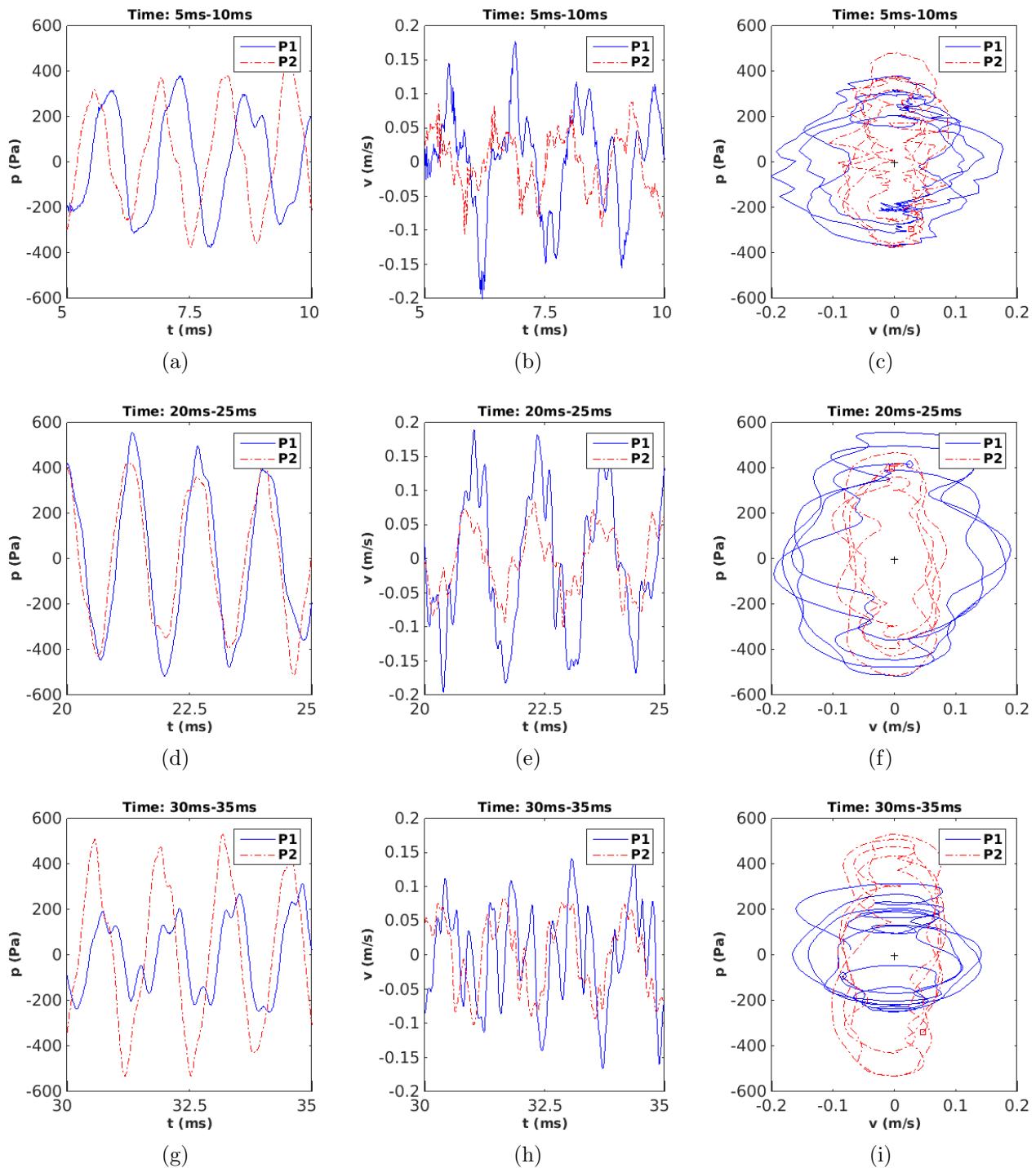


Abbildung 4: Vergleich der Sequenzen aus dem akustischen Einschwingvorgang  $t = 5 - 10$  ms, der Synchronisation  $t = 20 - 25$  ms und der Selbst-Justierung  $30 - 35$  ms des Zwei-Pfeifen Systems. a) d) g) Drucksignale von P1 und P2 am Probenpunkt C. b) e) h) Die Schallschnelle  $v$  am Probenpunkt C von P1 und P2. c) f) i) Phasenportraits am Probenpunkt C von P1 und P2. Die Anfangswerte der Sequenzen sind markiert, P1 (blauer Kreis), P2 (rotes Quadrat).

Umstand Rechnung, dass das System sich bezüglich der Synchronisation immer noch im Einschwingvorgang befindet. Intervalle mit hinreichen konstanter Phasenbeziehung wechseln mit Intervallen ab, in denen es zum Ausbrechen aus der Synchronisation bzw. der Selbst-Justierung des Systems kommt.

In den Abbildungen 4(a) - 4(i) sind drei charakteristische Zeitintervalle dargestellt. Die drei Zeitintervalle von jeweils 5 ms Länge zeigen exemplarisch Sequenzen des akustischen Einschwingvorgangs, der Synchronisation des Zwei-Pfeifen Systems sowie den Prozess der Selbst-Justierung. Gezeigt sind die Schalldrucksignale an den Probenpunkten C beider Pfeifen, P1 (blau) und P2 (rot,strich-punkt), die Schallschnelle  $v$  sowie die Phasenportraits.

In der Sequenz des akustischen Einschwingvorgangs  $5 \text{ ms} < t < 10 \text{ ms}$  erkennt man, dass das Signal P2 dem Signal von P1 vorausseilt. P2 hat die höhere Frequenz und läuft daher im betrachteten Zeitintervall ca. eine viertel Periode schneller als P1 (vgl. Abb. 4(a)). In der Abbildung 4(b) der Schallschnelle erkennt man noch viele, durch Quermoden verursachte Störungen der Signale, aber auch, dass sich gewisse Schwingungsmuster, insbesondere die Fundamentalschwingungen und die höheren Harmonischen ausbilden und stabilisieren.

Ein sehr viel geordneteres Bild zeigt die Sequenz  $20 \text{ ms} < t < 25 \text{ ms}$ , in dem das System synchron schwingt. In Abbildung 4(d) Man erkennt die Frequenz- oder Modenkopplung der Fundamentalschwingungen. Die Entwicklung der Schallschnelle verläuft ebenfalls synchronisiert. Neben den Fundamentalschwingungen beobachtet man aber auch höhere Harmonische. Im Phasenportrait in Abbildung 4(f) ist dies noch deutlicher zu erkennen.

In der Sequenz  $30 \text{ ms} < t < 35 \text{ ms}$  ist deutlich eine Periodenverdopplung des Signals von P1 bei gleichzeitiger Amplitudenabsenkung zu erkennen. Es wird vermutet, dass dies als Antwort auf das erneute, schnellere Schwingen von P2 erfolgt. Dabei zeigt die Schallschnelle von P1 ausgeprägte Nebenmaxima, die sich der 3. Harmonischen zuordnen lassen. Im Phasenportrait ist die Amplitudenabsenkung von P1 noch deutlicher zu erkennen. Das Agieren der dritten Harmonischen zeigt sich im Auftreten von Loops der Trajektorie von P1. Man beobachtet, dass P1 auf Kosten der Amplitude schneller schwingt und sich so dem Schwingungsverhalten von P2 anpasst. Das ist insofern bemerkenswert, als dass aus der Theorie der Synchronisation [6] bekannt ist, dass die Amplitude von Oszillationen auf einem Grenzzyklus asymptotisch-stabil ist, also Ljapunov-stabil (d.h. hinreichend kleine Störungen bleiben klein) und attraktiv, während die Phase neutral stabil ist, also stabil, aber nicht asymptotisch stabil. Für P2 wiederum „kostet“ es offenbar zu viel Energie, die Amplitude zu ändern. P2 ändert seine Phase, was zur Verlangsamung des Schwingens führt. Aufgrund der geringen Datenlage (ein Simulationslauf) kann das Wechselspiel hier nur qualitativ beschrieben werden. Welche Rolle der Energietransfer zwischen den Harmonischen bei der Synchronisation spielt und wie er genau funktioniert muss im Rahmen dieser Arbeit offen bleiben, ist aber eine spannende Fragestellung der aktuellen Forschung.

Die angestellten Betrachtungen beziehen sich auf ein mit  $0 \text{ ms} < t < 90 \text{ ms}$  vergleichsweise kleines Zeitintervall. Das bedeutet, es kann nicht abschließend geklärt werden, ob das System auch dauerhaft synchronisiert. Die dargestellten qualitativen Ergebnisse legen das nahe. Um die beobachteten Hinweise weiter zu verdichten, sind weitere, längere Simulationsläufe mit verschiedenen Pfeifenabständen und Verstimmungen notwendig.

## Zusammenfassung

In dieser Publikation wurden die Herangehensweisen, Methoden, Techniken sowie Werkzeuge für die numerische Behandlung aeroakustischer und fluidodynamischer Problemstellungen vorgestellt. Die Ausführungen fokussieren auf die numerische Behandlung der kompressiblen Navier-Stokes Gleichungen unter geeigneten Anfangs- und Randbedingungen der zu untersuchenden Problemstellung. Thematisiert wurde insbesondere das Vorgehen, welches zur erfolg-

reichen numerischen Bearbeitung des Problems der Synchronisation zweier Orgelpfeifen führt. Das Prozedere kann gegliedert werden in:

- O Physikalische Vorbetrachtungen,
- A Implementation (Pre-Processing),
- B Numerische Simulation (Processing),
- C Visualisierung und Analyse (Post-Processing).

Bei der Erstellung der numerischen Simulationen wurden Teile der unter der GNU General Public Licence stehenden C++ Bibliothek OpenFOAM 2.1 verwendet [3]. OpenFOAM steht für Open Source Field Operation and Manipulation und ist durch den Anwender frei konfigurier- und erweiterbar. Durch den Einsatz von numerischen Simulationen lassen sich die enormen Investitionen beim Bau einer Großorgel reduzieren. Darüber hinaus eröffnen numerische Simulationen einen tiefen Einblick in die sehr komplexen Vorgänge der Schallentstehung und der gegenseitigen Wechselwirkung akustischer Oszillatoren, die experimentell nicht oder nur schwer zugänglich sind.

Es wurde gezeigt, dass sich die komplexen, nichtlinearen Wechselwirkungen zweier Orgelpfeifen, die zur Synchronisation führen, mit Hilfe von numerischen Simulationen sehr gut abbilden lassen. Hierzu wurden die Geometrien zweier gegeneinander verstimmter baugleicher, gedackter Orgelpfeifen in ein pseudo-3D-Rechengitter übertragen. Das aeroakustisch und fluidynamisch sehr anspruchsvolle Problem wurde vollständig kompressibel gerechnet. Im Ergebnis der Analyse der Drucksignale der Probenpunkte im Inneren der jeweiligen Resonatoren zeigt das gekoppelte Zwei-Pfeifen System in der numerischen Simulation alle Merkmale, die die Ausbildung und die Aufrechterhaltung von synchronisierten Schwingungsvorgängen kennzeichnen.

## Literatur

- [1] Wolfgang Adelung. *Einführung in den Orgelbau*. Breitkopf & Härtel, Wiesbaden, 2003.
- [2] Jost Leonhardt Fischer. *Nichtlineare Kopplungsmechanismen akustischer Oszillatoren am Beispiel der Synchronisation von Orgelpfeifen*. PhD thesis, Universitätsbibliothek der Universität Potsdam, 2014.
- [3] H. Jasak, A. Jemcov, and Z. Tukovic. Openfoam: A c++ library for complex physics simulations. In *International Workshop on Coupled Methods in Numerical Dynamics, IUC, Dubrovnik, Croatia*, 2007.
- [4] Philip McCord Morse and K Uno Ingard. *Theoretical acoustics*. Princeton university press, 1968.
- [5] OpenFOAM. OpenFOAM Webpage: <http://www.openfoam.com>, Juni 2012.
- [6] Arkady Pikovsky, Michael Rosenblum, and Jürgen Kurths. *Synchronisation - A universal concept in nonlinear sciences*. Cambridge University Press, 2001.
- [7] D. Zscherpel. Alexander Schuke Orgelbau PotsdamGmbH, 2014. priv. comm.

# Maßnahmen zur Verbesserung des Klangs von Saxophonen

Johann-Markus Batke

Hochschule Emden/Leer, E-Mail: [johann-markus.batke@hs-emden-leer.de](mailto:johann-markus.batke@hs-emden-leer.de)

## Zusammenfassung

Um den Klang eines Saxophons zu verbessern, wird oft der S-Bogen ausgetauscht. Andere Maßnahmen sind das Anbringen einer Phase an der S-Bogen-Mündung oder auch ein Aufsteckring am Mundstück. Ziel dieses Beitrags ist die Diskussion, ob sich Veränderungen theoretisch begründen und ggf. andere als empirische Bewertungsmethoden finden lassen.

## Motivation

Maßnahmen, wie sie an Saxophonen zur Klangverbesserung vorgenommen werden, finden sich in ähnlicher Art und Weise bei wohl allen Instrumentengruppen wieder. Interessant ist, ob diese Maßnahmen sich tatsächlich akustisch auswirken, was häufig durch den Instrumentalisten beurteilt und so die Maßnahme schließlich rechtfertigt wird. Soll statt dieser empirischen Beurteilung eine objektive Messung erfolgen, die im Idealfall sogar theoretisch untermauert werden kann, so ist zuerst eine geeignete Messmethode bzw. das passende theoretische Gedankengebäude zu finden.

Die Auswahl der Untersuchungsmethode hängt häufig vom Ausführenden der objektiven Messung ab – im Falle der Untersuchung von Saxophonen wurde vom Autor bisher der Weg gewählt, das Signal einer Mikrofonaufnahme mit Methoden der digitalen Signalverarbeitung eingehend zu untersuchen. Je nach Art des Problems kann dieses Vorgehen zum Auffinden objektiver Maßstäbe geeignet sein oder dieses Ziel auch verfehlen, Materialuntersuchungen, optische Untersuchungen oder andere Verfahren könnten geeigneter sein. In diesem Beitrag werden für den Fall des Saxophons daher eine Anzahl verschiedener Maßnahmen zur Klangverbesserung kurz vorgestellt, eine technische Einordnung versucht und sofern vorhanden, auf bisherige Untersuchungsergebnisse verwiesen. Ziel des Artikels ist es, eine Diskussion über die Fachgrenzen der Untersuchungsmethoden hinaus anzustoßen.

## Methoden zur Untersuchung

### Empirie

Empirische Untersuchungen sind vermutlich die am häufigsten gewählte Methode, um Klangverbesserungsmaßnahmen an Musikinstrumenten zu untersuchen. Diese werden von Musikern durchgeführt, die das Instrument spielen können und den Effekt der Maßnahme unmittelbar bewerten. Zunächst ist dies vorteilhaft, da relevante Parameter automatisch hervortreten. Bei Saxophonen wird bei Klangverbesserungsmaßnahmen oft von einer besseren Ansprache oder Intonati-

on<sup>1</sup> berichtet.

Um den Einfluß der (nicht eben selten bei Musikern anzutreffenden) vorgefassten Meinung auszuschalten, ist ein Blindtest hilfreich. Bei vielen Instrumenten, speziell bei Saxophonen, ist es wichtig, Optik, Haptik, aber auch den Kontext zu verbergen. Die Optik von Instrumenten sich lässt allgemein durch einen abgedunkelten Raum verbergen (Ziegenhals 2014), haptische Eigenschaften sind je nach Instrument mehr oder weniger gut auszublenden. Der Kontext der Untersuchung bedeutet in diesem Zusammenhang, wie weit der Musiker über weitere Umstände zum Test informiert ist – beispielsweise kann das Wissen, dass das vom Musiker favorisierte Instrument in einer Testreihe vorhanden ist und entsprechend als das beste klassifiziert werden muss, großen Stress beim Musiker auslösen.

### Theorie

Um Klangverbesserungsmaßnahmen beurteilen zu können, liegt es nahe, dass produzierte akustische Signal aufzuzeichnen und mit Methoden der Signalverarbeitung eingehend zu untersuchen. Dies kann für einen Punkt im Raum erfolgen (Batke und Gloger 2012; Batke und Gloger 2013) oder für eine Vielzahl von Raumrichtungen, um die Abstrahlcharakteristik des Instruments zu erfassen (Deboy und Zotter 2010). Nach erfolgter Signalanalyse, etwa durch spektrale Untersuchungen wie in Batke und Gloger 2012 stellt sich die Frage, ob das gefundene Ergebnis für einen Hörer wahrnehmbar ist. Soll dies durch Abhören des aufgezeichneten Signals nachvollzogen werden, sind möglicherweise aufwendige Verfahren zur Auralisierung notwendig. Die maschinelle Erkennung von Qualitätsunterschieden akustischer Signale sind Gegenstand aktueller Forschung (Rake, Wiersdorf und Blauert 2014).

Wird das zu testende Instrument durch einen Musiker gespielt, so wird immer das Gesamtsystem Instrument-Spieler getestet; dies ist für die Beurteilung des Instruments zu beachten, denn ein verändertes Instrument kann ohne weiteres die Spielweises des Musikers ändern, was wiederum maßgeblich ein Messergebnis wie eine akustische Messung beeinflussen kann. Ursache und Wirkung lassen sich möglicherweise nicht eindeutig zuordnen.

Um den Einfluss des Musikers zu vermeiden, kann ein Automat als künstlicher Spieler herangezogen werden (ein Beispiel von vielen für das Saxophon findet sich bei (Raes 2014)). Es ist zu beachten, ob der Automat einen menschlichen Spieler hinreichend modelliert. Ist dies der Fall, können Automaten erfolgreich zur akustischen Untersuchung wie bei Grothe 2014 verwendet werden.

<sup>1</sup>Bei Saxophone wird der Begriff Intonation im Sinne von SStimmung"verwendet.

## Verbesserungsmaßnahmen

Nachfolgend werden einige Klangverbesserungsmaßnahmen für Saxophone vorgestellt, um einen Eindruck der Untersuchungsproblematik zu geben. Empirische wie theoretisch begründete Untersuchungen werden, sofern vorhanden, kurz erläutert.

### Mundstück

Dem Mundstück eines Saxophons kommt als Tonerzeuger starker Einfluss bei der Klangentstehung zu. Entsprechend gibt es eine Unmenge von Mundstückanbietern, darüber hinaus wird aber auch Zubehör für Mundstücke angeboten.

Exemplarisch gezeigt werden soll hier ein Mundstück des Saxophonisten James Bunte, dass ergänzend mit einem Aufsteck-Metallring ausgestattet ist, siehe Abbildung 1.



Abbildung 1: Ein Tenorsaxophon-Mundstück mit optionalem Aufsteckring. Bildquelle: Neff 2011

Der Saxophonist Steve Neff schreibt in seinem Test (Neff 2011):

When I played the mouthpiece in my practice room I felt like the metal band made the tone **thicker and fuller sounding**. On the other hand, without the ring it felt like the piece vibrated more and a bit **more buzz and ring** to it. When I listen to the sound clips **I'm not sure if I hear this difference**.

Der Saxophonist beschreibt eine spürbare Änderung durch den Aufsteckring, die sich durch eine akustische Aufnahme nicht nachvollziehen lässt. Es stellt sich die Frage, wie objektiv die Wahrnehmung des Spielers war. Wenn sie es war, bleibt die Frage, ob die akustische Aufnahme ausreichend war, um den erzielten Unterschied wiederzugeben.

Ein weiteres Zubehörprodukt für das Saxophonmundstück ist die sog. "Klangbrücke" (soundbridge), wie sie von Kuijt o.D. angeboten wird. Das Produkt wird als generell für Blasinstrumente geeignet beworben. Abbildung 2 zeigt die Montage bei einem Saxophonmundstück.

Die vom Hersteller beworbenen Eigenschaften

The lefreQue is a sound bridge that will make all wind instruments sound better. It consists of a bridge that is built up by two metal elements that **will repair the sound breaches** that occur in by different parts of a wind instrument.

konnten in einem Test durch den Saxophonisten Pete Thomas nicht nachvollzogen werden (Thomas o.D.):



Abbildung 2: Ein am Saxophon montiertes Plättchen zur Verbesserung der "Klangübertragung" vom Hersteller Lefreque (Kuijt o.D.). Bildquelle: (Thomas o.D.)

No discernible difference between takes with lefreque and without.

Auffällig ist in diesem Fall die offensichtlich ausgesprochen kleine Masse der Vorrichtung (vgl. die Größe des Aufsteckrings).

### Blatt und Ligature

Das Blatt als Teil des Anregungsmechanismus beim Saxophon ist unmittelbar als klangverändernd erkennbar, Material und Zuschnitt von Blättern sind wichtige Einflussfaktoren. Die Ligatur hält das Blatt mechanisch am Mundstück fest und kann sich potentiell auf den Klang auswirken, möglicherweise jedoch mehr noch auf das Spielgefühl. Auf eine Diskussion der Auswirkungen wird hier verzichtet, jedoch sollen der Vollständigkeit halber einige Variationen von Ligaturen in Abbildung 3 gezeigt werden.



Abbildung 3: Eine Vielzahl von Ligaturen wird für Saxophonmundstücke angeboten, Material und Form werden variiert.

### S-Bogen/Material

Der "S-Bogen" oder "Hals" des Saxophons schließt sich dem Mundstück an und wird von Saxophonisten getauscht, um Veränderungen in Ansprache, Klang und Tonvolumen bzw. verbesserter Intonation zu erzielen. Abbildung 4 zeigt beispielhaft S-Bögen aus Silber- bzw. Kupfermaterial. Während es einsichtig ist, dass eine geänderte Mensur sich auf die Intonation bzw. Intonierbarkeit des Saxophons auswirkt, sind Klangänderungen oftmals sehr nuanciert und darum umstritten. Untersuchungen mit Methoden der Signalverarbeitung zu Klang- und Anspracheunterschieden verschiedener Materialien finden sich in Batke und Gloger 2012 bzw. Batke und Gloger 2013. Bei den Untersuchungen wurden Sopransaxophone verschiedenen Materials von einem Musiker gespielt und akustisch aufgezeichnet. Es konnte gezeigt werden, dass sich Unterschiede im statistischen Mittel der Spektren je nach Material zeigen.

Ebenfalls auf den S-Bogen bezieht sich der Saxophonist Steve Goodson mit einem Einsatzstück für das Mundstück,



Abbildung 4: Beispiele für verschiedene Altsaxophon-S-Bögen, hergestellt aus Silber bzw. Kupfer. Bildquelle: Gloger Handkraft.

das er unter der Bezeichnung "Neck enhancer" mit der Firma "Nation of Music" vertreibt (Abbildung 5).



Abbildung 5: Der "Tenor neck enhancer" des Herstellers "Nation of Music". Bildquelle Goodson o.D.

Neben den für getauschte S-Bögen typischen Verbesserungen wird auch auf die Kostengünstigkeit der Maßnahme verwiesen:

Our tenor sax neck enhancer will **even out the tone, reduce resistance, increase response, and make your altissimo scream!** This is very easily the most cost efficient improvement you can make to your horn. Just slip the enhancer into the small end of your neck, put your mouthpiece on (it will tune in exactly the same place as it did without the enhancer), and prepare to be amazed!

Eine Änderung des Instrumentenverhaltens bei Verwendung des "Neck enhancers" ist durchaus zu erwarten, da das Innenvolumen des Mundstücks deutlich verkleinert wird.

## Trichter

Als Modifikation von Saxophonen weitab vom Mundstück soll schließlich ein Sopransaxophon des italienischen Herstellers Borgani vorgestellt werden. Das in Abbildung 6 gezeigte Instrument lässt sich mit verschiedenen Schallbechern ausstatten, die angeschraubt werden.

Die Trichter werden aus den Materialien Kupfer und Silber angeboten. Die Besprechung auf Haecker o.D. kommt zum Ergebnis, das deutliche Unterschiede auftreten. Der Test des Autors dieses Artikels kommt nicht zu diesem Ergebnis.

## Zusammenfassung

Es wurden einige Modifikationen an Saxophonen vorgestellt, die alle das Ziel der Klangverbesserung haben. Am Instrument lassen sich Mundstück, S-Bogen und ggf. sogar der Trichter tauschen. Weitere Veränderungen werden



Abbildung 6: Sopransaxophone des Herstellers Borgani lassen sich mit verschiedenen Schallbechern ausstatten. Bildquelle: Haecker o.D.

durch Zubehör wie die Ligatur oder eine "Sound-Bridge" vorgenommen.

Die Untersuchungen der Wirksamkeit dieser Modifikationen ist nicht trivial. Die theoretische Abschätzung durch Analyse des akustischen Signals bringt immer die Schwierigkeit der Zuordnung der erzielten Wirkung mit sich. Empirische Untersuchungen, meist der Test durch einen Musiker, haben dieses Problem nicht, sind allerdings ausgesprochen unsicher.

## Literatur

- Batke, Johann-Markus und Karsten Gloger (2012). "Bewertung von Saxophonspektren mit Methoden der Signalverarbeitung". In: *Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA 2012)*.
- (2013). "Analysis of saxophone attack transients by autoregressive modelling". In: *Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA 2013)*.
- Deboy, Daniel und Franz Zotter (2010). "Acoustic Center and Orientation Analysis of Sound-Radiation Recorded with a Surrounding Spherical Microphone Array". In: *2nd Ambisonics Symposium*. Paris.
- Goodson, Steve. *Nation of Music*. URL: <http://nationofmusic.com/>.
- Grothe, Timo (2014). "Klangänderungen durch Gabelgriffe beim Fagott". In: *Nuancen in der Musikalischen Akustik - Grenzgang zwischen Fakt und Mythos : Tagungsband zum Seminar des FAMA der DEGA, Detmold 09. - 10.11.2013*.
- Haecker, Tobias Leon. *Saxophonistisches: saxblog*. URL: <http://saxophonistisches.de/>.
- Kuijt, Hans. *LefreQue: dutch original sound solutions*. URL: <http://www.lefreque.com/>.
- Neff, Steve (2011). *Tenor Madness 42 Tenor Saxophone Mouthpiece*. URL: <http://www.neffmusic.com/blog/2011/09/tenor-madness-42-tenor-saxophone-mouthpiece/>.
- Raes, Godfried-Willem (2014). *Microtonal Musical Robot. ASA: an automated alto saxophone*. Research project on the development of new tools for musical expression at the University College Ghent - School of Arts. URL: <http://>

//www.logosfoundation.org/instrum\_gwr/  
asa.html.

Rake, Alexander, Hagen Wiersdorf und Jens Blauert (2014).  
“A case for TWO!EARS in audio quality assessment”.  
In: *Forum Acusticum*. European Acoustics Association.  
Kraków.

Thomas, Pete. *Taming the Saxophone*. Saxophone  
sound enhancing products. URL: <http://tamingthesaxophone.com/saxophone-sound-enhancing-products>.

Ziegenhals, Gunter (2014). “Zu Übereinstimmung von Mu-  
sikerurteilen und dem Einfluss der Objektreihenfolge bei  
Instrumententests (Spieltest)”. In: *Nuancen in der Musika-  
lischen Akustik - Grenzgang zwischen Fakt und Mythos :  
Tagungsband zum Seminar des FAMA der DEGA, Detmold  
09. - 10.11.2013*. Hrsg. von Deutsche Gesellschaft für  
Akustik Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. Berlin:  
DEGA.

# Physics of playing bluesharp

Alfred Förtsch

SGA, 63755 Alzenau, E-Mail: [foertsch@spessart-gymnasium.de](mailto:foertsch@spessart-gymnasium.de)

## Introduction

Bend notes are the trade mark of traditional harmonica blues. Overbends are the spice of modern bluesharp playing. Trying to understand such pitch bending within a simple linear resonator picture we will discuss resonances and phase shifts in the player's mouth. Appropriately defined phase shifts and their relation to the geometry of the oral cavity should also prove to be interesting within non-linear modelling.

## Basics

**Bluesharp**s are harmonicas with one blow and one draw reed per channel. It is the blow reed which will sound when one is softly blowing with relaxed embouchure into the instrument, whereas the draw reed will sound during drawing. Harmonica reeds oscillate without any constraint through a slit in a support plate and are therefore called **free reeds**.

Each reed is riveted on a metal plate with blow reeds on the upper and draw reeds on the lower one. Holding the instrument in a normal way (lower pitched notes to the left) one will find both kinds of reeds on the bottom side, blow reeds inside the channel and draw reeds on the outside of the instrument. There has to be an appropriate offset between reed tip and plate, so both kinds of reeds stick out downward. Blowing gently into one channel will narrow its offset for a blow reed (which is therefore called blown-closed) and enlarge it for a draw reed (which is called blown-open). When drawing at the channel, the roles of both reeds change. Calling the lower reed "blown"-closed and the upper reed "blown"-open still makes sense if one has in mind that a drawn air stream is directed from the outside to the inside of the reed channel.

Experiments [1] confirm that reed motion is exclusively induced by pressure differences between both sides of the reed, which again depend on reed position in a way that self-sustained oscillations can establish. The tip of the reed moves sinusoidally and can be modelled within good accuracy by a one point equivalent **harmonic oscillator** [2].

The air flow from the player's lungs to the environment or vice versa has to pass tiny gaps between reeds and plates, thereby forming a fast jet which acts as a source of a rich sound spectrum before dissipating.

Magnetic resonance images [3] show how Barrett (an instructor and professional player) gets normal and pitch bend notes by puckering as well as by tongue blocking. **Bends** and **overbends** come from specific tongue positions which are similar to those responsible for formants in speech production. Within linear acoustics **formants** are explained by resonances of the oral cavity. So pitch bending on the

"Mississippi saxophone" (as the bluesharp was called in former times) might be explained by resonances in the player's mouth, which take over the regime over the oscillating reeds, the analogy to woodwind instruments being obvious.

## Reed oscillation

The pressure fluctuations which define the external force in the harmonic oscillator equation of a free reed are complicated functions of time [2] [4]. Being weakly damped, a harmonica reed will nevertheless "feel" a **sinusoidal force**, namely the fundamental of the corresponding Fourier expansion. This behaviour of (nearly) exclusively coupling to the **fundamental** is quite different from the physics of woodwind or brass instruments.

A necessary (and in practice also sufficient) condition for a bluesharp to sound is that the interaction between air flux and reeds compensates for the friction terms in the oscillator equations. This will happen if each reed movement lags behind pressure fluctuations. It is a well-known property of harmonic oscillators that for small phase angles between elongation and force oscillation frequency and thus playing frequency of the instrument lies below eigen frequency of the reed, whereas playing frequency lies above eigen frequency for large angles.

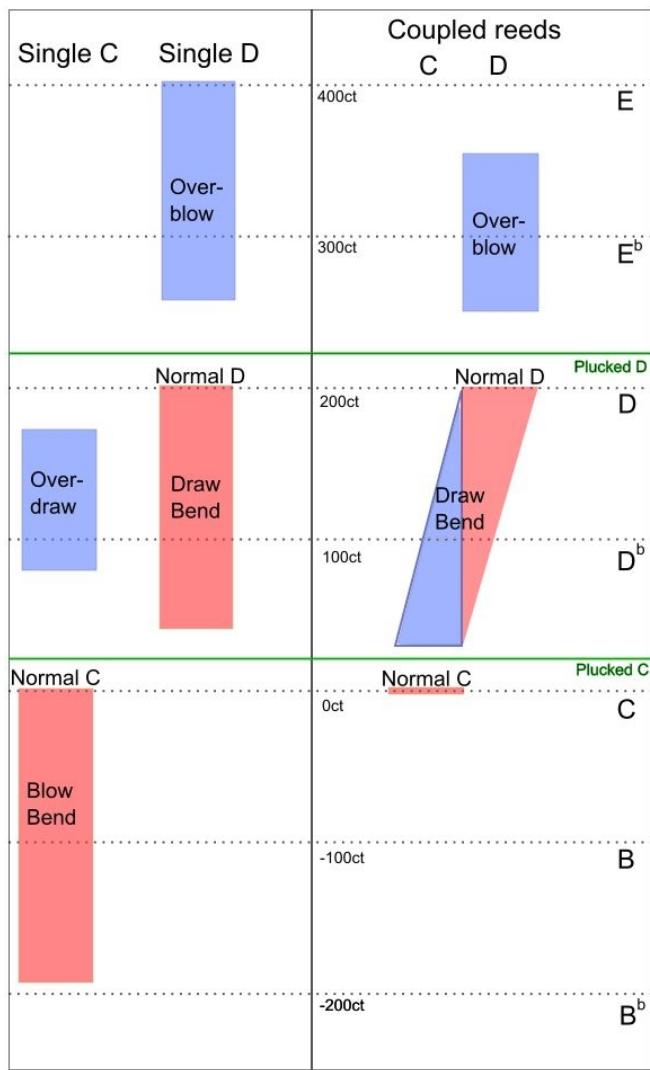
In woodwind or brass instruments this necessary **phase shift** comes from the bore as a resonator [5] [6]. For a free reed without any resonator the inertia of the air flux suffices to cause the required phase shift [1] [7]. For air flowing through a series of appropriately chosen volumes this phase shift can be derived without referring to standing waves or inertia, presupposing among others mass conservation for the volume flux [4] [8]. Such a non-linear ansatz might be inevitable because of the huge pressure fluctuations inside the player's mouth and the reed channels.

Let us look at a reed which is just moving from its rest position towards the reed plate. A blown-closed reed will close its gap, so pressure should rise and one might expect elongation and pressure to be in phase. A blown-open reed will further open the gap, more air can pass and pressure should fall, so elongation and pressure should be inversely phased. Adding some (but not too much) phase delay brings forth an intuitive explanation why blown-closed reeds sound below and blown-open reeds sound above their eigen frequency. Mind however that this argumentation is only valid for small oscillations, as long as the reed doesn't cross its plate.

## Pitch bending

Figure 1 compares frequency ranges of reeds in channel #4 of a C-harp. The values on the left-hand side were measured

after covering all other reeds of the harp with masking tape, especially the partner reed in the channel. The values on the right are playing frequencies of channel #4 with both reeds free. The origin of our logarithmic scale (labelled in cents) stands for the playing frequency 527Hz of the normal blow note C<sub>5</sub> (mind that most bluesharp are tuned some cent above equal tuning, so it makes sense to move the origin adequately). The color red stands for blown-closed, blue means blown-open. Plucking the reeds makes them oscillate with their respective eigen frequencies (plotted in green). The attained pitches depend of course on the quality of the instrument and on the skill of the player.



**Figure 1:** Pitches attainable on channel #4 of a C-harp as achieved by the author. Left-hand side: only one reed is allowed to oscillate. Right-hand side: both reeds in the channel are free to oscillate. Reeds may act as blown-closed (red color) or blown-open (blue color).

Attainable notes on hole #4 of a bluesharp with both reeds free to oscillate are a normal blow C, an overblow which can be bent up and a normal draw note D which can be bent down. The pitch of the draw note D could nearly be bent down to a C, which shows that it is only a rule of thumb that “one can bend down to a half note step above the lower note”. Overblows are often perceived by players as if the

normal blow note in the channel would “pop up” a minor third. Actually overblows come from the draw reed in the channel. According to figure 1 the overblow on channel #4 of a C-harp starts a scant over the eigen frequency of the blown-open draw reed D which lies a scant above its playing frequency as a normal blown-closed draw D which lies a whole note above the playing frequency of the normal blow C – adding to a scant minor third above the blow note C in concert with the player’s perception. Finally the interaction between a blown-open and a blown-closed reed results in some kind of obstruction: As soon as the draw reed D is allowed to oscillate, it is no more possible to bend the blow reed C with good tone, even if no overblow pops up instead.

As a plausible approximation one may assume that both reeds in the same channel feel the same pressure fluctuations, while the volume flux will find its way through both gaps, thus being influenced by both reed motions. Accordingly there are two jets as sources of sound. **Normal** notes are mainly produced by the blown-closed reed (the contribution of the blown-open reeds is omitted in figure 1). **Overblows** come nearly exclusively from the blown-open reed. **Bending** a draw note continuously down, at first the blown-closed reed starts oscillating, but the lower the pitch the more involved the blown-open reed gets (this passage is depicted only qualitatively in figure 1). The lowest pitch of a draw bend comes mainly from the blown-open draw reed.

Bend notes with both reeds oscillating are enabled by the phase conditions mentioned above. In some distance to the respective eigen frequencies of the reeds the blown-closed reed will nearly be in phase with pressure, while the blown-open reed will nearly be inversely phased. Consequently, the reeds will move nearly in parallel as described in [9], thus having a constructive impact on the pressure-fluctuations.

### The Johnston paper

Fletcher [5] modelled self-sustained air-driven oscillations of a reed coupled to a resonator in analogy to a two-point oscillator. He argued that self-sustained oscillations should occur near a pipe impedance maximum, if the real part of the admittance of the reed generator was negative and if the phase angles of the admittances of reed and pipe fulfilled a continuity condition. Johnston [10] modelled a bluesharp and the player’s oral cavity by simply adding the admittances of a blown-closed and a blown-open reed and coupling this parallel circuit to a resonator with more or less unknown properties.

With these input data one can look at the real part of the admittance of the reed system for different configurations (blow or draw notes on channels on the left-hand or on the right-hand side of the harp). For channels on the left-hand side (as channel #4 above) draw bends with pitches between both reed frequencies are predicted. For blow notes the real part of the admittance is negative below and above the respective eigen frequencies, so normal notes and overblows should be possible.

Without further information about impedance or admittance final conclusions could only be qualitative. Johnston assumed that a player can adapt both impedance maximum

and admittance phase angle independently so that all bend notes and overblows are achievable.

## Pitch bending and formants

Holding a reed plate out of the window of a driving car proves that there are self-sustained oscillations of free reeds without any extra volume. Playing **normal** notes on a bluesharps is possible with virtually any relaxed embouchure, otherwise the instrument would be hard to sell. It makes obviously no sense to explain normal notes with help of a resonator simply because there is none. Alternative explanations are mentioned above [1] [4].

**Bendings** and **overblows**, however, might have an intuitive explanation within a **resonator** picture, the transition from normal playing to bending corresponding to sharpening the impedance maxima of the oral cavity. Pitch bending utilizing mouth cavity resonances could be established for the clarinet and the saxophone, and saxophone players tune one of their mouth resonances a little bit above the frequency of the note to be played in the altissimo range [11] [12]. The author could achieve bend notes on a tenor saxophone with his harp player's bending embouchures (subjective impression) down to about 350Hz (sounding F<sub>4</sub>). The possibility for willingly manipulating the frequency of formants is basic for the singer's formant [13] which helps opera singers to be heard above the orchestra. Accordingly harp players have to learn **harp formants**. The tongue positions of Barrett [3] playing different draw bends on hole #3 of a C-harp are comparable with MRI-images of test persons speaking the vowel [i:] as analyzed by Kröger [14].

Striking at first glance is the cavity in the **anterior** part of the mouth which is delimited by the tongue nearly touching the palate. Standing waves in this cavity are made responsible for the second formant F<sub>2</sub> of [i:] and [u:], whereas the first formant F<sub>1</sub> of those vowels arises from the cavity between lips and glottis [15]. Both vowels have first formants F<sub>1</sub> with comparatively low frequencies of about 300Hz (corresponding to a draw D on hole #1 of a C-harp). Bending very low notes, players bring the lower parts of the respiratory tract into the game by lowering their glottis. The blow notes on the high end of a C-harp (hole #7 to #10) have frequencies of about 1000Hz to 2000Hz, which lie between the frequencies of the second formants F<sub>2</sub> of the vowels [u:] and [i:]. Thus the first formant of those vowels could explain bending lower notes, the second formant would explain bends and overbends of higher notes.

Bending lower notes continuously down, the above mentioned MRT images [3] as well as volume measurements in [9] show a correlation between pitch and volume of the anterior chamber, larger volume corresponding to lower pitch. However, for the wavelength  $\lambda$  of A<sub>4</sub> (whole step bend on hole #3 of a C-harp) one has  $\lambda/4 = 19\text{cm}$ , so standing waves in the anterior chamber can hardly explain pitch bending of such notes. This is a fortiori true for bending very low notes like a draw D<sub>3</sub> on hole #1 of a low C-harp with frequency 150Hz and wavelength  $\lambda = 2,30\text{m}$ . The larger volume should rather be a side effect, the decisive feature being the mountain-like **shape** of the tongue, which enforces

a detour upon the air streaming from the lips down to the glottis, thus lowering the first formant F<sub>1</sub>. A more concave shape of the tongue in the anterior chamber deepens the pitch even more [16]. The reason could again be an extension of the distance from the lips to the glottis, namely if the air stream is forced to follow the curvature of the tongue, maybe due to the Coanda effect. The geometry of the anterior chamber could also decisively influence phase shifts between pressure, air flow and reed oscillations, which in turn are related to playing frequency.

## Exploring the limits of the resonator picture

Playing experience shows that one achieves overblows on holes #4 or #6 by first bending the respective draw note as far as possible and then abruptly changing to an overblow, thereby keeping one's embouchure fixed. The corresponding pitch change of two semitones is hardly compatible with the idea of playing frequency close to impedance maximum, as the geometry of the oral cavity is unchanged. The explanation might be found in analogy to calculations and experiments with single reeds in Asian free reed instruments which are coupled to cylindric pipes as resonators [17]. Such an analogy makes sense, since solely the blown-open reed in the bluesharps channel is responsible for an overblow, and reeds in Asian free reed instruments are defined to be blown-open (despite of their symmetric geometry) because they sound above their eigen frequency.

Within Fletcher's theory [5], it is the continuity condition for the phase angles of the admittances of reed and resonator which turned out to be crucial for predicting the measured playing frequencies. Interestingly enough, this condition can even be stronger than the influence of the impedance maximum. As an example, the first impedance maximum of the sheng pipe lying at 350Hz, the instrument sounded with 520Hz slightly above reed eigen frequency of 511Hz. So one might suppose that bending on holes #4 to #6 on a blues harmonica works with an impedance maximum in the player's mouth somewhere below the pitch of the normal draw notes and a phase shift which at the same time enables the respective **overblows**.

Another observation casts doubt on a tight coupling of playing frequency and impedance maximum. **Bending** draw notes continuously down on holes #1 to #4 on a C-harp (or on lower tuned harps like a G-harp), one uses virtually the *same* sequence of oral configurations from [i:] to [u:], with playing frequencies varying over one octave. It is even possible to draw-bend an octave simultaneously down applying a tongue split on holes #1 to #4 (which might, however, be caused by a coupling of the oscillating reed pairs by the upstream air flow).

It seems as if the player achieved several things at once when manipulating the shape of the anterior chamber: Generating one or more oral cavity **impedance maxima** with the first order maximum somewhere in the lower frequency region and, equally important, setting up an adequate **phase shift** between volume flow and pressure fluctuations for the aspired pitch.

Summing up, the intuitive idea of the bluesharp as a “Mississippi saxophone” with the player’s mouth as a “bore”, which determines playing frequencies of various bends and overblows by its resonances, should at least be refined. Detailed information about the admittance of the player’s oral cavity seems desirable. The MRT data collected in [3] could provide impedance maxima and phase shifts for draw bends on hole #3 by numerical evaluation. Additional experiments and calculations with holes #1, #2, #4 and #6 could shed light on the above described phenomena.

As already mentioned, the reed as a weakly damped harmonic oscillator is mainly influenced by the first harmonic of the pressure fluctuations in the oral cavity. So the examination of phase shifts between elongation and this first harmonic should also make sense in the framework of **non-linear** modelling.

## Literature

- [1] Ricot, D., Caussé, R., Misdariis, N.: Aerodynamic excitation and sound production of blown-closed free reeds without acoustic coupling. The example of the accordion reed. *The Journal of the Acoustical Society of America* 117(4) (2005), 2279-2290
- [2] Millot, L.: «Etude des instabilités des valves : Applications à l’harmonica diatonique», thèse de doctorat, Paris (1999)
- [3] Egbert, P. R., Shin, L. K., Barrett, D., Rossing, T., Holbrook, A. B.: Real-time magnetic resonance imaging of the upper airways during harmonica pitch bends. *Proceedings of Meetings on Acoustics* 19(1), Acoustical Society of America (2013), 035075
- [4] Millot, L., Baumann, C.: A proposal for a minimal model of free reeds. *Acta acustica united with acustica* 93(1) (2007), 122-144
- [5] Fletcher, N. H.: Excitation mechanisms in woodwind and brass instruments. *Acta Austica united with Acustica* 43(1) (1979), 63-72
- [6] Fletcher, N. H.: Autonomous vibration of simple pressure controlled valves in gas flow. *The Journal of the Acoustical Society of America* 93(4) (1993), 2172-2180
- [7] Hilaire, A. O. S., Wilson, T. A., Beavers, G. S.: Aerodynamic excitation of the harmonium reed. *Journal of Fluid Mechanics* 49(04) (1971), 803-816
- [8] Millot, L.: Chromatical playing on diatonic harmonica: from physical modelling to sound synthesis. 162th meeting of the Acoustical Society of America San Diego (2011)
- [9] Bahnson, H. T., Antaki, J. F., Beery, Q.C. : Acoustical and physical dynamics of the diatonic harmonica. *The Journal of the Acoustical Society of America* 120(5) (1998), 2134-2144
- [10] Johnston, R. B.: Pitch control in harmonica playing. *Acoustics Australia* 15(3) (1987), 69-75
- [11] G. P. Savone, A. Lefebvre, A. R. da Silva : Measurement of vocal-tract influence during saxophone performance. *The Journal of the Acoustical Society of America* 123(4) (2008), 2391-2400
- [12] Chen, J. M., Smith, J., Wolfe, J.: Saxophonists tune vocal tract resonances in advanced performance techniques. *The Journal of the Acoustical Society of America* 129(1) (2011), 415-426
- [13] Wolfe, J., Garnier, M., Smith, J.: Vocal tract resonances in speech, singing, and playing musical instruments. *HFSP journal* 3.1 (2009), 6-23
- [14] Kröger, B. J.: Analyse von MRT-Daten zur Entwicklung eines vokalischen Artikulationsmodells auf der Ebene der Areafunktion. *Elektronische Sprachsignalverarbeitung. Studientexte zur Sprachkommunikation* 20 (2000), 201-208
- [15] Trommer, J., (2007) URL: <http://uni-leipzig.de/~jtrommer/phonetik07/k5c.pdf>
- [16] Barrett, D.: Bending Process on the 10-Hole Diatonic Harmonica with the Visual Aid of Magnetic Resonance Imaging (MRI). [https://www.bluesharmonica.com/sites/bluesharmonica.com/files/mri\\_bending-study\\_barrett.pdf](https://www.bluesharmonica.com/sites/bluesharmonica.com/files/mri_bending-study_barrett.pdf)
- [17] Dieckman, E. A., Cottingham, J. P.: Input impedance of Asian free reed mouth organs. *Journal of the Acoustical Society of America* 120(5) (2006), 3076-3076

# Studying the Sound Generation in the Bassoon

Timo Grothe<sup>1</sup>, Johannes Baumgart<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Erich-Thienhaus Institut, Hochschule für Musik Detmold*, <sup>2</sup>*Max-Planck-Institut für Physik Komplexer Systeme, Dresden*

Email: [grothe@hfm-detmold.de](mailto:grothe@hfm-detmold.de)

## Abstract

A model of the reed-resonator interaction in woodwind instruments is applied to the case of the bassoon. For measured values of the quasi-stationary lip force and blowing pressure, the unsteady pressure in the reed mouthpiece is calculated and compared to experimental observations. The computed sounding frequency is compared to empirical estimates from the impedance curve of the resonator. When only the most harmonic air column modes are used to represent the resonator, the averaged pitch deviation between model and experiment is smaller than a half semitone for notes in the mid and high range. The results point to the importance of higher modes for the pitch, especially for notes in the low range.

## Introduction

Unlike in string instruments, where there are two separated parts responsible for the control of pitch and the radiation of sound, in reed instruments both functions are united in the acoustic resonator. Even if radiation aspects are excluded, designing an optimal resonator in terms of pitch is a difficult task. Its fundamental and higher modes trigger the vibration of the reed mouthpiece and thus determine the pitch to a large extent. Fine-tuning can be done by the musician who can bend notes by adjusting the lip force on the reed and the blowing pressure. Because the coupling between reed and resonator is non-linear, it is very difficult to understand the contributions of the individual air column modes for the generation of the fundamental frequency.

Predictions of intonation properties are hardly to be derived only from the passive acoustic properties of the air column [1]. A simplified yet reliable model of the full system of air column and mouthpiece would be very useful for a directed woodwind instrument design which recently has been in the focus of some scientific studies [2, 3, 4].

Here we apply a minimal model that has been suggested for the clarinet [5] to the case of the bassoon and compare the sounding frequency prediction from the model to intonation estimates that are purely based on the air columns properties.

This text is organized as follows: At first, a short description is given on the model, on how the model parameters can be estimated from experiments [6], and on fundamental frequency estimators. In the subsequent section, a detailed examination of the note E $\flat$ 3 on several bassoons is given, followed by an overview of the predicted fundamental frequency of tones from the full tonal range of the bassoon. In the concluding section, the results are evaluated in terms of prediction accuracy and compared to simpler estimators.

## Material and Methods

### Reed Model

The physical model in the form in which it is used here was proposed by Kergomard [7]. We employ here the implementation of Doc *et al.* [5]. Intentionally it was developed for a clarinet, but we use it here for the bassoon with some modifications to the reed valve characteristics [6].

The model splits reed instruments into a resonator and a generator part and their coupling is due to the principle of mass conservation. In the model, the resonator is represented as a superposition of  $n$  acoustic modes. The generator is represented as a non-linear function with two parameters.

One specific playing configuration is determined by the following  $3n + 2$  parameters

$\omega_i$  angular frequency,

$Q_i$  quality factor,

$F_i$  relative magnitude,

$\gamma$  blowing pressure parameter,

$\zeta$  embouchure parameter,

where  $i = 1..N_m$  and  $N_m$  is the number of acoustic modes taken into account in the representation of the resonator. Details of the model are given in [5]. The clarinet case introduced there was adapted for the bassoon by a modification of the flow-pressure characteristics, as suggested in [6].

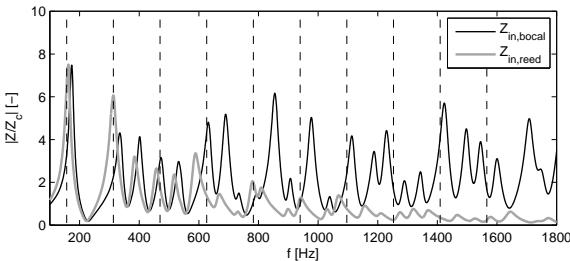
To apply the model, we need to determine these model parameters from experiments.

### Impedance Measurement

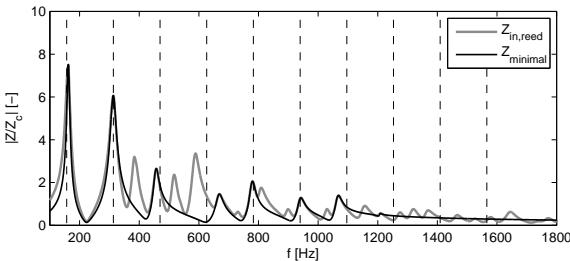
The air column of a specific fingering is approximated by an acoustic oscillator with  $n$  degrees of freedom. This is done by adjusting the  $3n$  parameters  $\omega_i, Q_i, F_i$  ( $i = 1..n$ ) of its transfer function such that it fits the input impedance of at the reed tip  $Z_{in,reed}$ . Because it is difficult to measure this quantity, we measure  $Z_{in,bocal}$  at the bocal input and calculate the input impedance at the reed tip by adding a cavity of volume  $V_{eq} = 1.9 \text{ cm}^3$  at the input end of the bore (Figure 1).

Following the rationale of Benade [8, 9] that a regime of oscillation settles at a frequency which is a best compromise between the air column modes, and knowing that the steady state sound consists of strictly harmonic components, only, we discard several acoustic modes from the measured spectrum: For each harmonic we retain only one air column mode, the one whose modal frequency is closest to the harmonic (Figure 2).

Using this reduced representation of the resonator is a strong simplification that we draw to find a minimalistic model of bassoon sound production. The aim of the article is to show



**Figure 1:** Modulus of the input impedance of the bassoon at the bocal input end (measured) and at the reed tip (numerically corrected).

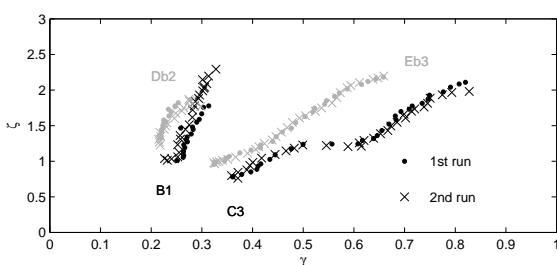


**Figure 2:** Modulus of the input impedance at the reed tip and an approximation to that curve with the 7 least inharmonic acoustic modes.

how this minimalistic model performs in estimates of the sounding frequency.

### Control Parameters

The embouchure configuration on the reed is represented by the parameters  $\gamma$  and  $\zeta$ , which are non-dimensional numbers that represent blowing pressure and embouchure tightness, respectively. These model parameters can be regarded as the control parameters with which the musician adjusts the sound. They can be obtained under stationary playing conditions for any specific embouchure configuration from a measurement of blowing pressure and lip force [6]. Note, that for each note on the bassoon quite different embouchure characteristics ( $\gamma, \zeta$ ) are needed to play in tune (Figure 3). The variability in the characteristics when playing several notes is much larger than between two repeated measurement runs. Experimental



**Figure 3:** Measured control parameters for to play the notes B1, D $\flat$ 2, E $\flat$ 3, C3 in tune. A measurement repetition is shown to illustrate the repeatability of the experiment.

data from a variety of fingerings on several bassoons and for a wide range of reed blowing configurations has been obtained [6]. Here, we first focus on the note E $\flat$ 3, to show some detailed simulation results and prove the concept. Second, we show sounding frequency estimates derived from the model

when applied to the full tonal range of the bassoon.

### Tuning Estimates

Several approaches have been proposed to derive fundamental frequency predictions from measurements of the resonator along with assumptions on the generator. We want to compare three of these estimators which are based only on the impedance curve, with the simulation results using the reduced resonator model introduced above. The comparison encompasses the following estimators for  $f_0$

Frequency of the largest<sup>1</sup> impedance peak ( $f(Z_{max})$ )

Maximum in the sum function (SF),

Zero-crossing of the intonation average ( $I_{av}$ ),

Simulation result of the minimal reed model (MRM),

which are explained in the following:

The most intuitive but oversimplified idea is, that the sounding frequency equals an air column resonance frequency. For many fingerings, this frequency can be found near the global maximum in the impedance modulus spectrum.

To account for the importance of higher acoustic modes Wogram suggested a “sum function” [10]

$$SF(f_0) = \sum_{n_h=1}^{N_h} \Re\{Z(n_h f_0)\}, \quad (1)$$

where  $n_h = 1..N_h$  are the ordinal numbers of the partials taking into account<sup>2</sup>.

The sum of the real parts of the input impedance at the fundamental frequency  $f_0$  and its harmonics would indicate a measure for the ease of playing at  $f_0$ . Evaluating this sum over a range of frequencies yields the sum function SF, the maximum would indicate the preferred sounding frequency. The rationale for this assumption is, that in steady-state conditions, the pressure spectrum contains only strictly harmonic components. The idea of this sum function has been used in variations, which have recently been revisited [11].

Another approach related to the sum function is the weighted intonation average [6]:

$$I_{av}(f_0) = \frac{1}{\sum_{n_m} |Z_{n_m}|} \sum_{n_m=1}^{N_m} I_{n_m} |Z_{n_m}|, \quad (2)$$

where  $n_m = 1..N_m$  are the ordinal numbers of the most harmonic modes with respect to  $f_0$ . (See the reduced resonator model  $Z_{minimal}$  in Figure 2).  $Z_{n_m}$  are the corresponding impedance magnitudes.

Here, the idea is to evaluate the detuning of air column modes with respect to the next harmonic partial. Summing up these values, and weighting the contributions to this sum by the impedance magnitude of the respective air column modes results in an estimate of detuning  $I_{av}$  of the resonator. This is suggested as measure for a tuning tendency against which the musician has to work with his embouchure. Evaluating this metric over a frequency range indicates the preferred sounding frequency at a zero crossing of  $I_{av}$ .

<sup>1</sup>in the vicinity of the nominal sounding frequency

<sup>2</sup> $N_h$  depends on the frequency range of interest  $N_h \leq f_{max}/f_0$

In the minimalist reed model introduced above, we have adopted this key idea by retaining only a few nearly harmonic modes, and represent the resonator by  $Z_{minimal}$  (see Figure 2).

## Results

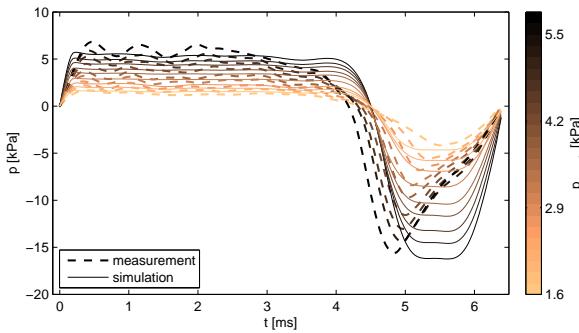
In this section selected results of the simulation are compared to experimental observations [6]. Focusing on the pitch, we show here tuning deviations in the unit Cent, which is the logarithm of a frequency ratio. If a frequency  $f$  is a semitone higher than a reference frequency  $f_{ref}$ , the corresponding detuning will be  $1200 \log_2(f/f_{ref})$  Cent = 100 Cent.

In all experiments, the control parameters were adjusted such that the sounding pitch  $f_{0,exp}$  equals the expected nominal pitch  $f_{0,nom}$  within a detuning of 0 Cent  $\pm 5$  Cent.

### Simulation results for E♭3

The note E♭3 on the bassoon is interesting, because it is played with a fork fingering known for an unstable pitch. This fingering shares the fundamental modal frequency (and the first open tonehole) with the note D3 which is a semitone lower. Therefore it is most obvious, that higher modes must play a role in the formation of a pitch. From a practical point of view, this is reflected in the fact that many auxiliary fingering alternatives (opening or closing additional tone holes downstream of the first open tonehole) are known among musicians to stabilize the intonation of this note [12].

The simulation of this note was successful for the full range of parameters  $(\gamma, \zeta)$  for which the standard fingering E♭3 [13] could be sounded in tune in the experiment. The dynamical pressure range was 2.4 to 8.2 kPa (RMS). The measured and simulated waveforms look different, still the magnitudes of maximum pressure and minimum pressure match well (Figure 4). Also the fundamental frequency did hardly change with a variation in blowing pressure, which suggests that the model represents well the mutual adjustment of mouth pressure and lip force to maintain the tuning when varying the dynamic level. When comparing lip force vs. blowing pres-

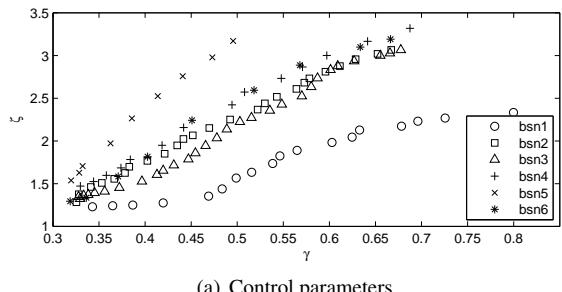


**Figure 4:** Pressure waveforms for the bassoon note E♭3 ( $f_{0,nom} = 156.6$  Hz), comparison of measurement and simulation result

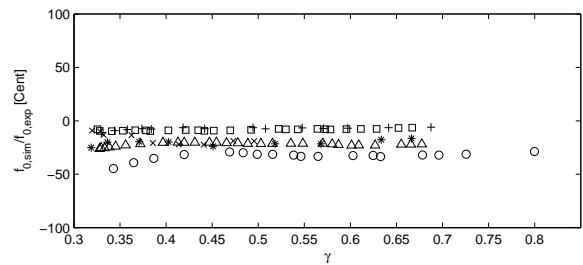
sure characteristics to play E♭3 in tune on several bassoons, we find significant differences (Figure 5(a)), which exceed by far the repeatability of the experiment (Figure 3). This means that the intonation property of this note varies largely among bassoons.

Comparing the simulation results  $f_{0,sim}$  for E♭3 with the ex-

periments we find differences in the order of 50 Cents, which corresponds to half a semitone. Another unexpected discrepancy is, that for the same blowing pressure  $\gamma$ , the bassoon  $bsn1$  played with highest lip force<sup>3</sup> has the lowest tuning among all bassoons under study. A similar phenomenon is reported for clarinets, where the pitch drops when increasing blowing pressure [2].



(a) Control parameters



(b) Pitch

**Figure 5:** Simulation result for E♭3: Control parameters  $\gamma$  and  $\zeta$  and resulting pitch, for five different bassoons. The pitch is indicated in terms of fundamental frequency deviation between simulation ( $f_{0,sim}$ ) and experiment ( $f_{0,exp}$ ).

### Fundamental frequency for all notes

Experimental data of  $Z_{in,reed}$ ,  $\gamma$  and  $\zeta$  are available for several bassoons over the full tonal and dynamical range [6]. For these sets of impedance curves, the fundamental frequency estimators described in section are given Figure 6(a) in form of a tuning deviation  $f_{0,est}/f_{0,nom}$  in Cent.

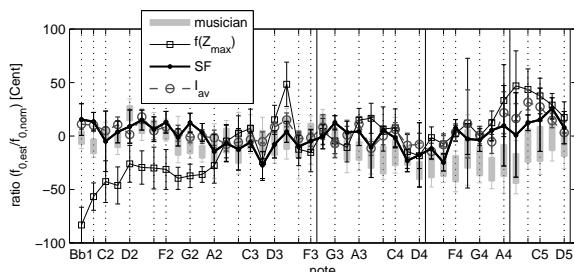
After the reduction of the corresponding input impedance curves  $Z_{in,reed}$  to *most harmonic* modal representations  $Z_{minimal}$ , simulations have been run for all experimental observations. The average<sup>4</sup> number of modeled configurations per note is 90 (approximately 15 dynamical levels on 6 bassoons). For simplicity these data are represented by mean value and standard deviation of the detuning  $f_{0,sim}/f_{0,exp}$  (Figure 6(b)). The gray boxplots in Figures 6 a) and b) are results obtained from an experiment with a musician, who was asked to play single notes on several bassoon-bocal-reed combinations repeatedly while omitting any conscious embouchure corrections [14].

It is remarkable, that for the notes at the lower end of the range, for which the first impedance peak is flat, the model has the largest scatter. This and the prediction of too sharp mean

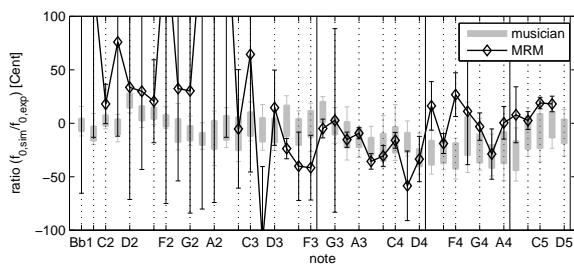
<sup>3</sup>A high lip force corresponds to a small  $\zeta$

<sup>4</sup>The exact number of experiments per note depends largely on the dynamical range along which it was possible to play in tune with an artificial mouth and ranges from 16 to 150.

values for the pitch may be due to averaging over overblown and/or multiphonic regimes which has not been investigated further here. For notes higher than D3, the model does not deviate more than 50 Cents from the experiment.



(a)  $f_0$ -estimators from an impedance measurement



(b)  $f_0$ -results from the simulation

**Figure 6:** Comparison of frequency estimators: first impedance peak ( $f(Z_{\max})$ ), sum function (SF), amplitude averaged pitch deviation ( $I_{\text{av}}$ ), and minimal non-linear reed model (MRM). The results are given in form of a tuning deviation  $f_{0,\text{est}}/f_{0,\text{nom}}$ . The gray boxplot represents the subjective tuning as perceived by a musician [14].

## Discussion

We employed a non-linear model for bassoon sound production, and used quantitative experimental data to test the model consistency.

With a minimalist approach using only a reduced set of the few *most harmonic* air column modes to represent the resonator, we find a reasonable agreement in sound level and pitch.

The model reproduces well the experimental observation that the steady state oscillations of reed instruments can be altered by adjusting the control parameters in a quasi-linear fashion to increase the sound level while maintaining the pitch.

Despite the large quantitative differences between measurement and simulation, the result of this preliminary study indeed is encouraging: Including overblown and multiphonic regimes, the mean value of sounding frequency lies for the majority of notes within the interval  $\pm 100$  Cent. Further we could show, that the simplest estimators are accurate within  $\pm 30$  Cent, if higher modes are taken into account.

For brass instruments it was found that sum function approaches would not provide more information than the direct reading of impedance peak data [11]. The present results however emphasize the importance of higher modes in bassoon air columns for the fundamental frequency estimation.

## Acknowledgment

The authors wish to thank Prof. Robert Mores for the organization of a very interesting and diversified seminar program.

## References

- [1] J. P. Dalmont, B. Gazengel, J. Gilbert, and J. Kergomard, "Some aspects of tuning and clean intonation in reed instruments," *Applied Acoustics*, vol. 46, no. 1, pp. 19 – 60, 1995. Musical Instrument Acoustics.
- [2] C. J. Nederveen and J.-P. Dalmont, "Mode locking effects on the playing frequency for fork fingerings on the clarinet," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, no. 1, pp. 689–697, 2012.
- [3] W. Coyle, J. Kergomard, P. Guillemain, C. Vergez, and A. Guilloteau, "An attempt at predicting the variation in playing frequencies for clarinets," in *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference 2013, SMAC 2013, Stockholm, Sweden*, 2013.
- [4] D. Noreland, J. Kergomard, F. Laloë, C. Vergez, P. Guillemain, and A. Guilloteau, "The logical clarinet: Numerical optimization of the geometry of woodwind instruments," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 99, no. 4, pp. 615–628, 2013.
- [5] J.-B. Doc, C. Vergez, and S. Missoum, "A minimal model of a single-reed instrument producing quasi-periodic sounds," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 100, no. 3, pp. 543–554, 2014-05-01T00:00:00.
- [6] T. Grothe, *Experimental Investigation of Bassoon Acoustics*. PhD thesis, Technische Universität Dresden, 2014.
- [7] J. Kergomard, *Mechanics of Musical Instruments*, ch. 6: Elementary Considerations on Reed-Instrument Oscillations, pp. 230–290. Springer Verlag Wien - New York, 1995.
- [8] A. H. Benade and W. B. Richards, "Oboe normal mode adjustment via reed and staple proportioning," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 73, no. 5, pp. 1794–1803, 1983.
- [9] A. Benade, *Fundamentals of Musical Acoustics*. Dover Publications, Inc., New York, 1990.
- [10] K. Wogram, *Ein Beitrag zur Ermittlung der Stimmung von Blechblasinstrumenten*. PhD thesis, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 1972.
- [11] P. Eveno, J.-F. Petiot, J. Gilbert, B. Kieffer, and R. Caussé, "The Relationship Between Bore Resonance Frequencies and Playing Frequencies in Trumpets," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 100, pp. 362–374, Mar. 2014.
- [12] T. B. Ewell, "Heckel eb3 (collection of suggestions for fingerings of eb3 on the modern german bassoon (heckel-system))." <http://www.idrs.org/resources/BSNFING/note/heckeB3.htm>, last viewed 2015/10/29, 1999.

- [13] T. B. Ewell, "The bassoon-family fingering companion." <http://www.idrs.org/resources/BSNFING/BsnFingerings.pdf>, last viewed 2015/10/29, 1999.
- [14] T. Grothe and J. Baumgart, "Assessment of bassoon tuning quality from measurements under playing conditions," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 101, no. 2, pp. 238–245, 2015.

## The Stroh violin and the phonograph

Polina Pirch<sup>1</sup>, Malte Kob<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laaber GmbH, 2355 Wiener Neudorf, Austria, Email: pp@schallmessung.com

<sup>2</sup> Erich-Thienhaus-Institut, Hochschule für Musik Detmold, 32756 Detmold, Deutschland, Email: kob@hfm-detmold.de

### Introduction

Sound transfer in the Stroh violins and the first recording machines is based on a similar physical principle. The vibration processes in the membrane and the conical horn are interrelated.

In case of the Stroh violin, the harmonic oscillation of the string is a source signal, and in case of the phonograph, the source is the singing voice with its formants and harmonic partials. Resonances of the horn emphasize or eliminate various frequency partials which results in a change in timbre.

This work presents the results from the comparative measurements: the transfer function of the Stroh violin is compared to the ordinary violin, and the phonograph wax cylinder recording is compared to the microphone recording.

### Phonograph

A. Rabinovici experimented with recording the Stroh violin on a wax cylinder [1]. She reports that the early recording horns probably distorted the sound before it got engraved on a cylinder or disc.

For the “Edison Home” phonograph seen in Fig. 1, our measurements in the laboratory of the Erich Thienhaus Institute (ETI) showed that the frequency range of the device is limited to 500 Hz to 4000 Hz. The frequency response of the whole device was obtained by recording test signals on the wax cylinder and comparing the playback with the microphone reference.



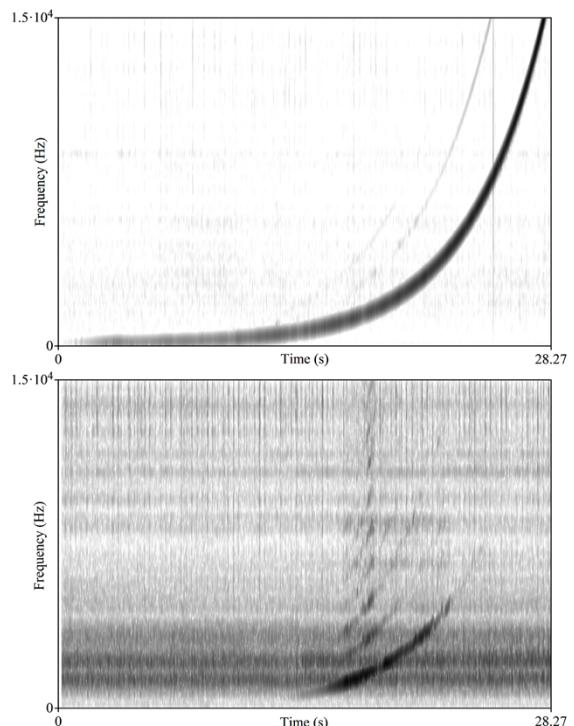
**Figure 1:** Recording of the singing voice on a wax cylinder with the Edison Home phonograph.

The frequency response of the phonograph is far from flat, which is the reason why the voice timbre is changed. The resonances lie in the region of vocal formants. This results in two effects. First, since the device itself is incredibly noisy, the mechanical noise is amplified almost to

the same level as the recorded voice. Therefore, the formants which are initially not there, appear in the recording and “color” the voice. These horn effects can be seen at the time signal of the recorded swept sine in Fig. 2: it amplifies the mechanical noise (horizontal lines) and causes the harmonics due to the conical shape.

Second, multiple harmonic partials develop at the horn resonance. Their overall level is decaying slower than the non-resonant tones, and a reverberation effect appears. These resonances are dependent on the dimensions of the recording horn.

The requirement for a better reproduction in a wide frequency range is the horn’s size and shape. The diaphragm condition must be good, and its tension shall be adjusted by the rim. As it was proven by Wilson [2], using the appropriate wide and long recording and playback horns (with the optimal shape for each of them), the low end of the phonograph frequency response could reach 30 Hz. This is not the case for the 30 cm x 30 cm horn of the Edison Home phonograph, however this model was very popular for a decade after 1900.



**Figure 2:** Recording of the swept sine with the microphone (top) and with the Edison Home phonograph (bottom), time domain.

## The Stroh violin

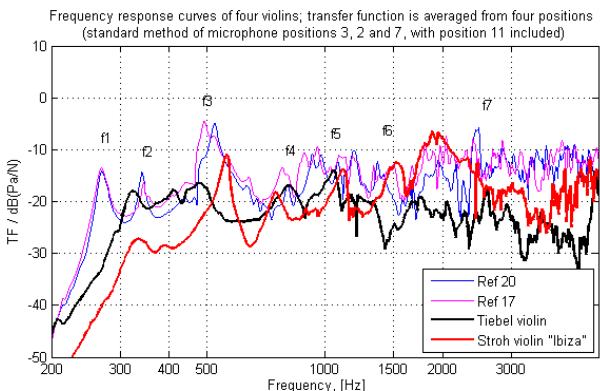
The Stroh violins have a circular diaphragm which translates the string vibration to the conical horn instead of a soundboard. The diaphragm and the horn color the sound of a bowed string at their natural frequencies. High sound projection is a benefit for the phonograph recording, since the phonograph recording horn is also a cone.

The studies and research works about the Stroh violin are listed in [5]. This work presents the sound path evaluation is based on measurements of the sound transfer functions in IfM Zwota. Two different Stroh violins are compared to two reference violins. The third Stroh violin was measured with and without the horn in ETI Detmold. The Stroh violins differ significantly in tim-



**Figure 3:** Setup for the measurement of transfer function and radiation pattern

bre. Though there is a considerable frequency dispersion, their modes are surprisingly close to the violins we are used to. R. Mores measured bridge admittance of the Stroh violin from the Hanneforth collection of instruments and compared it to the reference Stradivari masterwork [3]. The first peak of the Stroh violin bridge admittance is at 270 Hz, which is the same with the A0 Helmholtz mode of the ordinary violins, as if it would be “tuned”. The second peak is at 445 Hz, which is ca. 100 Hz higher than A1, the first longitudinal mode of the reference.



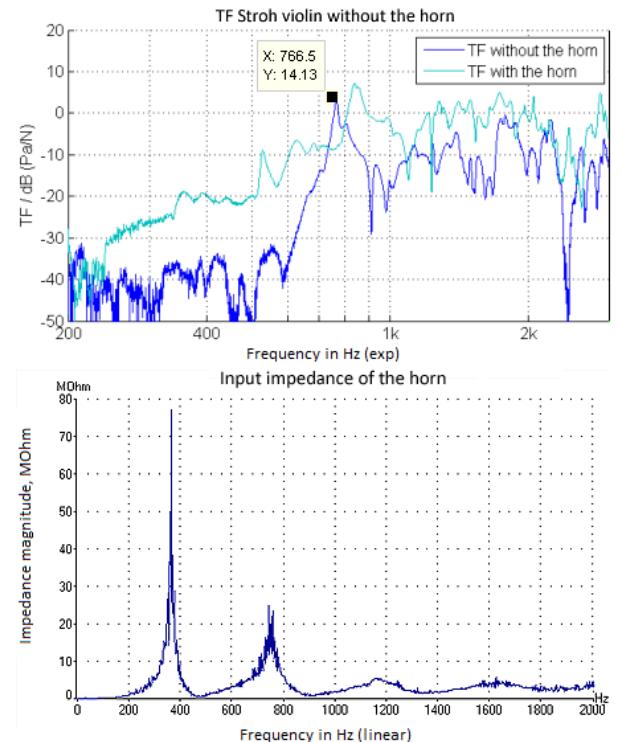
**Figure 4:** Transfer function of the two Stroh violins and two reference violins. Marked peaks correspond to the values in table

The transfer functions of the Stroh and the Tiebel violins from The Markneukirchen Musical Instrument Museum were measured in IfM Zwota according to the setup of Gunter Ziegenhals [6]. The Stroh violin is a replica and its horn is made of brass. Tiebel violin has an aluminium horn and a different design of the bridge connection [7]. The third violin is also a replica of the Stroh violin, made of aluminium and repaired. As it is shown in Table and Fig. 4, the first horn resonance of both violins is above 300 Hz, which is significantly higher than the first peak of the Stroh violin from the Hanneforth collection.

	f1, Hz	f2, Hz	f3, Hz	f4, Hz
Ref. violin 17	268.8	343.8	492.2	778.1
Ref. violin 20	270.3	340.6	521.9	800
Stroh v., Mores*	270	445	669	953
Tiebel violin	323.4	410.9	478.1	793.8
Stroh v., brass	334.4	389.1	556.3	753.1
Stroh v., alum	355	391	632	854

**Table 1:** First resonance frequencies of each investigated violin obtained by transfer function measurements. \*values of the bridge admittance from [3]

The modes of the horn and the diaphragm are located in Fig. 5 for the Stroh violin replica from Detmold. From this figure, it is seen that the diaphragm and the second horn resonances coincide and give a larger level of the mode, which resembles the longitudinal mode A1 in violins. Level and width of the resonances in the signature range depend on how close the modes of the diaphragm and horn are located.



**Figure 5:** The Stroh violin measured in Detmold. Top: the transfer function with and without the horn. Bottom: the input impedance of the horn.

## The radiation

In the article "Horn loudspeaker design" (1974), J. Dinsdale stated that in spite of the large size and difficulties in design implementation, the exponential horn has advantages in terms of presence, clear bass, and low distortion [8]. It allows the source output to remain balanced over its frequency range, although the sound off axis is dull. A throat of small diameter is needed for high efficiency at high frequencies, but a larger throat is best for low frequencies.

Figures 6 and 7 show the projection of the Stroh and the reference violins, measured with the 12 microphones setup in a hemisphere [7]. Necks of the both instruments are pointing upwards, the horn upwards left, the bridge to the left ( $180^\circ$ ), see the setup picture in Fig. 3

It is seen in the figures that at the low frequencies, the Stroh violin radiates as a monopole, while at higher frequencies, the membrane radiates intensively. The radiation character of a conventional violin is distributed in space more uniformly.

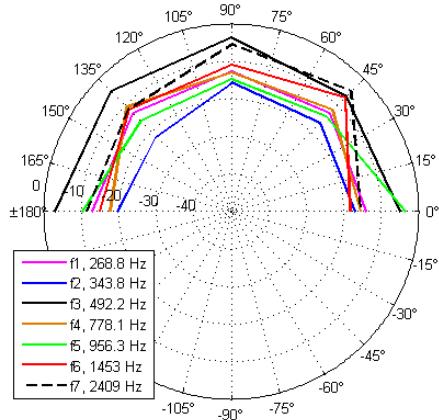


Figure 6: Reference violin's radiation in a vertical plane.

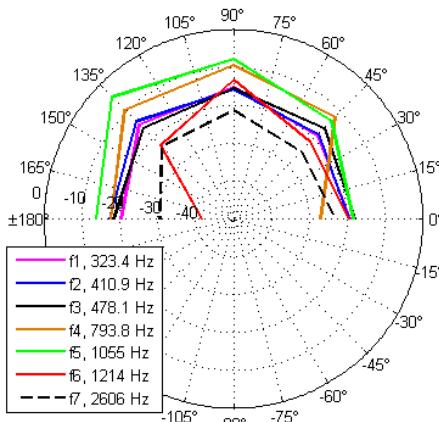


Figure 7: Tiebel violin's radiation in a vertical plane.

Since the bow in the Stroh introduces a strong vibration to the bridge and to the whole instrument, the radiation from the horn surface broadens the directivity beam. In case of the phonograph, less surface vibration is expected since the needle is an only input.

## Conclusion

Generally, sound impression of the Strohs is brighter than of the conventional violins. It is found that the horn is responsible for the lowest resonance of the Stroh violin, which is between 200 Hz and 360 Hz, depending on the instrument quality. The feeling of the absence of a wooden body is not so strong when played in the high registers.

To reach a lower A0-like mode in the Stroh violin, a bigger and more effective horn, for example of exponential shape, shall be employed.

From the other side, the essential thing about the phonograph recording is that the low violin modes could not be captured in the record. According to our findings for the "Edison Home", its frequency response lies between 500 and 4000 Hz. Therefore the phonograph recording of the Stroh violin sound, compared to the violin with soundboards, has:

- no resonance at 200 Hz, absence of which is however not heard in the record due to the working frequency range of the phonograph;
- the efficient and rich harmonic content due to the directed horn of the Stroh violin;
- had the distinct benefits against the sound of the conventional violin in the beginning of the XXth century.

## References

- [1] Rabinovici, A.: *Augustus Stroh's phonographic violin. A journey: Victorian London, Australia, Transylvania*. The Galpin Society Journal, Vol. 58 (2005), pp.100-123, 220-224
- [2] Wilson, P., Wilson, G. L.: *Horn theory and the phonograph*, 49th Convention of the AES, New York (1972)
- [3] Mores, R.: *Acoustical measurements on experimental violins in the Hanneforth collection*, Springer Int. Publishing (2013)
- [4] Martensen, K., Zakharchuk, P., Kob, M., Grotjahn, R.: *Grammophon und Gesangsstimme: Untersuchungen zur Akustik früher Aufzeichnungs- und Abspielgeräte*, Fortschritte der Akustik – DAGA 2015 in Nürnberg, pp.1429-1432 (2015)
- [5] Zakharchuk, P.: *History of Strings with Horns: A Study Overview*, Fortschritte der Akustik – DAGA 2015 in Nürnberg, pp.766-768 (2015)
- [6] Ziegenhals, G.: *Aufnahme von Frequenzkurven mit 2x12 Mikrofonpositionen*, Interner Forschungsbericht IfM Zwota, 2012
- [7] Pirch, P.: *On the use and acoustical characteristics of the mechanically augmented musical instruments and early recording devices*, M.Sc. thesis, Hochschule für Musik Detmold (2015)
- [8] Dinsdale, J.: *Horn loudspeaker design*. Wireless world, Cranfield (1974)

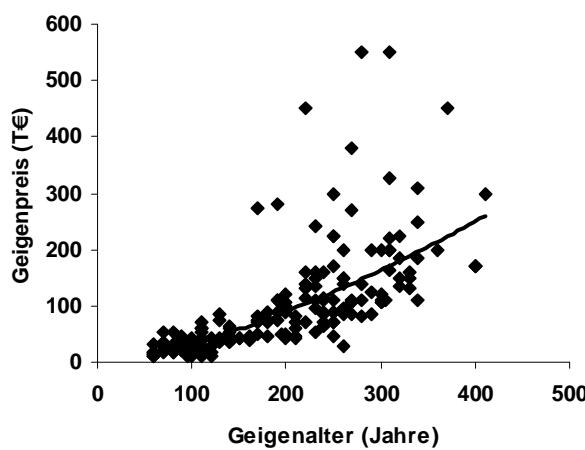
# Altern Geigen? Tonholz aus Sicht des Anwenders und Wissenschaftlers

Eva Dimigen, Heinz Dimigen

22605 Hamburg, E-Mail: [dimigen@t-online.de](mailto:dimigen@t-online.de)

## Einleitung

Eine einfache Antwort auf die oben gestellte Frage ergibt sich, wenn man die zeitliche Entwicklung der Geigenpreise, wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist, als Antwort nimmt. Italienische Geigen werden im Mittel mit zunehmendem Alter teurer. Geht man davon aus, dass dem höheren Preis auch eine bessere akustische Funktion entspricht, dürften Geigen ihre Qualität durch Älterwerden verbessern.



**Abbildung 1:** Preise italienischer Geigen vs. Geigenalter (Fuchs-Taxe 2008)

Abbildung 1 zeigt zugleich, dass es neben einem zeitlich kontinuierlichen Anstieg der Geigenpreise sehr große individuelle Geigenbauer-abhängige Preisschwankungen gibt. Deren Ursache aufzuklären, ist nicht das Ziel dieser Arbeit. Uns interessiert vielmehr der dargestellte zeitliche Anstieg des mittleren Preis- bzw. Qualitätsniveaus; hierzu haben wir untersucht, welche langfristigen Änderungen der physikalischen Eigenschaften des Tonholzes, insbesondere des für die Decken der Geigen oder Celli verwendeten und stark klangbestimmenden Fichtenholzes, sich bei mehrjähriger Auslagerung einstellen.

Es ist allgemein akzeptiert, dass der Elastizitätsmodul, die Dichte und die Dämpfung akustische Eigenschaften von Tonholz darstellen, welche die Klangeigenschaften von Streichinstrumenten mitbestimmen. Während es sehr zahlreiche Arbeiten zu den akustisch relevanten Eigenschaften von Fichten-Tonholz gibt, liegen nur sehr wenige Arbeiten zum Alterungsverhalten von Tonholz vor [1,2]; insbesondere das langfristige Verhalten der Dämpfung war bisher kaum Gegenstand von Untersuchungen wie auch dem Einfluss von Licht auf die akustischen Eigenschaften von Tonholz wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Dies ist umso merkwürdiger, als die intensive Suche nach den Gründen für die exzentrischen Eigenschaften vieler alter italienischer Streichinstrumente eine Untersuchung des Alterungsverhaltens von Tonholz hätte erwarten lassen.

Zu sagen ist allerdings, dass über den Einfluss der Holzalterung auf die Qualität alter Instrumente unterschiedlich geurteilt wird. Während etwa Saunders [3] und Barducci et al [4] vermuten, dass die Eigenschaften alter Geigen zum Teil durch Alterung des Tonholzes bedingt sein könnten, stellen Gütz und Danckwerth [5] fest, dass „das Holz, aus dem die alten Geigen gemacht sind, weder zur damaligen Zeit, noch heute, nach dreihundert Jahren, anders ist als das, was heute wächst.“

Die Ergebnisse unserer Untersuchungen zu dieser bisher nicht geklärten Frage, ob längere Lagerung von Fichten-Tonholz die akustischen Eigenschaften signifikant ändert, haben wir an einigen empirisch gewonnenen Erfahrungen aus dem Bereich des Geigenbaus gespiegelt.

## Praktische Erfahrungen mit Tonholz

Der Geigenbau ist in Teilen geprägt durch empirisch gewonnene Erfahrungen, die den Umgang mit Tonholz betreffen, wie etwa:

- Geigenbauer suchen möglichst altes Fichtenholz für die Decken der Instrumente [6]
- Geigen werden im Rohzustand gerne Sonnenlicht ausgesetzt
- Decken alter italienischer Geigen sind besonders leicht [7]
- Tonholz soll „klingen“, d.h. eine geringe Dämpfung aufweisen

Unsere eigenen empirischen Untersuchungen zur Dicke und Dämpfung von Cellodecken unterschiedlichen Alters ergab die in Tabelle 1 dargestellten Werte.

**Tabelle 1:** Mittlere Dicke und Dämpfung von Cellodecken verschiedenem Alters

Alter (Jahre)	10 - 100	200 - 300	
Deckendicke (mm)	4,2	3,7	
Alter (Jahre)	5 - 10	ca. 100	200 - 300
Dämpfung (Log. Dekr.)	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-2}$

Dabei stellen die Dämpfungswerte Mittelwerte aus ca. 6 Messungen pro Altersbereich dar, wobei die Cellodecken in der Regel erstklassigen Instrumenten entstammten. Was die Deckendicken, welche ebenfalls Mittelwerte darstellen, angeht, wurden die eigenen Messwerte durch extern bestimmte Deckendicken ergänzt (Poster der Zeitschrift „The Strad“).

Wir möchten bereits an dieser Stelle auf den erheblich höheren Dämpfungswert alter Cellodecken im Vergleich zu Decken jüngerer Instrumente hinweisen, ein Ergebnis, was im allgemeinen überrascht. Wir haben diese Erfahrung aber auch mit Geigendecken gemacht.

## Experimentelles

Gemessen wurden die zeitlichen Veränderungen der Abmessungen, der Masse, des Elastizitätsmoduls und der Dämpfung an Probenkollektiven, die aus Fichtenholz-Stäbchen mit Abmessungen von  $(150 \times 11 \times 4) \text{ mm}^3$  bestanden. Die Holzstäbchen wurden parallel wie auch senkrecht zur Faser geschnitten und vermessen. Entsprechende Messungen wurden auch an unlackierten Geigendecken durchgeführt.

Die Bestimmung der Dämpfung als logarithmisches Dekrement erfolgte sowohl über die Bestimmung der Abklingzeit nach Impulsanregung wie auch durch Messung der Halbwertsbreite der Resonanzkurve. Alle Details zu den vermessenen Proben, den eingesetzten Messverfahren und dem Auswerteprogramm sind an anderer Stelle niedergelegt [8].

Die Auslagerung der Proben über mehrere Jahre erfolgte in einem unbeheizten Raum; ein Teil der Proben wurde permanent in Dunkelheit gehalten, während der andere Teil Tageslicht ausgesetzt war. Durch Wahl der Position dieser Proben wurden maximale Beleuchtungsstärken zwischen 1000 und 75000 Lux erreicht. Die mittlere Beleuchtungsstärke war je nach Wetter und wegen des Tag-Nacht-Rhythmus natürlich wesentlich geringer.

## Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt den Verlauf der Probendicke über einen Zeitraum von ca. vier Jahren bei geringer Beleuchtungsstärke der Proben. Die Dicke der Probe verringert sich in diesem Zeitraum um ca. 2 %. Die periodischen Schwankungen der gemessenen Dicke werden durch die jährlichen Schwankungen der absoluten Feuchte der die Probe umgebenden Atmosphäre verursacht, welche zwischen  $5,5 \text{ gr./m}^3$  und  $11 \text{ gr./m}^3$  oszilliert. Mittels nichtlinearer Regression lässt sich bei Kenntnis der Klimawerte der Klimaeinfluss auf die alterungsbedingten Änderungen der Messgrößen eliminieren.

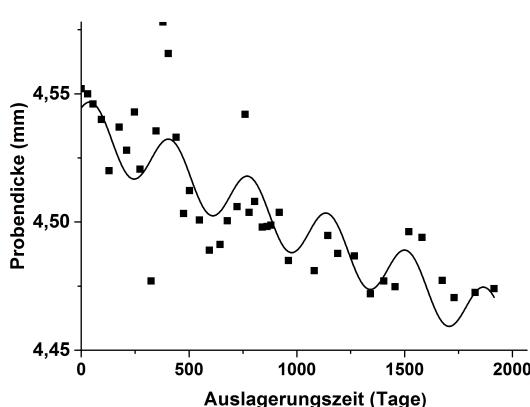


Abbildung 2: Probendicke vs. Auslagerungszeit

Abbildung 3 zeigt die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Auslagerungszeit der Proben für die Auslagerung in Dunkelheit bzw. bei intensiver Beleuchtung. In beiden Fällen tritt ein Anstieg des Elastizitätsmoduls ein, der für

beleuchtete Proben mit 4,4 % pro Jahr deutlich höher liegt als für unbeleuchtete Proben mit 1,4 % pro Jahr.

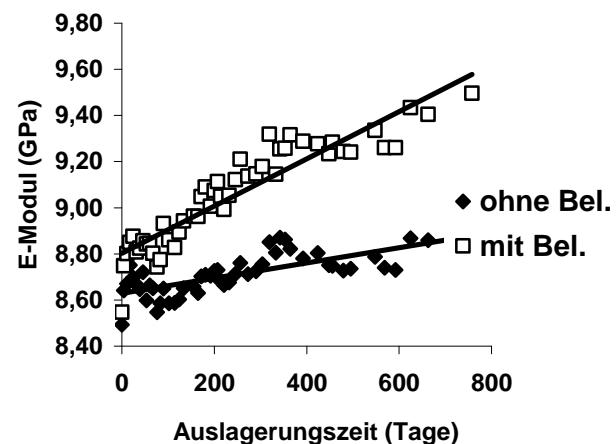


Abbildung 3: Elastizitätsmodul vs. Auslagerungszeit für beleuchtete und unbeleuchtete Proben

Auf die Frage, ob unterschiedliche Mechanismen an dem Beleuchtungs-abhängigen wie-unabhängigen Anstieg des Elastizitätsmoduls beteiligt sind, gibt das alterungsabhängige Verhalten der Dämpfung, welches in Abbildung 4 dargestellt ist, einen Hinweis.

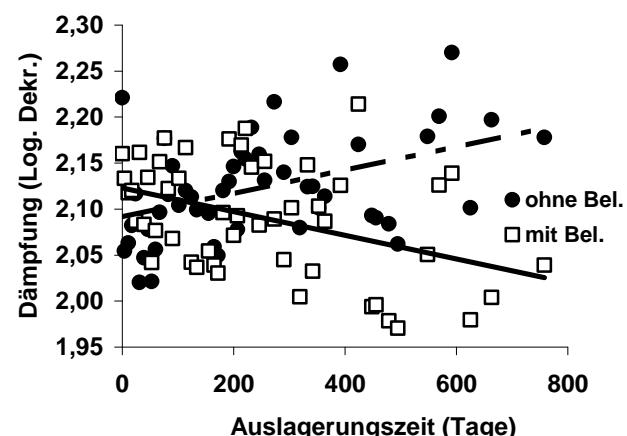


Abbildung 4: Dämpfung vs. Auslagerungszeit für beleuchtete und unbeleuchtete Proben

Während die Dämpfung von Proben, welche einer intensiven Beleuchtung ausgesetzt werden, signifikant abfällt, steigt im Fall der unbeleuchteten Proben die Dämpfung signifikant an. Dieses Ergebnis legt nahe, dass zwei unterschiedliche Prozesse vorliegen, deren einer Beleuchtungs-unabhängig den Elastizitätsmodul und die Dämpfung ansteigen lässt während der andere Beleuchtungs-abhängig ist und die Dämpfung vermindert; letzterer könnte mit dem als Photodegradation [9] bezeichneten Effekt verbunden sein.

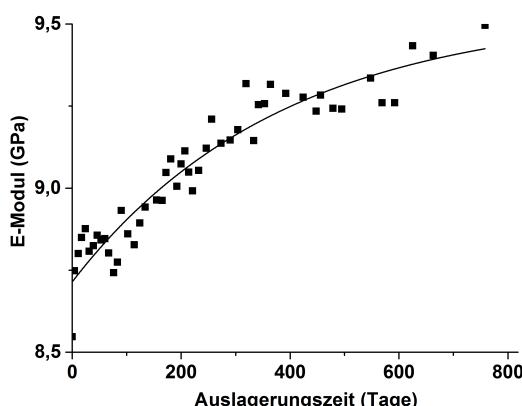
Tabelle 2 fasst die Änderungen zusammen, die sich an Fichtenholzproben als Ergebnis einer mehrjährigen Auslagerung ergeben.

**Tabelle 2:** Zeitliche Änderung von Holzparametern pro Jahr

	mit Beleuchtung	ohne Beleuchtung
E-Modul	$4,4\% \pm 0,3\%$	$1,4\% \pm 0,2\%$
Dicke	$-1,4\% \pm 0,1\%$	$-0,3\% \pm 0,1\%$
Dämpfung	$-2,3\% \pm 0,8\%$	$2,3\% \pm 0,7\%$

Zu beachten ist, dass die dargestellten Werte von Messungen über einen Zeitraum von etwa zwei Jahren stammen und keine langfristige Extrapolation zulassen. Eine solche war nur möglich für die Werte des Elastizitätsmoduls und der Probendicke unter Bestrahlung, indem diese mit einer Exponentialfunktion gefititet wurden.

Abbildung 5 zeigt einen solchen Fit für den Elastizitätsmodul unter intensiver Beleuchtung.



**Abbildung 5:** Elastizitätsmodul vs. Auslagerungszeit für beleuchtete Proben

Der Fit liefert für den Elastizitätsmodul eine Zeitkonstante  $\tau$  von  $380 \text{ Tage} \pm 80 \text{ Tage}$  und einen Gesamtzuwachs des Elastizitätsmoduls von ca. 10%. Die entsprechenden Werte für die Dickenänderung der Proben lag bei einem  $\tau$  von  $330 \text{ Tage} \pm 110 \text{ Tage}$  und einer Dickenabnahme von ca. 3%. Leider ließ sich kein Fit für den Verlauf des Elastizitätsmoduls und der Dicke unbeleuchteter Proben durchführen, so dass über die Gesamtänderung dieser Größen über sehr lange Zeiträume nichts ausgesagt werden kann.

Was die Dämpfung anbetrifft, war ebenfalls kein Fit möglich. Wenn wir aber davon ausgehen, dass sich Streichinstrumente die weitaus meiste Zeit ihres Daseins in einem Zustand befinden, in dem sie keine oder nur eine sehr geringe Bestrahlung mit sichtbarem Licht erhalten, können wir gemäß Abbildung 4 von einer anfänglichen zeitlichen Änderung der Dämpfung ohne Beleuchtung von  $6,1 \cdot 10^{-5}$  (1/Tag) ausgehen. Unter der Annahme einer Verdopplung der Dämpfungswerte über sehr lange Zeiträume, wie in Tabelle 1 gezeigt, ergibt sich als Folge des Alterungsprozesses eine Zeitkonstante  $\tau$  von 150 Jahren  $\pm 40$  Jahren für die Verdopplung der Dämpfung, ein Ergebnis, das unter der vereinfachenden Annahme nur eines wirksamen Alterungsprozesses plausibel erscheint und den tatsächlich beobachteten Zeiten entspricht.

Ohne auf die Messungen an Geigendecken, welche den Messungen an den Stäbchen folgten, hier noch näher eingehen zu wollen, sei folgendes hinzugefügt: Geigendecken zeigen bei Alterungsuntersuchungen grundsätzlich gleiches Verhalten wie die Stäbchen. Insbesondere sinkt die Dämpfung bei Beleuchtung während sie bei unbeleuchteten Proben ansteigt. Die Abnahme der Deckenmasse ist mit ca 10% erheblich.

## Zusammenfassung

Die oben dargestellten Ergebnisse zeigen:

- Fichte als Tonholz altert, das heißt, es ändert zeitabhängig seine physikalisch akustischen Eigenschaften. Damit altern auch die Geigen.
- Elastizitätsmodul, Güte Masse und Holzdicke ändern sich im Verlauf von Jahren Beleuchtungs-unabhängig und Beleuchtungs-abhängig um bis zu 10 %.
- Die Dämpfung verdoppelt sich bei geringen Lichtintensitäten im Verlauf von sehr langen Zeiräumen.

Da der Elastizitätsmodul und damit die Schallgeschwindigkeit mit der Alterung des Holzes ansteigt, sollte die Alterung in dieser Hinsicht zu einer akustischen Verbesserung des Holzes der Geigendecken führen. Dies wäre ein Grund für einen Qualitätsgewinn alternder Geigen. Was der über einen langen Zeitraum sich erstreckende erhebliche Anstieg der Dämpfung für Auswirkungen auf das Verhalten der Geigen hat, d. h., ob er vorteilhaft ist oder nicht, ist derzeit unklar und bedarf einer Untersuchung.

Nachdem sowohl ein Alterungsprozess unter Lichteinfluß wie auch eine Beleuchtungs-unabhängige Alterung mit unterschiedlichen Zeitkonstanten abzulaufen scheinen, ist unklar, wie sich im Detail die physikalischen Eigenschaften von Fichtenholz über längere Zeiräume einstellen, wenn beide Alterungsprozesse auf das Holz einwirken.

## Literatur

- [1] Holz D. (1981), Zum Alterungsverhalten des Werkstoffes Holz – einige Ansichten, Untersuchungen, Ergebnisse, Holztechnologie 22, 80-85
- [2] Schiema H., G. Ziegenhals (2012), Holzalterung und akustisch relevante Eigenschaften, DAGA 2012
- [3] Saunders F.A. (1946), The Mechanical Action of Instruments of the Violin Family; J.Acoust.Soc.Amer., 17(3), 169
- [4] Barducci G., G. Pasqualini (1975), Musical Acoustics, Part 1; Benchmark Papers in Acoustics/5, 410
- [5] Güth W., F. Danckwerth (1997), Die Streichinstrumente Physik-Musik-Mystik; Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 225
- [6] Roussel A. (1973), Grundlagen der Geige und des Geigenbaus; Verlag das Musikinstrument, Frankfurt/M., 31

[7] Curtin J. (2006); Tap Routine; The Strad, 49; October 2006

[8] Dimigen H., E. Dimigen (2014), Zum Alterungsverhalten von Tonholz, Holztechnologie 55, 1

[9] Derbyshire H., E.R.Miller (1981), The Photodegradation of wood During Solar Irradiation, Holz als Roh- und Werkstoff, 39, 341-350

# Die Entwicklung der Frequenzkurvenmesstechnik im Institut für Musikinstrumentenbau

Gunter Ziegenhals

IfM - Institut für Musikinstrumentenbau e.V. an der TU Dresden, 08267 Zwota, post@ifm-zwota.de

## Einleitung

In der modernen Akustik und Schwingungstechnik einschließlich der Systemanalyse wird der Begriff Frequenzkurve nicht verwendet. Vielmehr steht für den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangssignal eines linearen zeitinvarianten Systems bezüglich der Amplitude und der Phase der Begriff Frequenzgang, unter bestimmten Bedingungen auch der Begriff Übertragungsfunktion. In der Audiotechnik allerdings verwendet man sehr häufig den Begriff Frequenzkurve offenbar als Synonym für Frequenzgang. H. MEINEL (Initiator der Gründung des IfM und sein erster Leiter), der nach unserem Kenntnisstand als erster entsprechende Messungen an Geigen durchführte, verwendete konsequent den Begriff Frequenzkurven. Im IfM bezeichnen wir aus diesem Grunde traditionell entsprechende Messungen ebenfalls als Frequenzkurvenmessungen und folglich die Ergebnisse als Frequenzkurven.

Der Beitrag schildert die einzelnen Etappen der Entwicklung der Frequenzkurvenmesstechnik im IfM von den Arbeiten Hermann MEINELs in den 1930er Jahren bis zur Gegenwart. Dabei geht es insbesondere darum zu begründen, warum gerade die angewandten Methoden, Verfahren und Parameter ausgewählt wurden. Der Beitrag befasst sich ausschließlich mit der Aufnahme der Frequenzkurven, geht jedoch nicht auf deren Auswertung im IfM ein. Dies erfolgte bereits sehr ausführlich an anderer Stelle [14].

## Die Einführung der Frequenzkurvenmessung durch H. MEINEL

Preisaufgabe der Preußischen Akademie der Wissenschaften für das Jahr 1936:

- Feststellung der physikalischen Bestimmungsgrößen der Klangfarbe von Saiteninstrumenten und des Zusammenhangs dieser Bestimmungsgrößen mit der Bauart der Instrumente

Der Preisträger Hermann MEINEL löste die Aufgabe durch die Entwicklung und Anwendung der Frequenzkurvenmesstechnik. Er ging davon aus, dass die klangliche Güte einer Geige durch ihr Frequenzspektrum charakterisiert werden kann. Deshalb orientierte MEINEL auf die Frequanzanalyse des Geigenschalls. Die erste Veröffentlichung der wesentlichsten Ergebnisse erfolgte 1937 [1].

Für die Messung befand sich das Instrument in einer Haltevorrichtung, wurde am Hals festgehalten und der Endknopf gegen eine weiche Gummiunterlage gedrückt. Um reproduzierbare Versuchsbedingungen zu schaffen, verwendete H. MEINEL eine Anstreichvorrichtung mit zwei Kreisscheiben und ein darüber laufendes endloses Band, einen so genannten Endlosbogen. Die Kreisscheiben wurden von einem

Elektromotor angetrieben. Das Streichband bestand aus wenigen Seidenfäden und strich jeweils eine Saite stationär an (Abbildung 1). Der Bogendruck konnte eingestellt und mittels einer Federwaage gemessen werden. Folgende Bogen drücke fanden Anwendung:

- g- und d<sup>1</sup>-Saite 55 g
- a<sup>1</sup>- und e<sup>2</sup>-Saite 40 g.

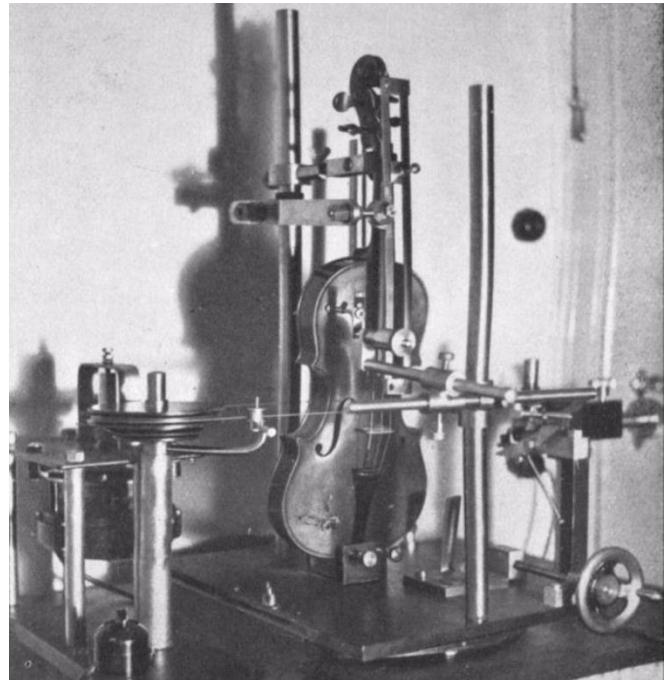


Abbildung 1: Mechanische Anstreichvorrichtung für Saiteninstrumente, entwickelt von H. MEINEL; Quelle: Archiv MEINEL (entnommen aus [2])

Die Geschwindigkeit des Streichbandes betrug 40 cm/s. Die Konstanz sicherte ein Synchronmotor. Zur Einstellung verschiedener Töne auf den Saiten verwendete MEINEL einen Druckbolzen (Kapodaster) zum Niederdrücken der Saiten auf das Griffbrett. In Abbildung 1 sind die beschriebenen Details recht gut zu erkennen.

Der im Ergebnis des künstlichen Anstreichens erzeugte Ton wurde mit einem in 90 cm Entfernung von der Längsachse der Geige in Höhe der f-Löcher aufgestelltem Kondensator mikrofon aufgenommen. Die Mikrofonposition befand sich im Winkel von 45° zur Deckennormalen in Richtung Stimm stockseite der Geige, also in der Position in der sich typisch das Publikum zur Violine eines stehenden Solisten befindet. Die Versuche fanden im reflexionsarmen Raum (MEINEL bezeichnet ihn als gedämpften Raum) des Instituts für Schwingungsforschung der Technischen Hochschule Berlin statt, in welchen MEINEL nach KÖLTZSCH [2] tätig war. Mit einer Schrittweite von 1/8 Ganzton wurde der Kapodaster verschoben, danach die Saite erregt und jeweils mit

Hilfe eines GRÜTZMACHERschen Suchtonanalysators die Amplituden der ersten vier Teiltöne gemessen. Legt man die sich aus den Messungen ergebenden Kurven für verschiedene Teiltöne übereinander, so zeigt sich eine recht große Ähnlichkeit. Ausgewertet wurden letztlich die Amplituden folgender Teiltöne:

- Frequenzbereich  $g - e^3$  1. Teilton der jeweils „gegriffenen“ Töne
- Frequenzbereich  $e^3 - e^4$  2. Teilton der jeweils „gegriffenen“ Töne
- Frequenzbereich  $e^4 - h^4$  3. Teilton der jeweils „gegriffenen“ Töne
- Frequenzbereich ab  $h^4$  4. Teilton der jeweils „gegriffenen“ Töne.

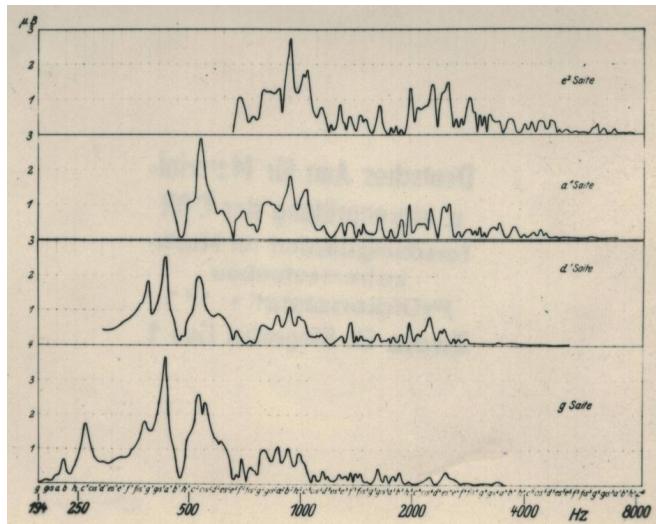


Abbildung 2: Frequenzkurven für jeweils eine der Violinensaiten (Quelle: Archiv IfM)

Aus den so gemessenen Teiltonamplituden über der Frequenz wurde dann die Frequenzkurve zusammenggebaut. MEINEL konnte mit dieser Vorgehensweise entsprechend seiner Abbildungen offenbar Frequenzkurven bis ca. 8,5 kHz aufnehmen. Er erstellte Frequenzkurven für Messungen jeweils auf den Einzelsaiten (Abbildung 2) oder auch über alle Saiten (Abbildung 3). Wie man aus Abbildung 2 erkennt, sind die Ergebnisse für die einzelnen Saiten (wie zu erwarten) nicht identisch. Welche Daten von welchen Einzelsaitenmessungen MEINEL schließlich in die Gesamtkurve einfließen ließ, ist nicht nachvollziehbar.

In einem zweiten Teil der Veröffentlichung (März 1937) beschreibt H. MEINEL „Frequenzkurven bei elektrodynamischer Erregung der Geige“. Hierzu baute er einen speziellen Steg, der sehr tiefe Kerben für die Saiten aufwies und in den über den Saiten in den Kerben ein Kupferblättchen eingelassen war. Mittels zweier Bündel dünner Kupferdrähte erfolgte die Kontaktierung des Kupferblättchens. Wird nun ein Wechselstrom durch das Blättchen geschickt und die ganze Anordnung in ein Magnetfeld gebracht, entsteht eine Wechselkraft auf den Steg. MEINEL koppelte den Sinusgenerator (Überlagerungssumme), der das Blättchen speiste mit einem Aufzeichnungsgerät (Pegelschreiber) und konnte so die Kurven in einem Messvorgang aufnehmen und gleich aufzeichnen. Durch geeignete Stellung des Kupferblättchens und des Magnetfeldes ließ sich der Steg in den drei Angriffsrich-

tungen der Saitenkraft separat anregen. MEINEL führte entsprechende Messungen durch. Er stellte fest, dass die Erregung parallel zu den Saiten praktisch vernachlässigt werden kann. Für seine Versuche verwendete er zunächst danach ausschließlich die Erregung senkrecht zur Decke. Er kommt darüber hinaus im Ergebnis der Auswertung seiner Experimente zunächst zu dem Schluss, dass die elektrodynamische Anregung nicht immer empfehlenswert ist.

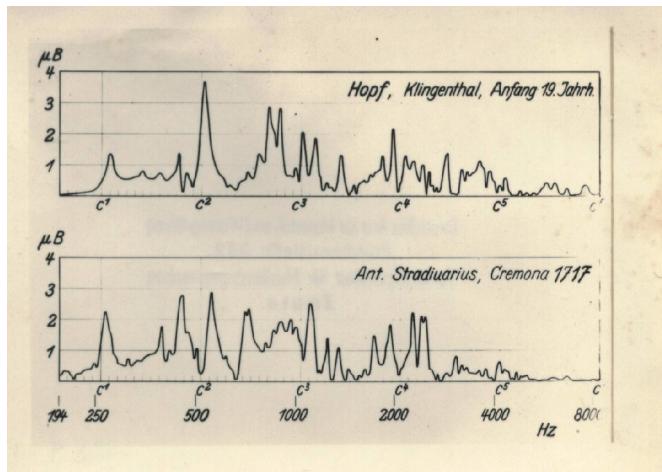


Abbildung 3: Gesamtfrequenzkurven (Quelle: Archiv IfM)

MEINEL setzte nach Gründung des IfM 1951 seine Versuche in Zwota fort. In Ermangelung eines reflexionsarmen Raumes (Dieser konnte erst kurz vor Ausscheiden von H. MEINEL 1961 fertig gestellt und in Betrieb genommen werden.) befassten sich die Arbeiten nur mit der Entwicklung der Messtechnik nicht jedoch mit vollständigen Messreihen. Beschrieben sind die Arbeiten in einem Bericht von ROHDE 1956 [3]. Als Hauptmethodik wird in diesem Bericht ausdrücklich das Verfahren des künstlichen Anstreichens, hier als Streichbandmethode bezeichnet, herausgestellt. Die elektrische Erregung kennzeichnet ROHDE explizit als ergänzende Methodik für untergeordnete Messungen, die insbesondere wegen des geringeren Messaufwandes zum Einsatz kommt. Eine elektrodynamische Erregung mit mechanischer Ankopplung wird definitiv verworfen. Man greift wieder die schon 1937 von MEINEL beschriebene elektromagnetische Anregung auf, diesmal jedoch mit einem ferromagnetischen Blättchen. Es wird interessanterweise nunmehr jedoch die Querrichtung für die Erregung favorisiert. Eine entsprechende Aussage findet man auch in einer Veröffentlichung von MEINEL aus dem Jahr 1957 [4].

## Entwicklungen in den 1960er, 1970er und 1980er Jahren

Nach Ausscheiden von H. MEINEL widmete man sich im IfM nun zunächst der Entwicklung der Frequenzkurvenmesstechnik für Zupfinstrumente. HÄCKER führte entsprechende Arbeiten 1968 aus [5]. Neben einer Anzupfvorrichtung konzipierte er eine elektromagnetische Anregung, offenbar nach Vorbild H. MEINEL aber mit einer Modifikation. Ein nicht kontaktiertes Eisenblättchen ( $m = 100 \text{ mg}$ ) wird zwischen g- und d-Saite auf den Steg geklebt. Von einer dem Steg gegenüber befindlichen Spule wird ein entsprechendes Wechselfeld erzeugt, welches eine Wechselkraft auf das Blättchen

und somit den Steg ausübt. Die Aufnahme des abgestrahlten Schalls erfolgt über ein Mikrofon in 1 m Entfernung vor dem Instrument (siehe Abbildung 4). Aufgrund der Eigenschaften des verwendeten RC-Generators musste die Frequenzkurve für vier Frequenzbereiche jeweils separat aufgenommen werden. Auch HÄCKER schloss eine mechanisch gekoppelte Erregung über ein elektrodynamisches System aus.

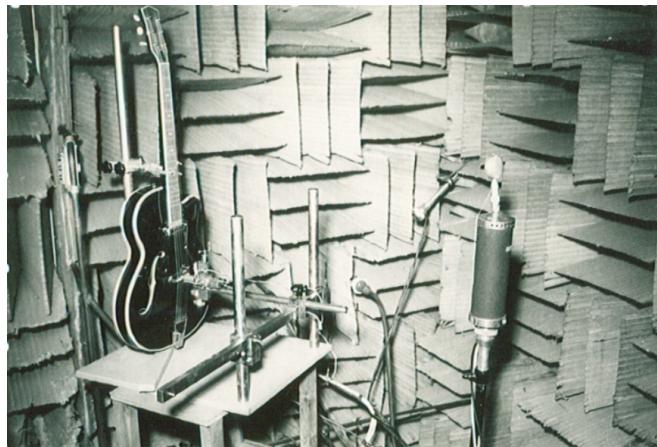


Abbildung 4: Frequenzkurvenmessung an Gitarren nach Häcker im reflexionsarmen Raum des IfM

1972 kam erstmals ein elektrodynamisches Anregesystem bei Frequenzkurvenmessungen an Gitarren zum Einsatz [6]. Es handelte sich bei dem Shaker um eine Eigenentwicklung des IfM. Angeregt wurde in der Stegmitte. Das Mikrofon befand sich in 0,8 m Abstand senkrecht vor der Decke in Höhe der oberen Schalllochbegrenzung. Es wurden nunmehr ausschließlich 1“-Messmikrofone eingesetzt. Der auswertbare Bereich der so gewonnenen Frequenzkurve bei Gitarren wird von KRÜGER mit 60 Hz ... 4 kHz angegeben. Weiterhin weist er einschränkend darauf hin, dass bei einem Abstand von 0,8 m das Mikrofon für die tiefen Frequenzen noch im Bereich des Nahfeldes liegt.



Abbildung 5: Gitarre mit elektrodynamischen Anregesystem

Abbildung 5 zeigt die Messapparatur außerhalb des reflexionsarmen Raumes. Es ist eine im IfM in dieser Zeit, zunächst nur für Gitarren, häufig eingesetzte alternative Messmethode zu erkennen. Der Schall wurde nicht im Fernfeld, sondern unmittelbar vor der Decke oder die Schwingung der Decke direkt an verschiedenen

Punkten aufgenommen. Im Bild ist ein kapazitiver Schwingungsaufnehmer samt Positioniereinrichtung zu sehen. Man bezeichnete diese Technik als „Nahfeldfrequenzkurve“. Diese Technik sollte einerseits die Schwingungsamplituden an ausgewählten Deckenpunkten direkt beobachten und so im Vergleich mit der normalen Frequenzkurve Rückschlüsse auf die Bedeutung der Schwingungen an diesen Orten erlauben. Andererseits bot diese Technik Potential, Messungen auch in den Firmen direkt durchführen zu können, da dort

natürlich keine reflexionsarmen Messräume, wie sie die Standard-Frequenzkurventechnik benötigt, zur Verfügung stehen.

M. SCHMIDT, damals Student an der TU Dresden beschäftigte sich 1974 während eines Praktikums mit der Entwicklung eines neuen Geigenmessplatzes für das IfM [7]. Zielstellung war die Entwicklung einer Messmethode mit kontinuierlicher technischer Anregung ohne Nutzung der Saitenerregung durch künstliches Anstreichen. Interessanter Weise wird in seinem Bericht mit keinem Wort auf die Arbeiten von H. MEINEL und ROHDE eingegangen. Auch in dieser Arbeit wird von vorn herein, wie schon bei ROHDE, die mechanisch gekoppelte elektrodynamische Variante ausgeschlossen. Als Grund wird die zu große Massebelastung durch das Anregesystem angeführt. Die Begründung ist in Anbetracht der damals noch nicht verfügbaren Kraftsensoren für die Erregersysteme durchaus stichhaltig.

Bei der Erregung greift SCHMIDT praktisch 1:1 auf die Lösung von ROHDE zurück (Ohne diesen zu zitieren!). Die Erregung erfolgt an der Stegoberkante auf der Bassbalkenseite quer zur Saitenrichtung und parallel zur Decke.

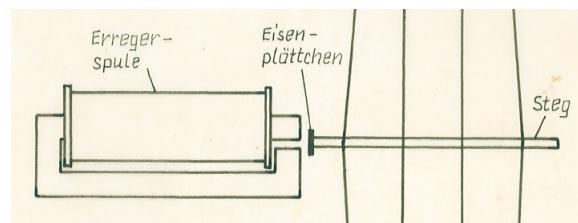


Abbildung 6: Anregesystem für Geigen nach SCHMIDT

Die Aufnahme des durch die Erregung vom Instrument erzeugten Schalls erfolgt im reflexionsarmen Raum mittels sechs gleichmäßig (jeweils 60°) in der Stegebene um das Instrument verteilten Mikrofonen. Deren Abstand zum Instrument beträgt jeweils 80 cm. Die Signale der Mikrofone werden in einem ebenfalls im Rahmen des Praktikums entwickelten Gerät als Pegel gemittelt und der mittlere Pegel ausgegeben. Schaltung und Leiterplatten sind im Bericht ausführlich dokumentiert.

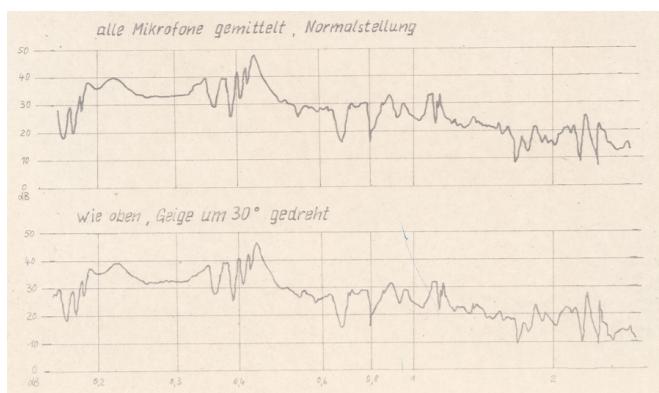


Abbildung 7: Von SCHMIDT dokumentierte Frequenzkurven

Da auch mit der Apparatur erzielte Messergebnisse dokumentiert sind und diskutiert werden, ist die Apparatur offensichtlich zumindest in Form einer Versuchsschaltung gebaut worden. Beim Eintritt des Autors in das Institut 1979 fand dieser die Apparatur allerdings nicht vor und es wurde auch

nicht über diese Arbeit bzw. die 6-Kanal-Pegelmittlung gesprochen. Vielmehr war die Investition in entsprechende Geräte sowie die Entwicklung einer passenden Auswerteelektronik im Gespräch. Vorgesehen war, sechs Mikrofone über sechs Mikrofonverstärker RFT 00 011 an sechs Anzeigeteile RFT 02 022 anzuschließen. Die Anzeigeteile verfügen über einen pegelproportionalen Gleichspannungsausgang. Diese Gleichspannungsausgänge sollten dann über ein Widerstandsnetzwerk gewichtet summiert werden. Neue Mikrofone, Messverstärker und Anzeigeteile wurden Mitte der 1980er beschafft, die vorgesehene Mehrkanalanordnung aber nicht realisiert.

Anfang der 1980er Jahre entwickelte E. MEINEL (1981) das Frequenzkurvenmessverfahren für Geigen weiter [8]. Er verwendete erstmals ein elektrodynamisches Anregesystem (Eigenbau IfM) bei mechanischer Ankopplung. Dies war bis dahin stets strikt verworfen worden. Die Form des Geigensteges, seine Tendenz zu ausgeprägten Eigenschwingungen und seine Funktion als Kippschwinger infolge der Versteifung unter dem rechten Fuß über den Stimmstock führen zu einer stärkeren Abhängigkeit der Frequenzkurve vom Anregeart am Steg als bei Gitarren. Die zu diesem Zeitpunkt international bevorzugte Anregung seitlich am Steg ließ sich mit dem recht großen Anregesystem (Abbildung 5) nicht realisieren. Nach Versuchen mit einigen möglichen Positionierungen entschied sich E. MEINEL letztendlich für die senkrechte Erregung in der Stegmitte. Eine Messung der Eingangskraft war nicht möglich.

Die Messungen fanden im reflexionsarmen Raum unter Verwendung eines Mikrofons in der Position  $45^\circ$  zur Deckennormalen am Steg in Richtung Stimmstockseite und  $45^\circ$  in Richtung Hals gedreht und 60 cm von der Griffbrettunterkante entfernt statt.

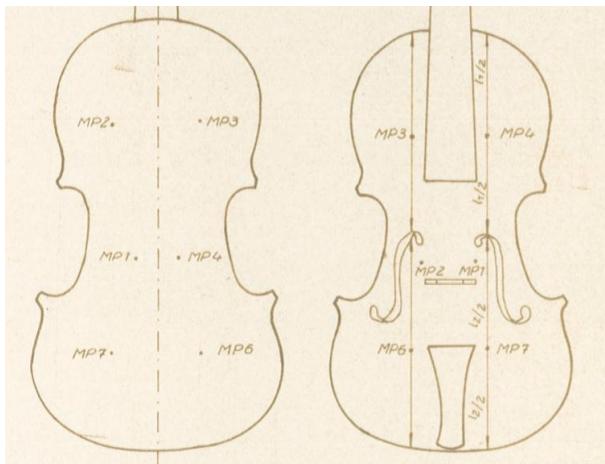


Abbildung 8: Messpunkte Nahfeldfrequenzkurve nach E. MEINEL

E. MEINEL bemühte sich im Rahmen dieser Arbeiten insbesondere um eine weitgehende Automatisierung der Messungen. Als Besonderheit verwendete er keinen Signalgenerator, sondern bezog den Gleitsinus von einer vorab hergestellten Bandaufnahme. Für die Generierung entsprechender Frequenzmarken auf dem Pegelschrieb enthielt die Aufnahme eine Reihe kurzer Stummschaltungen.

Als weitere Neuerung setzte E. MEINEL die Technik der Nahfeldfrequenzkurve im IfM erstmals auch für Geigen ein. Er tastete die Decken- und Bodenschwingungen an ausge-

wählten Punkten (Abbildung 8) mit einem Beschleunigungsaufnehmer KD91 ab. Aus Effektivitätsgründung sollte dabei die Anzahl der Punkte möglichst gering gehalten werden. Im Ergebnis der Messungen zweifelte E. MEINEL die Sinnfälligkeit dieser Messungen im Geigenfalle an. Ein wesentlicher Grund dafür war, dass sich im Gegensatz zum Gitarrenfall Messungen von Bodenschwingungen als zwingend erforderlich erwiesen. Damit stieg der Aufwand deutlich an. Die Methodik kam später auch nicht wieder zur Anwendung. Im weiteren Verlauf der 1980er Jahre fielen praktisch keine weiteren Messungen an Streichinstrumenten an, jedoch eine Reihe von Aufnahmen der Frequenzkurve an Gitarren. Dafür wurde die HÄCKERsche Einspannvorrichtung (Abbildung 4) sowie der Eigenbau-Schwingungserreger bei Anregung in der Stegmitte genutzt. Die Mikrofonposition wechselte zwischen 0,8 m und 1 m Abstand senkrecht zur Decke und als Aufpunkt diente nunmehr die Schalallochmitte. Für die Steuerung und Auswertung der Messung setzte man zum großen Teil die von E. MEINEL zunächst für Messungen an Violinen entwickelte Apparatur ein.

## Weiterentwicklungen in den 1990ern und Anfang der 2000er Jahre

Anfang der 1990er Jahre ergaben sich im IfM weiterhin nur Frequenzkurvenmessungen an Gitarren. Zur Anwendung kam das bislang bewährte Verfahren. Allerdings wurde der Eigenbau-Schwingungserreger gegen einen Mini-Schwingungserreger B&K 4810 ausgetauscht. Die Steuerung der Messung sowie die Aufzeichnung der Daten übernahm nunmehr ein 4-Kanal-Analysator ONO SOKKI CF6400. Es wurde allerdings weiterhin zunächst wie vorher nur mit einem Kanal, also ohne Kraftmessung der Erregung gearbeitet. Als Erregersignal wählten wir einen Gleitsinus und bauten sowohl Einschwingzeiten und Mittelungen bei jeder Frequenzstützstelle ein. Es ergaben sich für einen Bereich 0 Hz ... 5 kHz Messzeiten von 25 min. Die Auswertung der Messungen fand im Dialogbetrieb direkt am CF6400 mit den implementierten Funktionen statt. Ab 1995 stand ein Impedanzmesskopf B&K 8001 zur Verfügung, so dass nunmehr erstmals echte Frequenzgänge als Frequenzkurven aufgenommen werden konnten.

1996 zeichneten sich umfangreiche systematische Untersuchungen an Streichinstrumenten ab. Es musste eine Entscheidung über die zukünftig verwendete Methodik getroffen werden. Es sollte unbedingt auch die Quererregung zur Anwendung kommen. Es stellte sich sehr schnell heraus, dass dies mit der vorhandenen Methodik nur im Falle Kontrabass problemlos zu realisieren war. Nun stand seit der Beschaffung eines Modalanalysesystems 1992 die Impulshammertechnik zur Verfügung. So entschlossen wir uns, nicht zuletzt auch unter Berücksichtigung der Ergebnisse von JANSSON, BORK und MEYER [9], zukünftig die Messung an Streichinstrumenten auf der Basis der Impulserregung vorzunehmen.

Eine Applikationsschrift von B&K [10] wies aus, dass Impulshämmer je nach Größe den Frequenzbereich 0 ... 5 kHz abdecken können. Da uns ein Miniaturhammer PCB 086C80 zur Verfügung stand, erschien die Festlegung eines Messbereiches von zunächst 0 ... 5 kHz bei einer Auflösung von

3,125 Hz sinnvoll.

In der Applikationsschrift [10] diskutiert man auch die erforderlichen Signalfensterungen im Erregungs- und Antwortkanal. Für den Kraftkanal wird ein „transient window“, entspricht der sonst als Force-Fenster bezeichneten Variante, empfohlen. Begründet wird dies damit, dass der Impuls selbst im Vergleich zur gesamten aufgezeichneten Signalzeit sehr kurz ausfällt. So können Störungen durch Rauschen des Hammers aber auch Vibratoren des Hammers nach dem Anschlag das Erregungssignal verfälschen. Für das Antwortsignal wird ein Exponential-Fenster empfohlen. Es soll zum einen bei schwach gedämpften Signalen sichern, dass keine leakage-Fehler durch Abschneiden des Signals am Aufzeichnungsfensterende entstehen. Zum anderen unterdrückt es bei stark gedämpften Signalen etwaige Rauschanteile zum Ende der Aufzeichnung hin. Da uns auch bei der Einweisung durch Müller BBM bei der Installation der Modalanalyse die Kombination Force-exponential für die Übertragungsmessungen empfohlen wurde, verwendeten wir zunächst diese Fenster. Erste Testmessungen zeigten jedoch, dass die mit dem verfügbaren Analysator CF6400 erreichbaren Aufzeichnungslängen für unsere Anwendungen stets ein vollständiges Abklingen der Antwort sicherten und störendes Rauschen in Zusammenhang mit den verwendeten Sensoren und Messumgebungen nicht auftrat. Wir entschieden uns deshalb frühzeitig in den Antwortkanälen (Beschleunigungsaufnehmer bzw. Mikrofone) stets Rechteckfenster, d. h. keine spezielle Signalfensterung einzusetzen. Für das Kraftsignal des Impulshammers blieben wir allerdings beim Force-Fenster, was sich im Nachhinein als Fehler herausstellen sollte. Das Fenster wird einmal starr festgelegt. In Abhängigkeit von Hammermasse und Nachgiebigkeit des Messobjektes entstehen jedoch unterschiedliche Impulslängen. Das Fenster schneidet dann real vorhandene Erregungsteile ab, was zu Fehlern in der ermittelten Übertragungsfunktion führt. Das Force-Fenster bereitete in der Folgezeit immer wieder Probleme, insbesondere bei Geigenmessungen. Häufig machten sich Wiederholungsmessungen erforderlich. Die Fehlerquelle wurde letztlich erst 2009 durch konsequentes Umstellen auf Rechteckfenster auch im Kraftkanal beseitigt.

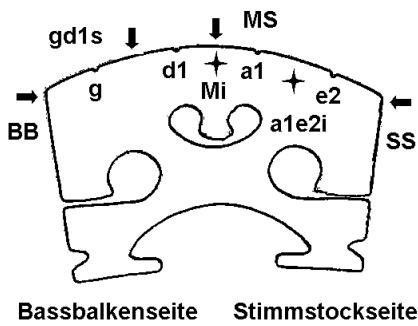


Abbildung 9: Anregeorte und Richtung untersuchter Erregung am Steg

Mitte der 1990er Jahre wurde im IfM ein Projekt zur Wirkung der Stegform auf den Klang der Streichinstrumente bearbeitet [11], [12]. Hier entstand Notwendigkeit und Gelegenheit die Konsequenzen verschiedener Erregungen am Steg ausführlich zu untersuchen. Zugleich war die Nutzung der Impulshammeranregung hier unumgänglich. Beim Spiel

erfolgt die Erregung am Steg an den Auflagepunkten der vier Saiten und zwar an jedem Auflagepunkt in drei Richtungskomponenten. Dies ergibt zunächst am Steg 12 Erregungsvektoren. Da an den Auflagepunkten der Saiten direkt keine Erregung möglich ist, muss diese in die Zwischenräume verlegt werden. Hinzu kommt, dass man nur an den Außenseiten der Stege in Querrichtung anregen kann. Abbildung 9 veranschaulicht die verschiedenen Erregungsorte und -richtungen. Die kleinen Kreuze sollen die Rückseite von Richtungspfeilen symbolisieren.

Die Untersuchungen fanden für die Fälle Geige und Cello auf zwei Wegen statt: Spezielle Feder-Masse-Systeme simulierten die Eingangsimpedanz der Decke. In den Massen unter den Stegfüßen befanden sich Triaxialaufnehmer, die die Schwingungsübertragung der Stegfüße auf die Decke festhielten. Die entsprechenden Versuche ergaben folgende Resultate:

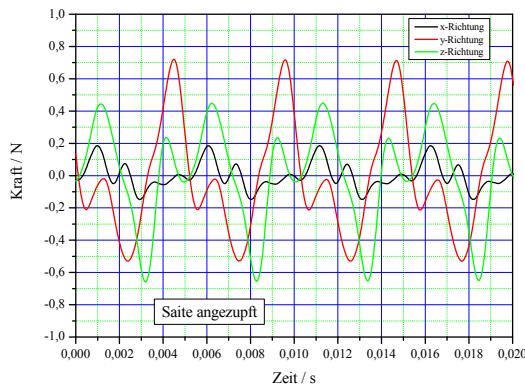
- Man kann für die Erregung senkrecht zur Decke und in Saitenrichtung auf zwei Punkte an der Stegoberseite jeweils in der Mitte zwischen g- und d<sup>1</sup>- sowie zwischen a<sup>1</sup>- und e<sup>2</sup>-Saiten (Cello entsprechend) zurückgreifen.
- Die Erregung in quer-Richtung kann an der Oberkante der beiden Seitenflächen erfolgen.

Der zweite Weg lag in Frequenzkurvenmessungen an je einem Testinstrument. Im Ergebnis zeigte sich:

- Erfolgt die Erregung auf der Baßbalkenseite des Steges, so weist die Quererregung um 3 ... 10 dB höhere Übertragungswerte auf als die senkrechte Erregung. Längserregung liefert um 20 dB schlechtere Übertragungseigenschaften.
- Wird stimmstockseitig erregt, so gelten die gleichen Aussagen bis etwa 4 kHz. Im darüber liegenden Frequenzbereich sind die Übertragungseigenschaften etwa gleich.

Es deutet sich die Vernachlässigbarkeit der Erregung in Saitenrichtung an. Zugleich erscheinen beide Quererregungen (BB und SS) gleich wichtig. Im Stegprojekt wurde mit den oben genannten vier Erregungsorten unter Einschluss der Erregung in Saitenrichtung gearbeitet.

In Vorbereitung eines Projektes zu Saiten [13] entwickelten Mitarbeiter des IfM im Zeitraum 1997/1998 eine universelle Saitenmesseinrichtung. Diese ermöglicht für alle Masuren der typischen Streich- und Zupfinstrumente Untersuchungen an Saiten bei Streich- und Zupferregung. Kernstück der Vorrichtung bildet ein in einem speziellen Steg integrierter, triaxialer Kraftaufnehmer, der es ermöglicht, die von den Saiten in drei Raumrichtungen in den Steg eingetragenen, dynamischen Kräfte zu erfassen. Bereits erste Testmessungen ergaben, dass die parallel zu den Saiten in den Steg eingetragenen Kräfte vernachlässigbar sind. Der Haupteintrag erfolgt in Querrichtung. Wird der Bogen beim Streichen sehr flach geführt, so kann man auch die senkrechte Komponente der Kraft vernachlässigen. Bei steiler Bogenhaltung nimmt sie spürbar zu. In der Anregeart Zupfen, ist die senkrechte Komponente immer gut ausgeprägt, die Saitenrichtung aber auch hier vernachlässigbar.



**Abbildung 10: Beispiel Krafteintrag in Steg, gezupfte Saite; x-Saitenrichtung, y-Querrichtung, z-senkrechte Richtung**

Die bereits 1935 von H. MEINEL getroffene Beobachtung hinsichtlich der Vernachlässigbarkeit der Erregung in Saitenrichtung bestätigt sich also. Damit war die Entscheidung zum Verzicht auf Messungen in Saitenrichtung gefallen. Ende der 1990er Jahre, nach Abschluss des Stegprojektes, fielen eine Reihe von Messungen an Celli an. Bei diesen modifizierten wir die Anregeorte und verwendeten den größeren Impulshammer PCB 086B01:

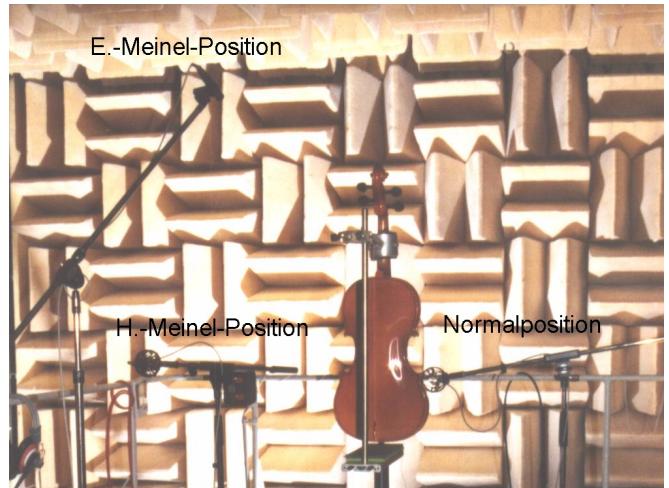
- Stegoberkante Bassbalkenseite, senkrechter und seitlicher (BB) Anschlag
- Stegoberkante Stimmstockseite, senkrechter und seitlicher (SS) Anschlag
- Stegoberkante Mitte, senkrechter (MS) Anschlag

Die Auswertung der Messungen zeigt, dass die seitliche Anregung die deutlich höchsten Übertragungswerte liefert. Der senkrechte Anschlag ergibt in der Mitte und auf der Stimmstockseite sehr ähnliche Frequenzkurven. Bei senkrechtem Anschlag auf der Bassbalkenseite fällt die Kurve deutlich ab. Dies entsprach im Wesentlichen den Ergebnissen aus dem Stegprojekt! Es wurde die Folgerung abgeleitet, die Messungen zukünftig nur noch mit zwei Anschlagorten, Stegmitte senkrecht (MS), und Steg Bassbalkenseite Oberkante seitlich (BB) vorzunehmen. Neben den vorliegenden Ergebnissen waren auch das Ziel, mit möglichst wenigen Messungen auszukommen und die Erreichbarkeit der beiden Anschlagorte bei Messung in Spielhaltung mit ausschlaggebend für die Entscheidung.

Nach der Entscheidung zur Erregung stand nun die Frage der Mikrofonierung. Es sollte auf jeden Fall nunmehr mit mehr als einem Mikrofon gearbeitet werden. Der vorhandene Vierkanal-Analysator bot eine Drei-Mikrofon-Lösung an. Um ggf. Kompatibilität mit früheren Messungen problemlos herstellen zu können, wählten wir neben einer Normalposition senkrecht zur Decke die „H.-Meinel-Position und die E.-Meinel-Position. Allerdings in modifizierter Form: Als Aufpunkt dient der Deckenpunkt unter der Stegmitte und der Abstand der Mikrofone zu diesem Aufpunkt beträgt 1 m. Zunächst erfolgte die Realisierung mittels Mikrofonstativen. Die Geige/Bratsche wurde zur besseren Handhabung auf einem erhöhten Gestell befestigt.

Es zeigte sich, dass diese Mikrofonanordnung unverändert für alle Streich- und Zupfinstrumente (Ausnahmen Kontra-

bass und Zither) verwendet werden kann. Es kommt nur darauf an, die Aufpunkte der Instrumente geeignet im Raum zu platzieren. Da die Stativvariante störanfällig und umständlich im Auf- und Abbau ist, wurden die Mikrofone später fest an Seilen und ihren Zuleitungen aufgehängt. Aktuell stehen 11 Mikrofone zur Verfügung, die im Raum auf einer Viertelkugel mit Radius 1 m verteilt sind. Die Positionen orientieren sich im Vertikalwinkel an DIN 45635-1, im Horizontalwinkel musste, bedingt durch die vorhandenen Befestigungselemente, eine 45°-Teilung realisiert werden.



**Abbildung 11: Mikrofonanordnung Frequenzkurvenmessung Geige**

Der reflexionsarme Raum des IfM ist ein Vollraum mit einer Grenzfrequenz der Auskleidung von 125 Hz und lichten Maßen zwischen den Keilspitzen von  $4,9 \times 4,5 \times 3,1 \text{ m}^3$ . Der Mittelpunkt der „Mikrofonkugel“ befindet sich im Mittelpunkt dieses lichten Raumes. Alle Stative und Hilfseinrichtungen für die Frequenzkurvenmessungen sind so gestaltet, dass der Aufpunkt der Instrumente sicher in diesem Mittelpunkt positioniert werden können. Als Aufpunkt dient bei Streichinstrumenten, wie bereits erwähnt, der Deckenpunkt unter der Stegmitte, bei Zupfinstrumenten die Schalldochtmitte, bei Zithern der Mittelpunkt der Decke. In Einzelfällen wird er speziell festgelegt.

Seit 2009 steht ein 16-Kanal-Analysator DS2000 zur Verfügung. Damit können nunmehr auch Frequenzkurven mit 11 Mikrofonpositionen der Viertelkugel und mit einem Dreh der Apparatur um 180° mit 21 Mikrofonpositionen auf einer Halbkugel aufgenommen werden. Wenn man von speziellen Fragestellungen wie z.B. zur Richtcharakteristik absieht, ergab die Hinzunahme weiterer Mikrofone zur Drei-Mikrofon-Anordnung keinen wesentlichen Erkenntniszuwachs, der Sprung von der ein- zur Drei-Mikrofon-Anordnung aber sehr wohl.

**Bemerkung:** Wenn genügend Zeit zur Verfügung steht, kann man natürlich auch mit einem Zwei-Kanal-Analysator Frequenzkurven eines Objektes mit beliebig vielen Mikrofonpositionen aufnehmen.

Es wäre nun als letzter Punkt noch die Art und Weise der Impulshammeranschläge zu diskutieren. Im Zeitraum der Umstellung der Technik auf Impulshammeranschlag fielen zunächst eine Reihe von Messungen an Celli und Kontrabässen an. Die Beobachtung sehr unterschiedlicher Spielhaltungen bei Streichern und Lautisten während Konzerten

ließen uns einige Experimente zum Einfluss der Spielhaltung vornehmen. Die Wirkung erwies sich als beträchtlich. Wir tendierten im Ergebnis dieser Experimente dahin, Frequenzkurvenmessungen zukünftig in Spielhaltung (in situ) durchzuführen. Diese ließen sich sehr gut in senkrechter Spielhaltung mit dem größeren Impulshammer PCB 086B01 vornehmen. Die linke Hand fasst das Instrument am Hals und bedämpft dabei gleichzeitig die Saiten. Mit der rechten Hand wird angeschlagen. Die Methode bewährte sich analog bei Zupfinstrumenten, die in normaler, waagerechter Spielhaltung vermessen werden. Der Impulshammer wird mit steeltip und ohne Extendermasse verwendet. Im Falle der Zupfinstrumente wird in der Stegmitte, senkrecht zur Decke angeschlagen. Selbstverständlich erfolgten auch hier Experimente mit variierenden, ggf. mehreren Anschlagorten am Steg. Es zeigte sich jedoch dabei kein Mehrgewinn an Informationen, auch nicht für den Fall unterbrochener Stege.

Frequenzkurven von Geigen und Bratschen ließen sich nicht in Spielhaltung gewinnen. Es musste der Miniaturimpulshammer verwendet werden und es ergaben sich zu viele Fehlschläge im wahrsten Sinne des Wortes. Die Lösung lag in einer Pendel-Hammeranregung. Der Pendelhammer entstand auf Basis des Miniaturhammers PCB 086C80. Die Pendelvariante muss allerdings neu kalibriert werden! Im Ergebnis einer Reihe von Versuchen entstand die in Abbildung 12 dargestellte Anschlagvorrichtung.



Abbildung 12:  
Anschlagvorrichtung

Die Halterung des Pendels lässt sich leicht in die Position für senkrechten Anschlag umspannen. Etwas problematisch ist der lange Pendelarm, der zu Eigenschwingungen des Pendels im gemessenen Frequenzbereich führt. Ein deutlich verkürzter Arm würde aber die Halterung ins Hauptschallfeld der Decke bringen.

Eine Messung entsteht stets als Mittelung über 10 Impulshammeranschläge.

Messungen zur Reproduzierbarkeit für die Fälle Geige und Gitarre über mehrere Jahre an klimatisiert gelagerten Referenzinstrumenten ergaben erstaunlich gute Resultate. Mittlerweile wurde der Messbereich bis 10 kHz unter Beibehaltung der Auflösung von 3,125 Hz erweitert. Abbildung 13 zeigt eine Repromessung. Dargestellt ist die Betragsmittelung der sechs entstehenden Frequenzgänge.

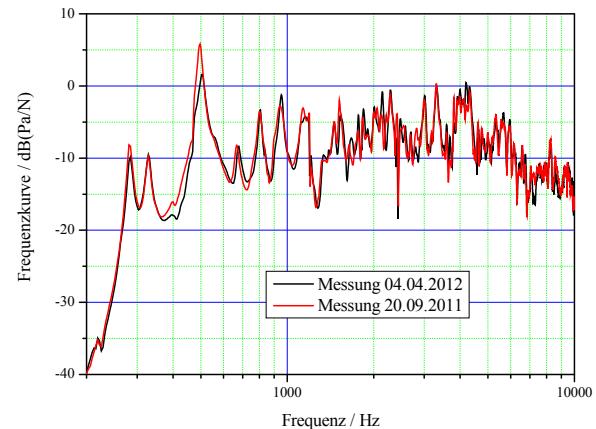


Abbildung 13: Repromessung an einer Referenzgeige

## Literatur

- [1] Meinel, H.: Über Frequenzkurven von Geigen. Akustische Zeitschrift Band 2 Januar 1937 S.22-33, März 1937 S. 62-71
- [2] Költzsch, P.: Antonio Bagatella und Hermann Meinel – zwei Geigenbaumeister und Akademiepreisträger: Padua 1782 / Berlin 1936. Seminar des FAMA in der DEGA 2011
- [3] Rohde, U.: Entwicklung und Erprobung einer elektrischen Erregungsvorrichtung für Geigen. Forschungsbericht IfM Zwota 1956 (Ms)
- [4] Meinel, H.: Regarding the Sound Quality of Violins and a Scientific Basis for Violin Construction. J.A.S.A. 29(1957) July S. 817 ff
- [5] Häcker, K.: Objektive Prüfmethode für Zupfinstrumente. Forschungsbericht IfM Zwota 1968 (Ms)
- [6] Krüger, W.: Entwicklung von Konzertgitarren mit Weltmarktspitzenqualität. Forschungsbericht IfM Zwota 1973 (Ms)
- [7] Schmidt, M.: Experimentelle Vorarbeiten zur Errichtung eines Geigenmessplatzes. Ingenieur-Beleg TU Dresden 1974 (Ms)
- [8] Meinel, E.: Qualitätsbewertung Violinen. Forschungsbericht IfM Zwota 1981 (Ms)
- [9] Jansson, Erik V.; Bork, I.; Meyer, J.: Investigations into the Acoustical Properties of the Violin. Acustica 62(1986)1 S. 1 - 15
- [10] Dossing, O.: Structural Testing – Part I: Mechanical Mobility Measurements. Brüel & Kjær, April 1988
- [11] Voigtsberger, K.; Ziegenhals, G.: Untersuchungen zum Übertragungsverhalten von Violinen- und Geigenstegen. Fortschritte der Akustik - DAGA 1997
- [12] Ziegenhals, G.; Voigtsberger, K.: Der Einfluß der Stegform auf den Klang der Streichinstrumente. Forschungsbericht IfM Zwota 1996 (Ms)
- [13] Ziegenhals, G.; Baltrusch, M.: Untersuchungen an Saiten von Gitarren und Geigen. Veröffentlicht auf den Internetseiten des IfM im September 2011
- [14] Ziegenhals, G.: Subjektive und objektive Beurteilung von Musikinstrumenten – Eine Untersuchung anhand von Fallstudien. Dissertation TU Dresden 2010

# Vergleichende Untersuchungen an Wolftötern für Celli

Susanne Puchelt

Westsächsische Hochschule Zwickau (WHZ) Studiengang Musikinstrumentenbau, [sanne.puchelt@gmx.de](mailto:sanne.puchelt@gmx.de)

## Einleitung

Der Wolfston ist ein schwieriges und vielschichtiges Thema, welches Musiker und Instrumentenbauer seit Jahrhunderten beschäftigt. Es handelt sich um einen Ton im Spektrum des Instrumentes, der durch seinen lauten, hohlen, bullernden Klang auffällt. Es gibt sehr viele Versuche und Lösungsansätze um dem Wolfston auf die Schliche zu kommen und ihn zu verhindern. Etliche der Lösungsansätze erklären nur einen Teil, oder eine Auftrittsform des Wolfes. Das Thema der vorliegenden Arbeit ist ein weiterer Versuch, das Phänomen Wolfston zu erklären und dem Bemühen, verschiedene Auftrittsformen des Wolfes zusammenzufassen. Darüber hinaus soll durch messtechnische Untersuchungen ein brauchbarer, verständlicher Vergleich von sieben vorhandenen Wolftötern erstellt werden.

Viele Musiker ziehen ein Cello mit Wolfston einem Cello mit Wolftöter vor. Sie sind der Meinung, dass der Wolftöter den Klang vom kompletten Instrument beeinflusst. Es wurde versucht, auch dies messtechnisch nachzu vollziehen.

## Definitionen und Ursachen

Musiker beschreiben den Wolfston als Ton, der lauter oder stärker ist als die benachbarten Töne. Es ertönt bei starkem Bogendruck ein stotterndes, unregelmäßiges Bullern. Der Ton „flattert“. Es bildet sich kein sauberer Ton, sondern er schwankt zwischen zwei Frequenzen, einer Schwebung gleich. Zudem ist die Ansprache sehr schwierig und der Ton wechselt sehr schnell im Abflauen und Aufbau. Je nach Stärke des Wolfes kann der Musiker mit Bogendruck den Ton kontrollieren.

Der Wolfston tritt meist in der Gegend um den Ton Fis und hauptsächlich auf der G-Saite auf. Laut W. Güth [1] gibt es drei verschiedene Arten von Wolfstönen.

- Wolfston erster Art: leichte Schwebung bei schwachem Bogendruck
- Wolfston zweiter Art: schwere Ansprache, verbunden mit einem lauten, sehr hohlen, dröhnen den Ton
- Wolfston dritter Art: schwere Ansprache, verbunden mit einem starken unregelmäßigen Flackern und dröhnen den Ton.

Je nach Instrument variieren die Arten des Wolfstones. Versuche einer Erklärung des Wolfstones sind sehr vielfältig. Es haben sich renommierte Wissenschaftler wie z.B. der indische Physiker C. V. Raman beteiligt. Insgesamt muss man feststellen, dass sich die Erklärungsvarianten z.T. ergänzen, z.T. aber auch widersprechen. Als wirklich einzig richtige und bewiesene Beschreibung des Phänomens Wolf kann wohl bislang noch keine der vorliegenden Varianten angesehen werden. Als Beispiele seien folgende Literaturen angeführt: Raman [2], White [3], Schelleng [4], Firth und Buchanan [5], Güth [6] und Dünnewald [6].

Aus den angegebenen Quellen lassen sich folgende Aussagen zu Entstehung und Ursachen des Wolftons ableiten:

- Der Wolf entsteht aus einer Wechselwirkung bzw. Kopplung der Hauptkorpusresonanz und der Saitenresonanz.
- „Normale“ Töne liegen nicht in der Nähe einer Korpusresonanz. Bei diesen Tönen ist die Amplitude der Eigenresonanz des Korpus verhältnismäßig klein. Hier tritt nur die Saitenfrequenz in Erscheinung. Bei dem Wolfston, welcher mit seiner Frequenz in der Nähe oder auf der Korpusresonanz liegt, ist die Amplitude der Eigenresonanz sehr viel größer, da der Korpus schwach gedämpft ist. Wie oben erwähnt kommt es bei starker Kopplung zu einer Erhöhung der Amplitude der angeregten Resonanz. Treffen sich nun beide Eigenresonanzen des gekoppelten Systems beginnt die eine Resonanzfrequenz die andere so zu stören dass die stabile Tonerzeugung behindert wird.
- Beide Resonanzen koppeln sich, sodass die Schwingungen instabil werden. Es entsteht ein neues Schwingungssystem mit zwei neuen Resonanzen welche sich oberhalb, bzw. unterhalb der „alten“ Eigenresonanz befinden. Je nach Stärke der Kopplung ist die Phasendifferenz dieser beiden Schwingungen größer oder kleiner.
- Durch dieses neue Schwingungssystem entsteht eine Schwebung, da die Energie und somit die Höhe der Amplitude zwischen den beiden neuen Resonanzen hin und her „wandert“.

Für schwere Ansprache in Verbindung mit dem Verschwinden des Tones ist eine andere Erklärung notwendig:

- Wie oben erläutert, ist bei einem „normalen“ Ton die Saitenamplitude größer als die des Korpus. Bei der Hauptkorpusresonanz nähert sich die Amplitude der Saite an.
- Zudem hat die Hauptkorpusresonanz ihr Maximum in Stegnähe. Der Steg hat sein Maximum der Konduktanz in der Nähe der Hauptkorpusresonanz. Diese hohe Konduktanz hat eine sehr geringe Impedanz zur Folge.
- Dies führt dazu, dass die vom Bogen zugeführte Energie durch die mangelnde Impedanz des Steges sofort in den Korpus geleitet und nicht abgestrahlt wird. Der Korpus nutzt diese Energie dazu seine Amplitude aufrecht zu erhalten.
- So kommt es beim Bogen zu einer Unterbrechung der Haftphase. Diese kurze Gleitphase verursacht eine neue Knickstelle der Saite, die dem Korpus kurzzeitig wieder Energie entzieht und die alte Knickstelle verdrängt. So verschwindet der vom Korpus aufgebaute Ton wieder. Der Korpus stellt

sich auf die neue Energiezufuhr ein und nimmt dem Bogen wie zuvor die Energie.

- Wenn der Korpus die abgezogene Energie verbraucht hat, fällt die Resonanz zusammen und der Grundton ist wieder nur noch zu hören. So kommt es auch zu einem zusätzlichen Klangfarbenwechsel.

Fest scheint also zu stehen: Der Wolf benötigt zur Entstehung eine ausgeprägte Korpusresonanz. Ein gutes Cello hat andererseits eine solche gut ausgeprägte Korpusresonanz. Sie ist für den erwarteten Celloklang wichtig. Bei einem guten Cello ist also ein Wolf zu erwarten. Genau das ist eine bekannte Musikeraussage.

## Das für die Untersuchungen eingesetzte Cello

Das Cello lehnt sich an ein Modell von Alessandro Gagliano 1704 an. Es hat eine Schwingende Saitenlänge von 68,4 cm. Das ist etwas kleiner als normal. Gebaut wurde diese Cello 2014 in Markneukirchen von der Autorin. Besaitet ist es für C- und G-Saite mit Spirocore Wolfram und für D- und A-Saite mit Larsen Soloist. Testspieler beschreiben den Klang des Cellos wie folgt:

- Die unteren Saiten sind sehr prägnant und haben viel Tiefe. In den oberen Lagen klingt es ein wenig geschlossen. Insgesamt ist es sehr durchsetzungssstark und trägt den Ton sehr weit. Die G-Saite ist etwas zu dominant und es ist eine Art Registerwechsel zu hören, beim Wechsel von D zu G-Saite.

Der Wolf befindet sich laut Stimmgerät auf dem  $f^{\#} + 20$  cent. Die Erfahrung zeigt aber, dass sich der Wolf je nach Wetterlage und Feuchtigkeit verschieben kann. Zudem ändert sich der Tonbereich. Manchmal reicht der Bereich bis zum  $f^{\#}$ , manchmal sogar fast bis zum f. Dass die Frequenz des Wolfstones sich nach oben in Richtung g verschiebt ist bis jetzt nicht festgestellt worden. Auch sind noch keine Regelmäßigkeiten hinsichtlich Veränderungen des Wolftons bekannt.

Die wichtigsten Resonanzen die in diesem Fall von Bedeutung sind befinden sich laut Fletcher und Rossing [8] bei:

**Tabelle 1:** Cellohauptmoden nach [8]

$C_1$ (Korpus)	$A_0$ Hohlraum	$T_1$ Decke	$C_2$ (Korpus)	$C_4$ (Korpus)
57 Hz	102 Hz	144 Hz	170 Hz	195 Hz

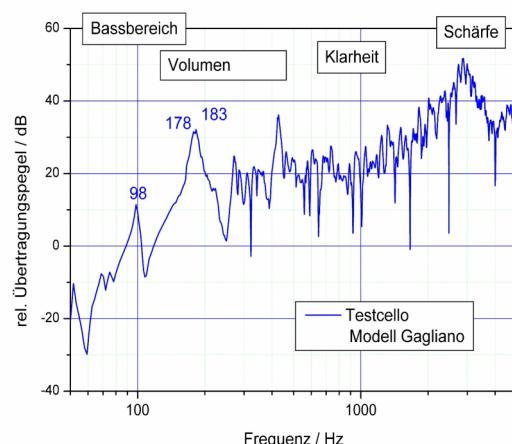
Zur einfachen und schnellen Charakterisierung von Moden an Streichinstrumenten wird am Studiengang Musikinstrumentenbau der WHZ eine Übertragungsfunktion zwischen einer Impulshammererregung (PCB 086B01) auf der Mitte der Stegoberseite und der resultierenden Beschleunigung (PCB 352B10) an einem Deckenpunkt unmittelbar neben dem bassbalkenseitigen Stegfuß. Die Messung erfolgt im Bereich 0 Hz bis 5 kHz mit einer Auflösung von 1,5625 Hz. Das Instrument wird an zwei Punkten (vorzugsweise Schnecke und Ende vom Unterbug) auf Schaumstoff gelagert, so dass das Instrument in der Luft „schwebt“. Es entstehen quasi freie Randbedingungen. Die Ergebniskurve stellt eine Mittelung über 10 Hammeranschläge dar. Die

Messanordnung zeigt Abbildung 1. Der Beschleunigungsaufnehmer ist mit etwas Mühe erkennbar.



**Abbildung 1: Cello frei gelagert auf Schaumstoff für die Übertragungskurvenmessung**

Abbildung 2 stellt die so gewonnene Übertragungskurve des Testcellos dar. Es zeigen sich bei 178 Hz und 183 Hz zwei eng benachbarte Hauptresonanzen, von denen die höhere offenbar den Wolf verursacht. Diese Folgerung entspricht Beobachtungen von DÜNNWALD [7].



**Abbildung 2: Übertragungsfunktion des Testcellos**

Die bei 98 Hz liegende Hohlraumresonanz erklärt die sehr dominante g-Leersaite.

## Die untersuchten Wolftöter

Es sind natürlich weit mehr Wolftöter auf dem Markt als im Projekt untersucht werden konnten. Bei den Ausgewählten handelt es sich um die am häufigsten verkauften und sie stehen funktionell stellvertretend für die Anderen. Die Beschreibungen sind im Wesentlichen den mitgelieferten Bedienungsanleitungen entnommen.

### LupX Wolftöter

Eine Halbkugel aus vollem Messing wird zwischen Steg und Saitenhalter an die Saite geschraubt. Es entsteht ein Dämpfungseffekt an der Saite. Masse: 8,4 g



### Wolftöter vergoldet (Röhre)

Vergoldetes Messingrörchen, wird zwischen Steg und Saitenhalter an der Saite festgeschraubt. Zum Schutz und höheren Dämpfung der Saite ist ein Gummi im Rörchen angebracht. Masse: 5,5 g



### Wolf-Eliminator (Kugel/Güth)

Metallische Hohlkugel, welche an 2 Federn aufgehängt ist und im Inneren eine kleine Stahlkugel enthält, die in Flüssigkeit eingebettet ist. Sobald der Wolfston gestrichen wird gerät die Hohlkugel in Resonanzschwingung. Ansonsten ruht die Kugel. Masse: 5,8g



### Wolf-Resonator (GEWA/Güth)

Ein Bleiklötzchen ist an einer dünnen Bronze-feder aufgehängt. Es wirkt der Resonanzschwingung des Korpus mit seiner Eigenresonanz entgegen. Er wird im Inneren des Cellos auf der unteren Bassseite befestigt. Masse: 8 g



### Wolf-Eliminator (Krentz)

Ein Röhrchen, in dem ein kalibrierter Magnet „schwimmt“ und die Resonanzen des Wolfes moduliert. Es wird auf der Innenseite des Cellos auf der unteren Bassseite mit Hilfe eines anderen Magneten an der Decke befestigt. Masse: 36,6g



### Wolf-Terminator

Zwei vibrierende Zungen mit flexiblen Gewichten an der Seite. Mit einem Inbus ist es möglich die Länge der Zungen einzustellen. Die Zungen verbinden die 2 konkurrierenden Resonanzen durch genaue Frequenzabstimmung. Er wird außen auf der Decke befestigt, meist auf der Bassseite neben dem Saitenhalter. Masse: 10,4g



### New Harmony

Eine Messingröhre wird zwischen Saitenhalter und Steg auf der G-Saite befestigt. Es entsteht wie beim LupX und der Röhre ein Dämpfungs-effekt. Masse: 3g - 13g

## Untersuchung der Wolftöter

Zuerst wurden die Wolftöter selbst untersucht. Die Frage die sich stellte war, ob der zu untersuchende Wolftöter eine Eigenfrequenz im kritischen Wolfstonbereich besitzt bzw. hervorruft oder nicht. Die Tests mit den Wolftötern, hinter denen aufgrund der Beschreibung bzw. ihres Aussehens ein Resonator vermutet wurde erfolgten auf einem Shaker der Marke B&K Typ 4810. Zwischen Shaker und Wolftöter war ein kalibrierter Impedanzmesskopf vom Typ 288D01 installiert (Abbildung 3). Aufgezeichnet wurde der Frequenzverlauf der Größe Beschleunigung pro Kraft über der Frequenz im Bereich 0 bis 500 Hz. Es handelt sich also um eine der Admittanz ähnliche Größe (fehlende Integration der Beschleunigung). Die auf diese Weise untersuchten Wolftöter waren:

Reonator (Güth), Wolf-Eliminator, Terminator und ein „einfaches“ Testgewicht.



Abbildung 3: Wolftöter befestigt auf Shaker mit Impedanzmesskopf

Das einfache Gewicht wurde zur Veranschaulichung der Situation mit gemessen. Die Ergebnisse der Messungen zeigt Abbildung 4.

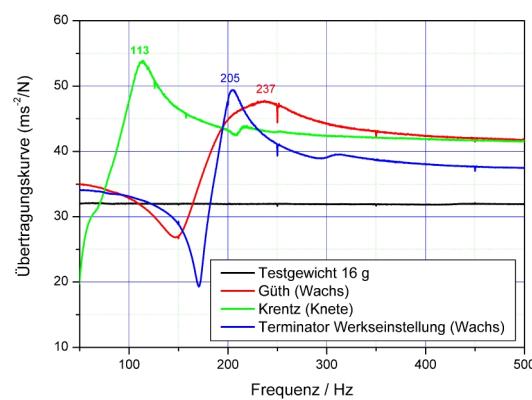
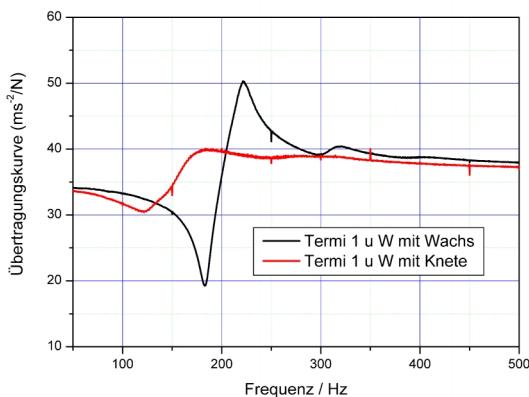


Abbildung 4: Übertragungskurven der gemessenen Wolftöter

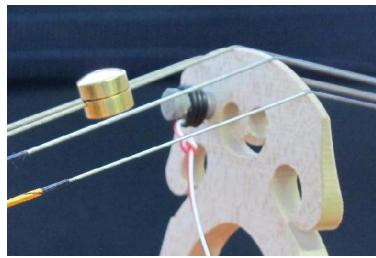
Die Ergebnisse dieser ersten Untersuchung zeigen eindeutig, dass es sich bei allen drei Wolftötern um Resonatoren handelt, welche ihre Eigenfrequenz mehr oder weniger im kritischen Bereich haben. Das Testgewicht zeigt hier, wie erwartet, ein frequenzunabhängiges Verhalten.

Die Wolftöter wurden mit dem zur Befestigung von Schwingungsaufnehmern üblichen Wachs auf dem Impedanzkopf angeheftet. Der Krentz war jedoch zu schwer und musste deshalb mit relativ viel Knete befestigt werden. Gerade er zeigt aber eine deutlich nach unten aus dem interessierenden Bereich herausfallende Resonanz. Es lag die Vermutung nahe, dass die Ursache in der Befestigung lag. Um die Vermutung zu überprüfen, erfolgte eine Reihe von Messungen mit dem Terminator unter Verwendung unterschiedlicher Befestigungen. Die Ergebnisse bestätigten die Vermutung. Es ist deutlich zu sehen, dass die Knete einen größeren Dämpfungseffekt hat und zudem die Frequenz deutlich herabsetzt (Abbildung 5). Daraus lässt sich folgern, dass die Eigenresonanz vom Krentz ohne die Knete wesentlich höher ist, da er mit einem Magneten am Cello befestigt wird. Für den Resonator Güth gilt dann ähnliches, weil dieser typischerweise mit Leim im Inneren des Cellos fixiert wird. Hierbei ist noch zu erwähnen, dass bei der Ermittlung der optimalen Position des Resonators Güth in der Werkstatt üblicherweise mit Knete gearbeitet wird. Aus den Messergebnissen lässt sich schließen, dass es so zu Positionsirrträumen kommen kann, weil der Leim wesentlich weniger dämpft und die elastische Zwischenschicht sehr viel dünner ist.



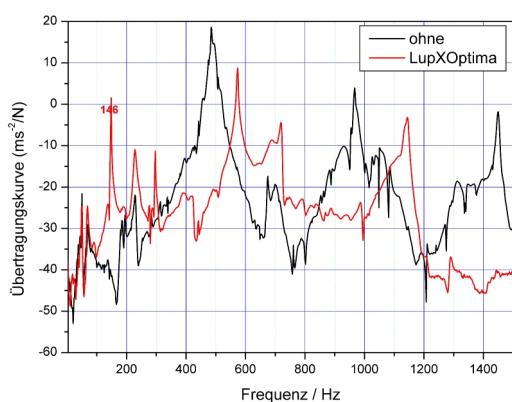
**Abbildung 5: Übertragungskurve des Terminator mit verschiedenen Befestigungsarten**

Die restlichen Wolftöter (mit Ausnahme der Kugel) stellen reine Messen dar, die an Saiten zu befestigen sind. Zusammen mit den Saiten sollten sie dann entsprechende Feder-Masse-Systeme, also Resonatoren darstellen. Eine Überprüfung dieser Folgerung war mit der bisher verwendeten Apparatur nicht möglich. Es wurde eine Anordnung wie in Abbildung 6 dargestellt, unter Verwendung eines Testcellos eingesetzt.



**Abbildung 6: Alternative Messanordnung**

Diesmal wurde nur das Beschleunigungsspektrum bei Erregung durch Anzupfen der Saiten aufgenommen. Gemessen wurden jeweils Situationen mit und ohne Wolftöter. Es zeigt sich, dass bei angebrachtem Wolftöter zusätzliche Peaks im interessierenden Bereich entstehen (Abbildung 7), sie also tatsächlich zusammen mit der Saite einen zusätzlichen Resonator ausbilden.



**Abbildung 7: Beschleunigungsspektrum am Steg nach Anzupfen des Saitenstückes zwischen Steg und Saitenhalter ohne und mit LupX**

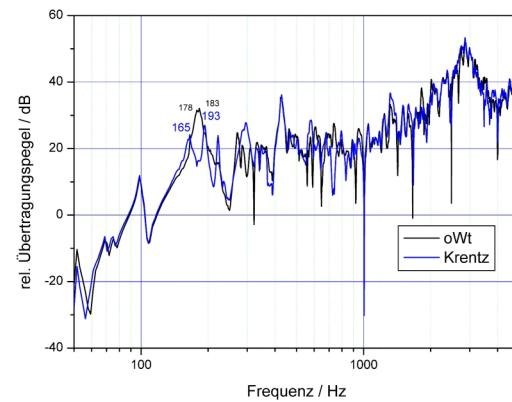
Da die Kugel einerseits ein Innenleben aufweist, andererseits zwischen zwei Saiten gespannt wird, musste auf eine weitere

Methodik ausgewichen werden. So wurde der Beschleunigungsaufnehmer direkt auf der Kugel platziert und am Steg mit einem Impulshammer angeregt. Auch hier zeigte sich eine Resonanz im kritischen Bereich.

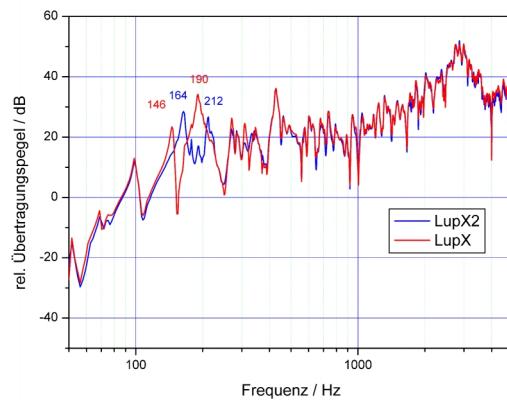
## Untersuchungen am Cello

Die Untersuchungen der Wolftöter in Zusammenhang mit einem Instrument erfolgten an einem Cello Modell nach Gagliano. Die Messungen fanden einmal nach der oben geschilderten Methodik einer einfachen Übertragungskurvenmessung zum anderen im Institut für Musikinstrumentenbau mittels der dort verwendeten Frequenzkurvenmesstechnik [9] (Fernfeld) statt.

Es sollen zunächst die Ergebnisse der Übertragungskurvenmessungen anhand der Wolftötervarianten Krentz und LupX diskutiert werden. Beide Wolftöter spalten die Hauptkorpusresonanz in zwei relativ weit auseinander liegende Resonanzen auf (Abbildung 8 und Abbildung 9). Die Hohlraumresonanz wird hingegen nicht beeinflusst.



**Abbildung 8: Wirkung des Wolftöters Krentz in der Übertragungskurve**



**Abbildung 9: Wirkung des LupX für zwei Positionen auf der Saite**

Im Falle des LupX sind Übertragungskurven für zwei verschiedene Positionen des LupX auf der Saite, d.h. für zwei Abstimmungen des Wolftöters dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die verschobenen Resonanzen auf verschie-

denen Frequenzen befinden und dass Pegel und Resonanzgüte ebenfalls von Fall zu Fall variieren. Die Wolfsonanz des Instrumentes und der Wolftöter verhalten sich also in erster (guter) Näherung wie zwei gekoppelte Ein-Massen-Schwinger. Das Ergebnis, d. h. die Wirkung des Wolftöters lässt sich durch seine Abstimmung (insofern diese möglich ist) beeinflussen.

Die Frequenzkurvenmessungen erfolgten an drei Tagen im Abstand von jeweils zwei Wochen. An jedem Messtag erfolgte eine Referenzmessung des Testcellos ohne Wolftöter (Abbildung 10). Es zeigen sich geringe Unterschiede, die zumindest zum Teil auf klimatische Einflüsse zurückzuführen sind, da eine klimatisierte Lagerung des Instrumentes nicht möglich war.

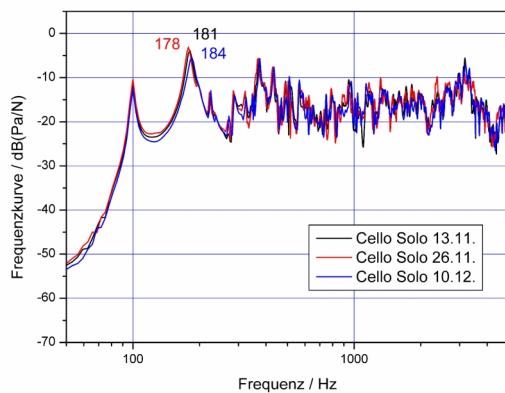


Abbildung 10: Referenzmessungen Frequenzkurve an den drei Messtagen

Aus allen Frequenzkurvenmessungen mit den verschiedenen Wolftötern gebildete Maximum- und Minimumkurven werden in Abbildung 11 der Frequenzkurve des Testcellos ohne Wolftöter gegenübergestellt. Es zeigt sich deutlich, dass der für den typischen Cellowolf interessante Frequenzbereich tatsächlich massiv beeinflusst wird. Aber auch oberhalb dieses Bereiches zeigen sich Veränderungen, die über die normalen Streuungen (Abbildung 10) hinausgehen. Es ist also in jedem Falle der Musiker gefragt, welche Veränderungen er bei der Wahl des Wolftöters in Kauf nehmen möchte.

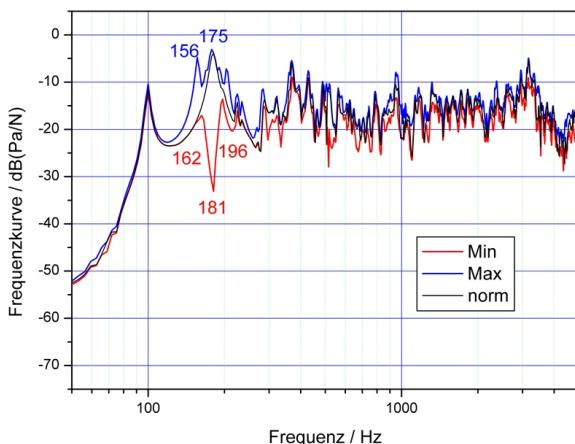


Abbildung 11: Max-Min-Verlauf aller Frequenzkurven mit Wolftötern im Vergleich zur FK ohne Wolftöter

Da der Terminator die meisten Einstellmöglichkeiten hat, wurde diesem etwas mehr Aufmerksamkeit gewidmet. Es fanden Messungen mit drei Abstimmfrequenzen, 170 Hz, 185 Hz und 200 Hz und auf drei Positionen (Abbildung 12) statt.



Position 1 Position 2 Position 3

Abbildung 12: Verwendete Wolftöterpositionen

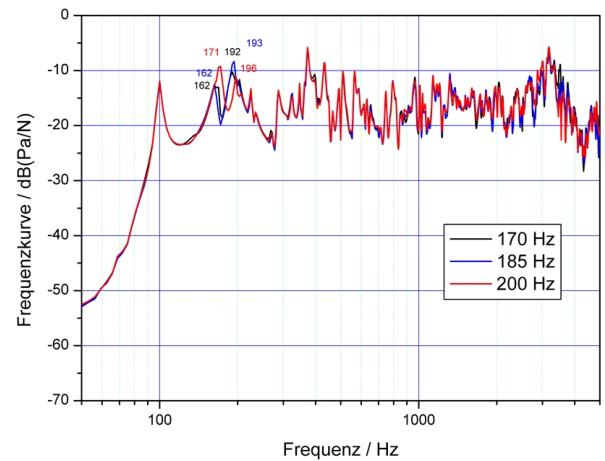


Abbildung 13: Wirkung verschiedener Abstimmungen des Terminators auf Position 1

Wie schon bei der entsprechenden Untersuchung am LupX zeigt sich, dass die Abstimmung des Wolftöters sowohl die Frequenzen der sich ausbildenden, aufgespaltenen Resonanzen als auch deren Pegel und in geringerem Maße auch deren Dämpfung beeinflusst. Dies erwartet man auch vom Mechanismus gekoppelter Schwinger.

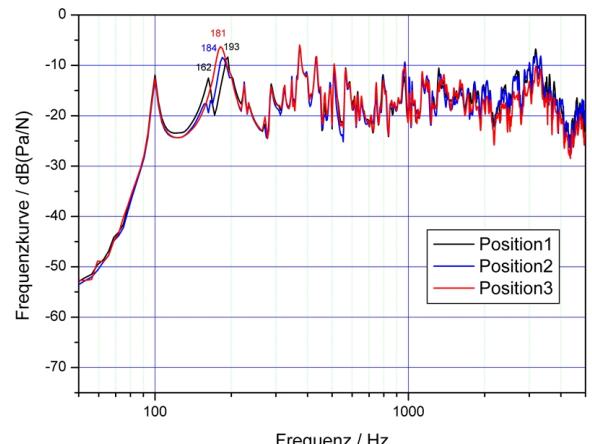


Abbildung 14: Wirkung verschiedener Wolftöterpositionen

Die Wirkung verschiedener Positionen des Wolftöters stellt schließlich Abbildung 14 dar. Eine Positionierung auf dem Saitenhalter zeigt praktisch keine Wirkung auf die Frequenzkurve. Der Terminator an Position 2 dämpft die Resonanz etwas und verschiebt sie leicht nach oben. Die typische Reaktion gekoppelter Swinger bleibt jedoch aus. Diese entsteht nur auf Position 1. Interessant sind in diesem Zusammenhang die stets mit vorgenommenen Anspieltests. Es zeigt sich, dass auch auf Position 2 der Wolf spürbar abgeschwächt wird, wenn auch nicht so stark wie auf Position 1. Es ist also nicht zwingend die volle Koppelreaktion der beiden Swinger erforderlich, um den Wolf spürbar zu beeinflussen. Mit der Position des Wolftöters wird zweifellos die Kopplung der beiden Schwingssysteme bestimmt. Kommt es nicht zur Aufspaltung der Wolfresonanz, so liegt offenbar nur eine schwache Kopplung vor. Für manche Wölfe, unter Berücksichtigung des Gesamtklanges des Instrumentes kann dies durchaus wünschenswert sein.

## Spieltests

Es wurde eine Reihe von Spiel- und Hörtests vorgenommen, bei denen Testpersonen die Wirkung, die Handhabbarkeit aber auch die Optik der Wolftöter zu beurteilen hatten. Dabei stellte sich heraus, dass die als eigenständige Resonatoren ausgebildeten Wolftöter die besseren Urteile gegenüber den Gewichteten bekamen, die erst in Zusammenhang mit der Saite, an die sie angeklemmt werden, zu Resonatoren erwachsen. Den besten Eindruck in den subjektiven Tests hinterließ der Wolf-Eliminator (Krentz), wenn auch nur mit geringem Vorsprung.

## Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben eine für die Praxis sehr wichtige Erkenntnis gebracht: Sie sind unter Werkstattbedingungen keinesfalls reproduzierbar. Die kleinste Veränderung, sei es in der Anregung, die Luftfeuchtigkeit, die Position des Wolftöters, seine Befestigung, ja selbst die Laune des Musikers, haben Einfluss auf den Wolfston und seine Beseitigung.

Alle Wolftöter verändern die Hauptkorpusresonanz, auf die sie natürlich alle mehr oder weniger gut abgestimmt waren. Die Veränderung geschieht entweder durch Aufspaltung der Resonanz oder durch Herabsetzen des Pegels. Nachteilig ist, dass stets auch andere Frequenzbereiche (Klangbereiche) beeinflusst werden.

Wolftöter stellen Swinger (Resonatoren) dar, die über eine Kopplung mit der den Wolf hervorrufenden Korpusresonanz als Schwingungstilger auf diese Resonanz wirken. Der Vollständigkeit halber fanden auch Versuche mit reinen Massestücken auf der Decke statt. Diese verschieben die Korpusresonanz nach unten. Eine solche Verschiebung weg vom am meisten betroffenen musikalischen Ton reicht aber nicht aus, um die störende Wirkung des Wolfes hinreichend zu mindern.

Als effektivste Stellschraube erwies sich die Veränderung der Position des Wolftöters. Je nachdem an welcher Stelle sich der Wolftöter befindet, hat man einen guten Eliminierungs-Effekt oder nur eine Veränderung im Klang. Die Einstellung der Kopplung zwischen Wolftöter und Korpusreso-

nanz erscheint also der wesentlichste Steuerparameter zu sein. An dieser Stelle sollten nachfolgende Untersuchungen ansetzen. Und natürlich erscheint es lohnenswert, sich mit den Möglichkeiten der Schwingungstilger zu beschäftigen.

## Literatur

- [1] Güth, W.: Der Wolfton beim Cello. *Acustica* 41(1978) S. 163-176
- [2] Raman, C. V.: On the „wolf-note“ of the violin and the cello. *Phil. mag.* vol. 32, London, 1916
- [3] White, G.W.: The Origin of the „Wolf-note in Bowed, Stringed Instruments. In *Proc. Cambridge Phil. Soc.* Cambridge 1915
- [4] Schelleng, J. C.: The violin as a circuit. *JASA* 36(1963) S. 326-338
- [5] Firth, I. M.; Buchanan, J. M.: The wolf in the cello. *JASA* 53(1973) S. 457-463
- [6] Güth, W.: Der Wolfton beim Cello. *Acustica* 41(1978)
- [7] Dünnewald, H.: Versuche zur Entstehung des Wolfs bei Violininstrumenten. *Acustica* 41(1979)
- [8] Fletscher, N.H. und Rossing, T. D.: *The physics of musical instruments*. New York 1998
- [9] Ziegenhals, G.: Subjektive und objektive Beurteilung von Musikinstrumenten – Eine Untersuchung anhand von Fallstudien. Dissertation TU Dresden 2010

## Preliminary results of the effect of reverberation and sound delay on organ playing

Sebastià V. Amengual<sup>1</sup>, Winfried Lachenmayr<sup>2</sup>, Dominik Kisić<sup>1,3</sup> and Malte Kob<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Erich-Thienhaus-Institut, Hochschule für Musik Detmold, 32756 Detmold, Deutschland, Email: {amengual; kob}@hfm-detmold.de

<sup>2</sup> Müller-BBM, 82152 München, Deutschland, Email: winfried.lachenmayr@mbbm.com

<sup>3</sup> Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb, 10000 Zagreb, Croatia, Email: dominik.kisic@fer.hr

**Abstract** - This article presents the process of modelization of an acoustic environment suitable for the study of the effect of room acoustics on organ playing. A first stage of the process was already presented in a previous paper [1] and the present work includes the implementation of a controllable delay between the interaction of the musician with the instrument and the generation of organ sounds. Preliminary results on the effect of delay are presented, as well as a comparison of results with a previous study case on the effect of reverberation on organ playing.

## Introduction

The performance of organ music in concert like environments is usual nowadays. However, most of the organ repertoire was historically composed to be performed in highly reverberant environments, such as churches and cathedrals. In addition, those environments sometimes present a great distance between the organ console and organ pipework, meaning that a considerable delay is present between the musician-instrument interaction and the incidence of sound on the musician. This effect forces the musicians to adapt their performance in order to overcome these adverse conditions. Moreover, in some cases, this delayed sound has to be synchronized with other musicians such as choirs, increasing the complexity of the playing strategies adopted by the performers.

Past studies on piano [2, 3, 4], cello [5, 6] and other instruments i.e. violin, flute, voice and oboe [7, 8] - suggest that there are strong links between reverberation and performance tempo. However, the effect of reverberation seems to be player and piece dependent.

The present study takes into account the individuality of the effects and compares different players performing the same pieces on the same instrument under changing acoustic conditions. The long term purpose of this study is to implement a classification of musicians relating individual aspects such as training, repertoire preference, age, etc. with their performance adjustments in varying acoustic conditions.

## Study Description

The general procedure of the experiment consists on different musicians performing a set of organ pieces repeat-



Figure 1: Music score of the analyzed excerpt (Mendelssohn A).

edly in the Detmold Concert Hall. The players are asked to perform a number of pieces of their choice which have been studied and prepared beforehand.

Every participant performs each piece several times and the acoustic conditions of the room are changed in real time between consecutive performances. A time period for testing the new acoustic situation is given between performances and length of the testing time is freely chosen by the performers. All the performances are recorded in MIDI format using an organ built-in MIDI output.

The participants in the experiment are students of the University of Music Detmold and the experiment lasts approximately 60 minutes with every musician.

Although several organ pieces are recorded in the study, the article presents the results of one analyzed excerpt, corresponding to the first 4 bars of *Sonate Op.65. No.2, Grave* composed by Felix Mendelssohn Bartholdy (see music score in Fig. 1). Further pieces are currently under analysis.

## Reverberation and organ performance

Preliminary results on the effect of reverberation on organ players were previously presented by Amengual *et al.* in [1]. This section presents an extension of the results presented in the cited article, which includes detailed information regarding the set-up, test procedure, creation of acoustics scenes and performance analysis. The experiment presented in the mentioned article will be referred as *Session 1* in this text, while *Session 2* stands for the present experiment and it is explained further in the following sections.

## Reverberation conditions

In *Session 1* three different acoustic situations are implemented for the experiment:

- Natural reverb: Natural room reverberation without enhancement. The  $RT_{60}$  of the room is approximately 1.6 seconds.
- Soft increase: The reverberation is increased by approximately 0.5 seconds between 250 and 1500 Hz.
- Strong increase: The reverberation time is strongly increased at low and mid frequencies, between 5 seconds at 250 Hz to 1.5 seconds at 5 kHz.

In *Session 2* only *Natural reverb* and *Strong increase* situations are generated. The implementation of the acoustic scenes as well as the measurement procedure for estimating the reverberation times is detailed in [1].

## Results

Performance variations related with tempo, quaver rest duration and average note duration are presented in Fig. 2. The analysis procedure is detailed in [1]. It is worth to note that the duration of quaver rests is an average of the duration of the first 5 rests of the piece (see music score in Fig. 1).

The results include the performances recorded in sessions 1 (s1) and 2 (s2), conducted in February and September 2015, respectively. Note that player OR has participated in both sessions and their results are included to compare the evolution of performance adjustments.

All players seem to be affected by the amount of reverberation, with higher reverberance leading to slower tempos. Player BL presents a decrease of tempo with reverberation, but as pointed in [1] the results are not statistically significant. Player YE shows a small tempo decreasing but the performance features of different takes in the same acoustic conditions differ considerably from each other, suggesting that these variations may not be statistically significant. Finally, player OR shows a tempo decrease with very small standard deviation between samples in both sessions 1 and 2 but the base tempo is considerably different in every session (approximately 70 and 53 BPM respectively). In addition, in session 1 the strategy followed to adopt the tempo variations is based on making longer notes and rests, while in session 2 the notes are shorter but the rests are much longer.

## Sound delay in organ performance

The delay present between the interaction of the musician with the instrument and the incidence of sound on the musician's ears is a common phenomenon due to the remote location of the pipework in many organ performing spaces such as churches. Antiphonal or echo registers

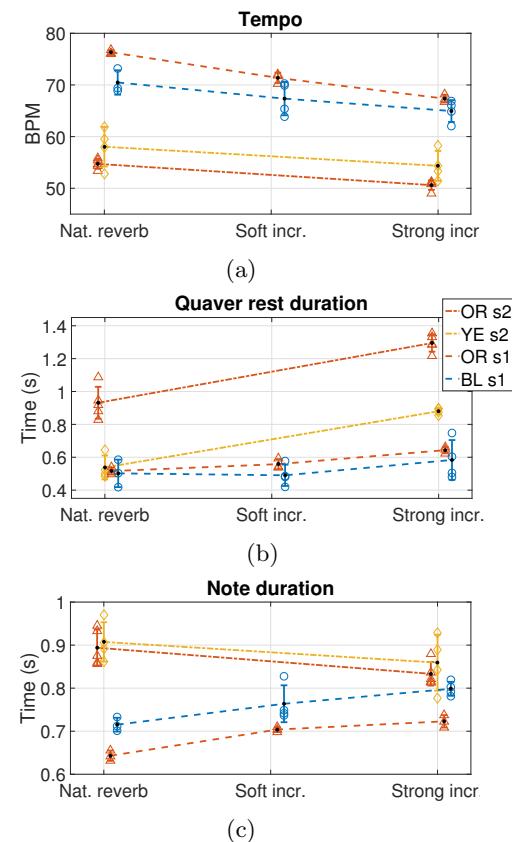


Figure 2: Performance results of *Mendelssohn A*, bars 1-4. Every color stands for a different player, dashed and dot-dashed lines represent the same players in session 1 and 2, respectively. Point markers represent results of single takes.

are also common and they are usually placed at the most remote location of the room.

Typical organ music ensembles include choirs, a fact that increases the complexity of the synchronization in the performance, and in order to avoid excessive delays it is recommended to limit the distance between organist and choir to approximately 12 meters [9] (delay of 35 ms). However, in case of using a remote pipework, the organ player has to adopt a playing strategy that takes into account the delay of the organ sound and the synchronization with an ensemble/choir. During the experiments one of the participants reported that they are typically used to play with remote pipework configurations of approximately 50 meters (146 ms of delay).

This study includes the implementation of a controllable delay between the musician-organ interaction and the generation of sound, allowing the exploration of performance strategies.

## Implementation of a controllable delay

To implement a controllable delay, a digital organ synthesizer approach is followed and the physical organ pipes are not used, thus leaving the organ as a MIDI console.

The MIDI messages generated during the performance are fed into a laptop with an organ synthesizer software (*Hauptwerk*). The signal generated by the synthesizer is then routed into a room acoustics enhancement system (*Vivace*) which implements a digital controllable delay and plays back the sound through the loudspeaker array present in the concert hall.

This set-up allows also the implementation of an antiphonal division of an organ, as presented by Kob *et al.* in [10] using a similar set-up.

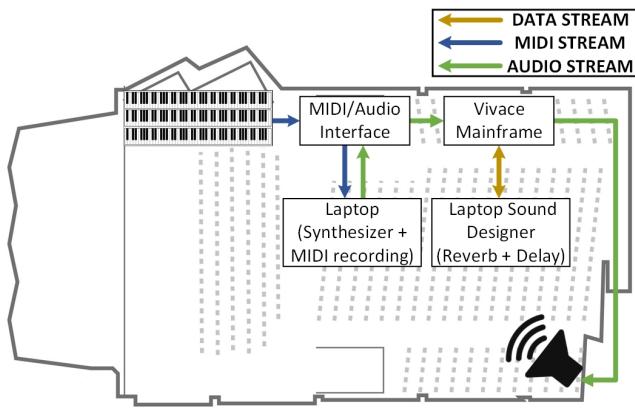


Figure 3: Schematic view of the set-up used for the implementation of a controllable delay.

## Delay conditions

The delay modelled in the experiment is divided into two parts: digital delay and physical delay. Since there is a computational delay introduced by the synthesizer and the sound routing, the digital delay has a minimum value of approximately 15 ms. Additionally, it can be increased with virtually no limit. The physical delay is caused by the distance between the console position and the sound emission position (back part of the hall, 27 meters away) and it corresponds to approximately 79 ms.

Two situations have been implemented with different delays:

- 94 ms: The sound delay is 94 ms, which corresponds to the computational delay and physical delay.
- 194 ms: The sound delay is 194 ms, corresponding to 100 ms of extra delay added to the base delay.

## Results

The results of the performances recorded with different delay configurations are compiled in Fig. 4. The vertical axis have the same scale and limits as Fig. 2 in order to allow an easy comparison of the results.

A first analysis of the results show no great variations in the performance tempo, although some subtle changes can be observed. Player OR presents a slight increase of tempo with higher delay, which is caused by shorter

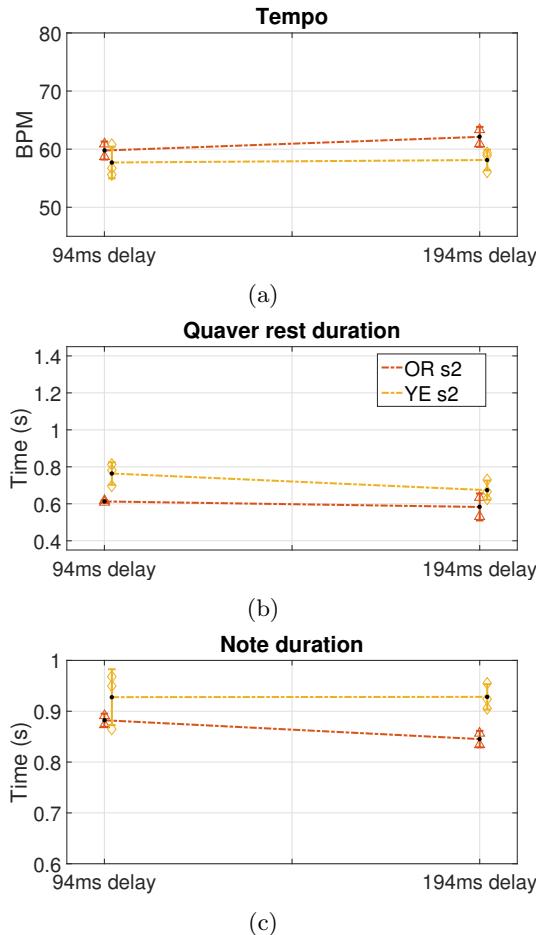


Figure 4: Performance results of *Mendelssohn A*, bars 1-4.

length of notes, while the length of the rests is kept constant.

## DISCUSSION

As stated previously in [1], the performance adjustments seem to widely vary depending on the player, since the same sound can provoke very different aural impressions on each person.

## External non-acoustic effects

As shown in Fig. 2, player OR completed very different performances in different sessions, but showing a great consistency between performances among the same session. Although the overall effect is the same (tempo decrease with more reverberation), the performance adjustments leading to this effect are considerably different. Also the base tempo of the performance differs greatly from session 1 to session 2. For this reason, it could be beneficial to include other psychological and physiological parameters - e.g. stress, mood, fatigue... - in order to classify the susceptibility of every musician regarding acoustics.

## Effect of the delay

The results (Fig. 4) suggest that varying the amount of delay in the interaction does not have a strong effect on the performance. However, as the players stated during the experiments, when an extreme delay is present on the instrument interaction they stop listening to the sound produced by the instrument and they focus their attention on the movement of the hands in order to get visual and auditory cues from the key strokes. All players participating in the delay experiment mentioned that they followed this strategy (focusing on hands movement) in both delay situations and this could be an explanation of why there are no visible changes in the performances when different delays are included. It is possible that both delay configurations are too big and the playing strategy is the same in both cases (there is no switch from listening to the instrument to focusing on the hands movement). In a future study it could be beneficial to include a (third) situation with a much shorter delay in order to force the players to adapt from a "music listening" playing strategy to a "visual mechanical" playing strategy.

## Combining delay and reverberation

After considering the relation between reverberation and tempo and the playing strategy in delayed interactions it seems logic to ask whether changing acoustic conditions combined with a highly delayed sound generation would lead to musical perceptible changes. According to players descriptions, they stop listening to the instrument sound when the delay condition is too adverse, meaning that they would keep technical control over the performance but the artistic control could be highly limited.

## Conclusion

This article presented experimental set-ups to mimic acoustic situations for organ playing and evaluate the performance of different players under changing conditions. The results show great variability between players and further tests with a bigger number of musicians are needed in order to be able to categorize them. In addition, the different results of a same player in the same acoustic conditions performing in different days suggest that it is necessary to take into account new individualized variables in the analysis of the results. Finally, it is also worth to include hybrid situations combining different reverberation and delay conditions in one same scenario in order to explore the artistic freedom of players in highly adverse situations.

## Acknowledgements

The authors wish to thank the musicians participating in the experiments. The research work presented in this article has been funded by the European Commission within the ITN Marie Curie Action project BAT-WOMAN under the 7th Framework Programme (EC grant agreement no. 605867).

## References

- [1] S. Amengual Garí, W. Lachenmayr, and M. Kob. Study on the influence of acoustics on organ playing using room enhancement. In *Proceedings of the Third Vienna Talk on Music Acoustics*, Vienna, Austria, 2015.
- [2] S. Bolzinger and J. C. Risset. A preliminar study on the influence of room acoustics on piano performance. *Journal de physique III*, 2(C1):93–96, 1992.
- [3] S. Bolzinger, O. Warusfel, and E. Kahle. A study of the influence of room acoustics on piano performance. *Journal de physique IV*, 4(C5):617–620, 1994.
- [4] K. Kawai, K. Kato, K. Ueno, and Sakuma T. Experiment on adjustment of piano performance to room acoustics: Analysis of performance coded into MIDI data. In *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2013*, Toronto, Canada, 2013.
- [5] Z. Schärer and S. Weinzerl. Room acoustics viewed from the stage: Solo performers' adjustments to the acoustican environment. In *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2013*, Toronto, Canada, 2011.
- [6] Z. Schärer and S. Weinzierl. The influence of room acoustics on solo music performance: An empirical case study. *Acta Acustica united with Acustica*, 99:433–441, 2013.
- [7] K. Ueno, K. Kato, and K. Kawai. Effect of room acoustics on musicians' performance. part i: Experimental investigation with a conceptual model. *Acta Acustica united with Acustica*, 96:505–515, 2010.
- [8] K. Kato, K. Ueno, and K. Kawai. Effect of room acoustics on musicians' performance. part ii: Audio analysis of the variations in performed sound signals. *Acta Acustica united with Acustica*, 101:743–759, 2015.
- [9] W. J. Cavanaugh, G. C. Tocci, and J.A. Wilkes. *Architectural Acoustics: Principles and Practice*. Wiley, 2004.
- [10] M. Kob, M. Kieslich, S. Antonin, D. Grigoriev, and G. Weinberger. Realisation of an antiphonal division of a concert organ using wfs. In *Proceedings of ICSA 2011*, Detmold, Germany, 2011.

# Körperorientiertes Musikhören und Bewegungslernen

Viktoria von Kirschbaum<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Geigenschule für Erwachsene, 22303 Hamburg, E-Mail: [Viktoria@von-Kirschbaum.de](mailto:Viktoria@von-Kirschbaum.de)

## Einleitung

Wie können wir unseren Körper beim Lernen und Hören von Musik einsetzen? Wie können wir durch körperliche Bewegung das Musiklernen unterstützen? Zwei Ansätze, die ich in meiner Praxis verwende, möchte ich nachfolgend vorstellen.

Einerseits kann man die Musik als eine geordnete Bewegung der Töne beschreiben. Als Hörer können wir Musik hören, sie aber nicht sehen oder anfassen. Sie berührt uns in unserem tiefsten Inneren. Wir haben ein Bedürfnis sie zu hören und zu genießen. Das körperorientierte Musikhören befasst sich mit der Möglichkeit, durch die Bewegung unserer Hände die Musik zu ertasten und sie begreifbarer zu machen. Darüber hinaus widmet sich der Ansatz auch der Frage, wie wir die Musik anders verstehen können, wenn wir sie nicht nur mit den Ohren wahrnehmen, sondern auch mit der Bewegung unserer eigenen Hände?

Auf der anderen Seite kann die instrumentale Musik selbst nur durch Bewegung des menschlichen Körpers entstehen. Bewegen sich die Bogenhand und die Finger nicht, erklingt auch keine Geigenmusik. Als Geigenspieler, besonders als erwachsene Anfänger, lernen wir körperorientiert wenn wir unseren Lernprozess auf Bewegungsmustern aufbauen, die uns vertraut sind, und die wir mit Leichtigkeit im Alltag beherrschen.

## Das körperliche Musikhören

Nehmen wir als Beispiel das bekannte Stück „Eine kleine Nachtmusik“ von Mozart.

Das erste Motiv, was wir hören, ist in die Höhe gerichtet, das zweite Motiv ist in die Tiefe gerichtet. Summen wir diese Motive und nutzen unsere Hände um die Bewegung der Töne nach oben und nach unten mit unseren Gesten zu unterstützen, entsteht ein Gefühl in uns für diese zwei verschiedenen Motive. Die Bewegungen unserer Hände geben uns einen Anknüpfungspunkt für eine empfindungsmäßige Interpretation des Gehörten. Wir können spüren und uns fragen, was es bedeutet, dass die Musik mit diesen zwei Motiven beginnt, ist es vielleicht ein Dialog zwischen zwei Charakteren? Oder eher ein Streit? Wie fühlt es sich an, wenn unsere Hände nach den beiden Motiven in einer offenen Geste in der Luft sind? Ist es eine Eröffnung eines Handlungsräumes? Beim weiteren Zuhören stellen wir fest, dass das dritte Motiv einen ganz anderen Charakter hat. Unsere Hände haben eine eher kreisende Bewegung mit einer unbestimmten Richtung. Das fühlt sich wieder anders an. Und um diesen Unterschied noch deutlicher zu spüren nehmen wir beide Hände. So setzt sich dieses Ertasten der Musik mit unseren Händen fort, bis die Struktur des ganzen Satzes für uns völlig neu wahrnehmbar wird. Wir haben uns die Struktur und den Sinn der Motive ertastet. Wir merken wie die Wiederholungen dem im ersten Eindruck ungeordneten Fluss der Töne eine Form geben.

Die Musik berührt uns, ob wir die Hände dazu nutzen oder nicht. Aber werden wir sie ohne unseren Körper entsprechend tief erleben können um sie auch zu verstehen? Würden wir ohne unsere Hände so intensiv fühlen können, um dem Gefühlten einen Sinn zu geben?

Meine Erfahrung zeigt mir, dass wir das Gehörte mit unseren Händen intensivieren, es erlebbar machen können. Der Inhalt dieser Motive würde uns entgehen, wenn wir sie nicht mit den Händen ertasten und den Sinn ertasten würden. So wird Musik für uns greifbar und dadurch verständlicher. Mozarts „Kleine Nachtmusik“ wird zu einem völlig neuen Erlebnis. Ob Mozart sie vielleicht sogar genau so geschrieben hat, als Erlebnis für unseren ganzen Körper?

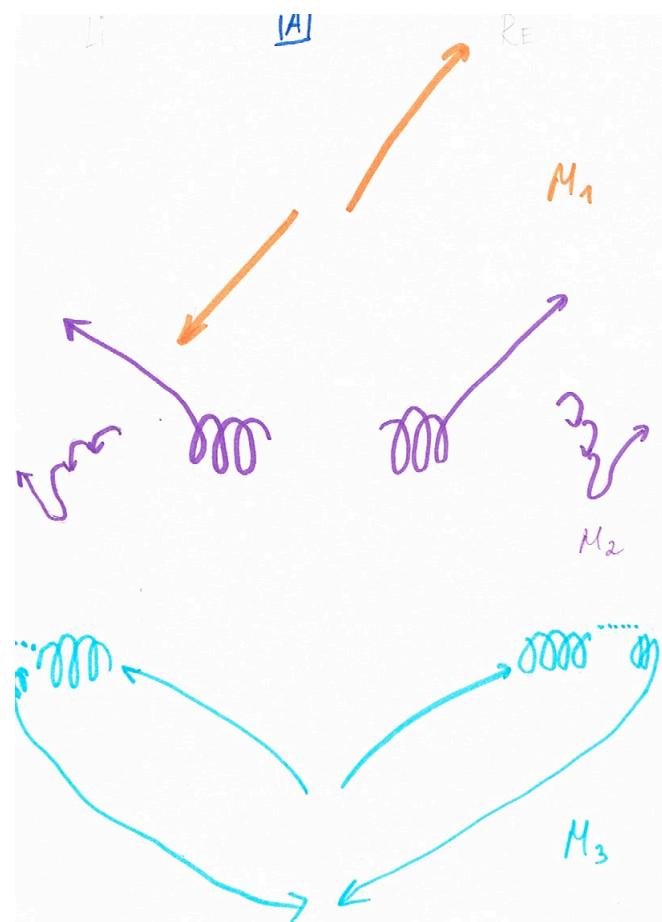


Abbildung 1: Dies ist eine schematische Darstellung der ersten drei Motive „Der kleinen Nachtmusik“ von Mozart.

## Das körperorientierte Bewegungslernen

Nehmen wir zum Beispiel ein kleines Matchboxauto und lassen es auf dem Tisch gerade hin- und herfahren. Diese Bewegung gelingt uns ohne Nachzudenken automatisch, nicht wahr? Das Matchboxauto ist für sich genommen unwichtig. Es dient nur dazu, die bereits im

Gehirn vorhandenen Bewegungsmuster zu aktivieren. Wir verwenden automatisch die Muster aus unserem Bewegungsrepertoire. Beobachten wir sie, dann stellen wir fest, dass wir exakt die genaue Haltung und die richtigen Bewegungen aller Gelenke haben, so wie wir sie brauchen um bequem das Auto auf dem Tisch zu fahren. Wir verstehen es automatisch das Auto zu steuern, und wir lassen auch die Schwerkraft für uns mitarbeiten. Wir kommen nicht auf die Idee das Auto über dem Tisch schweben zu lassen und wir drücken es auch nicht extra in den Tisch hinein. Das alles ist für uns so selbstverständlich, dass wir die Gesetzmäßigkeiten, die es uns ermöglichen diese Bewegung mit solcher Leichtigkeit auszuführen, gar nicht beachten. Wir sind uns dessen nicht mehr bewusst, welche Bewegungen wir da genau aneinanderreihen.

Zum Vergleich stellen wir uns jetzt die Beschreibung einer neuen Bewegung mit dem gleichen Ziel vor: halte dein Handgelenk gerade, hebe deinen Arm auf eine definierte Höhe usw. Das ist sehr anstrengend, und das Erlernen der gleichen Bewegung auf diese Art wird zudem viele Übungsversuche in Anspruch nehmen. Etwas neu zu lernen ist mühsamer, als etwas, was wir schon können, zu verfeinern und in einem anderen Kontext zu nutzen.



**Abbildung 2:** Mit einem Matchboxauto werden vorhandene Bewegungsmuster bereits aktiviert.

Was können wir aus der Bewegung des Autos für den Bogenstricht nutzen?

- Die Schwerkraft.

So wie das Auto auf dem Tisch steht, so steht der Bogen auf der Saite. Es ist selbstverständlich für uns das Auto weder schweben zu lassen noch in den Tisch extra hineinzudrücken. Mit dem Bogen tun die Anfänger ironischerweise aber genau das. Da die Saite dadurch nicht optimal in Schwingung versetzt wird, leidet die Qualität des Tones. Die Geige gibt ihr Feedback zu dieser Bewegung, indem sie quietscht.

- Die Fläche des Tisches.

Wenn wir das Auto führen ist es selbstverständlich, dass unsere Gelenke und unser ganzer Arm genau auf die Höhe der Tischoberfläche abgestimmt sind. Das Handgelenk bewegt sich optimal, um das Auto zu lenken, um es gerade auf dem Tisch zu fahren. Würden wir nur eine kleine Veränderung im Handgelenk vornehmen, würde das Auto die Oberfläche des Tisches verlassen und abheben. Der typische Anfängerfehler ist es die Höhe beim Streichen zu verlassen. Das Feedback der Geige dazu ist ein Erklingen einer anderen Saite.

- Das gerade Fahren des Autos.

Es ist selbstverständlich, dass wir das Auto so anfassen und lenken, dass es gerade fährt. Die Anfänger machen es spontan beim Bogen anders. Nur wenn wir den Bogen 90 Grad zur Saite positionieren und parallel zum Steg streichen setzen wir die Saite optimal in Schwingung.

- Die Geschwindigkeit und die Intensität.

Je schneller das Auto fährt, desto intensiver wird unsere Berührung des Autos sein um es gerade zu halten. Darüber machen wir uns keine Gedanken, weil es selbstverständlich ist. Beim Bogen spielt die Geschwindigkeit auch eine große Rolle. Nur bei einer auf die Geschwindigkeit abgestimmten Intensität der Berührung des Bogens klingt die Geige schön.

Wie man sieht, haben wir aus dem Auto-Bewegungs-Muster sehr viel für die Geige mitgenommen. Wir haben kein vollkommen neues Konzept gelernt. Wir haben schon einen guten, gesunden Ton mit der Geige erzeugt. Und das gelingt in der allerersten Geigenstunde.

Das Erlernen der Bogenhaltung, und welche alltäglichen Bewegungsmuster wir dafür brauchen, wäre der nächste Schritt. Dies würde jedoch den Rahmen des Vortrages sprengen. Lassen Sie uns einen Schritt weiter zur linken Hand gehen.

Die Bewegung der linken Hand mit einem Taschenspiegel ist ein anderes einfaches Beispiel eines Bewegungsmusters, das - genauso wie das Fahren des Autos - Alle beherrschen. Auch dieses Muster können wir für das Geige Lernen nutzen. Stellen wir uns bitte die folgende Anweisung vor: hebe die Hand in eine definierte Höhe, öffne sie bis zu einem gewissen Grad, drehe sie zur Geige und behalte das Handgelenk dabei gerade, usw.. Das klingt schwer, oder? Jetzt zum Vergleich die andere Anweisung: nimm diesen schönen Taschenspiegel und schaue dich bitte darin an. Mache es noch ein Mal. Aber diesmal nimm wahr und beobachte dabei, was deine Hand und der Arm automatisch tun. Lass uns das analysieren.

Jetzt geht es darum den Weg des Armes mit dem Spiegel in der Hand zum Gesicht auf den Weg des Armes mit den Fingern zu den Saiten zu übertragen. Das klingt leichter als die erste Anweisung, und das ist es auch.

Fazit: Wir lernen leichter und schneller, wenn wir nichts vollkommen Neues erlernen, sondern bekannte Bewegungsmuster in einem neuen Kontext adaptieren.

## Virtual Violin

Robert Mores

*robert.mores@haw-hamburg.de*

### Summary

The purpose of the demonstration is to give the attendance an opportunity to personally investigate the quality of the existing Virtual Violin platform. This platform is the result of an extended research effort, which allows luthiers to study the sound of a violin before manufacturing. All what is necessary is a reference sound on the basis of which the luthier modifies specific resonances or details he or she intends to implement in future violin models. Given these specific modifications and the reference, the sound of a virtual violin can be auralized and real-time while the luthier performs on a silent violin.

The semi-virtual violin research platform consists of a silent generator violin and a modifiable virtual resonance body. The real-time platform is developed with particular emphasis on highly realistic sound behaviour, haptic experience, and visual properties. Thus, the platform also allows for experiments on perceived violin sound quality and musician to instrument interaction together with professional violinists. Binaural transfer functions of real violins measured at the player's hearing position serve as starting point for spectral manipulations. The virtual body can be modified in terms of the positions and amplitudes of individual resonances and resonance areas. A filtering technique is described which enables changes of the magnitude spectrum by using a system of second-order peak filters. Other components along the signal chain are a specific impulse response measurement technique, a generator violin, and an equalization process for achieving authentic and traceable sound properties.

All steps of development are well documented in existing publications. The purpose of the demonstration is interaction and feedback from expert listeners.

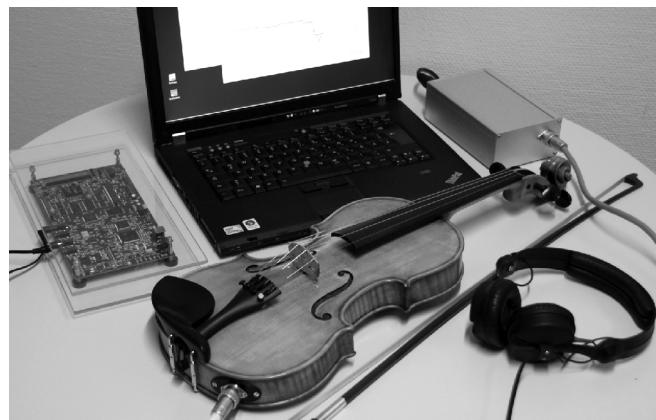


Fig. 1. Virtual violin with the silent violin for performance and the computation for real-time-auralization.

### Literatur

Smit, T., Türkheim, F. and Mores, R. "A highly accurate plucking mechanism for acoustical measurements of stringed instruments," *J. Acoust. Soc. Am.* (127:5), 2010.

Türkheim, F., Smit, T. and Mores, R. "A Semi-Virtual Violin for Investigations into Sound Quality and Musician-Instrument Interaction" 'Proc. Int. Computer Music Conf. (ICMC-10)', New York, USA, 2010.

Türkheim, F., Smit, T. and Mores, R. "String Instrument Body Modeling Using FIR Filter Design and Autoregressive Parameter Estimation" 'Proc. Conf. on Digital Audio Effects (DAFX-10)', Graz, Austria, 2010.

Türkheim, F., Smit, T. and Mores, R. "The Semi-Virtual Violin – A Perception Tool" 'Proc. 20th Int. Congress on Acoustics (ICA-10)', Sydney, Australia, 2010.

Türkheim, F., Smit, T., Hahne C. and Mores, R. "Novel Impulse Response Measurement Method for Stringed Instruments" 'Proc. 20th Int. Congress on Acoustics (ICA-10)', Sydney, Australia, 2010.