



Fachausschuss Musikalische Akustik in der DEGA

Physikalische Beschreibung und instrumentell gestützte Bewertung von Musikinstrumenten

Oktober 2007



Tagungsband zum Seminar des FAMA in der DEGA

Zwota, 19. - 20.10.2007

Physikalische Beschreibung und instrumentell gestützte Bewertung von Musikinstrumenten

Seminar des Fachausschusses Musikalische Akustik in der DEGA

Tagungsleitung:
Dipl.-Phys. Gunter Ziegenhals

Herausgeber:
Gunter Ziegenhals

Tagungsorte:
Institut für Musikinstrumentenbau an der Technischen Universität Dresden
Klingenthaler Straße 42, 08267 Zwota
Westfälische Hochschule Zwickau, Studiengang Musikinstrumentenbau
Adorfer Str. 38, 08258 Markneukirchen

Verlag und Bezug:
Institut für Musikinstrumentenbau an der Technischen Universität Dresden
Klingenthaler Straße 42, 08267 Zwota
post@ifm-zwota.de

Zitierhinweis:
Seminar des FAMA in der DEGA 2007

ISBN 978-3-00-024273-1

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist unzulässig und strafbar. Insbesondere gilt dies für die Übersetzung, den Nachdruck sowie die Speicherung auf Mikrofilm, mit vergleichbaren Verfahren oder auf Datenverarbeitungsanlagen.

Vorwort

Der Fachausschuss Musikalische Akustik in der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA) wurde 1990 gegründet und befasst sich mit den wissenschaftlichen Grundlagen und praktischen Anwendungen in allen Bereichen der Akustik, die mit Musik in Zusammenhang stehen. Der Fachausschuss soll der Kooperation und Koordination der auf dem Gebiet der Musikalischen Akustik arbeitenden Institutionen und Einzelpersonen sowie dem internationalen Kontakt zu den entsprechenden Ausschüssen in anderen europäischen Ländern dienen. Darüber hinaus soll er zur Überwindung der interdisziplinären Kluft zwischen Instrumentenbauern, Musikern, Tonmeistern, Musikwissenschaftlern und Architekten beitragen. Mitglied kann jedes ordentliche Mitglied der DEGA werden. Darüber hinaus können sich interessierte Personen als Interessenten registrieren lassen und erhalten dann Informationen über die Aktivitäten des Fachausschusses.

Nach dem Seminar im Jahr 2001 aus Anlass der Institutsgründung vor 50 Jahren in Zwota ist das 2007er Seminar die zweite Veranstaltung des Fachausschusses, für die ein Tagungsband vorgelegt wird. Wir wollen damit den Autoren, die mit ihren Bemühungen solche Veranstaltungen erst möglich machen, danken, indem wir ihnen die Möglichkeit einräumen, den Beitrag als zitierfähige Veröffentlichung zu listen.

Im Rahmenprogramm besichtigten die Tagungsteilnehmer das FRAMUS MUSEUM im Markneukirchen. Die Besucher erwarteten hier mehr als 200 Instrumente aus der Produktion der Framus-Werke von 1946 bis Ende der 1970er Jahre. Von der klassischen Violine über die Attila-Zoller-Gitarren bis hin zum legendären Star-Bass zeigt die Sammlung des Framus-Museums eine für eine deutsche Instrumentenbaufirma einmalige Vielfalt. Der Rundgang war eine fantastische Ergänzung und zugleich Entspannung zum Seminar.



Kontakte:

Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.
Voltastraße 5 Gebäude 10-6
13355 Berlin
dega@dega-akustik.de
<http://www.dega-akustik.de>

Gunter Ziegenhals
c/o Institut für Musikinstrumentenbau
Klingenthaler Str. 42
D-08267 Zwota
post@ifm-zwota.de

Zwota im März 2008

Gunter Ziegenhals

Inhaltsverzeichnis

Charakterisierung von Fagottklängen

T. Grothe

Aktuelle Methoden zur Untersuchung von Blasinstrumenten

J. Baumgart

Ein verbessertes Verfahren für Doppelkorrekturen an Blechblasinstrumenten

K. Wogram

Forschung am Studiengang Musikinstrumentenbau der WSH

E. Meinel

Probleme bei CAD-Anwendungen im Streichinstrumentenbau

G. Ziegenhals

Messtechnische und numerische Analyse einer Geige im Vergleich

K. Hoge

Thermische Modifikation von Holz im Musikinstrumentenbau

H. Schiema

Charakterisierung von Fagottklängen

Timo Grothe, Johannes Baumgart, Roger Grundmann

Technische Universität Dresden, Institut für Luft- und Raumfahrttechnik, 01062 Dresden

Abstract

In der vorliegenden Arbeit wird der Versuch unternommen, die Klangfarbe eines Musikinstrumentes durch Spektralanalyse aller seiner spielbaren Töne zu beschreiben. Um der Komplexität musikalischer Klänge gerecht zu werden, wurde eine mehrdimensionale Darstellung gewählt. Die Studie wurde an Fagottklängen durchgeführt.

Mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse wurde für einen Datensatz von Frequenzspektren ein orthogonales Bezugssystem bestimmt. Dadurch wird es möglich spektrale Grundcharakteristiken zu ermitteln und Klänge diesbezüglich zu unterscheiden. Durch eine geeignete Dimensionsreduktion können Klangähnlichkeiten in kompakter Form grafisch dargestellt werden. Die Hauptkomponentenanalyse hat sich als geeignete Methode erwiesen, um große Datenmengen bei Erhalt der wesentlichen Informationen zu komprimieren und Strukturen in der spektralen Zusammensetzung von Instrumentenklängen zu veranschaulichen.

Einleitung

Eine Bewertung von Geometrieänderungen an einem Musikinstrument hinsichtlich der Klangeigenschaften ist sehr komplex, da neben akustischen Eigenschaften auch wahrnehmungspsychologische Aspekte eine Rolle spielen. Es wird der Versuch unternommen, sich der Beschreibung der Klangfarbe eines Instrumentes durch eine geeignete Darstellung spektraler Eigenschaften einzelner Töne zu nähern. Der Begriff „Klangfarbe“ wird durch eine Vielzahl spektraler und zeitlicher Größen charakterisiert. Bis heute ist noch nicht bekannt, wie viele Attribute für eine eindeutige Klangfarbenbeschreibung benötigt werden und mit welchen akustischen Größen sie korrelieren [Park 2004], [Caclin 2005]. Unstrittig ist jedoch, dass die Anzahl der Obertöne und ihre relativen Intensitäten die Klangfarbe eines ausgehaltenen Tones maßgeblich prägen. Die Arbeit ist auf die Analyse der Struktur von Fagottklängen ausgerichtet, wobei der ausgehaltene Ton als eine Summe rein harmonischer Sinusschwingungen mit zeitlich invarianter Amplitude aufgefasst wird. Mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse (Principal Components Analysis, PCA) [Jackson 1991] wurde eine große Zahl von Teiltonspektren von Fagottklängen untersucht.

Die Hauptkomponentenanalyse ist eine multidimensionale Analyseverfahren um Korrelationen zwischen mehreren Variablen in einem Datensatz zu bestimmen. Die abhängigen Variablen werden dabei in einen neuen Satz von unkorrelierten Variablen, die so genannten Hauptkomponenten, transformiert. Für die Analyse von Klangspektren wurden in der vorliegenden Untersuchung Frequenzbänder als abhängige Variablen und die spektrale Energie der Harmonischen als zugehörige Werte aufgefasst. Aus einem solchen Datensatz bestimmte Hauptkomponenten stellen somit spektrale Grundcharakteristiken der zugrunde liegenden Klänge dar. Jedes Teiltonspektrum des analysierten Datensatzes kann als Linearkombination dieser Hauptkomponenten ausgedrückt werden, sie beschreiben somit

die Klangfarbe des Fagottes. In bisherigen Arbeiten wurde die Hauptkomponentenanalyse eingesetzt, um Zusammenhänge zwischen spektraler Zusammensetzung und der Dynamikstufe aufzuzeigen [Loureiro 2005], um Fagotttöne, die auf verschiedenen S-Bögen gespielt wurden zu vergleichen [Grundmann 2005], sowie um ein generalisiertes Klangfarbenmodell zu entwickeln [Burred 2006].

Material und Methode

Um die harmonische Struktur von Fagottklängen zu beschreiben, wurden die Frequenzspektren von allen Tönen des Fagottes analysiert. Das Datenmaterial lieferte die Firma Wilhelm Heckel GmbH, Wiesbaden – Biebrich. Im Firmengebäude spielte ein professioneller Fagottist innerhalb von 7 Jahren jeden Ton auf 505 verschiedenen Fagotten. Dabei wurde ein zwei Sekunden lang ausgehaltener Ton mit Audiotechnik bei 44,1 kHz, 16 Bit aufgezeichnet. Zu Vergleichszwecken wurden im reflexionsarmen Raum des Instituts für Akustik und Sprachkommunikation der TU Dresden Aufnahmen mit MTG M93-Mikrofonen und einem MOTU 896HD Analogwandler durchgeführt. Dabei spielte ein professioneller Fagottist chromatisch alle Töne auf 5 verschiedenen Fagotten (*Wilhelm Heckel GmbH, Bernd Moosmann Meisterwerkstätte für Holzblasinstrumente GmbH, J. Puechner Spezial Holzblasinstrumentenbau GmbH, Schreiber & Keilwerth Musikinstrumente GmbH, Rudolf Walter & Co Meisterwerkstatt für Holzblasinstrumentenbau*). In diesem Teil der Untersuchung wurden verschiedene Parameter (Fagotte verschiedener Hersteller, Rohrblatt, S-Bogen, Spieler, Dynamikstufe) variiert, um deren Einfluss auf das Klangspektrum zu quantifizieren.

Bei der Analyse der Tonaufnahmen wurden alle zeitabhängigen Phänomene wie Ansprache und Absprache sowie Frequenz- und Amplitudenmodulationen vernachlässigt. Ein Signalausschnitt von 500 ms wurde fouriertransformiert. Nach der Grundfrequenzbestimmung im Frequenzbereich wurde das Signal auf seine harmonischen Anteile reduziert, indem die spektrale Energie in Frequenzbändern mit der Breite der Grundfrequenz aufsummiert und dem entsprechenden Oberton zugeordnet wurde (siehe Abb. 1 Kurve a und b). Dadurch werden alle Geräuschanteile eliminiert, die Gesamtenergie des Signalabschnittes bleibt jedoch erhalten.

Bei der Analyse der Tonaufnahmen wurden alle zeitabhängigen Phänomene wie Ansprache und Absprache sowie Frequenz- und Amplitudenmodulationen vernachlässigt. Ein Signalausschnitt von 500 ms wurde fouriertransformiert. Nach der Grundfrequenzbestimmung im Frequenzbereich wurde das Signal auf seine harmonischen Anteile reduziert, indem die spektrale Energie in Frequenzbändern mit der Breite der Grundfrequenz aufsummiert und dem entsprechenden Oberton zugeordnet wurde (siehe Abb. 1 Kurve a und b). Dadurch werden alle Geräuschanteile eliminiert, die Gesamtenergie des Signalabschnittes bleibt jedoch erhalten.

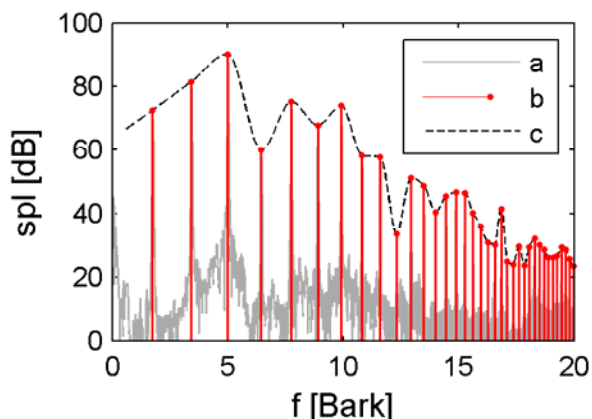


Abbildung 1: Frequenzspektrum eines Fagottklanges

Um die Hauptkomponenten für alle Töne des Fagottes zu bestimmen wurden die spektralen Hüllkurven der harmonischen Klangspektren verwendet. Der Frequenzbereich von 50 Hz bis 8 kHz wurde in 500 Frequenzbänder unterteilt, die auf der Bark- Skala äquidistant sind ($df = 0,0418$ Bark). Die Bestimmung der Hüllkurven erfolgte durch kubische Hermite- Interpolation (siehe Bild1, Kurve c). Die Interpolation führt zu einer maximalen Abweichung von ± 2 dB (Standardabweichung 0,07 dB) in den Amplituden der Harmonischen. Die so vorbereiteten Daten von 21210 spektralen Hüllkurven (42 Töne von Kontra B 58,27 Hz – es'' 622 Hz auf 505 Fagotten) wurden für die weitere Analyse zu einem Datensatz P zusammengefasst. Durch Hauptkomponentenanalyse lässt sich für diesen Datensatz von n k -dimensionalen Klangspektren ein System aus $(m \times k)$ Hauptkomponenten und $(n \times m)$ Hauptwerten bestimmen. Die Hauptkomponenten sind dabei orthogonale Einheitsvektoren des transformierten Koordinatensystems, die Hauptwerte sind dimensionsbehaftete Skalare. Jedes Klangspektrum kann gemäß Gl. (1) aus Linearkombinationen der Hauptvektoren rekonstruiert werden.

$$\mathbf{P} = [\bar{u}_1, \bar{u}_2, \dots, \bar{u}_m] \cdot \text{diag}(\bar{\lambda}) \cdot [\bar{v}_1, \bar{v}_2, \dots, \bar{v}_m]^T \quad (1)$$

$\bar{u}_i \cdot \lambda_i$: Hauptwerte ($n \times m$)

\bar{v}_i : Hauptkomponenten ($m \times k$)

k : Anzahl Frequenzbänder

n : Anzahl Klangspektren

m : Dimension des transformierten Koordinatensystems

Da die Hauptkomponenten nach fallender Varianz geordnet sind, sinkt der Informationsgehalt mit steigender Ordnungszahl m . Für $m < k$ ergibt sich somit eine komprimierte Form von P [Geladi 2003].

Ergebnisse

Im ersten Teil der Untersuchung konnte festgestellt werden, dass 95,5% der Gesamtvarianz in den spektralen Hüllkurven von Fagottklängen des gesamten Tonumfangs durch die ersten 25 Hauptkomponenten erklärt wird. Jedes

Teiltenspektrum des Ausgangsdatensatzes kann als Linearkombination aus diesen 25 Hauptkomponenten dargestellt werden, wobei die Genauigkeit der Rekonstruktion innerhalb von ± 1 dB in den Amplituden der Teiltöne liegt. Nach dieser Vereinfachung ist jeder Ton durch genau eine Position in einem Raum der Dimension 25 beschrieben. Eine noch drastischere Datenkompression ermöglicht qualitative Vergleiche in niedrigdimensionalen grafischen Darstellungen. Dabei werden die zu den Hauptkomponenten gehörigen Hauptwerte gegeneinander aufgetragen (scoreplot). Den Raum, der durch die ersten 3 Hauptkomponenten aufgespannt wird, und die Position der Klangspektren aller Fagotttöne darin, zeigt Abb. 2. Es ist erkennbar, dass die Töne des tiefen und mittleren Registers (Kontra B bis c') negative Hauptwerte auf der ersten Hauptkomponente aufweisen. Mit steigender Tonhöhe sinkt der zweite Hauptwert ab bis auf 0 (bei cis') und steigt danach wieder an.

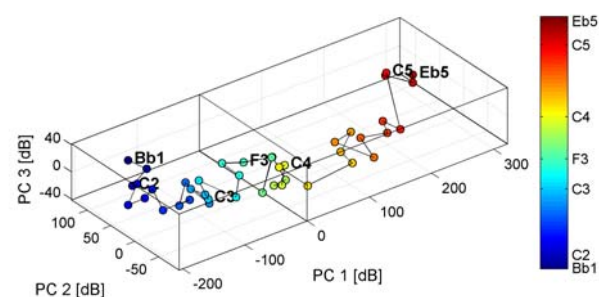


Abbildung 2: Fagottklänge in einem dreidimensionalen Hauptkomponentenraum (PC1 x PC2 x PC3) (Kontra B, 58,27Hz – es'', 622 Hz). Der Raum wurde durch Hauptkomponentenanalyse von 21.210 spektralen Hüllkurven von Fagottklängen (auf 505 Fagotten je 43 Töne gespielt) bestimmt. Jeder Kreis symbolisiert einen Ton, die Position ist durch die Schwerpunkte der ersten drei Hauptwerte aller 505 Klänge derselben Tonhöhe gegeben.

Die Hauptkomponenten, auf die sich die Hauptwerte beziehen, stellen spektrale Hüllkurvenmuster dar und sind in Abb. 3 dargestellt. Sie ermöglichen die Interpretation der qualitativen Hauptwertdarstellung hinsichtlich des Frequenzspektrums.

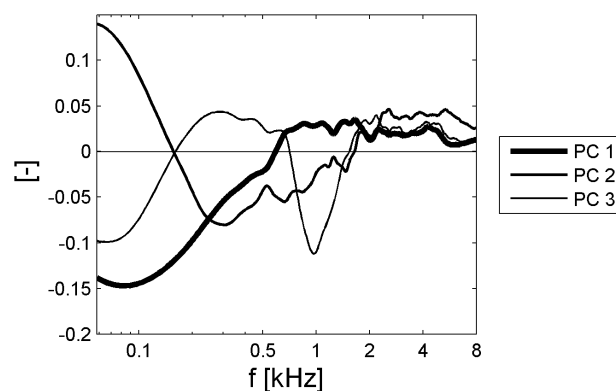


Abbildung 3: Die ersten drei Hauptkomponenten (PC1, PC2 PC3) der 21.210 analysierten Fagottklänge

Es ist deutlich erkennbar, dass die erste Hauptkomponente durch die Obertondichte im Bereich bis 600 Hz geprägt ist und somit hauptsächlich die Information über die Grund-

tonhöhe beinhaltet. Demnach führt ein negativer erster Hauptwert zu einer Anhebung des Frequenzbandes zwischen 50 und 200 Hz, hat aber kaum Einfluss auf die Frequenzen oberhalb von 0,8 kHz. Ein negativer zweiter Hauptwert führt zu einer Dämpfung der tiefen Frequenzen bis 100 Hz, während die Obertöne zwischen 150 Hz und 1,2 kHz betont werden.

Im zweiten Teil der Arbeit wurden die Klangspektren einzelner Tönen analysiert, die auf verschiedenen Fagotten in einem reflexionsarmen Raum gespielt wurden. Der Fagottist spielte dabei über den gesamten Tonumfang eines Fagottes jeden Ton einzeln an, bevor das nächste Fagott von einem anderen Hersteller angespielt wurde. Insgesamt wurde diese Verfahrensweise 5 mal wiederholt. Abb. 4 zeigt 25 Teiltonspektren vom Fagottton c, der 5 mal auf 5 verschiedenen Fagotten gespielt wurde, in einem zweidimensionalen Hauptkomponentenraum. Es wird deutlich, dass sich die Töne jedes Instrumentes in dieser Darstellung gruppieren.

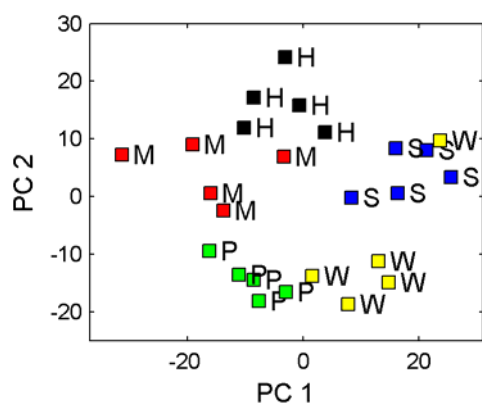


Abbildung 4: Teiltonspektren des Fagotttones c (130.8 Hz) in einem zweidimensionalen Hauptkomponentenraum. Die Töne wurden auf 5 Fagotten verschiedener Hersteller (H,M,P,W,S) eingespielt.

In weiteren Studien wurden von professionellen Fagottisten einzelne Töne wiederholt angeblasen und instrument- und spielerbezogene Parameter wie Rohrblatt, S-Bogen und Dynamikstufe variiert. Schon anhand der ersten 2 Hauptvektoren lassen sich die Klangunterschiede qualitativ darstellen. So konnte festgestellt werden, dass die Dynamikstufe den größten Einfluss auf die spektrale Zusammensetzung des Fagottklanges hat. Weiterhin ist das Klangspektrum stark durch Ansatz und Rohrblatt bestimmt. Die Darstellung der Hauptwerte wie in Abb. 4 erleichtert die Klassifizierung von Klängen in grafischen Darstellungen durch Konzentration auf die wesentlichen Unterschiede. Die Verknüpfung dieser abstrakten Darstellung zu den Frequenzspektren ist über die normierten Hauptkomponenten (vgl. Abb. 3) gegeben.

Zusammenfassung

Die Methode der Hauptkomponentenanalyse wurde eingesetzt, um Instrumentalklänge verschiedener Fagotte anhand ihrer harmonischen Struktur zu unterscheiden. Dazu wurden die Teiltonspektren von Signalausschnitten mit einer Sekunde Länge bestimmt. Die Hauptkomponentenanalyse der so repräsentierten Fagottklänge ermöglicht

eine kompakte Darstellung von Klangunterschieden. Zwei verschiedene Ansätze wurden gewählt:

Zum einen wurden die Klänge des gesamten Tonumfanges des Fagottes analysiert. Die Hauptvektoren können hier als Muster spektraler Hüllkurven interpretiert werden. Sie zeigen Zusammenhänge zwischen Grundtonhöhe und spektraler Zusammensetzung auf. Dabei decken die ersten 25 Hauptvektoren 95,5% der Gesamtvarianz ab, d.h. mit genau einer Linearkombination aus diesen 25 Hauptvektoren kann jedes Teiltonspektrum rekonstruiert werden, so dass die Amplitude jedes Obertons um maximal 3 dB abweicht. Die Hauptvektoren sind somit eine Form der Darstellung der instrumententypischen Klangstruktur.

Im zweiten Teil der Untersuchung wurde jeweils nur ein Ton des Fagotts durch professionelle Musiker gespielt, wobei verschiedene instrument- und spielerbezogene Parameter variiert wurden. Durch die Hauptkomponentenanalyse der Teiltonspektren ist es dann möglich, den Einfluss dieser Parameter auf die spektrale Struktur zu bewerten. Trotz der getroffenen Vereinfachungen lässt sich der Einfluss der herstellertypischen Bauform des Instrumentes auf den Klang nachweisen. Klangunterschiede durch verschiedene S-Bögen konnten mit der gewählten Methode beim Anspiel durch Musiker nicht erfasst werden. Hier ist eine Anblasvorrichtung notwendig, die Fagotte unter sehr genau reproduzierbaren Bedingungen anregen kann. Eine solche Vorrichtung befindet sich derzeit in der Entwicklung.

Literatur

- Grundmann, R. et al. (2005).** "Contribution of fluid dynamics to woodwind instruments investigations of timbre and pitch of bassoon bocals", *Journal of thermal science* : JTS 14(3), pp. 264-266
- Park, T. (2004).** *Towards Automatic Musical Instrument Timbre Recognition*, Ph. D. Thesis, Princeton University, USA, 2004
- Caclin, A et al. (2005).** "Acoustic correlates of timbre space dimensions: A confirmatory study using synthetic tones," *J. Acoust. Soc. America* 118(1), pp.471-482
- Jackson, J. (1991).** *A users's guide to principal components*, Jon Wiley & Sons, Inc.,1991
- Geladi P. et al.(2003):**Scatter plotting in multivariate data analysis, *Journal of Chemometrics*, 2003(17), pp 503-517
- Jackson, J. (1991).** *A users's guide to principal components*, Jon Wiley & Sons, Inc.,1991
- Loureiro, M. et al. (2004).** "Timbre classification of a single musical Instrument," *J. Proceedings of the 5th International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR)*, Barcelona, Spain, 2004
- Burred, J. et al. (2006).** "An Accurate Timbre Model for Musical Instruments and its Application to Classification", *Proceedings of the 1st Workshop on Learning the Semantics of Audio Signals*, Athens, Greece, 2006

Aktuelle Methoden zur Untersuchung von Blasinstrumenten

Johannes Baumgart, Andreas Richter, Roger Grundmann

Institut für Luft- und Raumfahrttechnik, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, Deutschland

Email: johannes.baumgart@tu-dresden.de

Aktuelle Arbeiten

Die musikalische Akustik stellt einen wesentlichen Forschungsschwerpunkt innerhalb der Akustik dar, wie die September 2007 stattfindende Konferenz "19. International Congress on Acoustics (ICA)" in Madrid deutlich zeigte. In 7 Sitzungen präsentierten internationale Forschergruppen in insgesamt 90 Fachvorträgen aktuelle Ergebnisse ihrer Arbeiten. Aus Sicht der Blasinstrumente seien nachfolgend einige repräsentative Arbeiten aus diesem breiten Spektrum ausgewählt, um den aktuellen Schwerpunkt der Musikinstrumentenforschung zu charakterisieren.

Die akustischen Resonanzen von Blasinstrumenten sind entscheidend für das Spielverhalten der Instrumente. Zur Bestimmung dieser Resonanzen hat sich insbesondere die 3-Mikrofon-Probe bewährt [5, 8]. Sie zeichnet sich im Vergleich zur Methode mit Widerstandsrohrchen [1] durch deutlich höhere Pegel aus. Dies erlaubt es somit ebenfalls, die Impedanz im Mundraum bei gespielter Instrument zu bestimmen. Dies findet beispielsweise bei Untersuchungen der Blockflöte [3] oder dem Didjeridu [16] Anwendung. Neben der physikalischen Messung im Instrument tritt allerdings die Bewertung am Ort des Hörers immer deutlicher in den Vordergrund [6, 11].

Numerische Modelle hingegen ermöglichen detaillierte Einblicke in das Instrument sowie die Bewertung separierter Effekte, deren experimentelle Untersuchung nur sehr schwierig zu realisieren ist [13, 4, 12]. Besondere Beachtung erfordert hier die Interaktion von Tonerzeugung und Resonator. Experimentelle Untersuchungen liefern dabei wichtige Informationen an der Schnittstelle [15, 14]. Neben Detailuntersuchungen klassischer Instrumente gewinnt allerdings die Untersuchung einheimischer bzw. landestypischer Musikinstrumente [7, 10] immer mehr an Bedeutung.

Strukturmechanik des S-Bogens des Fagotts

Musiker nehmen beim Spielen des Fagotts mit verschiedenen S-Bögen sowohl den Einfluss des Materials als auch die verschiedenen Geometrien des Hauptpfades wahr. Derartige Variationen beeinflussen neben der Strömungsmechanik ebenfalls das strukturelle Verhalten. Mithilfe einer numerischen Modalanalyse konnte ein Einfluss dieser Variationen auf die Biegeeigenfrequenzen der S-Bögen aufgezeigt werden. Während eine Veränderung der Materialstärke und des Verhältnisses von Steifigkeit zu Dichte zu einer konstanten Skalierung der Eigenfrequenzen über den gesamten Frequenzbereich führt, sind geometrische Veränderungen als relative Verschiebungen der Frequenzen zueinander zu identifizieren. Die Bestimmung der Biegemoden basierten auf Rechnungen mit dem Programm Ansys[®] [9, 2].



Abbildung 1: Verschiedene geometrische Ausführungen des Fagott-S-Bogens. Oben: gerade Form, unten: geschwungene oder auch traditionelle Form

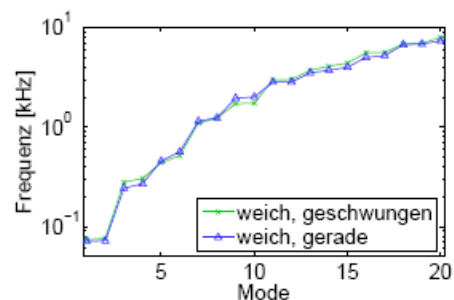


Abbildung 2: Eigenfrequenzen verschiedener geometrischer Ausführungen des Fagott-S-Bogens bei konstanter Wandstärke und identischem Material

Strömungsmechanik im Fagott

Die Strömungsmechanik und -akustik in Blasinstrumenten sind durch das Druck- und Geschwindigkeitsfeld beschrieben. Ein umfassender experimenteller Zugang zu diesen Felddaten gestaltet sich allerdings äußerst problematisch. Die numerische Untersuchung dieser Vorgänge liefert hierfür einen Lösungsansatz, hängt allerdings signifikant von einer geeigneten Wahl der Randbedingungen des zu untersuchenden Systems ab. Eine praktikable und an die realen Spielbedingungen angepasste Lösung liefert die Vorgabe des instationären statischen Druckes sowohl am Ein- als auch am Austritt des Instrumentes. Dieser Druck resultiert in den vorliegenden Untersuchungen aus Messungen mit Piezo-Druckaufnehmern am Eintritt des S-Bogens sowie am Becheraustritt bei dem tiefsten spielbaren Ton des klassischen Fagottes (B1). Als Strömungslöser fand die kommerzielle Software Ansys Fluent[®] Anwendung. Eine Validierung der erzielten Ergebnisse lieferten instationäre Druckmessungen im Stiefel des Instrumentes (siehe Abb. 3).

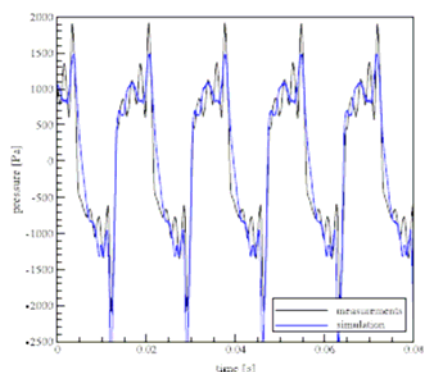


Abbildung 3 Gemessene und berechnete Druckverläufe im Stiefel des Fagottes

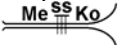
Literatur

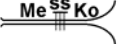
- [1] J. Backus. Input impedance curves for the reed woodwind instruments. *Journal of the Acoustical Society of America*, 56(4):1266–1279, 1974.
- [2] Johannes Baumgart and Roger Grundmann. Influence of bocal material on the sound of the bassoon. In *International Symposium on Musical Acoustics (ISMA) in Barcelona*, 2007.
- [3] Jer-Ming Chen, Dan Laurin, and John Smith Joe Wolfe. Vocal tract interactions in recorder performance. In *19th International Congress on Acoustics (ICA) in Madrid*, 2007.
- [4] Andrey R DaSilva, Helmut Kühnelt, and Gary Scavone. A brief survey of the lattice boltzmann method in musical acoustics. In *19th International Congress on Acoustics (ICA) in Madrid*, 2007.
- [5] Paul Dickens, John Smith, and Joe Wolfe. Improved precision in measurements of acoustic impedance spectra using resonance-free calibration loads and controlled error distribution. *J Acoust Soc Am*, 121(3):1471–1481, Mar 2007.
- [6] Matthias Eichner, Matthias Wolff, and Rüdiger Hoffmann. An hmm based investigation of differences between musical instruments of the same type. In *19th International Congress on Acoustics (ICA) in Madrid*, 2007.
- [7] Asier Agos Esparza, Erica Macho Stadler, and Maria Jesus Elejalde García. Acoustical analysis for a txistu. In *19th International Congress on Acoustics (ICA) in Madrid*, 2007.
- [8] V. Gibiat and F. Laloe. Acoustical impedance measurements by the two-microphonethree-calibration (tmtc) method. *Journal of the Acoustical Society of America*, 88(6):2533–2545, 1990.
- [9] Ansys Inc. *Ansys v11*. www.ansys.com, 2007.
- [10] Jonathan Kemp, John Chick, Murray Campbell, Darren Hendrie, and Arnold Myers. Measurement techniques and the playability of terminal horn crooks. In *19th International Congress on Acoustics (ICA) in Madrid*, 2007.
- [11] Arnold Myers, Joël Gilbert, Robert W. Pyle, and D. Murray Campbell. Non-linear propagation characteristics in the evolution of brass musical instrument design. In *19th International Congress on Acoustics (ICA) in Madrid*, 2007.
- [12] F. Silva, V. Debut, J. Kergomard, C. Vergez, A. Deblevid, and P. Guillemain. Simulation of single reed instruments oscillations based on modal decomposition of bore and reed dynamics. In *19th International Congress on Acoustics (ICA) in Madrid*, 2007.
- [13] Torunn Smevik. Fem simulation of wall vibrations of brass instruments. In *19th International Congress on Acoustics (ICA) in Madrid*, 2007.
- [14] John Smith, Guillaume Rey, Paul Dickens, Neville Fletcher, Lloyd Hollenberg, and Joe Wolfe. Vocal tract resonances and the sound of the australian didjeridu (yidaki). iii. determinants of playing quality. *Journal of the Acoustical Society of America*, 121(1):547–558, 2007.
- [15] Martin Kuster Maarten van Walstijn. Spatial coherence between microphones with arbitrary firstorder directivity in reverberant acoustic fields. In *ICA 19th International Congress on Acoustics, Madrid 2-7 September*, 2007.
- [16] Joe Wolfe, Neville Fletcher, Lloyd Hollenberg, Ben Lange, John Smith, and Alex Tarnopolsky. The acoustics of the player-didjeridu system. In *19th International Congress on Acoustics (ICA) in Madrid*, 2007.

Ein verbessertes Verfahren für Doppelkorrekturen an Blechblasinstrumenten


K. Wogram,
Vollbüttel

Einleitung

Die Formgebung des Rohres von Blechblasinstrumenten, also ihre Mensur, d.h. das Verhältnis der Durchmesser zur Länge, bestimmt im wesentlichen die Lage der Resonanzfrequenzen des Instrumentes und damit seine Stimmung oder Intonation. Daraus ergibt sich, daß es die wichtigste Aufgabe des Instrumentenmachers ist, den Durchmesserverlauf des Blechblasinstrumentes zu optimieren. Hierbei bedienen sich viele Instrumentenmacher des computergestützten Meß- und Korrekturprogramms , mit dem nicht nur der akustische Zustand eines beliebigen Blechblasinstrumentes auf objektive Weise gemessen werden kann, sondern mit dem auch Mensuränderungen ermittelt werden können, die zu einer Verbesserung der Intonation und damit auch der Ansprache führen.

Hier soll nun über eine neue Möglichkeit des überarbeiteten Programms  berichtet werden, die das Finden von Korrekturvorschlägen beschleunigt und gleichzeitig die Anzahl von notwendigen Korrekturen verringert.

Funktionsprinzip für Intonationskorrekturen

Das Prinzip der Mensurkorrekturen bei  beruht auf der Tatsache, daß sich eine Resonanz bei Blasinstrumenten in ihrer Amplitude sowie ihrer Frequenzlage verändert, wenn man an denjenigen Stellen, an denen die stehenden Schalldruckwellen einen Bauch (Maximum) oder einen Knoten (Minimum) aufweisen, den Durchmesser des Instrumentenrohres verändert. Vereinfacht ausgedrückt steigt die Resonanzfrequenz an, wenn das Rohr bei einem Schalldruckbauch eingengt wird, oder wenn das Rohr an einem Druckknoten erweitert wird. Diese Zusammenhänge kann man gut bei der Berechnung der Intonation einer Trompete demonstrieren, wie sie in Abb.1 dargestellt ist.

In der oberen Bildhälfte ist der Radiusverlauf des Instrumentes sowie der Verlauf der stehenden Welle für die 4. Resonanz wiedergegeben. Das untere Teilbild gibt die errechnete Stimmungskurve für die ersten 12 Resonanzen der Trompete wieder. Erweitert man nun den Rohrverlauf an der Stelle bei 99 cm von der Stürze entfernt, wo die stehende Welle der 4. Resonanz einen Bauch aufweist, so erhält man die Zustände, wie sie in Abb. 2 wiedergegeben sind.

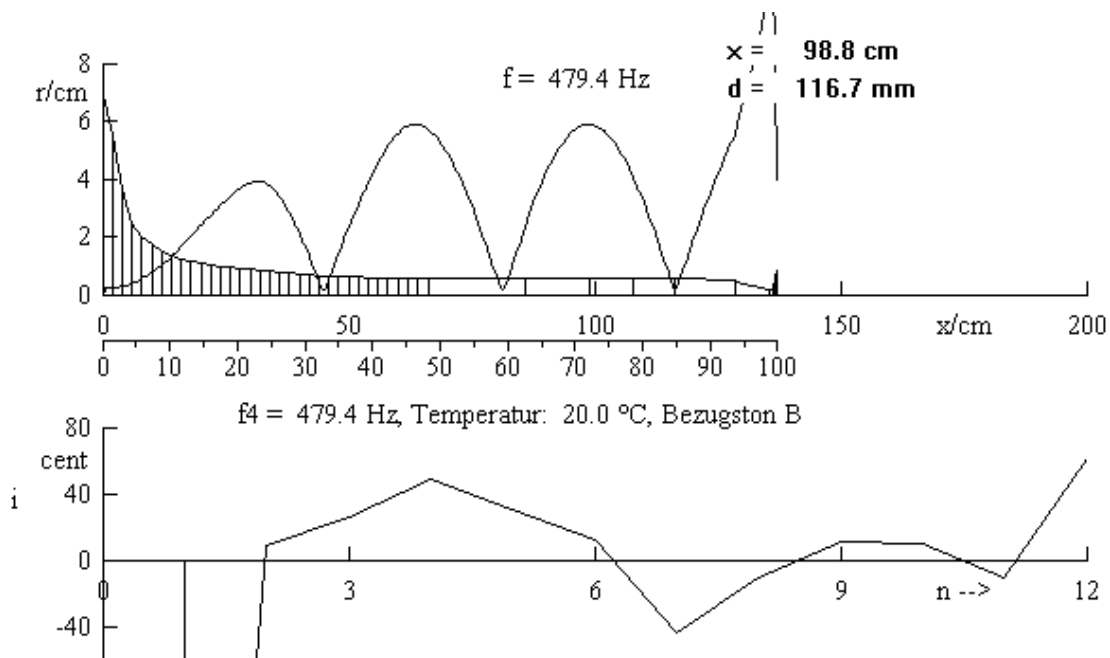


Abbildung 1: Berechnung der Resonanzlage einer Trompete

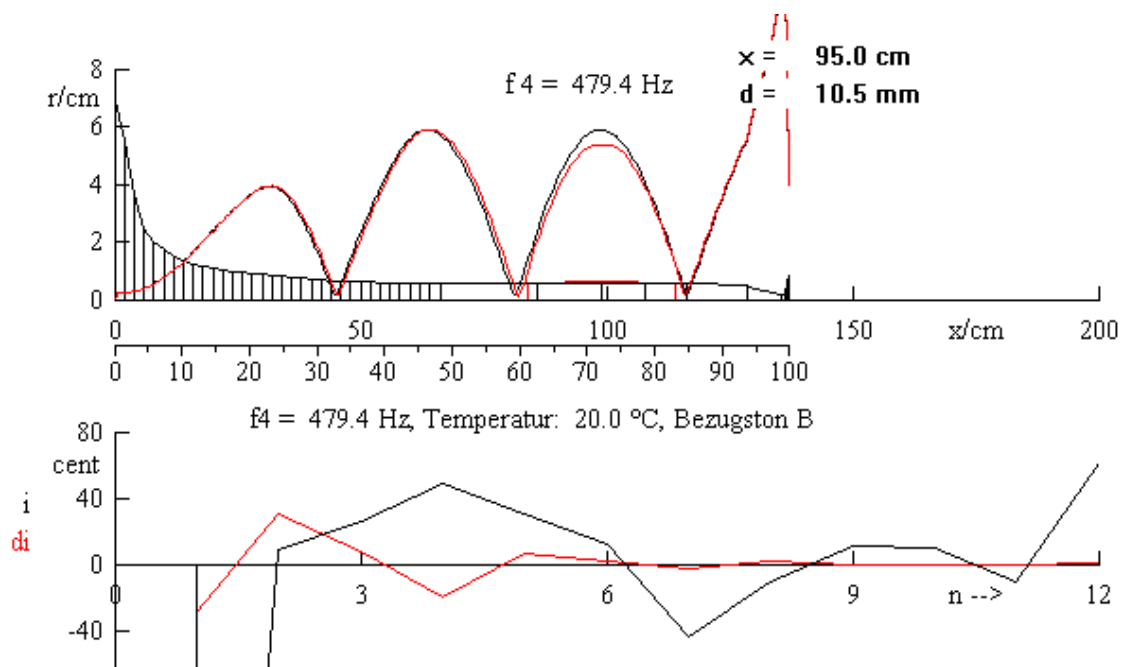


Abbildung 2: Veränderung von stehender Welle und Stimmung der 4. Resonanz bei Erweiterung an der Stelle eines Druckbauches bei 99 cm

Die Ausgangsdaten sowie die Intonation sind in schwarz gezeichnet, die Änderungen in rot, wobei die rote Intonationskurve die Veränderung des Ausgangszustandes wiedergibt. Man erkennt, daß sich die Stimmung der 4. Resonanz deutlich erniedrigt hat, was im Sinne einer besseren Intonation liegt. Daß sich bei dieser Maßnahme auch andere Resonanzen in ihrer Intonation verändert haben, bedarf keiner gesonderten Erwähnung, denn auch die weiteren Resonanzen besitzen ja Bäuche und Knoten im Bereich der gewählten Mensuränderungen.

Funktionsprinzip von $\overline{\text{Me}}^{\text{SS}}\text{Ko}$:

Das besondere des Meß- und Korrekturprogrammes $\overline{\text{Me}}^{\text{SS}}\text{Ko}$ liegt darin, daß die stehenden Wellen der Resonanzen einer Vielzahl von Blechblasinstrumenten gespeichert sind, und sich daraus Korrekturvorschläge für die Praxis ableiten lassen. Sollte einmal das gespeicherte Modell nicht ausreichend gut mit dem untersuchten Instrument übereinstimmen, so lassen sich die Lagen der stehenden Wellen ohne Probleme meßtechnisch mit $\overline{\text{Me}}^{\text{SS}}\text{Ko}$ erfassen.

Betrachten wir zunächst die Anwendung des Korrekturteiles von $\overline{\text{Me}}^{\text{SS}}\text{Ko}$ für ein beliebiges Blechblasinstrument, das viele Intonationsfehler aufweist. In Abb. 3 sind die Daten für die Mustertrompete in $\overline{\text{Me}}^{\text{SS}}\text{Ko}$ eingetragen. Links oben ist die grüne Stimmungskurve des Instrumentes wiedergegeben sowie die rote (gespiegelte) günstigste Korrekturkurve, rechts oben die Intonation nach der Korrektur und unten ein Schnitt des geraden Instrumentes (links die Stürze, rechts die Mundstückszwinge, Länge in %) mit der Darstellung der für eine Korrektur sinnvollen Bereiche. Hier gilt die obere Bildhälfte für eine Erweiterung des Rohres, die untere für eine Einengung. Die farbigen Bereiche zeigen die Qualität in einer Abstufung von blau (noch möglich) bis hellrot (sehr gut) mit einem lokalen Optimum als weißem Quadrat.

Wie man sieht, reicht eine einzige Korrektur der Mensur noch nicht aus, um eine sehr gute Intonation zu erreichen. Für diesen Fall liefert $\overline{\text{Me}}^{\text{SS}}\text{Ko}$ die Möglichkeit, 4 nacheinander anzuwendende Korrekturen zu ermitteln. Sie werden als Linien in dem unteren Teilbild gekennzeichnet, wie man in Abb. 4 erkennen kann.

Diejenigen Stellen, an denen das Programm günstige Korrekturen gefunden hat, werden mit grünen Linien gekennzeichnet. Dabei bedeutet der durchgezogene Bereich, daß hier eine entsprechende Einengung bzw. Erweiterung notwendig ist; der gestrichelte Teil der Linie dient nur der Orientierung. In diesem Fall liegen die Einengungen im Bereich 15% und 22% sowie 91%, wohingegen bei ca. 48% eine Erweiterung notwendig ist. Das Ergebnis ist rechts oben sowie links oben eingetragen, denn man kann ja noch weitere Korrekturen vornehmen.

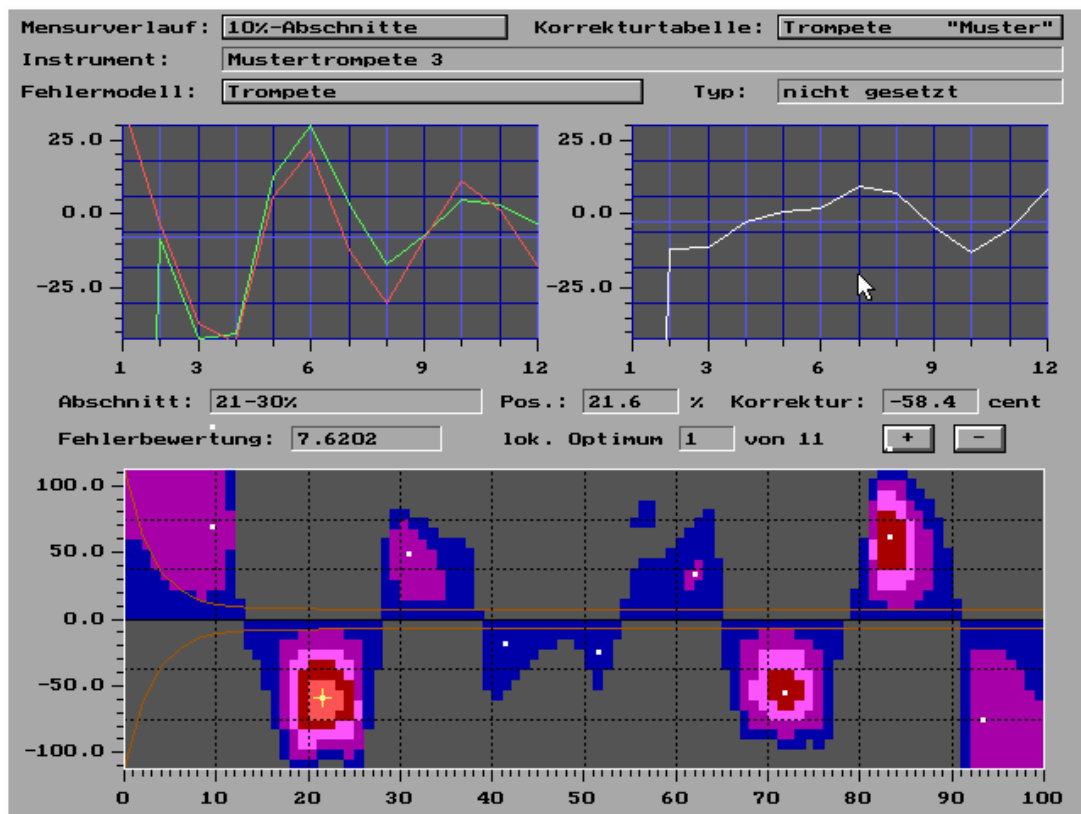


Abbildung 3: Mensurkorrektur einer Mustertrompete mit $\text{Me}^{\text{SS}}\text{Ko}$ Einstellung: Einzelkorrektur, automatische Bereichsfindung

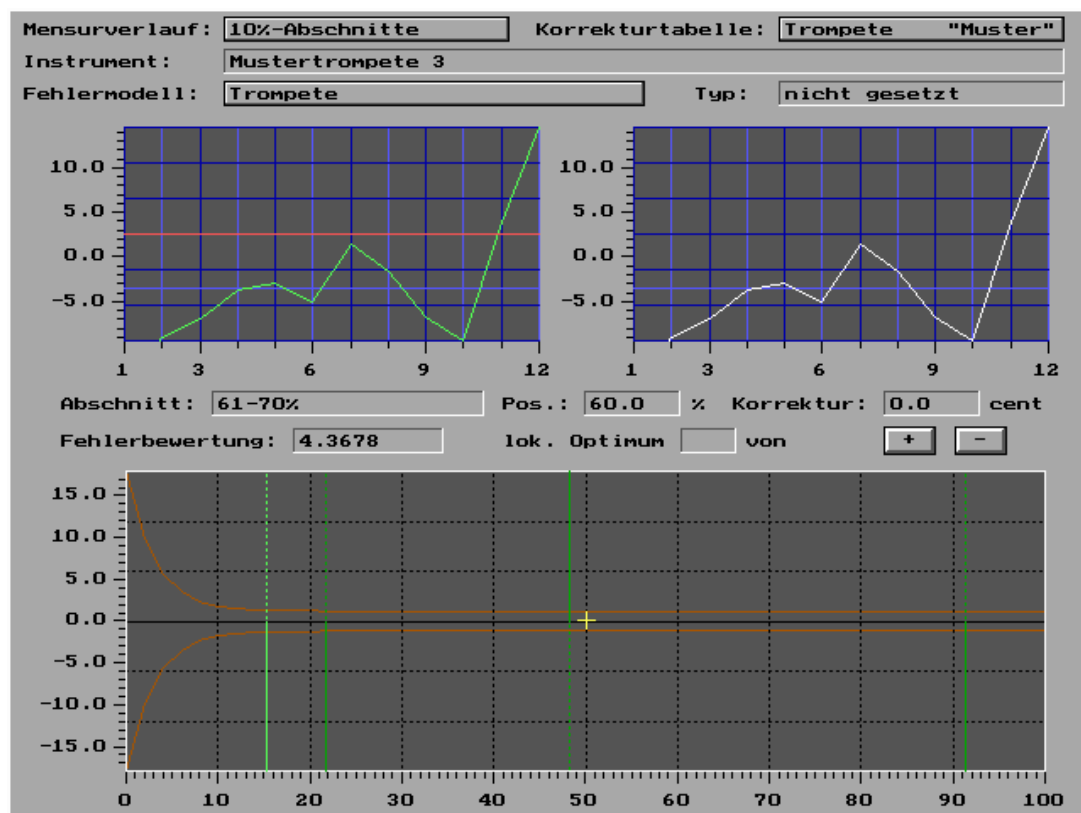


Abbildung 4: Kennzeichnung von 4 Korrekturen bei $\text{Me}^{\text{SS}}\text{Ko}$ durch grüne Linien

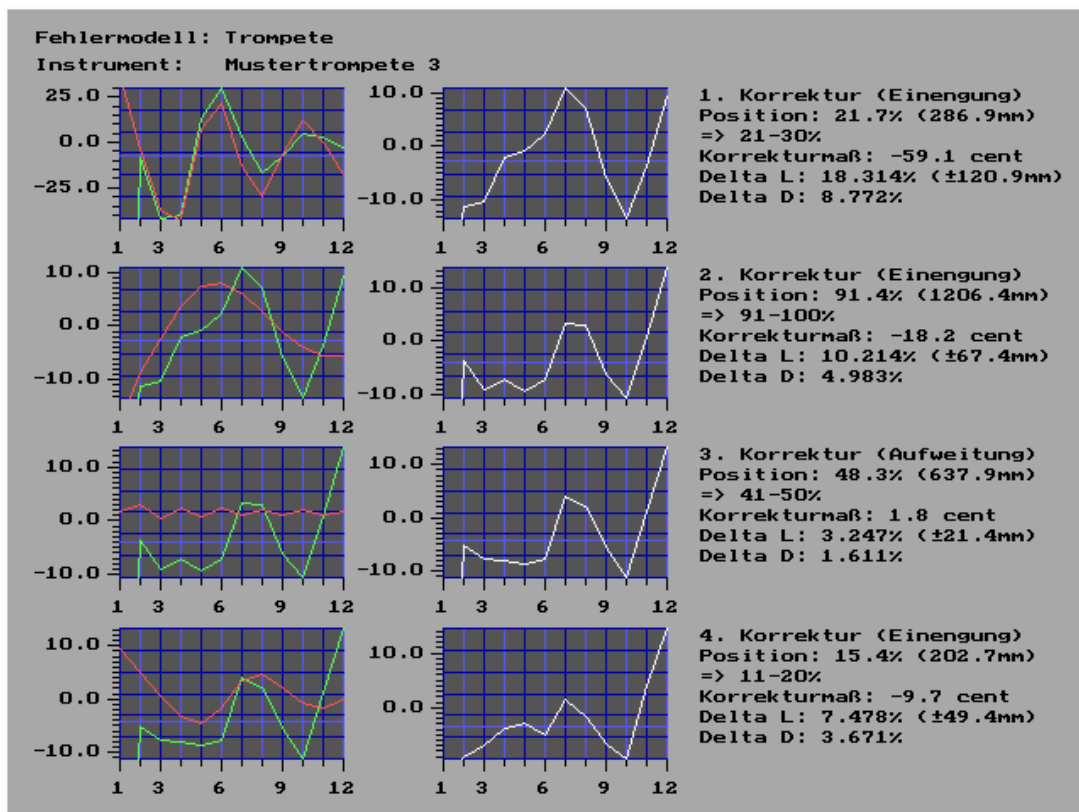


Abbildung 5: Auflistung der Ergebnisse für 4 serielle Einzelkorrekturen

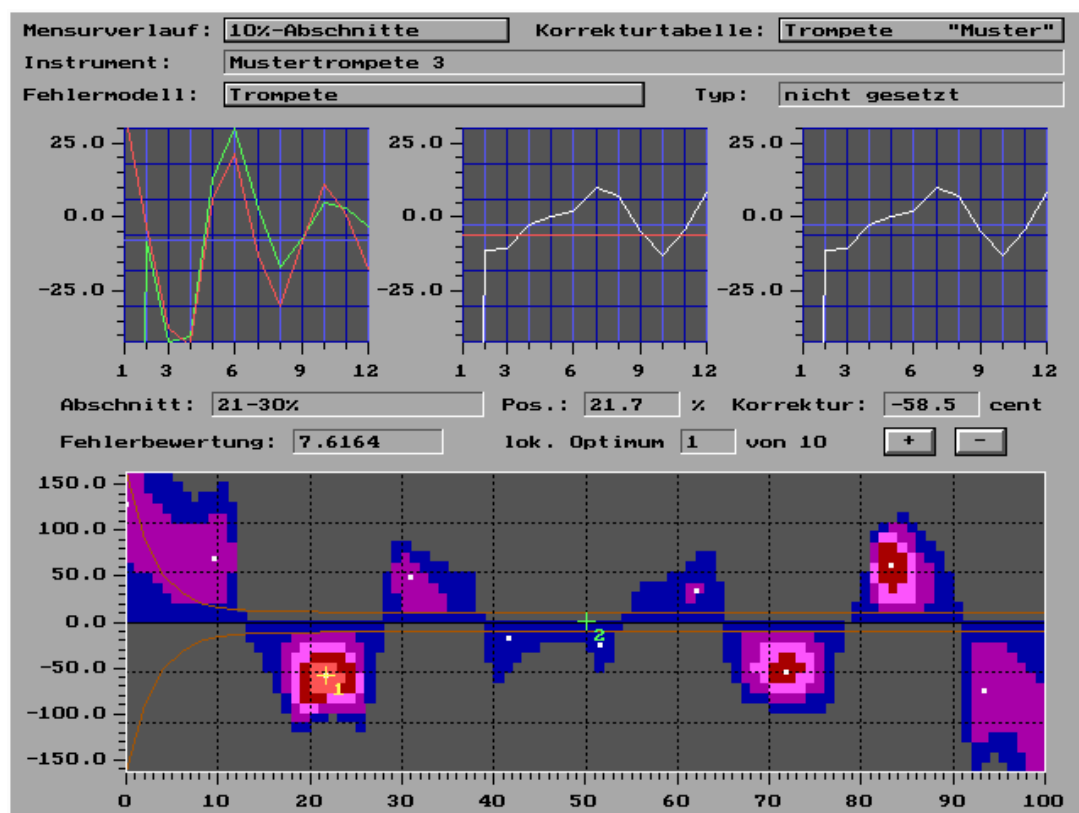


Abbildung 6: Darstellung von  mit feiner Auflösung und 2 Korrekturzeigern (1 und 2)

Für die weiteren mechanischen Arbeiten werden die Ergebnisse detailliert aufgelistet, wie man es in Abb. 5 sehen kann. Die einzelnen Korrekturen sind übereinander dargestellt (vorher - nachher) und die Daten für die mechanische Mensurüberarbeitung rechts daneben aufgeführt.

Doppelkorrekturen als Neuerung bei $\overline{\text{Me}}^{\text{SS}}\text{Ko}$:

Bei dem gezeigten Beispiel sieht man, daß die bisherige Methode von $\overline{\text{Me}}^{\text{SS}}\text{Ko}$ zwar ein gutes Resultat liefert, jedoch erst nach Durchführung von Mensurkorrekturen an 4 verschiedenen Stellen. Hier setzt die neue Methode der Doppelkorrekturen an, bei der die einzelnen Korrekturen nicht nacheinander (seriell) angewandt werden, sondern bei der zwei Korrekturen derart aufeinander abgestimmt werden, daß sich daraus schneller ein Optimum finden läßt - und zwar mit nur noch 2 Korrekturstellen! Hierbei werden zunächst die Korrekturmöglichkeiten an möglichst vielen Orten auf dem Instrument analysiert und dann weitere Korrekturmöglichkeiten für jeden der gefundenen Orte ermittelt. Aus dieser Vielzahl von Korrekturmöglichkeiten werden diejenigen Paare herausgesucht, die das beste Ergebnis liefern. Dazu ist es erforderlich, daß man 2 Korrekturdiagramme gleichzeitig darstellt und mit Hilfe von 2 getrennten Mauszeigern auch verändern kann. Für den manuellen Betrieb können wir nun mit zwei Mauszeigern arbeiten und die Auflösung zwischen fein (für serielle Korrekturen) und grob (für Doppelkorrekturen) wählen. Üblicherweise werden entlang der Rohrachse an 100 Stellen jeweils 30 Korrekturen errechnet und daraus die Sinnhaftigkeit in einer Farbskala dargestellt. Im Normalfall sieht das für 2 Mauszeiger (2 Korrekturmöglichkeiten) so aus wie in Abb. 6. Hier ist nur der Zeiger 1 gesetzt, der Zeiger 2 bei 50% besitzt keinen Wert!

Für die Berechnung von Doppelkorrekturen würde die Rechenzeit des Computers einen für die Praxis unakzeptablen hohen Wert annehmen, deshalb wird die Auflösung derart reduziert, daß nur noch 10 Stellen entlang der Rohrachse mit jeweils maximal 11 Werten untersucht werden. Durch besondere Optimierungsverfahren kann damit aber die volle Leistungsfähigkeit des Programms erhalten bleiben, so daß sich die Rechenzeit nur unwesentlich verlängert. Bleibt man bei der gewählten Darstellung, so ergibt sich rein formell die Ausgabe wie in Abb. 7.

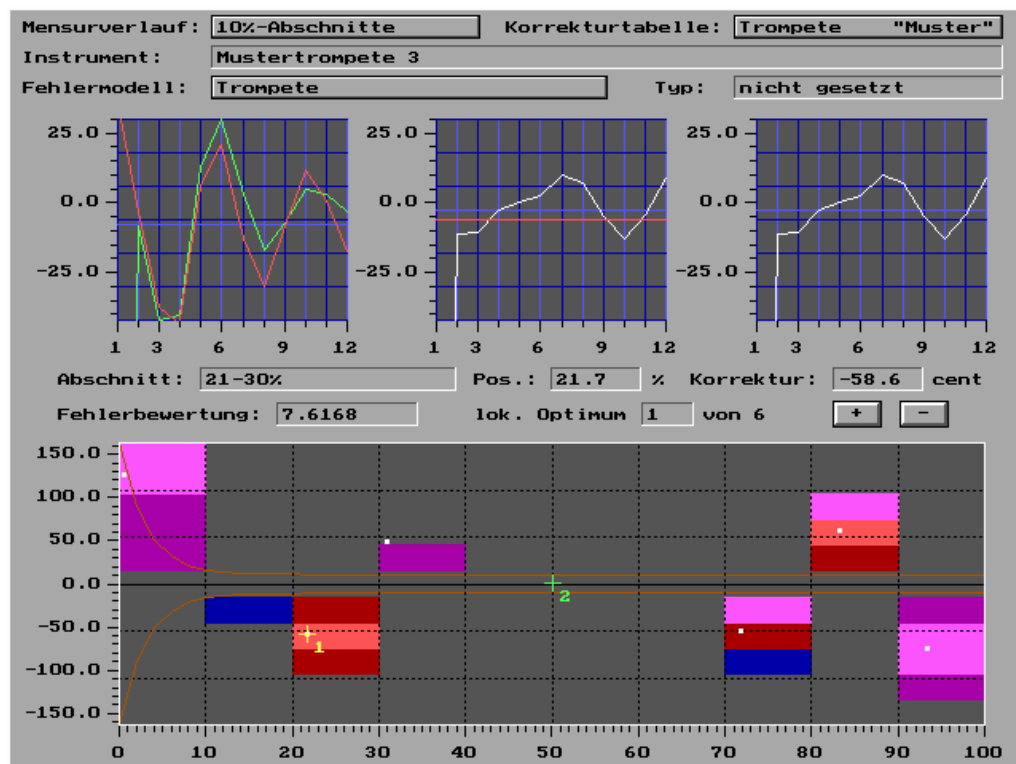


Abbildung 7: Darstellung wie in Abb.6, aber mit reduzierter Auflösung (grob)

Will man nun auch den 2. Korrekturzeiger verwenden, so kann man in dieser Darstellung auch manuell ein vernünftiges Ergebnis erarbeiten. Das ist im Beispiel von Abb. 8 getan worden. Das Ergebnis rechts oben sieht schon recht ordentlich aus.

Läßt man sich die Ergebnisse der beiden Korrekturen von $\overline{\text{Me}}^{\text{SS}}\text{Ko}$ anzeigen, so erhält man die Darstellung von Abb. 9. Eine noch bessere Annäherung an das Optimum erhält man durch Einschalten des automatischen Betriebes für Doppelkorrekturen in dem Computerprogramm. Hierbei werden von vornherein gleich 2 Korrekturzeiger berücksichtigt, und die Darstellung der Farbfelder entfällt. Dafür werden sehr viele Paare für die Doppelkorrekturen aufgelistet, aus denen sich der Instrumentenmacher die für ihn geeignetsten herausuchen kann. In dem Feld "lok. Optimum" erscheinen Ordnungszahlen für die Sinnhaftigkeit von Doppelkorrekturen, die mit den Feldern "+" und "-" weitergeschaltet werden können. Die Ergebnisse für die Intonation sowie die Positionen der beiden aufeinander abgestimmten Korrekturen werden detailliert angezeigt, wie man es in Abb. 10 sehen kann.

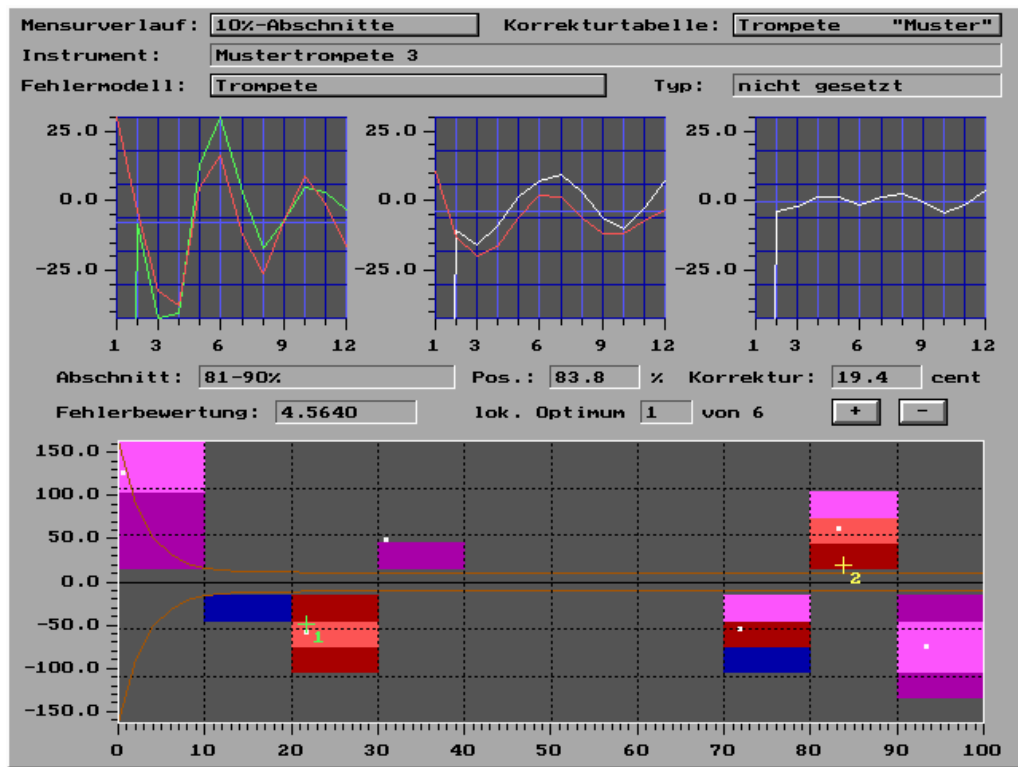


Abbildung 8: Manuelle Doppelkorrektur bei grober Auflösung (Cursor 1 bei ca. 22%, Cursor 2 bei ca. 84%)

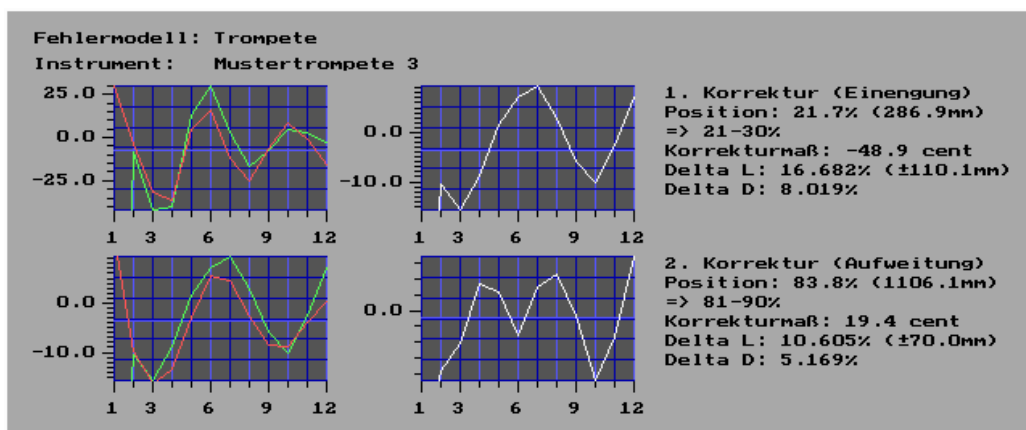



Abbildung 9: Ergebnis der manuellen Doppelkorrektur entspr. Abb. 8 (Intonationsskalen unterschiedlich!)

Vergleich der Ergebnisse verschiedener Verfahren von :

Am interessantesten ist ein Vergleich der Ergebnisse für die verschiedenen Methoden von  . In Abb. 11. sind die Ergebnisse für die folgenden Verfahren dargestellt: 1. Intonation nach 4 nacheinander vorgenommenen Korrekturen (Normalfall mit Automatik), 2. Intonation mit Verfahren der Doppelkorrektur bei manuellem Suchen des Optimums und zuletzt 3. die Intonation mit dem Verfahren der Doppelkorrektur mit automatischem Suchlauf für das Optimum. Man beachte die Maßstäbe für die Intonationsachse, die aussagen, daß die Schwankungsbreite der resultierenden Intonationskurve bei üblichem manuellem Suchen bei ± 10 cent liegt, bei manuellem Suchen von Doppelkorrekturen bei ± 4 cent und bei dem automatischen Suchlauf für Doppelkorrekturen nur noch bei ± 1 cent. Diese Darstellung untermauert deutlich die Vorteile der neuen Doppelkorrekturmethode.

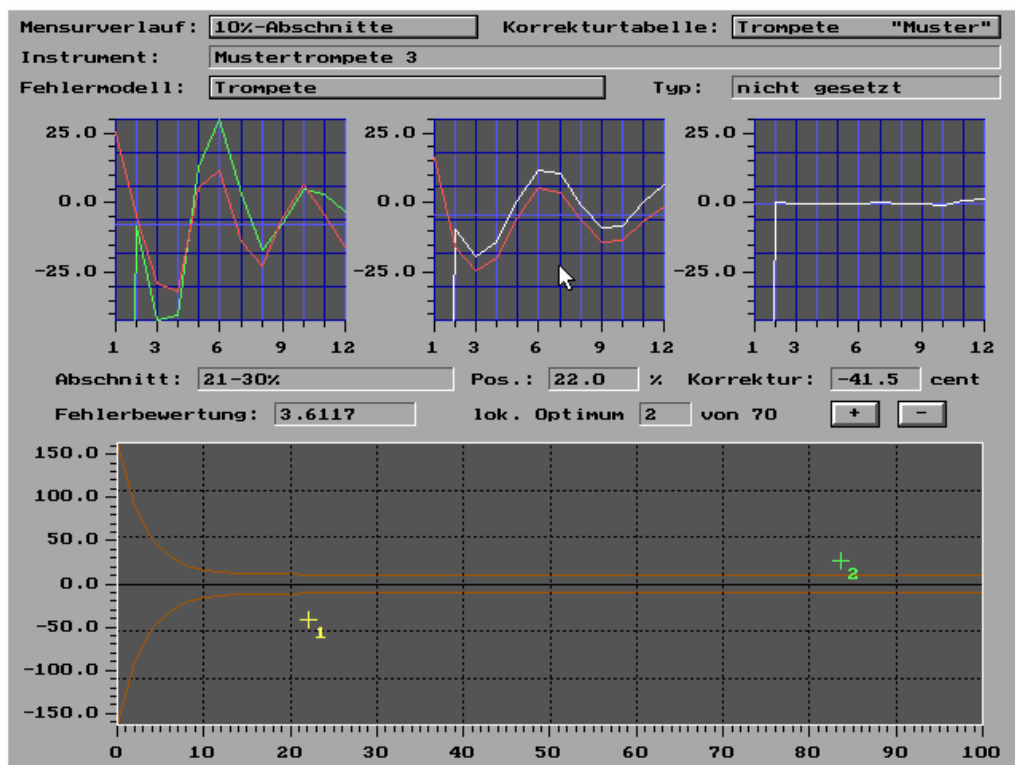
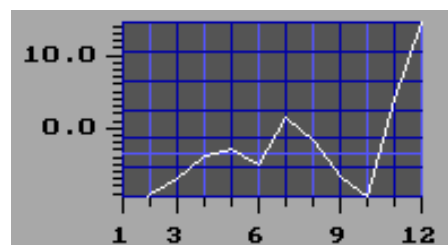
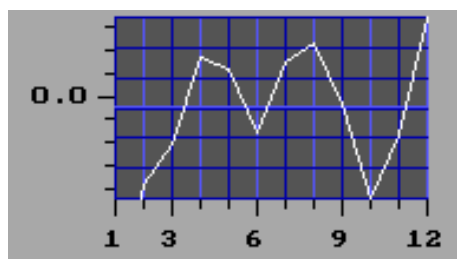


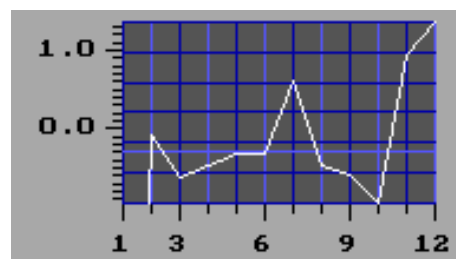
Abbildung 10: Darstellung eines lokalen Optimums bei automatischer Doppelkorrektur



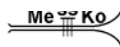
Normalfall: 4 Korrekturen



Manuelle Doppelkorrektur
 $\pm 4 \text{ cent}$



Automatische Doppelkorrektur
 $\pm 1 \text{ cent}$

Abbildung 11: Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Methoden von 

Forschung am Studiengang Musikinstrumentenbau der WHZ

E. Meinel

Westfälische Hochschule Zwickau

Einleitung

Der Musikinstrumentenbau kann im oberen Vogtland auf eine mehr als 350jährige Tradition zurückblicken. Er hat seine Wurzeln im handwerklichen Geigenbau. Mitte des 17. Jahrhunderts wanderten böhmische Exulanten in das Gebiet um Klingenthal und Markneukirchen ein, gründeten eigene Innungen und führten den Musikinstrumentenbau zu hoher Blüte. Am Ende des 19. Jahrhunderts galt das obere Vogtland als der weltgrößte Produzent an Orchesterinstrumenten.

Im Jahre 1988 wurde in Markneukirchen eine weiterbildende Einrichtung für Instrumentenbauer gegründet, die seit 1992 als Studiengang Musikinstrumentenbau und als eine Außenstelle des Fachbereiches Angewandte Kunst Schneeberg an der Westfälischen Hochschule Zwickau geführt wird.

Für die Unterbringung der neu geschaffenen Einrichtung dient eine das nötige künstlerische Ambiente bietende Jugendstilvilla in Markneukirchen.



Abbildung 1: Die „Merz-Villa“ - Sitz des Studienganges

Studium Musikinstrumentenbau

Der Studiengang Musikinstrumentenbau vermittelt in einem 4jährigen Direktstudium theoretische und praktische Kenntnisse und Fertigkeiten, die zum Entwurf und Bau von hochwertigen, künstlerisch gestalteten Musikinstrumenten befähigen. Auf der Grundlage umfassender musikwissenschaftlicher, naturwissenschaftlicher, kunstwissenschaftlicher und historischer Erkenntnisse und Methoden werden die Studierenden befähigt, kreativ auf dem Gebiet des modernen und historischen Musikinstrumentenbaus zu arbeiten. Die enge Verbindung von kunsthandwerklicher Tradition mit moderner wissenschaftlicher Ausbildung gewährleistet ein praxisorientiertes Studium. Derzeit werden die Studienrichtungen Streichinstrumentenbau, Zupfinstrumentenbau und Bogenbau angeboten. Der Fächerkanon umfasst im Wesentlichen:

- Künstlerisch-gestalterische Grundlagen
 - Naturstudium
 - Formgestaltung
 - Farblehre
- Wissenschaftlich-theoretische Grundlagen
 - Musikgeschichte/Ästhetik
 - Geschichte der Musikinstrumente
 - Instrumentenkundliche Analytik
 - Ästhetik
 - Kulturgeschichte
 - Klanggestaltung
 - Technische Mechanik
 - Akustik
 - Messtechnik
 - Werkstofflehre
 - Wirtschaftslehre
 - Informatik
- Entwurf/Technologie
 - Konstruktive Grundlagen
 - Instrumentenbautechnik
 - Restaurierungstechnik
 - Holzbildhauertechnik
 - Historische Grundlagen des Zupf- und Streichinstrumentenbaus

Ab dem Herbstsemester 2007/08 wird im Rahmen der Hochschulreform der Studiengang als Bachelorstudiengang angeboten. Die Lehrinhalte wurden neu strukturiert und in fächerübergreifende Module integriert.

Forschung

Die Forschung ist integrativer und wesentlicher Bestandteil des Studiums am Studiengang. Schwerpunkte sind insbesondere:

- Arbeiten zur Geschichte des Musikinstrumentenbaus (insbesondere des vogtländischen bzw. mitteldeutschen Musikinstrumentenbaus)
- Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen gestalterischen und/oder konstruktiven Parametern und akustischen bzw. sonstigen qualitätsrelevanten Eigenschaften
- Vertiefung der Kenntnisse über den Funktionsmechanismus der Musikinstrumente und der Perception durch Hörer und Spieler
- Instrumentenkundliche Analyse und katalogmäßige Erfassung von historisch relevanten Instrumenten aus dem Bestand der Musikinstrumentenmuseen
- Überprüfung und wissenschaftliche Untermauerung bisher ungesicherter, empirischer Erfahrungen des traditionellen Musikinstrumentenbaus

- Einsatz und praktische Erprobung alternativer Materialien, insbesondere unter dem Aspekt der Substitution nur noch begrenzt verfügbarer traditioneller Materialien (diverse Tropenhölzer, Elfenbein u.ä.)
- Forschung zu Herstellung und Anwendung von Musikinstrumentenlacken
- Entwicklung bzw. Weiterentwicklung objektiver Prüf- und Messverfahren zur objektiven Bewertung qualitätsrelevanter Eigenschaften von Musikinstrumenten, vorzugsweise von „werkstatttauglichen“ Methoden

Einen breiten Raum nimmt Entwicklung neuer gestalterischer und/oder konstruktiver Lösungen ein, wobei die Umsetzung wissenschaftlicher, speziell akustischer Erkenntnisse im Vordergrund steht. Drei Beispiele sollen dies verdeutlichen.



Abbildung 2: Unkonventionelle Konstruktionen

Der asymmetrischen Bratsche von Christine Steidler (Abb.2 links) liegen ergonomische Überlegungen zugrunde. Bei im Prinzip gleichen akustischen Eigenschaften werden deutlich bessere Hebelverhältnisse in der Spielhaltung erreicht und der Bewegungsapparat des Spielers entlastet.

Die Gitarre von Thomas Ochs setzt erfolgreich akustische Wirkprinzipien um, die auf Erkenntnissen der amerikanischen Biophysiker Michael Kasha zurückgehen (Abb.2 Mitte).

Ebenfalls auf physikalischen Überlegungen beruht die Geigenform, die von Dr. Franz Thomastik bereits in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelt und von Liesel Ohle (Abb.2 rechts) nachgebaut wurde.

Wenngleich insbesondere die letztere Geigenform in der allgemeine Konzertpraxis nicht unbedingt auf Akzeptanz stoßen dürfte, führen die Modellbauten zu wesentlichen Erkenntnissen, die sich in abgewandelter stilistischer Form auch größtenteils bei traditionellen Instrumentenformen umsetzen lassen.

Die Realisierung der Forschungsaufgaben erfolgt in:

- Semesterarbeiten
- Projektarbeiten (im 5. und 7. Semester)
- Diplomarbeiten (theoretischer und praktischer Teil, der in der Regel den Bau von Instrumenten einschließt)
- Forschungsprojekten

Langfristige Forschungsvorhaben

- Leben und Werk von Richard Jacob - Wissenschaftliche Erschließung der Sammlung "Weißgerber":

Der Markneukirchner Richard Jacob „Weißgerber“¹ (1877-1960) gehört zu den bedeutendsten Gitarrenbauern des 20. Jahrhunderts. Die Erforschung seiner Instrumente, die wissenschaftliche Dokumentation seines Nachlasses, die Analyse der Herstellungsverfahren und die Rekonstruktion klanggestalterischer, ästhetischer sowie stilistischer Postulate steht im Mittelpunkt der Forschungsarbeit.

- Historische Musikinstrumente – Rekonstruktionen und Modellfertigung für kunsthandwerklichen Instrumentenbau:

Die Wiederentdeckung und Neubelebung des Baus historischer Instrumente gewinnt zunehmend für die historische Aufführungspraxis Bedeutung. Da originale Instrumente kaum noch zur Verfügung stehen, müssen hochwertige Nachbauten Musikern zur Verfügung gestellt werden. Ziel des Forschungsprojektes ist es deshalb, historisch wertvolle Modelle zu analysieren, zu dokumentieren, zu rekonstruieren, zu fertigen und zu erproben.

- Applikationsforschung zu Musikinstrumentenlacken:

Die Qualität von Musikinstrumenten wird maßgeblich von den Eigenschaften der Lackierung mitbestimmt. Das Projekt widmet sich den im Musikinstrumentenbau signifikantem Lacken mit ihren akustischen, ästhetischen und konservierenden Eigenschaften. Insbesondere geht es um die wissenschaftliche Qualifizierung des im Wesentlichen auf empirischen Erfahrungen basierenden Gebietes einschließlich der Erforschung historischer Lackrezepturen als Bestandteil der Restaurierungstechnik und deren Herstellung.

Literatur:

[1] Homepage des Studienganges.URL:
<http://www.studia-instrumentorum.de/merz.htm>

¹ Künstler und Markenname

Probleme bei CAD-Anwendungen im Streichinstrumentenbau

G. Ziegenhals

Institut für Musikinstrumentenbau a. d. TU Dresden, Zwota

Einleitung

Bei den Streichinstrumenten gelten die Klangeigenschaften der Instrumente der alten italienischen Meister heute immer noch als Vorbild und alle neu gebauten Instrumente werden an diesen Klangeigenschaften von den Musikern gemessen. Deshalb liegt es nahe, für die Entwicklung neuer Instrumente mit den Methoden des Reverse Engineering zunächst genaue 3D-CAD – Konstruktionsunterlagen von alten Meisterinstrumenten zu erstellen. Diese Modelle könnten sowohl als Basis für eine entsprechende CNC-Bearbeitung von Decke, Boden und Hals als auch für die rechnergestützte Schwingungsanalyse (FE-Berechnungen) dienen.

In der industriellen aber auch z.T. in der handwerklichen Fertigung von Streichinstrumenten werden heute mechanische und CNC – Kopierfräsmaschinen in der Vorfertigung eingesetzt. Im handwerklichen Bereich arbeitet man dabei immer mit einem gewissen Aufmaß, so dass der Geigenbauer den „letzten Schliff“ immer noch per Hand ergänzen muss. Der Nachteil dieser an sich modernen Verfahrensweise besteht darin, dass nur wenige Modelle (Wölbungen, Konturen, Dickenverläufe) für die Vorfertigung verfügbar sind. Es gilt die Auffassung, dass die Fertigung kleiner Stückzahlen von individuellen Formen aufgrund der Maschinen- und Programmierkosten zu teuer ausfällt. Ziel der hier beschriebenen Arbeiten war es nun, auf der Basis verfügbarer Werkzeuge des Reverse Engineering eine Entwicklungsumgebung zu schaffen, die eine CNC – gestützte Fertigung von Streichinstrumenten in individuellen kleinen Serien mit akzeptablen Kosten ermöglicht. Sie liefen im Rahmen eines Kooperationsprojektes des Instituts für Produktionstechnik der Technischen Universität Dresden (ZUD) und des Instituts für Musikinstrumentenbau (IfM) Zwota (SCHETELICH 2006).

Zu lösende Probleme

Die angestrebte CNC gestützte Fertigung erfordert folgende Entwicklungs- bzw. Arbeitsschritte:

- Erfassen der Maße vorhandener Instrumente (Scannen)
- Erstellen von CAD – Datensätzen (Urmodelle und modifizierte Modelle)
- Erstellen von Steuerprogrammen
- Spannen der Werkstücke
- Fräsen der Werkstücke (Bearbeitungsparameter)

Kenner der Materie werden sofort fragen, wieso CAD – Datensätze erforderlich sind. Aus den beim Scannen erzeugten Punktwolken kann man ja direkt Steuerdaten generieren. Für die effektive Fertigung individueller Formen wollen wir jedoch die Möglichkeiten der Veränderung der Modelldaten (der Konstruktion) in CAD – Systemen nutzen. D.h. die erfassten Maße der historischen Instrumente sollen die Basis für abgeleitete Produkte bilden.

Beim Stichwort Scannen denkt der geschätzte Leser sicher sofort an moderne optische Verfahren und hier insbesondere den Einsatz von Lasern. Nun im Falle der Streichinstrumente stehen wir hier vor zwei weiteren Problemen: Wir benötigen nicht nur die für die optischen Verfahren „sichtbaren“ Außenmaße sondern auch die inneren Verläufe. Historische Instrumente können für den Nachbau in der Regel nicht zerlegt werden. Wir entschlossen uns deshalb, zunächst auf die mechanische Abtastung zurückzugreifen. An dieser Stelle sei schon vermerkt, dass auch das mechanische Tasten nicht unproblematisch ist. Es wird eine gewisse Andruckkraft benötigt, die die Gefahr einer Beschädigung der Oberfläche bei gewissen Messschritten birgt.

Studium des Ablaufes am Beispiel Geige und Cello

Die zu vermessenden Vorbildinstrumente mussten spielbar und auch für die akustischen Messungen geeignet sein. Alte Violinen aus den Jahren 1740-1760 des Musikinstrumentenmuseum Markneukirchen, wie es zunächst angestrebt war, konnten aus diesen Gründen nicht eingesetzt werden. Es wurde daher eine Violine Baujahr 1920 vom Geigenbaumeister Carl Oswald Meisel aus den Bestand der Westsächsischen Hochschule Zwickau, Studiengang Musikinstrumentenbau und ein Violoncello der Geigenbaumeisterin Kästner ausgewählt.

Die geometrische Vermessung dieser Instrumente erfolgte im IfM Zwota auf einer handgeführten 3D-Koordinaten-Messmaschine ETALON DERBY 454 (Abbildung 1).



Abbildung 1: Cello auf Koordinatenmessmaschine

Die Außenflächen des Bodens und der Decke wurden mit einem Messraster bei der Violine in X-Achse=5mm, Y-Achse=10mm und beim Violoncello in X-Achse=10mm, Y-Achse=20mm digitalisiert. Den Verlauf der Innenflächen gewannen wir über eine Dickenmessung an den Rasterpunkten mit dem Magnetdickenmessgerät MAGNA-MIKE 8000, dessen Magnetsonde mit einem Spezialhalter (Eigenbau) an der Messtasteraufnahme der Koordinatenmessmaschine befestigt wird (Abbildung 2).



Abbildung 2: Dickenmessung an einer Geige

Im Rahmen des mechanischen Scannens erreichten wir folgenden Genauigkeiten:

- Außenkontur $\pm 0,01$ mm
- Dicke $\pm 0,025$ mm
- Rasterpunkte $\pm 0,01$ mm

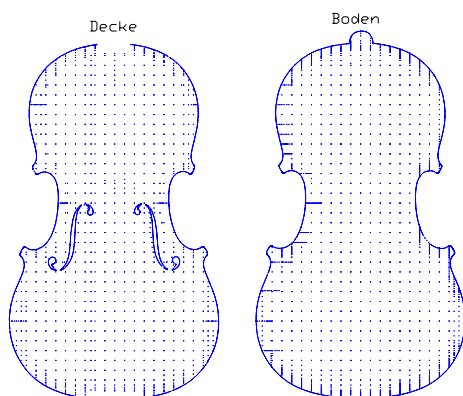


Abbildung 3: Punktwolken „Geige“ im Ergebnisse des Abtastprozesses

An der TUD wurde mit spezieller Software (SURFACER; Geomagic-Studio) aus den digitalisierten Daten die Außen- und Innenflächen in 3D generiert und zu einem Volumenelement für Boden und Decke zusammengesetzt. Diese dienten als Basis für die Erstellung der CNC-Fräsbahndatensätze und für die 3D-CAD-Konstruktion der Violine. Die freien Formen der Streichinstrumente bereiten den Programmen Probleme. Nacharbeit von Hand ist noch in erheblichem Maße erforderlich. Letztlich mussten viele Vereinfachungen vorgenommen werden.

Die ersten Fräsversuche offenbarten erhebliche Mängel. Es zeigte sich, dass bei Orientierung auf die Nutzung der Scan-Daten in CAD-Modellen aus denen dann wiederum Fräsdaten generiert werden, die Auflösung der mechanischen Abtastung deutlich zu gering ist. Bei höherer Auflösung steigt aber der Aufwand unverhältnismäßig an. Die Vorbilder wurden deshalb mit dem Verfahren der Streifenpro-

jektion zusätzlich vermessen und mit diesen Werten die CAD-Modelle entsprechend verfeinert.

Die aus den überarbeiteten Datensätzen gewonnenen Steuerdaten ermöglichten nun die Herstellung brauchbarer Boden- und Deckenrohlinge an der TUD, aus denen von der Geigenbaumeisterin Kästner jeweils drei Musterinstrumente gebaut wurden.

Akustische Beurteilung der Musterinstrumente

Die akustische Beurteilung erfolgte anhand der Frequenzkurve. Die Aufnahme der Kurven erfolgte im reflexionsarmen Raum des IfM. Für die Aufnahme werden im IfM Geigen und Bratschen in eine Haltevorrichtung eingespannt und mit einem Pendelhammer angeregt. Alle anderen Streich- und Zupfinstrumente halten wir manuell in Spielhaltung und klopfen mit einem normalen Impulshammer per Hand an (Abbildung 4 und 5).



Abbildung 4: Einspann- und Anregevorrichtung zur Frequenzkurvenmessung an Geigen und Bratschen



Abbildung 5: Frequenzkurvenmessung an Cello

Die folgenden Abbildungen zeigen die Frequenzkurven der drei **Mustergeigen** sowie die mittlere Kurve der Mustergeigen im Vergleich zum Vorbildinstrument.

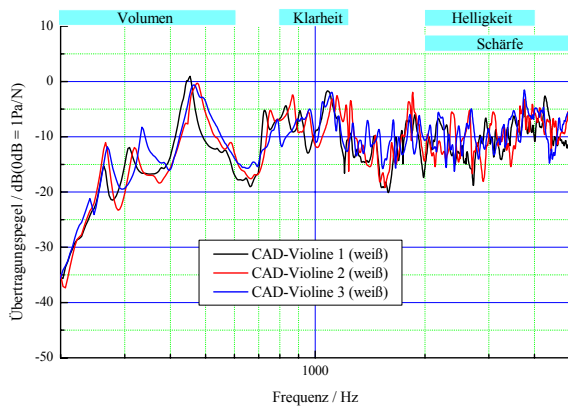


Abbildung 6: Frequenzkurven der Mustergeigen (weiß)

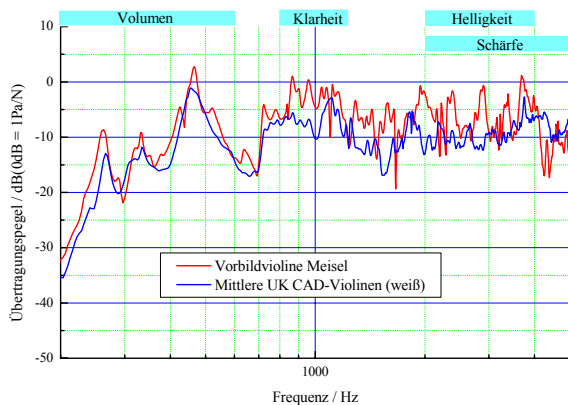


Abbildung 7: Mittlere Frequenzkurve der Mustergeigen (unlackiert = weiß) im Vergleich zur Vorbildgeige

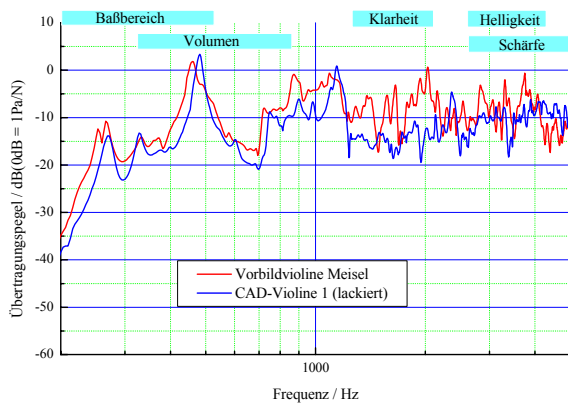


Abbildung 8: Vorbildgeige im Vergleich zur lackierten Mustergeige V 1

Leider konnte im Verlaufe des Projektes nur ein Muster noch lackiert werden, so dass der endgültige Vergleich letztlich nur an einem Muster erfolgen kann. Für eine Aussage zur Ähnlichkeit der Frequenzkurven als Maßstab für die Bewertung des Nachbauerfolges wollen wir die mittlere Pegelabweichung (energetisch berechnet) der Kurven zueinander verwenden. Bezogen auf 0dB=1Pa/N

erhalten wir folgende typische mittlere Pegelabweichungen:

- Mustergeigen untereinander (weiß) **-10,5 dB**
- Mustergeigen (weiß) zur Vorbildgeige **-7,5 dB**
- Mustergeige 1 (lackiert) zur Vorbildgeige **-8,5dB**
- Reproduzierbarkeit bei Vergleich Messungen im Winter 2005/2006 zu Messungen im Frühjahr 2007 **-12 dB**

Man kann anhand der Ergebnisse feststellen, dass die drei weißfertigen Musterinstrumente einander sehr nahe kommen und die Unterschiede im Rahmen üblicher Fertigungstoleranzen liegen. Die Differenz des lackierten Musters zum Vorbild liegt über den üblichen Fertigungstoleranzen, so dass zwar von einem recht gelungenen aber keineswegs vom einem exakten Nachbau zu sprechen ist.

Für die Celli fallen die Ergebnisse besser als für Geigen aus. Die folgenden Abbildungen zeigen im Vergleich die Frequenzkurven der drei Muster und das Vorbildinstrument gegenüber der mittleren Frequenzkurve der im Projekt gefertigten Muster.

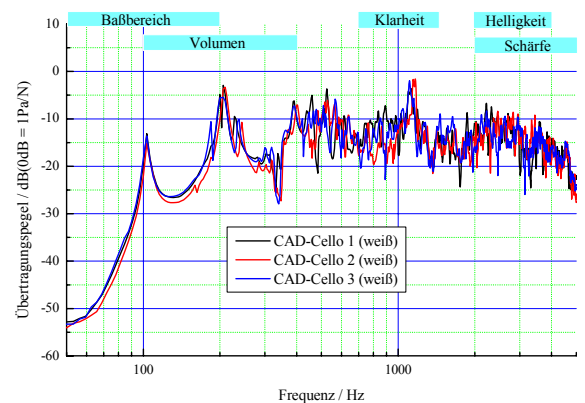


Abbildung 9: Frequenzkurven der Mustercelli (weiß)

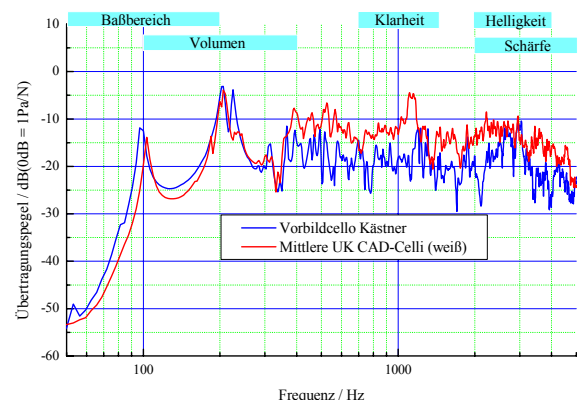


Abbildung 10: Mittlere Frequenzkurve der Mustercelli (weiß) im Vergleich zum Vorbild

Die Übereinstimmung der drei Mustercelli (weiß) hinsichtlich ihrer Frequenzkurve ist bemerkenswert. Vom Vorbild weichen sie wie die Geigen jedoch merklich ab. Die Nach-

Nachbauten sind aus akustischer Sicht als deutlich besser als das Vorbild einzuschätzen!

Zusammenfassung

Die eingesetzten Verfahren des Reverse Engineering lieferten nach nicht unerheblichen Anpassarbeiten sehr gleiche Muster, die sich jedoch noch merklich von den Vorbildern unterscheiden. Für eine handwerkliche Fertigung erscheint die erreichte Übereinstimmung als nicht befriedigend, wohingegen eine industrielle Produktion ohne weiteres darauf aufbauen könnte. In Bezug auf die handwerkliche Fertigung muss man hier aber unbedingt vermerken, dass eine rein CNC gefertigte Kopie auch nicht die Zielstellung darstellt. Vielmehr sollen kostengünstige Rohlinge mit variabler Formgebung für kleine Serien angeboten werden, die dann noch Veränderungen durch den Meister erfahren. Andererseits könnte sicherlich die Übereinstimmung mit weiteren Schritten zur Anpassung der Modelle verbessert werden.

Die im Projekt involvierten Firmen und Handwerker, aber auch eine selbst erstellte Studie kommen zu der Auffassung, dass ein geometrisch und akustisch genauer CAD- und CNC-gestützter Nachbau von kompletten Streichinstrumenten mit den derzeitigen Mitteln bei **wirtschaftlich sinnvollem Aufwand** noch nicht möglich ist. Insbesondere die angestrebte Einbindung des CAD – Schrittes bringt einen deutlichen Aufwandsbeitrag.

Eine alternative Lösung stellt das Scannen einzelner Decken und Böden mittels dem Verfahren der Streifenprojektion bei wesentlich höherem Abtastraster und direktem Ableiten der Fräsbahnen dar. Als günstig erweist sich, die optische Abtastung durch ein mechanisches Abtasten des äußeren Umrisses zu ergänzen. Auf diese Weise lassen sich Boden- und Deckenrohlinge individuell auch für kleinere Serien in individuellen Formen mit akzeptablem Aufwand herstellen. Die Vorlagen liefert der Hersteller in Form traditionell entworfener und gebauter Musterdecken und Böden. **Der Einfluss des Meisters bleibt damit an wesentlicher Stelle erhalten.** Gerade der letztere Sachverhalt führte zu einer überraschenden Akzeptanz der Lösung im an sich eher konservativen Lager der Streichinstrumentenhersteller.

Die Entwicklung auf dem Gebiet der Scan-Technologie geht mit außerordentlich hohem Tempo von statten. Bereits absehbar ist, dass in relativ kurzer Zeit Verfahren, die auf der technischen Tomographie basieren, zu akzeptablen Kosten verfügbar sein werden. Das Abtasten mit entsprechender Genauigkeit ist möglich, dass Problem der Innenmaße ist damit vom Tisch und die entsprechenden Programme zum Generieren von CAD – Datensätzen aus den Scan – Informationen der Tomographen sind in der Entwicklung bereits weit vorangeschritten.

Schetelich, F.; Schöne, Chr.:
Rechnergestützte Konstruktion, Simulation und Fertigung
von Musikinstrumenten
Musicon Valley Report 2006

Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Forschungsprojekt wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Initiative „Unternehmen Region“ gefördert.

Messtechnische und numerische Analyse einer Geige im Vergleich

K. Hoge

Einleitung

Der heutige Geigenbau gründet hauptsächlich auf Tradition und Handwerk. Das Instrument wird nach einer Klangvorstellung konzipiert und später durch Musiker und Publikum genau danach beurteilt. Bei dieser Meinungsbildung über die Güte eines Instruments spielen vor allem subjektive Faktoren eine Rolle die nur schwer in einzelne „technische“ Maßnahmen beim Bau der Geige zu überführen sind. Eine Beurteilung des Klangs und damit der Güte der Geige soll hier also nicht das Ziel sein. Mit der Entwicklung leistungsfähiger Rechenanlagen und –programme besteht jedoch seit einiger Zeit die Möglichkeit, auch numerische Berechnungsmethoden beim Instrumentenbau einzusetzen. Diese ermöglichen schon in einem sehr frühen Entwurfsstadium grundlegende Parameter zu bestimmen und physikalische Zusammenhänge gezielt zu erforschen. In diesem Beitrag soll die Simulation der vibroakustischen Eigenschaften einer Mustergeige mittels gekoppelter Finite-Elemente- und Boundary-Elemente-Methoden vorgestellt werden. Dabei wird bewusst der Einfluss des Spielers vernachlässigt und an eine schon übliche Herangehensweise der Geigenbauer angeknüpft. Eine gängige Untersuchungsmethode ist die Ermittlung von Übertragungsfunktionen. Als Eingang in das System dienen hier die auf den Steg wirkenden Kräfte (durch Impulshammeranregung des Stegs, sowie Zupf- und Streichanregung der Saiten) und als Ausgangssignal fungiert der Schalldruck an drei Positionen auf einer Kugelfläche (Radius 1 m) über dem Stegmittelpunkt. Diese Übertragungsfunktionen wurden sowohl berechnet als auch im Rahmen von Messungen am Institut für Musikinstrumentenbau Zwota, ermittelt. Ziel der Untersuchungen ist es, ein validiertes numerisches Modell zu erarbeiten, mit dem zukünftig die Einflüsse z.B. der verwendeten Materialien, der Vorspannungskräfte oder der Wanddicken effizient untersucht werden können.



Abbildung 1: Ansichten der Mustergeige

Messungen in Zwota

Abbildung 1 zeigt die Mustergeige an der alle Messungen am IfM Zwota durchgeführt wurden und auf der das numerische Modell basiert. In erster Linie dienen die Messungen als Vergleich für die folgende numerische Simulation. Daher wurde eine erste Messreihe im reflexionsarmen Raum ausgeführt. Als Anregung trifft ein Impulshammer in den drei Richtungen (X -in Richtung der Sai-

ten, Y – quer dazu, und Z – senkrecht zu den Saiten) auf den Steg, die Saiten wurden während dieser Messung bedämpft. Der Schalldruckpegel an den drei Mikrofonpositionen ist das Ausgangssignal. Die Übertragungsfunktionen für die drei Raumrichtungen wurden in einem Frequenzbereich von 0-5kHz gemessen.

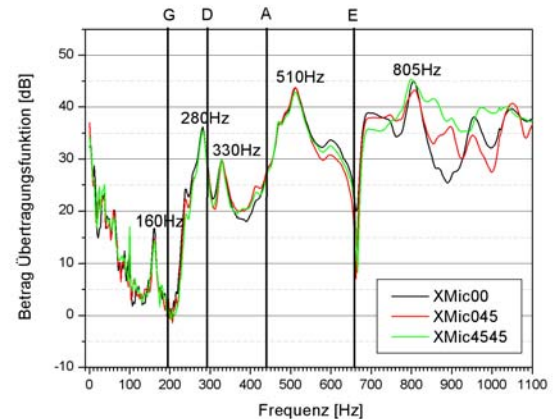


Abbildung 2: Beispiel der Übertragungsfunktion bei Anregung in X-Richtung

In Abbildung 2 sind beispielhaft für die X-Richtung die Übertragungsfunktionen zu den Mikrofonen im Bereich von 0-1,1kHz dargestellt. Die senkrechten Linien deuten die Lage der Saitenfrequenzen der Violine an. In der Literatur (vgl. [1], [2]) wird die Geige häufig anhand ihrer Übertragungseigenschaften charakterisiert. Besonders aussagekräftig ist dabei die Lage der Resonanz des eingeschlossenen Luftvolumens („Luftton“), der „Holzton“ und seine Subharmonische. Auch bei der hier betrachteten Mustergeige können diese Resonanzmaxima beobachtet werden (330Hz, 510Hz und 280Hz).

Neben den Übertragungsfunktionen werden sowohl das Eingangskraftsignal wie auch der Schalldruck an den drei Positionen aufgezeichnet. Die Kraftdaten werden später im numerischen Modell als Eingangskraft auf den Steg aufgebracht und die berechneten Ergebnisse mit den gemessenen Schalldrücken verglichen.

In einer weiteren Messung werden zusätzlich reale Eingangskräfte auf den Steg durch Anzupfen oder –streichen der Saiten aufgezeichnet. Dazu werden die Saiten der Violine nacheinander abgenommen und einzeln auf einen Monochord über einen künstlichen Steg, der gleichzeitig als Kraftaufnehmer dient, aufgespannt. Die Vorspannung der gestimmten Saiten wird für das numerische Modell notiert und die Saiten mit einem künstlichen Zupfer / Streicher angeregt. Das vibroakustische Verhalten der Geige aufgrund der gewonnenen 3D Kräfte auf den Steg kann dann später simuliert werden. Abbildung 3 zeigt ein Spielergebnis dieser Messung bei Streichanregung der G-Saite.

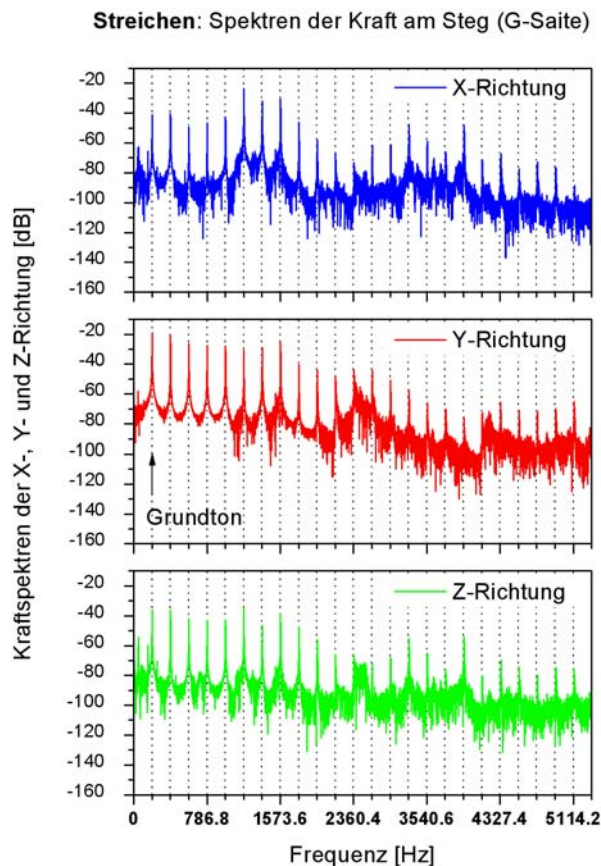


Abbildung 3: Spektren der Kraft auf den Steg bei Streichanregung der G-Saite

Das numerische Modell

Ausgehend von einer früheren Modalanalyse derselben Geige soll nun ein numerisches Modell für die gekoppelte Simulation erstellt werden. In zwei Ausführungen der Geige, mit und ohne modelliertem Steg, soll dessen Einfluss auf die

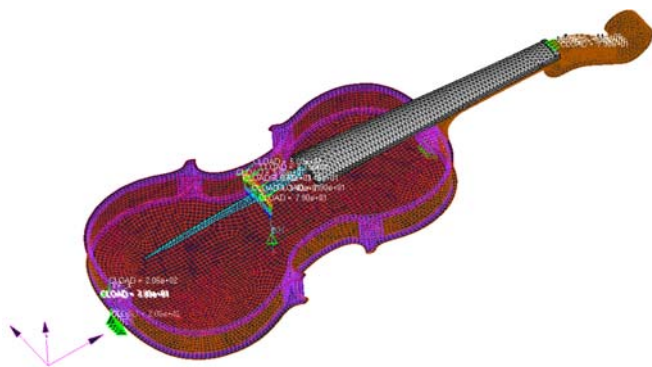


Abbildung 4: Strukturmodell der Geige mit Vorspannungskräften

Krafteinleitung in den Resonanzkörper aufgezeigt werden. Abbildung 4 zeigt das Strukturmodell der Mustervioline mit ausmodelliertem Steg. Decke, Boden, Zargen, Klötze, Stimmstock, Bassbalken, Hals und Griffbrett werden in beiden Simulationen berücksichtigt. Besonderes Augen-

merk ist dabei auf das orthotrope Materialverhalten von Holz zu richten.

Die beiden Modelle besitzen über 16000 Knoten und 80000 Freiheitsgrade, um das zu lösende Gleichungssystem und damit die Rechenzeit zu reduzieren, wird eine Modalanalyse (0-5kHz) vorangestellt (mit Vorspannungsberechnung) und die gekoppelte Berechnung in modalen Koordinaten ausgeführt. Da für das Materialverhalten von Holz und insbesondere die Dämpfungseigenschaften nur wenige Quellen in der Literatur zur Verfügung stehen, wurde hier ein Dämpfungsmaß von 0,05 gewählt. Für die gekoppelte Finite Element- und Boundary Element Analyse der Geige müssen entsprechend ein Strukturmodell und ein Akustikmodell für die Berechnung bereitgestellt und miteinander verlinkt werden. Die aus den Messreihen ermittelten Krafteingänge werden im Strukturmodell auf den Steg bzw. im zweiten Modell direkt auf die Decke aufgebracht. Die resultierenden Schalldrücke werden im Akustikmodell berechnet. Die Kopplung der beiden Modelle erfolgt nach Formel (1) und die Ergebnisse werden an diskreten Frequenzpunkten im Bereich von 180 bis 1000Hz bestimmt. Die Rechenzeit beträgt im Durchschnitt 75min pro Frequenz.

$$\begin{bmatrix} \Phi^T (\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \Phi & (\Phi^T \mathbf{C} \Phi)^T \\ (\Phi^T \mathbf{C} \Phi) & \frac{\mathbf{D}}{\rho \omega^2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \tilde{\mu} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi^T \mathbf{f}_S \\ \frac{\mathbf{f}_A}{\rho \omega^2} \end{pmatrix} \quad (1)$$

- K** Gesamtsteifigkeitsmatrix
- M** Massenmatrix
- Φ** Matrix mit den Eigenvektoren als Spalten
- α** modale Partizipationsfaktoren
- f_S** Struktur Lastvektor
- C** Kopplungsmatrix
- D** Koeffizientenmatrix
- μ̃** Oberflächenpotenziale
- f_A** akustischer Lastvektor

Vergleich der Mess- und Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Simulation des vibroakustischen Verhaltens der Mustergeige sind in Abbildungen 5 bis 7 zusammengefasst. Dabei werden die Simulationsergebnisse sowohl des Modells mit modelliertem Steg, wie auch die Werte bei Krafteinleitung direkt auf die Decke den zuvor gemessenen Schalldruckpegeln gegenübergestellt. (Hier nur für die Mikrofonposition 1, 1m über dem Stegmittelpunkt).

Die Diagramme sind wieder getrennt nach eingeleiteter Krafrichtung (X -in Richtung der Saiten, Y – quer dazu, und Z – senkrecht zu den Saiten) getrennt. Es fällt auf, dass beide Modelle im Verlauf der Schalldruckpegel über den Frequenzbereich gut mit den gemessenen Daten übereinstimmen. Betrachtet man die Pegelwerte, so zeigt das Modell mit dem neu modelliertem Steg deutlich bessere

Ergebnisse: die erste Eigenfrequenz des Stegs liegt zwar weit außerhalb des hier interessierenden Frequenzbereichs, aber der Steg ist verantwortlich für die Kräfteinleitung und -verteilung der Saitenkräfte in die Geigendecke, dabei steht ein Fuß in der Nähe des Stimmstocks, durch den die Kraft auch auf den Boden der Geige übertragen wird und der andere Fuß steht über dem Bassbalken, der die Kräfte in den oberen und unteren Geigendeckenbereich leitet.

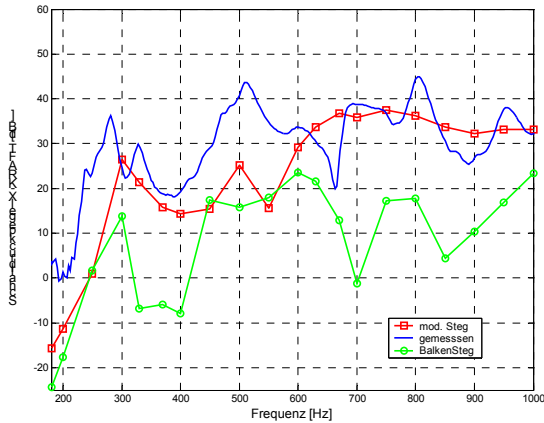


Abbildung 5 Vergleich der Schalldruckpegel an Mic_1, Kraftanregung in X-Richtung:

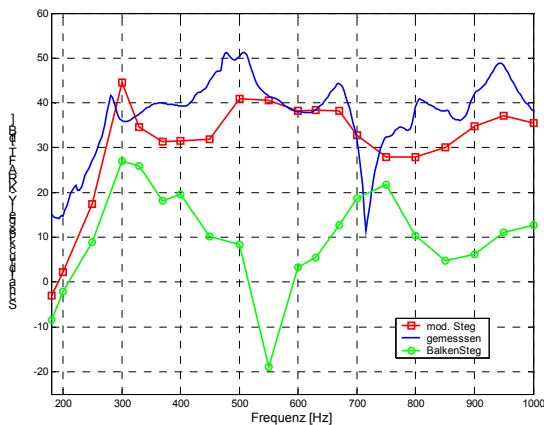


Abbildung 6: Vergleich der Schalldruckpegel an Mic_1, Kraftanregung in Y-Richtung

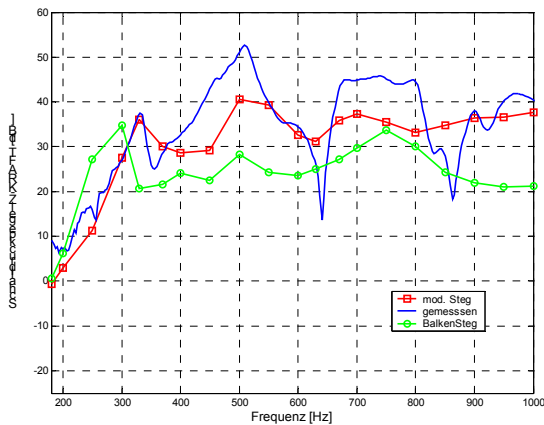


Abbildung 7: Vergleich der Schalldruckpegel an Mic_1, Kraftanregung in Z-Richtung

auf die Decke aufgebracht. Dies fällt besonders bei X- und Y- Richtung ins Gewicht, da die Hebelwirkung des Stegs, das Moment auf den Resonanzkörper, fehlt. Auch die Federwirkung des Stegs bleibt unberücksichtigt. Weitere Abweichungen kann man vor allem auf die ungenauen Materialdaten für Holz zurückführen. Hier wurde quasi ein künstliches Material „Ahorn“ oder „Fichte“ verwendet, dessen E-Module, Dichte und Dämpfungseigenschaften nicht tatsächlich mess- technisch an der Geige ermittelt wurden sondern aus Erfahrungswerten zusammengestellt. Weiterhin sind die Vergleichsmessungen Momentaufnahmen des aktuellen Schwingungsverhaltens der Geige, die in der Simulation durch vereinfachte Randbedingungen wie z.B. die Lagerung nachgestellt werden. Wie hier aufgezeigt, hat besonders die Position des Stegs großen Einfluss auf die Ergebnisse. Ein weiterer Punkt der maßgeblich zur Güte der Berechnung beiträgt ist die Anzahl der berücksichtigten Moden und vor allem auch eine genügend hohe Modendichte im interessierenden Frequenzbereich. Die hier ermittelten und berücksichtigten Moden fangen bei etwa 120Hz / 140 Hz an. Daher sollten die ermittelten Ergebnisse im tiefen Frequenzbereich auch in diesem Hinblick betrachtet werden. Mit Blick auf diese Einschränkungen kann man sehen, dass eine gekoppelte FEM / BEM Rechnung für die Geige eine geeignete Analyse Methode ist und durch Verbesserungen des Strukturmodells (Material) und einer höheren Modenzahl noch bessere Ergebnisse zu erwarten sind.

Abbildung 8 spielt hier eine besondere Rolle. Das Diagramm zeigt die Simulationsergebnisse bei realer Anregung (Zupfen und Streichen der G-Saite) für die keine Vergleichsmessung vorhanden ist. Die Berechnungspunkte wurden hier so gewählt, dass sie jeweils auf und zwischen Harmonische des Tons der G-Saite fallen. Wie erwartet zeigt sich ein schmalbandiges tonales Spektrum. Bei einer numerischen Simulation kann also ein Kräfteingangssignal (Klopfon, Impulshammeranregung oder reale Anregung) in das Modell eingebracht und die Auswirkungen simuliert werden. Die Ergebnisse können in Form einer Übertragungsfunktion oder der Schalldruckverteilung im Raum dargestellt werden.

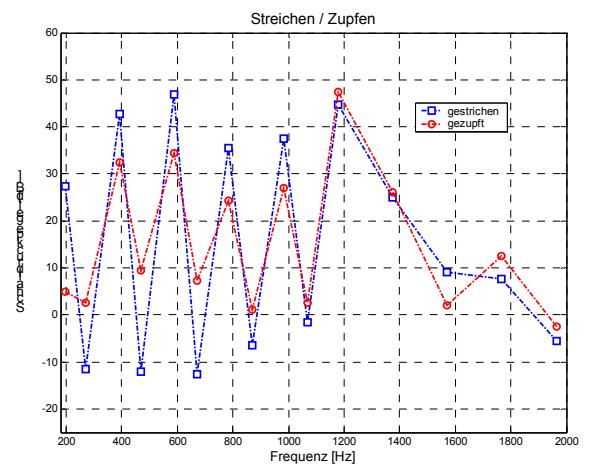


Abbildung 8: Simulationsergebnis des Schalldrucks an Mic_1 bei realer Zupf- / Streichanregung

Bei dem zweiten Modell wurde die gemessene Kraft auf einen Punkt genau zwischen Stimmstock und Bassbalken

Zusammenfassung

Ziel der Untersuchungen ist es, ein validiertes numerisches Modell zu erarbeiten, mit dem zukünftig die Einflüsse z.B. der verwendeten Materialien, der Vorspannungskräfte oder der Wanddicken effizient untersucht werden können. Die Übertragungseigenschaften wurden an einer Mustergeige sowohl gemessen als auch numerisch simuliert. Im vorangegangenen Abschnitt wurden beide Ergebnisse verglichen und es konnte gezeigt werden, dass eine gekoppelte FEM / BEM Berechnung für die Violine eine geeignete Analysemethode ist. Es wurde deutlich, dass der Steg eine wichtige Rolle auch in der Simulation trägt und in einem numerischen Modell der Geige unbedingt mit aufgenommen werden sollte. Die numerische Analyse kann das Know-How und die Tradition der Geigenbauer nicht ersetzen. Denn beim Bau eines solchen „Klangkunstwerks“, das den subjektiven Klangempfindungen von Musikern und Publikum entsprechen soll, ist viel Fingerspitzengefühl nötig. Aber die numerische Simulation ist eine gute Ergänzung zur messtechnischen Untersuchung und der traditionellen Herangehensweise der Geigenbauer. Nähere Untersuchungen der Materialparameter des Holzes und eine weitere Anpassung des Modellstegs (Position, Wanddicke, Material) an die Mustergeige führen zu einem genaueren Strukturmodell und an diesem können dann grundsätzliche Parameteränderungen simuliert werden.

Ein Ausblick für zukünftige numerische Untersuchungen ist vor allem die Verbesserung des Strukturmodells, daneben eine Aufstellung von Parameterstudien, z. B. der Dämpfungseigenschaften. Da die Entwicklung der Rechnerkapazitäten ständig fortschreitet, können auch größere numerische Modelle, wie die Violine, zukünftig schneller bearbeitet werden und eine Rechnung unter Berücksichtigung von mehr Frequenzpunkten ist dann in akzeptabler Zeit möglich.

Literatur

- [1] Hutchins, C. M.: „Violinen“; erschienen in „Die Physik der Musikinstrumente 2. Auflage, Beiträge aus Spektrum der Wissenschaft“, S.64-77, Berlin: Spektrum, Akad. Verl., 1998
- [2] Hutchins, C. M.: „Klang und Akustik der Geige“; erschienen in „Die Physik der Musikinstrumente 2. Auflage“, Beiträge aus Spektrum der Wissenschaft“, S.88-98, Berlin: Spektrum, Akad. Verl., 1998
- [3] Cremer, L.: „Physik der Geige“; S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1981
- [4] Güth, W.: „Einführung in die Akustik der Streichinstrumente“; S. Hirzel Verlag, Stuttgart / Leipzig 1995
- [5] Hoge, K.: „Messtechnische und numerische Analyse einer Geige im Vergleich“; Diplomarbeit, TU Dresden, Institut für Akustik und Sprachkommunikation, Dresden, 2007
- [6] Numerical Integration Technologies N.V.: „Sysnoise Rev 5.0, Theoretical Manual“; Numerical Integration Technologies N.V., Leuven, Belgien, 1993

Thermische Modifikation von Holz im Musikinstrumentenbau

H. Schiema

Institut für Musikinstrumentenbau a. d. TU Dresden, Zwota

Einleitung

Holz stellt einen wichtigen Werkstoff in vielen Bereichen des Musikinstrumentenbaus (Streich-, Zupf-, Schlag- und Holzblasinstrumente) dar. Dabei werden sehr hochwertige Hölzer (Klangholz) verwendet. Die richtige Auswahl der Holzart stellt eine Grundlage für gute Gebrauchseigenschaften wie die akustischen Eigenschaften sowie die spieltechnischen Eigenschaften dar. Durch eine stetig wachsende Nachfrage an Musikinstrumenten ist in den nächsten 5 bis 10 Jahren mit einer Verknappung des Angebotes bestimmter hochwertiger Klanghölzer zu rechnen. Aus diesem Grund erscheint es nun wichtig, Alternativhölzer für die Verwendung im Musikinstrumentenbau zu finden. Es wird davon ausgegangen, dass die Technologie der thermischen Holzmodifikation das richtige Werkzeug darstellt, die Problematik der angespannten Materialsituation positiv im Sinne des Musikinstrumentenbaus zu beeinflussen.

Begriffsbestimmung: „Thermische Modifikation von Holz“

Grundsätzlich versteht man unter thermischer Modifikation von Holz:

- die Behandlung von Holz bei ca. 100 bis 300°C in einer geschlossenen Anlage unter Gasatmosphäre (wie z.B. Luft, Wasserdampf bzw. Inertgas)
- Einbringung von Wachsen und Ölen ins Holz unter Druck und erhöhter Temperatur

Bei beiden Verfahren wird der gesamte Querschnitt des Holzes erhitzt. Die Verfahren unterscheiden sich im Wärme übertragenden Medium sowie dem Druck und der Temperatur. Das Ziel des Verfahrens ist die Stabilisierung des Holzes gegenüber Feuchte, die Veränderung der physikalischen und mechanischen Eigenschaften sowie die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegen Schädlinge und Mikroorganismen.

Eigenschaftsänderungen durch thermische Modifikation

Durch den Einsatz des Verfahrens der thermischen Modifikation können folgende Eigenschaften gezielt verändert werden:

- Optisches Erscheinungsbild (dunklerer Farbton)
- Steigerung der Oberflächenhärte
- Verbesserung der Wetterbeständigkeit
- Verbesserung der Fäulnisbeständigkeit sowie der Resistenz gegen Mikroorganismenbefall
- Geringere Feuchtigkeitsaufnahme
- Geringere Formänderung bei Feuchte (30 bis 90% besser als unbehandelt)
- Verringerung der Ausgleichsfeuchte (10 bis 60%)
- Veränderung der Biegefestigkeit

Historische Entwicklung

Die ersten Versuche der gezielten Modifikation von Holz durch Hitze reichen bis in die 20er Jahre des letzten Jahrhunderts zurück. Der Beginn der technischen Umsetzung der thermischen Vergütung ist durch *Stamm* und *Hansen* in den 30er und 40er Jahren des letzten Jahrhunderts zu verzeichnen. Hieraus entstand später das Patent: „Staybwood“, bei welchem Holz durch flüssiges Metall oder Salzschmelze bei 260 bis 315°C hindurchgeführt wird. Es folgte ein belgisches Patent der „Künstlichen Überalterung von Holz“ bei ca. 170°C. Im Jahre 1950 sind zwei Patente, ein deutsches und ein französisches Patent, der „Verfahren zur Behandlung von Holz unter Einwirkung von Wasserdampf, Druck und Temperatur“ zu nennen.

1973 wurde das „Feuchte-Wärme-Druck-Verfahren“ von *Burmester* entwickelt [1]. Hier wurde das Holz im Atoklaven bei 140 bis 180°C erwärmt, welches dann später durch *Giebel* unter Inertgas-Atmosphäre und einer Temperatur von 160 bis 240°C weiterentwickelt wurde [2].

In den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts ist ein weiteres wichtiges Patent zu nennen, das Plato Verfahren. Hierbei handelt es sich um einen dreistufigen Prozess, bei welchem 1. die Behandlung mit Nassdampf bei 170 bis 190°C und einem Druck von 8 bis 10 bar, 2. eine Trocknung auf 10% Restfeuchte und 3. ein „Backprozess“ bei 160 bis 200°C erfolgt.



Abbildung 1: Moderne Modifikationsanlage (Fa. Thermoholz Austria)

Derzeitige Modifikationsverfahren

Derzeitige Modifikationsverfahren sind grundsätzlich in 5 Gruppen zu unterteilen (Tabelle 1)

Verfahren	Wärmeübertrager	Temperaturbereich	Druck
Wasserdampf	Wasserdampf	150-250°C	Luftdruck
Inertgas	Inertgas/Wasserdampf	150-260°C	3-15 bar
Plato	Wasserdampf/Wasser	160-200°C	8-10 bar
Öl-Hitze	Pflanzenöl	180-220°C	Luftdruck
Wachstränkung	(PE-)Wachse	um 200°C	Luftdruck

Tabelle 1: Derzeitige Modifikationsverfahren

Eigenschaftsprüfung von Thermoholz für den Einsatz im Musikinstrumentenbau

Im Rahmen eines Forschungsprojektes mit dem Thema: „Einsatz von durch thermische und thermomechanische Verfahren verbesserten Hölzer im Musikinstrumentenbau“ [3], wurden folgende Eigenschaften im Vergleich zu unbehandelten Holzproben mit folgendem Ergebnis untersucht.

Tabelle 2: Eigenschaftsprüfung Thermoholz

Bewertungsgruppe	Eigenschaft	Bewertung
Akustisch relevante Werkstoffeigenschaften	Dichte	unbedenklich
	Dynamischer E-Modul	
	Lucchi-E-Modul	
	Schallausbreitung	günstig
	Dämpfung	
Technologische Eigenschaften	Härte	unbedenklich
	Schlagzähigkeit	mindernd
	Klebfestigkeit	unbedenklich
	Lackierbarkeit	
	Spanbarkeit	
	Schweißbeständigkeit	unbedenklich
Fertiginstrument	Aussehen	unbedenklich, günstig
	Subjektiver Spieltest	unbedenklich
	Objektiver Spieltest	unbedenklich, günstig

Die Tabelle beinhaltet die Bewertungen der modifizierten Hölzer der Firmen: „Thermoholz Austria“ und „Theodor Nagel Hamburg“.

Diese Firmen konnten genügend Zwillingsproben zur Verfügung stellen, mit deren Hilfe eine vergleichenden Bewertung eindeutige Aussagen lieferte.

Die Hölzer beider Modifizierungsverfahren (Thermoholz und FWD-Verfahren) sind für den Einsatz im Musikinstrumentenbau geeignet.

Von beiden Verfahren ist insbesondere das mildbehandelte (piano) Holz vorzuziehen. Mittel bis stark modifiziertes Holz weist eine erhöhte Sprödigkeit auf, welche für Musikinstrumente eher ungeeignet ist.

Hölzer welche mit dem Verfahren der Wachsträngung behandelt wurden sind derzeit nicht zu empfehlen, da der angestrebte positive Effekt des Verfahrens nicht nachgewiesen werden konnte [4].

Zusammenfassung

Durch eine gezielte thermische Behandlung lassen sich physikalisch-technische Eigenschaften von Holz so verändern, dass sie den Erfordernissen des Musikinstrumentenbaus besser entsprechen, als die unmodifizierter Hölzer. In erster Linie sind das Eigenschaften, wie reduzierte Wassersorption, besseres Stehvermögen und Dimensionsstabilität, sowie akustische Eigenschaften, die mit einer künstlichen Alterung verglichen werden können. Aufgrund der erzielten Eigenschaftsänderungen ergeben sich 3 spezielle Einsatzgebiete:

- Musikinstrumente, welche eine hohe Dimensionsstabilität und geringe Feuchtesorption verlangen (z.B. Blasinstrumente)
- Musikinstrumente bei denen lang gelagertes Holz zum Einsatz kommt (Verringerung der Lagerzeiten und –kosten)
- Verwendung für Restaurationen und Reparatur alter Musikinstrumente (Erscheinungsbild wie gealtertes Holz)

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass Thermoholz für diese Anwendungsbereiche eine mögliche Alternative darstellt, bisher verwendetes Klangholz jedoch nicht vollständig ersetzt. Durch Thermoholz wird das Holzsortiment erweitert und es ergeben sich neue Produkte. Thermisch modifizierte Hölzer bedürfen keiner jahrelangen Lagerung. Thermisch modifizierte Hölzer tragen durch Verminderung der Lagerkosten zur Verbesserung der Kostenstruktur bei.



Abbildung 2: Vergleich Gitarre unbehandelt (links), mit Thermoholzdecke (rechts)

Literatur

[1] Burmester, A. 1974: Einfluss einer Wärme-Druck-Behandlung halbtrockenen Holzes auf seine Formbeständigkeit. Holz als Roh- und Werkstoff 31 (6), S.237-243
 [2] Giebeler, E. 1983: Dimensionsstabilisierung von Holz durch die FWD-Behandlung. Holz als Roh und Werkstoff 41 (3), S.87-94
 [3] Eichelberger, K. 2005: Einsatz von durch thermische und thermomechanische Verfahren verbesserten Hölzern im Musikinstrumentenbau Forschungsbericht IfM 2005
 [4] Pfriem, A. 2004 REM Untersuchung an Waxwood Forschungsbericht TUD 2004

Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Forschungsprojekt wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. gefördert.

ISBN 978-3-00-024273-1

Versand als Druckkopie oder pdf-Datei über

Institut für Musikinstrumentenbau
Klingenthaler Straße 42
08267 Zwota
post@ifm-zwota.de