



Fachausschuss Musikalische Akustik in der DEGA

**Nuancen in der Musikalischen Akustik -
Grenzgang zwischen Fakt und Mythos**

Dezember 2014

Tagungsband zum Seminar des FAMA in der DEGA

Detmold 09.-10.11.2013

Nuancen in der musikalischen Akustik- Grenzgang zwischen Fakt und Mythos

Seminar des Fachausschusses musikalische Akustik in der DEGA

Detmold 09.-10.11.2013

Tagungsleitung: Timo Grothe und Malte Kob

Tagungsort: Hochschule für Musik Detmold,
Erich-Thienhaus-Institut

Bezug: Elektronische Version über die Internetseite der DEGA
www.dega-akustik.de/fachausschuesse/ma/dokumente

Herausgeber und Kontakt:

Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.

Voltastraße 5

13355 Berlin

dega@dega-akustik.de

<http://www.dega-akustik.de>

Dr.-Ing Timo Grothe,

Prof. Dr.-Ing Malte Kob

Hochschule für Musik Detmold/ ETI

Neustadt 22, 32756 Detmold

{grothe, kob}@hfm-detmold.de

<http://www.eti.hfm-detmold.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, 2014

ISBN: 978-3-939296-07-2

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 interessierten 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.

Für die Veranstaltung 2013 entschieden sich die Mitglieder des FAMA erstmals, die Veranstaltung am Erich-Thienhaus-Institut (ETI) der Hochschule für Musik Detmold durchzuführen. Dieser Ort hat eine gewisse Tradition in der deutschen Geschichte der Musikalischen Akustik, hatte doch schon der Institutsgründer Erich Thienhaus die Bedeutung der Dualität von künstlerischer und ingenieurwissenschaftlicher (Aus-) Bildung für Musikaufführung und -produktion erkannt als er das Berufsbild des “Tonmeisters” schuf.

Durch die langjährige Lehrtätigkeit von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Meyer bestanden enge Kontakte zur Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig, die bis 1996 einen vielbeachteten Fachbereich “Musikalische Akustik” unterhielt.

Auf Initiative und unter Federführung von Prof. Dr.-Ing. Malte Kob gibt es seit 2012 einen internationalen wissenschaftlichen Masterstudiengang “Music Acoustics” am ETI, ein Studienangebot, das sich an Bachelor des hauseigenen Tonmeisterstudiengangs ebenso wie an externe musikbegeisterte Absolventen von natur- oder ingenieurwissenschaftlichen Bachelorstudiengängen richtet.

Nach erfolgreicher Akkreditierung des Studiengangs im Sommer 2013 bot es sich an, die Mitglieder des FAMA sowie weitere aktive Forscher und Interessierte der musikalischen Akustik zu einem Seminar nach Detmold einzuladen. So sollte das Erich-Thienhaus-Institut Ort des interdisziplinären Austauschs zur Musikalischen Akustik werden.

Thema

Zum Thema der Veranstaltung, das möglichst viele Forscher und Interessierte ansprechen sollte, wurde folgendes Motto benannt:

Nuancen in der musikalischen Akustik – Grenzgang zwischen Fakt und Mythos

Alle Eingeladenen wurden gebeten, dies im Kontext ihrer Spezialisierung in der Musikalischen Akustik zu interpretieren, um in Form von Vorträgen, Workshops oder Demonstrationen zum Programm beizutragen.

Prinzipiell ist die Funktionsweise der verschiedenen Musikinstrumente ja weitläufig bekannt, doch stellt sich in der Praxis des Musikinstrumentenbaus, der Messung, der Modellierung oder des Spielens heraus, dass neben der primären Funktion eine minimale Änderung eines Parameters wesentliche Auswirkungen auf Klang und Spielbarkeit hervorrufen kann.

Das Wissen um diese Sensibilität ist unserer Ansicht nach ein besonderer Reiz der Forschungsrichtung “Musikalische Akustik” und wirft eine Vielzahl von ganz grundsätzlichen Fragen auf:

- Was ist eine “wesentliche” Änderung?
- Wie können wir sie nachweisen?
- Ist eine Kausalität zwischen Wirkung und Ursache erkennbar?
- Glauben wir dabei Messgeräten oder unserer Wahrnehmung?

oder:

- Was ist Fakt, was ist Mythos?

Aus allen Bereichen — Theorie und Praxis, Musiker und Instrumentenbauer — sind Fälle dieser kleinen Änderungen mit großer Wirkung bekannt. So sollten diese und die Methodiken zu deren Untersuchung auf dem Symposium gemeinsam diskutiert werden.

In diesem Sinne sollte das Detmolder FAMA Symposium eine Plattform zum Erfahrungsaustausch sein, Diskussionen anregen und neue Fragen aufwerfen, um so Menschen und Ideen zusammenzubringen.

Programm

Unserer Einladung folgend wurden 16 Beiträge aus verschiedenen Bereichen der musikalischen Akustik angemeldet, die wie folgt zusammengefasst das Programm ergaben:

Das Seminar begann mit drei Beiträgen zum **Hören von Nuancen**, in denen aktive Prozesse im Innenohr (J. Baumgart S.10) demonstriert wurden. Es schloss sich ein Hörversuch an, in dem die Teilnehmer ein Klavierstück, das mit verschiedenen Mikrofonen aufgenommen wurde, hören konnten (S. Waloschek und T. Grothe S.59).

In geselliger Runde klang der Abend bei Detmolder Pils in Strates Brauhaus aus.

Fortgesetzt wurde am nächsten Morgen mit einem Beitrag, der die Rolle der Mikrofonierung für Hörversuche aufzeigte (M. Schneider, S.14), bevor es zum Thema **Messung von Nuancen** mit zwei Beiträgen weiterging: Hier wurde zunächst über Erfahrungen aus dem Wettbewerb um den Deutschen Musikinstrumentenpreis zur subjektiven Qualitätseinschätzung berichtet (G. Ziegenhals, S.17), anschließend folgte ein Bericht über einen Diskriminanztest zur Detektion kleinster baulicher Veränderungen von Konzertflügeln durch Pianisten (R. Mores, S.21).

Im folgenden Teil des Seminars wurden verschiedene Aspekte von **Nuancen bei Musikinstrumenten** vorgestellt. Hier gab es jeweils zwei Beiträge zu verschiedenen Instrumentengruppen. Bei den *Saiteninstrumenten* wurde zu den Mythen des Geigenbaus (E. Zenetti, S. 25) und des Filzstechens beim Klavier (J. Fricke, S.26) berichtet; zu *Schlaginstrumenten* gab es einen Beitrag über die Mechanik von Stimmgabel (R. Schmidt und J. Gier S.31) und Steelpan (M. Steppat, S. 32). Vor der Mittagspause in der Mensa der HfM Detmold gab es eine Vorführung eines selbstgebautes Stahlzungeninstrumentes, des Hank (C. Zamorano Martinez, S. 59).

Am Nachmittag wurde das Programm mit zwei Beiträgen zur *Orgel* fortgesetzt. Dabei standen konstruktive Besonderheiten der Rohrflöte (A. Gloos, J. Angster, A. Miklos S.36) und die Wandschwingung der Labialpfeife (M. Kob und W. Kausel S.40) im Vordergrund.

Bei den *Rohrblattinstrumenten* wurde über den Einfluss des Wandmaterials auf den Saxophonklang (J. Batke S.44) und über Gabelgriffe bei Fagott (T. Grothe S.46) vorgetragen. Vor der Kaffeepause gab es die Möglichkeit, alte Vintage-Röhrenverstärker im Original und als digitale Emulation zu hören (P. Zakharchuk und M. Kob S.59).

Der letzte Teil des Seminars kann unter **Verfahren zur Klanganalyse** zusammengefasst werden. Hier wurde über Möglichkeiten der Klangfarbenklassifikation (S. Siddiq, S.51) berichtet und die Eignung verschiedener Verfahren der Signalanalyse zur Beschreibung des Gesangsvibratos erprobt (M. Schmitt und M. Kob S. 53).

Das Seminar wurde beschlossen mit einer Demonstration kreativer Modifikationsmöglichkeiten von Gitarren und E-Gitarren zur Erzeugung experimenteller Sounds (Y. Landman, S.59).

Wie schon zu früheren Veranstaltungen bieten wir mit der Erstellung eines ISBN-gelisteten Tagungsbandes den Autoren die Möglichkeit einer zitierfähigen Veröffentlichung. Wir möchten den Referenten damit nicht zuletzt für ihre Bemühungen danken, die eine solche Veranstaltung erst möglich machen.

Weiterhin bedanken wir uns sehr herzlich beim Vorstand der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA) für die Herausgabe dieses Tagungsbandes (DEGA Projekt Nr. 198).

Ebenfalls an dieser Stelle möchten wir uns bei der Leitung der Hochschule für Musik Detmold sowie des Erich-Thienhaus-Instituts und beim Studentenwerk Bielefeld bedanken für die Unterstützung in der praktischen Durchführung des Seminars. Vielen Dank auch an Manuel Grunden, Nadja Reike und Cristina Zamorano Martinez für die Webredaktion bzw. die tatkräftige Unterstützung bei der Bewirtung der Seminarteilnehmer.

Detmold, im Dezember 2014

Timo Grothe

Malte Kob



Teilnehmer des FAMA Seminars am 09.11.2013 in Detmold

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Aktive Vorgänge im Innenohr beim Hören im musikalischen Kontext | |
| Johannes Baumgart | 10 |
| Das Mikrophon als Messinstrument – zur Problematik von Hörversuchen | |
| Martin Schneider | 14 |
| Zu Übereinstimmung von Musikerurteilen und dem Einfluss der Objektreihenfolge bei Instrumententests (Spieltest) | |
| Gunter Ziegenhals | 17 |
| Diskriminanztest mit Lernphase und ohne semantische Notation für den Nachweis kleinster baulicher Veränderungen an Musikinstrumenten | |
| Robert Mores | 21 |
| Nuancen – Mythos und Fakt: Violine | |
| Esther Zenetti | 25 |
| Der Mythos vom Filzstechen bei Flügel und Klavier | |
| Jobst Fricke | 26 |
| Zur mechanischen Stimmgabel | |
| Rolf Schmidt und Joachim Gier | 31 |
| Auswirkungen nichtlinearer Kopplungen auf die anschlagabhängige Klangfarbe der karibischen Steel pan | |
| Michael Steppat | 32 |

Der Einfluss unterschiedlicher Deckelkonstruktionen auf den Rohrflötenklang

Andreas Gloos, Judit Angster und Andras Miklos 36

Klangliche Besonderheiten der Wandschwingungen von Orgelpfeifen

Malte Kob und Wilfried Kausel 40

Signalverarbeitungsverfahren zur Beurteilung von Musikinstrumentenklingen am Beispiel eines Sopransaxophons

Johann-Markus Batke 44

Klangänderung durch Gabelgriffe beim Fagott

Timo Grothe 46

Timbre Space revisited - Was ist Fakt, was ist Mythos?

Saleh Siddiq 51

Kann das Vibrato der Gesangsstimme durch psychoakustische Parameter beschrieben werden?

Maximilian Schmitt und Malte Kob 53

Workshops***Hörversuch zur Klangfarbe von Mikrofonen***

Simon Waloschek und Timo Grothe 59

Tuning a hank-drum

Cristina Zamorano Martinez 59

Comparison of tube amplified sound and tube amplification emulation of the same model

Polina Zakharchuk und Malte Kob 59

Guitar preparation techniques

Yuri Landman 59

Aktive Vorgänge im Innenohr beim Hören im musikalischen Kontext

Johannes Baumgart¹

¹ *Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme, Nöthnitzer Str. 38, 01187 Dresden*

Email: baumgart@pks.mpg.de

Einleitung

Wenn ein Musikinstrument einen Ton spielt, nehmen wir diesen mit unseren Ohren wahr. Sehr empfindlich sind wir bei Tonhöhenunterschieden, während die Lautstärke nicht so differenziert wahrgenommen wird. Damit wir auch bei kleinsten Schwingungen der Luft hören können, bedarf es aktiver Unterstützung. Diese aktive Verstärkung impliziert, dass im Innenohr Energie für die mechanische Bewegung bereitgestellt wird.

Im Innenohr findet auch die Umsetzung der mechanischen Bewegung in ein elektrisches Signal in den sogenannten Haarbündeln statt. Hier spielen aktive Prozesse eine Rolle, welche sich in Form von Kombinationstönen zeigen. Im Folgenden werden Hörbeispiele diskutiert, die die bekannten Effekte veranschaulichen. Die Tonbeispiele entstanden im Rahmen einer Einführung eines allgemeinen Publikums in die Hörforschung am Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme in Dresden.

Sensitivität des Ohres

Unser Gehör ist sehr empfindlich. Eine einfache Abschätzung verdeutlicht dies: Die Wahrnehmungsschwelle entspricht einem Schalldruckpegel von etwa 0 Dezibel bei einer Frequenz von etwa einem Kilohertz. Mithilfe der Impedanz der Luft ergibt sich hiermit eine Bewegungsamplitude von etwa 10 Pikometern – dies ist kleiner als der Durchmesser des Wasserstoffatoms. Diese hohe Sensitivität ermöglicht uns, das Einatmen eines Musikers zu hören, bevor er beginnt ein Stück zu spielen. Doch dies allein reicht noch nicht aus, um mit unserem Ohr Musik hören zu können. Es ist auch entscheidend, verschiedene Töne¹ differenzieren zu können.

Unser Ohr nimmt kleinste Veränderungen in den Tonhöhen wahr. Die Grundfrequenz ist hier der maßgebliche Faktor. Ein klassisches Experiment um dies zu quantifizieren ist, die Tonhöhe sinusförmig über die Zeit zu modellieren und die Modulationsamplitude hierbei so einzustellen, dass die Schwankung gerade wahrnehmbar ist [1]. Die sich ergebende Wahrnehmungsschwelle entspricht in etwa der Abweichung der eingestimmten großen Terz von der gleichstufig gestimmten bei gleichem Grundton.

Ein für die Musik relevantes Maß für ein Frequenzverhältnis ist das Cent: $D = 1200 \log_2(f_2/f_1)$. Das Cent ist ein logarithmisches Maß wobei 100 Cent einem Halbton und 1200 Cent einer Oktave bei gleichstufiger Stimmung entsprechen. Die reine Dur-Terz weicht von der gleichstufigen Terz um $D = -14$ Cent ab. Die reine Quinte entspricht nahezu der

gleichstufigen Quinte und weicht nur um $D = +2$ Cent ab. Ein Ton ist jedoch nicht allein durch die Frequenz bestimmt und so ist die Amplitude ein weiterer Parameter der moduliert werden kann. Da wir wenig empfindlich bezüglich der Lautheit von Tönen sind, wird in der Musik die Dynamik nur in wenigen grob abgestuften Größen beschrieben. Bei einer Amplitudenmodulation sind wir auch dementsprechend weniger empfindlich.

Eine geeignete Beschreibung von einem System welches sensitiv ist, selektiv in Bezug auf die Frequenz und wenig empfindlich gegenüber Veränderungen der Amplitude ist ein nichtlineares System nahe einer Hopf-Bifurkation [2]. Eine physikalische Beschreibung eines solchen Systems ist mit einer komplexen Variablen z in folgender Form möglich

$$\frac{dz}{dt} = \mu z + i\omega_0 z - B|z|^2 z, \quad (1)$$

hierbei ist μ ein Dämpfungs- ($\mu < 0$) oder Verstärkungsfaktor ($\mu > 0$), ω_0 die charakteristische Eigenfrequenz und B die Stärke der Nichtlinearität. Der nichtlineare Term stellt sicher, dass die Amplituden nur zu einem bestimmten Wert anwachsen. Zur spektralen Auflösung werden eine Vielzahl von derartigen Oszillatoren benötigt, um das Spektrum des Hörbereiches abzubilden. Eine interessante Beobachtung ist, dass ein solches System auch spontan ohne äußeren Stimulus oszilliert; dies äußert sich beim gesunden Ohr durch spontane otoakustische Emissionen [3]. Eine weitere Konsequenz sind Kombinationstöne, die sich durch die Nichtlinearitäten dieses Verstärkungsmechanismus ergeben [4].

Kombinationstöne

Die Kombinationstöne sind in der Musik schon lange bekannt und entstehen beim gleichzeitigen Spielen von zwei verschiedenen Tönen. Erste Beschreibungen des Phänomens gab es laut Fricke [5, 6] bereits im 18. Jahrhundert durch Georg Andreas Sorge [7, 8] und Tartini [9].

Die Frequenz des Kombinationstons ergibt sich als Summen und Differenzen der ganzzahligen vielfachen der beiden Grundfrequenzen: $f_{KT} = n_1 f_1 \pm n_2 f_2$. Am prominentesten sind Kombinationstöne für kleine Zahlen n_1 und n_2 die keine Obertöne der Primärtöne sind ($n_i \neq 0$).

Ein gut hörbarer Differenzton ist $f_{KT} = 2f_1 - f_2$. Dieser ist besonders gut hörbar, wenn die beiden Frequenzen nahe beieinander liegen $f_2/f_1 \approx 1.1$ und die Frequenz im Bereich der höchsten Empfindlichkeit unseres Ohres bei wenigen Kilohertz liegt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich in diesem Fall der Differenzton im Innenohr nahe der Primärtöne befindet. So oszilliert der Teil im Innenohr mit den Primärtönen in einer nichtlinearen Weise und erregt den nahe

¹Ein Ton setzt sich aus seinem sinusförmigen Grundton und dazugehörigen Obertönen zusammen. Bei dem reinen Sinuston verschwinden die Obertöne.

benachbarten Teil ohne große Verluste an, welcher sensitiv auf die Frequenz des Kombinationstons ist.

Ein bekanntes und gut hörbares Tonbeispiel hierfür ist, einen Ton mit konstanter Frequenz zu spielen und gleichzeitig einen zweiten mit leicht ansteigender Frequenz. Das Ohr nimmt nun den Differenzton wahr, welcher im Laufe der Zeit tiefer wird. Dies ist keine akustische Täuschung, wie sie zum Beispiel von der Shepard-Skala [10] bekannt ist.

Auch mit kurzen Primärtönen, die zufällig in einem vorgegebenen Frequenzbereich liegen, lassen sich Kombinationstöne erzeugen. Für den Fall dass die Primärtöne keiner klar erkennbaren Melodie folgen, kann der zweite Primärtönen dennoch so gewählt sein, dass sich wiederum eine sinnvolle Tonfolge ergibt². Die Phase ändert sich zufällig von Primärtönen zu Primärtönen, wodurch es schwerer fällt die Kombinationstöne zu hören [6].

Tonbeispiele

Zur Veranschaulichung sind im folgenden Tonbeispiele zu den oben genannten Themen vorgestellt. Die Tondateien wurden mit Matlab synthetisiert und sind im Wave-Format mit einer Auflösung von 16 bit und einer Abtastrate von 44,1 kHz gespeichert. Die Amplitude aller Tondateien sind auf ähnliche Lautheit eingestellt. Die Dateien stehen unter:

<http://www.dega-akustik.de/fachausschuesse/ma/dokumente/tonbeispiele-baumgart.zip>
zur Verfügung.

Ton aus Einzelimpulsen

Es werden Dirac-Impulse gespielt (Tondatei: 1-1_dirac_for.wav). Der zeitliche Abstand ist zu Beginn eine Sekunde. In jeder Sekunde halbiert sich der Abstand zwischen den Impulsen. So ergeben sich Töne mit folgenden aufsteigenden Frequenzen in Hertz: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192 und 16384. Zeitlich umgekehrt abgespielt ergibt sich die entsprechend abfallende Tonfolge (Tondatei: 1-2_dirac_rev.wav).

Hiermit wird deutlich, wie aus Rhythmus ein Ton wird und wie groß der Hörbereich ist. Darüber hinaus wird bei der zeitlich umgekehrten Reihenfolge deutlich, dass ein Ton aus einzelnen Impulsen reich an Obertönen ist. Es scheint, als ob immer noch ein weiterer tieferer Ton dazu gespielt wird und der um eine Oktave höhere weiterhin gespielt wird.

Frequenzmodulation

Ein Sinuston mit einer Grundfrequenz $f_0 = 443$ Hz (Kammerton A) ist sinusförmig über der Zeit in der Frequenz moduliert. Die Modulationsfrequenz beträgt 4 Hz und die Modulationsamplitude der Frequenz variiert wie in der Tabelle 1 angegeben. Für die Erzeugung der Tondatei wurde zunächst von Sample zu Sample die Phasenänderung bestimmt und aus dem Sinus des aufsummierten Phasenwinkels das Zeitsignal berechnet.

Tabelle 1: Übersicht über Modulationsamplituden der Frequenz für die beigefügten Tondateien.

| $\Delta f / f_0$ | D (Cent) | Tondatei |
|------------------|------------|----------------------------|
| 0 | 0 | 2-1_sin_df_permil_0000.wav |
| 0,001 | 1,7 | 2-2_sin_df_permil_0001.wav |
| 0,003 | 5,2 | 2-3_sin_df_permil_0003.wav |
| 0,01 | 17,2 | 2-4_sin_df_permil_0010.wav |
| 0,03 | 51,2 | 2-5_sin_df_permil_0030.wav |
| 0,1 | 165,0 | 2-6_sin_df_permil_0100.wav |

Amplitudenmodulation

Ein Sinuston mit einer Grundfrequenz $f_0 = 443$ Hz (Kammerton A) ist sinusförmig über der Zeit in der Amplitude moduliert. Die Modulationsfrequenz beträgt 4 Hz und die Amplitude der Modulation in Tabelle 2 gibt an, um welchen maximalen Betrag das Signal reduziert wird. So entspricht die Modulationsamplitude von 1 einem Zeitsignal, bei welchem das Signal zeitweise komplett verschwindet. Für die Erzeugung der Tondatei wurde der Sinuston mit der zeitlich veränderlichen Amplitude gewichtet.

Tabelle 2: Übersicht über Modulationsamplituden für die beigefügten Tondateien.

| relative Amplitude | Tondatei |
|--------------------|----------------------------|
| 0 | 3-1_sin_da_percent_000.wav |
| 0,01 | 3-1_sin_da_percent_001.wav |
| 0,03 | 3-1_sin_da_percent_003.wav |
| 0,1 | 3-1_sin_da_percent_010.wav |
| 0,3 | 3-1_sin_da_percent_030.wav |
| 1 | 3-1_sin_da_percent_100.wav |

Dreiklang

Es erklingt ein A-Dur Dreiklang (A-Cis-E, $f_0 = 443$ Hz) bestehend aus drei reinen Sinustönen. Die einzelnen Töne erklingen in der Reihenfolge f_0 , f_1 und f_2 . Sie sind um 0,5 Sekunden zeitversetzt und werden allmählich ausgeblendet. So bleiben nach einer Sekunde alle drei Töne nebeneinander stehen. Die Frequenzverhältnisse und zugehörigen Tondateien sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Im Nachklang ist eine Schwebung zu hören, die bei der reinen Stimmung verschwindet.

Tabelle 3: Übersicht über die Frequenzen eines A-Dur-Dreiklanges in gleichstufiger und reiner Stimmung. Die Terz (Cis) hat die Frequenz f_1 und die Quinte (E) die Frequenz f_2 . Die Frequenz des Grundtons ist der Kammerton A ($f_0 = 443$ Hz).

| Frequenz | D (Cent) | Tondatei |
|----------------------|------------|--------------------|
| $f_1 = 2^{4/12} f_0$ | 0 | 4-1_drei_equal.wav |
| $f_2 = 2^{7/12} f_0$ | 0 | |
| $f_1 = 5/4 f_0$ | -14 | 4-1_drei_harm.wav |
| $f_2 = 3/2 f_0$ | +2 | |

Differenztöne

In diesem Beispiel wird ein Ton mit konstanter Frequenz ($f_1 = 886$ Hz) und ein Ton, der mit der Zeit linear in der

²Die Anregung hierzu stammt von Pascal Martin, Paris.

Frequenz ansteigt $f_2(t) = (1.1 + 0.2t/t_{\text{end}}) f_1$, verwendet. Werden die Töne f_1 (Tondatei: 5-1_mo_f1.wav) und f_2 (Tondatei: 5-2_mo_f2.wav) einzeln abgespielt, sind die einzelnen Sinustöne zu hören. Werden beide Töne zeitgleich abgespielt (Tondatei: 5-3_mo_f1f2.wav), sind neben den Primärtönen auch Kombinationstöne zu hören. Besonders prägnant ist hier der Kombinationston $f_{KT} = 2f_1 - f_2$. Dieser fällt über die Zeit ab $f_{KT} = (0.9 - 0.2t/t_{\text{end}}) f_1$. Diese Tonbeispiele liegen auch in einer Stereovariante vor, bei welcher f_1 auf einem Kanal abgespielt wird und f_2 auf dem Anderen (mo im Dateinamen ersetzt durch st). Dadurch lassen sich nichtlineare Überlagerungen im Wiedergabesystem abschließen.

Wie oben beschrieben, lassen sich auch mit kurzen Primärtönen, die zufällig in einem vorgegebenen Frequenzbereich liegen, Kombinationstöne erzeugen. In diesem Beispiel folgt der zweite Primärton dem Bildungsgesetz $f_2 = 2f_1 - f_0$, hier entspricht f_0 der zeitlich veränderliche Frequenz der durch den Differenzton erzeugten Melodie.

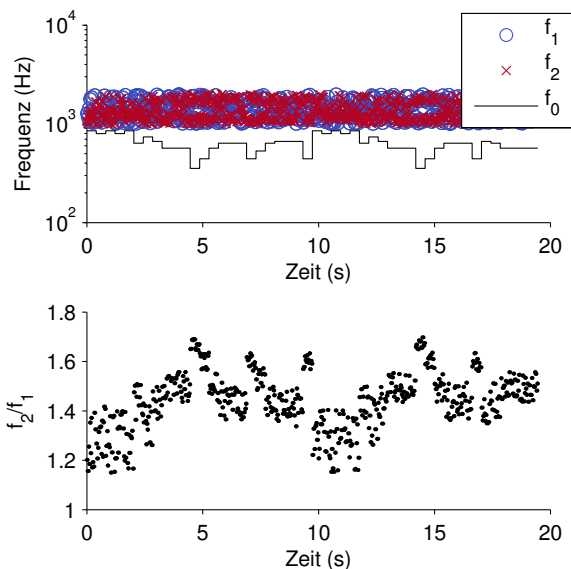


Abbildung 1: Melodie von *Für Elise* gespielt mit Kombinationstönen der Form $f_0 = 2f_1 - f_2$. Im oberen Teil sind die verwendeten Frequenzen der Primärtöne (f_1 , f_2) und die dazugehörige Frequenz der Melodie f_0 dargestellt. Im unteren Teil ist das Frequenzverhältnis der beiden Primärtöne dargestellt.

Nach diesem Algorithmus wurde die Melodie von *Für Elise* (Ludwig van Beethoven, a-Moll, WoO 59) gespielt durch Kombinationstönen in der Form $f_0 = 2f_1 - f_2$ erzeugt. Die Primärtöne liegen zwischen 1 und 2 kHz und haben eine Dauer von 0,02 bis 0,05 s. Die Frequenzen der Melodie liegen recht nahe der Primärtöne. So ist beim ersten Hören die Melodie nur schwer zu erkennen. Hier hilft es, mit hoher Lautstärke zu hören oder den Mix mit der Melodie (6-4_mo_elise_2f1-f2.wav). Ist dem Hörer klar, auf was er fokussieren muss, reicht auch eine geringere Lautstärke, da der Differenzton $2f_1 - f_2$ auch bei geringen Amplituden gut hörbar ist. In Abbildung 1 sind die Frequenzen dargestellt und eine Übersicht über die dazugehörigen Tondateien findet sich in Tabelle 4.

Tabelle 4: Übersicht über die dargebotenen Frequenzen in den beigefügten Tondateien für die Melodie von *Für Elise* gespielt mit Kombinationstönen der Form $f_0 = 2f_1 - f_2$. Alle liegen auch in einer Stereovariante vor (mo im Dateinamen ersetzt durch st).

| Frequenz | Tondatei |
|-----------------------------|-------------------------|
| f_1 | 6-1_mo_elise_2f1-f2.wav |
| f_2 | 6-2_mo_elise_2f1-f2.wav |
| $f_1 + f_2$ | 6-3_mo_elise_2f1-f2.wav |
| $0,1 f_0 + 0,9 (f_1 + f_2)$ | 6-4_mo_elise_2f1-f2.wav |

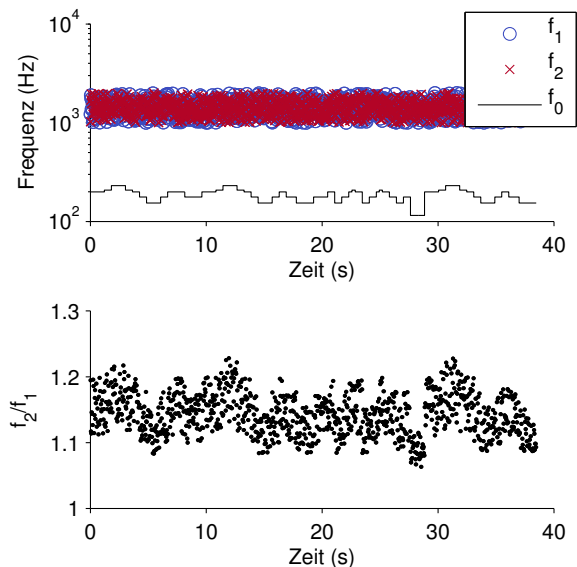


Abbildung 2: Melodie von *Ode an die Freude* gespielt mit Kombinationstönen der Form $f_0 = f_2 - f_1$. Im oberen Teil sind die verwendeten Frequenzen der Primärtöne (f_1 , f_2) und die dazugehörige Frequenz der Melodie f_0 dargestellt. Im unteren Teil ist das Frequenzverhältnis der beiden Primärtöne dargestellt.

Auch der Differenzton $f_0 = f_2 - f_1$ ist gut hörbar. Es fällt etwas leichter diesen zu hören, da die Melodie klar von den Primärtönen entfernt ist. Jedoch ist der Effekt der Nichtlinearität stark von der Amplitude abhängig und so fällt es schwerer diesen bei geringen Lautstärken zu hören. Als Beispiel ist anbei die Melodie von *Ode an die Freude* (Ludwig van Beethoven, d-Moll, Op. 125). Die Parameter sind die gleichen wie bei dem vorangegangenen Beispiel von *Für Elise*. Das Bildungsgesetz für den zweiten Primärton lautet nun jedoch $f_2 = f_1 + f_0$. In Abbildung 2 sind die Frequenzen dargestellt und eine Übersicht über die dazugehörigen Tondateien findet sich in Tabelle 5.

Unendlich steigender/fallender Ton

Die Shepard-Skala [10] ist eine akustische Täuschung, die die Illusion einer unendlich aufsteigenden oder abfallenden chromatischen Tonleiter hervorruft. Statt einer diskreten Tonleiter ist es auch möglich, kontinuierlich ein Glissando zu spielen. Diese Illusion entsteht dadurch, dass ein Sinuston mit vielen Obertönen verwendet wird. Die Obertöne sind hier Töne mit ganzzahligen vielfachen der Grundfrequenz. Die Amplituden des Spektrums folgen einer Einhüllenden, die unabhängig der Grundfrequenz ist und zu tiefen wie hohen Fre-

Tabelle 5: Übersicht über die dargebotenen Frequenzen in den beigefügten Tondateien für die Melodie von *Ode an die Freude* gespielt mit Kombinationstönen der Form $f_0 = f_2 - f_1$. Alle liegen auch in einer Stereovariante vor (mo im Dateinamen ersetzt durch st).

| Frequenz | Tondatei |
|-----------------------------|-------------------------|
| f_1 | 7-1_mo_freude_f2-f1.wav |
| f_2 | 7-2_mo_freude_f2-f1.wav |
| $f_1 + f_2$ | 7-3_mo_freude_f2-f1.wav |
| $0,1 f_0 + 0,9 (f_1 + f_2)$ | 7-4_mo_freude_f2-f1.wav |

quenz abfällt. In Tabelle 6 findet sich eine Übersicht über die hierzu gehörigen Tondateien.

Tabelle 6: Übersicht über die Varianten der Shepard-Skala und -Glissando der beigefügten Tondateien.

| Art | Tondatei |
|------------------------|---------------------|
| Skala, aufsteigend | 8-1_scale_inc.wav |
| Skala, absteigend | 8-2_scale_dec.wav |
| Glissando, aufsteigend | 9-1_shepard_inc.wav |
| Glissando, absteigend | 9-2_shepard_dec.wav |

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Tonbeispiele sollen Anregung sein, um sich mit den Vorgängen beim Hören im musikalischen Kontext zu befassen. Unser Ohr und unsere Hörgewohnheiten haben jedoch weit mehr zu bieten als die oben erwähnten Eigenschaften. Eine weitere wichtige Größe sind beispielsweise die Phaseninformation beim niederfrequenten Hören [11] und Imperfektionen des Metrums [12]. Die zunehmende aufs wesentliche reduzierte Beschreibung von Teilvorgängen beim Hören ermöglicht es, weitere Zusammenhänge zu erforschen und in Bezug zur Musik zu bringen.

Danksagung

Mein Dank geht an Dr. Timo Grothe für die Organisation eines spannenden Seminars und Prof. Jobst Fricke für die wertvollen Hinweise zu den Kombinationstönen. Des Weiteren danke ich Daniel Platz und Silvanus Alt für hilfreiche Kommentare zum Manuskript.

Literatur

- [1] E. Zwicker and H. Fastl. *Psychoacoustics. Facts and Models*. Springer, 1999.
- [2] A. J. Hudspeth. Making an effort to listen: mechanical amplification in the ear. *Neuron*, 59(4):530–545, Aug 2008.
- [3] Florian Fruth, Frank Jülicher, and Benjamin Lindner. An active oscillator model describes the statistics of spontaneous otoacoustic emissions. *Biophysical Journal*, 107(4):815 – 824, 2014.
- [4] Jérémie Barral and Pascal Martin. Phantom tones and suppressive masking by active nonlinear oscillation of the hair-cell bundle. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 109(21):E1344–E1351, May 2012.

- [5] Jobst Fricke. *Über subjektive Differenzöne höchster hörbarer Töne und des angrenzenden Ultraschalls im mmusikalische Hören*. Doktorarbeit, Köln, 1960.
- [6] Jobst Fricke. *Die Musik in Geschichte und Gegenwart*, Band 5, Kapitel Kombinationstöne, Seiten 482–486. Bärenreiter und Metzler, 1996.
- [7] Georg Andreas Sorge. *Anweisung zur Stimmung und Temperatur*. Hamburg, 1744.
- [8] Georg Andreas Sorge. *Vorgemach der musicalischen Composition*. Lobenstein, 1745.
- [9] Giuseppe Tartini. *Trattato di musica secondo la vera scienza dell' armonia*. Padova, Giovanni Manfrè, 1754.
- [10] Roger N. Shepard. Circularity in judgments of relative pitch. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 36(12):2346–2353, 1964.
- [11] Tobias Reichenbach and A. J. Hudspeth. Discrimination of low-frequency tones employs temporal fine structure. *PLoS ONE*, 7(9):e45579, 09 2012.
- [12] Holger Hennig, Ragnar Fleischmann, Anneke Fredebohm, York Hagmayer, Jan Nagler, Annette Witt, Fabian J. Theis, and Theo Geisel. The nature and perception of fluctuations in human musical rhythms. *PLoS One*, 6(10):e26457, 2011.

Das Mikrophon als Messinstrument - Zur Problematik von Hörversuchen

Martin Schneider¹

¹ Georg Neumann GmbH, 13403 Berlin, E-Mail: martin.schneider@neumann.com

Kurzfassung

Zur Durchführung von Hörversuchen und zeitlich ausgedehnten Untersuchungen an Musikinstrumenten wird die Aufnahme und Speicherung der erzeugten Signale mittels Mikrophonen benötigt. Hierzu sollten Kondensatormikrophone mit hohen Qualitätsansprüchen verwendet werden. Von den verfügbaren Typen sind nicht alle gleichermaßen für diese Aufgabe geeignet, da sie sich z.B. in Bezug auf Frequenzgang, Richtcharakteristik, Entfernungsabhängigkeit (Nahbesprechungseffekt) und Dynamik unterscheiden. Die Vor- und Nachteile diverser Typen werden erläutert und abgewogen.

Der umgekehrte Fall, die klangliche Beurteilung von Mikrophonen mittels Aufnahmen von Stimmen oder Instrumenten, stellt eine vergleichbare Problematik dar: Eine Vielzahl von aufnahmetechnischen Parametern kann bei der Aufnahme weit größere Unterschiede hervorrufen als die teils sehr geringen Unterschiede zwischen Mikrophontypen. Allein schon die notwendige exakte Reproduzierbarkeit des Signals reduziert die geeigneten Quellen auf eine geringe Auswahl. Über Erfahrungen aus Mikrophonvergleichen und betreuten Diplomarbeiten wird berichtet.

Signalkette Messmikrophone

Bei Hörversuchen und Messungen umfasst eine typische Signalkette des Akustikers folgende Punkte: Signalquelle – Abstrahlung – Raumakustik – Rezeption I (durch Hörer/VP, Mikrophon oder messtechnische Auswertung) – Aufnahme – Wiedergabe – Rezeption II. Beim Tonmeister wird der Punkt Aufnahme noch durch beliebig viele mögliche Bearbeitungsschritte ergänzt. Die prinzipielle Schwierigkeit liegt häufig darin, kontrolliert nur einen oder wenige Parameter zu verändern, um verlässliche Ergebnisse zu erhalten. Diese Vorgehensweise steht im Kontrast zum Großteil der in Musikermagazinen oder Webforen diskutierten „Hörvergleiche“, bei denen eine beliebige Anzahl Parameter gleichzeitig variiert werden. Dort trifft man auch auf Aussagen wie: „Ich habe vor Jahren das Instrument / Mikrophon XYZ verwendet / gehört, und das klang ganz anders (natürlich: besser) als dieses hier“. Das Interesse des Mikrophonherstellers wie auch des Instrumentenherstellers und -prüfers liegt aber darin, eine verlässliche Beurteilung der Variation einzelner Parameter zu erhalten.

Mess-, Studio- und Aufnahmемikrophone

Für Luftschallmessungen werden meist Messmikrophone in NF-Kondensatorschaltung verwendet. Mit ihrer weitgehend kugelförmigen Richtcharakteristik und recht großem Dynamikumfang sind sie für viele Anwendungen geeignet. Gelegentlich kommen Spezialtypen wie Intensitätsmesser (mit Druck- und Schnellmessung), Sondenmikrophone oder optische Messaufnehmer zum Einsatz. Dem natürlichen Hören kommt die Binauraltechnik am Nächsten. Häufig

findet die Rezeption von Musik allerdings über Aufnahmen statt, sodass die Verwendung typischer Aufnahmемikrophone ein gewohnteres Klangbild ergeben als Messmikrophone. In der Studioteknik findet man bevorzugt gerichtete Druckgradientenempfänger erster Ordnung, mit (auch variablen) Richtcharakteristiken zwischen Kugel, Niere und Acht [1]. Von diesen erscheint die Acht, mit einer generell sehr frequenzunabhängigen Richtwirkung, aber auch die Nierencharakteristik als geeignet zur lokalen Untersuchung akustischer Quellen. Die häufigsten Charakteristiken bei Aufnahmen sind Nieren sowie Super-/Hypernieren.

Mikrophonparameter

Bei der klanglichen Beurteilung von Mikrophonen gilt dasselbe wie bei Instrumenten: eine umfassende Kenntnis der akustischen und technischen Eigenschaften ist notwendig und hilfreich zur detaillierten Beurteilung. Für Mikrophone sind dafür in IEC 60268-4 allein 48 Parameter angegeben [2]. Von diesen sind insbesondere die akustischen Parameter, die Nichtlinearitäten sowie ggf. die umwelttechnischen Parameter zu berücksichtigen.

Frequenzgang und Richtcharakteristik

In Abb. 1. sind exemplarisch die Freifeld-Frequenzgänge von zwei hochwertigen Kleinmembran-Studiomikrophonen in 10°-Schritten abgebildet. Auch wenn die gemessenen Unterschiede nicht groß erscheinen, werden den Mikrophonen unterschiedliche „Klänge“ nachgesagt.

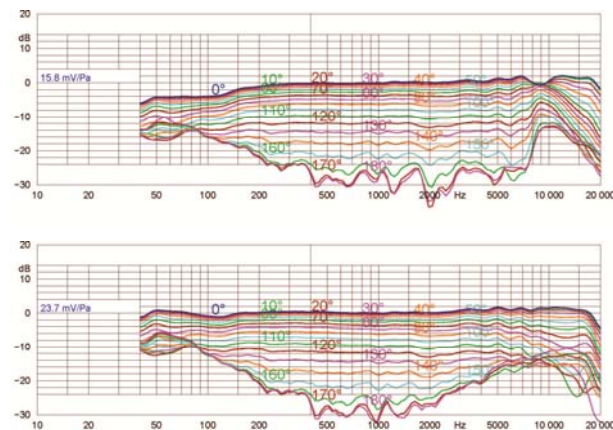


Abbildung 1: Freifeld-Frequenzgänge zweier Studiomikrophone mit Richtcharakteristik „Niere“, Messabstand 1,24m

Essentiell ist bei Einsatz und Messung von Druckgradientenempfängern die Kenntnis der Wellenform und des Messabstands. In Abb. 2 sind exemplarisch Freifeldmessungen eines Nierenmikrophones dargestellt [1]:

- Nahfeld (0,05m), mit künstlichem Mund nach ITU-T P.51
- „Mittelfeld“ (1,24m), mit koaxialem Lautsprecher
- Fernfeld (5m), mit 2-Wege-Lautsprecher

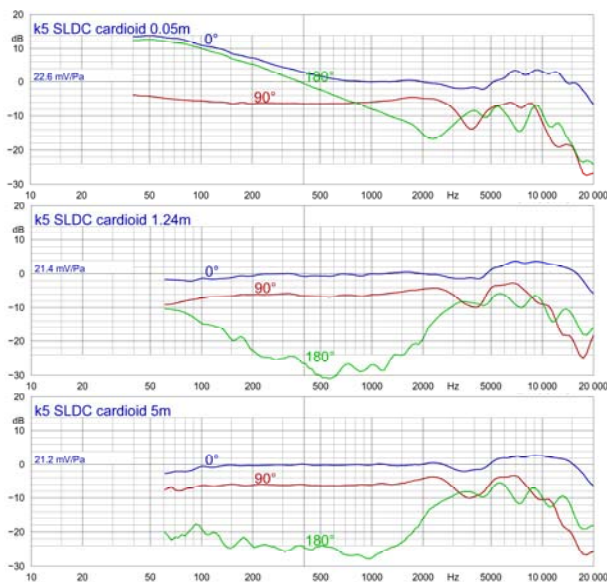


Abbildung 2: Freifeld-Frequenzgänge eines Mikrophons mit Richtcharakteristik „Niere“, Messung im (von oben nach unten) Nah-, „Mittel-“, Fernfeld [2]

Der Anwender muss sich somit bewusst sein, ob er im angenäherten Frei- oder Diffusfeld arbeitet, sowie im Fern- oder Nahfeld der Quelle.

Dynamikumfang und Nichtlinearitäten

Mit Kondensatormikrophonen mit analoger Schaltungstechnik lässt sich ein Dynamikbereich von bis zu 130 dB abdecken [4], bei entsprechendem Nachregeln des Vorverstärkers. Dieses Nachregeln kann bei Mikrophonen mit integriertem A/D-Wandler entfallen [5].

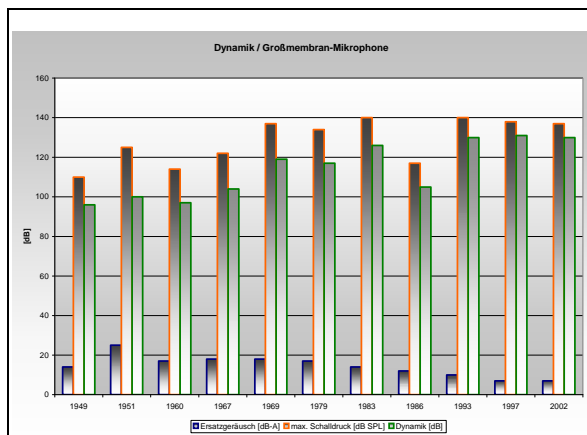


Abbildung 3: Dynamik, Ersatzgeräuschpegel und maximaler Schalldruck von Großmembranmikrophonen, 1949-2002 [4]

Zu Eigenrauschen und Dynamikumfang von Mikrophon und Aufnahmekette siehe [6]. Eine nähere Untersuchung der Mikrophonschaltungen ergab [7], dass Mikrophone hörbare Nichtlinearitäten produzieren können, die bei modernen Schaltungen aber erst bei sehr hohen Schalldruckpegeln $L_p > 120\text{ dB SPL}$ beginnen, wahrnehmbar zu werden.

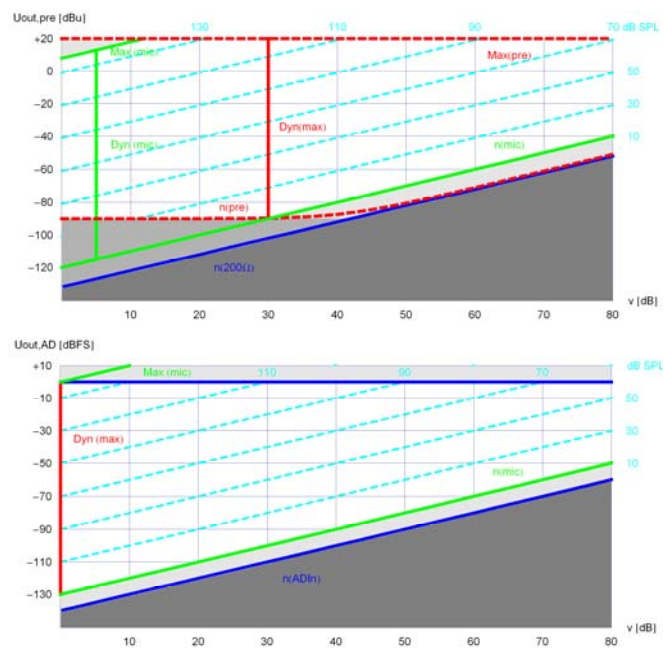


Abbildung 4: Verstärkungsabhängiger Dynamikumfang von analogen und digitalen Mikrophonen [5]

Hörversuche

Vorverstärkung („Einpegeln“)

Bei Hörversuchen mit Mikrophonen kann schon die Frage der gewählten Vorverstärkung und Pegelangleichung zwischen verschiedenen Mikrophonen ein Problem darstellen. Die Empfindlichkeitsunterschiede könnten z.B. nach unterschiedlichen Kriterien angeglichen werden:

- idealisiert: entsprechend Frei- oder Diffusfeldfaktor, je nach raumakustischer Situation, ggf. unter Berücksichtigung der Richtcharakteristik und der Beschallungswinkel
- technisch / tonmeisterlich: nach Aussteuerungsanzeige
- künstlerisch / tonmeisterlich: nach Gehör / Empfinden
- lautheitskompensiert: nach Zwicker oder EBU R 128 / ITU-R BS.1770 [8], wenn nur Klang- oder Timbreunterschiede betrachtet werden.

Beispiele zu Hörversuchen und Aufnahmebibliotheken

Essentiell ist bei Mikrophonhörvergleichen die weitestgehende Beschränkung der Parameteranzahl. Ein Beispiel ist [7], bei dem die Hörbarkeit der Nichtlinearitäten von Mikrophonschaltungen aus 60 Jahren untersucht wurde. Die Mikrophone besitzen den identischen akustischen Wandler, dennoch werden ihnen von Nutzern unterschiedliche „Klänge“ nachgesagt. Durch rein elektrisches Einspeisen der Testsignale wurden optische, Gehäuse- und Konstruktionseinflüsse ausgeschaltet. Die Nichtlinearitäten wurden nach klassischen (Abb. 5) und neueren Bewertungskriterien gemessen. Als Testsignale wurden Aufnahmen aus einer öffentlich verfügbaren Bibliothek verwendet.

In einem Hörversuch, bei dem der Einspeisepegel und damit die erzeugten Nichtlinearitäten variiert wurden, sollten die Versuchspersonen angeben, ob sie Verzerrungen wahrnehmen.

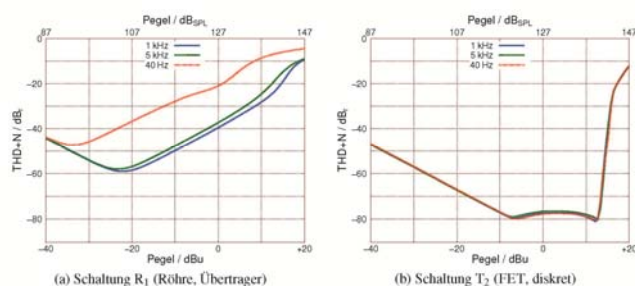


Abbildung 5: THD zweier Mikrophonschaltungen als Funktion des Eingangspegels bei drei Frequenzen [7]

Die Einspeisepegel wurden über den bekannten Übertragungsfaktor des Wandlers auf äquivalente Schalldruckpegel rückgerechnet. Das Ergebnis, dass erst bei hohen bis sehr hohen Schalldruckpegeln relevante und wahrnehmbare Nichtlinearitäten auftreten, bestätigte die Vermutung, dass diese nicht allein die Klangunterschiede ausmachen, und somit weitere Untersuchungen vonnöten sind.

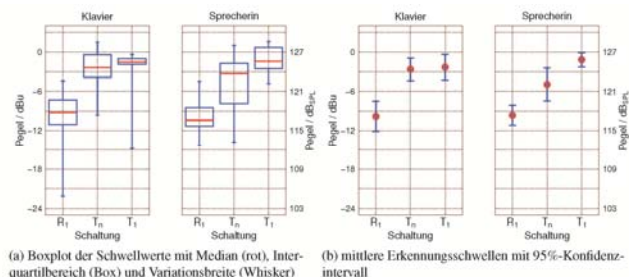


Abbildung 5: THD zweier Mikrophonschaltungen als Funktion des Eingangspegels bei drei Frequenzen [7]

Ein weiteres Beispiel ist [9], bei dem der Klang von Mikrofonen im Innenraum eines geschlossenen Flügels dokumentiert und ggf. optimiert werden sollte. (In einer vorhergehenden Arbeit [10] wurde der geöffnete Flügel untersucht.) Es wurde ein automatischer Flügel verwendet und die Mikrophonauswahl auf bauähnliche Typen der Richtcharakteristiken Kugel, Niere und Acht beschränkt. Die Mikrophone besaßen integrierte A/D-Wandler, sodass keine Vorverstärker benötigt wurden und eine einfache Signalkette vorliegt, die vollständig einstellbar und reproduzierbar ist. Die Mikrophone wurden an unterschiedlichen Stellen im Flügel platziert. Diese Arbeit zeigte, dass weitere Untersuchungen notwendig sind, um bei dieser nicht optimalen Mikrofonierungssituation einen ausgewogenen und zufriedenstellenden Klang zu erzielen.

Für den nicht wissenschaftlich interessierten Nutzer ist es hilfreich, unterschiedliche Mikrofonierungen durch Aufnahmen veranschaulicht zu bekommen. Ein herausragendes Beispiel zur Schlagzeugabnahme ist [11]. Aber auch in den Fachmedien [12] oder seitens Herstellern [13] sind gelegentlich Veröffentlichungen oder Werkzeuge zu finden, die eine hinreichende Aussagekraft besitzen und dem Mikrofonnutzer beim Vergleich von Mikrofonen und Mikrofonierungssituationen dienen können.

Literatur

[1] Schneider M (2008), *Mikrofone*, in: Weinzierl S, *Handbuch der Audiotechnik*, Springer, Berlin



Abbildung 7: Visualisierte „Mikrofonfahrt“ aus [11]



Abbildung 7: Untersuchung des Mikrofonierungsabstands [12]

- [2] Schneider M (2009), *Microphone Parameters*, 3. International VDT Symposium, Hohenkammer
- [3] Schneider M (2010), *Kondensatormikrofone im Vergleich*, Tagungsband 26. Tonmeistertagung, Leipzig
- [4] Schneider M (2002), *Mikrophone – wohin geht die Reise?*, Tagungsband 22. Tonmeistertagung
- [5] Schneider M (2007), *Digital Microphones for High Resolution Audio*, 31st AES Conference, London
- [6] Schneider M (1998), *Eigenrauschen und Dynamikumfang von Mikrofon und Aufnahmekette*, Tagungsband 20. Tonmeistertagung, Karlsruhe
- [7] Werner T, 2010, *Hörbarkeit und klangliche Bewertung der nichtlinearen Verzerrungen von Kondensatormikrofonen*, Magisterarbeit, TU Berlin
- [8] ITU-R BS.1770, *Algorithms to measure audio programme loudness and true-peak audio level.*, International Telecommunication Union, 2006
- [9] Heckl M., 2012, *Das Klavier in der Populärmusik*, Diplomarbeit, HfM Detmold
- [10] Urba, R., 2009, *Klaviermikrofonierungsverfahren, Klassik und Jazz*, Diplomarbeit, HfM Detmold
- [11] Wunderlich R. & Koch C. 2002, *Microphones Meet Drums*, Diplomarbeit, FH Düsseldorf und Robert-Schumann-Hochschule, Düsseldorf
- [12] Senior M., 2008, *Piano Recording*, www.soundonsound.com/sos/jan08/articles/pianorecording_0108.htm, Abruf am 10.11.2013
- [13] *DrumMicA*, de-de.sennheiser.com/service-support/drummica, Abruf am 10.11.2013

Zu Übereinstimmung von Musikerurteilen und dem Einfluss der Objektreihenfolge bei Instrumententests (Spieltest)

Gunter Ziegenhals

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

Einleitung

Die Messungen und Gutachten im Rahmen des Wettbewerbs um den Deutschen Musikinstrumentenpreis (DMIP) liefern quasi als Nebenprodukt eine Reihe von sehr interessanten und wertvollen Daten, deren weitere Auswertung teilweise unerwartete Ergebnisse zu Tage fördert. Nun sind die Arbeiten nicht als wissenschaftliche Untersuchungen angelegt. Die Stichprobengrößen der einzelnen Wettbewerbsinstrumente, sie bewegten sich bislang zwischen 5 (= Mindestteilnehmerzahl) und 25 (Violine, DMIP 2009), sind für statistisch gesicherte Aussagen in der Regel zu klein. Für die Anzahl der Gutachter mit konstant fünf trifft das auf jeden Fall zu. Dennoch bringt die Betrachtung der Daten interessante Details ans Licht, die zumindest Trendaussagen zulassen. Mit zwei Aspekten soll sich der Beitrag befassen. Die erste Fragestellung dreht sich um die Übereinstimmung der Gutachterurteile.

- Wie einig sind bzw. waren sich die Gutachter denn eigentlich, oder anders gefragt: Kann man auf hinreichend übereinstimmende Bewertungen zurückgreifen?

Die zweite Betrachtung richtet sich auf den Einfluss der Reihenfolge der Darbietung der Testobjekte. Begutachtet wird ohne zurücklegen. Jeder Juror erhält die einzelnen Instrumente jeweils allein und ohne die Möglichkeit direkt mit anderen zu vergleichen, bzw. nachträglich beispielsweise eine vermutete, anfänglich zu strenge Bewertung zu korrigieren.

Die Basis für die hier dargelegten Betrachtungen bilden Tests mit insgesamt 290 Instrumenten verteilt auf 27 Instrumententypen (Geige, b-Trompete, Oboe usw.). Drei Typen, Fagott, Geige und Cello sind jeweils zweimal vertreten.

Testpersonen

Die an der Bewertung beteiligten Juroren werden nicht von dem die Tests ausführenden Labor sondern von der Leiterin des Musikinstrumentenmuseums Berlin ausgewählt. Dieser Weg wird gewählt, um sicher zu stellen, dass die einreichenden Firmen bei der Auswahl der Musiker keine Rolle spielen.

Die Testpersonen rekrutieren sich aus der ersten Garde in Deutschland tätiger Orchestermusiker. Soweit möglich wird auf Musiker zurückgegriffen, die zugleich einen Lehrauftrag an einer Musikhochschule ausüben. Professoren sind es in besonderem Maße gewohnt, sich mit mehr als nur ihren persönlichen Instrumenten zu beschäftigen. Ausgesprochene Solisten werden bei der Auswahl gemieden, obwohl natürlich andererseits die meisten der benannten Juroren die Solistenstelle in ihrem Satz besetzen.

Testaufbau

Die Beurteilung der Instrumente durch die Musiker erfolgt mittels eines Fragebogen gestütztem Spieltest. Da 90 % der Fragen im sehr stark abgedunkelten Raum zu beantworten sind, übernimmt der Testleiter das Ausfüllen des Fragebogens. Test im Dunklen aus dem Grund, dass die mögliche Kenntnis des Herstellers, der Marke, das Testergebnis nicht beeinflusst. Befragungen während der Tests zeigten, dass trotz Verdunkelung die Erkennungsrate bei ca. 20 % liegt. Sie schwankt dabei zwischen 0 % im Fall der Violine und 60 % beim Fagott. Ein nicht beherrschtes Risiko in Bezug auf markengeprägte Fehlbeurteilungen liegt allerdings in der vermeintlichen Erkennung eines Herstellers.

Statistische Auswertungen belegen, dass sich die Bewertungstrends der einzelnen Testpersonen in den bei normaler Beleuchtung vergebenen Urteilen gegenüber der Dunkelphase nicht ändern. D. h. einmal unter den Bedingungen des Nichterkennens gefasste Meinungen zur Qualität des Instrumentes werden durch den optischen Eindruck zumindest kurzfristig nicht nachträglich verändert. Leider nicht statistisch erfasste, verbale Äußerungen der Musiker lassen aber den Schluss zu, dass Tests ohne Verdunklung in vielen Fällen zu anderen Ergebnisse geführt hätten.

Die Fragen für die Dunkelphase verteilen sich recht gleichmäßig auf die Aspekte Klang, Ansprache, Intonation und Spieltechnik. Bei Licht geht es um das äußere Erscheinungsbild, die Verarbeitung und das Preis-Leistungsverhältnis.

Die Differenzierung der Musikerurteile

Es wurde oben erwähnt, dass die Juroren ihre Urteile nicht durch den optischen Eindruck nachträglich grundsätzlich verändern. Es stellt sich aber natürlich die Frage, ob sie innerhalb der Dunkelphase unterschiedliche Aspekte hinsichtlich des Instrumentes differenziert bewerten. Einfach ausgedrückt lautet die Frage: Gibt es aus der Sicht der Musiker beispielsweise gut klingende aber schlecht stimmende Instrumente?

Um diese Frage zu untersuchen, fassten wir für Holz- und Metallblasinstrumente die Urteile zu den Gruppen

- Klang
- Volumen
- Ansprache
- Stimmung
- Spielbarkeit

zusammen. Im Falle der Streich- und Zupfinstrumente entfiel die Gruppe Stimmung und bei Gitarren ersetzten wir zudem die Gruppe Ansprache durch eine Merkmalsgruppe Sustain. Untersucht wurde nun die Korrelation zwischen den mittleren Urteilen für die einzelnen Gruppen und zwar zum

einen für jeden Einzelmusiker und zum anderen für die mittleren Urteile der jeweiligen Fünfergruppe. Es zeigen sich folgende Ergebnisse:

Bei **Metallblasinstrumenten** korrelieren bei der Betrachtung der fünf Musiker jeweils als Gruppe die Merkmalsgruppen Klang, Volumen und Stimmung zu 70 %, Ansprache weist mit 60 % Korrelation auch keine wirkliche Eigenständigkeit auf, lediglich die Spielbarkeit deutet mit 40 % Korrelation zu den anderen Merkmalen eine Sonderstellung an. Bei der Einzelbetrachtung der Juroren fallen die Korrelationen in allen Fällen leicht, jedoch bleibt die Spielbarkeit als einzige eigenständige Merkmalsgruppe erhalten.

Im Falle der **Holzblasinstrumente** gehen die Ergebnisse zwischen Gruppen- und Einzelbetrachtung sehr deutlich auseinander. Während in der Gruppe die akustischen Merkmale um 90 % miteinander korrelieren und sich auch die Spielbarkeit mit Werten um 55 % nicht als Merkmal verselbstständigt, liefert die Einzelauswertung der Musiker deutlich niedrigere Werte. Neben der Spielbarkeit kristallisiert sich bei Holzblasinstrumenten auch die Stimmung als eigenständiges Merkmal heraus.

Für die **Streichinstrumente** bilden praktisch alle Merkmale eine untrennbare Einheit. Die drei Akustikmerkmale Klang, Volumen und Ansprache hängen mit Korrelationen zu 100 % in der Gruppe und mit 90 % bei Einzelauswertung zusammen und auch die Spielbarkeit kann sich mit Korrelationen um 60 % nicht von den anderen Merkmalen abheben. Die Bewertungen der **Zupfinstrumente** verhalten sich ähnlich zu den bei Metallblasinstrumenten festgestellten. Klang, Volumen und Ansprache korrelieren in der Gruppe und in der Einzelauswertung (80 %), die Spielbarkeit erreicht bei den Einzelmusikern mit um 45 % eine Eigenständigkeit.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Musiker zwischen den „akustischen“ Merkmalen Klang, Volumen, Ansprache praktisch nicht differenzieren. Entweder das Instrument gefällt oder nicht. Die Stimmung ergibt nur bei Holzblasinstrumenten eine eigenständige Bewertung. Völlig undifferenziert geht es bei den Streichinstrumenten zu.

Der erste Eindruck der Ergebnisse

Die Bewertungen der Musiker pro Frage werden in einer neunstufigen Skala zwischen 1 und 5 Punkten erfasst. Für die weitere Zusammenfassung der Wertungen erfolgt erstens eine Normierung auf 100 Punkte und zum anderen eine Egalisierung auf gleiche Bewertungsmaßstäbe. Beides ist aber für die hier diskutierten Sachverhalte ohne Bedeutung. Eine erste Einschätzung der Musikerbewertung ist eine Darstellung der vergebenen Ränge (oder auch Platzziffern) pro Musiker und Instrument. Diese Darstellung wird auch als erstes Ergebnis dem Preisrichterausschuss präsentiert.

Tabelle 1: Vergebene Ränge DMIP 2008 Bass-Klarinette

| | Instr.1 | Instr.2 | Instr.3 | Instr.4 | Instr.5 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Musiker 1 | 5 | 1 | 4 | 2 | 3 |
| Musiker 2 | 5 | 3 | 4 | 1 | 2 |
| Musiker 3 | 4 | 3 | 5 | 2 | 1 |
| Musiker 4 | 4 | 3 | 5 | 2 | 1 |
| Musiker 5 | 4 | 2 | 5 | 3 | 1 |

Betrachtet man Tabelle 1, so erscheint es auf den ersten Blick eine fast perfekte Übereinstimmung der Musikerurteile hinsichtlich der Bewertung der Instrumente zu geben. Wertet man allerdings die Daten statistisch aus, so kommt man zu einem deutlich anderen Ergebnis.

Die Korrelation der Musikerurteile

Für eine weiterführende statistische Auswertung zogen wir wieder die Urteile der einzelnen Musiker zu den aufgeführten Merkmalsgruppen heran. Geprüft wurde, wie viele Musiker jeweils in ihren Urteilen zu den Merkmalsgruppen untereinander korrelierende Aussagen treffen. Unter Korrelation wird in der gesamten Auswertung verstanden, wenn der Korrelationskoeffizient den Grenzwert für die Annahme einer Korrelation mit einer 5 % Irrtumswahrscheinlichkeit überschreitet.

Ermittelt wurde, wieviel Prozent der Aussagen korrelieren. Die sich ergebenden Prozentsätze können grob wie folgt interpretiert werden:

- 10 % Übereinstimmung = 2 Musiker sind sich einig, 3 haben nicht übereinstimmende andere Meinungen.
- 20 % Übereinstimmung = je zwei Gruppen zu je 2 Musikern sind sich einig, aber nicht die beiden Gruppen. Der fünfte Musiker vertritt eine dritte, andere Meinung.
- 30 % Übereinstimmung = 3 Musiker sind sich einig, 2 haben nicht übereinstimmende andere Meinungen.
- 40 % Übereinstimmung = Es gibt eine Dreier- und eine Zweiergruppe.
- 60 % Übereinstimmung = Vier Musiker sind sich einig.
- 100 % Übereinstimmung = Alle fünf Musiker sind sich einig.

Tabelle 2: Prozentuale Übereinstimmung der Musikerurteile

| Instr.-Typ | kor. Fälle/% | Instr.-Typ | kor. Fälle/% |
|------------|--------------|-------------------------|--------------|
| Bariton | 4 | b-Klarinette | 64 |
| Q.-Posaune | 8 | Fagott | 10 |
| Tp hoch b | 44 | Oboe | 8 |
| Horn | 8 | Flöte | 4 |
| Basspos. | 8 | Bassklarin. | 24 |
| F-Tuba | 2 | Fagott 2010 | 6 |
| b-Trompete | 88 | E ^b -Klarin. | 2 |
| Bass-Tp. | 24 | | |
| Tenorhorn | 0 | | |
| Tenorpos. | 26 | | |
| | | Zither | 75 |
| Geige 2001 | 8 | West.-Git. | 20 |
| Cello 2004 | 50 | Mandoline | 23 |
| Bratsche | 20 | Gitarre | 5 |
| Bass | 10 | Arch.-Git. | 5 |
| Geige 2009 | 0 | Laute | 18 |
| Cello 2012 | 10 | E-Gitarre | 20 |

In Tabelle 2 sind die gefundenen korrelierenden Fälle prozentual für die einzelnen untersuchten Instrumententypen aufgeführt.

Von einer einhelligen Meinung der jeweils fünf Juroren zu den Instrumenten kann man eigentlich nur im Falle der b-Trompete, hoch b-Trompete und der Zither, mit gewissen Abstrichen für b-Klarinette und in einem der beiden Cello-Tests sprechen.

Wie kann man dieses Ergebnis werten? Da es sich bei den Wettbewerbsinstrumenten ausschließlich um höchstwertige Produkte handelt kann man die Hypothese aufstellen, dass die einzelnen Objekte keine wesentlichen Abweichungen in Bezug auf die allgemein erwarteten Eigenschaften mehr aufweisen und so vorrangig die individuellen Bedürfnisse der Juroren bei der Beurteilung zum Tragen kommen. Das Ergebnis ist zugleich ein Beweis für die Notwendigkeit des mehrstufigen Tests im Rahmen des Deutschen Musikinstrumentenpreises.

Einfluss der Reihenfolge der Testinstrumente

Mehrfache spontane Aussagen der Testmusiker gingen in die Richtung, dass die Reihenfolge der zu testenden Instrumente eine Rolle spielt. Hauptargument war dabei, dass man zu Beginn des Tests noch keinen rechten Maßstab aufgebaut hat und die ersten Kandidaten deshalb u. U. ungerecht bewertet. In Zusammenhang mit Fragebogen gestützten Tests ist dies keine unbekannte Erscheinung. Es ist z.B. nicht unüblich, eine erste Gruppe von Urteilen nicht in die Auswertung einzubeziehen. Bei den Tests zum DMIP erhält aus diesen Gründen jede Testperson die Instrumente in einer anderen Reihenfolge.

Nun ist es durchaus interessant einmal zu prüfen, ob die Reihenfolge tatsächlich eine Rolle spielt. Bei grobem Vergleich der Zahlenwerte während der Tests selbst und im Rahmen der Auswertungen konnten die befürchteten Effekte nicht beobachtet werden. Es wurde deshalb eine spezielle Auswertung vorgenommen.

Dazu stellten wir die Reihenfolge der Vorlage der Instrumente dem jeweils zugeordneten Rang für jeden Musiker gegenüber. Die Wahl der auszuwertenden Größe fiel deshalb auf den Rang und nicht die vergebene Punktzahl, weil der Rang eine vom Bewertungstyp (optimistisch – pessimistisch) unabhängige, d.h. in gewisser Weise normierte Größe darstellt. Man hätte natürlich auch eine normierte Punktbewertung verwenden können. Es entsteht eine Tabelle mit einer Zeilenzahl die dem Produkt aus Anzahl der Musiker (hier immer gleich 5) und der Anzahl der jeweiligen Instrumente entspricht. Diese Zeilenzahl entspricht der Anzahl der zu betrachtenden Fälle. Die beiden Spalten sind der jeweilige Testplatz und der erreichte Rang. Wir prüfen nun die Korrelation der beiden Spalten. Die folgenden Tabellen (Tabelle 3 bis Tabelle 6) stellen die Ergebnisse dar. Neben dem Instrumententyp sind die sich ergebende Fallzahl, der daraus resultierende Grenzwert des Korrelationskoeffizienten (5 %) und der berechnete Korrelationskoeffizient r eingetragen.

Die Betrachtung wurde in einem zweiten Schritt jeweils für alle Exemplare einer Instrumentengruppe, wie z.B. die Blechblasinstrumente vorgenommen. Da unterschiedliche Anzahlen von Exemplaren für die einzelnen Typen vorliegen

wurden Anzahl, Testplatz und Rang jeweils auf 10 normiert. Tabelle 7 stellt die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 3: Korrelation Rang – Testplatz, Metallblasinstrumente

| Instr.-Typ | Fallzahl | $r_{Gr.}(5\%)$ | r |
|------------|----------|----------------|--------|
| Bariton | 50 | 0,282 | -0,014 |
| Q.-Posaune | 40 | 0,316 | -0,055 |
| Tp hoch b | 70 | 0,239 | -0,079 |
| Horn | 25 | 0,396 | -0,1 |
| Basspos. | 40 | 0,316 | 0,002 |
| F-Tuba | 30 | 0,361 | -0,126 |
| b-Trompete | 80 | 0,224 | -0,181 |
| Bass-Tp. | 40 | 0,316 | -0,029 |
| Tenorhorn | 40 | 0,316 | -0,119 |
| Tenorpos. | 60 | 0,250 | 0,008 |

Tabelle 4: Korrelation Rang – Testplatz, Holzblasinstrumente

| Instr.-Typ | Fallzahl | $r_{Gr.}(5\%)$ | r |
|-------------------------|----------|----------------|--------|
| b-Klarinette | 55 | 0,27 | -0,134 |
| Fagott_02 | 25 | 0,396 | 0,019 |
| Oboe | 25 | 0,396 | -0,12 |
| Querflöte | 25 | 0,396 | -0,14 |
| Bassklarin. | 25 | 0,396 | 0,22 |
| Fagott_10 | 30 | 0,361 | 0,04 |
| E ^b -Klarin. | 30 | 0,361 | 0,131 |

Tabelle 5: Korrelation Rang – Testplatz, Streichinstrumente

| Instr.-Typ | Fallzahl | $r_{Gr.}(5\%)$ | r |
|------------|----------|----------------|--------------|
| Geige_01 | 65 | 0,248 | 0,075 |
| Cello_04 | 75 | 0,231 | 0,074 |
| Bratsche | 70 | 0,239 | -0,192 |
| Kontrabass | 40 | 0,316 | -0,068 |
| Geige_09 | 125 | 0,179 | -0,042 |
| Cello_12 | 70 | 0,239 | 0,259 |

Tabelle 6: Korrelation Rang – Testplatz, Zupfinstrumente

| Instr.-Typ | Fallzahl | $r_{Gr.}(5\%)$ | r |
|-------------|----------|----------------|--------------|
| Zither | 60 | 0,258 | 0,049 |
| Westerngit. | 40 | 0,316 | -0,038 |
| Mandoline | 35 | 0,338 | -0,084 |
| Gitarre | 55 | 0,27 | -0,213 |
| Arch.-Git. | 30 | 0,361 | 0,406 |
| Laute | 60 | 0,258 | 0,194 |
| E-Gitarre | 35 | 0,330 | -0,250 |

Tabelle 7: Korrelation Rang – Testplatz, Instrumentengruppen

| Instr.-Typ | Fallzahl | $r_{Gr.}(5\%)$ | r |
|------------|----------|----------------|--------|
| Metallblas | 415 | 0,098 | -0,083 |
| Holzblas | 215 | 0,137 | -0,008 |
| Streich | 445 | 0,095 | 0,016 |
| Zupf | 280 | 0,119 | 0,041 |

Abbildung 1 zeigt exemplarisch die Verteilung von Testplatz und Rang für die bewerteten Metallblasinstrumente.

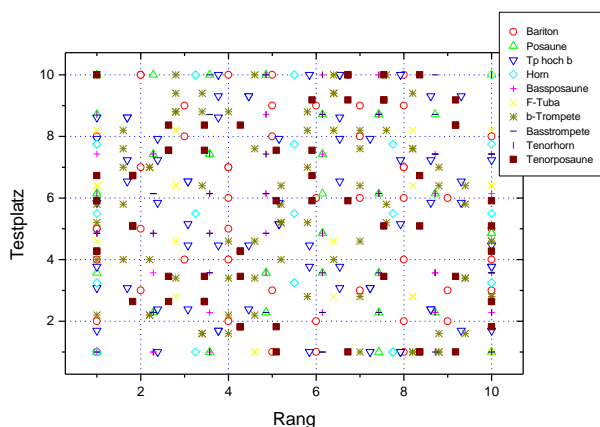


Abbildung 1: Verteilung von Rang und Testplatz für alle bewerteten Metallblasinstrumente

In Abbildung 2 ist die Verteilung für einen der beiden Fälle mit einem anzunehmenden Zusammenhang dargestellt. Beim Nachzählen der Punkte auf den möglichen Kombinationen wird man bemerken, dass scheinbar Punkte fehlen (Es müssten jeweils fünf sein.). Dem ist aber nicht so. Aufgrund der hier ausschließlich ganzzahligen Möglichkeiten, fallen Punkte auch mal zusammen.

Man erkennt durchaus im Gewirr der Punkte die sich abzeichnende Korrelation von Testplatz und Ergebnis. Die später gereichten Instrumente werden tendenziell schlechter bewertet.

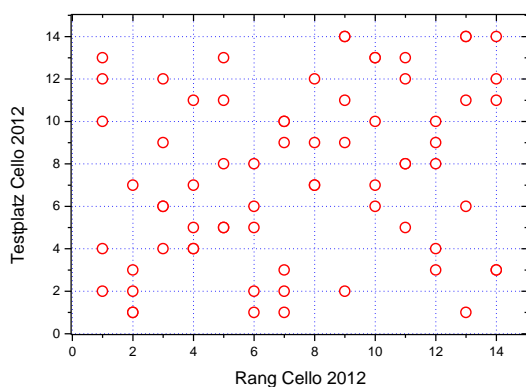


Abbildung 2: Verteilung von Rang und Testplatz für die Stichprobe Cello 2012

Zunächst könnte man aus den Ergebnissen den Schluss ableiten, dass man aufgrund des selten auftretenden Zusammenhanges die Testreihenfolge außer Acht lassen kann. Da aber ein Zusammenhang auftreten kann und es sich zudem nicht vorhersagen lässt, wodurch dieser bedingt wird (siehe Test Cello: einmal ja, einmal nein), sollte man über eine wechselnde Darbietung der Objekte vorbeugen.

Zusammenfassende Einschätzung

Die statistischen Auswertungen der Spieltests zum DMIP ergaben für die meisten Fälle eine in dem Maße nicht erwartete, sehr geringe Korrelation zwischen den Urteilen der Juroren. Obwohl aufgrund der sehr kleinen Stichproben eine statistische Sicherheit nicht gegeben ist, kann man die Ergebnisse aber zumindest als Indizien werten. Diese lassen durchaus Zweifel am Sinn derartiger Tests, bei denen man Musiker den Sieger finden lässt, aufkommen. Fassen wir einmal die Bedingungen des Tests zusammen:

- Die Qualifikation der Juroren ist über jeden Zweifel erhaben.
- Die Testbedingungen wurden ausnahmslos von allen beteiligten Testpersonen als hervorragend eingeschätzt. Einziges Manko ist die fehlende Möglichkeit, die Tragfähigkeit im Saal zu testen. Diese Art von Test lässt aber das Budget des DMIP nicht zu.
- Bei den Testobjekten handelt es sich durchweg um Spitzenprodukte des deutschen Musikinstrumentenbaus

Letzteres ist wohl als die Ursache der Ergebnisse anzusehen. Die Produkte der verschiedenen Hersteller haben in den letzten 20 Jahren eine Entwicklung genommen, dass alle allgemein bekannten und als solche auch anerkannte Probleme behoben wurden. Somit treten die individuellen Vorstellungen der Testpersonen bei der Bewertung in den Vordergrund. Daraus ergeben sich zwangsläufig die beobachteten Phänomene. Diese Entwicklung sollte uns im Sinne des Musikinstrumentenbaus erfreuen und gleichzeitig darauf einstimmen, zukünftig größeres Augenmerk auf die individuellen Gesichtspunkte auch aus akustischer und messtechnischer Sicht zu legen.

Die hier dargelegten zusätzlichen Auswertungen der im Rahmen der Tests zum Deutschen Musikinstrumentenpreis erhaltenen Daten, stellen keinesfalls die Ausschöpfung aller Möglichkeiten dar. Der gewonnene und sich zur Zeit noch erweiternde Datenpool birgt zweifellos eine Vielzahl weiterer interessanter Informationen. Auf die Ergebnisse zukünftiger Analysen der Daten aus verschiedenen Sichtweisen darf man gespannt sein.

Der Deutsche Musikinstrumentenpreis wurde 1990 vom Bundesminister für Wirtschaft gestiftet und mit Erlassen von 1998 und 2006 jeweils für weitere acht Jahre fortgeführt. Der Wettbewerb umfasst jährlich zwei von einem Kuratorium ausgewählte Instrumente aus zwei verschiedenen Gattungen. Das Bundesministerium für Wirtschaft übernimmt die Kosten für die Ermittlung der Preisträger. Der Preis selbst ist ein Ehrenpreis.

Diskriminanztest mit Lernphase und ohne semantische Notation für den Nachweis kleinster baulicher Veränderungen an Musikinstrumenten

Robert Mores

University of Applied Sciences, Hamburg, Germany, Email: robert.mores@haw-hamburg.de

Einleitung

Die Bewertung von Klang und/oder Spielbarkeit an Musikinstrumenten wird regelmäßig durch subjektive Kriterien und Vorwagnahmen beteiligter Probanden erschwert. Ein gemeinsamer semantischer Raum bzw. intersubjektive Skalen müssen i.d.R. in einem langwierigen, mehrstufigen Prozess gefunden werden [NJLB09]. Dabei wird in der Regel die Dimensionalität bestimmt, etwa mittels multi-dimensional scaling (MDS), und auf eine semantische Notation verdichtet, etwa mittels repertory grid, wobei einmal gefundene Bewertungssysteme selten erneut Anwendung finden, sondern immer wieder neu für eine Zusammenstellung von Musikinstrumenten und bewertender Gruppe entstehen. Erschwerend kommt hinzu, dass der Wunsch nach objektiver Bewertung insbesondere bei hochwertigen Instrumenten angestrebt wird, zwischen denen oft nur Nuancen an Differenzen bestehen. Soll allein die Differenz zwischen Instrumenten oder gar nur die Diskriminierbarkeit von kleinen Veränderungen an einem Instrument feststellbar sein, ohne dabei das Wesen wahrgenommener Unterschiede beschreiben zu wollen, so eignet sich hierfür die etablierte Signalentdeckungstheorie [Swets64] [GS66]. Dabei kann auf eine semantische Notation sogar vollständig verzichtet werden, wenn Musiker in einer Lernphase vorab entlang eigener Kriterien die vermeintlichen Unterschiede zwischen zwei angebotenen Situationen oder Reizen A und B für sich selbst feststellen, um im anschließenden Blindtest Treffer für A und B abzuzählen. Für einen renommierten Flügelhersteller wurde auf dieser Basis belastbar erhoben und dabei eine gewisse Selbstüberschätzung von Musikern beobachtet.

1 Signalentdeckungstheorie

Die ursprüngliche Idee dieser Theorie [Swets64, GS66], in einem Rauschen ein Signal als noch ebenmerklich erkennbar nachzuweisen, lässt sich auf

die Aufgabe anwenden, an Musikinstrumenten ebenmerkliche Unterschiede des Klangs und/oder spieltechnischer Eigenschaften festzustellen. Mit diesem forced choice (FC) Test über eine Reihe von einzelnen Beobachtungsintervallen ergeben sich Ja/Nein Antworten im Sinne Fehler erster und zweiter Art, je nachdem, ob ein Signal oder Merkmal tatsächlich angeboten wurde oder nicht. Für die Auswertung werden Treffer und Fehlalarme auf die jeweilige Anzahl jeweils mit und ohne Signal (Merkmal) angebotener Proben normiert. Die so entstandenen Werte stehen für die Wahrscheinlichkeiten (Flächenanteile unter den Dichtefunktionen) der zu unterscheidenden Fälle. Ohne die Verteilung als solche festzustellen und unter der regelmäßigen Annahme einer Normalverteilung lassen sich über die gefundenen Flächenanteile mittels der Fehlerfunktion die Integrationsgrenzen finden und so ein Distanzmaß d' entwickeln, welches den Abstand der Mittelwerte in Relation zur Standardabweichung ausweist. Die Sensitivität / Distanz ergibt sich demnach durch z-Transformation:

$$d' = z(\text{Trefferquote}) - z(\text{Fehlalarmquote}).$$

| Reiz Antwort | Signal (Merkmal) vorhanden | Signal (Merkmal) nicht vorhanden |
|---------------------------------------|-------------------------------|---|
| Signal (Merkmal) entdeckt | Treffer (hit) | Fehlalarm (false alarm) |
| Signal (Merkmal) nicht entdeckt | Auslasser (miss) | korrekte Zurückweisung (correct reject) |

Tab. 1: bei der Signalentdeckungstheorie verwendete Antwortklassifikation

Ab $d' > 1$ gilt ein Merkmal als unterscheidbar. Der Wert, ab welchem ein vergleichsweise für die gleiche Grundmenge herangezogener Hypothesentest (etwa ein zweiseitiger KS-Test oder Rangsummentest) falsifiziert, liegt regelmäßig bei $d' = 0,5 \dots 1$.

Alternativ kann zur Auswertung die Binomialverteilung herangezogen werden. Liegt die Wahrscheinlichkeit, allein durch Würfeln eine gleich hohe oder höhere Erkennungsrate zu erreichen, über 1% bzw. 5%, so ist die Hypothese normalerweise abzulehnen, da statistisch gesehen keine Signifikanz vorliegt. Hierfür werden Treffer und korrekte Zurückweisungen akkumuliert. Für ein Signifikanzniveau von 1% müssen bei z.B. 20 Versuchen 16 korrekte Zuordnungen vorliegen.

2 Erweiterung

In der Regel findet die Theorie Anwendung, wenn eine unmissverständliche Aufgabenstellung vorliegt, um ein klares Ja oder Nein zu ermöglichen (ursprünglich die Frage nach einem im Rauschen enthaltenen Signal, genauso unmissverständlich die Diskriminierfähigkeit eines Drogenhunds oder die Sicherheit eines medizinischen Tests).

Die oft geringen Unterschiede zwischen Musikinstrumenten lassen sich typischerweise nicht mit einfachen oder sehr klaren und unmissverständlichen Begriffen wie laut/leise abfragen. Es liegen subtile Unterschiede vor, die Probanden haben eigene Vorstellungen, Präferenzen und Vorerfahrungen. Daher lösen begriffliche Festlegungen bei den Probanden unterschiedliche Assoziationen und Erwartungen aus, die wiederum in Antworttendenzen eingehen [Möller10, Raake06]. Reliable und valide Messungen sind so erschwert. Die Erweiterung betrifft nun den Gedanken, bei Probanden lediglich das Distanzmaß zu ermitteln, ohne dabei nach irgendeinem Signal oder Merkmal zu fragen. Die Probanden suchen in einer vorangestellten Lernphase für sich selbst nach einem oder nach mehreren Unterscheidungsmerkmalen etwa zwischen einem Paar Musikinstrumente A und B, wobei subjektive Präferenzen, Vorerfahrungen und Fertigkeiten in idealer Weise zum Tragen kommen. Die Probanden werden nicht nach den Merkmalen oder Festlegungen gefragt.

In der Lernphase wird ein Proband in Kenntnis gesetzt hinsichtlich der Identität von A und B. Ein Wechsel

zwischen den Reizen oder Situationen A und B erfolgt auf Wunsch des Probanden, bis dieser die Phase selbst beendet. Im anschließenden Blindtest werden A und B permutiert angeboten. Der Proband muss sich für A oder B entscheiden, die Antworten lassen sich nach der genannten Antwortklassifikation einordnen oder mittels Binomialverteilung auswerten. Bekannt ist diese Vorgehensweise aus der Nahrungsmittelforschung [MCC99]. Mamou-Mani et al. wendete dieses Prinzip zur Unterscheidung von Trompeten an [MSMR12].

Das Verfahren hat drei wesentliche Stärken. (i) Unabhängig von Antworttendenzen des Probanden kann ermittelt werden, denn der Test kann adaptiv ausgeführt werden, um mit den angebotenen Proben einem zu liberalen oder konservativen Antwortverhalten entgegenzuwirken, siehe receiver operator curve (ROC) in der Literatur [Egan75]. (ii) Während Psychoakustiktests in den Ingenieurwissenschaften regelmäßig einem Bottom-Up Ansatz folgen, liegt hier eine komplexe kognitive Aufgabe vor, wobei weder sensorisch noch kognitiv eingeschränkt wird und Antworten aus einem ganzheitlichen Urteilsvermögen resultieren. (iii) Die Ergebnisse sind relevant, denn in der Anwendung – einem konkreten Auswahlverhalten eines Kunden – wird ebenfalls entlang subjektiver Kriterien entschieden.

Es ist zu empfehlen, einen solchen Diskriminanztest routinemäßig auch vor anderweitigen Erhebungen mit Musikern voranzustellen, wenn z.B. etwas zum Wesen von Merkmalen ermittelt werden soll. Vor dem Hintergrund der Erfahrung, dass Musiker in echten Doppelblindtests oft die eigenen Musikinstrumente nicht mehr erkennen, ist zunächst die Unterscheidbarkeit festzustellen bevor man Merkmale benennen oder gar mehrer Dimensionen feststellen möchte. Selbstverständlich lässt sich die Diskriminierungsfähigkeit von Probanden auch aus den Antworten direkt statistisch ermitteln, wie etwa nach dem von Bech vorgestellten Modell [BZ06].

3 Erhebung

Bei einem deutschen Hersteller von Konzertflügeln ergab sich im Zuge einer Innovation die Frage nach der Systematisierung. Ein sehr geringfügiger baulicher Unterschied an einem ohnehin schon über lange Zeit optimierten und perfektionierten Modell ließ den erzielbaren qualitativen Vorteil etwa so klein erscheinen wie die qualitative Streuung aus laufender Fertigung ausfällt. In diesem Zusammenhang wurden systematische Messungen an Teilkomponenten und an Selbstspielflügeln vorgenommen, die jedoch unter Aufbietung einer Vielzahl an Analyseverfahren nach dem Stand der Technik keine Unterschiede erkennen ließen. Die Konstrukteure und Intonateure glaubten jedoch, etwas zu hören und waren von einem entwickelbaren Potential überzeugt.

Begleitend wurden seitens des Herstellers im Zuge von Wettbewerben sowie im eigenen Auswahlraum Beobachtungen zum Auswahlverhalten von Künstlern und von Kunden vorgenommen. Die festgestellten Präferenzen deuteten auf eine Unterscheidbarkeit des eingebrachten Merkmals hin. An dieser Stelle wurde ein Diskriminanztest vorgeschlagen, um Sicherheit zu gewinnen. Dieser wurde iterativ und im Dialog mit dem Hersteller entwickelt, um erdenklichen Vorwegnahmen und Einflussfaktoren zu begegnen¹.

Der Test mit Lernphase und Erhebungsphase wurde an einem Flügel durchgeführt, um welchen eine Wand aus durchgängigem Lautsprecherstoff so drapiert wurde, dass von dem Flügel nur die Tastatur und die Pedale erkennbar und zugänglich waren. Hinter dem Vorhang wurde das Merkmal sporadisch so eingebracht, dass dies für Probanden nicht erkennbar war und die Umrüstzeit zwischen jeweiligen Einzelbeobachtungsintervallen sehr kurz ausfiel. Es wurde eine Sequenz aus 20 vorab permutierten Folgen von A (ohne Merkmal) und B (mit einem Merkmal) angeboten. Das Merkmal wurde in zwei Varianten angeboten B1, B2.

3.1 Beobachtungen

Alle drei Musiker, die in jeweils gesonderten Sitzungen teilnahmen, konnten sehr gut mit Aufgabe umgehen.

Es war zu beobachten, dass die gegebene Professionalität am Instrument einen sportlichen Ehrgeiz begründet, die vorliegende Aufgabe gut lösen zu wollen. Alle drei Musiker waren nach einer zwei bis 15 Minuten dauernden Einlernphase überzeugt, den Unterschied zwischen A und B für sich ausmachen zu können. Dabei suchten die Probanden nach Unterschieden insbesondere bei (i) Klangverschmelzungen, (ii) bei sich eventuell ergebenden Abweichungen zwischen dem erlebten Klang und dem Klang, der mit der Ausführung des Anschlag erwartet wird, und (iii) anhand von Phrasen, für die ein gutes Klanggedächtnis und insofern eine weitere externe Referenz vorliegt. Ein solcher Suchraum wäre im Zuge eines Testentwurfs kaum entstanden. Alle drei Musiker haben nach einer ersten Sequenz von fünf bis zehn Einzelbeobachtungsintervallen um eine erneute Lernphase gebeten, welche gewährt wurde.

3.2 Werte und Auswertung

Die Antworten der Musiker M1 bis M3 sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Dabei ist das Distanzmaß d' wie beschrieben aus Treffer- und Fehlalarmquoten berechnet. Bei Musiker 1 und 2 liegt keine Diskriminierung vor. Musiker 3 diskriminiert ansatzweise, aber für das Paar A/B1 in umgekehrter Richtung. Das heißt entweder hat beim Probanden ein Wechsel der Zuordnung stattgefunden, oder es liegt ein Raten vor, welches zufällig in die andere Richtung zeigt, siehe auch M2 mit A/B1. Musiker 3, ein international konzertierender Solist, diskriminiert das Paar A/B2 mit $d' = 1,05$. Das entsprechende Signifikanzniveau der Binomialverteilung für korrekte Zuweisungen (Treffer und korrekte Zurückweisungen zusammengefasst) läge mit 14 aus 20 bei 5,77%. Die mit einem d' von etwa 1 sich gerade eben abzeichnende Diskriminierungsfähigkeit entspricht der auf einem Signifikanzniveau von 5% gerade noch eben abzulehnenden Hypothese, eine Diskriminierungsfähigkeit läge vor. In Anlehnung an [MSMR12] und dem dort für einen Test mit Musikern empfohlenen Signifikanzniveau von 1% wäre die Hypothese sogar deutlich abzulehnen.

¹ Für eine systematische Liste siehe [BZ06].

| Test | Tr | Fa | Tr + kZ | d' |
|---------|----|----|---------|-------|
| M1 A/B1 | 5 | 5 | 10 | 0 |
| M1 A/B2 | 4 | 3 | 11 | 0,27 |
| M2 A/B1 | 6 | 7 | 9 | -0,27 |
| M2 A/B2 | 6 | 5 | 11 | 0,25 |
| M3 A/B1 | 2 | 5 | 7 | -0,84 |
| M3 A/B2 | 7 | 3 | 14 | 1,05 |

Tab. 2: Antworten aus 20 Einzelbeobachtungen (10 x A, 10 x B) von drei Musikern, klassifiziert nach Treffern (Tr), Fehlalarm (Fa) und der Summe aus Treffern und korrekten Zurückweisungen (kZ), sowie das entsprechend ermittelte² Distanzmaß d' .

3.1 Weitere Beobachtungen

Die Auswertung konnte noch in der Sitzung selbst erfolgen und den Probanden mitgeteilt werden. Diese zeigten sich von dem Ergebnis überrascht, es sei mit den gegebenen Antworten im wesentlichen gewürfelt worden. Zeigten doch alle drei Musiker nach der Einlernphase eine deutliche Selbstsicherheit, A und B unterscheiden zu können, denn alle äußerten sich spontan und ungefragt mit klaren Aussagen. Diese Zuversicht und das ermittelte Ergebnis passen nicht zusammen und sprechen für eine gewisse Selbstüberschätzung. Es zeigt aber auch, dass der Bewertungsprozess für die zu erfassenden subtilen Unterschiede von subjektiven Größen stark beeinflusst wird, wie etwa subjektive Vorstellungen und Vorwagnahmen oder subjektives und variierendes Erleben während der Beurteilung.

Beim Flügelhersteller setzte nach Vorliegen der Versuchsergebnisse zunächst eine Ernüchterung ein, hat man doch zuvor bereits „hörend“ optimiert, und muss man nun doch annehmen, dass das Phänomen kognitiv und nicht akustisch vorliegt.

Zusammenfassung

Es wird ein Diskriminierungstest vorgeschlagen, welcher auf der Signalentdeckungstheorie basiert und um eine

Einlernphase erweitert ist, um semantische Notationen vollständig zu vermeiden. Das Distanzmaß d' repräsentiert die Diskriminierbarkeit bzw. -fähigkeit.

Der Test wurde in der Praxis als gut durchführbar erlebt und die Schlichtheit und Klarheit begründen verlässliche Aussagen.

Bei einem Test an Konzertflügeln konnte beispielsweise nachgewiesen werden, dass Phänomene, die nach Einbringen eines konstruktiven Merkmals offenbar „deutlich zu hören“ sind, am Ende tatsächlich von Profimusikern nicht diskriminiert werden.

Bibliographie

[NJLB09] A. Nykänen, O. Johansson, J. Lundberg, and J. Berg, “Modelling perceptual dimensions of saxophone sounds,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 95, no. 3, pp. 539–549, 2009.

[Swets64] Swets, J.A. (Hrsg.) (1964) *Signal detection and recognition by human observers*. New York: Wiley.

[GS66] Green, D.M., Swets J.A. (1966) *Signal Detection Theory and Psychophysics*. New York: Wiley.

[Möller10] Sebastian Möller, *Quality engineering: Qualität Kommunikationstechnischer Systeme*, Springer, 2010, Seite 25.

[BZ06] Bech, S. & Zacharov, N. (2006). *Perceptual audio evaluation*. Chichester: Wiley.

[MSMR12] Mamou-Mani, Adrien; Sharp, David; Meurisse, Thibaut and Ring, William (2012): Investigating the consistency of woodwind instrument manufacturing by comparing five nominally identical oboes. *Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), pp. 728–736.

[MCC99] M. C. Meilgaard, G. V. Civille and B. T. Carr, *Sensory Evaluation Techniques* (third edition), CRC (1999).

[Raake2006] Raake A (2006) *Speech Quality of VoIP: Assessment and Prediction*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, West Sussex

[Egan75] Egan, J. P. (1975). *Signal Detection Theory and ROC Analysis*. Series in Cognition and Perception. Academic Press, New York.

² Bei Verwendung der `erfinv` Funktion in MATLAB ist an zwei Stellen zu entnormieren, z.B. für M3 A/B2:
`>> sqrt(2)*erfinv(2*0.7-1)-sqrt(2)*erfinv(2*0.3-1)`

Nuancen – Mythos und Fakt: Violine

Esther Zenetti

Universität Regensburg, E-Mail: esther.zenetti@stud.uni-regensburg.de

Einleitung

In diesem Beitrag wird ein Teil des geheimnisvollen Mythos über die Akustik der Violine anhand der Literatur über Forschung an Geigenkörpern durch ernüchternde Fakten entzaubert.

Amerika

In Brecksville/Ohio widmete sich Marshall der Modalanalyse (die ersten „5“ wichtig). In Greenville/North Carolina untersuchte Bissinger den Zusammenhang zwischen Moden und Frequenzen (3 kHz gut). In Passadena erforschte Willems den Einfluss der Temperatur auf Moden und Frequenzen.

In New Jersey erforschte Hutchins als eine der ersten die Akustik der Streichinstrumente und entwickelte weitere Instrumente der Familie. In Knoxville/Tennessee bzw. New York untersuchten Schwarze bzw. Burckle und Grissino-Mayer den Einfluss des Maunderminimums auf das Holz.

An der CWRU in Cleveland/Ohio verfasste Benade allgemeine Aufsätze zu musikalischer und Raumakustik, Akustik der Violine, Wolfson (Oszillation f Korpus-Luft-Ton/Saite), Dämpfung und in Erinnerung an J. Schelleng. In Elkhart/Indiana schrieb Pickering über Streichinstrumente und über Saiten.

Europa

In Lulea benutzte Isaksson, Molin u.a. bei experimenteller Forschung Hologramm. In Cambridge untersuchte Woodhouse den Zusammenhang zwischen Moden und Frequenzen (2,5 kHz gut) und erforschte Holz und Lack (Schichten und Mineralien). In Paris untersuchten Echard u.a. den Lack mit Röntgenstrahlen (Mineralien und Bindemittel). In St Gallen experimentierten Spycher u.a. mit Holz (kl./gr. Ringe).

In Rom schrieb der Geigenbauer Sacconi ein Buch über alte Instrumente (Geheimnisse Stradivaris). In London beschäftigten sich Shorter bzw. Stowell mit alten italienischen Violinen. An der KTH Stockholm legte Askenfeld u.a. seinen Schwerpunkt auf den Zusammenhang zwischen Bogen und Saite (v, F).

An der RWTH Aachen untersuchte Kuttruff den Zusammenhang zwischen Geigenbau und Klangqualität, auch bei alten Instrumenten. In Zwota führten Meinel bzw. Liebl u.a. experimentelle Forschung zu Lack und dem Zusammenhang zwischen Geigenbau und Klangqualität durch.

In der PTB Braunschweig experimentierten Lottermoser, Meyer, Wogram und Bork zu Schallabstrahlung. An der TU Berlin schrieb Cremer ein Buch über die Physik der Geige.

Am MDW in Wien verglich Mc Cue einen neuen Geigenbauer mit einem alten. In Prag beschrieb Stepanek, Schneider u.a. den Klang, auch von alten Instrumenten, mit geeigneten verbalen Parametern. In Moskau untersuchte Goßler Moden (10% Frequenzabweichung).

Asien

Im Iran beschäftigte sich Arakélian mit Geigenbau und Lack (Myrrhe). An der Hokkaido-Uni in Sapporo benutzte Nagai numerische Methoden (FEM).

Australien

An der UNSW Sydney schrieb Wolfe allgemein über die Akustik von Musikinstrumenten und John McLennan über die Geschichte und den Stimmstock. An der UNSW Canberra untersuchte Fletcher die Physik der Musikinstrumente.

Zusammenfassung

Zu mehreren Schwerpunkten von alten und neuen Violinen wurde an unterschiedlichen Orten geforscht, hauptsächlich alte Instrumente, Bau, Holz, Lack, Moden/Spektrum, Physik und Saiten. Dabei wurden auch neue Verfahren benutzt (optische, Röntgen, Laser, 3D, Hologramm, Simulation).

Dank an Sonja Koller, Johannes Kolb, JK+, CMH, J. Meyer.

Literatur

- [1] CASJ/VSA/JASA//AA/Acustica//ICA/SMAC/DAGA-Papers
- [2] Publikationsliste der DEGA
(<http://www.dega-akustik.de/publikationen>)
- [3] E. Zenetti: Akustik der Violine. (Facharbeit)

Der Mythos vom Filzstechen bei Flügel und Klavier

Jobst Fricke

Abt. Systematische Musikwissenschaft

Musikwissenschaftliches Institut der Universität zu Köln

E-Mail: alm01@uni-koeln.de

1. Das Instrument

Flügel der Firma Grottrian & Steinweg, Modell 185, Fabrikations-Nr. 43995 (Bj 1923?)

Abgespielter Zustand: "harter" Klang, leicht scheppernd, in die Hammerköpfe eingedrückte Rillen. Die Tiefe der Rillen betrug beim blanken Bezug mindestens die Hälfte des Durchmessers der Saite.

Restaurierung des Instruments regulär: Auswechseln der Hammerköpfe.

Alternativ: 1. Abschleifen der Hammerköpfe und Optimierung ihrer Form. 2. Stechen mit einer Nadel zur Auflockerung und Elastizitätserhöhung des Filzes.

2. Der Befund

2.1 Befunderhebungen

Dokumentation der Wirkung der (alternativen) Arbeitsgänge anhand von Spektren und Schwingungsbildern. Registrierung der Saitenbewegungen an der Stelle des Anschlags[1]

Ton g', Frequenz lt. Tabelle 392 Hz, gemessen 400 Hz

3-facher Bezug der Saiten, Länge der Saiten 45,9 cm, Anschlagpunkt 5,5 cm vom Stimmstocksteg

2.2 Arbeitsgänge der Restaurierung[2]

Zustand 1: abgespieltes Instrument vor der Überholung

Zustand 2: nach dem Abschleifen

Zustand 3: nach dem Stechen.

Zustand 4: nach 200 kräftigen Anschlägen im *ff*

2.2 Auftreten (damals) neuer merkwürdiger Nebeneffekt

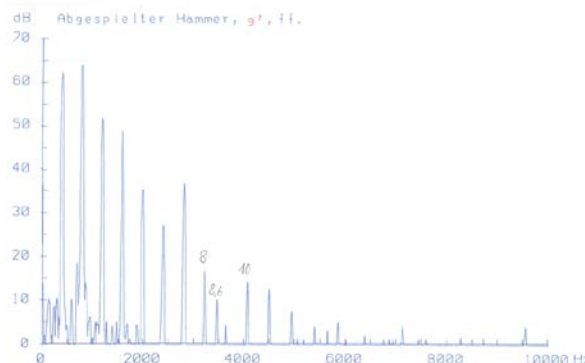


Abbildung 1: *ff*-Anschlag des Tones g' vor der Restaurierung (Spektrum im Zustand 1)

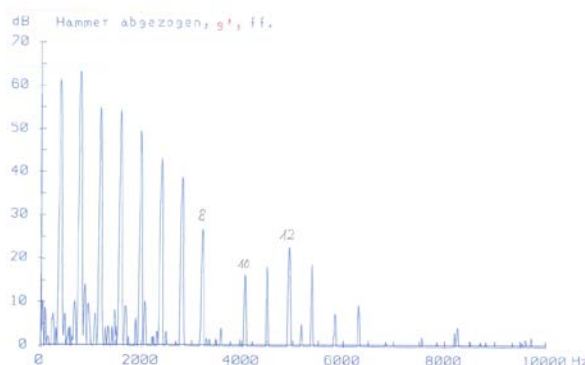


Abbildung 2: Der gleiche Ton nach dem Abziehen (Spektrum im Zustand 2)

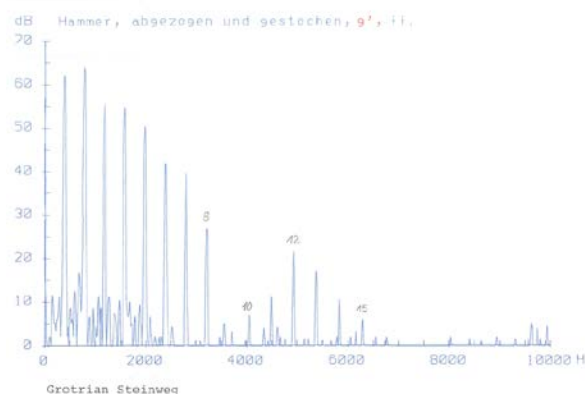


Abbildung 3: Der gleiche Ton nach dem Stechen (Spektrum im Zustand 3)

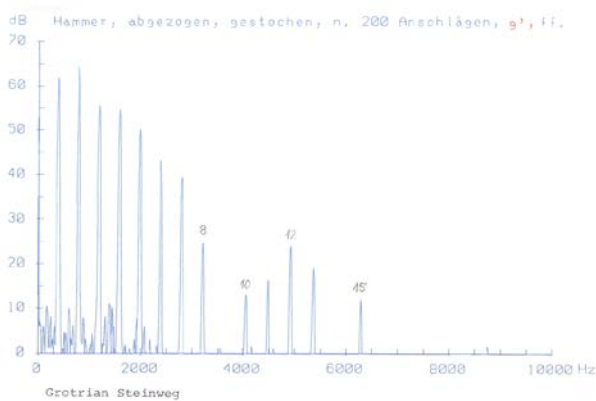


Abbildung 4: Der gleiche Ton nach 200 *ff*-Anschlägen (Spektrum im Zustand 4)

Durch das Abziehen wird im Bereich um 5000 Hz eine Gruppe von Teiltönen stärker, in der im *ff* vor allem der Teilton 12 hervortritt.

Durch das Stechen wird diese Gruppe in der Amplitude reduziert. Das gilt vor allem für die Teiltöne 10 und 11, aber auch für Teilton 12 selbst.

Nach 200 Anschlägen sieht das Spektrum aber nahezu so aus wie vor dem Stechen. Bei den Teiltönen 10, 11 und 12 sind Anstiege der Amplitude zu verzeichnen um 3 dB, 5 dB bzw. 10 dB. 200maliges Anschlagen einer Taste ist in der musikalischen Ausübung eine äußerst geringe Anzahl. Wenn nach so wenigen Anschlägen schon eine rückläufige Tendenz sichtbar ist, bedeutet das, dass die Wirkung schnell nachlässt. Das Stechen stellt also keine nachhaltige Maßnahme dar.

3. Erste Erklärungen anhand der Bewegung der Saite

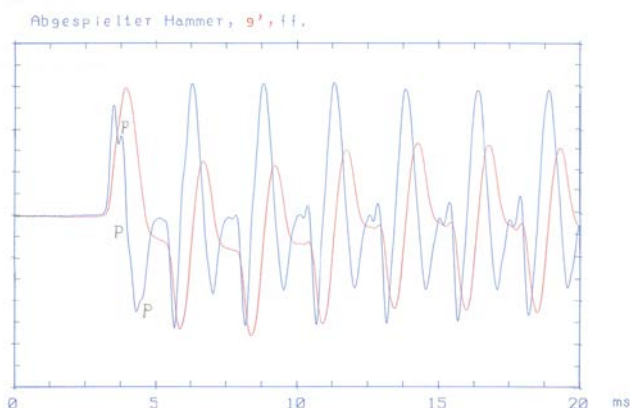


Abbildung 5: Zeitfunktion der Auslenkung (rot) und Schnelle (blau) im Zustand 1. Im Schwingungsbild erkennbare Prellschwingung *p*, die nach dem Abziehen sich über die ganze Saite ausbreitet d.

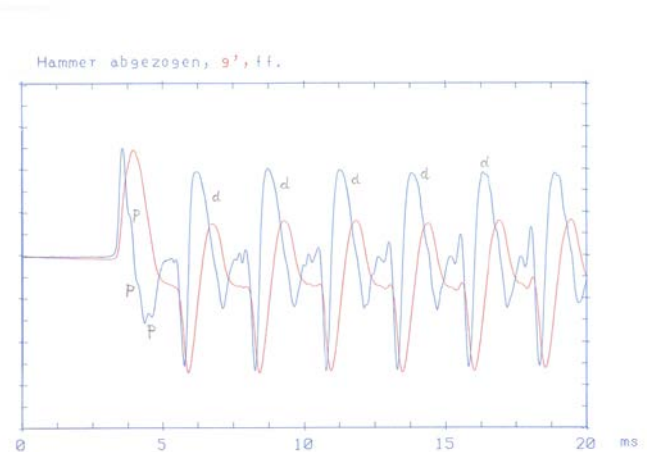


Abbildung 6: Zeitfunktion der Auslenkung (rot) und Schnelle (blau) im Zustand 2

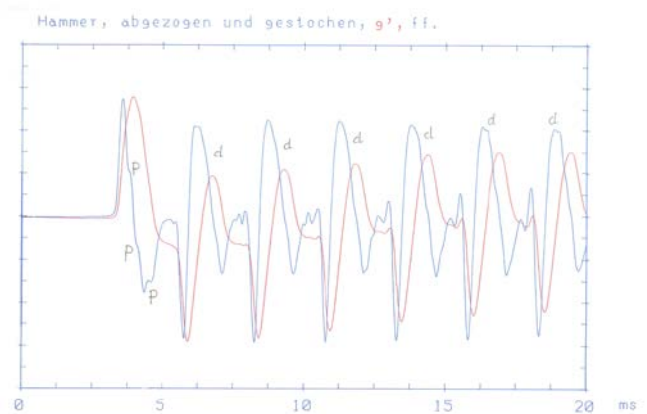


Abbildung 7: Zeitfunktion der Auslenkung (rot) und Schnelle (blau) im Zustand 3

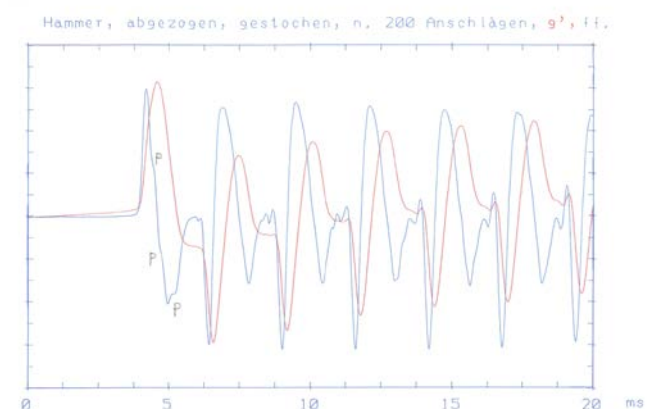


Abbildung 8: Zeitfunktion der Auslenkung (rot) und Schnelle (blau) im Zustand 4

Informationen zum Befund:

Bei einer Länge der Saiten 45,9 cm und einer Entfernung des Anschlagpunkts 5,5 cm vom Stimmstocksteg beträgt das Längenverhältnis rein geometrisch 8,3 (wenn „drehbare Lagerung“ vorhanden wäre und Saite ohne Biegesteife vorausgesetzt werden könnte).

Durch die feste Einspannung eines biegesteifen Drahtes an den Stegen ergibt sich ein verkürztes Teilungsverhältnis 8,6 beim *ff*-Anschlag. Beim *mf*-Anschlag tritt eine Komponente zwischen 7. und 8. Spektrallinie (etwa bei 7,5) stärker hervor als die 8,6-Komponente.

Schwingungstechnisches und geometrisches Längenverhältnis sind also zu unterscheiden.

Anmerkung:

Bei der Einschätzung dieser unharmonischen Komponenten ist zu beachten, dass alle höheren Teiltöne der Obertonverschiebung unterliegen, der 8. Teilton selbst also schon bei 8,x liegt. Die „Inharmonizität der Obertöne“ aufgrund der Biegesteife ist in der Spektraldarstellung sogar schon ab dem 6. Teilton unmittelbar sichtbar. Sie ist an den gedehnten Abständen der Spektralkomponenten im höheren Frequenzbereich zu erkennen.

Die Bezeichnung "abgespielter Hammer" bedeutet, daß im Filz des Hammerkopfes deutlich Rillen abgezeichnet waren, in diesem Fall 3 Rillen von dem 3-fachen Saitenbezug. Die Tiefe der Rillen betrug mindestens die Hälfte des Durchmessers der Saite, so dass die Saite auf dem Hammerkopf wie in einem 3-seitigen Widerlager festgehalten wurde. Diese Anschauung wird dadurch gestützt, dass die Prellschwingung hauptsächlich beim abgespielten Hammerkopf existiert und vorwiegend zwischen Stimmstocksteg und Hammerkopf nachweisbar ist. Diese Interpretation legen die Schwingungsbilder der Saite nahe. Die Reflexion der Prellschwingung am Hammerkopf wird deutlich durch die starke Rückwirkung auf den Hammerkopf während der Reflexion. Sobald der Hammerkopf abgezogen ist, also eine glatte Oberfläche hat, läuft diese Schwingung über den Hammerkopf hinweg und dehnt sich über die ganze Saite aus. Dadurch wird ihre Energie über die ganze Saite verteilt, und die Rückwirkung auf den Hammer am Auflagepunkt der Saite wird geringer. Im Spektrum ist sie deswegen nicht mehr zu sehen. Im Schwingungsbild jedoch kann man sie über einige Schwingungen (bis mindestens 20 ms) verfolgen.

Die rückläufige Entwicklung durch die 200 Anschläge ist in den Schwingungsbildern am besten bei den *mf*-Tönen zu erkennen. Die Schwingungsfigur nach 200 Anschlägen ist nahezu identisch mit der vor dem Stechen, also dem Hammerkopf im abgezogenen Zustand. Die Wirkungslosigkeit des Stechens zeigt sich hier also auch in der Darstellung der Zeitfunktion.

Bewegungsabläufe der Saite an der Stelle des Anschlags für den gleichen Ton *g'*, angeschlagen *mf*:

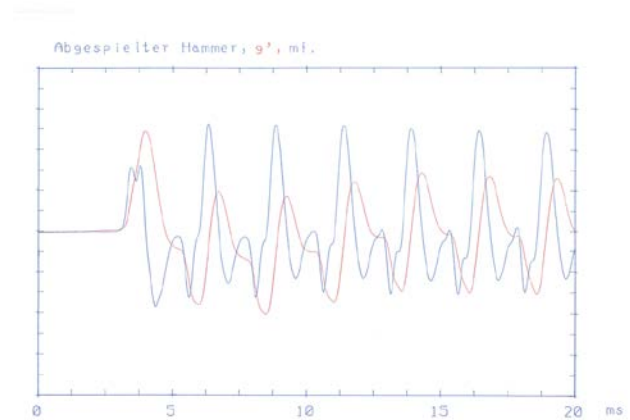


Abbildung 9: Auslenkung (rot) und Schnelle (blau) im Zustand 1

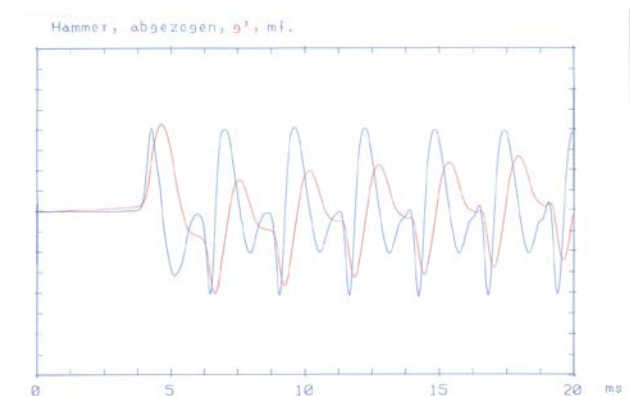


Abbildung 10: Auslenkung (rot) und Schnelle (blau) im Zustand 2

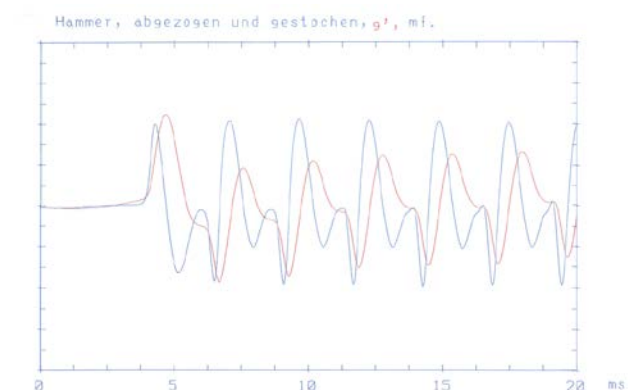


Abbildung 11: Auslenkung (rot) und Schnelle (blau) im Zustand 3

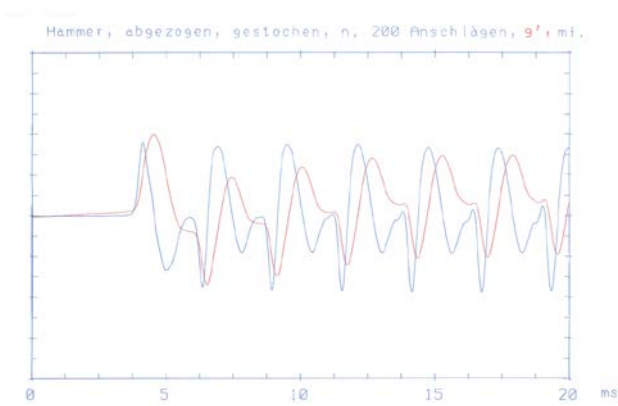


Abbildung 12: Auslenkung (rot) und Schnelle (blau) im Zustand 4

Diesen Befund bestätigen auch die Spektren von den *mf*-angeschlagen Tönen *g'*.

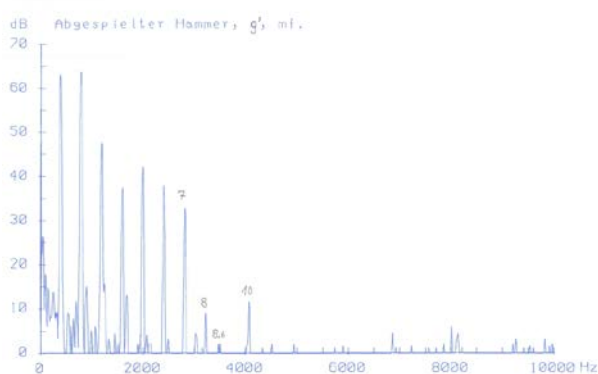


Abbildung 13: Spektrum im Zustand 1

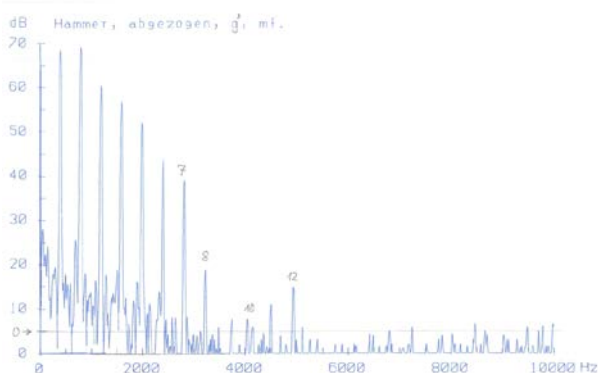


Abbildung 14: Spektrum im Zustand 2

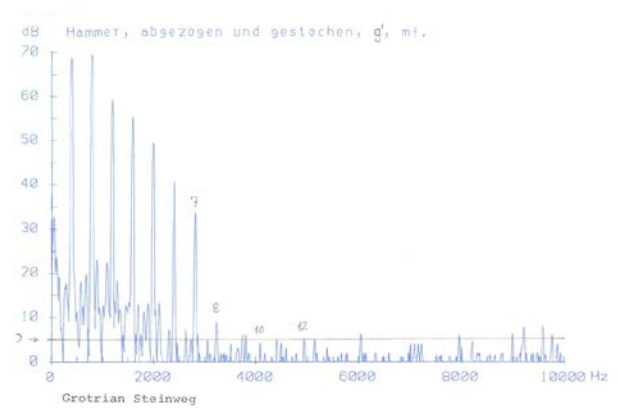


Abbildung 15: Spektrum im Zustand 3

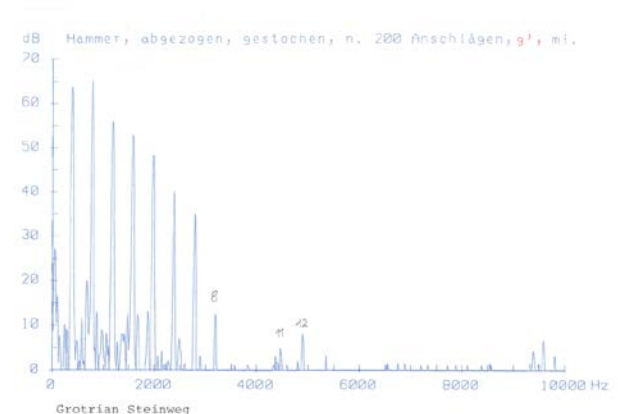


Abbildung 16: Spektrum im Zustand 4

4. Methode der Befunderhebungen

Magnetische Induktion bei Bewegungen der Saite im Magnetfeld erzeugt Ströme, die an den Enden der Saite abgegriffen werden. Ein Ende der Saite musste dazu isoliert befestigt werden, um einen Kurzschluss durch parallel liegende Saiten zu vermeiden.

Magnet: Material Alnico, magnetische Energiedichte ca. 40 kJoule/m^3 , Stärke 10000 Gauß

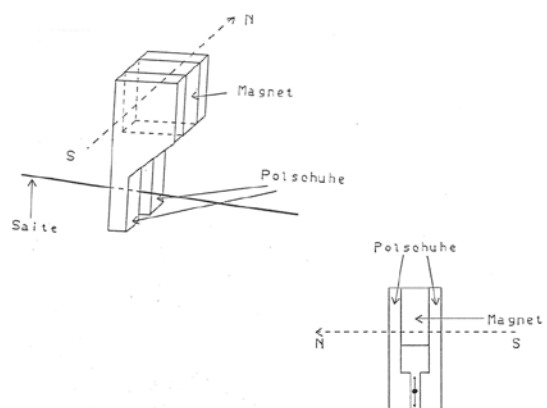


Abbildung 17: Form und Anbringung des Magneten

5. Erfolgreicher Nachweis an anderer Stelle

Der erfolgreiche Nachweis der Prellschwingung gelingt am besten in der Mitte des Saitenstücks, auf dem sie entsteht, nämlich zwischen Hammer und Stimmstocksteg.[3][4] Dort hat diese Schwingung das Maximum ihrer Amplitude, ihren Schwingungsbauch. Diese Art des Nachweises der Prellschwingung wurde an einem Hammerflügel (Sassmann H2) durchgeführt, bei dem die Hämmer nicht aus Filz, sondern aus Holz gefertigt und mit Leder bezogen waren. Die untersuchte Saite besaß das Teilungsverhältnis 10. Das folgende Bild zeigt diese Schwingung und beweist zugleich die 10-fache Frequenz der Grundschwingung. Im zugehörigen Spektrum tritt diese 10-fache Grundfrequenz als Spektralkomponente auch deutlich hervor und zwar an einer Stelle, an der die Envelope des Spektrums wegen der Anregungsstelle bei 1/10 der Saitenlänge eigentlich ein Minimum haben sollte.

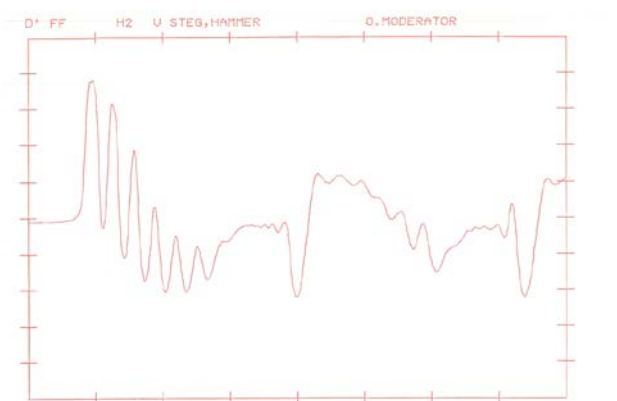


Abbildung 18: Die an einem Hammerflügel nachgewiesene Prellschwingung (Sassmann H2)

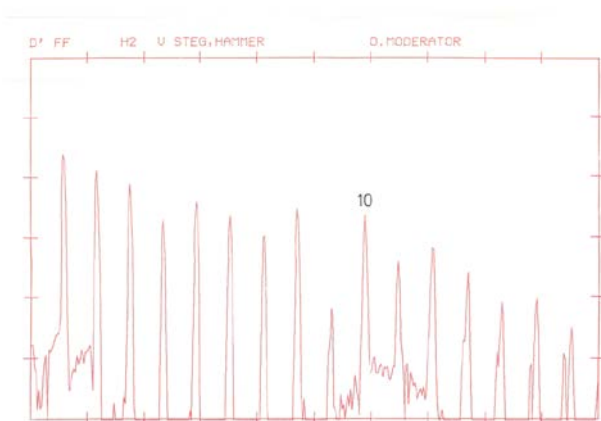


Abbildung 19: Das Spektrum dieses Tons eines Hammerflügels

6. Ausblick und Schluss

Entscheidend für den Klang von Flügel und Klavier ist der Hammer: Gewicht, Elastizität, Oberfläche und Anschlagpunkt.

Literaturliste

- [1] Fricke, J. P.: Die durch induktive Messung festgestellten Besonderheiten an Klavier- und Kontrabaßsaitenschwingungen. In: Instrumentenbau-Zeitschrift 46, Heft 2/3, 1992, S. 133-141, Abb. 9.
- [2] Fricke, J. P.: Intonation. In: C. Kammertöns, S. Mauser (Hrsg.). Lexikon des Klaviers, S. 359-360. Laaber 2006: Laaber.
- [3] Gätjen, B.: Das Hammerklavier - akustisches Bindeglied zwischen Clavichord und modernem Flügel? In: M. Lustig, (Hrsg.), Zur Geschichte des Hammerklaviers, S. 148-155. Michaelstein 1996. (Michaelsteiner Konferenzberichte Band 50).
- [4] Fricke, J. P.: Die Klangcharakteristik von zwei Hammerflügeln des Musikwissenschaftlichen Instituts der Universität zu Köln, erklärt durch Anschlagbewegung und Saitenanregung. In: M. Lustig, (Hrsg.), Zur Geschichte des Hammerklaviers, S. 156-170, Abb. 2. Michaelstein 1996. (Michaelsteiner Konferenzberichte Band 50).

Zur mechanischen Stimmgabel

Rolf Schmidt, Joachim Gier

Technische Universität Dresden, Email: rolf.schmidt@tu-dresden.de

Kurzfassung

Die mechanische Stimmgabel ist seit über 300 Jahren bekannt und gerade vor und nach der Stimmtonkonferenz 1885 in Wien hat sich eine Vielzahl von Forschern mit der Mechanik und der Akustik dieses schlichten Instrumentes beschäftigt. Die Arbeiten dieser Forscher bestimmen seit dieser Zeit unser Wissen auf diesem Gebiet und die Erkenntnisse von Euler, d' Alembert, Chladni, Young, Wheatstone, H. v. Helmholtz, Lissajous, Rayleigh u.a. gehören seitdem zum Bildungskanon an den Universitäten.

In der umfangreichen Stimmgabelliteratur werden die verschiedensten Fragen gestellt. Dazu gehören Fragen nach der normgerechten Herstellung und Gestalt der Stimmgabel, der Art und Weise der Anregung und auch nach dem Einfluss von Temperatur, Luftdruck und Magnetfeldern auf den Stimmton und die Obertöne. Die Beschäftigung mit dieser Literatur gibt einen interessanten Einblick in den Stand der Wissenschaft und die verwendeten Methoden. Gegenstand des Vortrages ist die kritische Hinterfragung einiger in der Literatur dokumentierter Aussagen zu Phänomenen der Stimmgabelschwingungen. Zum Beispiel die Aussage: Durch Temperaturerhöhung wird infolge der Veränderung des Elastizitätskoeffizienten des Stahls die Schwingungszahl verringert. Ist das Mythos oder Fakt? Diese und andere Fragen werden unter Verwendung neuzeitlicher Methoden der Simulation und der experimentellen Analyse behandelt und diskutiert.

Auswirkungen nichtlinearer Kopplungen auf die anschlagabhängige Klangfarbe der karibischen Steel pan

Michael Steppat¹

¹ *Beuth Hochschule für Technik, 13353 Berlin, E-Mail:steppat@beuth-hochschule.de*

Einleitung

Es gibt Tage, an denen Musiker ihr Instrument nicht besonders mögen, weil sie unter Umständen das Gefühl haben, das dessen Ansprache am Vortag viel besser war oder die gespielten Töne viel "sauberer" klangen. Neben den physikalischen Einflüssen, wie verschiedene Temperatur und Luftfeuchtigkeit, führen auch verschiedene physiologische Faktoren dazu, dass jedes Spiel durch den Musiker individuell anders wahrgenommen wird. Selbst bei einem Wegfall dieser Einflussgrößen, wenn z.B. Musik aufgenommen wurde und mehrfach danach angehört wird, können Wahrnehmung und Bewertung bei jedem erneuten Durchhören deutlich variieren. Das Zitat von Heraklit "Du kannst nicht zweimal in denselben Fluss steigen" unterstreicht diesen Umstand. Veränderungsprozesse im menschlichen Geist bewirken, dass die Wahrnehmung unserer Umwelt im ständigen Wandel ist.

Ebenso wie es unmöglich ist, zweimal in den gleichen Fluss zu steigen, ist es auch nicht möglich, zweimal den gleichen Ton wahrzunehmen. Bereits nach dem Hören des ersten Tons gelangt dieser ins Gedächtnis, welches den zweiten sofort als "Kopie" entlarvt. Ein Grund, warum lieblos programmierte Sequenzen von einem Drumcomputer den Eindruck einer Monotonie vermitteln können. Durch die fehlende Differenzierung der klanglichen Parameter verliert der Hörer das Interesse an der Darbietung.

Die gängigste Methode, programmierten musikalischen Sequenzen "Leben einzuhauchen" ist die Variation der Anschlagstärke. Im einfachsten Fall bewirkt diese Nuancen in der Dynamik, welche in der Folge für den Zuhörer an Berechenbarkeit verlieren und daher zu einer Steigerung der Aufmerksamkeit führen können.

Ist die szenische Handlung eines Films allzu voraussehbar, tritt ein ähnliches Problem wie bei der monotonen Drumcomputer-Sequenz auf. Der Zuschauer verliert schnell das Interesse. Mit seinen dramaturgischen Konzepten "Surprise", "Suspense" und "Mystery" gelang es Filmregisseur Alfred Hitchcock in seinen Filmen, die Aufmerksamkeit des Zuschauers zu halten.

Ein "Surprise" ist etwas im Ablauf der Handlung Überraschendes, mit welchem der Zuschauer nicht gerechnet hatte. Mit diesem Mittel kann die Aufmerksamkeit kurzfristig angehoben werden. In der Wahrnehmung von Klängen könnte der Zuschauer durch eine unerwartete Änderung von Klangparametern überrascht werden. Dazu zählen, neben der bereits oben angesprochenen Dynamik mit Änderungen der Lautstärke, auch die Variation der Zeitstruktur, bei welcher der Hüllkurvenverlauf der einzelnen Teiltöne verändert wird. Mit der Veränderung des Anschlags kann auch eine Veränderung der Klangfarbe

verbunden sein, wie z.B. beim Klavier, dessen Klang mit zunehmender Anschlagstärke obertonreicher wird. Hervorgerufen wird diese anschlagabhängige Kodierung der Klangfarbe durch die Kontaktzeit des Hammers mit der Saite [1]. Die Kontaktzeit nimmt mit schwächer werdenden Anschlag zu und dämpft somit die höheren Frequenzanteile. Die Kontaktzeit hängt von der Steifigkeit des Hammerfilzes ab, welcher wie einer Feder wirkt. Je größer die Steifigkeit, desto kürzer ist die Kontaktzeit. Beim Filz ist die Steifigkeit nichtlinear, d.h. mit zunehmender Anschlagstärke nimmt auch die Steifigkeit zu. Weitere für den Zuhörer überraschende Ereignisse können eine Änderung der räumlichen Anordnung sein, so z.B. wenn Schallquellen von links nach rechts wandern (Panning) oder der Entfernungseindruck sich verändert. In dem 1967 erschienenen Album "Axis: Bold as love" von Jimmy Hendrix wurde insbesondere dessen Leadgitarre von Toningenieur Eddie Kramer mit umfangreichen Panningeffekten versehen. Auch minimale zeitliche Unterschiede im Klangeinsatz (Timing) oder das Auslassen eines zu erwartenden Klangs, können zur Wahrnehmung einer Veränderung führen.

Mit "Suspense" kann im Unterschied zu "Surprise" die Aufmerksamkeit länger gehalten werden. Dem Zuschauer wird das Eintreffen eines bestimmten Ereignisses suggeriert, welches aber nicht eintrifft. So wie die Töne eines Dominantseptakkords nach einer Auflösung streben, können auch die Parameter einzelner Klänge den Zuhörer dazu veranlassen, sich deren Änderung herbeizuwünschen. Klingt z.B. eine Passage eines Stücks gewollt dumpf und tiefenlastig, so kann beim Zuhörer die Erwartung entstehen, dieses durch einen Regelvorgang zu beheben. Auch andere klangliche Unzulänglichkeiten, wie der durch Mittenlastigkeit hervorgerufene "Telefonhöreffeckt" oder künstlich hinzugefügte Störgeräusche bewirken eine Spannung.

Bei dem Konzept des "Mystery" sucht der Zuschauer nach einer Erklärung für den Handlungsablauf, z.B. wer bei einem Mord der Täter war, welche der Film aber zunächst vorenthält. Klänge die mit einfachen Sinusgeneratoren erzeugt werden, enthalten wenig "Mystisches". Dem Zuhörer gelingt es relativ schnell, die Klangentstehung nachzuvollziehen. Eine gewisse Undurchsichtigkeit kann mit der Modulation der Amplitude und/oder der Frequenz erreicht werden. In den ersten Analogsynthesizern, wie z.B. bei dem von Robert Moog entwickelten "Minimoog" wurde hierfür der Low Frequency Oscillator eingesetzt, der mit einer Frequenz von 0-20 Hz spannungsgesteuert die Amplitude oder die Frequenz verändert. Finden bei der Klangentstehung auch chaotische Prozesse statt, kann sichergestellt werden, dass jeder Ton ein individuelles Einzelstück ist.

Modellierung der nichtlinearen Kopplung

Chaotische Schwingungsvorgänge, die ihre Ursache in der nichtlinearen Kopplung von Moden haben, finden sich bei Instrumenten deren Klangkörper aus dünnwandigem Blech bestehen. Hierzu zählen Becken von Schlagzeugen, Gongs, der ostasiatische Tamtam und die karibische Steel pan.

Einen Ansatz, den Klang eines Tonfeldes der Steel pan physikalisch zu modellieren, bietet ein von Achong entwickeltes Modell, welches aus vier Masse-Feder-Dämpfer-Systemen besteht [2]. Jedes dieser vier Teilsysteme repräsentiert einen der jeweiligen Schwingungsmoden zugeordneten Teilton. Die Frequenzverhältnisse der ersten vier Teiltöne des Tonfeldes können harmonisch sein, möglich sind aber auch Stimmungen, bei welcher der 3. Teilton auf den 2,5-fachen Wert der Grundfrequenz eingestimmt wird. Für jede Mode (die tiefgestellte Zahl gibt die Nummer des Teiltönen an) kann eine Bewegungsgleichung (1) formuliert werden. Die Parameter ω_i charakterisieren die jeweilige Eigenfrequenz (als Kreisfrequenz) und die Parameter μ_i den Dämpfungsfaktor.

$$\begin{aligned}\ddot{x}_1 &= -\omega_1 x_1 - \mu_1 \dot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 &= -\omega_2 x_2 - \mu_2 \dot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 &= -\omega_3 x_3 - \mu_3 \dot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 &= -\omega_4 x_4 - \mu_4 \dot{x}_4\end{aligned}\quad [\text{m/s}^2] \quad (1)$$

Die Moden des Tonfeldes einer Steel pan sind untereinander mechanisch gekoppelt. Die Kopplung bewirkt, dass zwischen den Moden ein Austausch der Bewegungsenergie stattfindet. Rechnerisch kann die Kopplung dadurch nachvollzogen werden, dass die Auslenkung einer Mode eine Anregung einer anderen Mode bewirkt. Die Größe der Anregung hängt von einem Faktor ab. Dieser wird durch den als Kopplungsfaktor bezeichneten Parameter α_{uvi} festgelegt. Die Indices u, v, i ermöglichen dabei eine Zuordnung. Mit u und v wird die Mode angegeben, deren Auslenkung die Anregung bewirkt und der Index i bezieht sich auf die angeregte Mode. Bei quadratischer Kopplung sind u und v identisch.

In der folgenden Bewegungsgleichung (2) für die 2. Mode ist die Kopplung durch einen Beschleunigungsterm ausgedrückt. Hierdurch erhält die 2. Mode eine Anregung, welcher vom Quadrat der Auslenkung der 1. Mode abhängt.

$$\ddot{x}_2 = -\omega_2 x_2 - \mu_2 \dot{x}_2 + \alpha_{112} x_1^2 \quad [\text{m/s}^2] \quad (2)$$

Diese quadratische Kopplung bewirkt ein sehr dynamisches Verhalten des Spektrums. Kleine Anschläge führen zu einer geringen Anregung des 2. Teiltönen, was dazu führt, dass der 1. Teilton im Spektrum dominiert. Mit zunehmender Anschlagstärke rückt der 1. Teilton immer stärker in den Hintergrund. Eine weitere quadratische Kopplung besteht zwischen dem zweiten und vierten Teilton, welche über den Faktor α_{224} festgelegt wird. Somit entsteht bei der Steel pan eine anschlagsabhängige Kodierung der Klangfarbe, die in ihren Auswirkungen zwar Analogien zu der des Klaviers aufweist, die hierzu führenden Mechanismen, wie eben

gezeigt, aber unterschiedlich sind. Die Kontaktzeit der bei der Steel pan verwendeten Sticks spielt aber dennoch eine Rolle. Sticks für die Instrumente der tieferen Registerlagen haben eine dickere Umwicklung, was beim Anschlag zu einer Verlängerung der Kontaktzeit führt mit der damit verbundenen Dämpfung unerwünschter höherer Frequenzanteile.

Neben den quadratischen Kopplungen der tieferen Moden zu den höheren, existieren noch weitere lineare Kopplungen, welche auf die erste Mode zurückwirken. Auf diese wirken Auslenkungen der Moden 2 und 3, ebenso ist auch eine Kopplung der 1. und 2. Mode mit der 3. Mode vorhanden. Durch Kopplung und Gegenkopplung wird die Bewegungsenergie zwischen den Moden hin- und hergeleitet. Da dieser Vorgang periodisch ist, hat dies auf die Hüllkurve den gleichen Effekt wie eine Schwebung.

Mit zunehmender Anschlagstärke weisen die Spektren der angeschlagenen Tonfelder einen höheren Geräuschanteil auf. Das konnte durch Messungen an Instrumenten gezeigt werden, bei welchen die harmonischen Spektralanteile von Klängen verschiedener Anschlagstärken in Relation zum Gesamtspektrum gesetzt werden [3].

Das Modell von Achong kann mit Hilfe des Finite Differenzenverfahrens berechnet werden. Bei Berechnungen mit verschiedenen Anschlagstärken konnte ebenfalls der Effekt beobachtet werden, dass chaotische Anteile im Klang mit größerer Anschlagstärke zunehmen. Diese lassen sich bei den mit Hilfe eines Oktavbandfilters herausgefilterten Teiltönen als Phasenverdopplungen im Phasendiagramm erkennen.

FEM-Modellierung des Klangkörpers

Die Modellierung von Steel pan-Klängen mit vier gekoppelten Masse-Feder-Systemen durch das Differenzenverfahren ist zwar zur Simulation der Schwingungsverläufe einzelner Tonfelder geeignet. Fragen, welche die Wechselwirkung mit benachbarten Tonfeldern oder die Akustik des gesamten Klangkörpers betreffen, können damit nicht untersucht werden. Hier liefert die Finite Elemente Methode Ansätze. Vom Korpus des Instruments wird ein aus Schalenelementen und beweglichen Knoten bestehendes Modell entwickelt. Mit einer Diskretisierung von ca. 10.000 Knoten können die Schwingungsformen der jeweils ersten Eigenmoden für jedes Tonfeld berechnet werden. Das FEM-Modell einer Tenor-Steel pan, welches einen Tonumfang von zwei vollen Oktaven (D4-C#6) hat, ist in Abbildung 1 dargestellt [3]. Die Tonfelder sind in Quint- und Quartabständen ringförmig angeordnet.

Die Berechnungen basierten allerdings auf einem theoretischen Modell mit einer idealisierten geometrischen Form. Bei den Tonfeldern wurde vereinfachend von Schalenelementen mit einem konstanten Krümmungsradius ausgegangen. In der Realität ist die Krümmung der Tonfelder lokal sehr unterschiedlich und mitunter viel komplexer. Ein Modell, welches auf Geometriedaten eines realen Instruments basiert und für die Modellierung als Referenz dienen kann, wäre hier von Vorteil. Eine

Ermittlung der Modelldaten wäre über 3D-Laserscans möglich.

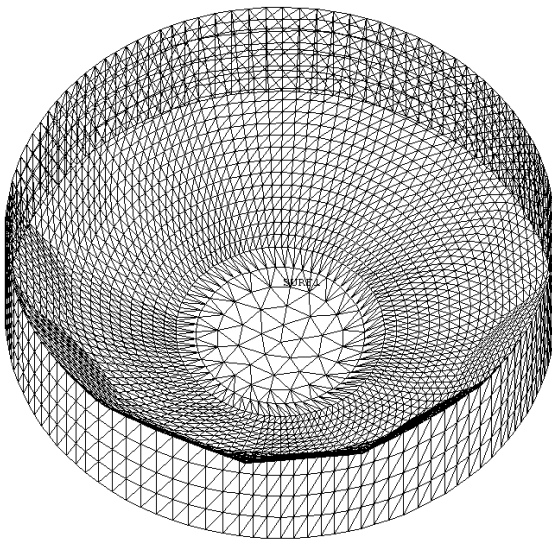


Abbildung 1: FEM-Modell einer Tenor Steel pan

Ein weitere Schwierigkeit bei der Berechnung ist das Vorhandensein interner Druck- und Zugspannungen, deren Verteilung ebenfalls lokal sehr unterschiedlich sein kann. Es ist zwar möglich, die Spannung in die Berechnung mit einzubeziehen. Die genaue Spannungsverteilung ist bei Instrumenten allerdings schwierig zu bestimmen. In Abbildung 2 ist die erste Mode des Tonfelds E4 dargestellt. Der glockenförmige Verlauf der Biegelinien deutet auf eine feste Einspannung hin und somit auf wenig Kopplung zu den benachbarten Tonfeldern.

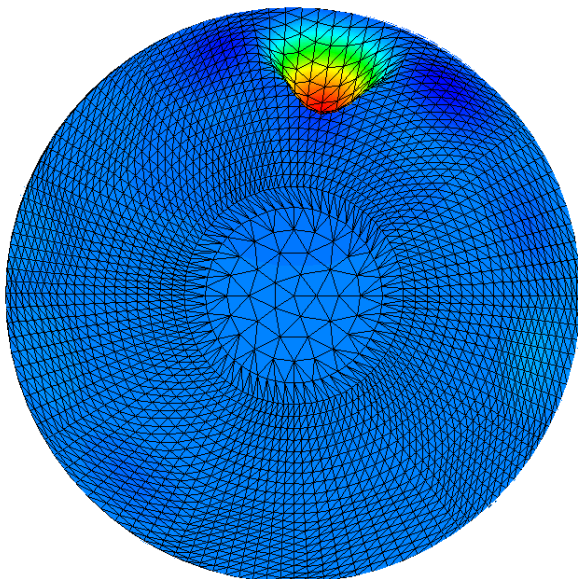


Abbildung 2: Erste Mode des Tonfelds E4. Die Amplitude wurde zur besseren Veranschaulichung maximiert.

Die Schwingungsberechnung erfolgt bei der FEM in einem Differentialgleichungssystem, bei welchem die Bewegungs-

gleichung für jeden Freiheitsgrad durch eine Differentialgleichung für ein Masse-Feder-Dämpfersystem formuliert werden kann. Die Gleichungen lassen sich in einem System zusammenfassen, welches aus einer Massenmatrix **M**, einer Steifigkeitsmatrix **K** und einer Dämpfungsmatrix **R** besteht (Gleichung 3).

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} = -\mathbf{K}\mathbf{x} - \mathbf{R}\dot{\mathbf{x}} \quad [\text{N}] \quad (3)$$

Die Größe der quadratischen Matrix ist durch die Anzahl der Freiheitsgrade gegeben. Somit steigt der Rechenaufwand abhängig von der Anzahl der Freiheitsgrade ebenfalls quadratisch.

Eine PC-basierte Berechnung eines Modells mit 10.000 Knoten (20.000 Freiheitsgrade) dauert etwa eine Stunde. Dies erfordert eine sorgfältige Planung bei der Bestimmung der Modelldaten. Ein intuitives Arbeiten, bei welchen die Modelldaten schnell angepasst werden können, scheidet bei dieser Methode aus.

Ein möglicher Lösungsansatz zur Beschleunigung der Berechnungen wäre, diese zu parallelisieren. Mit Hilfe der General Purpose Computation On Graphics Processing Unit (GPGPU) können Berechnungen parallel auf einer Grafikkarte durchgeführt werden. Im Gegensatz zur CPU mit derzeit vier bis acht Kernen, besitzt eine Grafikkarte zur Berechnung der Grafikausgabe bis zu 2.880 Streamprozessoren. Die Programmierschnittstelle Open Computing Language (OpenCL) ermöglicht mit ihrem Plattform-Modell die Programmierung dieser Prozesse. Das System besteht hierbei aus einem Host, welcher die einzelnen Prozessoren verwaltet und die Berechnungen zur Laufzeit zuweist. Für die grafische Ausgabe der Modellierungsdaten kann OpenCL auf die Objekte der Grafikbibliothek OpenGL zugreifen. In der Industrie gebräuchliche FEM-Programme wie ANSYS oder NASTRAN unterstützen mit Open CL die Durchführung paralleler Berechnungen [4].

Nuancen im Spektrum

Die Steel pan ist eines der wenigen Instrumente, bei welchem nicht nur die Grundtöne gestimmt werden müssen, sondern auch die im Spektrum enthaltenen Teiltöne. Gestimmt werden 2-5 Teiltöne. In Trinidad ist es unter Tunern üblich, nur die ersten beiden bzw. die ersten drei Teiltöne zu stimmen. Hierdurch ist der Geräuschanteil höher, welcher dem Instrument eine gewisse Rauigkeit gibt. Der deutsche Pan-Bauer Eckhard C. Schulz stimmt hingegen 5 Teiltöne in jedem Tonfeld [5].

Der 3. Teilton kann in verschiedenen Verhältnissen zum Grundton gestimmt werden. Möglich sind die zum Grundton relativen Verhältnisse: 1:2,5; 1:3 und 1:4. Die Stimmung im Verhältnis 1:2,5 entspricht bezogen auf den Grundton dem Intervall: Oktave+Terz und erzeugt einen rauheren glockenähnlichen Klang. Eine harmonische Stimmung, welche dem Intervall: Oktave+Quinte entspricht, im Verhältnis 1:3 wirkt weich. Im Verhältnis 1:4 (Doppeloktave) wirkt der Klang hell und mitunter spitz. In Hörversuchen, bei welchen den Versuchsteilnehmern Klänge

mit diesen Verhältnissen im Paarvergleich angeboten wurden, konnte eine Präferenz zum Verhältnis 1:2,5 festgestellt werden.

Schallabstrahlung und Aufnahme

Bei geringem Anschlag schwingt nur das angeschlagene Tonfeld selbst. Die ersten Moden werden wie Monopolquellen abgestrahlt. Alle zweiten Moden werden hingegen wie Dipole abgestrahlt [6]. Mit zunehmender Anschlagstärke werden die benachbarten Tonfelder angeregt, die nun auch zu Schallquellen werden und die Abstrahlung durch Interferenzen beeinflussen. Somit findet bedingt durch diese Abstrahlung eine zusätzliche anschlagabhängige Veränderung des Spektrums statt.

Der Übergang von einem für den Zuhörer noch als angenehm empfundenen Klang zu einem geräuschhaften weniger angenehmen, kann beim Spiel bedingt durch die nichtlineare Kopplung sehr rasch erfolgen. Dies setzt gerade im Zusammenspiel mit größeren Klangkörpern, wie z.B. bei einem Orchester voraus, dass der Spieler nicht allzu forciert spielen darf und sein Instrument selbst gut hören muss, was ggf. über ein Monitoring sichergestellt werden muss.

Für die Mikrofonierung von Steel pans eignen sich Großmembranmikrofone und dynamische Mikrofone [7]. Der Abstand zum Instrument hängt dabei von der Tonlage ab. Die Tenor und Double Second werden in einer Entfernung von 0,8 m aufgenommen. Dabei wird das Mikrofon direkt über dem Instrument platziert. Bei den Instrumenten der tieferen Lagen wie Bass und Cello wird ein kleinerer Abstand im Bereich zwischen 0,3 und 0,4 m gewählt.

Zusammenfassung

"Und jedem Anfang wohnt ein Zauber inne", schreibt Hermann Hesse in seinem Gedicht "Stufen". Auch wenn Hesse in diesem Gedicht eher damit Lebensabschnitte meinte, scheint diese Analogie auch auf die relativ kurze Lebensdauer einzelner Klangereignisse zuzutreffen. Nicht-lineare Gesetzmäßigkeiten in der Signalverarbeitungskette bei der Klangentstehung oder -übertragung führen zu einer Art Unberechenbarkeit, die jedes Klangereignis individuell machen. Ein Spannungsfeld bei der Produktion von Audioaufnahmen sind häufig auch die Qualitätsparameter "Zeitliche Durchsichtigkeit" und "Registerdurchsichtigkeit". Aufnahmen die allzu transparent klingen, werden vom Hörer oftmals genauso häufig abgelehnt, wie Aufnahmen bei welchen das Gegenteil vorherrscht. Einen Mittelweg hier zu finden, erweist sich in vielen Fällen als eine "Gratwanderung".

Als ebensolche erweist sich auch das Stimmen der Steel pan. Die Tonfelder sind nicht vollständig voneinander entkoppelt, so dass die Stimmung eines Tonfelds auch die Stimmung der benachbarten mit beeinflusst. Dies erfordert sehr viel Erfahrung und Fingerspitzengefühl. Neben der geometrischen Form haben auch die internen Spannungen sehr großen Einfluss auf die Frequenz der einzelnen Teiltöne. Die durchgeführte Modellierung mit einer idealisierten geo-

metrischen Struktur zeigt zwar, dass es prinzipiell möglich ist, die Klangentstehungsmechanismen und die Entkopplung der Tonfelder nachzuvollziehen, greift aber für eine Untersuchung der Einflüsse interner Spannungen und geometrischer Feinstrukturen zu kurz. In weiteren Studien ist daher ein Modell erforderlich, dessen geometrische Daten ein reales Instrument abbilden.

Literatur

- [1] Fricke, J.P. : Hammer-Berührungsdauer und Saitenform bei der angeschlagenen Klaviersaite. In: Fortschritte der Akustik, FASE/DAGA 82, S. 891-894
- [2] Achong, A.: The steelpan as a system of non-linear mode-localized oscillators, I: Theory, Simulations, Experiments and Bifurcations, Journal of Sound and Vibration (1996) 197(4), 471-487
- [3] Steppat, M.: Untersuchungen zur Klangerzeugung und Klangwahrnehmung der karibischen Steeldrum, Peter Lang-Verlag, Frankfurt, 2009
- [4] Numerische Strukturmechanik,
URL:<http://www.nvidia.de/object/computational-structural-mechanics-de.html>
- [5] Wie klingen E.C.S-SteelPans,
URL:http://www.ecs-steeldrums.de/index_4_11.html
- [6] Copeland, B.; Morrison, A.; Rossing, T.D.: Sound radiation from Caribbean steelpan. J. Acoust. Soc. Am. 117(1) January 2005, 375-382
- [7] Capturing the Sound of Steel Drums,
URL:<http://www.youtube.com/watch?v=RaRdsbHB1q4>

Der Einfluss unterschiedlicher Deckelkonstruktionen auf den Rohrflötenklang

A. Gloos¹, J. Angster¹, A. Miklós²

¹Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

²Steinbeis Transferzentrum Angewandte Akustik, 70499 Stuttgart

Einleitung

Die Forschungsgruppe „musikalische Akustik“ des Fraunhofer Instituts für Bauphysik in Stuttgart befasst sich seit nunmehr über zwei Jahrzehnten mit der angewandten Orgelforschung. Im Rahmen von Forschungsprojekten analysieren Wissenschaftler die physikalische Funktionsweise von Orgelteilen und Orgelbaugruppen. So wurden bereits tiefgründige Studien über die Klangentstehung bei Labial- als auch bei Zungenpfeifen durchgeführt [1-6]. Anhand derer ist es möglich, den Einfluss sowie die Funktion der unterschiedlichen Pfeifenparameter zu verstehen und ggf. zu optimieren. Die Forschungsergebnisse dienen aber auch als Basis für die Entwicklung computergestützter Software zur zuverlässigen Planung und Dimensionierung von Orgelpfeifen [7-8]. Darüber hinaus wurden Untersuchungen an Orgelbaugruppen durchgeführt, welche nur indirekt am Klang der Orgel beteiligt sind. So wurde beispielsweise ein neuartiges Windsystem entwickelt, welches in der Lage ist, die durch das Orgelspiel bedingten Winddruckschwankungen schneller als ein herkömmliches Windsystem auszugleichen [9]. Dadurch entsteht eine ausgewogene und nicht durch Druckschwankungen beeinträchtigte Klangqualität. Seit Neuestem können nun auch Versuche und Neuentwicklungen an der institutseigenen Forschungsorgel durchgeführt und getestet werden [10]. Unerlässlich für die Forschungsarbeit ist stets die Kommunikation mit den Orgelbaufachleuten, da diese über praktische Fertigkeiten und Kenntnisse verfügen, welche für die Arbeit der Wissenschaftler wertvoll und grundlegend sind. Aber auch den Orgelbaufachleuten wird aus den Erkenntnissen der Orgelforschung eine völlig neue Sichtweise geboten, die nicht selten dazu führt, dass Arbeitsabläufe und Arbeitsschritte überdacht und optimiert werden. Dadurch tun sich neue Wege auf, die zur effektiveren und kostengünstigeren Produktion sowie einer Steigerung der Klangqualität beitragen.

In Zusammenarbeit mit Orgelbauunternehmen ist auch die Idee über eine Projektarbeit entstanden, die sich mit dem Einfluss unterschiedlicher Deckelkonstruktionen auf den Rohrflötenklang befasst. Im Folgenden wird die Problematik existierender Deckelsysteme erläutert und neuartige Konstruktionskonzepte dargestellt, die den bekannten Schwachstellen entgegenwirken. Anschließend zeigen die Resultate aus akustischen Messungen den Einfluss der verschiedenen Deckelkonstruktionen auf den Klang. Abschließend werden die Lösungskonzepte aus klanglicher als auch aus wirtschaftlicher Sichtweise bewertet.

Grundlagen

Die Rohrflötenpfeife (**Abb. 1**) ist eine Labialpfeife mit einem sehr warmen und zurückhaltenden Klangcharakter. Die Besonderheit dieser Pfeifenart liegt darin, dass die Pfeifenmündung mit einem Deckel versehen ist, indem ein Röhrchen eingelötet ist. Mithilfe dieses Bauteils lassen sich gezielt Teiltöne verstärken. Damit dies funktioniert, müssen die Dimensionen von Pfeifenresonator und Röhrchen exakt aufeinander abgestimmt sein. Für diese Aufgabe wurde eine Software entwickelt, welche die Abmessungen dieser Komponenten in Abhängigkeit der gewünschten Teiltonverstärkung kalkuliert [11-14].

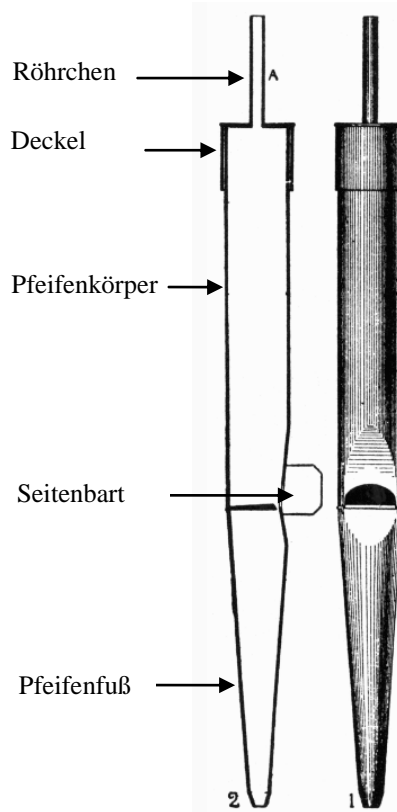


Abbildung 1: Schnitt- und Frontansicht einer typischen Rohrflötenpfeife [15]

Um den Deckel auf dem Pfeifenkörper zu befestigen, ergeben sich zwei in der Praxis angewandte Möglichkeiten. Bei der bevorzugten Variante wird der Deckel auf den Pfeifenkörper gelötet (**Abb. 2**). Laut Aussage der Fachleute erzeugen Rohrflöten mit dieser Deckelbefestigungsart erfahrungsgemäß den besten Rohrflötenklang. Jedoch bestimmt die Deckelposition die Tonhöhe der Pfeife. Wird dieses Bauteil also aufgelötet, lässt sich dessen Position und

somit die Stimmung der Pflfe nicht mehr ohne weiteres Verändern.

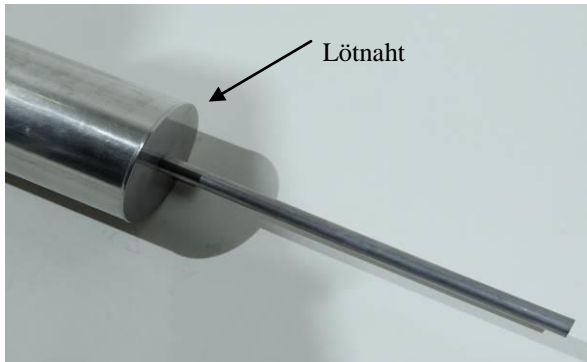


Abbildung 2: Rohrflöte mit aufgelötetem Deckel

Eine weitere Möglichkeit stellt der auf den Pfeifenkörper aufgesetzte Deckel dar (**Abb. 3**). Dieser ist innerhalb eines gewissen Bereichs stramm auf dem Pfeifenkörper verschiebbar, wodurch sich die Frequenz der Pfeife bequem einstellen lässt. Zwischen Pfeifenkörper und Deckel befindet sich eine Filzdichtung, die für eine luftundurchlässige Verbindung sorgt. Jedoch ist das Dichtungsmaterial einer ständigen Druckbelastung ausgesetzt. Gibt der Filz nach, so verringert sich die Haftkraft des Deckels. Aufgrund dessen kann der Deckel rutschen, wodurch die Gewährleistung einer dauerhaft gleichbleibenden Tonhöhe nicht gegeben ist.



Abbildung 3: Blick auf Rohrflöten mit aufgesetzten Deckeln und Filzdichtungen [16]

Aus den geschilderten Nachteilen ergeben sich die Anforderungen, die bei der Entwicklung folgender Deckelkonstruktionen berücksichtigt worden sind.

Lösungsvarianten

Lösungsvariante 1 (**Abb. 4**) bildet einen aufgesetzten Deckel mit schrägem Ende, der dem Gang eines Schraubengewindes gleicht. Am Pfeifenresonator ist eine Lasche angelötet. Je nach Drehsinn wandert der Deckel entlang der Lasche nach oben bzw. nach unten. Dies ermöglicht eine positionsunabhängige Sicherung des Deckels gegen Rutschen.

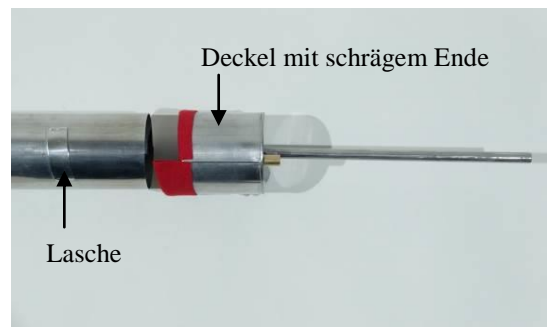


Abbildung 4: Aufgesetzter Deckel mit schrägem Ende und Lasche (Lösungsvariante 1)

Die Lösungsvariante 2 (**Abb. 5**) verfolgt dasselbe Prinzip wie Variante 1. Jedoch sind an den Deckel zwei Klangbrücken aus federhartem Messing angelötet. Bei aufgesetztem Deckel drücken diese auf den Pfeifenresonator. Dadurch sollen die Schwingungen des Pfeifenkörpers, vorbei an der Filzdichtung, auf den Deckel übertragen werden. Dieses Prinzip findet erfolgreich Anwendung bei dem Blasinstrument Klarinette. Eine Klangbrücke zwischen Mundstück und Birne führt dort zu einer Verbesserung der Klangqualität.

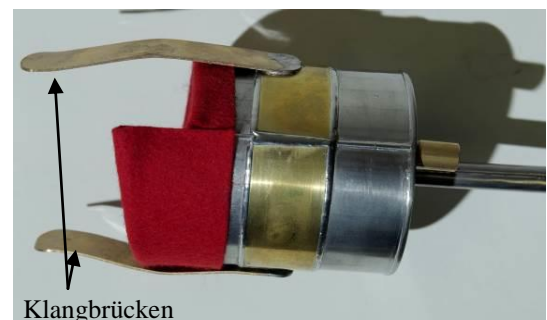


Abbildung 5: Aufgesetzter Deckel mit schrägem Ende und Klangbrücken (Lösungsvariante 2)

Abb. 6 stellt die Bauvariante 3 dar, bei der sich der Deckel im Inneren des Pfeifenkörpers befindet. Auf eine Dichtung wird hierbei verzichtet. Der Deckel steht somit im direkten Kontakt mit dem Resonator der Pfeife, wodurch eine mögliche Dämpfung zwischen Resonator und Deckel ausgeschlossen werden kann. Mithilfe einer Rohrschelle ist der Deckel gegen Rutschen gesichert.

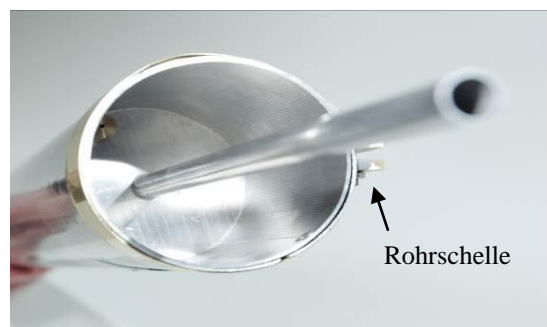


Abbildung 6: Zylindrischer Innendeckel ohne Dichtung (Lösungsvariante 3)

Lösungsvariante 4 (Abb. 7) besteht im Wesentlichen aus zwei PVC-Kunststoffscheiben und dem Röhrchen. Eine dieser Scheiben befindet sich im Inneren des Resonators, wo es für die Regulierung der Tonhöhe zuständig ist. Die äußere Scheibe dient zur Abdeckung der Pfeifenmündung. Darüber hinaus kann darauf optional ein Klemmring aufgelegt werden, der das Röhrchen umgibt und so das System gegen Rutschen sichert.

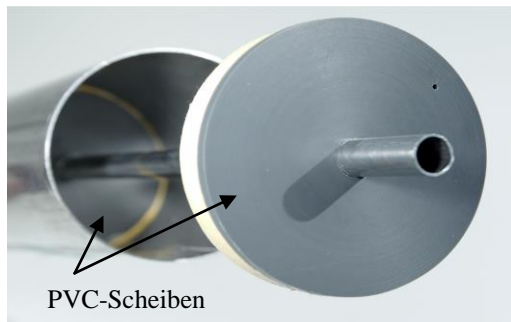


Abbildung 7: PVC-Innendeckel (Lösungsvariante 4)

Messergebnisse

Zur Analyse des Einflusses der Deckelkonstruktion auf den Pfeifenklang wurden Messungen mit den unterschiedlichen Lösungsvarianten an Labium, Röhrchenende und im Deckel durchgeführt. Um festzustellen, ob die einzelnen Lösungsvarianten im Bezug zur aufgelöteten Deckelkonstruktion tatsächlich eine Klangänderung hervorrufen, wird im Folgenden stets die Hüllkurve des Spektrums der Referenzpfeife (aufgelöteter Deckel) mit denen der einzelnen Lösungsvarianten gegenübergestellt. Das Frequenzspektrum ist aus dem vom Hörer wahrgenommenen Klang, gemessen am Labium, gebildet.

Abb. 8 stellt die Hüllkurven des Spektrums der Referenzpfeife (schwarze Kurve) und der Variante 1 (rote Kurve) dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass bis zum 9. Teilton kaum eine Änderung vorhanden ist.

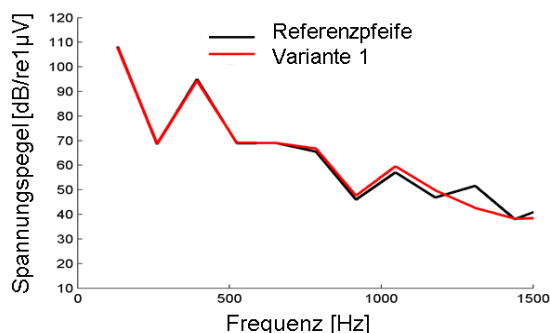


Abbildung 8: Vergleich zwischen Referenzpfeife und der Deckelkonstruktion mit schrägem Ende (Variante 1)

Folgendes Diagramm (Abb. 9) zeigt die Gegenüberstellung zwischen Referenzpfeife und Variante 2. Hierbei liegen die Spannungspegel der Deckelkonstruktion mit schrägem Ende und Klangbrücken über denen der Referenzpfeife. Der Verlauf der beiden Hüllkurven ist aber dennoch bis zum 9. Teilton identisch.

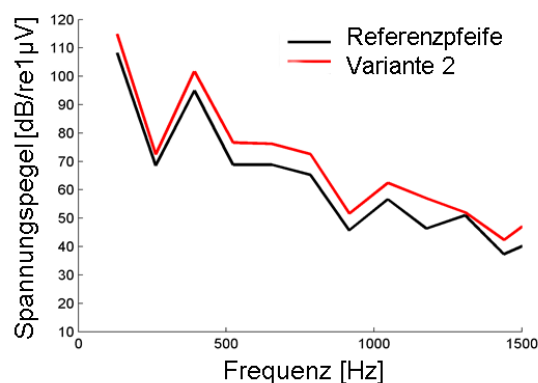


Abbildung 9: Vergleich zwischen Referenzpfeife und der Deckelkonstruktion mit schrägem Ende und Klangbrücken (Variante 2)

In **Abb. 10** ist die Referenzpfeife zusammen mit der Deckelbauvariante 3 gegenübergestellt, wobei auch hier ein ähnliches Verhalten wie bei der vorherigen Deckelbauart vorliegt. Die Werte der Messungen mit zylindrischem Innendeckel ohne Dichtung weisen ein geringes Offset gegenüber der Referenzpfeife auf. Der Hüllkurvenverlauf ist aber über den kompletten Frequenzbereich identisch.

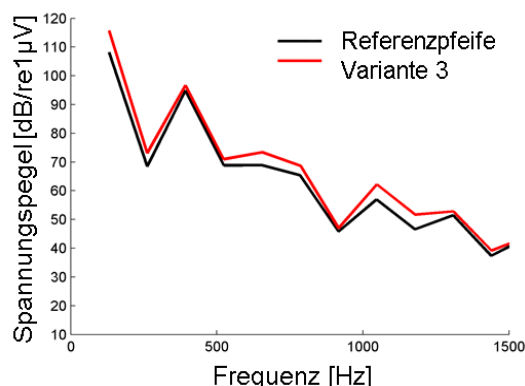


Abbildung 20: Vergleich zwischen Referenzpfeife und dem zylindrischen Innendeckel (Variante 3)

Betrachtet man nun **Abb. 11**, in der die Hüllkurve von Variante 4 und der Referenzpfeife dargestellt ist, so erkennt man auch hier keine wesentlichen Unterschiede im Frequenzspektrum.

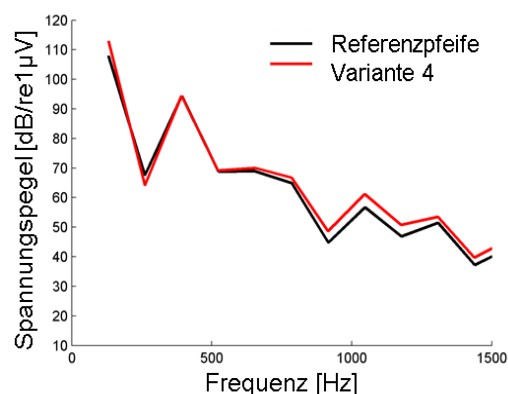


Abbildung 31: Vergleich zwischen Referenzpfeife und dem PVC Deckel (Variante 4)

Zusammenfassung

Eine abschließende Beurteilung der einzelnen Varianten unter klanglichen als auch wirtschaftlichen Aspekten kommt zu dem Schluss, dass sich die Herstellung des Deckels mit Klangbrücken (Variante 2) als sehr zeitintensiv erweist. Der Vergleich des Hüllkurvenverlaufs dieser Variante mit dem der Referenzpfeife ergibt trotz Klangbrücken keine wesentlichen Unterschiede im Klangcharakter. Stellt man also den klanglichen Nutzen dem herstellungsbedingten Mehraufwand gegenüber, so ist ein praktischer Gebrauch dieser Variante eher fraglich.

Auch der zylindrische Innendeckel (Variante 3) unterscheidet sich klanglich nicht wesentlich von der Referenzpfeife. Bei deren Herstellung wird aber höchste Präzision abverlangt, da der Außendurchmesser des Deckels exakt auf den Innendurchmesser des Pfeifenkörpers abgestimmt sein muss. Diese Tatsache geht mit einem hohen zeitlichen Mehraufwand einher, der nicht durch klangliche Vorteile gerechtfertigt werden kann.

Betrachtet man die Deckelkonstruktionen mit schrägem Ende (Variante 1) und aus PVC (Variante 4), so stehen diese aus klanglicher Sicht auf keinem Fall der aufgelöteten Deckelkonstruktion nach. Gleichzeitig bieten diese beiden Systeme aber auch die Möglichkeit, den optimalen Klang der Pfeife durch freies Verschieben des Deckels einzustellen. Ist dessen gewünschte Position erreicht, so sorgt die Lasche bzw. der Klemmring auf einfache Art und Weise für einen sicheren und dauerhaften Halt des Deckels. Für diese beiden Bauvarianten ergeben sich keine zeitlichen als auch materiellen Mehrkosten, weshalb diese Bauarten durchaus solide Alternativen zur aufgelöteten Deckelkonstruktion darstellen.

Abschließend soll die These „Rohrflöten mit aufgesetztem Deckel erzeugen den besten Rohrflötenklang“ hinsichtlich Faktum oder Mythos beurteilt werden. Die Antwort ist sicherlich zweigeteilt. Allein aus klanglicher Sicht kann die Meinung der Orgelbauer nicht bestätigt werden. Die Messergebnisse zeigen deutlich, dass sich die einzelnen Varianten nur geringfügig von der Referenzpfeife unterscheiden. Fakt ist hingegen die Tatsache, dass aufgesetzte Deckel keine Arretierung gegen Rutschen besitzen. Aufgrund von material- und temperaturbedingten Gegebenheiten kann nicht immer von einer ausreichenden Haftkraft zwischen Deckel und Pfeifenkörper ausgegangen werden. Daraus ergibt sich, dass eine mangelnde Sicherung des Deckels auf Dauer den Klang bzw. die Stimmung der Pfeife verändert.

Die vier vorgestellten Deckelkonstruktionen sind allesamt gegen ein Rutschen des Deckels konzipiert. Grund genug, um die eine oder andere Lösungsvariante beim Bau von Rohrflötenregistern anzuwenden und deren Klangverhalten im Laufe der Jahre zu beobachten.

Literatur

- [1] A. Miklós and J. Angster, "Properties of the Sound of Flue Organ Pipes," *Acustica united with Acta Acustica*, vol. 86, pp. 611-622, 2000.
- [2] G. Paál, J. Angster, W. Garen, and A. Miklós, "A combined LDA and flow-visualization study on flue organ pipes," *Experiments in Fluids*, vol. 40, pp. 825-835, 2006
- [3] H. J. Außerlechner, T. Trommer, J. Angster, and A. Miklós, "Experimental jet velocity and edge tone investigations on a foot model of an organ pipe," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 126, no. 2, pp. 878-886, 2009
- [4] A. Miklós, J. Angster, S. Pitsch, and T. D. Rossing, "Reed vibration in lingual organ pipes without the resonators," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 2, no. 113, pp. 1081-1091, 2003
- [5] A. Miklós, J. Angster, and S. Pitsch, "Interaction of reed and resonator by sound generation in a reed organ pipe," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, no. 5, pp. 3121-3129, May 2006
- [6] N. H. Fletcher, T. D. Rossing, "The physics of musical instruments", Springer Science+Business Media Inc. New York, NY 10013, USA, p.560 (1991)
- [7] Development of an innovative organ pipe design method. EU Project, Contract No: G1ST-CT-2002-50267 (DEMORGIPE), (2003-2005)
- [8] S. Adachi, "Principles of sound production in wind instruments"; *Acoustical Science and Technology* 25 (6), 400-405 (2004)
- [9] Advanced Computer Designed Open Wind Systems for Pipe Organs. EU CRAFT-1999-70755 (COMPDESORG) (2002-2003)
- [10] Die Forschungsorgel;
<http://www.fraunhofer.de/de/fraunhofer-forschungsthemen/themenspezial/forschungsorgel.html>
- [9] Rucz, Péter; Trommer, Thomas; Angster, Judit; Miklós, András; Augusztinovicz, Fülöp: "Sound design of chimney pipes by optimization of their resonators. *J. Acoust. Soc. Am.* 133 (1), January 2013 (529-537)
- [11] Rucz, Péter; Augusztinovicz, Fülöp; Angster, Judit; Fiala, Péter, Trommer, Thomas; Miklós, András: Optimization algorithms for the sound design of chimney and tuning slot organ pipes. DAGA 12 in Darmstadt, DEGA, 2012, S. 205-206. , CD-ROM
- [12] Angster, J., Miklos, A., Rucz, P., Augusztinovicz, F.: The Physics and Sound Design of Flue Organ Pipes. 164th Meeting of the Acoustical Society of America, Kansas City, Missouri, 22 - 26 October 2012. *J. Acoust. Am.*, Vol. 132, No. 3, Pt.2, 2069, (2012)
- [13] S. J. J. M. F. Kokkermans, M-P. Verge, A. Hirschberg, A. P. J. Wijnands, R. L. M. Schoffelen, „Acoustics behaviour of chimney pipes“, *J. Acoust. Soc. Am.* 105 (1), 546-551 (1999)
- [14] Klang, B. Akustik im Überblick. Schall und Rauch Verlag, Stadt, 2010
- [15] <http://www.organstops.org/r/Rohrflote.gif>
- [16] <http://www.images.bistum-hildesheim.de/19/1869/2/11314208848324216316.jpg>

Zum Einfluss von Wandschwingungen bei Blasinstrumenten

Malte Kob, Wilfried Kausel

Erich-Thienhaus-Institut, Hochschule für Musik Detmold

Email: kob@hfm-detmold.de

Institut für Wiener Klangstil, Universität für Musik und darstellende Kunst Wien

Email: kausel@mdw.ac.at

Zusammenfassung

Die Frage des Einflusses von Wandschwingungen von Orgelpfeifen und Blechblasinstrumenten ist recht kontrovers diskutiert worden. Während die Tonerzeugung des Pfeifentons auf die Interaktion des Labiums mit der Luftströmung beschränkt ist, sind im Anklang des Pfeifentons als auch in einigen Fällen stationäre Klangeinflüsse der Pfeifenwand-schwingung dokumentiert. Neben einer Erläuterung einiger Messergebnisse der Modalstruktur von Wand und Luftsäule einer Orgelpfeife wird im Vortrag auch ein Klangvergleich zur Wahrnehmung der Klangänderung durchgeführt. Während der Einfluss von Wandschwingungen bei Blasinstrumenten in einem breiten Frequenzbereich wirksam sein kann, führt bei zylindrischen Rohren nur ein Zusammenfallen von Wand- und Luftresonanzen zu deutlich wahrnehmbaren Effekten. Nur bei sehr dünnwandigen Rohren mit sehr weiter Mensur zeigen Modellrechnungen einen Einfluss von Dehnungsschwingungen im dB-Bereich.

Geschichtlicher Überblick

Die Frage nach der Hörbarkeit von Wandschwingungen von Orgelpfeifen und Blechblasinstrumenten wurde in der Vergangenheit kontrovers diskutiert. Während einige Forscher den Effekt für vernachlässigbar beschreiben [BH05, Bac05], [GT98a, GT98b], gibt es auch Forscher, die einen hörbaren Effekt beschreiben [ND04], [APGM98].

Orgelpfeifen

Ein grundlegendes Problem der Untersuchung von Wandschwingungen ist das Schaffen von Versuchsbedingungen, in denen eine direkte Wirkung der Wandschwingungen nachweisbar ist. Bei der Orgelpfeife wäre also ein direkter Vergleich derselben Pfeife mit und ohne Wandschwingungen wünschenswert. Da allerdings Wandschwingungen nur bei zylindrischen Pfeifen aus einer Blei-Zinn-Legierung beobachtet wurden, und diese meist aus einem durchgehenden Material vom Fuß bis zum oberen (passiven) Ende gefertigt werden, ist ein Austausch einer potentiell schwingenden mit einer nicht schwingenden Pfeifenkörper schwierig. Ein Austausch würde auch das Labium betreffen, bei dem kleinste Veränderungen gravierende Auswirkungen auf den Klang haben. In eigenen Untersuchungen wurde daher versucht, die Schwingungen der Pfeifenwand mit Hilfe eines dämpfenden Belags zu reduzieren, ohne dass die Konfiguration des Labiums verändert wurde. Eine 50 cm lange Prinzipalpfeife wurde in einem Freifeldraum so aufgestellt, dass an einem Aufbau sowohl vibroakustische als auch klangliche



Figure 1: Dämpfung der Orgelpfeife

Analysen durchgeführt werden konnten (siehe Abb. 2).

In einem zweiten Versuch wurde die Resonanz der Luftsäule mit Absorptionsmaterial gedämpft, das so eingebracht wurde, dass die Wandschwingung nicht gedämpft wurde. Die Wirkung der Dämpfungen wurde sowohl mit mechanisch angeregten Transferfunktionen als auch mit Zeit-Frequenzanalysen von kontrolliert angeblasenen Pfeifenklängen untersucht. Die Ergebnisse einer Resonanzanalyse wurde mit den Berechnungen der Strukturmoden eines Finite-Elemente (FE)-Modells (siehe Bild 3 der Pfeife verglichen. Die FE-Berechnungen weisen auf mehrere deutlich ausgeprägte Moden zwischen 800 und 2000 Hz hin, die potentiell zur Abstrahlung von Schall beitragen könnten.

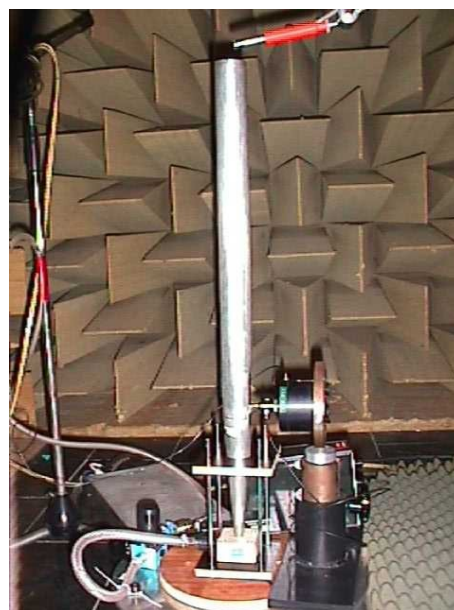
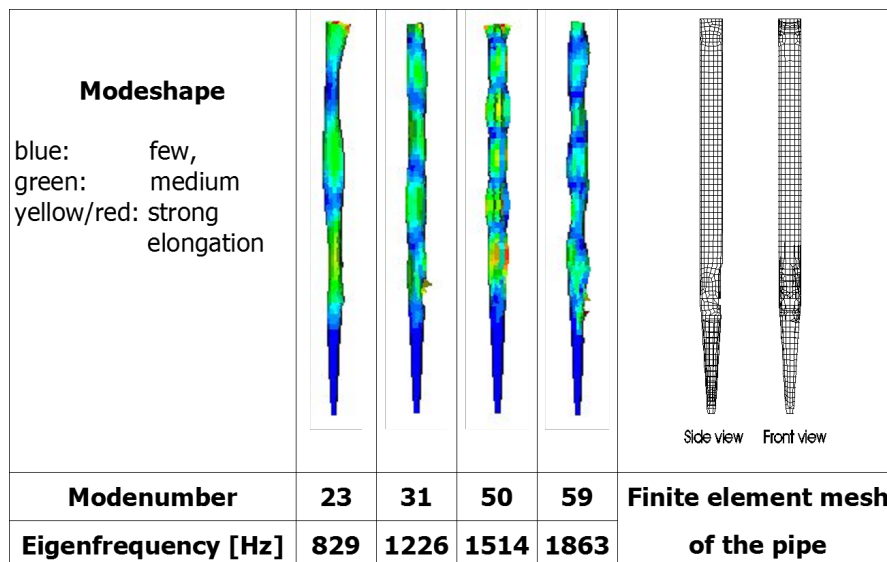
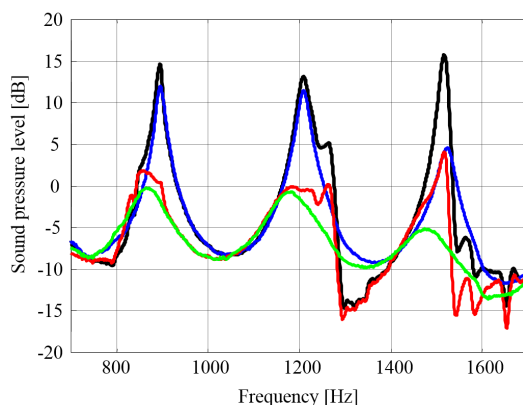


Figure 2: Messungen an der Orgelpfeife

**Figure 3:** Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnungen

Ergebnis der Resonanzanalyse

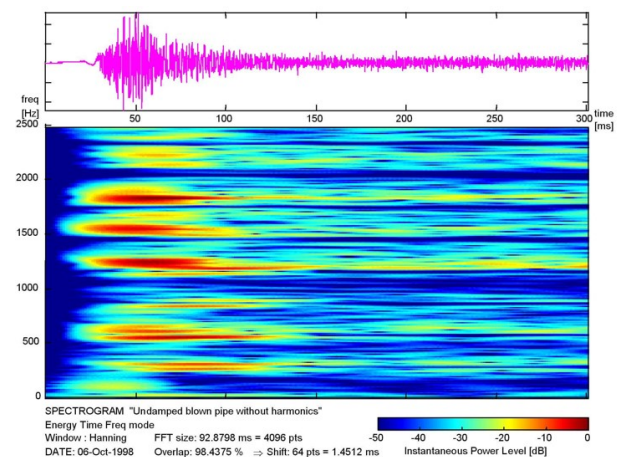
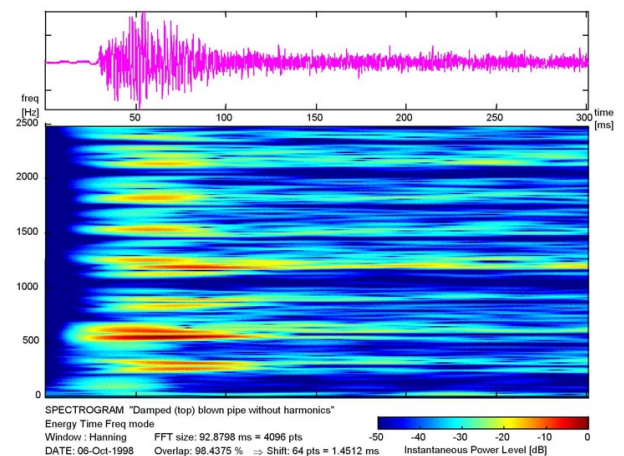
Im Vergleich der Unterschiede der Betragsspektren, die sowohl aus der Modalanalyse als auch der FRF-Messung resultieren ist erkennbar, dass die Klangänderung nur bei Resonanzfrequenzen auftritt, bei denen sowohl Resonanzen der Luftsäule als auch der Wandstruktur liegen, siehe Bild 4. Sowohl die Dämpfung der Luft- als auch der Strukturmoden

**Figure 4:** Ergebnisse der FRF-Messungen

führt bei den unteren drei Frequenzen der Strukturmoden zu einer

Ergebnis des Klangvergleichs

Während im im Spektrum des stationären Klanges der Orgelpfeife keine Änderungen zwischen dem ungedämpften und gedämpften Fall sichtbar sind und auch kein hörbarer Unterschied wahrnehmbar ist, können sowohl im Spektrogramm als auch im Hörversuch Unterschiede im transienten Anklang des Orgelpfeifenklangs wahrgenommen werden (siehe Bilder 5,6). Die Unterschiede sind allerdings nur kurz sicht- bzw. hörbar.

**Figure 5:** Ergebnisse der Klanganalyse ohne Dämpfung**Figure 6:** Ergebnisse der Klanganalyse mit Dämpfung

Blechblasinstrumente

Wenn vom akustischen Einfluss mechanischer Schwingungen in Blasinstrumenten gesprochen wird, dann muss man verschiedene Schwingungsarten unterscheiden. Untersucht wurden

- Biegeschwingungen von Rohren [WSH03],
- Elliptische Schwingungen des Rohrumfangs (z.B. [GT98b] oder [Kob00a, Kob00b]),
- Dehnungsschwingungen in radialer Richtung [KZM10] und
- Dehnungsschwingungen in axialer Richtung [CKM⁺12].

Da Biegeschwingungen die akustisch wirksame Querschnittsfläche im Rohr kaum beeinflussen, könnte ein hörbarer Effekt nur durch Rückwirkung des vibrierenden Mundstücks auf die Bläserlippen zustande kommen. Lässt man eine solche einstweilen außer acht, scheiden Biegeschwingungen als akustischer Parameter aus. Elliptische Umfangsschwingungen besitzen üblicherweise sehr scharfe Resonanzen, daher muss sich ihr akustischer Einfluss auf transiente Vorgänge beschränken, beziehungsweise auf Fälle, in denen mechanische und akustische Resonanzfrequenzen exakt zusammenfallen. Unter diesen Voraussetzungen wurden zum Teil dramatische Wechselwirkungen wie etwa Wolfstöne beobachtet (Nief, Gautier, Dalmont, Gilbert, 2008 [NGDG08]).

Dehnungsschwingungen in radialer Richtung, das sind Oszillationen im Mensuradius, haben den stärksten Einfluss auf die effektive Querschnittsfläche, auch wenn die auftretenden Amplituden sehr gering sind. Diese Art von Wandschwingung bewirkt einen parasitären Schallfluss aus der oder in die Wand, sowie eine Modulation des lokalen Luftvolumens die sich als verteilte Schalldruckquelle darstellen lässt. Dieser Einfluss lässt sich berechnen. Ergebnisse mit realistischen Annahmen lassen darauf schließen, dass auch dieser Schwingungsmodus höchstens in Orgelpfeifen aus sehr dünnem Blech und gleichzeitig sehr weiter Mensur eine Änderung der akustischen Eingangsimpedanz um mehr als etwa 1 dB verursachen kann.

Dehnungsschwingungen in axialer Richtung, also Oszillationen der Rohrlänge, stehen mit radialen Schwingungen über den Poisson-Effekt in Beziehung. Starke Fluktuationen der Rohrlänge bei relativ tiefen Frequenzen (einige hundert Hertz) treten vor allem bei dünnwandigen Rohren auf, insbesondere wenn beide Rohrenden mit zusätzlicher Masse (Bördelung des Schallstücks, Mundstück und Kopf des Blägers) behaftet sind. Diese Längsschwingungen werden nach Poisson in Modulationen des Querschnitts umgesetzt, die auf die eingeschlossene Luftsäule rückwirken.

Ganz besonders stark ist dieser Einfluss im Bereich des Schallstücks, wo eine kleine axiale Auslenkung der sich steil nach außen krümmenden Wand die effektiv wirksame Begrenzung der Luftsäule in radialer Richtung stark verschieben kann. In diesem Bereich erzeugt das akustische Druckfeld auch die stärksten axial wirksamen Verschiebungskräfte. Die axialen Vibrationen werden also hauptsächlich am Schallstückende stimuliert oder auch am

Mundstücksende durch die schwingenden Lippen eingekoppelt. Es ist interessant, dass diese Art von axialer Schwingung eine weit geringere Güte aufweist und einige nebeneinander liegende Luftresonanzen beeinflussen kann.

Rechnungen sowie experimentelle Beobachtungen (siehe Abb. 7) legen nahe, dass es sich in diesem Fall nicht um

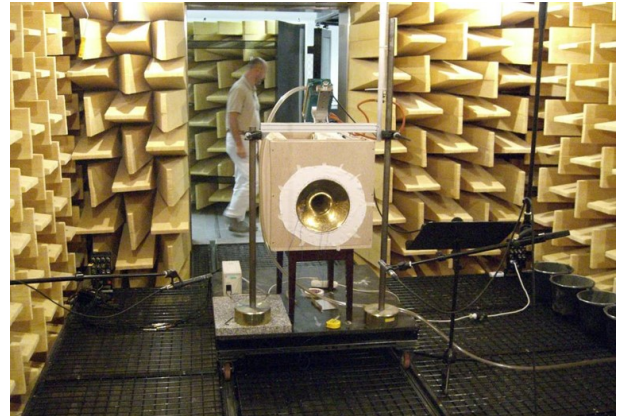


Figure 7: Aufbau zur Untersuchung der Trichterschwingungen eines französischen Horns

eine einzige Schwingung handelt, sondern um ein Kontinuum in einander übergehender Schwingungsmoden, deren gesamte Frequenzbandbreite ausreicht, mehrere Naturtöne z.B. einer Trompete signifikant zu verändern. Je nach Material, Wandstärke und Aufbau variieren die Impedanzunterschiede im 1..3 dB Bereich (siehe [KMN08] und Abb. 8). Sie können auch dramatisch werden, wenn strukturelle Reso-

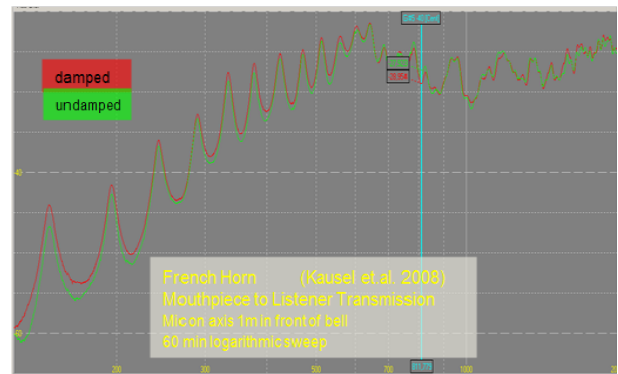


Figure 8: Impedanzen eines Französischen Horns ohne (grün) und mit Dämpfung (rot)

nanzen und Naturtöne sich einander annähern – dabei ist perfekte Übereinstimmung noch gar nicht nötig.

Diese Untersuchungen wurden bis jetzt an ungebogenen isolierten Schallstücken mit relativ hoher Wandstärke (0.55 mm) gemacht. Es ist zu erwarten, dass die zusätzlichen Freiheitsgrade, die in ganzen Instrumenten durch Stützen, Biegungen, Züge etc. auftreten, den Einfluss von Material, Wandstärke und Bauart noch deutlicher hervortreten werden lassen. Schon die isolierten Schallstücke zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen Theorie und Praxis, da die gelötete und gehämmerte Naht einen Mode-Split verursacht und den Grundmodus bei etwa 700 Hz in zwei Halbmoden bei 690 und 710 Hz zerfallen lässt. Auch die höheren

Längsmoden zerfallen in einen Anteil bei der Naht und einen der gegenüberliegenden Seite.

Von dieser Tatsache abgesehen, deckt sich das gemessene Verhalten sehr gut mit dem theoretisch ermittelten und auch der berechnete Einfluss auf die akustischen Kenngrößen entspricht in etwa den Beobachtungen.

Diskussion

Sowohl bei Orgelpfeifen als auch Blechblasinstrumenten treten Schwingungen der Instrumentwand auf, die nachweislich die Übertragungsfunktionen von Anregung bis zum Ort des Hörers verändern können. Voraussetzung scheint jedoch die Konzidenz von Schwingungsmoden und Resonanzen des Anregungsschalls zu sein, ohne die der Effekt nur vernachlässigbar gering ist. Weiterhin scheint eine Hörbarkeit von Wandschwingungen eher für transiente Klänge wie den Anklang des Instruments gegeben zu sein.

References

- [APGM98] J. Angster, G. Paal, W. Garen and A. Miklos, *The effect of wall vibrations on the timbre of organ pipes*, Proc. 16th International Congress on Acoustics and 135th JASA Meeting, Seattle, vol. 3, 1998, pp. p753–754.
- [Bac05] J. Backus, *Wall vibrations in organ pipes and their effect on tone*, The Journal of the Acoustical Society of America **38** (2005), no. 5, 912–912.
- [BH05] J. Backus and T. Hundley, *Wall vibrations in flue organ pipes and their effect on tone*, The Journal of the Acoustical Society of America **39** (2005), no. 5A, 936–945.
- [CKM⁺12] V. Chatziioannou, W. Kausel, T. Moore *et al.*, *The effect of wall vibrations on the air column inside trumpet bells*, Acoustics 2012 Nantes (2012).
- [GT98a] F. Gautier and N. Tahani, *Vibroacoustic behaviour of a simplified musical wind instrument*, Journal of sound and vibration **213** (1998), no. 1, 107–125.
- [GT98b] F. Gautier and N. Tahani, *Vibroacoustics of cylindrical pipes: internal radiation modal coupling*, Journal of sound and vibration **215** (1998), no. 5, 1165–1179.
- [KMN08] W. Kausel, A. Mayer and G. Nachtmann, *More experimental evidence favouring the hypothesis of significant wall vibration influence on radiated horn sound*, Journal of the Acoustical Society of America **123** (2008), no. 5, 3120.
- [Kob00a] M. Kob, *Eigenmodes of a flue organ pipe*, Acustica **86** (2000), no. 4, 755–757.
- [Kob00b] M. Kob, *Influence of wall vibrations on the transient sound of a flue organ pipe*, Acustica **86** (2000), no. 4, 642–648.
- [KZM10] W. Kausel, D. W. Zietlow and T. R. Moore, *Influence of wall vibrations on the sound of brass wind instruments.*, J Acoust Soc Am **128** (2010), no. 5, 3161–3174 (eng).
- [ND04] C. Nederveen and J. P. Dalmont, *Pitch and level changes in organ pipes due to wall resonances*, Journal of sound and vibration **271** (2004), no. 1, 227–239.
- [NGDG08] G. Nief, F. Gautier, J. P. Dalmont and J. Gilbert, *Influence of wall vibrations on the behavior of a simplified wind instrument*, The Journal of the Acoustical Society of America **124** (2008), no. 2, 1320–1331.
- [WSH03] J. Whitehouse, D. Sharp and T. Hill, *Wall vibrations in musical wind instruments*, Acoustics Bulletin **28** (2003), no. 4, 20–23.

Signalverarbeitungsverfahren zur Beurteilung von Musikinstrumentenklängen am Beispiel eines Sopransaxophons

Johann-Markus Batke

Technicolor Research and Innovation, Karl-Wiechert-Allee 74, 30625 Hannover, Deutschland, Email: Jan-Mark.Batke@technicolor.com

Abstrakt

Bei der Herstellung von Musikinstrumenten wird dem Baumaterial in aller Regel große Bedeutung zugemessen. Messtechnisch ist die akustische Auswirkung jedoch nicht immer eindeutig zu belegen. In der vorliegenden Untersuchung werden ein handelsübliches Sopransaxophon aus Messing mit einem in einem neuartigen Produktionsvorgang aus Kupfer erstelltem Modell verglichen. Dabei ist das Ziel, die Beurteilung des Klangs durch Musiker mit Methoden der Signalverarbeitung nachzuvollziehen bzw. zu belegen. Untersucht werden Saxophonklänge im stationären Fall sowie der Einschwingvorgang einzeln gespielter Töne.

Einleitung

Zwei Sopransaxophone gleicher Bauweise von verschiedenen Herstellern sollen in diesem Beitrag gegenübergestellt werden: ein HENRI SELMER Modell *Mark VI* sowie ein in Handarbeit hergestelltes Instrument von KARSTEN GLOGER. Der augenscheinliche Unterschied zwischen den Instrumenten besteht im Material des Korpus; das Selmer-Sopran ist konventionell aus Messing gefertigt, das Gloger-Sopran aus Kupfer. Beim Vergleich durch Musiker und Zuhörer werden dem Gloger-Sopran häufig eine stabilerer Intonation, leichtere Ansprache (insbesondere im Flageolet-Bereich), bessere Kontrollierbarkeit der Dynamik, ein tragfähigerer und individuellerer Ton zugesprochen. Jedoch kommt es auch vor, dass kein Unterschied oder die gegenteilige Bewertung abgegeben wird.

In vorangegangenen Arbeiten wurde angestrebt, durch Methoden der Signalverarbeitung über Tonaufnahmen der Instrumente zu einer objektiven Bewertbarkeit der festgestellten Unterschiede zu kommen [2, 3]. Von den genannten Beschreibungen kann der tragfähigere, individuellere Ton am klarsten den spektralen Eigenschaften des Klangs zugeschrieben werden. Alle weiteren Beschreibungen wie eine leichtere Ansprache oder Kontrollierbarkeit des Instrumentes beziehen sich auf die Spieleigenschaften der Instrumente, die sich im Einschwingvorgang des Tons und anderen Parametern wieder spiegeln und ggf. nur für den Spieler wahrzunehmen sind.

Versuch

Bei den Untersuchungen wurden alle Aufnahmen von lediglich einem Musiker eingespielt. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen lediglich, ob und in welcher Weise ein Unterschied zwischen den hervorgebrachten Klängen besteht. Zur qualitativen Beurteilung der Instrumente wäre eine aufwendigere Versuchsgestaltung mit mehreren Musikern notwendig [7, 11].

Die Signale wurden in der Werkstatt Gloger Handkraft (Wohnraumakustik) mit einem Großmembranmikrofon (Oktava Mk219) im Abstand von 1 m vor dem Becher aufgezeichnet [9]. Da es sich um vergleichende Messungen

handelt, können die spektralen Verfärbungen durch das Großmembranmikrofon und den Mikrofonabstand zunächst außer Acht gelassen werden.

Spektrale Eigenschaften

Ein etablierter Weg zur Untersuchung des Klangs von Musikinstrumenten ist die Betrachtung des Leistungsdichtespektrums [5]. Die Be- und Auswertung der Spektren wird üblicherweise durch visuelle Inspektion vorgenommen, dessen Ergebnis dann stark von der Erfahrung und dem Vorwissen des Betrachters abhängt. Dieser Umstand sowie die sehr große Anzahl von Einzelmessungen, die für die spektrale Bewertung eines Musikinstruments wie dem Saxophon notwendig sind, führen zu dem Wunsch nach einer Vereinfachung des Bewertungsverfahrens.

Der Multimedia-Standard MPEG-7 bietet eine Reihe von Bewertungskriterien von spektralen Messungen [4]. In den Untersuchungen in Batke und Gloger [2] wurden die Descriptoren *Spectral Centroid*, *Spectral Spread*, *Spectral Skewness* und *Spectral Kurtosis* ausgewählt. Es soll betont werden, dass diese Auswahl nur einen Teil der Klangeigenschaften beschreiben kann [10].

Die zur Untersuchung verwendete Bandbreite aus den Signalen berechneten Spektren beträgt 12 kHz. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die über alle Dynamikstufen gemittelten Werte für den Spectral Centroid. Der Spieler erzielt auf dem Gloger-Sopran für alle gespielten Töne (bis auf das C2) einen höheren Wert als das Selmer-Sopran, ersterem kann damit ein hellerer Klang zugeschrieben werden. Die Ergebnisse zu Spectral Spread, Spectral Skewness und Spectral Kurtosis sind in Batke und Gloger [2] zu finden.

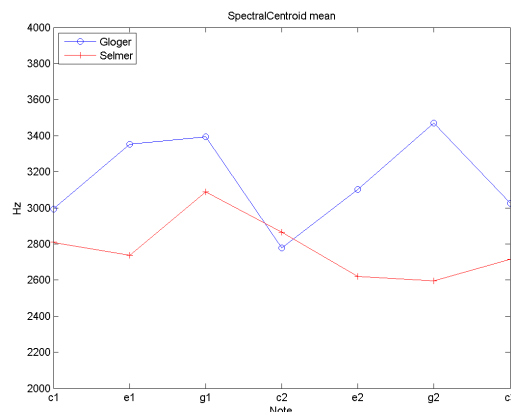


Abbildung 1: Der Spectral Centroid gemittelt über die Dynamikstufen *pp*, *mf* und *ff*.

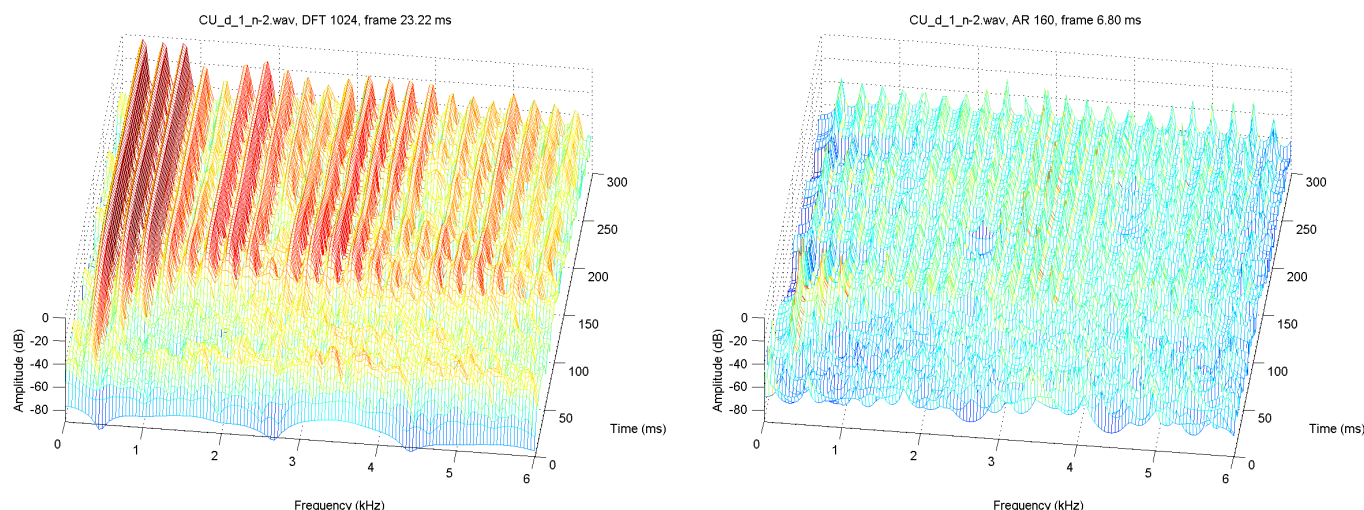


Abbildung 2: Die SF-Analyse (links, 1014 Punkte) im Vergleich zur AR-Analyse (rechts, Ordnung 160) für das Kupfersopran, D1 gespielt ohne Artikulation mit der Zunge.

Einschwingvorgang

Um den Einschwingvorgang der untersuchten Signale genauer betrachten zu können, wird häufig die zeitliche Veränderung der Fourier-Spektren über die Zeit betrachtet [8]. Dabei tritt das Problem auf, dass für eine hinreichend große Frequenzauflösung die Zeitauf Auflösung zu gering ist bzw. umgekehrt bei der Wahl kurzer Zeitfenster die Frequenzauflösung nicht ausreicht. Eine Lösung bietet z.B. die Autoregressive Modellierung (AR-Modellierung). Sie adaptiert ein weißes Rauschen durch All-Pol-Filterung auf das untersuchte Signal. Zur Schätzung der All-Pol-Koeffizienten steht verschiedene Algorithmen wie die Kovarianz-Methode, die modifizierte Kovarianz-Methode, oder das Verfahren nach Burg zur Verfügung [1]. Ein All-Pol-Filter mit Ordnung P adaptiert die spektrale Spitzen auf die dominantesten Spitzen des Messsignals, das Spektrum des All-Pol-Filters hat also die gleichen spektralen Eigenschaften wie das Messsignal. Die in Batke und Gloger [3] verwendete AR-Modellierung wurde bereits zuvor erfolgreich zur Untersuchung von Musikinstrumentenklängen verwendet [1, 6].

Abbildung 2 zeigt als Beispiel den Einschwingvorgang des Kuper-Soprans dargestellt über die Kurzzeit-Fourier-Transformation (Shorttime Fourier, SF) und die AR-Modellierung. Frequenz und zeitlicher Beginn der Spektrallinien lassen sich in der AR-Darstellung genauer ablesen, während die SF-Darstellung verlässlichere Information über die Energieverteilung im Spektrum beinhaltet [3].

Literatur

- [1] BACHMANN, W. ; BÜCKER, H. ; KOHL, B.: Feinstrukturanalyse des Einschwingens eines Pianoklanges. In: *Acta Acustica united with Acustica* 68 (1989), April, Nr. 2, S. 123–130
- [2] BATKE, Johann-Markus ; GLOGER, Karsten: Bewertung von Saxophonspektren mit Methoden der Signalverarbeitung. In: *Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA 2012)*, 2012
- [3] BATKE, Johann-Markus ; GLOGER, Karsten: Analysis of saxophone attack transients by auto-regressive modelling. In: *Deutsche Jahrestagung für Akustik (DAGA 2013)*, 2013
- [4] EISENBERG, Gunnar: *Identifikation und Klassifikation von Musikinstrumentenklängen in monophoner und polyphoner Musik*, TU Berlin, Dissertation, 2008
- [5] HÄNSLER, Eberhard: *Statistische Signale*. Springer, 1996
- [6] KEILER, Florian ; KARADOĞAN, Can ; ZÖLZER, Udo ; SCHNEIDER, Albrecht: Analysis of transient musical sounds by auto-regressive modelling. In: *6th International Conference on Digital Audio Effects DAFx-03*. London, September 2003
- [7] MORES, Robert: *Diskriminanzteste mit Lernphase und ohne semantische Notation für den Nachweis kleinster baulicher Veränderungen an Musikinstrumenten*. Seminar des Fachausschusses Musikalische Akustik (FAMA) der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA), Detmold. November 2013
- [8] OPPENHEIM, Alan V. ; SCHAFER, Ronald W.: *Digital Signal Processing*. Prentice-Hall, 1975
- [9] SCHNEIDER, Martin: *Das Mikrophon als Mess-Instrument – Zur Problematik von Hörversuchen*. Seminar des Fachausschusses Musikalische Akustik (FAMA) der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA), Detmold. November 2013
- [10] SIDDIQ, Saleh: *Timbre Space revisited – Was ist Fakt, was ist Mythos?* Seminar des Fachausschusses Musikalische Akustik (FAMA) der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA), Detmold. November 2013
- [11] ZIEGENHALS, Gunter: *Zur Übereinstimmung von Musikerurteilen und dem Einfluss der Objektreihenfolge*. Seminar des Fachausschusses Musikalische Akustik (FAMA) der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA), Detmold. November 2013

Klangänderung durch Gabelgriffe beim Fagott

Timo Grothe

Erich-Thienhaus Institut, Hochschule für Musik Detmold

Email: grothe@hfm-detmold.de

Einleitung

Ein Beispiel für den großen Einfluss einer kleinen Änderung in der Musikalischen Akustik findet sich bei Gabelgriffen auf Holzblasinstrumenten. Hierbei kommen oft verschiedene Griffvarianten zum Einsatz. Dabei werden durch zusätzliches Öffnen oder Schließen von Tonlöchern stromab des ersten offenen, tonhöhenbestimmenden Tonloches Resonanzfrequenzen der Luftsäule verschoben, die weit oberhalb der klingenden Frequenz liegen. Die diesen höheren Resonanzen zugeordneten Impedanzmaxima der Luftsäule sind betragsmäßig deutlich geringer als das Impedanzmaximum der Grundresonanz, und stehen oftmals in keinem harmonischen Verhältnis zur klingenden Frequenz.

Trotzdem führen diese kleinen Änderungen der Resonanzeigenschaften der Luftsäule zu einer im musikalischen Kontext deutlichen Veränderung von Tonhöhe und Klangfarbe. Daher werden Griffvarianten für Gabelgriffe insbesondere beim Fagott gezielt von Musikern eingesetzt: Nahezu alle überblasenen Töne werden mit Gabelgriffen gespielt, sie werden als Standardgriffe von Beginn an gelernt. Demgegenüber legen sich die meisten Fagottisten für die hohen Töne ein Repertoire an Hilfsgriffen zu, die ganz individuell und abweichend von der Standardgriffen die Besonderheiten ihres Instrumentes oder ihrer Spieltechnik berücksichtigen.

Die zugrunde liegenden Mechanismen des gekoppelten, selbsterregten Schwingungssystems von Rohrblattmundstück und Luftsäule sind komplex und im praktischen Anwendungsfall des Fagottes nicht einfach zu untersuchen, da auch minimale Änderungen von Lippenkraft und Blasdruck am Rohrblatt Tonhöhenänderungen bedingen.

Material und Methode

Um die beobachtbaren Tonhöhen- und Klangänderungen allein auf eine Modifikation am Resonator zurückführen zu können, wurde ein Experiment mit einem "künstlichen Bläser" durchgeführt. Diese Vorrichtung erlaubt es, ohne Veränderung der Ansatzkonfiguration am Rohrblatt einen stationären Ton über Minuten zu erzeugen. Dabei wurden fünf verschiedene Griffkombinationen des Tones e_b ($f_0 = 157$ Hz) gegriffen und die resultierenden Änderungen des instationären Druckes im Rohrblattmundstück und im umgebenden Raum gemessen.

Zur Beschreibung des Experimentes wird eine Trennung des Gesamtsystems Fagott in zwei Teilsysteme – Resonator und Anregungsmechanismus – vorgenommen. Die Trennung findet an der S-Bogenspitze statt. Das darauf aufgesteckte Doppelrohrblatt sowie der angeschlossene "künstliche Bläser" repräsentieren den nichtlinearen Anregungsmechanismus, der als Blackbox durch Stell- und Betriebsparameter beschrie-

ben ist. Der Fagottkorpus mit aufgestecktem S-Bogen wird als passiver Resonator betrachtet, der durch seine akustische Impedanz am Eintritt vollständig beschrieben ist.

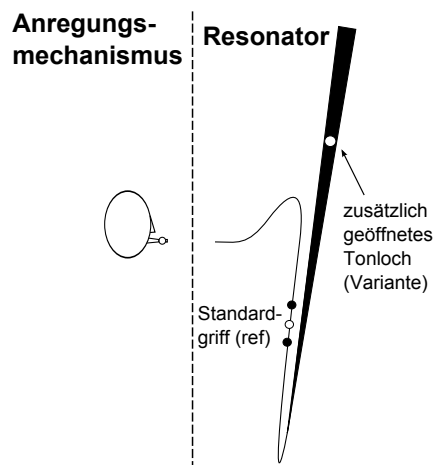


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Versuchs. Das gekoppelte System von Fagott, Mundstück und Spieler wird an der S-Bogenspitze gedanklich in zwei Teilsysteme getrennt. Während des Spielens bleibt der Anregungsmechanismus (Teilsystem links) unverändert, während am Resonator (Teilsystem rechts) eine kleine Änderung in Form einer Griffvariante vorgenommen wird. Die Zustandsänderung des gekoppelten Gesamtsystems wird anhand von Messwerten bestimmt und mit dem Referenzzustand verglichen.

Resonator

Zur Messung der frequenzabhängigen, komplexen Eingangsimpedanz $Z(f) = p(f)/U(f)$ wurde das Messsystem "BIAS" der Firma Artim, Wien, Österreich genutzt. Bei diesem System wird die Luftsäule mit einer Volumenstromquelle U angeregt und der resultierende Druck p gemessen [9]. Der Messkopf ist mit einem Durchmesser von 13,8 mm für Messungen an Blechblasinstrumenten konzipiert und wurde mit einem Adapter versehen, der den Anschluss eines Fagott S-Bogens (Durchmesser ca. 5 mm) ermöglicht. Basierend auf der Theorie eines eindimensionalen akustischen Wellenleiters kann aus der gemessenen Impedanz die Eingangsimpedanz am S-Bogeneintritt berechnet werden, wenn die Innenkontur des Adapters bekannt ist [1, 4].

Anregungsmechanismus

Um den als Resonator fungierenden Fagottkorpus musiker-nah und zugleich kontrolliert und reproduzierbar anzuregen, wurde eine Versuchsvorrichtung "künstlicher Bläser" verwendet [7]. Ein Fagott-Doppelrohrblattmundstück aus synthetischem Material¹ ist am starren Ende in die Wan-

¹Selmer Premium Plastic 270M

derung einer Druckkammer eingespannt, so dass die flexiblen Rohrblatthälften frei in die Kammer ragen. Das Anblasrohr eines Fagottes, der so-geannte S-Bogen, kann außerhalb der Druckkammer an das Mundstück angeschlossen werden. Durch den ovalen Schlitz, den die Rohrblatthälften formen, wird die Luft ins Instrument geblasen. Die Größe der Schlitzöffnung kann dadurch variiert werden, dass eine "künstliche Lippe" gegen die freikragenden Rohrblatthälften verfahren wird. Diese künstliche Lippe besteht aus einem Verbund flexibler Materialien, der ähnliche Dämpfungseigenschaften wie menschliche Lippen aufweist [6]. Der Aufbau ist auf einer Kraftmessdose montiert die mit Mikrometerschrauben parallel und senkrecht zur Rohrblattachse verschoben werden kann wobei die dadurch auf das Mundstück ausgeübte Kraft gemessen wird. Der Fagottkorpus mit dem S-Bogen ist ebenfalls in eine Vorrichtung eingespannt und die Anblaskammer mit Mundstück kann auf einer Linearführung verschoben werden um Resonator und Anregungsvorrichtung zu verbinden. Der gesamte Aufbau ist mechanisch so robust konstruiert, dass die Änderung der Griffkombination am Fagottkorpus keinen Einfluss auf die Lippenkonfiguration am Rohrblatt hat.

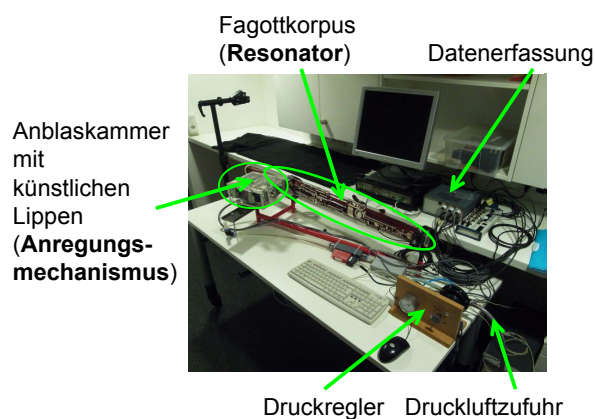


Abbildung 2: Versuchsaufbau künstlicher Bläser im Labor des Erich-Thienhaus Instituts

Tonerzeugung

Zur Erzeugung stationärer Töne wird Luft aus einem Druckluftreservoir in die Anblaskammer mit dem Mundstück eingeblasen. Nach Überschreiten eines charakteristischen Anblasdruckes² beginnt das Mundstück zu Schwingen, ein Ton wird hörbar. Mit Hilfe eines Präzisionsdruckreglers kann der Gleichanteil des Anblasdruckes in der Kammer eingestellt und mit einer Genauigkeit von wenigen Pascal über Minuten konstant gehalten werden.

Somit hat das Experiment bei fester axialer Position der Lippe zwei stationäre Stellparameter: den Blasdruck p_m und die Lippenkraft F_l , zu denen sich in Abhängigkeit vom angeschlossenen Resonator ein Betriebszustand ergibt, der durch weitere quasi-stationäre Parameter (Luft-Volumenstrom q , RMS-Schalldruck im Rohrblatt $p_{r,RMS}$, klingende Frequenz f_0) beschrieben ist. Der Differenzdruck zwischen Rohrblatt

und Umgebung, sowie der Schalldruck in der Umgebung werden mit stationären Drucksonden³ synchron und zeitlich hochaufgelöst gemessen.

Versuchsablauf

Zu dem einfachen eb- Gabelgriff des Fagottes wurden fünf verschiedene Varianten a) bis e) gegriffen, die als Alternativgriffe gebräuchlich sind [3]. Abbildung 3 zeigt links die Griffkombination⁴ und rechts das resultierende Tonlochschemata und die Kontur des Fagottkorpus. Der Ursprung ($x = 0$) dieser Diagramme entspricht dem S-Bogeneintritt, offene bzw. geschlossene Tonlöcher sind als leere bzw. gefüllte Ellipsen gezeichnet. Die Änderung im Tonlochschemata, die sich relativ zum Standardgriff durch die jeweilige Griffvariante a)-e) ergibt, ist jeweils unterhalb der Fagottachse ($r = 0$) abgebildet und farblich abgesetzt. Die Position des ersten offenen Tonlochs (Fingerloch d) bei ca. $x = 0.62$ m ist durch eine vertikale graue Linie markiert.

Zunächst wurde der Ton eb mit dem einfachen Gabelgriff angespielt. Anschließend wurde unmittelbar hintereinander, ohne Änderung an den drei Reglern des Aufbaus, zu den Alternativgriffen a)→b)→c)→d)→e) gewechselt. Dieser Versuch wurde für zwei Dynamikstufen *piano* und *forte* ($p_m = 2$ kPa bzw. $p_m = 4.4$ kPa) durchgeführt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse bestätigen, dass kleine Verstimmungen der höheren Luftsäulenresonanzen durch das Öffnen oder Schließen zusätzlicher Tonlöcher die Grundfrequenz und die spektrale Zusammensetzung des Klangs deutlich beeinflussen. Durch den gewählten Versuchsaufbau können die Änderungen allein der Modifikation des Resonators zugeschrieben werden.

Änderung von Tonhöhe und Anblasparametern

Für den Gabelgriff eb am Fagott wurden durch fünf alternative Griffvarianten Tonhöhenänderungen bis zu 20 Cent gemessen. Abgesehen davon änderten sich auch andere quasi-stationäre Betriebsparameter des Anregungsmechanismus in deutlichem Maß durch die kleinen Änderungen am Resonator (Abbildung 5). Der Luft-Volumenstrom q erhöht sich beispielsweise in der Griffvariante e) im *piano* Spiel um ca. 25%. Gleichzeitig sinkt der RMS-Wert des Mundstücksdruckes $p_{r,RMS}$ um ca. 10%, der Blasdruck p_m im Mundraum um ca. 5 %. Dass der mechanische Ansatz der Lippe am Rohrblatt während des Experimentes nicht verändert wurde ist daran erkennbar, dass die Lippenkraft nahezu konstant ist.

Offensichtlich sind Maß und Richtung der Änderungen, die eine Griffvariante bewirkt, auch dynamikabhängig (Abbildung 5). Während der Luftvolumenstrom q im *piano* bei den Griffvarianten d) und e) deutlich ansteigt, sinkt er im *forte* deutlich ab. Die Tendenz der Stimmungsänderung I ist gleich, jedoch ist die erzielte Tonhöhenabsenkung im *piano* deutlich größer. Auf der andern Seite bewirkt die Griffvariante b) im *piano* nahezu keine Tonhöhenänderung, während im *forte* eine deutliche Verstimmung nach oben geschieht.

³kulite XCQ-093, bzw. Brüel & Kjær 4190

⁴Darstellung der Fagottgriffe in der von der International Double-Reed Society (IDRS) vorgeschlagenen ASCII-Schreibweise [2].

² $p_{m,initial} \approx 2 \dots 5$ kPa

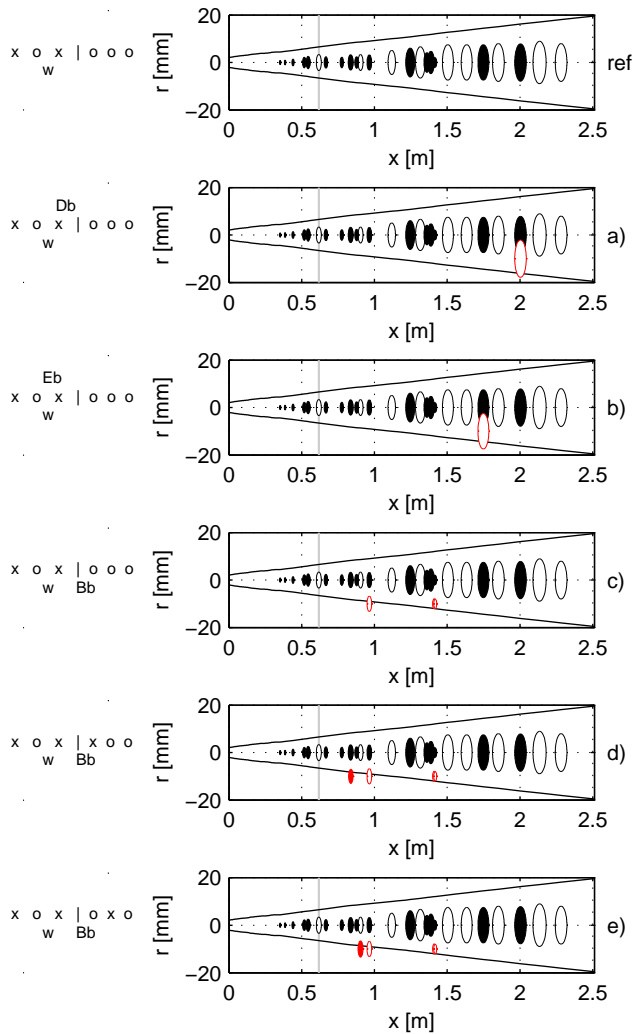


Abbildung 3: Griffschema (links) und Tonlochschemata (rechts) für fünf Variationen a-e) des Fagott Gabelgriffs eb ($f_0 = 157$ Hz). Das Griffschema ist in der sogenannten ASCII-Schreibweise [2] dargestellt.

Klangfarbenänderungen

Die Griffvarianten beeinflussen nicht nur die stationären Anblasparameter und die Tonhöhe, sondern auch die Wellenform des Mundstücksdrucks und damit die spektrale Zusammensetzung des Tones (Abbildung 6). Die im abgestrahlten Klangspektrum (L_s) im *piano* besonders deutlich erkennbare Anhebung der spektralen Hüllkurve bei ca. 450 Hz bleibt unverändert⁵. Dieser Formant ist charakteristisch für den Fagottklang. Der zweite Formant, der für den Standardgriff bei ca. 1.2 kHz erkennbar ist, wird durch die verschiedenen Griffvarianten auf der Frequenzachse verschoben. Diese Verschiebung ist für Griffvariante c) besonders deutlich. Die Formantverschiebungen sind auch im Pegelspektrum des Mundstücksdruckes L_r , also direkt am Ort der Schallentstehung gut erkennbar. Nebenbei sei hier

⁵Eine Ausnahme ist Griffvariante a)

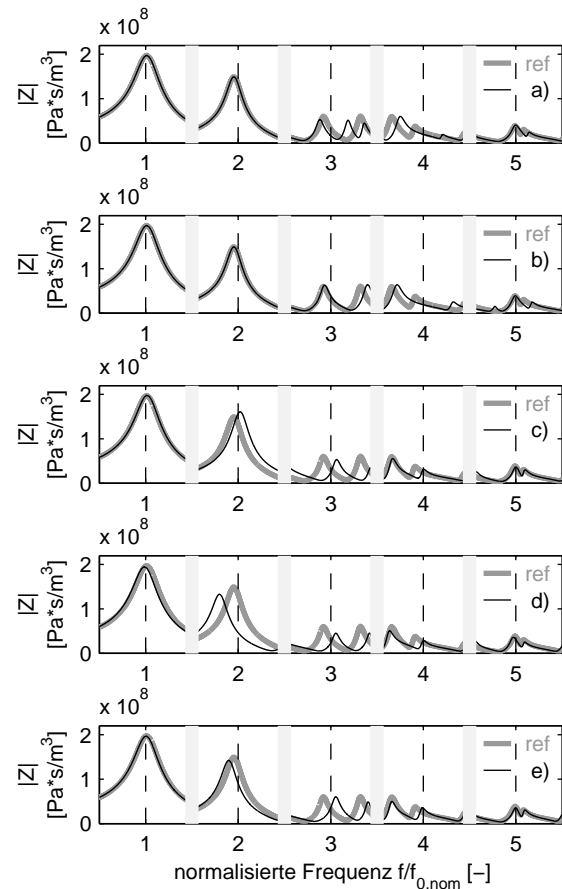
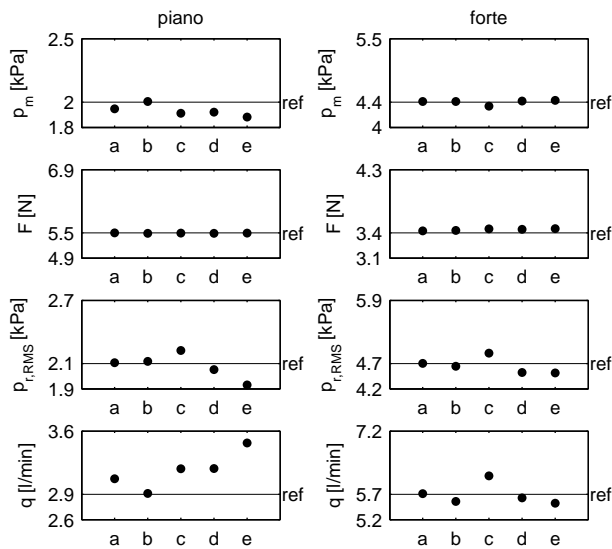


Abbildung 4: Akustische Eingangsimpedanz für fünf Variationen a-e) des Fagott Gabelgriffs eb ($f_0 = 157$ Hz). Die dicke dunkelgraue Linie kennzeichnet den einfachen Gabelgriff (ref). Die Frequenzachse ist normiert und nicht kontinuierlich; um jede Harmonische $n f_0$ der klingenden Grundfrequenz f_0 wird ein Bereich ± 2 Ganztonschritten gezeigt ($n = 1 \dots 5$).

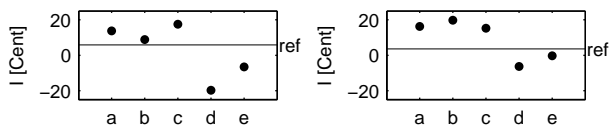
angemerkt, dass, anders als in früheren Arbeiten vermutet wurde [5], der Hauptformant des Fagottklangs um 0.5 kHz im Rohrblattspektrum nicht vorhanden ist.

Dadurch wird deutlich, dass die Änderung im abgestrahlten Klang infolge nur bedingt auf die spektrale Änderung in der Anregung zurückzuführen ist. Die Spektren für die Griffvarianten a) und b) sind am Ort der Schallentstehung (L_r) sehr ähnlich, unterscheiden sich aber deutlich für den abgestrahlten Klang (L_s). Dies ist insofern nicht überraschend, als dass die Griffvarianten nicht nur die Resonanzfrequenzen der Luftsäule verschieben, sondern auch abstrahlenden Öffnungen des Resonators geometrisch verändern.

Vielmehr zeigen die hier vorgestellten Messungen, dass die unter Fagottisten bekannten Klangänderungen nicht allein auf veränderte Abstrahlungsbedingungen zurückführbar sind, sondern dass geringe Verstimmungen der höheren



5.1: Anblasparameter



5.2: Tonhöhe

Abbildung 5: Änderung der stationären Betriebsparameter durch das Umgreifen auf die Griffvarianten a),b),c),d),e) für den Fagottgabelgriff eb ($f_0 = 157$ Hz).

Für p_m , F , $p_{r,RMS}$, und q in Abb. 5.1 umfasst der Darstellungsbe-
reich der Ordinate das Intervall +25% bis -10% .

Die Änderung der Tonhöhe ist in Abb. 5.2 als Intervall I in Cent be-
zogen auf den Referenzzustand (ref) angegeben. 100 Cent entspricht
einem Halbtonschritt.

Luftsäulenresonanzen auf den Anregungsmechanismus
zurückwirken. Die Vermutung nahe, dass neben der Schwin-
gungsdauer des Rohrblattes (Tonhöhe) auch seine periodische
Bewegungsform beeinflusst wird, was so zur Klangänderung
beiträgt.

Erklärungsansätze

Es fällt schwer, die Eingangsimpedanzkurven (Abbildung 3)
für Erklärungsansätze heranzuziehen. Offensichtlich ist je-
doch, dass die Griffvarianten nur Oberschwingungen be-
einflussen während die Grundschiwingung der Luftsäule
($f/f_{0,nom} = 1$) nahezu unverändert⁶ ist. Die erste Ober-
schwingung ($f/f_{0,nom} = 2$) ist für die Griffvarianten d) und
e) zu tief (Fig. 4). Denselben Trend nach unten zeigt auch be-
obachtete Tonhöhenänderung (Fig.5).

Auf der anderen Seite ist bei der Griffvariante b) im *forte* mit
ca. 20 Cent die größte Verstimmung nach oben in dieser Un-
tersuchung gemessen worden. Hier stimmt die Eingangsimpe-
danzkurve weitestgehend mit der Referenzsituation überein;
nur im Bereich der 4. Harmonischen sind Änderungen erkenn-
bar. Demgegenüber weist die Griffvariante e), die eine deut-
liche Verstimmung der ersten ($f/f_{0,nom} = 2$) und zweiten
Oberschwingung ($f/f_{0,nom} = 3$) bewirkt (Fig. 4) im *forte*

⁶Eine minimale Verstimmung ist für Griffvariante d) erkennbar

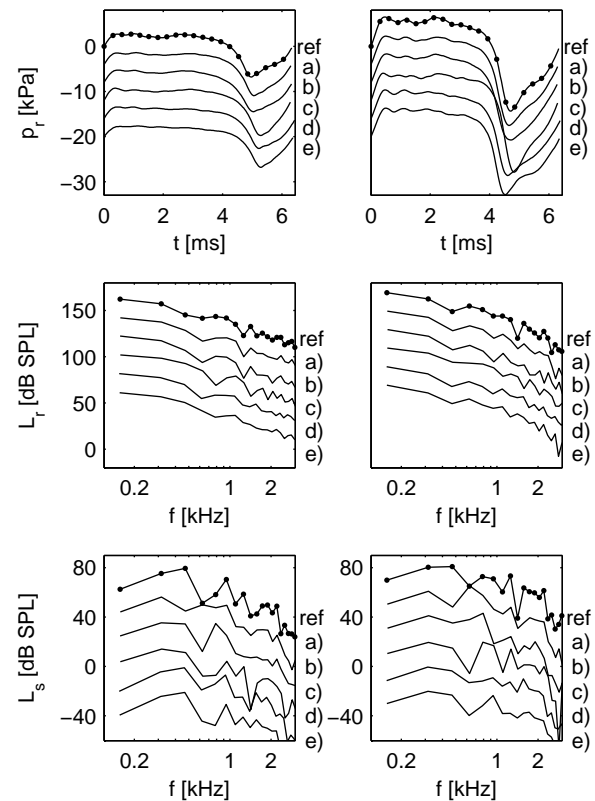


Abbildung 6: Änderung der instationären Messdaten durch das Um-
greifen auf die Griffvarianten a),b),c),d),e) für den Fagottgabelgriff
eb ($f_0 = 157$ Hz).

Oben: Zeitreihe des Mundstücksdrucks p_r (eine Periode).

Mitte: Pegelspektrum des Mundstücksdrucks (L_r)

Unten: Pegelspektrum des abgestrahlten Schalldrucks (L_s)

Die dargestellten Kurven der Griffvarianten a),b),c),d),e) sind zur
besseren Lesbarkeit vertikal verschoben. (Oben: $\Delta p_r = -4$ kPa,
Mitte und Unten $\Delta L = -20$ dB)

von allen Griffvarianten die kleinste Tonhöhenänderung auf.

Ausblick

Die hier gezeigten Messungen bestätigen, dass allein aufgrund
minimaler Änderungen der höheren Resonanzen der Luftsäule
Tonhöhen- und Klangänderungen möglich sind. Diese Ef-
fekte sind deutlich hörbar und praxisrelevant: Viele Fagotti-
sten üben Hilfsgriffe und Griffvarianten ein, um auf ihrem
speziellen Instrument einige Töne leichter stimmend spielen
zu können oder um deren Klang gezielt zu verändern. Die
vorliegende Untersuchung unternimmt einen ersten Versuch
die durch Griffvarianten möglichen Änderungen zu quanti-
fizieren. Unter Beibehaltung der Lippenkraft des Ansatzes
änderten sich allein durch das Umgreifen die übrigen Anblas-
parameter wie Blasdruck, Luftvolumenstrom und Lautstärke
um -10 bis +25 %. Die beobachteten Tonhöhenänderungen
liegen bei weniger als 1/5 Halbtonschritt.

Die Änderungen sind dynamikabhängig und können im *pia-
no* oder *forte* gegensätzlich gerichtet sein. Im Klangspektrum
werden Verschiebungen des zweiten Formanten beobachtet.

Aufgrund dessen liegt es nahe, dass einfache Ansätze wie die von Wogram vorgeschlagene “Summenfunktion“ [10] nicht geeignet sind, um die zugrunde liegenden Effekte zu erklären. Ein physikalisches Minimalmodell des Rohrblattes könnte hilfreich sein, um die Dynamik des gekoppelten Systems besser zu verstehen, und den Einfluss höherer Resonatormoden auf die Schwingungsdauer theoretisch zu untersuchen. Nederveen *et al.* haben Tonhöhenänderungen für einige Hilfsgriffe bei der Klarinette anhand eines Ab-initio Modells erklären können [8]. Aufgrund der komplexen Geometrie des Doppelrohrblattmundstückes und der konischen Resonatorgeometrie wird es nicht leicht sein, die hier gezeigten Messergebnisse für das Fagott anhand eines Modells quantitativ nachvollziehen zu können. Dies wäre eine Voraussetzung, um dem Instrumentenbauer konstruktive Änderungen vorschlagen zu können, mit dem Ziel das heutige moderne Fagott einfacher spielbar zu machen.

Danksagung

Der Autor bedankt sich recht herzlich bei der TU Dresden sowie bei der Musikhochschule Detmold, insbesondere Prof. Klaus Wolf und Prof. Malte Kob, für die Möglichkeit, den Versuchsaufbau ans Erich-Thienhaus Institut mitzubringen, zu ergänzen und die hier gezeigten Messungen durchführen zu können. Ein besonderer Dank gilt dem Rektorat der Hochschule für Musik Detmold und Prof. Malte Kob, die für den Autor am Erich-Thienhaus-Institut die Möglichkeit zur Forschungstätigkeit in der Musikalischen Akustik geschaffen haben.

Literatur

- [1] A. H. Benade. On the propagation of sound waves in a cylindrical conduit. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 44(2):616–623, 1968.
- [2] Terry B. Ewell. Ascii fingering representation. <http://www.idrs.org/resources/BSNFING/ascii.htm>, last viewed 2012/02/20, 1999.
- [3] Terry 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 2012/02/20, 1999.
- [4] N. H. Fletcher, J. Smith, A. Z. Tarnopolsky, and J. Wolfe. Acoustic impedance measurements—correction for probe geometry mismatch. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(5):2889–2895, 2005.
- [5] Frans Fransson. The source spectrum of double-reed woodwind instruments i. Technical report, Department for Speech, Music and Hearing, KTH, Stockholm, Sweden, 1966.
- [6] Bruno Gazengel, T. Guimezanes, Jean Pierre Dalmont, Jean Baptiste Doc, Sylvain Fagart, and Y Leveille. Experimental investigation of the influence of the mechanical characteristics of the lip on the vibrations of the single reed. In *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics, ISMA, Barcelona*, 2007.
- [7] Timo Grothe. Investigation of bassoon embouchures with an artificial mouth. In *Program of the 11th Congrès Français d’Acoustique and 2012 IOA annual meeting, Acoustics2012, Nantes*, 2012.
- [8] 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*, 131(1):689–697, 2012.
- [9] Thomas Ossman, Heinrich Pichler, and Gregor Widholm. Bias: A computer-aided test system for brass wind instruments. In *Audio Engineering Society Convention 87*, 10 1989.
- [10] Klaus Wogram. *Ein Beitrag zur Ermittlung der Stimmung von Blechblasinstrumenten*. PhD thesis, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, 1972.

Timbre Space revisited – Was ist Fakt, was ist Mythos?

Saleh Siddiq

Institut für Musikwissenschaft der Universität Wien, 1090 Wien, E-Mail: siddiq@gmx.at

Einleitung

Schon seit Stumpf [1] und spätestens seit Licklider [2] ist die Multidimensionalität des Phänomens Klangfarbe bekannt. Aus der Fülle der verschiedenen Ansätze [3][4][5][6] haben sich nach einer grundlegenden Studie von Grey [7] die *Timbre Spaces* (TS) zur Klangfarbenbeschreibung durchgesetzt. In diesen sind die klangfarblichen Merkmale von Musikinstrumenten entlang der Raumachsen angeordnet. Dabei haben sich mit der spektralen (*Schärfe* bzw. *Spectral centroid*) sowie zeitlichen Makrostruktur (*Einschwingvorgang*, bzw. Hüllkurve) vor allem zwei Parameter als Standarddimensionen der Klangfarbe durchgesetzt [8]. Aufgrund ihrer Anschaulichkeit und Plastizität sind sie in den meisten Lehrbüchern der musikalischen Akustik und Systematischen Musikwissenschaft zu einem festen Bestandteil der Klangfarbendefinition geworden.

Problem- und Fragestellung

Wenn derartige TS allgemeingültige Aussagen über Klangfarbenwahrnehmung treffen können, müssten Klänge gleicher bzw. ähnlicher Klangfarbe (d.h. Klänge gleicher Instrumente) in ähnlichen Regionen der TS liegen und die TS untereinander konsistent sein.

Da die meisten Studien jedoch auf (re-)synthetisierte Klänge jeweils gleicher Tonhöhe, Lautheit und perzeptiver Dauer reduziert sind, liegt der Schluss nahe, dass sich das Klangmaterial von Studie zu Studie stark unterscheidet. Auch bezüglich der Klangfarbendimensionen weichen die TS zum Teil voneinander ab.

Unter diesen Voraussetzungen sind Vergleichbarkeit und Allgemeingültigkeit der Ergebnisse stark eingeschränkt. Die konkrete Frage lautet also: Wie vergleichbar und allgemeingültig sind die bisher veröffentlichten Timbre Spaces?

Methodik: Timbre Spaces im Vergleich

Da sich die Fragestellung an den fertigen Modellen und nicht deren Erstellung orientiert, wurden nur die Ergebnisse, d.h. die euklidischen Räume und ihre speziellen Klangfarbenanordnungen, im Sinne von Koordinatensystemen miteinander verglichen.

Die verglichenen Timbre Spaces

Die Auswahlkriterien der Vergleichsräume waren Gemeinsamkeiten beim Klangmaterial (d.h. welche Instrumente wurden verwendet?) sowie den Klangfarbendimensionen, auf die das Modell rückbezogen wurde.

Mit der spektralen und zeitlichen Hüllkurve wurden in allen Vergleichsräumen die genannten „Standarddimensionen“ verwendet. Die dritte Dimension wird weniger zuverlässig

auf einen bestimmten Klangparameter bezogen [8]. Die letztlich zum Vergleich herangezogenen TS von Grey (1975), Krumhansl (1989) und McAdams et al. (1995) greifen diesbezüglich alle auf (spektrale) *Fluktuationen* zurück [7][9][10][11].

Krumhansl und McAdams et al. haben überdies jedem Klang eine *spezifische Dimension* („Specificity“) zugestanden, die sich allerdings nicht im TS niederschlägt [9][10][11]. Da sie aber die Korrelation mit den zugeordneten Parametern verbessert [10], fungiert sie vermutlich als Auslagerungsdimension, die alle nicht verwertbaren Klangeigenschaften speichert.

Alle Vergleichsräume basieren auf (re-)synthetisierten Klängen westlicher Instrumente (v.a. Holz- und Blechbläser, Streicher), deren Ähnlichkeiten in Hörversuchen ermittelt und in Matrizen übertragen wurden, woraus anhand *mehrdimensionaler Skalierung* (MDS) die euklidischen Modelle errechnet wurden [7][9][10][11].

Vergleich der Timbre Spaces

Zum Vergleich der TS wurde der Umstand genutzt, dass Berechnungen durch MDS die perzeptiven Klangfarbenunterschiede in Distanzen übersetzen. Oder anders gesagt: Aus (Un-)Ähnlichkeitsverhältnissen werden Distanzverhältnisse [9][10][11]. Die maximale Distanz (maximale Unähnlichkeit) wurde jeweils als 100% interpretiert, wodurch die verschiedenen TS aufeinander bezogen werden konnten. Auf diese Weise wurde ein *Meta Timbre Space* (MTS) erstellt, der alle gemeinsam verwendeten Klänge aus den Vergleichsräumen beinhaltet und zueinander in Beziehung setzt.

Ergebnisse

Der Vergleich zeigt, dass die gleichen Instrumente, je nach Studie, zum Teil sehr unterschiedliche Positionen im Raum einnehmen. Bemerkenswert ist dies vor allem beim Vergleich der TS von Krumhansl und McAdams et al., da sie auf den selben Stimuli basieren.

Zur Veranschaulichung sollen drei exemplarische Instrumente (Fagott (Holzbläser), Posaune (Blechbläser) und Streicher; siehe Tab. 1., Abb. 1.) herangezogen werden.

Tabelle 1: Meta Timbre Space-Koordinaten von Fagott, Posaune und Streichern. Abk.: G = Grey, K = Krumhansl, M = McAdams; ZHK = zeitliche Hüllkurve, Flux = Fluktuation, SHK = spektrale Hüllkurve

| Achsen | Fagott | | | Streicher | | | Posaune | | |
|----------|--------|----|----|-----------|----|----|---------|-----|----|
| | G | K | M | G | K | M | G | K | M |
| ZHK (X) | 54 | 0 | 13 | 90 | 12 | 13 | 67 | 12 | 13 |
| Flux (Y) | 99 | 37 | 14 | 20 | 63 | 80 | 91 | 100 | 29 |
| SHK (Z) | 66 | 16 | 82 | 65 | 21 | 73 | 0 | 100 | 12 |

Die deutlichsten Unterschiede treten bei der Posaune auf (Abb. 1, gestricheltes Dreieck), die v.a. hinsichtlich der spektralen Hüllkurve und Fluktuationen praktisch an gegenüberliegenden Raumenden positioniert ist.

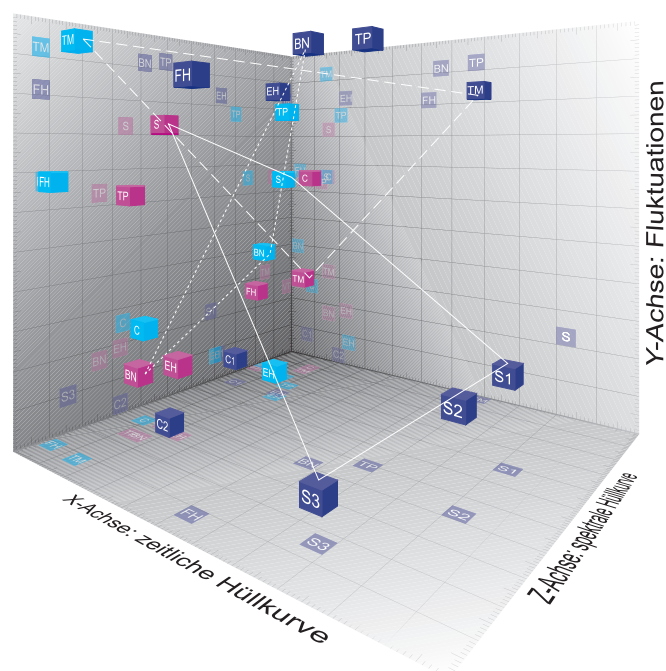


Abbildung 1: Meta Timbre Space (MTS). Farben: Blau = Grey; Cyan = Krumhansl, Magenta = McAdams; Dimensionen: zeitliche Hüllkurve (X), Fluktuationen (Y), spektrale Hüllkurve (Z); Abk.: BN = Fagott, C = Klarinette, EH = Engl. Horn, FH = Waldhorn, S = Streicher, TM = Posaune, TP = Trompete; voll = Lage d. Streicher, gestrichelt = Lage d. Posaunen, gepunktet = Lage d. Fagotte

Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen, daß TS in dieser Form weder vergleichbar noch verallgemeinerbar und im Bezug auf die Wahrnehmung von Klangfarben nur sehr bedingt aussagekräftig sind.

Es ist erstaunlich, dass trotz zum Teil identischer Stimuli so unterschiedliche Ergebnisse vorliegen. Mögliche Erklärungen sind v.a. Abweichungen in der Beurteilung durch die Versuchspersonen, unter Umständen bedingt durch divergente Abhörbedingungen, sowie das synthetische, jeweils in Tonhöhe, Lautheit und Dauer synchronisierte Klangmaterial. Da die Klangfarbendimensionen den Daten i.d.R. erst nach der Berechnung zugeordnet werden, ist unwahrscheinlich, dass sie das Ergebnis maßgeblich beeinflussen.

Dass es bisher nicht gelungen ist, allgemeingültige TS zu entwickeln überrascht in mehrerlei Hinsicht. Zum Einen sind sich die Autoren der verglichenen Studien der Tonhöhen- und Dynamikabhängigkeit musikalischer Klangfarben durchaus bewusst [7][9] und haben überdies im Blick, dass TS erst durch natürliche Klänge und Hörbedingungen bezüglich ihrer Praxistauglichkeit überprüft werden können [11]. Zum Anderen hat Stumpf mit seiner *Klangfarbendefinition im engeren und weiteren Sinn* [1] eine solide

Palette in Frage kommender Dimensionen (bzw. zugrunde liegender akustischer Parameter) vorgelegt und Schumann zudem das Verhalten des Spektrums im Bezug auf musikalische Dynamik sehr präzise beschrieben [2].

In einem derzeit an der Universität Wien vorbereiteten Forschungsprojekt, in dessen Rahmen auch die vorliegenden Beobachtungen fallen, wird das Konzept des TS deshalb neu aufgegriffen.

Unter Berücksichtigung der Tonhöhen- und Dynamikabhängigkeit von Klangfarben sowie unter Zuhilfenahme heutiger technischer Möglichkeiten sollen die gehörrichtigen Klangfarbendimensionen identifiziert und darauf aufbauend eine sowohl allgemeingültige als auch von Tonhöhe und Spielweise unabhängig stimmige Ordnungssystematik für Klangfarben erstellt werden.

Literatur

- [1] Stumpf, A.: Tonpsychologie, Bd. 2. Hirzel, Stuttgart, 1890
- [2] Licklider, J. C. R.: Basic Correlates of the Auditory Stimulus. Stevens, S. S. (Hrsg.): Handbook of experimental Physiology. Winley & Sons, New York, 1951, 985–1039
- [3] Köhler, W.: Akustische Untersuchungen. Beiträge zur Akustik und Musikwissenschaft 4. Leipzig, 1909
- [4] Schumann, K. E. Physik der Klangfarben, Bd. 2., Habil. Berlin, 1929
- [5] Albersheim, G.: Zur Psychologie der Ton- und Klangeigenschaften. Unter Berücksichtigung der „Zweikomponententheorie“ und der Vokalsystematik. Heitz & Co, Strassburg [u.a.], 1939
- [6] Bismarck, G. v.: Extraktion und Messung von Merkmalen der Klangfarbenwahrnehmung stationärer Schalle, Diss. Mitteilung aus dem Sonderforschungsbereich 50 „Kybernetik“, München, 1972
- [7] Grey, J. M.: An exploration of musical timbre using computer-based techniques for analysis, synthesis and perceptual scaling. Stanford University, Center for Computer Research in Music and Acoustics, Report No. STAN-M-2, 1975
- [8] Caclin, A. et al.: Acoustic correlates of timbre space dimensions: A confirmatory study using synthetic tones. JASA 118 (2005), 471–482
- [9] Krumhansl C.: Why is musical timbre so hard to understand? Nielzen, S.; Olsson, O. (Hrsg.). Structure and perception of electroacoustic sound and music. Elsevier, Amsterdam, 1989, S. 43–53
- [10] McAdams, S. et al.: Perceptual scaling of synthesized musical timbres: Common dimensions, specificities, and latent subject classes. Psychological Research. 58 (1995), 177–192
- [11] McAdams, S.: Perspectives on the Contribution of Timbre to Musical Structure. Computer Music Journal. 23 (1999), 85–102

Kann das Vibrato der Gesangstimme durch psychoakustische Größen beschrieben werden?

Maximilian Schmitt, Malte Kob

Erich-Thienhaus-Institut, Hochschule für Musik Detmold

E-Mail: {maximilian.schmitt,kob}@hfm-detmold.de

Abstract

Aufgrund der physiologischen Erzeugung zeigt das Vibrato der Singstimme sowohl eine periodische Änderung der Grundfrequenz als auch der Amplitude mit einer Modulationsfrequenz von ca. 4 bis 8 Hz. Die einzelne Betrachtung der Variation der beiden Signalparameter Frequenz und Amplitude mit den Parametern Jitter und Shimmer ist daher zwar möglich, charakterisiert die makroskopische Variation eines Vibratos jedoch nicht hinreichend.

In der Psychoakustik wird als Parameter für eine Beurteilung der wahrgenommenen Schwankungsstärke eine kombinierte Amplituden- und Frequenzmodulation definiert. Untersuchungen verschiedener Stimuli von Wickelmaier et al. haben jedoch gezeigt, dass die Schwankungsstärke die Frequenzmodulation nicht zufriedenstellend beschreibt, während die Implementierung des *Extents*, also Frequenzhubs von Amir et al. sogar eine zuverlässige Klassifikation von Vibrato ermöglicht. Es stellt sich die Frage, inwiefern eine Standardisierung der Schwankungsstärke für die Musikalische Akustik sinnvoll wäre.

Wir vergleichen im Vortrag verschiedene Algorithmen zur Berechnung der Schwankungsstärke anhand von Gesangsbeispielen und untersuchen, welche psychoakustische Größe geeignet ist, ein Gesangsvibrato in verschiedenen Ausführungen zu beschreiben.

Einleitung

In der Musik bezeichnet das Vibrato eine geringfügige periodische Variation der Frequenz eines gehaltenen Tons. In der Praxis lässt sich ein Vibrato auf den meisten natürlichen Instrumenten und insbesondere im Gesang nicht durchführen ohne auch die Amplitude periodisch zu variieren. Nach der klassischen Definition von Seashore [1] besteht das *Gesangsvibrato* aus der periodischen Veränderung von Frequenz, Amplitude und Formantenspektrum.

Ein professioneller Sänger kann das Vibrato als musikalisches Gestaltungsmittel einsetzen und bewusst verstärken oder abschwächen.

Das lange und laute Singen ohne Vibrato führt normalerweise zur Stimmermüdung. Durch das Vibrato wird die erhöhte Anspannung der Muskeln bei höheren Lautstärken kompensiert, indem sich der *Vocalis-Muskel* an den Stimmlippen periodisch entspannt [11].

Aufgrund der größeren Bandbreite eines frequenz- und amplitudenmodulierten Tons ist der Gesang mit Vibrato im Ensemble außerdem durchsetzungsfähiger.

Zunächst werden im folgenden Abschnitt die anatomischen Ursachen und die Eigenschaften eines Stimmvibratos beschrieben. Anschließend werden alle Größen und Maße vorgestellt, die wir in unseren Untersuchungen betrachtet

haben. Im darauffolgenden Abschnitt werden diese Maße dann zunächst auf Sinustöne mit genau definierter Modulation angewandt und danach auf reale Gesangsaufnahmen mit Vibrato. Schließlich wird das Fazit gezogen und offene Fragen werden aufgezeigt.

Anatomische Ursachen des Gesangsvibratos

Bei der Entstehung des Vibratos der Gesangstimme wirken verschiedene anatomische Mechanismen zusammen, deren Anteile noch nicht genau geklärt sind [2].

1. **Stimmlippen:** Die Spannung der Stimmlippen ändert sich periodisch, wodurch eine Frequenz- und Amplitudenmodulation mit einer Modulationsfrequenz zwischen 6,5 und 8 Hz resultiert.
2. **Kehlkopf:** Durch einen Tremor der Kehlkopfmuskulatur vollführt der Kehlkopf eine periodische Kippbewegung. Die Länge des Ansatzrohrs bis zum Mund variiert somit und es ergibt sich eine Phasenmodulation.
3. **Zwerchfell:** Durch Schwankungen des Anregungsluftstroms aufgrund rhythmischer Bewegung des Zwerchfells werden sowohl Amplituden- als auch Frequenzschwankungen verursacht. Die Rate dieser Schwankungen liegt zwischen 3,5 und 4 Hz.

Durch die Kopplung dieser Systeme entsteht ein „komplexes Vibrato“, mit einer Modulationsfrequenz zwischen 4,5 und 8 Hz.

Als Modulationstiefe wird von Horii eine Bandbreite von 50 bis 150 Cent angegeben [3], von Migita eine Bandbreite von 68 bis 84 Cent [4]. Die Modulationstiefe steht hierbei für die gesamte Bandbreite der Modulation, 100 Cent würden also eine Variation um jeweils einen Viertelton über und unter die Mittenfrequenz bedeuten. Die Modulationstiefe im Operngesang ist im Allgemeinen höher als im Jazz- oder Popgesang [5].

Die Amplitudenschwankungen eines Vibratos liegen zwischen 2 und 3 dB [3].

Größen zur Beschreibung von Frequenz- und Amplitudenmodulation

Rate, Extent & Amplitude

Um die Modulationsfrequenz und die Frequenz- bzw. Amplitudenmodulationstiefe eines Gesangsvibratos zu bestimmen, wurden in verschiedenen Untersuchungen die Maße *Rate*, *Extent* und *Amplitude* berechnet [4, 5].

Die von uns implementierten Berechnungsverfahren lehnen sich an die Methode von Amir [5] an und werden an dieser Stelle kurz erläutert.

Das Verfahren basiert auf einem Tracking der Grundfrequenz (Tonhöhe) der Stimme. Da die Bestimmung der Grundfrequenz des Gesangs in einem instrumental begleiteten Stück nicht ohne eine hohe Fehlerrate funktioniert, wurde in [5] die gesungene Tonhöhe zunächst geschätzt und das Signal mit einem Schmalband-Filter um die Tonhöhe herausgefiltert. Diesen Schritt konnten wir auslassen, da wir uns zunächst auf die Analyse modulierter Sinustöne und reine Gesangsaufnahmen konzentriert haben. Der Verlauf der Grundfrequenz wurde von der Software *Praat* [13] berechnet.

Zur Bestimmung der **Rate** wurde nun über eine FFT das Spektrum des Tonhöhen-Verlaufs berechnet (*Pitch Spectrum*) und die Stelle des Maximums bestimmt.

Der **Extent** wird durch den Interperzentil-Bereich aller Werte der Grundfrequenz, ausgedrückt in Cent, festgelegt. Empirisch wurde als Interperzentil-Bereich der Wertebereich gewählt, in dem die mittleren 90% aller Werte liegen. Dadurch werden Ausreißer und Fehler bei der Bestimmung der Grundfrequenz durch Ein- und Ausschwingen des Vibratos oder des Tracking-Algorithmus verhindert.

In Abbildung 1 ist dies veranschaulicht.

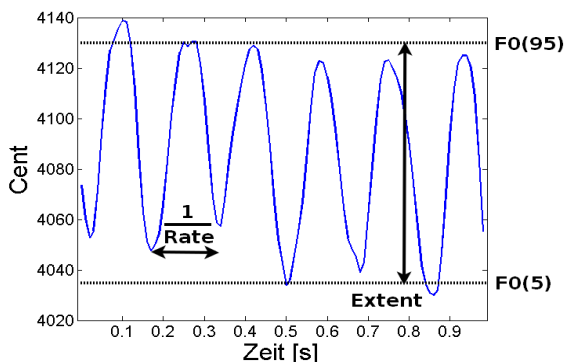


Abbildung 1: Illustration der Parameter Rate und Extent am Verlauf der Grundfrequenz F_0 einer Stimme mit den Perzentilen $F_0(X)$

Das Maß **Amplitude** berechnet sich analog zum Extent, jedoch aus dem Verlauf des Pegels über der Zeit. Da dieser in Anwesenheit von Hintergrundmusik sehr schwierig zu bestimmen ist, wird es von Amir nicht weiter betrachtet. Problematisch bei der Berechnung der *Amplitude* ist auch die häufig zu konstatierende Drift (Crescendo oder Diminuendo) des Pegels während eines Vibratos.

Jitter & Shimmer

Die beiden Größen Jitter und Shimmer werden in der Stimmanalyse und Stimmdiagnostik verwendet, um Mikrovariationen der Grundfrequenz (Jitter) und der Amplitude (Shimmer) der Stimme zu beschreiben [10].

In unseren Untersuchungen wurden Jitter und Shimmer mit der Software *Praat* [13] berechnet. Auch mit den Programmen *openSMILE* [14] und *MDVP* [15] lassen sich die beiden Größen berechnen, allerdings sind die verwendeten Algorithmen unterschiedlich, sodass die Ergebnisse nicht

kompatibel sind.

In *Praat* sind ebenfalls verschiedene Berechnungsmethoden angeboten, die sich jedoch bis auf eine Skalierung fast identisch verhalten. Daher wurden nur die Methode *local* berücksichtigt, bei der für den Jitter die durchschnittliche Abweichung der Verschlusszeiten der Stimmlippen zweier benachbarten Perioden ermittelt wird. Beim Shimmer wird analog dazu die durchschnittliche Abweichung der Amplitude zu den Verschlusszeiten berechnet.

Schwankungsstärke

Eberhard Zwicker und Hugo Fastl führten die *Schwankungsstärke* als subjektive Empfindungsgröße der Lautheitschwankungen amplituden- oder frequenzmodulierter Signale ein. In [7] ist ein Berechnungsmodell angegeben, jedoch kein vollständiger Algorithmus. Insbesondere ist nicht beschrieben, wie die Modulationsfrequenzen bestimmt werden und wie in Gegenwart mehrerer Modulationsfrequenzen vorgegangen werden muss. Der Parameter *Schwankungsstärke* ist im Gegensatz zu den psychoakustischen Größen *Lautheit* oder *Schärfe* nicht standardisiert.

In eigenen Untersuchungen stellten wir fest, dass die Schwankungsstärke in unterschiedlichen Programmen zur psychoakustischen Bewertung von Geräuschen völlig unterschiedliche Werte annimmt. Die Skalierung der Schwankungsstärke ist verschieden und die Korrelation der Werte für eine Datenbank aus mehr als 40 Geräuschen, darunter Musik, Sprache und Verkehrsgeräusche, liegt teilweise unter 50% [12].

Bei den in [7] dargestellten Untersuchungen wurde die Schwankungsstärke für beide Modulationsarten bei einer Modulationsfrequenz von 4 Hz am größten bewertet. Untersuchungen von Wickelmaier und Ellermeier [6] haben jedoch gezeigt, dass der Einfluss der Modulationsfrequenz auf die Schwankungsstärke individuell völlig gegensätzlich bewertet wird. Das mit der *Brüel & Kjaer Sound Quality Software* berechnete Maß der Schwankungsstärke kann deren subjektive Bewertung, insbesondere bei Modulationsfrequenzen die sich deutlich von 4 Hz unterscheiden, auch nicht näherungsweise abbilden. Übereinstimmend war in dem Experiment nur die Bewertung des Modulationsgrads, der mit zunehmendem Grad als größere Schwankungsstärke empfunden wurde.

Es stellt sich die Frage, ob die Definition einer Größe Schwankungsstärke prinzipiell möglich und sinnvoll ist oder ob Amplituden- und Frequenzmodulation allgemein sehr unterschiedlich wahrgenommen werden.

In unseren Untersuchungen zum Gesangsvibrato haben wir zwei Verfahren zur Berechnung der Schwankungsstärke verglichen. Zum einen den Algorithmus aus den *Sound Quality Metrics* der Software *PULSE* von *Brüel & Kjaer*, zum anderen ein als *Fluctuation* bezeichnetes Maß aus dem *PsySound*-Projekt [16].

In *PULSE* wird die Schwankungsstärke aus den Teilschwankungsstärken jeder Frequenzgruppe gebildet. In jeder Frequenzgruppe wird aus der Hüllkurve des Teilbandsignals eine Modulationsfrequenz bestimmt. Die Teilschwankungsstärke wird wie in Formel 1 aus der Varianz der zeitvarianten Laut-

heit gebildet und mit der ermittelten Modulationsfrequenz $f_{\text{mod}}(z)$ so gewichtet, dass sich das Maximum bei einer Modulationsfrequenz von 4 Hz einstellt. Im Unterschied zur Darstellung in [7, Formel 10.3] wird hier für jedes Frequenzband eine spezifische Modulationsfrequenz verwendet.

Der *Pegelhub des Mithörschwellen-Zeitmusters* $\Delta L_E(z)$ errechnet sich aus den Lautheitsperzentilen mit $\Delta L_E(z) = 20 \log_{10} \frac{N'(1)}{N'(99)}$

$$F'(z) = \frac{0,032 \cdot \Delta L_E(z) \cdot \Delta z}{\frac{f_{\text{mod}}(z)}{4} + \frac{4}{f_{\text{mod}}(z)}} \quad (1)$$

Die Schwankungsstärke wird schließlich aus der Summe aller Teilschwankungsstärken gebildet.

PULSE liefert einen Schwankungsstärke-Wert für jede Sekunde eines Audiosignals. Die Berechnungsmethode benötigt jedoch eine lange Einschwingzeit, sodass bei Dateien von weniger als 10 Sekunden Länge der Mittelwert in hohem Maße von der Länge der Datei abhängig ist. Die in den unteren Abschnitten betrachteten Vibratoaufnahmen haben daher eine Länge, welche die übliche Länge eines Gesangsvibratos deutlich übersteigt.

Das Berechnungsverfahren der *Fluctuation* in *PsySound* ist prinzipiell ähnlich, die Lautheitsberechnung basiert auf dem *Dynamic-Loudness-Modell* [8] von Josef Chalupper. Es fehlt jedoch die Gewichtung mit der Modulationsfrequenz, d.h. der maximale Zahlenwert resultiert nicht für eine Modulationsfrequenz von 4 Hz.

Ergebnisse für modulierte Sinustöne

Vor der Auswertung der beschriebenen Größen auf echte Gesangsaufnahmen wurden diese für künstlich erzeugte modulierte Sinustöne berechnet, um festzustellen, wie sich die Größen bei Modulationen mit bekannten genau definierten Parametern verhalten.

Die Frequenzmodulation wird auf die Phasenmodulation in Gleichung 2 zurückgeführt. Dabei beschreibt $f_s(t)$ das Nutzsignal, k den *Phasenmodulationsindex* und f_0 die (arithmetische) Mittenfrequenz.

$$y_{\text{PM}}(t) = \sin \left(2\pi (f_0 t + k f_s(t)) \right) \quad (2)$$

Aus der zeitvarianten Phase ergibt sich die Momentanfrequenz $f_{0,\text{PM}}(t)$ aus Gleichung 3. Da die Frequenz die Ableitung der Phase ist, geht in die Momentanfrequenz des modulierten Signals die Ableitung des Nutzsignals ein.

$$f_{0,\text{PM}}(t) = f_0 + k f_s'(t) \quad (3)$$

Bei der Frequenzmodulation stellt als einziger Unterschied $f_s(t)$ das Integral des Nutzsignals dar.

Da wir eine sinusförmige Modulation des Trägersignals möchten, ist unser *Nutzsignal* ein Cosinus mit der Modulationsfrequenz f_{mod} . Die Integration des *Nutzsignals* zum Sinus in Gleichung 4 ist hier eigentlich nicht relevant, da dies nur eine Phasenverschiebung der Modulation bewirkt.

$$y_{\text{FM}}(t) = \sin \left(2\pi f_0 t + \frac{A_{\text{FM}}}{2 f_{\text{mod}}} \sin(2\pi f_{\text{mod}} t) \right) \quad (4)$$

Für die Modulationstiefe A_{FM} , also die Bandbreite zwischen minimaler und maximaler Frequenz im modulierten Signal, gilt $A_{\text{FM}} = 2k$. Durch Ableitung des Arguments ohne den Vorfaktor 2π erhalten wir gemäß Gleichung 3 die gewünschte Momentanfrequenz zwischen $+\frac{A_{\text{FM}}}{2}$ und $-\frac{A_{\text{FM}}}{2}$ in Gleichung 5.

$$f_{0,\text{FM}}(t) = f_0 + \frac{A_{\text{FM}}}{2} \cos(2\pi f_{\text{mod}} t) \quad (5)$$

Die Amplitudenmodulation wird nach Gleichung 6 erzeugt und auf das frequenzmodulierte Signal aufmoduliert (Gleichung 7).

$$m_{\text{AM}}(t) = A_{\text{AM}} \cos(2\pi f_{\text{mod}} t) + 1 \quad (6)$$

$$y(t) = m_{\text{AM}}(t) \cdot y_{\text{FM}}(t) \quad (7)$$

Der Modulationsgrad A_{AM} kann hierbei Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Bei maximalem Modulationsgrad wird das Signal zwischen der doppelten Amplitude und der Amplitude 0 moduliert.

Die Phasenverschiebung um $\frac{\pi}{2}$ (Cosinus anstatt Sinus) in Gleichung 6 bewirkt, dass Amplitude und Frequenz ihre Maxima an denselben Stellen haben.

In der Auswertung mit verschiedenen Parametern f_{mod} , A_{FM} und A_{AM} geben die Maße *Rate*, *Extent* und *Amplitude* Modulationsfrequenz, Modulationstiefe bzw. Modulationsgrad sehr genau wieder und sind jeweils nahezu invariant gegenüber den anderen Parametern.

Jitter und *Shimmer* nehmen beide linear mit wachsender Modulationsfrequenz zu. Wie zu erwarten wächst nur die Größe *Jitter* mit einer zunehmenden Frequenzmodulation, also einer größeren Modulationstiefe, während *Shimmer* ausschließlich auf eine zunehmende Amplitudenmodulation anspricht.

Wie Abbildung 2 bestätigt, hat die Schwankungsstärke aus

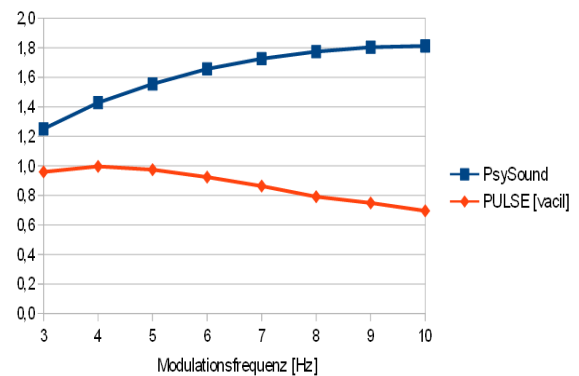


Abbildung 2: Schwankungsstärke in Abhängigkeit der Modulationsfrequenz für einen Sinuston von 500 Hz bei 80 dB mit einer Modulationstiefe von 20 Hz und einem Amplituden-Modulationsgrad von 0,5

PULSE ihr Maximum bei einer Modulationsfrequenz von 4 Hz und fällt in beide Richtungen ab, während die Schwankungsstärke aus *PsySound* zwischen 3 und 10 Hz ansteigt, bei etwa 10 Hz aber einen Grenzwert erreicht.

Der Einfluss der Frequenzmodulation auf beide Maße ist sehr

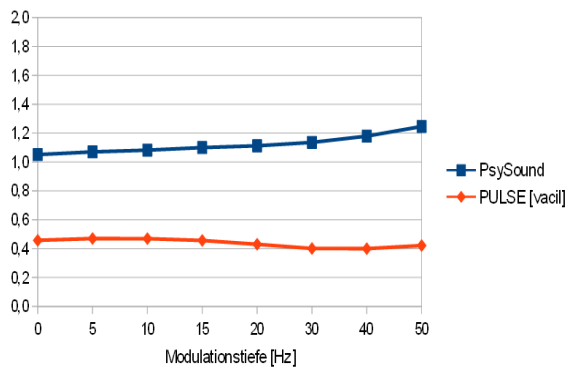


Abbildung 3: Schwankungsstärke in Abhängigkeit der Modulationstiefe der Frequenzmodulation für einen Sinuston von 500 Hz bei 80 dB mit einer Modulationsfrequenz von 6 Hz und einem Amplituden-Modulationsgrad von 0,5

gering (Abbildung 3). Der Wert aus *PsySound* steigt zwar mit steigender Modulationstiefe etwas an, in Zahlenwerten ist dieser Anstieg jedoch relativ klein. Bei *PULSE* ist der Verlauf über der Modulationstiefe noch nicht einmal monoton.

Die Schwankungsstärke aus beiden Berechnungsmethoden

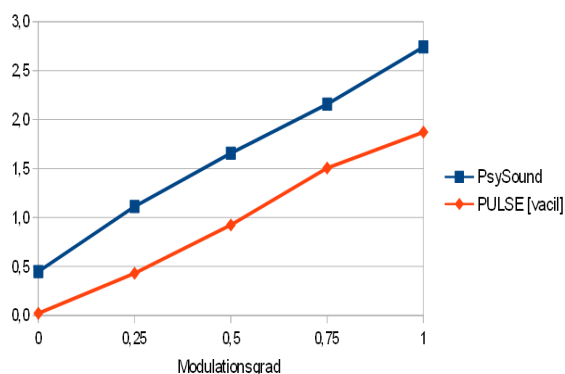


Abbildung 4: Schwankungsstärke in Abhängigkeit des Modulationsgrads der Amplitudenmodulation für einen Sinuston von 500 Hz bei 80 dB mit einer Modulationsfrequenz von 6 Hz und einer Modulationstiefe von 20 Hz

steigt aber nahezu linear und auch quantitativ eindeutig mit stärkerer Amplitudenmodulation (Abbildung 4).

Ergebnisse für Gesangsaufnahmen

Zur Evaluation der Größen für echtes Gesangsvibrato wurden von uns Gesangsaufnahmen eines Sängers und einer Sängerin, beide Studenten, erstellt.

Aufgabe war es, jeweils drei bis viermal **ohne Vibrato**, mit **schwachem Vibrato** und mit **starkem Vibrato** einen Ton zu singen und über mehrere Sekunden zu halten. Tonhöhe und Vokal sollten dabei bei jeder Vibratostärke variiert werden.

Abbildung 5 zeigt, dass die mittleren Modulationsfrequenzen beider Sänger bei ca. 6 Hz liegen. Beim Sänger ist die Modulationsfrequenz bei schwachem Vibrato signifikant um fast 1 Hz niedriger als bei starkem Vibrato. Bei der Sängerin zeigt sich eher eine gegenteilige Tendenz. Die Raten sind jedoch in allen Fällen ziemlich konstant und konnten auch

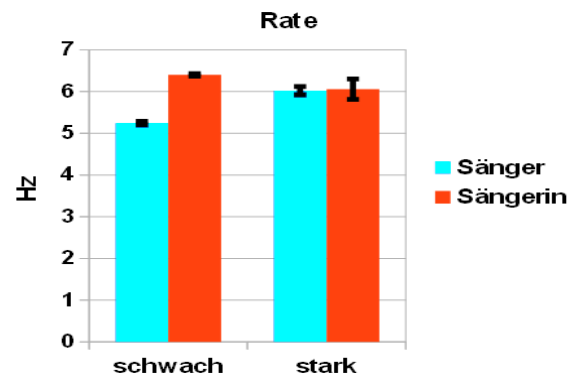


Abbildung 5: Rate (Modulationsfrequenz) des Gesangsvibratos des Sängers und der Sängerin bei schwachem und starkem Vibrato

nach eigenen Aussagen der Sänger kaum beeinflusst werden.

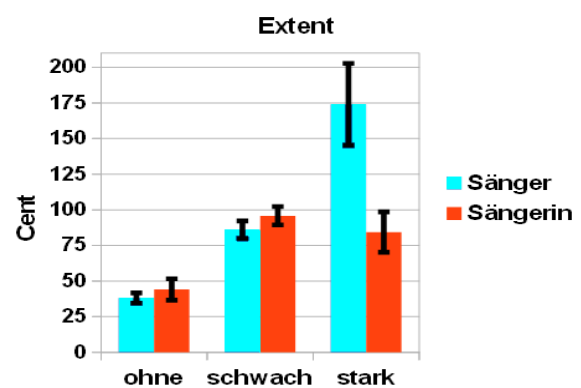


Abbildung 6: Extent des Sängers und der Sängerin ohne, bei schwachem und bei starkem Vibrato

Der Extent (Abbildung 6) steigt beim Sänger zwischen den drei Abstufungen signifikant an, während bei der Sängerin am Extent quasi kein Unterschied zwischen schwachem und starkem Vibrato festzustellen ist. Der Parameter Amplitude konnte nicht zuverlässig ermittelt werden, da die Amplitude während der Vibratotöne meist eine Drift hatte, also im Verlauf lauter oder leiser geworden ist.

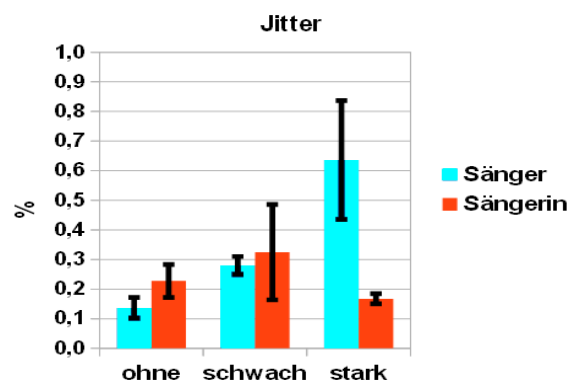


Abbildung 7: Jitter des Sängers und der Sängerin ohne, bei schwachem und bei starkem Vibrato

Auch bei Jitter und Shimmer (Abbildungen 7 & 8) ist wie beim Extent festzustellen, dass sich nur beim Sänger die Unterschiede der Vibratostärke zeigen. Bei der Sängerin liegen

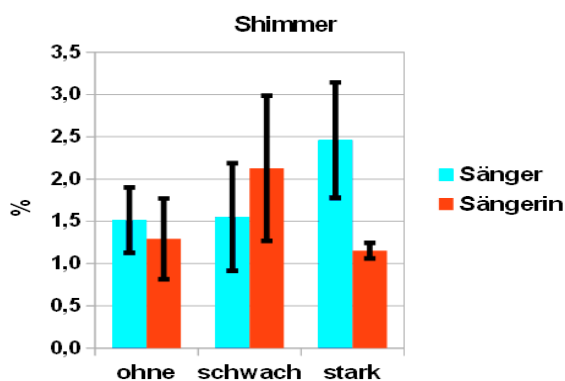


Abbildung 8: Shimmer des Sängers und der Sängerin ohne, bei schwachem und bei starkem Vibrato

die Maße sogar noch unter dem Wert für den Gesang ohne Vibrato.

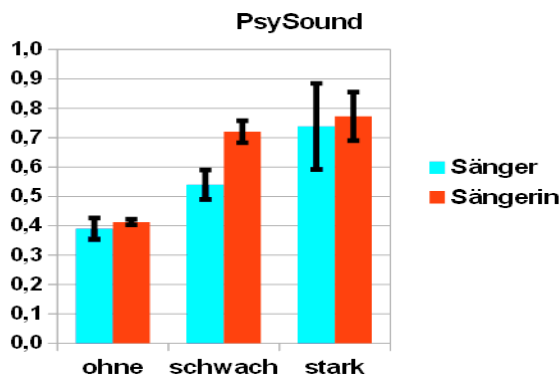


Abbildung 9: Schwankungsstärke aus PsySound3 des Sängers und der Sängerin ohne, bei schwachem und bei starkem Vibrato

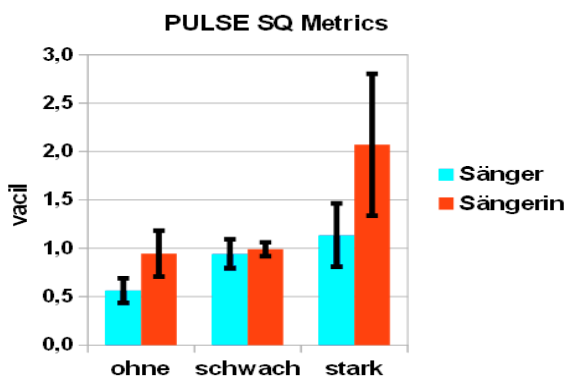


Abbildung 10: Schwankungsstärke aus PULSE des Sängers und der Sängerin ohne, bei schwachem und bei starkem Vibrato

Bei der Schwankungsstärke (Abbildungen 9 & 10) lässt sich hingegen für beide Berechnungsmethoden ein Anstieg mit zunehmender Vibratostärke feststellen. Während beim Sänger die Diskrimination mit PsySound besser funktioniert, ist bei der Sängerin zumindest für die Unterscheidung zwischen schwachem und starkem Vibrato das Maß aus PULSE geeigneter. Allgemein steigen jedoch beide Maße bei beiden Sängern monoton mit zunehmender Vibratostärke.

Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich in unserem Versuch die Stärke eines Gesangsvibratos nur bei einer Testperson in Extent, Jitter und Shimmer zeigte. Allein die Schwankungsstärke war bei beiden Sängern tendenziell bei starkem Vibrato größer.

Wir konnten feststellen, dass die Abstufungen der Maße bei unterschiedlichen Vibratostärken kaum vom Pegel abhängig waren. Allerdings ist die Schwankungsstärke von der Frequenz des Grundtons der Stimme abhängig, dies zeigt sich insbesondere bei *PULSE*. Da die eingesungenen Tonhöhen bei jeder Vibratostärke im Mittel gleich waren, dürfte sich diese Abhängigkeit jedoch nicht gravierend auf die Ergebnisse ausgewirkt haben.

Es sind weitere Untersuchungen notwendig, ob die Inkonsistenzen der gemessenen Größen und Parameter durch die Ausbildung und die Fähigkeiten des Sängers bzw. der Sängerin, durch unterschiedlichen Gesangsstil oder durch anatomische Unterschiede begründet sind. Entscheidend ist auch die Frage, welche Parameter vom Sänger gezielt beeinflussbar sind und welche durch die Anatomie fest vorgegeben sind, insbesondere inwiefern die Anteile der Amplituden- und der Frequenzmodulation gesteuert werden können.

Literatur

- [1] Carl E. Seashore: In Search of Beauty in Music – A Scientific Approach to Musical Esthetics. The Ronald Press Company, New York, 1947
- [2] Peter-Michael Fischer: Die Stimme des Sängers. Analyse ihrer Funktion und Leistung – Geschichte und Methodik der Stimmbildung. Metzler, Stuttgart, 1993
- [3] Yoshiyuki Horii: Acoustic Analysis of Vocal Vibrato: A Theoretical Interpretation of Data. Journal of Voice, 3 (1989), 36-43
- [4] Naoto Migita, Masanori Morise und Takanobu Nishiura: A Study of Vibrato Features to Control Singing Voices, Proceedings of 20th International Congress on Acoustics (ICA), 2010, 43, 72-75
- [5] Noam Amir, Irit Ronen und Ofer Amir: Acoustic Characteristics of Vibrato in Different Singing Styles, Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC) 2013
- [6] Florian Wickelmaier und Wolfgang Ellermeier: Scaling the Perceived Fluctuation Strength of Frequency-Modulated Tones. Presented at the 147th Meeting of the Acoustical Society of America, New York, 2004
- [7] Hugo Fastl und Eberhard Zwicker: Psychoacoustics – Facts and Models. 3. Auflage, Springer, Berlin, 2007
- [8] Josef Chalupper und Hugo Fastl: Dynamic Loudness Model (DLM) for Normal and Hearing-Impaired Listeners. Acta Acustica United with Acustica, vol. 88 (2002), 378-386
- [9] Josef Chalupper: Modellierung der Lautstärkeschwankung für Normal- und Schwerhörige. DAGA 2000, 254-255

- [10] R.J. Baken und Robert F. Orlikoff: Clinical Measurement of Speech and Voice. 2. Edition, Singular, Delmar, 2000
- [11] Richard Miller: Solutions for Singers – Tools for Every Performer and Teacher. Oxford University Press, New York, 2004
- [12] Tobias Weissgerber, Sabine Schlittmeier, Stefan Kerber, Hugo Fastl und Jürgen Hellbrück: Ein Algorithmus zur Vorhersage des Irrelevant Sound Effects. DAGA 2008
- [13] Praat: doing phonetics by computer, URL:
<http://www.fon.hum.uva.nl/praat/>
- [14] openSMILE: The Munich Versatile and Fast Open-Source Audio Feature Extractor. , URL:
<http://opensmile.sourceforge.net/>
- [15] MDVP - The Multi-Dimensional Voice Program, URL:
<http://www.kaypentax.com/>
- [16] PsySound3 Projektseite <http://psysound.wikidot.com/>

Workshops und Demonstrationen

Yuri Landman¹, Cristina Zamorano Martinez², Simon Waloschek³, Polina Zakharchuk⁴,
Timo Grothe³, Malte Kob³

E-mail: ¹ strateraser@gmail.com, ² cristinaceta@gmail.com, ³{waloschek, grothe, kob}@hfm-detmold.de, ⁴ polifro@gmail.com

Übersicht

Das Rahmenprogramm zum FAMA-Seminar bestand aus insgesamt vier Beiträgen in Form von Demonstrationen.

Eingangs fand für die Teilnehmer des Seminars ein Hörversuch zu Klangfarben-Nuancen statt, bei dem ein identisches Klavierstück aufgenommen mit verschiedenen Mikrofonen gehört werden konnte (Abb. 1).

Weiterhin wurde eine selbstgebaute Stahlzungen-Trommel demonstriert und der praktische Vorgang des Intonierens gezeigt (Abb. 2).

Zum direkten Klangvergleich waren berühmte alte Röhrenverstärker im Original und als digitale Emulation zu hören (Abb. 3).

Den Abschluß des Seminars bot eine experimentelle Vorführung zu kreativen Möglichkeiten der mechano-elektrischen Klangerzeugung (Abb. 4).

Hörversuch zur Klangfarbe von Mikrofonen

(Simon Waloschek und Timo Grothe)

Im Rahmen einer studentischen Laborübung wurden in der Messkammer des ETI Frequenzgänge verschiedener Mikrofone gemessen. An einem MIDI-Flügel wurden anschließend mit diesen Mikrofonen an gleicher Mikrofonposition Aufnahmen gemacht und anschließend auf gleiche Lautheit normiert. In einem doppelblinden Hörversuch können die Probanden die Klangeigenschaften der verschiedenen Mikrofone objektiv vergleichen, und mit einem semantischen Differential bewerten. Zum Abschluss werden die Höreindrücke der Mono-aufnahmen mit den Frequenzgängen der jeweiligen Mikrofone verglichen.



Abbildung 1: Gute Stimmung vor Beginn des Hörversuchs

Tuning a Hank drum

(Cristina Zamorano Martinez und Malte Kob)

The Hank drum is a steel instrument such as the Hang or Steel Pan. In contrast to them, it consists on several free reeds cut into steel box acting as a resonator. It can be played either with

hands or mallets. The reeds are tuned in the fundamental tone by cutting it with a hacksaw. During this process we find the difficulty that reeds are going out of tune while one of them is fine tuning. The sound and the playability of a self made Hank drum will be shown together with a hands-on demonstration of the tuning process using a bare fine-toothed hacksaw blade. Big changes in pitch are observed when modifying the instrument in small scale e.g. the length of the tongue. Many other questions about the influence of the material and shape properties in sound are welcome to be discussed.



Abbildung 2: Cristina Zamorano (links) demonstriert ihr selbst gebautes "Hank" (Bild rechts).

Comparison of tube amplified sound and tube amplification emulation of the same model

(Polina Zakharchuk und Malte Kob)

Amplifier technology moved away from valves in the late 60's and 70s - in those days transistor technology was widely used and solid state devices replaced valves in all parts of the audio equipment. However, tube amplifiers are still extensively used in popular music production due to their specific sound properties. Nowadays, original amplifiers are often replaced by hardware or software simulations thanks to their usability and light weight. This contribution is dedicated to the question of how thoroughly the real vintage tube amplifier can be represented by a solid-state emulation. Seminar participants are introduced into the myths of tube sounds by a literature review on tube amplification and distortion, and the strategies of digital tube amplifier modeling are explained. As the main instrument of investigation the electric piano Korg SV-1 is used, which specializes in great vintage sounds and provides a set of modeled real amplifiers in its signal path. The key features of its AMP-section are explained, which simulates the combinations of such a classic amplifiers as Fender Super Reverb and VOX AC30 with variable depth or influence rate. For comparison of the use of a real vintage amp to a model simulation, these three prototypes are adjusted carefully to the same perceived level and sound of the SV-1 simulation reproduced with an active studio monitor. During the presentation,

listening to the original and simulated sound shall answer the question what aspects of the different sounds have been simulated such as noise components, nonlinearities and the spectral shape. The presentation concludes with an explanation of the differences that still persist.

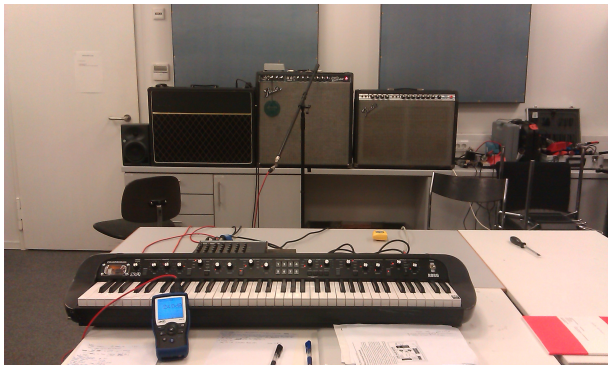


Abbildung 3: Originale Vintage-Röhrenverstärker und ein Keyboard mit Effektprozessor im Hörvergleich.

Danksagung

Die Organisatoren des Seminars möchten allen Ausführenden recht herzlich danken für ihren großen Einsatz bei ihren Beiträgen, die das Programm bereichert und aufgelockert haben.

Guitar Preparation Techniques

(Yuri Landman)

This presentation shows guitar preparation techniques accompanied with some live prepared samples. How to get unorthodox sounds out of a normal guitar with simple adding everyday objects out of an office or kitchen for instance. These modifications create sounds reminiscent to a banjo, church bells, Indonesian Gamelan bells, gongs, or more dreamy harp-like timbers.

The author is an experimental instrument builder from the Netherlands, who published a book with Bart Hopkin in 2012 about the topic of a prepared guitar, a derived technique based on John Cage's famous prepared piano. The background of his invented instruments derived from the guitar preparation techniques will be explained and demonstrated.



Abbildung 4: Yuri Landman demonstriert experimentelle Modifikationen akustischer Saiteninstrumente aus seinem Zauberkoffer.