



Fachausschuss Musikalische Akustik in der DEGA

**(Musikalische) Akustik im Dienste des
Musikinstrumentenbaus**

September 2001



Tagungsband zum Seminar des FAMA in der DEGA

Zwota, 28. - 29.9.2001

Seminar des Fachausschusses Musikalische Akustik in der DEGA

Tagungsleitung:

Dr.-Ing. Klaus Wogram
Dipl.-Phys. Gunter Ziegenhals

Herausgeber:

Gunter Ziegenhals

Tagungsort:

Institut für Musikinstrumentenbau Zwota
Klingenthaler Straße 42, 08267 Zwota

Verlag und Bezug:

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

Zitierhinweis:

Seminar des FAMA in der DEGA 2001

ISBN 3-00-009226-9

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. Zu diesen Aufgaben gehören z.B.

- Die Akustik der Musikinstrumente
- Die Raumakustik musikalischer Aufführungsstätten
- Musikalische Aspekte der Psychoakustik
- Musikalische Aspekte der Tonstudioteknik
- Akustische Fragen der Spieltechnik und der musikalischen Ästhetik

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.

Der Fachausschuss führt regelmäßig Fachveranstaltungen und Seminare durch. Bisher wurde bewusst auf Tagungsunterlagen verzichtet, um den Aufwand für alle Beteiligten nicht zuletzt in finanzieller Hinsicht gering zu halten. Mit der Einladung des Instituts für Musikinstrumentenbau (IfM), das Seminar im Jahr 2001 aus Anlass der Institutsgründung vor 50 Jahren in Zwota durchzuführen, bot sich nun eine Gelegenheit, die Tagung entsprechend zu dokumentieren und die Inhalte allen Interessenten zugänglich zu machen. Neben den Tagungsvorträgen finden Sie in diesem Band auch die Festrede von H. Fleischer anlässlich der Festveranstaltung zum 50. Geburtstag des IfM sowie einen Rückblick des Geschäftsführers G. Ziegenhals auf die Geschichte des Instituts.

Im Rahmenprogramm besichtigten die Tagungsteilnehmer die Vogtländische Musikinstrumentenfabrik GmbH in Markneukirchen (Metallblasinstrumente und Saxophone) und erhielten dabei eine außerordentlich sachkundige Führung durch Herrn Dipl.-Ing. R. Eltz. Hierfür unseren Dank! Der Dank der Veranstalter gilt auch der Sparkasse Vogtland, die in der Zweigstelle Klingenthal entsprechende Tagungsräume zur Verfügung stellte, allen Vortragenden, die ein Seminar erst mit Leben erfüllen sowie dem Team des IfM für die vorzügliche Organisation und den reibungslosen Ablauf!

Kontakte:

Dr.-Ing. Klaus Wogram
c/o PTB 1.401
Bundesallee 100
D-38116 Braunschweig
Klaus.Wogram@ptb.de

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

Braunschweig und Zwota im Januar 2002

Klaus Wogram, Gunter Ziegenhals

Inhaltsverzeichnis

Vortrag	Seite
Musikalische Akustik und Musikinstrumentenbau <i>H. Fleischer</i>	5
Untersuchung der Ursachen von instabilen Pfeifentönen bei Orgeln <i>J. Angster; S. Pitsch; A. Miklós</i>	9
Wandgeometrie und Klang von Prinzipalpfeifen (Teil 1) <i>D. Zscherpel; Th. Görne; St. Bergweiler</i>	11
Hörversuch zu Wandgeometrie und Klang von Prinzipalpfeifen (Teil 2) <i>Th. Görne; D. Zscherpel; M. Zierenberg; St. Bergweiler</i>	13
Tonhöhenfeinabstimmung und Gehörtraining <i>D. Geller</i>	16
Zur Qualität musikalischer Schallereignisse <i>Th. Hempel</i>	18
Resonanzholzmerkmale von Gitarrendecken <i>G. Ziegenhals</i>	20
Betriebsschwingungsformen und Admittanzen von Gitarren <i>H. Fleischer</i>	24
Magnetische Tonabnehmer für Elektrogitarren <i>H.E.W. Lemme</i>	29
Magnetische Gitarrentonabnehmer <i>M. Zollner</i>	32
Ein Beitrag zur Analyse der Klangformung im Anfangszustand von gezupften Klängen, dargestellt an Hand von Gitarrenklängen damit zusammenhängende instrumentenbauliche Probleme <i>E. Lieber</i>	39
Erfahrungen bei der Zusammenarbeit mit Instrumentenmachern <i>W. Krüger</i>	42
Zur Impulsantwort bei Blechblasinstrumenten <i>K. Wogram</i>	46
Nachbarschaftsbelästigung durch Klavierspiel auf Flügeln und geeignete Gegenmaßnahmen <i>H. Bückler</i>	51
Schwingungsformen einer Stimmgabel <i>I. Bork</i>	53
50 Jahre Institut für Musikinstrumentenbau <i>G. Ziegenhals</i>	57
Teilnehmerverzeichnis	60

Musikalische Akustik und Musikinstrumentenbau

Helmut Fleischer, Neubiberg bei München

Festvortrag, gehalten anlässlich des 50jährigen Bestehens des Instituts für Musikinstrumentenbaus in Zwota

Meine sehr geehrten Damen und Herren,

der Organisator der heutigen Festveranstaltung, mein hochgeschätzter Kollege Gunter Ziegenhals, hat mich gefragt, ob ich nicht ein paar Sätze zum Thema "Musikalische Akustik und Musikinstrumentenbau" sagen könnte. Dieser Bitte komme ich gerne nach, zumal da er mir freie Hand gelassen hat, dies von einer ganz persönlichen Warte aus zu tun. Das werde ich jetzt versuchen, auf die Gefahr hin, möglicherweise das eine oder andere, oder - schlimmer noch - den einen oder anderen nicht zu erwähnen. Räumlich gesehen werde ich mich dabei auf Deutschland und zeitlich auf die Gegenwart beschränken. Also: Die folgenden Ausführungen erheben keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit, sondern geben meine subjektive, momentane Sicht der Dinge wieder.

Vier Themenkreise will ich ansprechen:

1. Was ist "Musikalische Akustik"?
2. Wer betreibt "Musikalische Akustik"?
3. Was leistet "Musikalische Akustik"?
4. Wie kann der Musikinstrumentenbau von der "Musikalischen Akustik" profitieren?

Sie sehen, in dieser Aufzählung kommt "Musikalische Akustik" viermal vor, "Musikinstrumentenbau" nur einmal. Das liegt daran, dass ich von Letzterem leider nicht sehr viel verstehe, und unter seriösen Wissenschaftlern ist es nun einmal guter Brauch, nicht über Dinge zu reden, von denen man keine Ahnung hat - zumindest nicht vor Publikum. Mehr Erfahrung mit Musikinstrumentenbauern hat beispielsweise Walter Krüger, soviel, dass er für übermorgen einen entsprechenden Fachvortrag angekündigt hat. Warum ich trotzdem referieren darf, liegt wohl daran, dass ich aus München komme. Gunter Ziegenhals hat in einem Nebensatz fallen lassen, dass bayerischer Dialekt immer gut ankäme. Ich werde ihn in dieser Hinsicht enttäuschen und mich - soweit es mir möglich ist - bei meinem Vortrag des Hochdeutschen bedienen.

1. Was ist Musikalische Akustik?

Einem Sprachpuristen dürfte dieser Begriff sicher nicht ganz glücklich gewählt erscheinen. Korrekter wäre vielleicht "Akustik unter besonderer Berücksichtigung der Erzeugung und Wahrnehmung musikalisch genutzter Schalle"; ist aber nicht gerade elegant. Also, belassen wir es beim ursprünglichen Begriff.

Musikalische Akustik umfasst aus meiner Sicht zunächst einmal die wissenschaftlichen Grundlagen dafür, wie ein Musikinstrument - und hier schließe ich die menschliche Stimme ein - funktioniert. Dies beinhaltet,

- wie das Instrument das musikalische Signal erzeugt, und

- wie dieses Signal in Schall umgesetzt und abgestrahlt wird. Da die Abstrahlung meist in einem geschlossenen Raum erfolgt, gibt es an dieser Stelle zahlreiche Berührungspunkte zur Raumakustik. So gesehen kommt es nicht von ungefähr, dass an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt dieselben Wissenschaftler Musikalische Akustik und Raumakustik betreiben.

Bis hierhin ist alles noch Physik, und so heißt das einschlägige Standardwerk von Fletcher und Rossing auch "The physics of musical instruments". Schwingungslehre und Schallfeldakustik sind aber nur ein Teil der Wahrheit. Ganz wesentlich ist, was geschieht, sobald das Schallsignal am Ohr eingetroffen ist und der Mensch mit seinem Gehör ins Spiel kommt. Hier setzt die Psychologische Akustik auf zweierlei Arten an:

- Zum einen eher ganzheitlich durch Hörexperimente mit Versuchspersonen, die den "Sound" von Instrumenten beurteilen. Deren Aussagen behandelt man anschließend mit Methoden der Statistik. Auf diesem Wege versucht man, Zusammenhänge zwischen Urteilsmerkmalen und physikalisch messbaren Eigenschaften der Instrumente oder ihrer Schallsignale aufzuspüren.
- Ein anderer Ansatz der Psychoakustik ist eher analytisch. Die Wahrnehmung von Instrumentenklängen wird durch Begriffe wie "Tonhöhe", "Schärfe", "Lautstärke" beschrieben, die so genannten Empfindungsgrößen. Man strebt an, diese subjektiven Merkmale zu objektivieren. Im Prinzip braucht man auch hierzu Versuchspersonen. Es gibt aber bereits Messgeräte, die dies können, und zwar dadurch, dass sie nachempfinden, was Personen urteilen würden.

Mit oder ohne Einbeziehung des Menschen, der Musikalischen Akustik geht es um harte Fakten, die belegbar und nachprüfbar sein müssen. Sie gehört zu den exakten Wissenschaften. Damit dürfte die Abgrenzung gegenüber manchen Ausprägungen der Musikwissenschaft klar sein.

2. Wer betreibt Musikalische Akustik?

Vorweg: Ein Bundesamt für Musikalische Akustik gibt es nicht, und es gibt auch kein Universitätsinstitut, das so heißt. Wirklich hauptberuflich befassen sich derzeit nur wenige, in Deutschland höchstens ein Dutzend Personen, mit dieser Thematik. Einige Beispiele:

- Das tut Eberhard Meinel an der Hochschule Zwickau/Markneukirchen.
- Beim Fraunhofer-Institut in Stuttgart ist Judit Angster dabei, den Geheimnissen der Orgel auf die Spur zu kommen.
- Sodosagen die Gründungsväter der Musikalischen Akustik in Deutschland sind Wissenschaftler von der

PTB in Braunschweig mit dem Spiritus Rector Jürgen Meyer, der bereits in Pension gegangen ist.

- In München betreibt "Musikalische Psychoakustik" beispielsweise Ernst Terhardt, inzwischen emeritiert, mit seinen Leuten.
- Als ganze Gruppe von echten Hauptberuflern - und damit ziemlich allein auf weiter Flur - müssen natürlich die Lokalmatadore genannt werden, die Mannschaft des Instituts für Musikinstrumentenbau in Zwota mit dem Geschäftsführer Gunter Ziegenhals an der Spitze. Davon wird am heutigen Abend noch ausführlich die Rede sein.

Die vorher erwähnte PTB liefert das Stichwort für ein wichtiges Sammelbecken auch für Wissenschaftler, die Musikalische Akustik in der Diaspora betreiben, den Fachausschuss Musikalische Akustik (kurz: FAMA) in der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA). Dessen Vorsitzender war Jürgen Meyer und ist Klaus Wogram, beide von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Noch soll es Wissenschaftler geben, die sich bisher nicht haben einfangen lassen. Die beginnen aber vielleicht dann zu strömen, wenn ich jetzt einfach einmal behaupte: Die Mitgliederliste dieses Fachausschusses ist auf bestem Wege, das "Who is Who" der deutschen Musikalischen Akustik zu werden.

Davon können Sie sich an Ort und Stelle selbst überzeugen. Morgen und übermorgen hält der FAMA hier ein Seminar ab mit weitgespannten Themen und namhaften Vortragenden von A (Judit Angster), die ein ganzes Bündel von Vorträgen über die Orgel einleitet, bis B (Ingolf Bork) aus Braunschweig, der uns zum Abschluss sagen wird, wie die Stimmgabel schwingt. Damit ist das Alphabet der Musikalischen Akustik aber keineswegs abgehakt. Es geht tatsächlich bis zum Z wie Gunter Ziegenhals und Manfred Zollner. Mein Rat ist, gehen Sie hin, hören Sie zu und machen Sie sich selbst ein Bild.

Auffallen werden Ihnen die zahlreichen Überschneidungen mit angrenzenden Wissensgebieten. Mit anderen Worten: Die Musikalische Akustik ist interdisziplinär. Sie können sich dann auch einen Begriff davon verschaffen, aus welcher vielfältigen Tätigkeiten die Personen kommen, die sich damit befassen. Musikwissenschaftler, wie man zunächst vermuten könnte, sind das nur in seltenen Fällen, häufiger Naturwissenschaftler, Physiker, Ingenieure, sehr häufig Elektroingenieure.

Obwohl auf ganz unterschiedlichen Gebieten der Technik tätig, haben sie doch eines gemeinsam: Eine innige Beziehung zum Instrument und zur Musik, sei es von der familiären Prägung her, sei es aus eigener Neigung. Oder anders ausgedrückt: Sie betreiben Musikalische Akustik nur in wenigen Fällen als Profession, aber immer als Passion. Sie sind nicht nur mit dem Verstand, sondern auch mit dem Herzen dabei, also "Amateure" im besten Sinne von "Liebhabern". Und das gilt in vielen Fällen auch für Pensionisten und Emeritierte, die frei von der Bürde eines Amtes nun endlich das betreiben können, was sie schon ein Leben lang interessiert hat: nämlich Musikalische Akustik.

3. Was leistet Musikalische Akustik?

Was gemacht wird, ist allerdings keineswegs amateurhaft, sondern sehr professionell. Ich will versuchen, grob zu katalogisieren, welche Themenkreise sie hauptsächlich behandeln:

Im Vordergrund steht immer die Frage: "Wie funktioniert das Musikinstrument?". Darauf baut auf: "Welcher messbare Kennwert des Instruments beeinflusst wie das Schallsignal?". Dagegen könnten Sie - wie übrigens auch mancher Musikwissenschaftler und Musikinstrumentenmacher - einwenden: Das haben ja wohl bereits vor Jahrhunderten Größen wie Euler, Chladni oder Helmholtz herausbekommen. Im Prinzip ja, im Detail nein. Die Theorie der Wirkungsmechanismen ist im Groben bekannt, nicht jedoch im Feinen ausgearbeitet. Und auf die Feinheiten kommt es beim Musikinstrument bekanntlich an. Das technische Instrumentarium, mit dem man diesen Feinheiten nachzuspüren kann, wird immer umfangreicher. Dies sind u.a.

- elektronische Messgeräte,
- moderne Messverfahren, z. B. mit Laser, und
- in jüngerer Zeit zunehmend auch: Computer-Berechnungsverfahren.

Zur Illustration möchte ich ein Beispiel nennen, das mir sehr am Herzen liegt, auch wenn es keinen direkten Bezug zum hiesigen Musikinstrumentenwinkel hat: Glocken. Es ist heute möglich, die Teiltöne einer Glocke auf dem Computer mit der Methode der Finiten Elemente sehr genau zu berechnen. Einschränkend muss ich sagen: Die Glocke ist aber auch schon eines der wenigen Beispiele, bei dem dies einigermaßen gut funktioniert. Warum ist das so?

- Die Randbedingungen sind einfach (die Glocke ist an einem Punkt befestigt und wird nicht am Körper gehalten),
- das Material ist hier weitgehend gleichmäßig (eben Bronze und kein gewachsenes Holz),
- das Instrument ist buchstäblich aus einem Guss (ohne Fügstellen oder Leimverbindungen),
- von relativ einfacher Form (ohne Rippen, drehsymmetrisch) und
- schwer im Vergleich zur Luft (nicht leicht wie etwa ein Paukenfell).

In allen Fällen, in denen dies nicht zutrifft, simuliert das Computermodell die Realität bisher nur unzureichend oder mit riesigem Aufwand. Deshalb hat für Abschätzungen die einfache Theorie durchaus ihre Daseinsberechtigung, und darüber hinaus vor allem das Experiment. Versuche spielen in der Musikalischen Akustik, ungeachtet aller Computerisierung, eine ganz wesentliche Rolle.

Wie bereits erwähnt: Physik in Theorie, Computermodell und Experiment ist nicht alles, zumindest bei einem Musikinstrument. Es ist kein Problem, 1000 Schwingungsformen einer Glocke zu berechnen. Gemessen haben englische Kollegen einer Veröffentlichung zufolge 134 solcher

Formen. Zum Prinzipalbereich zählen die Campanologen üblicherweise fünf Teilschwingungen. Wird die Glocke angeschlagen, hört man letztlich eine Tonhöhe, den so genannten Schlagton, der - nebenbei bemerkt - weder dem tiefsten, noch dem stärksten Teilton entspricht, sondern erst beim Hören entsteht. Dieses Beispiel soll verdeutlichen:

- Eine Informationsreduktion findet bereits bei der Umsetzung von Schwingung in Schall statt. Nicht alles, was schwingen kann, ruft auch Schall hervor.
- Eine Umformung und noch viel drastischere Reduktion geschieht im Gehör. Vor allem der Effekt der Verdeckung bewirkt, dass nicht alles, was als Schall messbar ist, auch wahrgenommen wird und zum Hörereindruck beiträgt. Aus dieser Erkenntnis ziehen z. B. die modernen Musikformate, wie MiniDisc oder MP3, gewaltigen Nutzen.

Worauf ich hinaus will, ist die fundamentale wichtige Rolle des Hörens, die natürlich dem Musiker mit den "goldenen Ohren" und dem Instrumentenbauer sehr wohl bekannt ist.

Hier muss man durchaus nicht die Hände in den Schoß legen und resigniert feststellen, dies entziehe sich nun endgültig dem Zugriff der Wissenschaft. Im Gegenteil, das Wissensgebiet der Psychologischen Akustik bzw. Psychoakustik (ich erwähne als einen ihrer Väter meinen akademischen Lehrer Eberhard Zwicker aus München) hat in jüngerer Zeit enorme Fortschritte gemacht. Sie stellt Methoden bereit, die Hörempfindung mit Experimenten zu erforschen und mit den neuen gehörbezogenen Messverfahren nachzubilden.

Ihr großes Verdienst im vorliegenden Zusammenhang ist, dass sie es ermöglicht, diese Informationsreduktion nachzuvollziehen. Sie sagt uns, welche von den vielen Teiltönen, die wir berechnen oder messen können, für das Hören überhaupt von Bedeutung sind. Dadurch weist sie den physikalischen Parametern denjenigen Stellenwert zu, der ihnen für die Funktion des Instruments tatsächlich auch zukommt. Die Psychoakustik ist die notwendige Ergänzung der Physik und relativiert dadurch, dass sie den Blick auf das Wesentliche fokussiert.

4. Wie kann der Musikinstrumentenbau von der Musikalischen Akustik profitieren?

Zunächst einmal dadurch, dass der Instrumentenmacher nicht etwa der Befürchtung anheim fällt, der Akustiker möchte dem Meister mit den "goldenen Händen" ins Handwerk pfuschen. Mit solchen Vorbehalten würde er möglicherweise nicht einmal allein dastehen. Sie werden auch von manchem Geisteswissenschaftler gepflegt, der sich mit Musik beschäftigt.

Zur Begründung dieser Abwehrhaltung wird ein Gegensatz konstruiert zwischen Technik auf der einen Seite und Musizier- und Handwerkskunst auf der anderen Seite. Hier frage ich Sie: Was anderes als ausgeklügelte Technik

steckt denn in einer Orgel, der Königin aller Musikinstrumente? Meine Damen und Herren, draußen auf dem Parkplatz stehen lauter Autos, aber keine einzige Postkutsche. Warum, bitte, sollte dann die Stimmgabel das modernste Messinstrument sein, das man bei der Glockenprüfung akzeptiert? Technische Hilfsmittel sind kein Teufelszeug. Richtig und sinnvoll eingesetzt, bringen sie Segen. Wer einen Gegensatz Technik versus Kunst beschwören will, verspielt schlicht jede Chance auf Weiterentwicklung.

Um noch einmal das Beispiel der Glocke zu bemühen: Wenn der Glockengießer nichts weiter will, als immer wieder die Glocken kopieren, die schon sein Vater und Großvater gegossen haben, dann allerdings kann man den Dialog an dieser Stelle beenden. Etwas übertreibend könnte man sagen: Dieses Handwerkswissen liegt seit dem Guss der Erfurter Gloriosa, also seit 500 Jahren vor, und seitdem liefert es auch wirklich gute Ergebnisse. Es gibt aber auch den einen oder anderen Glockenmacher, der ganz genau wissen will, was abläuft, wenn eine Glocke angeschlagen wird. Vielleicht strebt er sogar nach Höherem und will neue Klänge erzeugen, womöglich etwas noch nie da Gewesenes schaffen, seine Handwerkskunst nicht nur auf tradierte Weise ausüben, sondern sie mit seinem Verstand durchdringen und zu ihrer Fortentwicklung beitragen.

Wie könnte er das bewerkstelligen? Er kann entweder ständig neue Rippen ersinnen, die Form herstellen, die Glocke gießen, den Klang durch einen Glockensachverständigen beurteilen lassen und sie wieder einschmelzen, wenn das Ergebnis nicht befriedigt. Dieses "Trial and Error" wäre möglich, aber viel zu langwierig und immens teuer. Es ist wesentlich zielführender, Variationen der Form und ihre Auswirkungen auf den Klang am Computer zu simulieren und erst dann mit den handwerklichen Form- und Gießerarbeiten zu beginnen, wenn man sich in der Nähe des Zieles weiß. Warum nicht eines der Optimierungsverfahren nutzen, wie man sie im Automobil- oder Flugzeugbau mit Erfolg verwendet? Die Glocke, deren Computermodell man kennt, dann zu vervollkommen sowie tatsächlich auch zu formen und zu gießen, ist noch schwierig genug und ein Stück Handwerkskunst, das nun, weiß Gott, kein Akustiker dem Gießer wegnehmen will, geschweige denn kann.

Kurzum: Dieses Beispiel zeigt, Methoden der Musikalischen Akustik können

- die Evolution abkürzen.

In anderen Ländern hat man überhaupt keine Hemmungen, traditionelle Handwerkskunst mit Computerverfahren auf das Vorteilhafteste zu kombinieren. Von Japan, das bekanntlich sehr technikgläubig ist, will ich gar nicht reden. Beispielsweise in den Niederlanden, wo Glockenspiele eine große Tradition haben, hat man mit viel Erfolg neuartige Carillons mit dem Computer gerechnet und traditionell gegossen, und die werden sogar akzeptiert. Was ich sage, bezieht sich nicht nur aufs Glockengießen, sondern auf jede Sparte des Musikinstrumentenbaus. Überall gibt es Möglichkeiten, wissenschaftliche Erkenntnisse mit Gewinn zu nutzen. Damit lassen sich

- letztlich Kosten senken (auch wenn zunächst einmal etwas investiert werden muss),
- Ressourcen schonen (denken Sie an Elfenbein oder nicht mehr erhältliche Tropenhölzer),
- die Qualität erhöhen,
- diese Qualität sichern (und dem Kunden mit einem Zertifikat belegen, wie dies erfreulicherweise in einigen Fällen schon getan wird) sowie
- das Instrument weiterentwickeln.

Auf den Konkurrenzdruck, der aus der Globalisierung und der EU-Erweiterung gerade an der Grenze zu Tschechien erwächst, will ich gar nicht erst eingehen. Dies brauche ich hier wohl auch nicht, weil ich den Musicon-Valley-Aktivitäten mit Freude entnehme, dass man dem Gebot der Stunde gefolgt und in der richtigen Richtung aktiv geworden ist. Also: Man sollte es nicht als Bruch der Handwerkshere sehen, neue naturwissenschaftliche Erkenntnisse und Methoden in die tägliche Arbeit einfließen zu lassen. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass man davon erst einmal Kenntnis bekommen muss.

Hier zeigt sich nun eine fundamentale Schwierigkeit: Oft ist einfach nicht bekannt, was alles schon gemacht worden ist. Diese Problematik hat der Fachausschuss sehr wohl erkannt. Aus diesem Problembewusstsein heraus plant es, eine umfassende Datenbank von Arbeiten zur Musikalischen Akustik zu erstellen und allen Interessierten, natürlich auch und vor allem den Musikinstrumentenbauern, frei zugänglich zu machen. Man kann sagen: FAMA - die tun was.

Woran man sich in diesem Zusammenhang gewöhnen muss, das ist, dass viele dieser Arbeiten keine Auftragsforschung mit praxisorientierter Aufgabenstellung sind. Vielmehr wählt häufig der Autor selbst ein Thema und bearbeitet es auf einem hohen Niveau wissenschaftlicher Abstraktion. Dies bedeutet, dass der Musikinstrumentenbauer nicht jede seiner Fragen direkt beantwortet finden wird. Es bedarf der Geduld, wenn die Erkenntnis in Bruchstücken vorliegt, die erst zusammengesetzt werden müssen. Dies wird nicht zuletzt dadurch erschwert, dass der Handwerker und der Wissenschaftler auch dann unterschiedliche Sprachen sprechen, wenn beide Deutsche sind.

Um so wichtiger wird die Rolle von sachkundigen und kompetenten Mittlern,

- die beide Sprachen sprechen,
- die den Überblick über die wissenschaftliche Literatur haben, und
- die das Puzzle der Beiträge zusammensetzen in der Lage sind.

Diese Mittler gibt es. Neben dem FAMA ist dies insbesondere und vor allem das hiesige Institut für Musikinstrumentenbau, eine einzigartige Einrichtung, gleichermaßen nahe der Wissenschaft und nahe am Instrumentenbau.

Und damit schließt sich der Kreis zum Anlass dieser Feierstunde. Nach allem, was ich

- über das hoch motivierte, aber etwas heterogene und versprengte Fähnlein der "Musikalischen Akustiker" und
- über Verständigungsschwierigkeiten zwischen Handwerk und Wissenschaft

ausgeführt habe, kommt dem Institut für Musikinstrumentenbau in Zwota, das es seit nunmehr 50 Jahren gibt, eine herausgehobene Rolle zu. Angesichts dessen, was sich in Hinsicht auf zentrale Stützpunkte der Musikalischen Akustik - beispielsweise in Braunschweig - abgespielt hat, kann ich meinem Empfinden zum Institut am besten mit den Worten aus der Fernsehwerbung Ausdruck verleihen:

Schön, dass es so etwas noch gibt!

Und ich hoffe sehr, dass es so etwas noch lange geben wird. "Das Institut" ist eine feste Größe im Musikwinkel. Wenn Gunter Ziegenhals abends Institutsgäste ausführt und das letzte Wernesgrüner getrunken ist, sagt er der Bedienung zum Abschluss einfach: "Geht aufs Institut". Die Bedienung nickt; es herrscht wortloses Einverständnis. Ich beneide ihn. Es hätte einen Schwall unangenehmer Fragen zur Folge, wenn ich das Gleiche in München versuchen würde.

Meine herzliche Gratulation "dem Institut" mit all seinen Mitarbeitern, Respekt für das, was in den vergangenen 50 Jahren geleistet worden ist und "ad multos annos". Wuchern Sie mit dem Pfund, dass Wissenschaft und Handwerkskunst hier im Vogtländischen Musikwinkel die besten Voraussetzungen vorfinden, eine fruchtbare Symbiose einzugehen und so die ganze Musicon Valley-Region zu prägen.

Ich freue mich, dass "das Institut" existiert und so gute Arbeit leistet. Meine Damen und Herren, freuen Sie sich mit mir!

Untersuchung der Ursachen von instabilen Pfeifentönen bei Orgeln

J. Angster, S. Pitsch, A. Miklós
Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart

Einleitung

Es kommt oft bei historischen oder auch bei neugebauten Orgeln vor, dass die Musik durch instabile Pfeifentöne gestört wird. Ein Beispiel einer solchen Störung aus der Sicht der Organisten ist: Ein oder mehrere Töne werden lange ausgehalten. Plötzlich kommen andere Stimmen einzeln oder in Akkorden dazu. Beim Einsetzen dieser Töne sinken die ausgehaltenen Töne in ihrer Tonhöhe vorübergehend oder dauerhaft ab [1]. Die Ursachen von solchen und ähnlichen Problemen wurden systematisch im Rahmen von einem durch die Europäische Kommission unterstützten Forschungsprojekt untersucht. Ziel des Projektes ist es unter anderem, ein Computerprogramm zu entwickeln, welches das Windsystem von Kirchenorgeln strömungstechnisch und akustisch günstig auslegen und dazu beitragen kann, in der Praxis häufig auftauchende Fehler zu vermeiden. Wichtige Messdaten für die Software-Entwicklung müssen durch Messungen im Labor oder vor Ort ermittelt werden.

In-situ Untersuchungen an Orgeln

Es wurden Messungen an 8 Orgeln unterschiedlicher Baustile aus fünf Ländern durchgeführt. Unter anderem wurden folgende Parameter untersucht: Maximaler Windverbrauch, Stabilität des Druckes im Reservoir, Druckschwankungen aufgrund tieffrequenter akustischer Resonanzen des Systems, Druckmodulationen, verursacht durch einen plötzlichen Druckabfall in den verschiedenen Bauteilen, d.h. Windkanäle und Kondukten, unterschiedlichen Kröpfen, Bohrungen, Ventilen, usw. Weiterhin wurden Messungen durchgeführt, um den Einfluss der Druckänderungen im Pfeifenfuß auf den Klang feststellen zu können.

Als Beispiel wird hier der Einfluss der Druckschwankungen aufgrund tieffrequenter akustischer Resonanzen des Kegelladen-Systems auf den Pfeifenklang vorgeführt. **Bild 1** zeigt die Skizze einer Registerkanzelle. Ist das Register einregistriert, steht die Registerkanzelle unter Druck. Mit der Taste kann das Kegelventil geöffnet werden. Ganz am Anfang des Pfeifenklanges war ein deutlicher „Zitterton“ zu hören, was sich sehr störend auf die Orgelmusik auswirkte. **Bild 2** zeigt, dass eine deutliche Druckmodulation mit rund 11 Hz sowohl in der Registerkanzelle als auch nach dem Kegelventil und im Pfeifenfuß auftrat. Die hochfrequente Komponente des Drucksignals entspricht der Druckschwingung, die durch den Klang verursacht wird. Um dieses Phänomen erklären zu können, wurde die der Pfeife zugeordnete Taste bei nicht eingeschaltetem Register

niedergedrückt. Die Druckschwingung von 11 Hz zeigte sich auch ohne Winddruck, d.h. sie wurde in der Registerkanzelle durch die plötzliche Öffnung des Kegelventils angeregt (**Bild 2**). Diese Untersuchungen zeigen, dass der „Zitterton-Effekt“ durch die akustische Resonanz der Registerkanzelle verursacht wird.

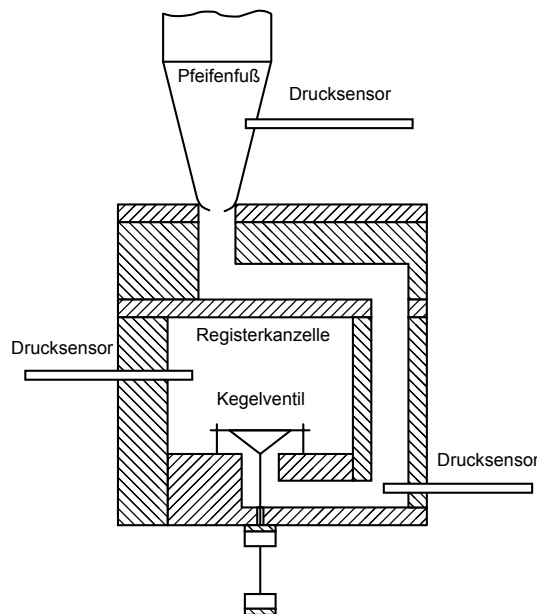


Bild 1
Skizze einer Registerkanzelle mit Kegelventil

Bei einer anderen Orgel wurde der modulierte Pfeifenklang analysiert, um zeigen zu können, ob die hörbare Tonhöhenmodulation durch eine reale Frequenzmodulation oder nur als ein subjektiver Effekt auftritt. **Bild 3** zeigt, dass auf die Druckschwingungen in der Registerkanzelle nach einer kleinen Zeitverschiebung das Schallsignal folgt. Die zeitliche Verzögerung kann damit erklärt werden, dass der Pfeifenresonator Zeit braucht, um die Amplitude zu ändern (je höher der Gütefaktor des Resonators, desto größer die Verzögerung). Im Pfeifenfuß wurde eine Druckmodulation von 10% mit einer Frequenz von rund 10 Hz gemessen. Um die Frequenzänderungen feststellen zu können, wurden an drei unterschiedlichen Stellen, die im **Bild 3** mit Pfeilen angezeigt wurden, 6 ms Zeitfenster aus dem Schallsignal ausgeschnitten. Eine Position war im stationären Teil, die zweite bei einer Minimums-Position und die dritte bei einer Maximums-Position in der zeitlichen Funktion des Klanges.

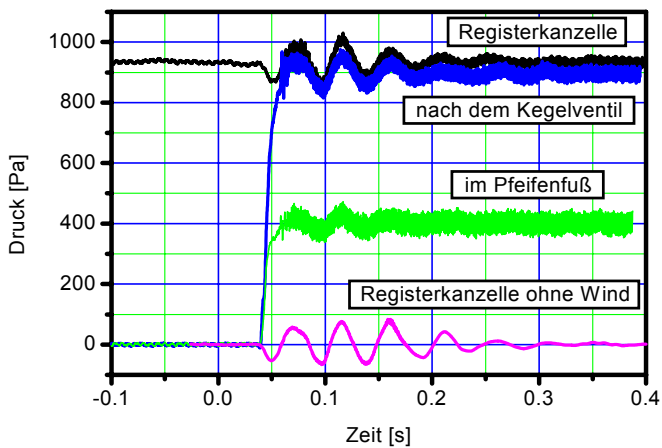


Bild 2
Druckverläufe an versch. Positionen

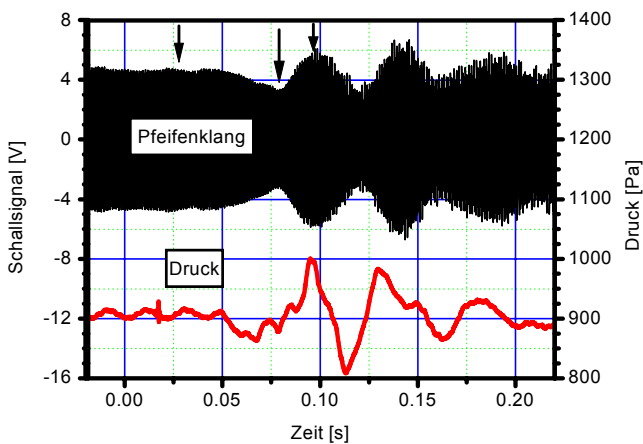


Bild3
Klang der Pfeife und Druck in der Reg.kanzelle

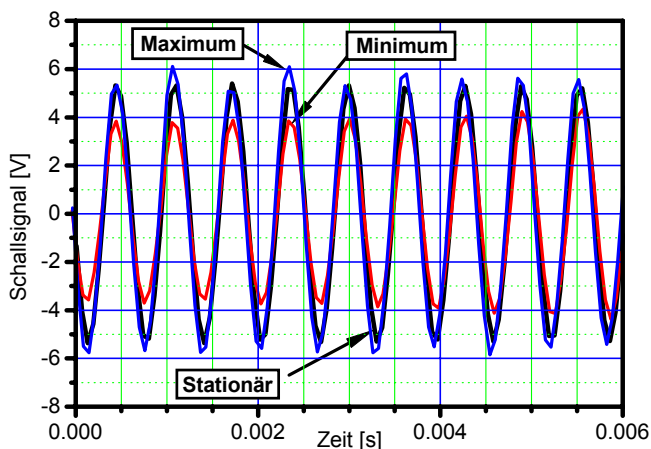


Bild4
Klanganalyse an verschiedenen Zeitpunkten

In Bild 4 wurden die Zeitfenster beim Zeitpunkt 0 zusammengesetzt. Es kann gut beobachtet werden, dass das Klangsignal an der Minimums-Position eine etwas längere Periode hat als das Signal an der stationären Position. Entsprechend ist die Periode des Signals an der Maximums-Position etwas kürzer. Die Differenzen in der Frequenz sind etwa $\pm 0,9\%$ bzw. ± 15 cent. Auf der anderen Seite beträgt die Amplitudenmodulation etwa 20%. Das bedeutet, dass die hörbare Tonhöhenänderung, obwohl eine direkte Frequenzmodulation festgestellt wurde, mehr durch eine Amplitudenänderung verursacht wird. Die Größe der Frequenzmodulation ist zu gering, um so große Tonhöhenunterschiede bewirken zu können.

Zusammenfassung

Mit in-situ Messungen wurden die dynamischen Druckprobleme unterschiedlicher Orgeln untersucht. An einem Beispiel wurde gezeigt, dass für den „Zitterton-Effekt“ die tieffrequente akustische Resonanz der Registerkanzelle verantwortlich ist. Am anderen Beispiel wurde untersucht, welchen Einfluss die im Windsystem auftretende Druckschwankung auf den Pfeifenklang hat. Mit ähnlichen Untersuchungen wurde gezeigt, dass Druckschwankungen in den Windkasten und Kanzellen äußerst störend sein können. Die Messergebnisse sollen bei der Entwicklung eines Computerprogramms helfen, das eine günstige Auslegung des Windsystems von Kirchenorgeln ermöglicht.

Literatur

[1] H.P. Mebold: Considerations about the organ wind supply, ISO Information, No. 30, 11-24 (November 1989)

Danksagung

Der Dank der Verfasser gilt den folgenden, im Projekt teilnehmenden Orgelbauunternehmen: Werkstätte für Orgelbau Mühleisen GmbH, Leonberg, Manufacture d'Orgues Mühleisen, Strasbourg, Frankreich, Orgelbau Wegscheider, Dresden, Christian Scheffler Orgelwerkstatt Sieversdorf (Frankfurt/Oder), Marcussen & Son, Orgelbyggeri A/S, Aabenraa, Dänemark, Orgelbau Schumacher, Baelen, Belgien, Pels-d'Hondt Orgelbouw BVBA, Herselt, Belgien, Fratelli Ruffatti Pipe organ builders, Padova, Italien, Gerhard Grenzing, Papiol (Barcelona), Spanien, Oficina e Escola de Organasia, Ltd., Esmoriz (Porto), Portugal, Didier Grassin, London, U.K., Pécsi Orgonaépítő Manufaktúra KFT, Pécs, Ungarn.

Das Forschungsprojekt wurde von der Europäischen Gemeinschaft im Rahmen von einem CRAFT (Cooperative Research Action For Technology) Projekt unterstützt.

Wandgeometrie und Klang von Prinzipalpfeifen

Detlef Zscherpel¹, Thomas Görne², Steffen Bergweiler³

Motivation

Die Firma Alexander Schuke Potsdam-Orgelbau GmbH war in seiner bereits 1820 beginnenden Firmengeschichte oft mit der Restaurierung und Rekonstruktion von historischen Orgeln beauftragt. Dabei war es notwendig, nicht nur äußerlich die Orgeln in ihrer ursprünglichen Gestalt wieder herzustellen sondern auch mit Hilfe der alten Techniken den originalen Klang der Pfeifen wieder entstehen zu lassen.

In den letzten Jahren wurde das originale Material durch chemische Analyse weitgehend aufgeschlüsselt und steht nun für den Neubau von Pfeifen zur Verfügung. Die mit vielen Spurenelementen angereicherte Blei-Zinn-Legierung wird nach alter Technik auf Sandstein in mehrere Millimeter dicke Platten gegossen, die dann in weiteren Arbeitsschritten auf der Orgelzinn-Drehmaschine bearbeitet werden. Im letzten Schritt werden nur noch Mikrometer feine Späne abgehoben, so dass eine Platte definierter Dicke mit hochpolierter Oberfläche entsteht. Diese Bearbeitung der gegossenen Platten wurde von den alten Meistern per Hand ausgeführt, so auch von Joachim Wagner (1690-1749). Dabei wurden oft die Teile, die für den Pfeifenkörper verwendet wurden, zum Ende hin ausgedünnt, d.h. die Wandstärke der Pfeife blieb nicht konstant.

Matthias Schuke, Geschäftsführer des Potsdamer Orgelbaus und Orgelbaumeister, weiß aus seiner Intonationserfahrung, dass das Ausdünnen von Pfeifen sowohl ihren Klang als auch die Ansprache verbessert. Das Verfahren hat natürlich auch direkte Auswirkung auf die Masse der Pfeife: die C-Pfeife des Prinzipals hat ohne Ausdünnung eine Masse bis zu 120 kg, die mit Ausdünnung auf 48 kg abnimmt.

Im Widerspruch zu der Erfahrung der Orgelbauer stehen die Veröffentlichungen der Wissenschaftler: Boner, Newman (1940) wiesen nach, dass das Wandmaterial nur wenig Einfluss auf den Klang hat; Backus, Hundley (1966) vernachlässigen den Einfluss der Wand auf das stationäre Spektrum. In den neueren Veröffentlichungen, z. B: Kob (2000), wird aber der Einfluss von Wandschwingungen auf den Klang wieder erwähnt.

Es besteht demnach ein Forschungsbedarf zur Klärung des Widerspruchs.

Experimentelles

Es wurden jeweils zehn Prinzipalpfeifen C (2 ') parallelwändig und linear ausgedünnt hergestellt, deren Ausgangsmaterial auf der computergesteuerten Orgelzinn-drehmaschine bearbeitet wurde. Sämtliche Maße waren identisch, und zwei Intonateure versuchten nacheinander, allen Pfeifen den gleichen Klang zu verleihen.

Von jeder Pfeife wurden computergestützte Tonaufnahmen angefertigt. Dafür wurde eine Prüfwindlade verwendet, die direkt vom Messcomputer über einen eigenen Controller gesteuert wurde. Das Mikrofon befand sich in 1 m Abstand in der Mitte zwischen Aufschnitt und Mündung der Pfeifen. Damit sollte der Klangeindruck des Intonateurs aufgenommen werden. Der gesamte Messaufbau ist im Bild 1 dargestellt.

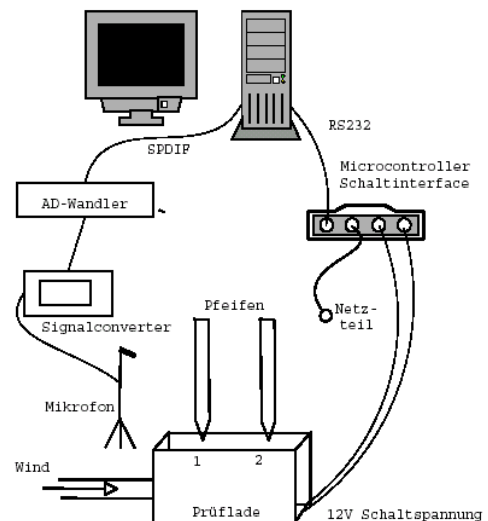


Bild 1: Messaufbau

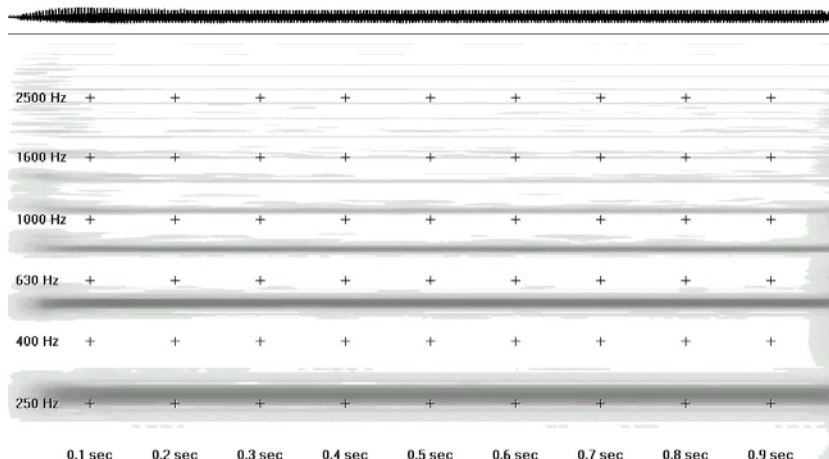


Bild 2: Zeit-Frequenz-Analyse für parallele Pfeifenwand (Graustufen von 0 dB bis -60 dB)

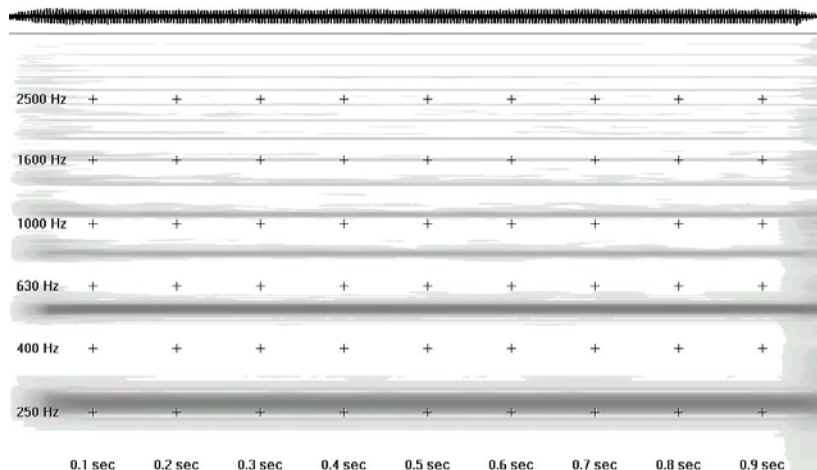


Bild 3: Zeit-Frequenz-Analyse für ausgedünnte Pfeifenwand (Graustufen von 0 dB bis -60 dB)

Ergebnisse

Die Fourier-Analyse des gemessenen Mikrofonsignals in Abhängigkeit von der Zeit liefert ein Zeit-Frequenz-Spektrum des Pfeifenklanges. Für die parallelwandige Pfeife zeigt sich Bild 2; Im Vergleich dazu das Spektrum der ausgedünnten Pfeife Bild 3. Es zeigt sich eine deutlichere Ausprägung der höherzahligen Obertöne für die ausgedünnte Pfeife, jedoch ein stärkerer zweiter Oberton für die Messung mit paralleler Pfeifenwand. Besonders deutlich wird dieser Effekt bei einer Mittelung über den Zeitbereich Bild 4.

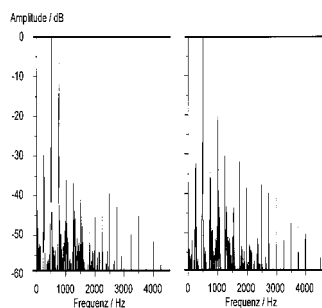


Bild 4: Parallele Pfeifenwand links – ausgedünnt rechts

Auch hier werden durch die Ausdünnung der Pfeifenwand die höherzahligen Obertöne verstärkt, jedoch verliert der zweite Oberton (Quinte) an Intensität.

Diskussion

Die hier gezeigten Unterschiede sind nicht nur für einzelne Pfeifen nachweisbar, sondern betrifft alle 20 hergestellten Messpfeifen. Diese Zahl von Pfeifen war notwendig, um den Einfluss des Intonateurs möglichst gering zu halten, der alle Pfeifen gleich intonieren sollte. Weil ihm das offensichtlich nicht gelingen konnte, lassen sich die Unterschiede in den berechneten Spektren nur mit dem Einfluss der Pfeifenwand erklären, zumal sich das Abstrahlverhalten der Pfeifen durch das Ausdünnen ohne Änderung des Innendurchmessers nicht verändert hat.

Die höhere Intensität der hochzahligen Obertöne sollte durch einen helleren bzw. schärferen Klang auch hörbar

sein. Dazu wurde von Thomas Görne ein Hörversuch durchgeführt, wie er im nächsten Beitrag ausführt.

Zusammenfassung

Der Widerspruch zwischen dem subjektiven Empfinden des Orgelbauers und den Messungen der Wissenschaftler über den Einfluss der Pfeifenwand auf den Klang führte zu diesen Messungen, in denen direkt Zeit-Frequenz-Spektren von parallelwandigen und ausgedünnten Messpfeifen verglichen wurden. Dabei wurden hinsichtlich der Intensität der Obertöne deutliche Unterschiede festgestellt.

Literatur

- C.P. Boner, R.B. Newman, J. Acoust. Soc. Amer. **12** (1940) 83.
 J. Backus, T.C. Hundley, J. Acoust. Soc. Amer. **39** (1966) 936.
 M. Kob, ACUSTICA – acta acustica **86** (2000) 642.

¹ Alexander Schuke Potsdam-Orgelbau GmbH.
www.schuke.de

² Görne Akustik Berlin. www.goerneakustik.de

³ Universität Potsdam, Angewandte Physik kondensierter Materie (APKM)

Hörversuch zu Wandgeometrie und Klang von Prinzipalpfeifen

Thomas Görne¹, Detlef Zscherpel, Michael Zierenberg², Steffen Bergweiler³

Zusammenfassung

Die subjektive Bewertung von Orgelpfeifen durch den Intonateur lässt die Folgerung zu, dass durch unterschiedliche Ausführung von Wandgeometrien der Pfeifen auch unterschiedliche klangliche Qualitäten erreicht werden. Die Untersuchung des Klangempfindens mit Hilfe des Konstanzverfahrens bei 35 Versuchspersonen an einer Reihe von Prinzipalpfeifen bestätigt diese Annahme.

1. Versuchsvorbereitung

Um den Einfluss der Wandgeometrie auf den Klang bei Orgelpfeifen untersuchen zu können, wurden 20 Labialpfeifen aus Orgelmetall mit Prinzipalmensur angefertigt. 10 dieser Prüfpfeifen erhielten Pfeifenkörper aus parallelwandigen Metallplatten, 10 Pfeifen wurden in exakt gleicher Geometrie „ausgedünnt“, d.h. sie weisen einen zur Pfeifenmündung linear abnehmenden Wandquerschnitt auf. Alle Prüfpfeifen wurden mit identischen Abmessungen und identischer Aufschnittsgeometrie hergestellt, und sie wurden von zwei Intonateuren auf gleichen Klang eingestellt. Es wurden von jeder Prüfpfeife Tonaufnahmen angefertigt. Als Aufnahmerraum wurde die Intonierwerkstatt des Orgelbauers genutzt; der Mikrofonabstand betrug 1m. Das Messmikrofon befand sich somit außerhalb des mit ca. 0.6m bestimmten Hallradius und in gleicher Entfernung zu Aufschnitt und Mündung der Pfeifen. Bei Wiedergabe der monophonen Aufzeichnungen mit einem Lautsprecher ist so eine Hörsituation gewährleistet, die der Arbeitssituation des Intonateurs entspricht⁴.

2. Versuchsdurchführung

Zur Durchführung des Hörversuchs wurde das *Konstanzverfahren* eingesetzt. Es zeichnet sich durch folgende Charakteristika aus:

- nach jeder Reizdarbietung urteilt die Versuchsperson,
- die Reizkenngröße wird in regelloser Folge geändert,
- die Auswertung erfolgt durch statistische Verfahren.

Die Bewertung erfolgte durch 8 Adjektivpaare, die jeweils zwei gegensätzliche Extrema einer Klangqualität beschreiben. Vier Adjektivpaare dienten dabei der Beschreibung des stationären Klangs:

1. rund – flach
2. dunkel – hell
3. stumpf – scharf
4. warm – kalt

Vier Adjektivpaare dienten der Bewertung des Einschwingvorgangs („Ansprache“):

5. hart – weich
6. kratzig – glatt
7. spuckend – rauschend
8. schnell – langsam

Die Versuchspersonen konnten für jeden angebotenen Klang durch ein Kreuz auf einem Fragebogen ein abgestuftes Urteil in einer fünfstufigen Skala zwischen je zwei Extrema für jede dieser acht Kategorien abgeben.

In zufälliger Reihenfolge wurden den Versuchspersonen 30 Aufnahmen der Prüfpfeifen angeboten. Dabei waren je 5 der parallelwandigen und 5 der ausgedünnten Pfeifen in zwei unterschiedlichen Aufnahmen im Versuch vertreten. Die Versuchspersonen wurden aufgefordert, nach jedem einzelnen Hörbeispiel in acht Klangkategorien zu urteilen. Es war den Versuchspersonen freigestellt, einzelne Kategorien bei der Beurteilung nicht zu berücksichtigen.

3. Versuchsauswertung

Die Auswertung des Versuchs erfolgte durch die Bestimmung der Summenhäufigkeiten der Antworten in jeder der acht Kategorien. Dabei wurden jeweils die Beurteilungen der parallelwandigen und der ausgedünnten Pfeifen zusammengefasst. 30 der Versuchspersonen wurden in der Gruppe „Laien“ zusammengefasst, 5 Versuchspersonen waren professionelle Musiker („Profis“).

Fünf der acht zur Beurteilung eingesetzten Kategorien zeigten sich zur Bewertung der Klangunterschiede der Prüfpfeifen ungeeignet. Bei der Auswertung war hier kein deutlicher Unterschied in der Bewertung der parallelwandigen und der ausgedünnten Pfeifen erkennbar. In drei Kategorien lassen sich deutliche Unterschiede bei der Bewertung der parallelwandigen und der ausgedünnten Pfeifen erkennen.

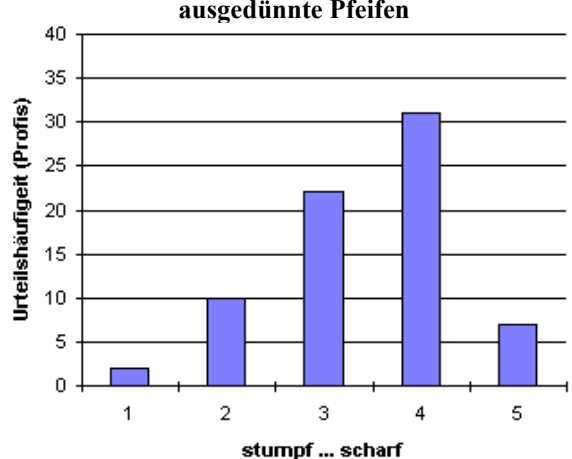
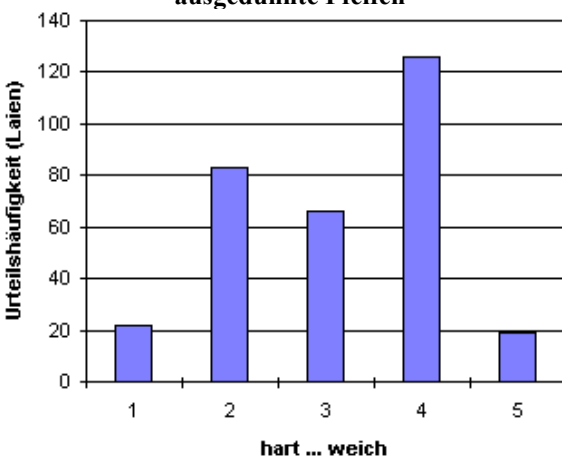
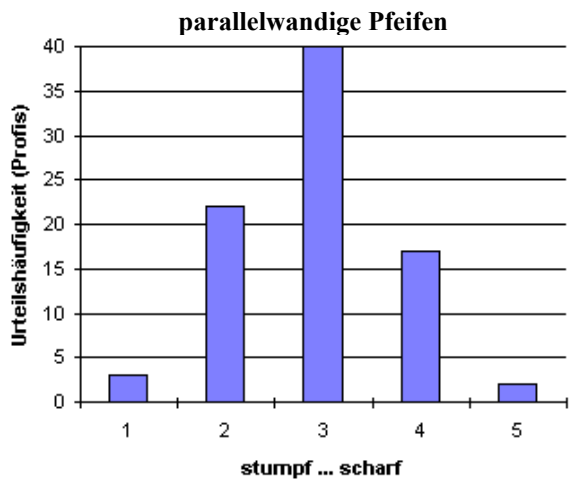
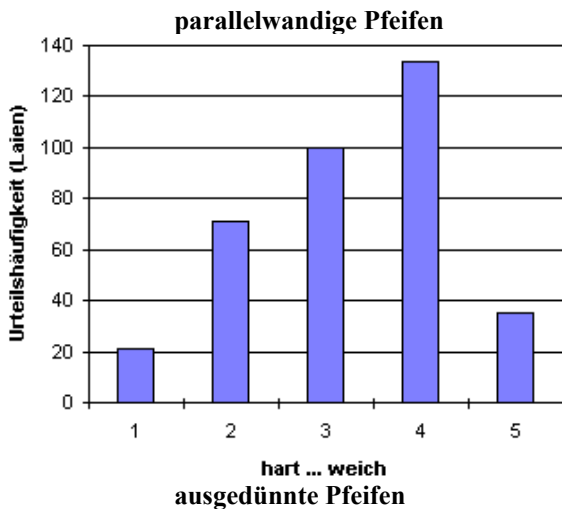
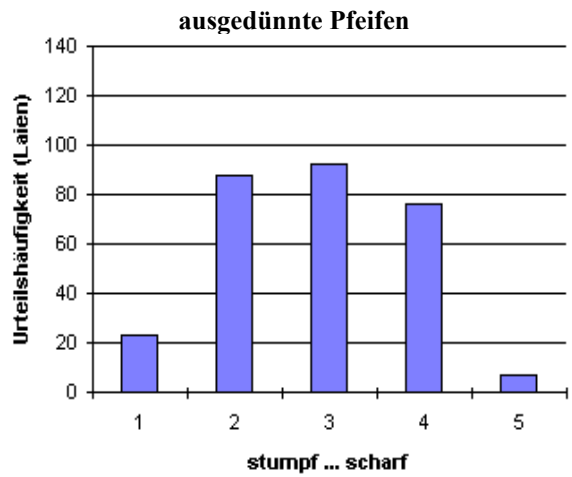
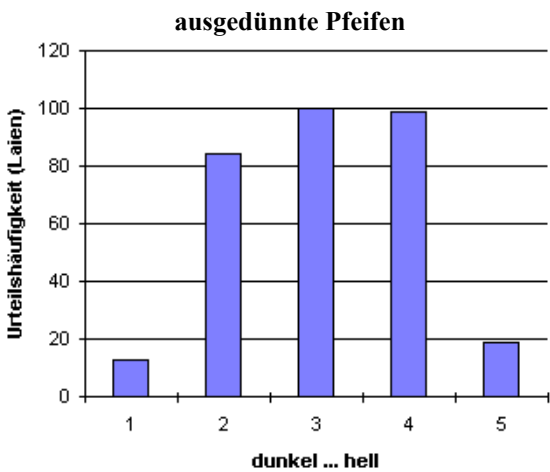
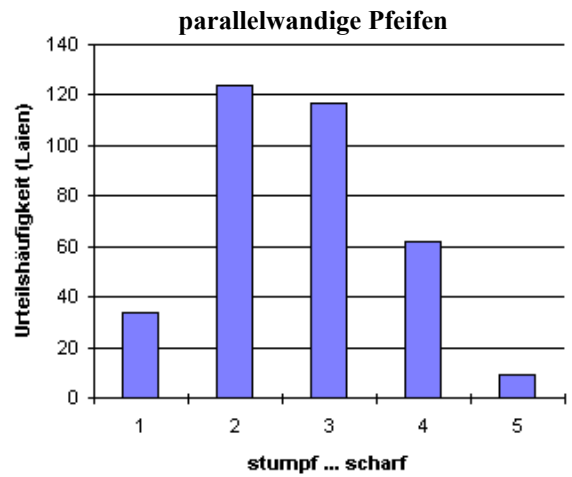
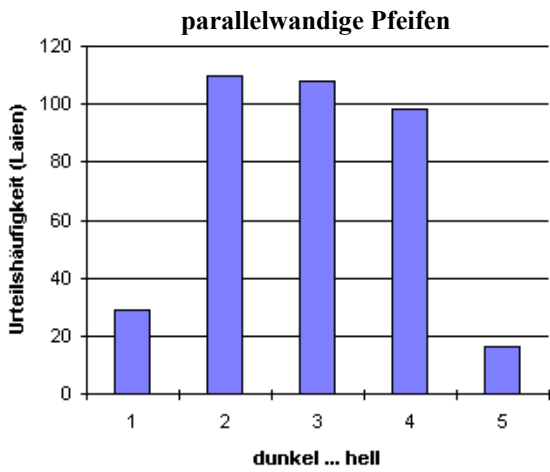
In den Diagrammen ist die absolute Häufigkeit der Urteile auf der fünfstufigen Skala in drei Kategorien angegeben.

4. Zusammenfassung

Es sind in drei klanglichen Beurteilungskategorien Unterschiede bei der klanglichen Beurteilung parallelwandiger und ausgedünnter Prinzipalpfeifen erkennbar. Die Urteile der „Profi“-Versuchspersonengruppe decken sich mit denen der „Laien“-Gruppe, die klanglichen Unterschiede der unterschiedlichen Wandungsgeometrien werden jedoch von den „Profis“ deutlicher wahrgenommen.

Von den für den Versuch hergestellten Prinzipalpfeifen werden die Pfeifen mit ausgedünnter Wandung als heller und schärfer im Klang empfunden, und die Ansprache ist tendenziell härter.

Der Versuch hat gezeigt, dass die Wandgeometrie der Prinzipalpfeife einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Klangempfindung des Instruments hat. Eine Klassifikation der beiden Pfeifentypen nach rein klanglichen Kriterien bei identischer Bauart – d.h. identischer Mensur und Aufschnittsgeometrie – ist möglich.



5. Danksagung

Die Autoren möchten sich insbesondere bei Prof. Dr.-Ing Michael Möser, Technische Universität Berlin, Institut für Technische Akustik (ITA) sowie bei Anna Baeger (ITA) für die Messungen in der Prüfhalle des ITA bedanken. Unser weiterer Dank gilt André Bergner und Ralf Krüger, Universität Potsdam / UP Transfer Gesellschaft für Wissens- und Technologietransfer mbH für die Unterstützung bei der Versuchsauswertung.

¹ Görne Akustik Berlin. www.goerneakustik.de

² Alexander Schuke Potsdam Orgelbau GmbH.
www.schuke.de

³ Universität Potsdam, Angewandte Physik kondensierter Materie (APKM) / UP Transfer GmbH

⁴ Vergleichende Messungen des Langzeitspektrums im reflexionsarmen Raum und im Hallraum des ITA Berlin haben gezeigt, dass bei der Diffusfeldmessung nichtharmonische Komponenten im Spektrum deutlicher hervortreten als im Freifeld. Zur subjektiven Bewertung haben wir uns daher für die „musikinstrumentengemäße“ Diffusfeldmessung entschieden, obwohl die im Wesentlichen mehrfach monofrequente Anregung des Schallfelds durch die Harmonischen des Pfeifentons kein echtes homogenes Diffusfeld erzeugt.

Tonhöhenfeinabstimmung und Gehörtraining

Doris Geller

Die Feinabstimmung musikalischer Tonhöhen geschieht in der musikalischen Praxis in zwei völlig unterschiedlichen Bereichen. Der eine ist das Einstimmen von Instrumenten. Dies wird bei den meisten Instrumenten von den Musikern selbst vorgenommen, z. B. bei Streich- und Zupfinstrumenten, wie Gitarre oder Harfe, und beim Cembalo. Das Klavier mit seinen ca. 230 Saiten wird dagegen gewöhnlich vom eigens dafür ausgebildeten Fachmann gestimmt. Sobald das Instrument fertig gestimmt ist, werden die Tonhöhen der leeren Saiten nicht mehr verändert.

Eine ganz andere TonhöhenEinstellung findet jedoch beim Spiel auf Instrumenten mit variablen Tonhöhen statt, also bei Streichern, Bläsern und Sängern (wobei die Singstimme hier zu den Instrumenten zählt). Während der Streicher seinen Finger auf die Saite setzt, der Bläser eine ganz bestimmte Ansatzposition und der Sänger eine bestimmte Spannung der Stimmlippen produziert, wählt er gleichzeitig eine ganz bestimmte, mit dieser Fingerstellung oder Ansatzposition gekoppelte Tonhöhe. Die Entscheidung über das Höher oder Tiefer trifft er in Abhängigkeit vom musikalischen Zusammenhang, wobei es für den einzelnen Ton meist mehrere mögliche, d. h. musikalisch korrekte Tonhöhen gibt. Die Entscheidung über den jeweiligen Stimmungswert trifft der Musiker nach dem Gehör, indem er die tatsächlich produzierte Tonhöhe mit der Tonhöhe vergleicht, die er sich vorher vorgestellt hat bzw. sie mit den Tonhöhen seiner Mitspieler vergleicht. Die gespielte Tonhöhe wird dann bewertet und gegebenenfalls korrigiert. All dies vollzieht sich in der aktuellen Spielsituation blitzschnell und - im Idealfalle - für den Zuhörer nicht wahrnehmbar. Diese Abstimmung der Tonhöhen "in Echtzeit" wird im Gegensatz zum Vorweg-Einstimmen eines Instruments als "Intonation" bezeichnet¹).

Wie gut jemand intoniert, ist von seiner musikalischen Erfahrung und von der Qualität seines Gehörs abhängig. Durch das Instrumentalspiel, vor allem im Ensemble mit anderen Musikern, lernt das Gehör automatisch, mehr oder weniger gut zu intonieren. Jedoch werden dem Spieler dabei die einzelnen komplizierten Vorgänge, wie sie gerade beschrieben wurden, meist nicht bewusst. Oft schleifen sich auf diese Weise bestimmte Gewohnheiten ein, die bei einer bewussten Beschäftigung mit der Intonation dann mühsam wieder abgebaut werden müssen.

Durch ein gezieltes Hörtraining, welches gleichzeitig mit der Instrumentalausbildung das Intonationsgehör schult, lassen sich solche Umwege vermeiden und außerdem die Intonationssicherheit erheblich steigern. Aber nicht nur die Spieler selbst, sondern alle, die die Intonation anderer zu beurteilen haben, wie Instrumentallehrer, Chor- und Orchesterleiter, sollten ihr Intonationsgehör ausbilden²).

Bisher waren die Möglichkeiten zur Schulung des Intonationsgehörs sehr begrenzt. Zwar lassen sich im Gehörbildungsunterricht mit Hilfe von Tonaufnahmen Intonationsunterschiede demonstrieren; doch sie lassen sich nicht verifizieren, denn wer kann schon beweisen, dass das zweigestrichene e der 1. Violine in Takt 96 wirklich zu hoch ist? Der Lehrer hört es zwar, aber wie kann er seinen Schülern vermitteln, dass er Recht hat? Wirklich nachvollziehen könnte dies der Schüler nur, wenn er die Möglichkeit hätte, die betreffende Tonhöhe zu verändern, wenn er also aus-

probieren könnte, wie es sich ein bisschen höher oder tiefer anhört. Genau dies praktizieren die Streicher täglich beim Üben auf ihrem Instrument, und deshalb ist es auch nicht verwunderlich, dass bei Tonhöhenvergleichstests die Gruppe der Streicher von allen Instrumentengruppen am besten abschneidet, wie Jürgen Meyer in seiner Untersuchung "Zur Tonhöhenempfindung bei musikalischen Klängen in Abhängigkeit vom Grad der Gehörschulung"³) gezeigt hat.

Aus dem Bedürfnis heraus, auch den Nichtstreichern das Ausprobieren und Korrigieren von Tonhöhen zu ermöglichen, ist das Computerprogramm INTON entstanden, mit dem das Erkennen und Korrigieren der Intonation von Melodieschritten, Zusammenklängen und Zusammenklangfolgen erlernt werden kann⁴). Speziell für dieses Programm wurde der INTONAT entwickelt, ein Gerät, welches in der Lage ist, die Tonhöhenunterschiede mit der Genauigkeit zu produzieren, die für das Intonationstraining notwendig ist. Da sich beim Einstimmen einer reinen Oktave oder Quinte bereits bei einer Stimmungsabweichung von nur einem Cent eine störende Schwebung bemerkbar macht, musste unser Klangerzeuger unterhalb der 1c-Grenze liegen (1c = 1/100 Halbton). Zum Vergleich: Eine handelsübliche Soundkarte hat eine Tonhöhenauflösung von 4-7c. Damit arbeitet der INTONAT auf dem Niveau eines hochwertigen Stimmgeräts oder eines teuren Synthesizers.

Das INTON-Programm besteht aus einem kompletten Lehrgang mit ca. 400 Einzelübungen, die, mit einfachsten Grundlagenübungen beginnend, allmählich bis zu schwierigen zweistimmigen Höraufgaben fortschreiten. Es geht darum, die in den Übungen enthaltenen verstimmten Töne zu erkennen und zu korrigieren. Zunächst einmal kann ausprobiert werden, welche unterschiedliche Größen ein Intervall überhaupt haben kann, wie diese sich anhören und welche Stimmungswerte akzeptabel sind und welche nicht. Da sich jeder beliebige Stimmungswert einstellen lässt, lassen sich interessante Hörerfahrungen machen, die sonst nicht möglich sind. So kann das "Wegstimmen" einer Schwebung z. B. für den Spieler eines Tasteninstrumentes ein "Aha-Erlebnis" sein.

An die Aufgaben kann man auf unterschiedliche Weise herangehen: Zum einen kann man die Melodieschritte einfach so einstimmen, wie sie einem am besten gefallen, d. h. wie man sie im Stück spielen würde. Wenn man sich anschließend anhand der Centwerte anschaut, wie groß die Intervalle wirklich sind, die man eingestimmt hat, erhält man wertvolle Aufschlüsse über seine bisher meist unbewusst ablaufenden Hör- und Intonationsgewohnheiten. Der andere Weg ist der Versuch, bestimmte Stimmungswerte zu erreichen, wie z. B. die reinen Intervalle oder die temperierten. Bei der anschließenden Kontrolle wird man vielleicht feststellen, dass ein reines Intervall in der melodischen Linie ganz anders wirkt, als man es vom Zusammenklang her erwartet hätte.

Wer mit INTON arbeitet, geht folgendermaßen vor: Zunächst wird eine Übung aus einer Liste ausgewählt, z. B. zweistimmiges Hören mit verstimmten Tönen in der Oberstimme. Nach Aufrufen der Übung liest man die Noten mit einem erläuternden Text auf dem Bildschirm. Darunter befindet sich ein übersichtliches Menü mit allen Bedien-

elementen. Man kann sich nun das Übungsstück in einer verstimmten Fassung beliebig oft, in beliebigen Abschnitten und in beliebigem Tempo vorspielen und die verstimmt Töne und ihre Abweichungsrichtung (zu hoch / zu tief) bestimmen. Anschließend kann man die Töne mit Hilfe der Cursortasten in Centschritten "richtig" einstimmen. Währenddessen kann man sich den einzustimmenden Ton und dessen Umgebung beliebig oft anhören. Nach Beendigung der Aufgabe kontrolliert man das Stimmergebnis, indem man sich die Centwerte für die einzelnen Töne auf den Bildschirm holt.

Mit INTON lässt sich auch das Stimmen eines Tasteninstrumentes oder einer Harfe erlernen. Das Strapazieren mechanischer Instrumente durch Stimmversuche wird dadurch umgangen - jedenfalls soweit es um das Erlernen der reinen Hörvorgänge beim Stimmen geht. Außer der gleichstufig temperierten können mit INTON sieben historische Stimmungen geübt werden.

Die Übungen bestehen aus Zyklen von Zweiklängen (Oktaven, Quinten, Quartan, in den historischen Stimmungen auch große Terzen), wie sie auch beim Stimmen akustischer Instrumente benutzt werden. Während in den Intonationsübungen gleiche Töne verschieden eingestimmt sein können, wirkt sich hier die Verstimmung eines Tons auf sämtliche gleichnamige Töne aus, die innerhalb des Übungsstückes vorkommen.

- 1) Geller, Doris: Praktische Intonationslehre für Instrumentalisten und Sänger, Buch und CD, Bärenreiter 1997
- 2) Geller, Doris: Sauber intonieren - kann man das lernen? In: Das Orchester 11/99
- 3) Meyer, Jürgen: Zur Tonhöhenempfindung bei musikalischen Klängen in Abhängigkeit vom Grad der Gehörschulung. In: Acustica 42 (1979)
- 4) INTON, das Trainingsprogramm zur Entwicklung des Intonationsgehörs (1998)

Autoren: Wilhelm Heucke-Gareis und Doris Geller

Bezugsadresse:
Heucke-Gareis Electronics
Baumgartenstraße. 19
68623 Lampertheim
Tel+Fax: 06256/232

Systemanforderungen: IBM-kompatibler PC ab 286 aufwärts, DOS ab 3.1 aufwärts, Betrieb unter Windows ist möglich.

Das Programm ist auch in englischer Sprache erhältlich.

Zur Qualität Musikalischer Schallereignisse

Thomas Hempel

Siemens AG, Corporate Technology, Information and Communication, Fachzentrum User Interface Design,
Otto-Hahn-Ring 6, D-81730 München
thomas.hempel@mchp.siemens.de

Schallereignisse?

Natürlich spricht man im Zusammenhang von Musik üblicherweise nicht von „Schallereignissen“ [1] oder von „akustischer Materie“ [2]. Vielmehr ist zu beobachten, dass sich beim Thema Musik die Ausdrucksweise schnell auf eine ästhetische Ebene verlagert und so spricht man – gerade als Musikfreund – eher von „Brillanz“, „Druck“ oder „musikalischem Ausdruck“ für das Gehörte¹. So begeben sich selbst hartgesottene Physiker, Ingenieure und andere Wissenschaftler auf eine Ebene, die zu messen bislang lediglich Menschen, aber (noch?) keine Apparate im Stande sind. Auch in der musikwissenschaftlichen Fachliteratur wird die Feststellung gemacht, dass in Bezug auf Musik *„keine objektgebundenen Eigenschaften auszumachen sind, die sich als eindeutig und spezifisch musikalische ansprechen lassen“* [3]. Musik wird als kognitionsabhängig angesehen und *„als Realität überhaupt erst durch mentale Aktivitäten (wahrnehmen, erinnern, relationieren, erinnern, bewerten usw.) erzeugt.“* [3]. So wird beim Hören von Musik von *„bedeutungsverleihenden Prozessen“* [4] gesprochen. Zusammenfassend sei hier [2] zitiert, der schreibt: *„Erst durch kategoriale Formung erhält die akustische Materie der musikalischen Wahrnehmung eine Gestalt, die man sinnvoll als Musik bezeichnen kann“*.

Messungen: Apparate und Hörer

Qualitätsurteile erlauben wir uns in der Akustik üblicherweise in zweierlei Form: Bei instrumentellen Messungen verwenden wir quantifizierbare Maße (z. B. den Pegel eines n -ten Teiltones), wohingegen wir uns bei mit Musik in Zusammenhang stehenden Urteilen eher qualitativ äußern (z. B.: *„die düstere Stimmung im zweiten Satz...“*)². In weniger emotionsbehafteten Untersuchungsumfeldern der Akustik, beispielsweise bei der Bewertung von Industriergeräuschen tut man sich da leichter: Da man sich ohnehin einig ist, dass es sich hierbei eindeutig um Geräusche und nicht Musik handelt, werden nüchtern Dezibel, sone oder Artikulationsindizes verglichen. Nun existiert auch eine „Grauzone“ zwischen den traditionellen Konventionen hinsichtlich einer Trennung von Musik und Geräusch. Spätestens die *musique concrète* der 1940er Jahre führt uns die Instabilität der Unterscheidung von Musik und Geräusch vor Augen, in späteren Jahrzehnten fortgesetzt von der elektroakustischen Musik. Auch heutzutage wird im Unterhaltungsmusikbereich durch den Umgang von Musikversatzstücken mit bewusst niedriger Wiedergabetreue (*lo-fi Samples*) bisweilen eine Ästhetik erzeugt, die diese Grenzen wieder in Erinnerung rufen.

Dennoch, den Produzenten geräuscharmer Industriemaschinen, manipulierter Geräuschversatzstücke und traditioneller Musik ist eines gemeinsam: Ihr Ziel ist die Erzeugung eines jeweils optimalen „Geräusches“ in einer gegebenen Situation! Dass ein solches Geräuschoptimum natürlich nur unter Einbeziehung des jeweiligen (Aufführungs-)Ortes und den dort herrschenden Konventionen und Erwartungen existiert, ist dabei selbstredend; in Maschinenhalle, Club und Konzertsaal existieren sowohl unterschiedliche Anforderungen als auch (kulturelle) Erwartungshaltungen.

Kontext und Klassifikation

Im letzten Abschnitt wurde im weitesten Sinne eine Parallele zwischen Lärmbekämpfung, Klanginstallation und Konzertaufführung gezogen, um aufzuzeigen, dass allen diesen Fachgebieten trotz unterschiedlichster Herangehensweisen letztlich die Erzeugung einer optimalen akustischen Qualität³ oberstes Gebot ist. Dass Versuche, eine optimale Geräuschgestaltung ausschließlich durch die Messungen und Vorhersagen von Apparaten zu erzielen, nur für definierte und äußerst eng umrissene situative Kontexte gilt, soll kurz am Beispiel der Filmmusik bzw. der Geräusche im Film erläutert werden.

Film ist der Prototyp eines bimodalen Mediums, einer Symbiose visueller und auditiver Zeichen. Unter der Annahme, dass ein mit Apparaten nach aller Kunst der Psychoakustik hinreichend beschriebenes Klangobjekt vorliegt (etwa ein Türschlaggeräusch), so kann dieses gleiche Geräusch in dem einen filmischen Kontext als das Zuschlagen einer Tür (indexikalische Relation) empfunden werden, in einem anderen filmischen Zusammenhang jedoch Angst z. B. vor dem unerwarteten Erscheinen einer verhassten Person hervorrufen (symbolische Relation⁴). Für solch unterschiedliche Wirkungen identischer auditiver Stimuli lassen sich in der Literatur, aber auch im Alltag noch viele weitere Beispiele finden. Im gewählten Beispiel wird jedoch bereits offensichtlich, dass ein bestimmtes Geräusch nicht ausschließlich auf Grund seiner (psycho-)akustischen Eigenschaften zu bestimmten Reaktionen im Hörer im Stande ist (physikalisch extreme Schallereignisse wie Knalle einmal ausgenommen). Vielmehr obliegt es i. d. R. dem Hörer in einem gewissen Kontext, in dem er sich befindet, durch eine geeignete Klassifikation des Hörereignisses eine Bewertung des Gehörten durchzuführen. Ein Geräusch ist somit prinzipiell vieldeutig. In einer vieldeutigen, z. B. visuellen Situation kann über ein gezieltes Geräusch jedoch blitzschnell eine eindeutige Einordnung der Gesamtszene durchgeführt werden (vgl. z. B. die Beispiele der *„unidentifizierten Klangobjekte“* in der Filmpraxis [10]).

³ Vgl. hier den Begriff der *auditiven Systemqualität* in [6].

⁴ Zur Unterscheidung indexikalischer, ikonischer und symbolischer Relationen im Hinblick auf eine Systematisierung auditiver Zeichen s. [7] bzw. [5].

¹ Zur begriffll. Trennung von Schall- und Hörereignis s. [1].

² Zu *verbalen* und *instrumentellen Deskriptoren* s. [5].

Die Eigenschaft der sofortigen Einordnung von Szenen ist im Übrigen ebenso bei der Gestaltung auditiver Benutzungsschnittstellen zur Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit (*Usability*) von Produkten von immenser Bedeutung [9]: Ein Produkt, sei es ein Mobiltelefon, ein Fahrkartenautomat oder eine Leitwarte, muss vom jeweiligen Benutzer in der jeweiligen Situation sofort intuitiv verstehbar und damit bedienbar sein. Hier können auditive Zeichen wertvolle Hilfsmittel darstellen. Ergebnisse, die im skizzierten interdisziplinären Umfeld gewonnen worden sind, ermöglichen hier also außerordentlich nützliche Übertragungen in andere Fachbereiche hinein.

Musikalische Akustik

Mindestens folgende Schlussfolgerungen lassen sich aus dem bisher Erarbeiteten ziehen:

- Korrelationen zwischen einzelnen physikalischen Parametern und Hörereignissen existieren.
- Diese Korrelationen alleine sind jedoch nicht im Stande, unterschiedliche Hörereignisse gleich gut zu beschreiben, geschweige denn vorherzusagen.
- Natur-, Ingenieurs-, Musik- und Geisteswissenschaften müssen hinsichtlich der Beschreibung und Vorhersage zur Qualität musikalischer Schallereignisse zusammenarbeiten.

Die Erzeugung optimaler Geräusche kann bei ausschließlicher Verwendung einer „Apparateakustik“ nicht gelingen, wie sie bisweilen im industriellen ingenieurakustischen Umfeld anzutreffen ist. Genauso schwer tun sich aber oft Musiker und Tonkünstler, die zwar Klangvisionen zum Ausdruck von Gefühlswelten besitzen, aber zu ihrer Beschreibung oft nur stark metaphorisches Vokabular verwenden. Hier setzt die Idee der „musikalischen Akustik“ an: Die Verbindung zu schaffen zwischen dem rein musikalischen Hörereignis, wie es im Kopf von Hörern, Musikern und Tonkünstlern existiert, und den gleichfalls notwendigen (psycho-) physikalischen Grundlagen, wie sie z. B. mit Hilfe der Ingenieurwissenschaften zu beschreiben sind.

Benutzen wir die Naturwissenschaften dort, wo sie am meisten zur Erklärung akustischer Sachverhalte beitragen und die Musik- und Geisteswissenschaften dort, von wo sie am besten Impulse für zukünftige Erklärungsmodelle liefern können.

Möge der „Musikalischen Akustik“ dies auch in Zukunft gelingen!

Literatur

- [1] Blauert, J. (1974): *Räumliches Hören*. D–Stuttgart: Hirzel.
- [2] Dahlhaus, C. (1975): Was ist eine musikalische Tatsache? *Schweizerische Musikzeitung*, 115, S. 113–116.
- [3] Casimir, T. (1991): *Musikkommunikation und ihre Wirkungen: eine systemtheoretische Kritik*. D– Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag.
- [4] de la Motte-Haber, H. (1984): Die Kategorie des Geräusches und der traditionelle Kunstbegriff. A. Schick und K. P. Walcher (Hrsg.), *Beiträge zur Bedeutungslehre des Schalls*, S. 357–364, CH– Bern und D–Frankfurt am Main: Peter Lang.
- [5] Hempel, T. (2001): *Untersuchungen zur Korrelation auditiver und instrumenteller Messergebnisse für die Bewertung von Fahrzeuginnenraumgeräuschen als Grundlage eines Beitrags zur Klassifikation von Hörereignissen*, D–München: Herbert Utz Verlag Wissenschaft.
- [6] Hempel, T. und Blauert, J. (1999). Von «Sound Quality» zur «Auditiven Systemqualität». B. Feiten, F. Hein, A. Röbel und W. Schaller (Hg.), *Impulse und Antworten*, Festschrift für Manfred Krause, S. 111–117. D–Berlin: Wissenschaft und Technik Verlag.
- [7] Hempel, T. (2001): On the Development of a Model for the classification of Auditory Events, *Proceedings of the 4th European Conference on Noise Control*, 14–17 January 2001, GR–Patras.
- [8] Hempel, T. (1999): Semiotische Aspekte bei der Qualitätsbewertung. K. Wogram und J. Angster (Hg.), *Reflexion von Messergebnissen an den Aussagen der Musiker – Subjektive Hör- und Spieltests; ihre Durchführung und Auswertung*, Seminarvorträge des Fachausschusses «Musikalische Akustik» der Deutschen Gesellschaft für Akustik, 1.–2.10.1999. D–Stuttgart: Fraunhofer Institut für Bauphysik.
- [9] Hempel, T. (2001): Klassifikation von Hörereignissen durch den Hörer, Vorträge des Seminars *Geräuschqualität: Methoden und Umsetzung in der Fahrzeug- und Elektroindustrie*, 26.– 27.9.2001, D–Essen: Haus der Technik
- [10] Flückiger, B. (2001): *Sound Design – Die virtuelle Klangwelt des Films*, Bd. 6 v. Zürcher Filmstudien, D–Marburg: Schüren Verlag.

Resonanzholzmerkmale von Gitarrendecken

G. Ziegenhals

Institut für Musikinstrumentenbau, Zwota

Einleitung

Die in diesem Artikel vorgestellten Ergebnisse beruhen auf Arbeiten in vier vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie bzw. dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten geförderten Projekten, die in den Jahren 1993 bis 2001 im Institut für Musikinstrumentenbau bearbeitet wurden sowie älteren Arbeiten des IfM. Die getroffenen Aussagen gelten nur für Holz als Material für Gitarrendecken. Eine Übertragung auf andere Zupfinstrumente ist unter gewissen Einschränkungen möglich. Für den Fall der Streichinstrumente sind eigenständige Untersuchungen notwendig. Ein entsprechendes Projekt wird z.Z. im IfM bearbeitet. Auf die Ergebnisse darf man gespannt sein.

Traditionelle Resonanzholzmerkmale

Die traditionelle Auswahl von Resonanzholz erfolgt ohne wesentliche technische Hilfsmittel. Da die Forderung nach einem gleichmäßigen, engen Jahrringbau besteht sucht man Resonanzholz an Standorten, die ein gleichmäßiges langsames Wachstum der Bäume begünstigen. Zur Gewährleistung „stehender Jahrringe“ bei den Zuschnitten sind im allgemeinen Stammdurchmesser > 50 cm (für Gitarrendecken) erforderlich. Die Auswahl erfolgt nach dem Aufsagen der Stämme durch visuelle Begutachtung nach folgenden Merkmalen: Gleichmäßiger, enger Jahrringbau, keine Äste, kein Drehwuchs, kein Druckholz, Spätholzanteil zwischen 15% und 30%, keine Verfärbungen, keine Harzgallen u.a.m. Lässt man die relativ leicht erkennbaren Fehler wie z. B. Drehwuchs außer acht, so beschreiben diese Merkmale die Jahrringstruktur. HOLZ /1/ beschreibt diese 1984 mit folgenden messbaren Merkmalen:

- **mittlere Jahrringbreite $b_{J,MW}$**
- **Standardabweichung der Jahrringbreite $b_{J,SA}$**
- **Variationskoeffizient $V_K = 100 * b_{J,SA} / b_{J,MW}$ (in %)**
- **Variationsmaß $\varepsilon_k = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{200 \Delta k_{ji}}{k_{ji} + k_{j(i+1)}} \right)^2}$**
- **Häufigkeitsverteilung der Jahrringbreite in Klassen zu 0,4 mm Breitenzuwachs, 0...0,4 mm; 0,4...0,8 mm usw.**
- **Spätholzanteil sp in %**

Jüngste Untersuchungen im IfM zeigen, dass die Folge der Jahrringbreiten in guter Näherung als normalverteilt angesehen werden kann; also durch Mittelwert und Standardabweichung der Jahrringbreite hinreichend beschrieben ist. Zur eindeutigen Charakterisierung des Jahrringbaus ist zusätzlich der Parameter Spätholzanteil notwendig. Die Merkmale Variationsmaß, Variationskoeffizient und Häufigkeitsverteilung korrelieren stark mit der Standardabweichung

und ergeben keinen Beschreibungszuwachs. Alle drei Merkmale können bei entsprechender Erfahrung visuell gut abgeschätzt werden. Ein weiteres Merkmal ist der **Jahrringwinkel** (stehende Jahrringe = 90°). Da dieser aber bei der Verarbeitung (Zuschnitt) entsteht, stellt er kein echtes Resonanzholzmerkmal dar.

Mechanische Kenngrößen von Resonanzholz

Die akustisch wesentlichen Merkmale von Resonanzholz sind:

- E-Modul in Faserrichtung E_F (in GPa)
- E-Modul quer zur Faserrichtung E_q (in GPa)
- Rohdichte ρ (in g/cm³)
- Dämpfung (in %) ??????????????????
- Poissonsche Konstanten μ_F und μ_q (Querdehnung)

Diese Merkmale können an Probekörpern bekannter Dimension messtechnisch exakt bestimmt werden. Man kann sie (außer $\mu!$) mit entsprechender Erfahrung auch grob mit den menschlichen Sinnen abschätzen.

Die Fragezeichen hinter dem Merkmal Dämpfung sollen darauf hinweisen, dass zwischen der üblicherweise über die Halbwertsbreite von Resonanzen bestimmten Dämpfung ($\Delta f/f$), der Materialeigenschaft Dämpfung, die als Konstante in die Newtonsche Bewegungsgleichung eingeht und der letztlich im Fertiginstrument wirksamen Gesamtdämpfung bislang kein brauchbarer Zusammenhang beschrieben wurde. Die Folgerungen aus den an Probekörpern gemessenen Dämpfungen (%) bzgl. des Einflusses auf das fertige Instrument sind also rein spekulativ.

In älteren Arbeiten aus dem IfM (und in anderen Quellen) werden die Longitudinalwellengeschwindigkeit $\sqrt{E / \rho}$

und der sogenannte Resonanzquotient $\sqrt{E / \rho}^3$ (man kann ihn als eine Art Maß für die Biegewellengeschwindigkeit betrachten) als für die Beschreibung von Resonanzholz wichtige, abgeleitete Größen aufgeführt. Für beide werden hohe Werte als positiv dargestellt. Resonanzholz sollte also leicht und steif sein. Dies entspricht auch der traditionellen Forderung des Instrumentenbaus. In jüngeren Arbeiten findet man die beide Merkmale nicht mehr und auch in den Forderungen für gutes Resonanzholz /1/ von HOLZ (1984) tauchen sie nicht mehr auf.

In den Abbildungen 1 und 2 sind beide Größen jeweils in Faserrichtung (x-Achse) und quer zur Faserrichtung (y-Achse) für eine Gesamtstichprobe von 1200 Deckenhälften für Gitarren (Deckenrohlingen) als Streubereiche dargestellt. Die Symbole in den Diagrammen weisen auf folgende Holzproben hin: 1 - Fichte aus dem Schwarzwald, 2 - Tanne aus dem Schwarzwald, 3 - Einzelprobe unbekannter Herkunft, 4 - Fichte aus dem Vogtland, 5 - Zeder.

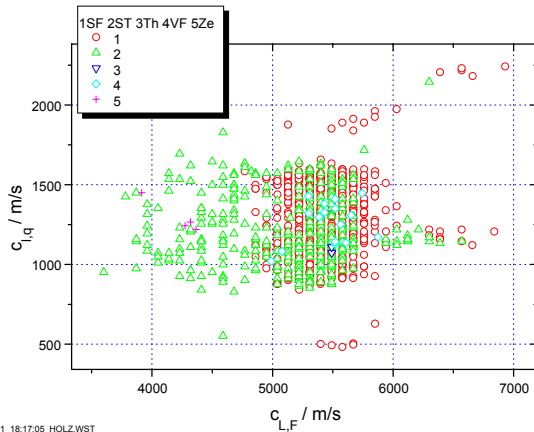


Abbildung 1: Streubereich Longitudinalwellengeschwindigkeit in und quer zur Faserrichtung für 1200 Deckenhälften

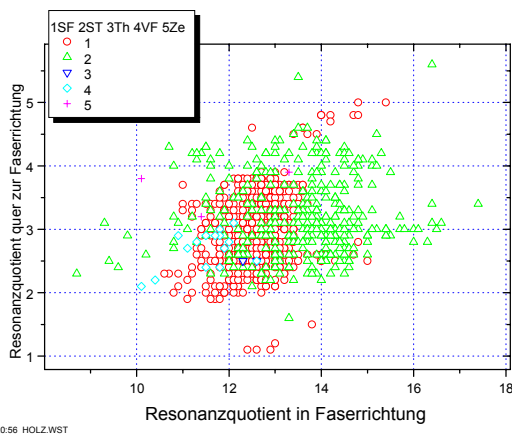


Abbildung 2: Streubereich Resonanzquotient in und quer zur Faserrichtung für 1200 Deckenhälften

Vergleicht man beide Diagramme, so erkennt man, dass sich bei der betrachteten realen Stichprobe die Verhältnisse für die beiden Merkmale, Longitudinalwellengeschwindigkeit und Resonanzquotient, regelrecht umkehren. Eine Forderung nach hohen Werten in beiden Merkmalen für gutes Resonanzholz ist also nicht sinnvoll.

Die mechanischen Kenngrößen von Holz hängen von der aktuellen Holzfeuchte ab. Um vergleichbare Werte zu erhalten müssen Messungen stets bei gleicher Feuchte vorgenommen werden. Im IfM wird traditionell bei 8% Holzfeuchte gemessen. Bei dieser Feuchte weist die Dämpfung ein Minimum auf.

Bisherige Merkmalgrenzwerte für Resonanzholz

HOLZ veröffentlichte 1984 /1/ folgende Forderungen an die Merkmalswerte für Holz um es der Kategorie Resonanzholz zuordnen zu können:

- $b_{J,SA} < 0,75$ mm
- $20\% < sp < 33\%$
- eingipflige Verteilung der Jahrringbreite
- $\varepsilon_J < 28$
- $0,5$ GPa $< E_q$
- Dämpfungsfaktor $< 2 \cdot 10^{-2}$

Eine Forderung nach leichten, steifen Hölzern findet sich also nicht, wohl aber die nach möglichst hoher Steife quer zur Faserrichtung.

In der Arbeit von HOLZ 1984 findet man darüber hinaus zwei sehr interessante Bemerkungen: Zum einen schlägt er vor, auf die Eingrenzung des Spätholzanteils, insbesondere in Hinblick auf Probleme seiner Bestimmung im „Nicht – Laborbetrieb“, zu verzichten. Zum andere weist er ausdrücklich darauf hin, dass **ein Zusammenhang zwischen der Jahrringbreite und den akustisch wichtigen Eigenschaften nicht angegeben werden kann.**

Jüngste Untersuchungen im IfM bestätigen dies im wesentlichen. Einige Stichproben zeigen aber den Zusammenhang, dass ein hoher MW der Jahrringbreite einen niedrigen E_q (quer zur Faserrichtung) bedingt. Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht stabil.

Korrelation zu subjektiven Urteilen

An drei Stichproben von Gitarrendeckenhälften wurde der Zusammenhang zwischen den bekannten, messbaren Resonanzholzmerkmalen und der subjektiven Beurteilung der Deckenqualität bzw. der Fertiginstrumente untersucht:

STP 1: 27 Einzeldeckenhälften Schwarzwaldfichte, 5 Einzeldeckenhälften Schwarzwaldtanne, 6 Einzeldeckenhälften Vogtlandfichte

STP 2: 36 Deckenpaare Schwarzwaldfichte, 21 Deckenpaare Schwarzwaldtanne

STP 3: 17 Deckenpaare Schwarzwaldfichte, 11 Deckenpaare Schwarzwaldtanne. Aus diesen Decken wurden im Rahmen eines IfM Projektes baugleiche Gitarren gefertigt. Von diesen Gitarren stehen Ergebnisse akustischer Untersuchungen sowie subjektiver Tests zur Verfügung.

Die folgende Tabelle 1 zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen den Resonanzholzmerkmalen und der subjektiven Beurteilung der Deckenrohlinge. Die Beurteilung wurde von erfahrenen Instrumentenbauern vorgenommen. Es sind nur die Korrelationskoeffizienten eingetragen, für die die Nullhypothese verworfen werden kann. Unter Klopfon f_1 wird die Resonanzfrequenz der ersten Biegemode in Faserrichtung verstanden, die man leicht durch geschicktes Anklopfen der Deckenhälfte per Gehör abschätzen kann. (Der Jahrringwinkel wurde nur bei STP 2 betrachtet.)

Merkmal	Subjektive Beurteilung		
	STP1	STP2	STP3
Dichte		0,28	
E_F	0,44	0,42	
E_q			0,74
Jahrringwinkel	-		-
Klopfon f_1	0,34	0,44	
MW Jahrringbreite	-0,80	-0,70	-0,86
SA Jahrringbreite	-0,65	-0,38	-0,50

Tabelle 1: Korrelationskoeffizienten zwischen objektiven Resonanzholzmerkmalen und subjektiver Beurteilung der Holzqualität

Man erkennt, dass die subjektive Beurteilung vorrangig nach dem Kriterium „Gleichmäßiger, enger Jahrringbau“ vorgenommen wurde. Weiterhin wird offensichtlich eine hohe Steife in Faserrichtung gewünscht, die natürlich mit der Klopfonhöhe f_1 korreliert.

Zum Einfluss des Jahrringwinkels

An Stichprobe 2 betrachten wir den Einfluss des Jahrringwinkels. Er handelt sich wie bereits erwähnt um kein echtes Holzmerkmal, da er beim Zuschnitt der Deckenhälften bestimmt wird. Als ideal werden von Instrumentenbauern stehende Jahrringe (Jahrringwinkel = 90°) angesehen. Verringert man den Jahrringwinkel so zeigen sich für die mechanischen Kenngrößen der Deckenhälften folgende Tendenzen:

- Die Dichte steigt leicht an.
- Der E – Modul in Faserrichtung wächst.
- Der E – Modul quer zur Faserrichtung sinkt deutlich.
- c_L in Faserrichtung steigt schwach an.
- c_L quer zur Faserrichtung sinkt merklich.
- Der Resonanzquotient quer zur Faserrichtung sinkt deutlich.

Die Beobachtungen erfolgten bis zu einem Jahrringwinkel von ca. 70° .

Beurteilung von Fertiginstrumenten

Aus den Deckenrohlingen der Stichprobe 3 konnten im Rahmen der Projekte baugleiche Gitarren gefertigt werden. Mit einer Gruppe von 20 Testpersonen, 10 Gitarristen, 10 Nichtgitarristen erfolgten folgende subjektive Tests:

Hörtest: Die Probanden erhielten Klangbeispiele über Kopfhörer zugespielt. Es war jedes Klangbeispiel zu bewerten. Die Einspiele nahm ein Berufsmusiker im reflexionsarmen Raum des IfM vor. Als Aufnahmemikrofon diente ein Kunstkopf der Fa. head acoustics. Spieler und Kunstkopf „saßen sich im Abstand von 2 m gegenüber“.

Spieltest (ST) Klang: Die Gitarristen testeten die Instrumente ohne Zeitbegrenzung, wobei die Aufmerksamkeit speziell auf die Klangqualität gelenkt wurde.

Spieltest gesamt: Die Gitarristen testeten die Instrumente ohne Zeitbegrenzung mit der Fragestellung ein Gesamturteil im Sinne einer Kaufentscheidung abzugeben.

Tabelle 2 zeigt die Korrelationen zwischen den subjektiven Urteilen über die Instrumente und den objektiven Resonanzholzmerkmalen.

Deckenmerkmal	Hörtest	ST Klang	ST ges.
Dichte	-0,42	-0,44	
E_F	-0,57	-0,55	
E_q			0,61
Klopfon f_1	-0,52	-0,52	
MW Jahrringbreite			-0,68
SA Jahrringbreite			-0,46

Tabelle 2: Korrelationskoeffizienten zwischen objektiven Resonanzholzmerkmalen und subjektiver Beurteilung der fertigen Instrumente STP 3

Es sind wiederum nur die Korrelationskoeffizienten eingetragen, für die die Nullhypothese verworfen werden kann. Man erkennt deutlich zwei Tendenzen: Während die Klangeindrücke deutlich mit den akustisch relevanten Merkmalen Dichte und Elastizitätsmodul korrelieren, zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Gesamturteil und der Jahrringstruktur. Offensichtlich orientiert man sich für ein Gesamturteil vorwiegend optisch und votiert analog zu den Instrumentenbauern für einen engen, gleichmäßigen Jahrringbau. Ein Zusammenhang zwischen Jahrringbau und klanglichen Eigenschaften der Instrumente ist nicht erkennbar!

„Gutbereiche“ der akustisch wesentlichen Eigenschaften

Anhand der Ergebnisse der Arbeiten können Bereiche für die akustisch wesentlichen Merkmale des Resonanzholzes angegeben werden, die mit großer Wahrscheinlichkeit zu gut beurteilten Instrumente führen:

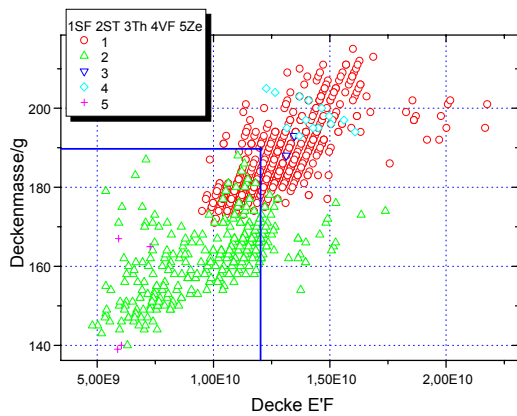
- **$E_F < 12 \text{ GPa}$**
Minimaler beobachteter Wert bei 6 GPa, gutes Instrument. Aber: kleinere Werte standen in der Stichprobe nicht zur Verfügung, d.h. ein unterer Grenzwert kann nicht angegeben werden!
- **$E_q \text{ ca. } 1 \text{ GPa}$**
Geringer „Gut – Trend“ eher zu niedrigeren Werten
- **$\rho < 0,44 \text{ g/cm}^3$**
Minimaler beobachteter Wert bei $0,35 \text{ g/cm}^3$, Instrument gut. Aber: kleinere Werte standen in Stichprobe nicht zur Verfügung, d.h. ein unterer Grenzwert kann nicht angegeben werden!

Für E_F und ρ werden positive Trends zu kleineren Werten hin angegeben, d.h. je kleiner der Wert, desto besser werden die Fertiginstrumente beurteilt. Der Verweis auf minimal beobachtete Werte bedeutet, dass nichts darüber ausgesagt werden kann, ob es einen optimalen Wert für die Größe gibt, nach dessen Unterschreitung sich der Positivtrend umkehrt. Kleinere Werte für die beobachteten Größen waren in den Stichproben nicht vorhanden.

Abbildung 3 zeigt den Streubereich der wesentlichen mechanischen Kenngrößen Dichte (Masse) und Elastizitätsmodul in Faserrichtung für die Gesamtstichprobe 1200 Deckenhälften. Der „Gutbereich“ ist markiert. Die Bedeutung der Symbole ist analog zu Abbildung 1 und 2.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss des Ausgangsmaterials auf die Fertiginstrumente deutlich geringer ausfällt als allgemein angenommen. Weiterhin orientiert man sich offensichtlich zur Beurteilung des Holzes an der Jahrringstruktur, obwohl deren Einfluss auf die Akustik der Fertiginstrumente nicht nachweisbar ist. Genauere Analysen zeigen allerdings, dass eine Auswahl nach Jahrringstruktur (eng und gleichmäßig) mit hoher Sicherheit keine ausgesprochen schlechten Instrumente hervorbringt. Man stünde also auf der sicheren Seite.



25.07.01 10:26:47 HOLZ.WST

Abbildung 3: Streubereich Masse und E-Modul in Faserrichtung für 1200 Deckenhälften.

Darüber hinaus widersprechen unsere Ergebnisse in der Tendenz bisherigen Aussagen. BALTRUSCH erkannte bei Detailuntersuchungen an STP3, dass die von uns beobachteten Tendenzen verschwinden, wenn man nur Holz nach traditioneller Auswahl einbezieht /2/. Offensichtlich wurden frühere Untersuchungen an durch die traditionelle Betrachtung in ihrer Variationsbreite hinsichtlich der mechanischen Holzeigenschaften zu stark eingeschränkten Stichproben vorgenommen. Eine Betrachtung einer breiten Qualitätspalette von Resonanzholz, wie sie von uns vorgenommen wurde, scheint jedoch auch aus der Sicht heraus überaus sinnvoll, dass es eine Reihe allgemein anerkannter alter Instrumente gibt, die kein engjähriges, gleichmäßiges Resonanzholz aufweisen.

Eine weitere Ursache für die Diskrepanzen zu üblichen Auffassungen sehen wir im Gitarrenbau in der zweifellos vorliegenden Dominanz der Beleistung und anderer konstruktiver Details gegenüber den Materialeigenschaften. Die die Schwingungen bestimmende Steife eines Bauelementes, ist das Produkt aus E - Modul und Flächenträgheitsmoment. Man kann leicht nachrechnen, dass die bei Gitarren oft verwendete Hauptdiagonalleiste allein bereits ein höheres Flächenträgheitsmoment aufweist als die Decke selbst.

Eine zusätzliche, bisher aber rein hypothetische Vermutung geht dahin, dass die Schwingfähigkeit in Bereichen zwischen den Leisten von Bedeutung ist. Diese würde durch eine weniger steife Decke begünstigt.

Letztlich sei noch auf die Problematik der Asymmetrien an Zupf- und Streichinstrumenten verwiesen. Es ist eine bekannte Tatsache, dass für asymmetrische Schwingungen einer Platte die akustische Abstrahlung stärker ist. Asymmetrien in den Schwingformen werden aber durch eher unregelmäßige Jahrringstrukturen begünstigt. Modalanalysen zeigen nun, dass gute Meisterinstrumente in der Tat für die Deckenmoden (ab Mode 3) meist deutlich mehr Asymmetrien aufweisen. Ein Beispiel zeigen die Abbildungen 4 und 5. Dies ist eine Erklärung dafür, dass aufgrund ihrer ungleichmäßigen Jahrringe schlecht beurteilte Decken doch gute Instrumente hervorbringen.

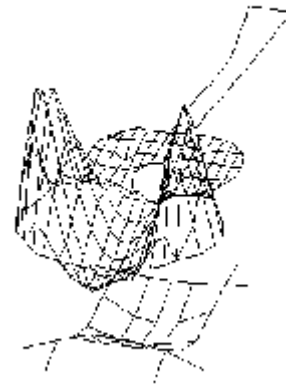


Abbildung 4: 3. Deckenmode einer Meistergitarre;
 $f_r = 363$ Hz

Zu gleichen Ergebnissen gelangte auch KLUCK bereits 1996 als er mit Gitarrendecken experimentierte, deren Jahrringe nicht nur gegenüber den stehenden Jahrringen geneigt waren, sondern deren Faser schräg in der Decke verliefen und spitzwinklig angeschnitten waren /3/. Die resultierenden zusätzlichen Inhomogenitäten führten ebenfalls zu gut bewerteten Instrumenten, was zunächst keineswegs erwartet wurde.

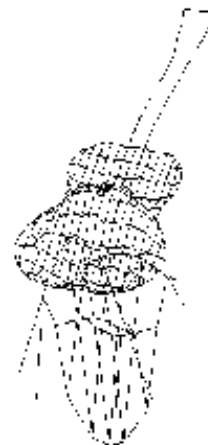


Abbildung 5: 3. Deckenmode einer Industriegitarre;
 $f_r = 412$ Hz

Literatur

- /1/ HOLZ, D.: **Über einige Zusammenhänge zwischen forstlich-biologischen und akustischen Eigenschaften von Klangholz (Resonanzholz)**
Holztechnologie **25** (1984) 1, S. 31-36
- /2/ BALTRUSCH, M.: **Resonanzholz im Gitarrenbau und die Beurteilung daraus hergestellter Instrumente durch Musiker**
Fortschritte der Akustik DAGA 2000
- /3/ Kluck, D.; Holz, D.: **Objektive und subjektive Bewertung von Fichtenresonanzholzdecken unterschiedlicher Faser – Zuschnittwinkel für Gitarren**
Fortschritte der Akustik DAGA 97

Betriebsschwingungsformen und Admittanzen von Gitarren

Helmut Fleischer

Institut für Mechanik, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, UniBw München, 85577 Neubiberg

1. Einleitung

Bei einem Zupfinstrument wie der Gitarre ruft der Spieler freie Schwingungen einer Saite hervor. Da die Saite allein praktisch keinen Schall abstrahlen kann, sind zusätzliche Vorkehrungen nötig, um die Schwingung hörbar werden zu lassen. Bei der akustischen Gitarre übernimmt der Korpus diese Aufgabe. Dazu muss er selbst schwingungsfähig und, damit Schwingungen angeregt werden können, an den Auflagern der Saiten beweglich sein. Bei der elektrischen Gitarre wird das Saitensignal mittels Tonabnehmern abgegriffen und mit den Mitteln der Elektroakustik in Schall umgesetzt. Der Korpus kann aus Vollholz (*solid body*) gefertigt werden und ist dann weitgehend unbeweglich.

Um das Schwingungsverhalten der Instrumente zu untersuchen, an das bei diesen beiden Typen völlig andersartige Anforderungen gestellt werden, stehen leistungsfähige messtechnische Hilfsmittel zur Verfügung. Zwei davon werden am Beispiel einer akustischen und einer elektrischen Gitarre mit *solid body* betrachtet.

2. Messung von Betriebsschwingungsformen

2.1. Begriffsbestimmung

Unter einer Betriebsschwingungsform (*operating deflection shape*, vgl. [1]) versteht man das Bewegungsmuster, mit dem die Gitarre auf eine bestimmte Anregung antwortet. Davon zu unterscheiden ist die Eigenschwingungsform (*mode shape*), die eines der "Atome" darstellt, aus denen sich jede Schwingungsverteilung zusammensetzt. Um Eigenschwingungen zu ermitteln, müssen die Messdaten im Sinne einer Modalanalyse [2] weiterverarbeitet werden. Demnach stellen etwa die von Jansson [3] angegebenen Schwingungsbilder keine Moden, sondern Betriebsschwingungsformen dar. Sobald die Erregerfrequenz mit einer Eigenfrequenz übereinstimmt, liefert die Betriebsschwingungsform ein sehr gutes Abbild der Eigenform. Wählt man eine realistische Anregung (bei einer Gitarre etwa am Steg), so erhält man zusätzlich quantitative Aussagen darüber, mit welchen Amplituden die Gitarre auf eine gegebene Erregerkraft antwortet.

2.2. Messaufbau und -vorgang

Da das Schwingungsverhalten wesentlich von den Randbedingungen bestimmt wird, wurde dafür Sorge getragen, die Gitarre bei der Messung unter "natürlichen" Bedingungen, d.h. von einer Person in sitzender Spielhaltung am Körper (*in situ*) gehalten, zu betreiben. Angeregt wurde mit einem Rauschsignal über einen elektrodynamischen Schwingererregter, der die akustische Gitarre am Steg und die E-Gitarre am Hals zum Schwingen brachte. Anhand eines Videobildes wurde ein Messgitter definiert. An dessen Gitterpunkten wurde die Schwinggeschwindigkeit unter Nutzung des Doppler-Effekts berührungslos mit einem Laser Scanning Vibrometer der Firma Polytec abgetastet, was wenige Minuten dauerte. Der Computer berechnete für jeden Messpunkt aus der Schwinggeschwindigkeit und der anregenden Kraft eine Übertragungsfunk-

tion. Ausgewertet wurde anhand einer gemittelten Übertragungsfunktion, deren Maxima auf Eigenschwingungen hindeuten. Die zugehörigen Betriebsschwingungsformen im Bereich tiefer Frequenzen bis 500 Hz wurden dargestellt.

2.3. Ergebnisse für die akustische Gitarre

Fig. 1 zeigt Resultate für eine namenlose, schlichte Gitarre (Nr. 6 in [4]), die dort ausführlich diskutiert und

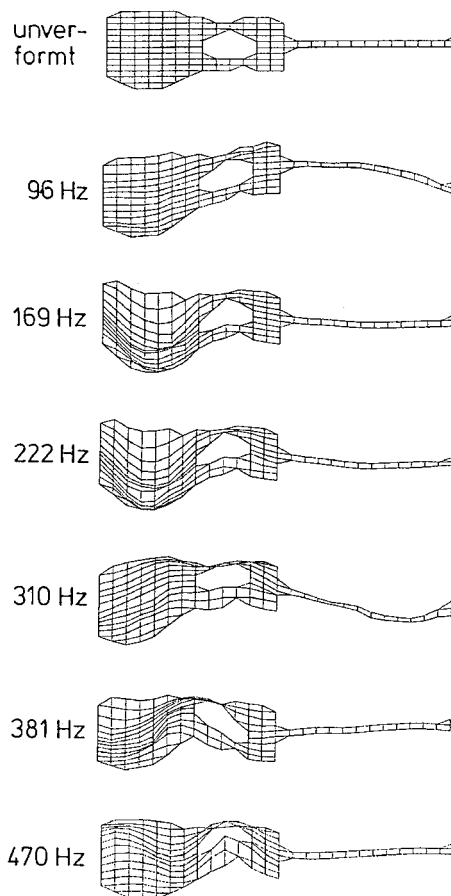


Abb. 1. Betriebsschwingungsformen von Decke und Hals der akustischen Gitarre.

Oben: Mess-Situation.

Darunter: Ergebnisse der Vibrometer-Messung.

hier ohne weiteren Kommentar zusammengestellt sind. Das Instrument wurde bei dieser Messung von einer weiblichen Person (E) gehalten. Ergänzend wurden drei weitere Versuche durchgeführt. Dieselbe Gitarre wurde von zwei männlichen Personen (Γ) auf ähnliche Art gehalten sowie auch in einen Gitarrenständer gestellt und ohne Kontakt mit einem menschlichen Körper untersucht.

Wird ein Instrument für die Messung in einer Vorrichtung gelagert, hat dies den Vorteil guter Reproduzierbarkeit. Da die Auflagerdämpfung gering ist, bilden sich zudem die Schwingungsformen sehr deutlich aus. Ein fundamentaler Nachteil ist jedoch, dass die Randbedingungen mehr oder weniger von denen beim Spielen abweichen. Welche Diskrepanzen daraus resultieren können, zeigt Tab. I. Dort sind die Frequenzen zusammengestellt, bei denen gleichartige Schwingungsformen, die in Anlehnung an [4] bezeichnet sind, beobachtet wurden. Als Beispiel sei die Helmholtz-Schwingung genannt, der für die Qualität einer Gitarre allgemein große Bedeutung zugemessen wird. Bei den *in-situ*-Messungen liegt deren Frequenz etwa 13% tiefer als bei der Messung in einem Gitarrenständer, was immerhin mehr als zwei Halbtönen entspricht. Bei *solid-body*-Instrumenten wurden noch größere Abweichungen festgestellt. Erst ab der dritten oder vierten Hauptschwingung scheinen die Frequenzen von der Art, wie die Gitarre gelagert ist, nicht mehr wesentlich beeinflusst zu werden.

Tab. I. Frequenzen (in Hz) der Betriebsschwingungsformen der akustischen Gitarre, bestimmt in vier unterschiedlichen Messungen

Schwingungsform	<i>in situ</i>			im Gitarrenständer
	Pers. 1 ♀	Pers. 2 ♂	Pers. 3 ♂	
Helmholtz	96	96	94	107
00-Dipol	169	171	170	185
00-Monopol	222	222	221	226
10	310	310	309	309
20	381	381	381	388
30	470	465	466	470

Wirklichkeitsnahe Ergebnisse hoher Aussagekraft erhält man demnach, wenn eine Person das Instrument während der Messung möglichst wie beim Spielen hält, was bei grundlegenden Untersuchungen auch am Institut für Musikinstrumentenbau in Zwota (Ziegenhals [5]) praktiziert wird. Wenn verschiedene Personen das Instrument in ähnlicher Weise halten, liegen entgegen häufig geäußerten Befürchtungen die Frequenzabweichungen im Prozentbereich und sind somit tolerierbar. Dagegen können sie, wie man anhand von Tab. I beim Vergleich der "natürlichen" mit der "technischen" Lagerung erkennt, vor allem bei tiefen Frequenzen groß sein. Als Fazit bleibt die Empfehlung, wann immer möglich *in situ* zu messen. Der Nachteil möglicher Diskrepanzen bei unterschiedlichen Personen und Haltungen wird bei weitem aufgewogen durch den elementaren Vorteil, dass die Verhältnisse im Experiment weitgehend dieselben wie beim realen Spielbetrieb sind.

2.4. Ergebnisse für die elektrische Gitarre

Die in Abb. 2 gezeigten Resultate beziehen sich auf eine E-Gitarre Fender Stratocaster (Nr. 4 in [6]), die eine Person gemäß den obigen Überlegungen in sitzender Spielhaltung auf dem Schoß hielt. Angeregt wurde der Hals am 7. Bund. In [6] sind die Schwingungsformen näher besprochen. Da sich der Korpus erwartungsgemäß als wenig beweglich erweist, sind die Schwingungen nicht sehr vielfältig und beschränken sich vorwiegend auf den Hals und den Kopf. Im Bereich zwischen 83 Hz (leere E₂-Saite) und 500 Hz sind lediglich zwei Grundformen zu unterscheiden.

3. Messung von Admittanzen

3.1. Begriffsbestimmung

Die mechanische Admittanz ist der komplexe Quotient aus der Schwinggeschwindigkeit und der gleich orientierten Erregerkraft. Die in Kapitel 2 besprochenen Übertragungsfunktionen stellen danach Transfer-Admittanzen dar. Beziehen sich Kraft und Schwinggeschwindigkeit auf ein und denselben Punkt, spricht man von einer Punkt-Admittanz.

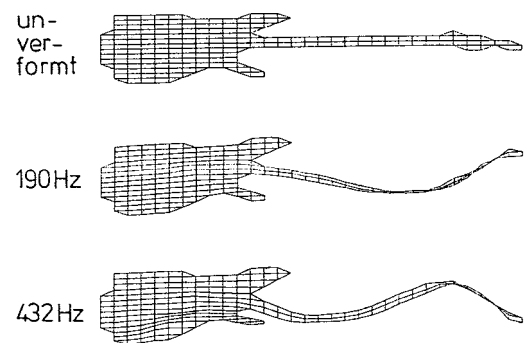
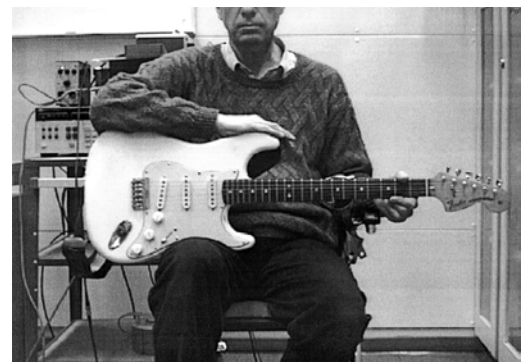


Abb. 2. Betriebsschwingungsformen von Korpus und Hals der elektrischen Gitarre.

Oben: Mess-Situation.

Darunter: Ergebnisse der Vibrometer-Messung.

Ihr Imaginärteil wird als Suszeptanz, der Realteil als Konduktanz bezeichnet.

Die Admittanz kennzeichnet die Bewegungs-Antwort auf eine anregende Kraft und damit Art und Größe der "Schwingfreudigkeit" der Gitarre. Ist die Admittanz positiv imaginär, verhält sich das Instrument am betreffenden Punkt wie eine Feder. Ist sie negativ imaginär, dann reagiert es wie eine Masse. Wenn die Admittanz reell ist, verhält sich die Gitarre wie ein Dämpfer, d.h. nimmt am

betreffenden Punkt Energie von der Saite auf und leitet sie unumkehrbar ab. In Hinsicht auf die Abstrahlung von Energie als Schall bzw. auf das vorzeitige Abklingen von Saitenschwingungen kommt der Konduktanz somit eine herausragende Rolle zu.

3.2. Messaufbau und -vorgang

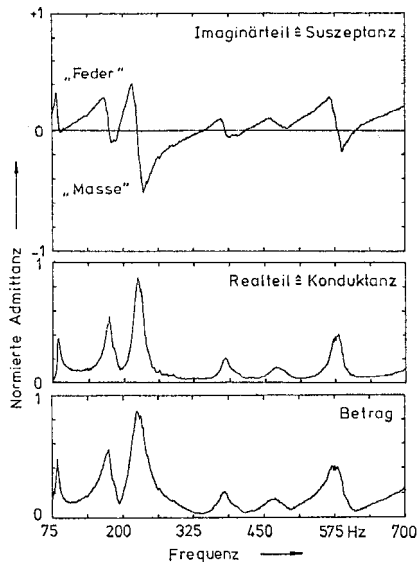


Abb. 3. Normierte komplexe Admittanz, gemessen am Steg der akustischen Gitarre.

Zur Messung der Admittanz wurde ein Impedanz-Messkopf der Firma Brüel & Kjaer in Kombination mit einem Schwingerreger verwendet. Er wurde an der Messstelle gegen die Gitarre gedrückt, die eine Person ähnlich wie in Abb. 1 oder 2 in sitzender Spielhaltung auf dem Schoß hielt. Der übrige Versuchsaufbau ist in [6,7] beschrieben. Abb. 3 zeigt als Beispiel Betrag, Realteil (Konduktanz) und Imaginärteil (Suszeptanz) der Admittanz in normierter Darstellung zwischen 75 und 700 Hz. Gemessen wurde bei der G₃-Saite am Steg der akustischen Gitarre.

Eine Saite hat an zwei Punkten Kontakt mit dem Instrument. Daher ist nicht nur dessen Reaktion am Steg, sondern auch diejenige an den möglichen Auflagepunkten auf dem Griffbrett von Interesse. Ein kompaktes Bild von der Konduktanz - und damit von der Energie-Aufnahmefähigkeit des Instrumentenkörpers - entsteht durch Kombination der Einzelkurven zu einer 3D-Darstellung. Bezieht man neben dem Hals auch den Steg mit ein, so erhält man eine umfassende Übersicht.

3.3. Steg- und Halskonduktanz der akustischen Gitarre

Ergebnisse für die beiden Gitarren sind in Abb. 4 und 5 zusammengestellt. Da entlang der Mittellinie gemessen wurde, sind laterale Abweichungen, wie sie vor allem bei asymmetrisch aufgebauten Instrumenten beobachtet werden [6,7], naturgemäß hier nicht erfasst. Die Diagramme geben Aufschluss über die Stellen und Frequenzen, bei denen Schwingungsenergie ins Instrument fließen kann. Um die Konduktanz, die eine Saite an ihren beiden Auflagepunkten (Sattel bzw. Bund sowie Steg) "fühlt", genauer

auszuwerten, ist eine Schablone [6,8] von Vorteil.

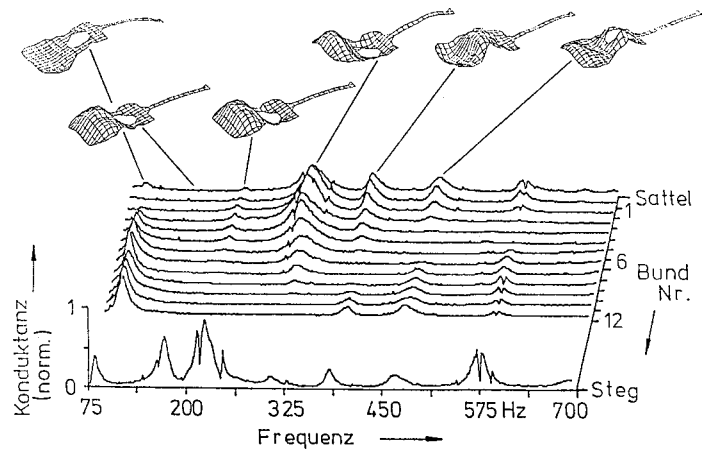


Abb. 4. Normierte Konduktanz an Hals und Steg der akustischen Gitarre.

Die Einzelkurven in Abb. 4 zeigen die Konduktanz über der Frequenz. Gemessen wurde am Sattel (oben), an den ersten zwölf Bünden und am Steg (unten). Alle denkbaren Auflagepunkte einer Saite (leer oder bis zum 12. Bund gegriffen) sind somit erfasst. Für eine weitergehende Interpretation sei auf [4] verwiesen. Zur Illustration der Zusammenhänge sind die Betriebsschwingungsformen eingefügt, die zu den entsprechenden Konduktanz-"Höhenzügen" gehören. Es gibt Formen (ca. 170 und 220 Hz), bei denen vor allem die Decke schwingt, der Hals dagegen in Ruhe ist. Die Konduktanz-"Landschaft" besagt, dass hier Energie vor allem über den Steg ins Instrument gelangt. Das Gegenteil gilt bei ca. 310 Hz. Bei dieser Frequenz liegt ein Schwingungsknoten nahe beim Steg; dagegen vermag gemäß Abb. 4 der Hals vergleichsweise viel Energie aufzunehmen. Für die übrigen Schwingungen lässt das Diagramm erkennen, dass Energie gleichermaßen über den Hals wie auch über den Steg in das Instrument fließen kann.

3.4. Steg- und Halskonduktanz der elektrischen Gitarre

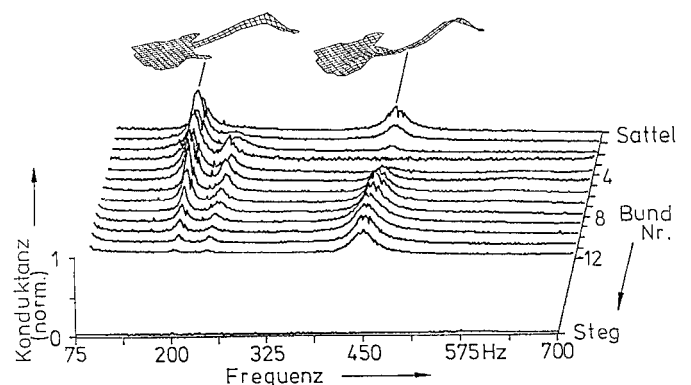


Abb. 5. Konduktanz an Hals und Steg der elektrischen Gitarre.

Abb. 5 ist auf dieselbe Art und im selben Maßstab wie Fig. 4 dargestellt und bezieht sich auf die E-Gitarre. Deren Konduktanz-Landschaft stellt sich wesentlich übersichtlicher als die der akustischen Gitarre dar. Die Stegkonduktanz erweist sich als gleichbleibend klein, d.h. über den Steg fließt praktisch keine Energie in das Instrument. Hierin äußert sich ein elementarer Unterschied zwischen dem elektrischen und dem akustischen Instrument. Wie die Schwingungsbilder zeigen, kann im Gegensatz dazu der Hals recht beweglich sein. Da er bei der E-Gitarre dünner und länger als bei ihrem akustischen Pendant ist, liegen die Schwingungsfrequenzen entsprechend tiefer. So tritt eine vergleichbare Halsschwingung beim akustischen Instrument bei etwa 310 Hz, beim elektrischen dagegen - mit torsionsbedingten Varianten - bereits zwischen 190 und 230 Hz auf. Eine zweite Schwingung mit einem zusätzlichen Knoten etwa am 3. Bund ist bei ca. 430 Hz zu beobachten. Diese beiden Grundschwingungen spiegeln sich als zwei Gebirgszüge in der Konduktanz-Landschaft von Abb. 5 wider. Im betrachteten Frequenzbereich werden bei der untersuchten E-Gitarre keine weiteren Schwingungen beobachtet.

4. Abschließende Diskussion

Mit dem Laser Scanning Vibrometer lassen sich die Schwingungen von Decke und Hals berührungsfrei erfassen und die Betriebsschwingungsformen auf vielfältige Weise visualisieren. Ebenso können die Schwingungen des Bodens - und mit Einschränkungen auch der Seitenwände - gemessen werden. Wenn gewünscht, kann der Messdatensatz einer anschließenden Modalanalyse unterzogen werden. Er lässt sich auch als Basis für weiterführende Rechnungen nutzen. Beispielhaft sei die *Boundary-Element*-Berechnung [9] von Schallleistungs-Frequenzgängen und Richtcharakteristiken einer akustischen Gitarre genannt.

Hier haben gewichtige Gründe, wie z. B. dass neben der Decke auch der Boden betrachtet wurde, für eine Lagerung der Gitarre in einer technischen Vorrichtung gesprochen. Prinzipiell ist eine *in-situ*-Messung vorzuziehen und auch machbar. Darunter ist zu verstehen, dass eine Person das Instrument während des Experiments hält und mit ihrem Körper "natürliche" Randbedingungen schafft. Auf diese Art gewonnene Schwingungsformen und -frequenzen können von denen abweichen, die man für eine "technische" Halterung erhält. Ihre Aussagekraft ist insofern sehr viel höher, als die *in-situ*-Randbedingungen denen im Spielbetrieb sehr nahe kommen.

Willkür hinsichtlich des Anregungspunktes, wie sie bei der Messung von Betriebsschwingungsformen zwangsläufig waltet, entfällt bei der Bestimmung der Admittanz. Die Anregung wandert zum jeweiligen Messpunkt mit. Die Bewegung, mit der die Gitarre auf eine am selben Ort wirkende Kraft antwortet, wird auf die Anregung bezogen. Äußerst aussagekräftig ist das Verhältnis der In-Phase-Komponenten, die Konduktanz. Diese Messgröße ist ein Maß für die Schwingungsenergie, die in den Korpus fließen kann. Da hierfür die Kontaktpunkte Saite-Instrument in Frage kommen, wird die Konduktanz an beiden Enden einer Saite gemessen. Das Ergebnis schließt sämtliche Arten der Umsetzung von Energie (Abstrahlung von Schall infolge der angeregten Korpuschwingungen,

Dämpfung im Material und an Fügestellen des Korpus usw.) ein.

Steht die Abstrahlung von Schall im Vordergrund, sind die (räumlichen) Betriebsschwingungsformen des Gitarrenkörpers von Interesse. Wird primär das Abklingen der Saite behandelt, hat die (punktuelle) Konduktanz an deren Auflagern direktere Aussagekraft. Die Schwingungsenergie, die in den Instrumentenkörper fließt, ruft bei der akustischen Gitarre zum einen den erwünschten - Schall hervor, kann aber zum anderen auch als - unerwünschte - Reibungswärme verloren gehen. Zu welchen Teilen dies geschieht, ist allerdings derzeit nur unvollständig geklärt.

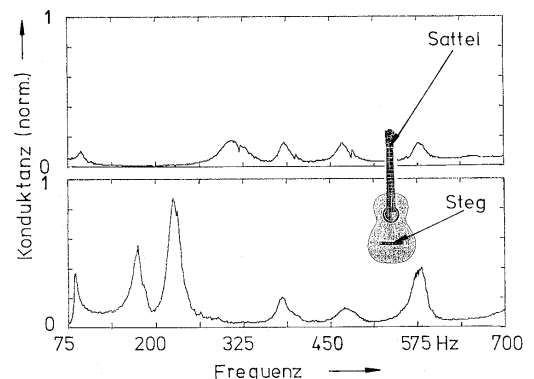


Abb. 6. Konduktanz an Sattel (oben) und Steg (unten) der akustischen Gitarre.

Bereits aus Abb. 4 war zu erkennen, dass die Saiten der akustischen Gitarre – im Widerspruch zum ersten Augenschein – nicht nur am Steg, sondern auch am Hals ein bewegliches Auflager vorfinden. Abb. 6 bekräftigt diesen Sachverhalt noch einmal am Beispiel der Sattel- und Stegkonduktanz an den Auflagern der leeren G_3 -Saite. Die Messkurven sind so zu interpretieren, dass die Saite den Instrumentenkörper vor allem am Steg, aber auch am Hals zum Schwingen zu bringen vermag. Schwingungsenergie kann bei der akustischen Gitarre demnach über beide Enden der Saite in das Instrument gelangen.

Beim elektrischen Instrument stellen sich die Verhältnisse einfacher dar. Der Vergleich der Stegkonduktanzen (unten in Abb. 6 und 7) macht den Unterschied zwischen der "schwingfreudigen" Decke der akustischen Gitarre und dem "schwingunwilligen" Vollholzkörper ihrer elektrischen Schwester deutlich. Folglich ist am Steg der E-Gitarre (Abb. 7 unten) die Konduktanz auch wesentlich kleiner als an ihrem Sattel (Abb. 7 oben). Ausnahmen wurden lediglich bei einigen wenigen Exemplaren beobachtet [6]. Deren erhöhte Stegkonduktanzen können z. B. von einer ungünstigen Positionierung der Brücke oder von einem schlecht ausgeführten Vibrato-Mechanismus herühren. Als Regel gilt jedoch für gut gefertigte *solid-body*-Gitarren: Wenn die Saite den Instrumentenkörper zum Mitschwingen bringt, dann wird dies am halsseitigen Auflager geschehen. Primär fließt bei der elektrischen Gitarre Schwingungsenergie von leer gespielten Saiten über den Sattel und von gegriffenen Saiten über das Griffbrett in den Instrumentenkörper. Der Halskonduktanz gebührt daher größte Aufmerksamkeit.

Anders als bei der akustischen Gitarre ist der Transfer von Schwingungsenergie in den Korpus bei der E-Gitarre prinzipiell unerwünscht, da er keinen Nutzen in Form von

abgestrahltem Schall bringen kann, sondern lediglich die Saite vorzeitig ausschwingen lässt. Die direkte Erzeugung von Schall spielt keine Rolle. Hinsichtlich der Auflagerdämpfung liefert die "objektorientierte" Punkt-Messung an den Kontaktstellen Saite-Instrument hinreichend Information. Die durchweg kleine Stegkonduktanz in Abb. 5 und 7 belegt, dass bei einem gut gefertigten *solid-body*-Instrument die Saiten über ihr korpusseitiges Ende in aller Regel keine Energie abgeben. Von großer Unterscheidungs- und Aussagekraft ist daher die Konduktanz, die sich auf dem Griffbrett der E-Gitarre (oder des E-Basses) messen lässt. Sie stellt *d e n* Indikator für orts- und frequenzselektive Energieverluste am Halsende der Saiten ("dead spots") dar.

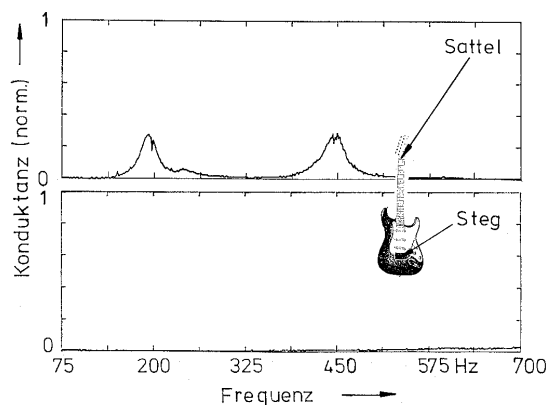


Abb. 7. Konduktanz an Sattel (oben) und Steg (unten) der elektrischen Gitarre.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Laser-Vibrometrie insbesondere im Hinblick auf die nachfolgende Berechnung des Schallfeldes, das ein akustisches Instrument hervorruft [9], das Mittel der Wahl sein wird. In diesem Zusammenhang sollten der hohe Aufwand und die hohen Kosten nicht unerwähnt bleiben, die dieses Verfahren erfordert. Im Vergleich dazu ist die Konduktanz-Messapparatur kompakter und deutlich kostengünstiger. Die Messung der Konduktanz findet ihre bevorzugte Anwendung derzeit bei der Untersuchung von elektrischen Instrumenten [6,8]. Da beide Messverfahren denselben Sachverhalt, nämlich Schwingungen des Instrumentenkörpers, zum Gegenstand haben, ergänzen sie sich gegenseitig, jedoch hat jedes seine ganz spezifischen Anwendungsbereiche.

Literatur

- [1] Richardson, M.H., Is it a mode shape, or is it an operating deflection shape? *Sound and Vibration* **31** (1997), 54 - 61.
- [2] Fletcher, N.H., Rossing, T.D., *The physics of musical instruments*. Springer, New York 1998.
- [3] Jansson, E. V., A study of acoustical and hologram interferometric measurements of the top plate vibrations of a guitar. *Acustica* **25** (1971), 95 - 100.
- [4] Fleischer, H., *Schwingungen akustischer Gitarren*. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik **1/98**. UniBwM, Neubiberg 1998.
- [5] Ziegenhals, G., Persönliche Mitteilung.
- [6] Fleischer, H., *Schwingungsuntersuchungen an elektrischen Gitarren*. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik **2/01**. UniBwM, Neubiberg 2001.
- [7] Fleischer, H., Zwicker, T., Mechanical vibrations of electric guitars. *Acustica - acta acustica* **84** (1998), 758 - 765.
- [8] Fleischer, H., Zwicker, T., Investigating dead spots of electric guitars. *Acustica - acta acustica* **85** (1999), 128 - 135.
- [9] Moosrainer, M., Fleischer, H., Application of BEM and FEM to musical instruments. *Boundary Elements in Acoustics*, WIT Press 2000, 377 - 410.

Magnetische Tonabnehmer für Elektrogitarren

Helmuth E. W. Lemme, freier technischer Autor, 80339 München

1. Einleitung

In der heutigen Rock- und Popmusik stehen Elektrogitarre und Elektrobass stark im Vordergrund. Die Musiker sind hier überaus wählerisch, was ihren „Sound“ betrifft. Es hat sich gezeigt, dass die Tonabnehmer (unter Musikern „Pickups“ genannt) hierauf einen wesentlichen Einfluss ausüben. Sie wandeln die Schwingungen der Saiten in elektrische Wechselspannungen um.

Auf dem Markt sind zahllose verschiedene Typen, und es herrscht ein sehr harter Wettbewerb zwischen den einzelnen Herstellern, der fast rein auf der emotionalen Ebene ausgetragen wird. Sie preisen in schönen Worten die phantastischen Eigenschaften ihrer Produkte an, handfeste technische Fakten darüber, was die verschiedenen Typen mit dem von der Gitarre gelieferten Klangmaterial machen, gibt aber keiner von ihnen heraus. Stattdessen verbreiten sie eher verwirrende Informationen, die nicht den Tatsachen entsprechen. Entsprechend viele Irrmeinungen kursieren in der Musikerszene. Hier ist einige zu korrigieren. An Tonabnehmern ist nichts Magisches, sondern es sind elektrotechnische Geräte – sogar relativ simple. Und für ihre Entwicklung braucht es keine großartige Eingebung, sondern ganz nüchterne Physik – Wechselstromlehre und Ferromagnetismus.

Unter Gitarristen heißt es vielfach: "Der und der Tonabnehmer klingt so und so". Diese Formulierung ist unkorrekt. Ein Tonabnehmer für sich allein „klingt“ nicht. Er kann nur das Tonmaterial weiterverarbeiten, das er von Saiten und Korpus geliefert bekommt. Dies tun die gängigen Typen allerdings keineswegs naturgetreu. Vielmehr verfärbt sie es – jeder Typ in seiner eigenen Weise. Das ist auch durchaus so gewünscht. Es hat schon annähernd neutral übertragende Tonabnehmer gegeben, diese sind bei den Musikern jedoch nicht angekommen. Ein Tonabnehmer hat keinen „Klang“, sondern nur eine „Übertragungscharakteristik“. Diese legt für den letztlich entstehenden Klang lediglich die grobe Richtung fest, ist aber nicht Ursache der wirklichen Feinheiten. Diese kommen vielmehr von Korpus und Saiten.

2. Die verschiedenen Bauarten

Die wesentlichen Bestandteile eines magnetischen Tonabnehmers sind Spulen und Magnete. Die Magnete stecken entweder direkt in den Spulen, oder in diesen sitzen Kerne aus Weicheisen (oft Schrauben), und die Magnete sitzen dann darunter. Abb. 1 zeigt die beiden wichtigsten Bauformen.

Diese Typen haben den Nachteil, dass sie leicht magnetische Wechselfelder von Netztransformatoren oder Leuchtstofflampen-Drosseln einfangen. Das abgegebene Tonsignal ist dann von einem störenden Brummen überlagert. Deswegen wurden doppelspulige Bauformen entwickelt, im Fachjargon „Humbucker“ genannt (zu Deutsch „Brumm-Unterdrücker“. Die Spulen sind hier gegensinnig zusammengeschaltet, so dass sich die Brummsignale in beiden gegenseitig wegheben. Damit sich die Tonsignale

nicht ebenfalls kompensieren, zeigen in der einen Spule die Nordpole

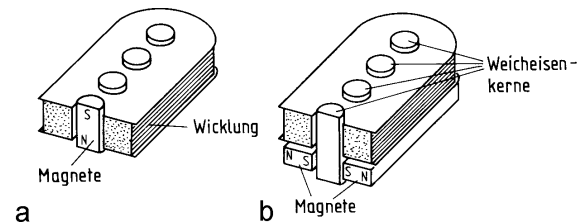


Abb. 1. Tonabnehmer mit einer Spule

der Magnete auf die Saiten und in der anderen die Südpole. Dadurch addieren sich die Tonsignale, und die Ausgangsspannung ist doppelt so hoch wie bei nur einer Spule. Abb. 2 zeigt die wichtigsten Bauarten von doppelspuligen Tonabnehmern.

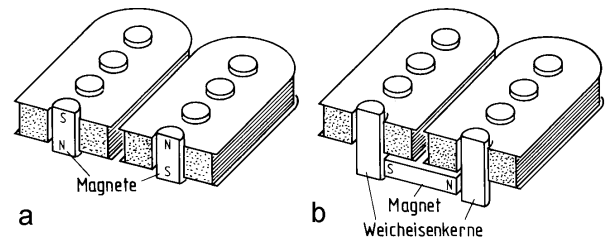


Abb. 2. Tonabnehmer mit zwei Spulen, brummfrei

3. Die elektrischen Eigenschaften

Die Übertragungscharakteristik wird im wesentlichen durch das Wechselstromverhalten der Spulenwicklung bestimmt. Die weitaus wichtigste Größe ist ihre Induktivität L , sie hängt sehr stark von der Windungszahl und von der Spulengeometrie ab, außerdem vom magnetischen Material der in ihr steckenden Kerne (Magnete, Schrauben oder feste Weicheisenteile), nur sehr schwach dagegen von Magneten, die unter ihr montiert sind. Eine weitere Größe, die noch eine gewisse Wirkung ausübt, ist die Kapazität C der Wicklung. Der ohmsche Widerstand R ist nur von untergeordneter Bedeutung. Für eine reale Spule kann man in erster Näherung die in Abb. 3a angegebene Ersatzschaltung verwenden.

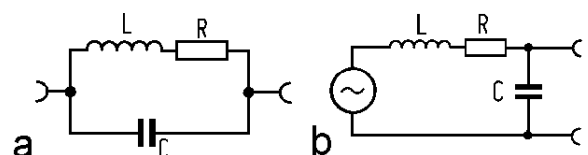


Abb. 3. Ersatzschaltbilder für Tonabnehmer

Für einen doppelspuligen Tonabnehmer sind zwei dieser Schaltungen in Serie zu legen. Da aber beide Spulen (bei präziser Fertigung) praktisch gleiche Eigenschaften haben, darf man hier zur elektrischen Untersuchung ebenfalls die

einfache Ersatzschaltung verwenden, wobei man dann für die Induktivität und den Widerstand den doppelten Wert und für die Kapazität den halben Wert von einer Spule ansetzen muss.

4. Der Frequenzgang: Tiefpass 2. Ordnung

Wenn die Saiten in Ruhe sind, hat der von den Magneten erzeugte magnetische Fluss durch die Spule einen konstanten Wert. Sobald er sich ändert, wird in der Spule eine Spannung induziert. Eine schwingende Saite erzeugt eine Wechsellspannung. Man kann jetzt die Ersatzschaltung umzeichnen, so dass daraus eine Signalquelle mit einigen daran hängenden passiven Bauelementen entsteht, siehe Abb. 3b.

Die Anordnung aus L, R und C stellt einen sogenannten "Tiefpass zweiter Ordnung" dar, eine in der Elektrotechnik weithin bekannte Standardschaltung, die zum Filtern von Frequenzgemischen verwendet wird. Tiefe Frequenzen gehen ungehindert durch, hohe werden abgeschwächt – mit steigender Frequenz immer stärker. Ein solcher Tiefpass besitzt eine gewisse obere Grenzfrequenz f_g . Sie ist so definiert, dass hier die Ausgangsleistung auf den halben Wert gegenüber tiefen Frequenzen abgefallen ist, die Ausgangsspannung demnach auf den Teil $1/\sqrt{2} \approx 70\%$, entsprechend 3 dB Abschwächung. Oberhalb von f_g beträgt die Flankensteilheit 12 dB/Oktave, d. h. die Übertragungsstärke fällt proportional zum Quadrat der Frequenz ab (doppelte Frequenz – ein Viertel der Amplitude). Eine untere Grenzfrequenz ist nicht definiert.

Etwas Unerwartetes passiert bei einem so aufgebauten Tiefpass etwas unterhalb der Grenzfrequenz f_g : Hier kommt es zwischen der Induktivität und der Kapazität zu einem Resonanzeffekt. Beide zusammen bilden einen Schwingkreis aus. Das Ergebnis ist, dass Signalanteile in einem schmalen Frequenzbereich hervorgehoben werden. Aus dem Filter kommt hier eine höhere Spannung heraus, als hineingeht. Es ist aber trotzdem kein "Perpetuum Mobile", denn es kommt nicht mehr Leistung heraus. Der Ausgangsstrom wird entsprechend schwach, ähnlich wie bei einem Transformator. Dieser Effekt ist Hochfrequenztechnikern und Kurzwellen-Amateuren bestens bekannt, man verwendet ihn zur Anpassung von Antennen an Sender. Der typische Frequenzgang eines Tiefpassfilters mit Resonanzstelle hat den in Abb. 4 gezeigten Verlauf.

Genauso verhalten sich auch Gitarren-Tonabnehmer. Die Lage der Resonanzfrequenz und die Stärke der Resonanzüberhöhung sind bei jedem Typ unterschiedlich. Daraus resultiert die jeweilige Übertragungscharakteristik. Dies ist im wesentlichen das "Geheimnis" eines Tonabnehmers. Die Oberwellen in der Umgebung der Resonanzfrequenz werden hervorgehoben, die darüber dagegen abgeschwächt. Nur die Spektralanteile weit unterhalb der Resonanzfrequenz werden unverfälscht übertragen. Bei einigen Typen (vor allem alten deutschen und japanischen) hat die Resonanz auch gar keine Überhöhung, die Wiedergabestärke fällt von den tiefen zu den hohen Frequenzen einfach nur ab.

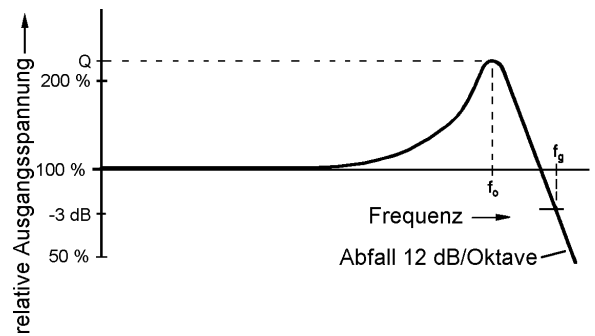


Abb. 4. Typischer Frequenzgang

5. Der Einfluss der äußeren Beschaltung

Im praktischen Betrieb wird der Tonabnehmer nun nicht direkt an den Verstärker angeschlossen. Vielmehr sitzen in den weitaus meisten E-Gitarren und -Bässen noch Regler für Lautstärke und Klangfarbe, und von der Ausgangsbuchse zum Verstärker verläuft ein mehrere Meter langes Koaxialkabel. Dieses hat eine Kapazität, die hier auf keinen Fall zu vernachlässigen ist. Sie ist wesentlich größer als die Wicklungskapazität der Tonabnehmer-Spule und addiert sich zu dieser. Dadurch sinkt die Resonanzfrequenz auf einen niedrigeren Wert als bei einem nicht mit einem Kabel verbundenen Tonabnehmer. Der Lautstärke- und der Klangregler in der Gitarre sowie der Eingangswiderstand des Verstärkers wirken für den Tonabnehmer als ohmsche Last parallel zu seinem Ausgang. Dadurch vermindert sich die Überhöhung der Resonanz gegenüber dem im Leerlauf erreichbaren Wert. Die Ersatzschaltung eines Tonabnehmers im praktischen Betrieb hat dann die in Abb. 5 gezeigte Form.

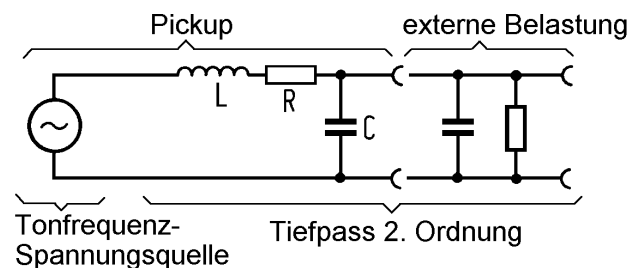


Abb. 5. Tonabnehmer mit externer elektrischer Belastung im praktischen Betrieb

In welcher Weise der Tonabnehmer nun das von den Saiten gelieferte Klangmaterial verfärbt, hängt also nicht nur von seinen eigenen Eigenschaften ab, sondern auch vom Kabel und von den Potentiometern in der Gitarre (für Lautstärke- und Klangeinstellung). Die Übertragungscharakteristik ist demnach keineswegs fest, sondern hat einen gewissen Bereich, innerhalb dessen sie je nach äußeren Bedingungen variieren kann. Das kann man ganz gezielt ausnutzen. Die Hersteller scheinen diese Tatsache allerdings gar nicht zu wissen.

Bei den meisten gängigen Tonabnehmer liegt die Resonanzfrequenz in Verbindung mit durchschnittlichen Kabeln zwischen 2 kHz und 5 kHz, also gerade im Bereich der größten Empfindlichkeit des menschlichen Ohres. Kurz gesagt ergibt sich bei 2 kHz ein weicher, singender, bei 3 kHz ein heller, brillanter, bei 4 kHz ein greller, metallischer und bei 5 kHz oder noch mehr ein spitzer, glas-

harter Ton. Je stärker die Resonanz ausgeprägt ist, um so charakteristischer hört sich der Klang der Gitarre an. Eine schwach oder überhaupt nicht ausgeprägte Resonanz macht den Klang eher ausdruckslos. Die Überhöhungen der meisten gängigen Tonabnehmer liegen meist zwischen 1- und 4-fach (entsprechend 0 bis 12 dB).

Wenn man die externe Lastkapazität variiert, kann man mit nur geringem Materialaufwand die Klangfarbe verändern. Am besten ist der Einbau eines Drehschalters mit mehreren verschiedenen Kondensatoren direkt in die Gitarre. Damit kann man dann die Resonanzfrequenz in Stufen variieren, wie in Abb. 6 gezeigt.

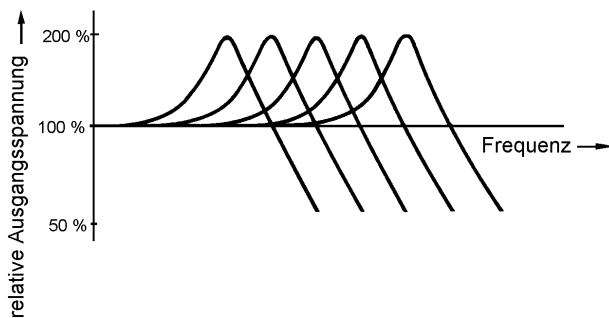


Abb. 6. Mit demselben Tonabnehmer durch Parallelschalten verschiedener Kondensatoren erzielbare Frequenzgänge

6. Messung der Übertragungscharakteristik

Kennt man Resonanzfrequenz und -güte, so hat man die Übertragungscharakteristik eines Tonabnehmers bereits zum größten Teil im Griff. Darüber hinaus gibt es noch einige weitere Effekte, die sich auf diese Weise nicht beschreiben lassen; sie machen aber nur sehr wenig aus. Um die Frequenzgangkurve quantitativ zu messen, müsste man eigentlich die Originalschwingung der Saite noch einmal registrieren und die vom Tonabnehmer abgegebene Spannung in Abhängigkeit von der Frequenz damit vergleichen. In der Praxis lässt sich das aber kaum durchführen. Es gibt aber einen anderen Weg: Die Spannung wird ja durch die Änderung des magnetischen Flusses in der Spule erzeugt. Anstatt die Saite zu bewegen, streut man ein magnetisches Wechselfeld von außen in die Spule ein. Damit die induzierte Spannung vor der Klangverfärbung durch das Tiefpassfilter frequenzunabhängig wird, muss die zeitliche Änderung des Magnetfeldes bei Variation der Messfrequenz konstant bleiben, d. h. die Amplitude muss umgekehrt proportional zur Frequenz sein.

Die Messanordnung besteht aus einem Sinusgenerator, einem Integrator, an dessen Ausgang die Spannung umgekehrt proportional zur Frequenz erscheint, und einem Leistungsverstärker, der die Erregerspule speist. Diese wird so über dem Tonabnehmer montiert, dass sie möglichst gut in dessen Spule(n) einstrahlt. Bei Einzelspul-Typen müssen dazu die Achsen konzentrisch ausgerichtet sein, bei Doppelspul-Typen um 90° verdreht.

Die Messung ist dann einfach: Man variiert die Frequenz des Sinusgenerators und misst die vom Tonabnehmer abgegebene Wechselspannung. Der Absolutwert ist dabei unwichtig, es interessieren nur die Lage der Resonanz und die Überhöhung gegenüber den tiefen Frequenzen. Wie sich verschiedene ohmsche und kapazitive Belastungen

dabei auswirken, lässt sich leicht feststellen. Vorteilhaft ist bei diesem Verfahren, dass an der Gitarre selbst keinerlei Änderungen vorgenommen zu werden brauchen. Der Tonabnehmer braucht nicht ausgebaut zu werden.

Damit diese Messungen breiteren Kreisen von E-Gitarren-Fachleuten möglich wird und so die bisher noch bestehenden Kluff zwischen Instrumentenbauern und Elektronikern überwunden wird, wurde vom Autor das Messgerät „Pickup-Analyzer“[©] entwickelt. Es enthält alle genannten Funktionsteile (Sinusgenerator, Integrator, Endstufe, Messteil) in einem Gehäuse. Die Messwerte für Frequenz und Ausgangsspannung werden auf digitalen Displays angezeigt. Die Erregerspule wird extern angeschlossen. Nach kurzer Einarbeitungszeit ist die Bedienung denkbar einfach. Damit lassen sich alle gängigen Tonabnehmer sehr genau auf ihre Übertragungseigenschaften untersuchen. Technische Fehler (Unterbrechungen, Windungsschlüsse), ungünstige Eigenschaften (fehlende Resonanz) sowie Exemplarstreuungen bei einer ganzen Serie von Tonabnehmern lassen sich damit innerhalb von wenigen Minuten nachweisen. Auch wie sich das Abnehmen der Blechkappe oder der Einbau von anderen Magneten auswirkt, ist eindeutig zu erkennen. Man kann sich anhand der Ergebnisse den Frequenzgang eines Tonabnehmers so zurechtschneiden, dass er optimal zu den Eigenschaften von Korpus und Saiten passt, die für den Grundklang verantwortlich sind.

Detailliertere Informationen siehe unter www.gitarrenelektronik.de

Literatur

Helmuth Lemme: Elektrogitarren-Sound. Pfalum-Verlag München, 1994.

Magnetische Gitarrentonabnehmer

Manfred Zollner
 Fachhochschule Regensburg

1. Der magnetische Kreis

Magnetische Tonabnehmer tasten die Schwingungen der Saiten eines Musikinstruments ab und wandeln sie in elektrische Signale um. Bei Elektrogitarren und –bässen sind hierzu unter den Saiten Permanentmagnete angebracht, um die ein dünner Kupferdraht zu einer Spule gewickelt ist. Der in **Abb. 1.1** vereinfacht dargestellte magnetische Kreis besteht aus zwei Bereichen: Dem Permanentmagnet (häufig Alnico), beschreibbar durch seine Hystereseschleife im B / H –Diagramm, und dem Luftfeld [Grundlagen z.B. in Führer et al.].

Die wichtigsten Größen zur Beschreibung magnetischer Felder sind **Feldstärke H** (mit der Einheit Ampere/Meter = A/m) und **Flussdichte B** (mit der Einheit Voltsekunde/Quadratmeter = Vs/m² = Tesla = T). Das Produkt aus Flussdichte und Fläche wird magnetischer **Fluss Φ** genannt, das geschlossene Linienintegral über die Feldstärke ergibt die **Durchflutung Θ** . Die Durchflutung als Maß für die Ursache des Magnetfeldes ist vergleichbar der Spannung im elektrischen Kreis bzw. dem Druck im Wasserkreis, die Flussdichte entspricht der elektrischen Stromdichte (Stromstärke / Fläche) bzw. dem flächenspezifischen Volumenfluss, und damit der Strömungsgeschwindigkeit. Um im Wasserkreis bei gegebenem Druck die durchfließende Menge zu vergrößern, muss der Strömungswiderstand verkleinert werden, z. B. durch Vergrößern des Rohrquerschnitts. Beim elektrischen Kreis nimmt (bei eingepprägter Spannung) die Stromstärke zu, wenn der elektrische Widerstand verkleinert wird, z. B. durch Vergrößern des Drahtquerschnitts.

Der **Widerstand R_m** im magnetischen Kreis wird von zwei Komponenten bestimmt: Dem sog. Eisenwiderstand R_{Fe} (der heißt so, auch wenn der Magnet nicht aus reinem Eisen besteht), und dem Luftwiderstand R_L . Der Eisenwiderstand ist bei üblichen Magneten ortsunabhängig, aber feldstärkeabhängig und somit nichtlinear. Der volumenspezifische Luftwiderstand ist ortsunabhängig und feldstärkeunabhängig (also linear), das Luftfeld ist aber inhomogen, weil die Feldstärke in hohem Maß vom Ort abhängt: Je weiter man sich vom Magnet entfernt, desto geringer wird die Feldstärke. Das Produkt aus Widerstand und Fluss gibt die **magnetische Spannung V_m** als Teil der Durchflutung. Die **Permeabilität μ** beschreibt die magnetische Materialeigenschaft: Je größer μ , desto kleiner ist der magnetische Widerstand.

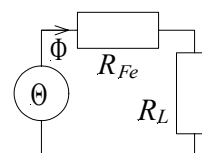
Der volumenspezifische magnetische Widerstand einer Stahlsaite ist nichtlinear und viel kleiner als der magnetische Luftwiderstand. Wenn eine Stahlsaite ins Magnetfeld gebracht wird, vergrößert sich in diesem Bereich folglich der magnetische Teilfluss. Dies wirkt sich in magnetfernen Gebieten nur unwesentlich auf den Gesamtfluss aus, da die Teilflüsse im Fernfeld sehr gering sind. Im Nahbereich des Magneten bewirkt das Einbringen einer Stahlsaite aber eine wesentliche Zunahme des magnetischen Gesamtflusses.

Das Hin- und Herschwingen einer Stahlsaite im Nahbereich eines Magneten kann folglich zu einer zeitlichen Änderung des Magnetflusses durch den Magneten führen – mit unterschiedlicher Effizienz:

Schwingt die Saite in einer Ebene, in der die Feldstärke konstant (d.h. ortsunabhängig) ist, so ändert sich hierdurch zwar die örtliche Feldverteilung, aber nicht der Gesamtfluss. Nur wenn die Saite zwischen Gebieten mit unterschiedlicher Feldstärke hin- und herschwingt, ergeben sich Auswirkungen auf den Gesamtfluss. Ein Magnettonabnehmer der hier dargestellten Bauart ist somit insbesondere für Saitenschwingungen empfindlich, die *normal* zu seiner Magnetpoloberfläche verlaufen; d.h. den Saitenabstand zum Magnet ändern. Schwingungen, die *parallel* zur Magnetpoloberfläche verlaufen, erzeugen nur eine geringe Ausgangsspannung, hierfür ist der Tonabnehmer unempfindlich.

Die zeitlichen Änderungen des Magnetflusses können von einer Spule in elektrische Signale umgewandelt werden. Das **Induktionsgesetz** besagt, dass die pro Windung induzierte Spannung der zeitlichen Ableitung des Magnetflusses entspricht. Da der Magnetfluss vom Ort der Saite beeinflusst wird, hängt die Flussänderung von der Ortsänderung, d.h. von der Saitengeschwindigkeit ab; diese wird manchmal auch als **Schnelle** bezeichnet. Um die doch recht kleinen Flussänderungen gut erfassen zu können, sind Spulen mit vielen Drahtwindungen erforderlich. Häufig liegt die Windungszahl zwischen 5000 – 10000, der Drahtdurchmesser ist zumeist kleiner als 0,1 mm. Hiermit werden bei üblichem Anschlag (im elektrischen Leerlauf) Spannungen von etwa 1V erzeugt.

Die vom Tonabnehmer produzierte Spannung hängt von vielen Faktoren ab. Vom Musiker direkt beeinflussbar ist die Anschlagstärke, welche wiederum die Saitenauslenkung und damit die -geschwindigkeit beeinflusst. Für kleine Auslenkungen kann das Gesamtsystem linearisiert werden, zur doppelten Auslenkung gehört dann die doppelte Geschwindigkeit und somit auch die doppelte Spannung. Bei üblichem (starken) Saitenanschlag ist aber bereits mit erheblichen Nichtlinearitäten zu rechnen.



$$V_m = \int H ds = R_m \cdot \Phi$$

$$\Phi = B \cdot A; \quad B = H \cdot \mu$$

$$\Theta = \oint H ds$$

Abb. 1.1: Magnetischer Kreis

Die elektrische Spannung hängt ferner ab vom Saitendurchmesser, vom Saitenmaterial und vom Abstand zwischen Saite und Magnet. Massive Saiten geben mit zunehmendem Durchmesser mehr Spannung ab – wenn sie vergleichbar schwingen. Dies ist aber nicht grundsätzlich gegeben, weil mit zunehmendem Durchmesser die Federsteifigkeit steigt, wodurch die Auslenkung abnimmt. Umspinnene Saiten sind wegen der eingeschlossenen Luft weniger effizient als massive Saiten. Das Saitenmaterial hat auf die mechanoelektrische Übertragung eher wenig Einfluss, sofern es Nickel, Stahl oder ähnlich hochpermeables Material ist. Die hörbaren Klangunterschiede zwischen Nickel- und Stahlsaiten kommen zum großen Teil vom unterschiedlichen (mechanischen) Schwingungsverhalten der Saite. Der Einfluss des Saitenabstandes auf die elektrische Spannung ist kompliziert, mit zunehmendem Abstand verkleinert sich die Spannung (siehe später). Die Frequenzabhängigkeit wird in den nächsten beiden Kapiteln ausführlich dargestellt

2. Zweipolersatzschaltbild

Um die Übertragungscharakteristik des Tonabnehmers (TA) quantitativ beschreiben zu können, sind neben den magnetischen Größen die elektrischen Daten erforderlich. In aller Regel spezifizieren die Hersteller aber keine Daten (die Bezeichnung Wahnsinns-Sound ist wenig hilfreich), so dass nur Messungen und hieraus abgeleitete Ersatzschaltungen weiterhelfen. Ersatzschaltungen für Wandler sind seit langem bekannt [z. B. Feldtkeller / Nonnenmacher]. Die TA-Wicklung mit ihren vielen tausend Windungen stellt eine erhebliche Induktivität dar (1 ... 10 H), der lange dünne Kupferdraht (knapp 1 km) liefert einen ohmschen Widerstand von einigen Kiloohm. Der Abstand zwischen hoher und tiefer E-Saite beträgt ca. 5 cm, daraus ergibt sich für kleine TA (z. B. Stratocaster) eine Wicklungsfläche S von ca. $6 \times 1 \text{ cm}^2$. Mit ca. 1 cm Wicklungshöhe und 5500 Windungen kann die Induktivität beispielhaft zu

$$L = N^2 \mu S / h = 2.3 \text{ H}$$

abgeschätzt werden; dies passt gut zu den Messwerten normal-lauter TA. Zu beachten ist, dass die Induktivität durch das Magnetmaterial kaum verändert wird; die Hysterese verläuft im Arbeitspunkt schon ziemlich flach, deshalb gilt für die Permeabilität $\mu \approx \mu_0 = 1.26 \text{ } \mu\text{H/m}$. Bei einem gemessenen Kupferwiderstand von ca. $6 \text{ k}\Omega$ ergibt sich ein Kupferdurchmesser von ca. 0.05 mm . Derartige dünne Drähte sind zwar schwer verarbeitbar, aus Platzgründen verwendet man aber nur selten dickere Drähte (AWG #42 = $64 \mu\text{m}$ Gesamtdurchmesser).

Neben der Wicklungsinduktivität L und dem Wicklungswiderstand R muss aber auch noch die Wicklungskapazität C berücksichtigt werden. Sie kann für Spulen üblicher Bauart abgeschätzt werden [Feldtkeller / Bosse]:

$$C \approx 2bl / h \cdot \text{pF/cm}$$

Für 1.1 cm Wicklungsbreite b , 0.3 cm Wicklungshöhe h und 14 cm Windungslänge l ergibt sich eine Kapazität von 101 pF ; Messungen ergeben mit 120 pF vergleichbare Werte (Stratocaster). Einige Tonabnehmer haben eine größere Wicklungshöhe bei kleinerer Wicklungsbreite, z. B. ergibt

sich für den Jazzmaster-TA: $b = 4 \text{ mm}$, $h = 14 \text{ mm}$, daraus $C \approx 10 \text{ pF}$.

Die Gültigkeit des Ersatzschaltbildes kann durch Vergleich von Impedanz-Messungen mit -Berechnungen bewiesen werden. Die Impedanz ist der komplexe elektrische Widerstand, der an den Anschlussklemmen des TA bestimmt wird. **Abb. 2.1** zeigt ein elektrisches Ersatzschaltbild des TA (**ESB1**). Bei sehr tiefen Frequenzen wird die Impedanz durch den Kupferwiderstand R bestimmt, bei einigen kHz ergibt sich ein Resonanzmaximum, bei hohen Frequenzen erfolgt ein kapazitätsbedingter Abfall. Für die Messung wurde ein älterer Stratocaster-TA (70er Jahre) über kurze Zuleitungen ohne weitere Bauteile (also ohne Potentiometer etc.) an ein Impedanzmessgerät angeschlossen. Zwischen Messung und Rechnung gibt es eine prinzipielle Übereinstimmung, die Ausprägung der Resonanzspitze ist aber unterschiedlich. Zusätzliche Bedämpfung liefert ein eingefügter Querwiderstand R_q ; er wirkt sich nur im Bereich großer Impedanz, d.h. in der Umgebung der Resonanz aus. **Abb. 2.2** zeigt das um R_q erweiterte Ersatzschaltbild **ESB2**. Der Vergleich Messung / Berechnung zeigt nun sehr gute Übereinstimmung. Ähnliche Ergebnisse lassen sich bei allen TA erwarten, die Einzelmagnete ohne weitere Metallteile enthalten.

Weniger gut geeignet ist das **ESB2** bei TA mit Abschirmblechen oder mit unter der Spule liegenden Balkenmagneten. Der magnetische Wechselfluss induziert hierbei nicht nur in der Spule, sondern auch in den Metallteilen eine elektrische Spannung, die zu einem Wirbelstrom führt. Die Metallteile wirken wie eine kurzgeschlossene Sekundärwicklung. Der Widerstand dieser Kurzschlusswicklung (einige $\text{m}\Omega$) wird mit dem quadrierten Windungsübersetzungsverhältnis (z. B. 5500^2) hochtransformiert und ergibt einen nicht zu vernachlässigenden Querwiderstand im Ersatzschaltbild. **Abb. 2.3** zeigt eine Impedanzmessung bei einem TA aus einer Hoyer-Gitarre (60er Jahre). Ähnliche TA wurden damals auch von Framus verwendet, der Entwickler war vermutlich Billy Lorento alias Bill Lawrence alias Willi Lorenz Stich. Unter der Spule liegen hier zwei Balkenmagnete, die von einem Bodenblech gehalten werden, zusätzlich ist von oben eine metallene Abschirmkappe über den TA gestülpt. Mit R_q kann zwar das Resonanzmaximum approximiert werden, die Übereinstimmung um 1 kHz ist aber nur mäßig.

Die Unterschiede werden deutlicher, wenn an den TA ein übliches **Gitarrenkabel** angeschlossen wird. Im hörbaren Frequenzbereich wirkt es rein kapazitiv, je nach Länge ergibt sich eine zusätzliche Querkapazität von $300 - 1300 \text{ pF}$ (Messung). Das Impedanzmessgerät ermöglichte die Zuschaltung von $K = 0 \text{ pF}$, 330 pF , 707 pF , 1037 pF , 4700 pF . Je größer die Kapazität, desto niedriger die Resonanzfrequenz.

In **Abb. 2.4** sind die Kurven für unterschiedliche kapazitive Belastung dargestellt, die Wirbelstromverluste führen doch schon zu deutlichen Abweichungen zwischen Messung und Rechnung.

Abb. 2.6 zeigt für einen Hoyer-TA den Einfluss der Blech-Abschirmkappe auf den Impedanzfrequenzgang. Durch die Wirbelströme wird nicht nur das Resonanzmaximum abgesenkt, es erhöht sich auch die Resonanzfrequenz.

Für eine genaue Approximation ist es erforderlich, die Wirbelstromverluste mit dem Ersatzschaltbild des lose gekoppelten Übertragers nachzubilden [Feldtkeller, Führer]. Hierfür gibt es mehrere Möglichkeiten. Eine einfache Schaltungsergänzung besteht aus der Parallelschaltung einer verlustbehafteten Spule (**ESB3**), in **Abb. 2.8** als $L_x R_x$ bezeichnet. Zwar sind Induktivität und Verlustwiderstand der als Blech realisierten Kurzschlusswicklung ziemlich klein, sie werden wegen des großen Windungsverhältnisses aber gewaltig hochtransformiert. Ihre Parallelschaltung bewirkt zweierlei: Durch L_x verringert sich die Gesamtinduktivität, wodurch die Resonanzfrequenz vergrößert wird, und wegen R_x ändert sich die Dämpfung.

Ob die Wirbelstromverluste tatsächlich nachgebildet werden müssen, hängt vom Aufbau des TA und von der gewünschten Genauigkeit ab. In vielen Fällen wird auch das ESB2 zufriedenstellende Ergebnisse liefern. In **Abb. 2.9** und **Abb. 2.10** sind die Impedanzfrequenzgänge von zwei kapazitiv belasteten TA dargestellt. Beim Stratocaster-TA erkennt man eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung, beim P90 sind kleinere Abweichungen sichtbar. Mit einer ESB3-Modellierung ergibt sich auch für diesen TA eine perfekte Übereinstimmung.

3. Vierpolersatzschaltbild

Ein Instrumental-TA soll natürlich nicht nur als komplexer Widerstand (Zweipol) wirken, sondern mechanische Saitenschwingungen in elektrische Signale umwandeln. Hierzu braucht er – systemtheoretisch betrachtet – einen Eingang und einen Ausgang (Vierpol). In der Realität ist das Eingangssignal der sich zeitlich ändernde Magnetfluss. Seine Nachbildung im Ersatzschaltbild ist nicht ganz so einfach: Entweder man nimmt im ESB einen konstanten Stromfluss durch die Spule an, und modelliert den sich durch die Saitenbewegung ändernden magnetischen Widerstand als Zeitvariante Induktivität, oder man stellt sich den magnetischen Wechselfluss modellhaft als von einer wechselstromgespeisten Sendespule kommend vor.

Die Gültigkeit dieser Simulation kann leicht überprüft werden: In einem Versuch wurde eine kleine Spule (1cm x 6cm, 10 Windungen) mit eingepprägtem Strom (13 mA) gespeist und auf einen Stratocaster-TA gelegt. Der gemessene Übertragungsfrequenzgang (...) ist in **Abb. 3.1** dargestellt. Zum Vergleich wurde mit den aus der Impedanzmessung (ESB2—) gewonnenen Bauteilwerten die Übertragungsfunktion berechnet. Wie man sieht, sind die beiden Kurven fast identisch, das ESB ist folglich geeignet.

Die **Bandpasscharakteristik** verdient besondere Beachtung: Quelle ist ein eingepprägter Strom mit frequenzunabhängiger Amplitude. Dem entspricht eine frequenzunabhängige Magnetflussamplitude, die wiederum von einer frequenzunabhängigen Saitenauslenkung hervorgerufen wird. Bei einer realen Saite nimmt hingegen die Auslenkung zu hohen Frequenzen hin ab, was aber die Gültigkeit des ESB nicht beeinträchtigt: Die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung bleibt erhalten, weil für die Frequenzabhängigkeit des Sendespulenstroms und der

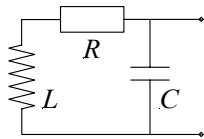
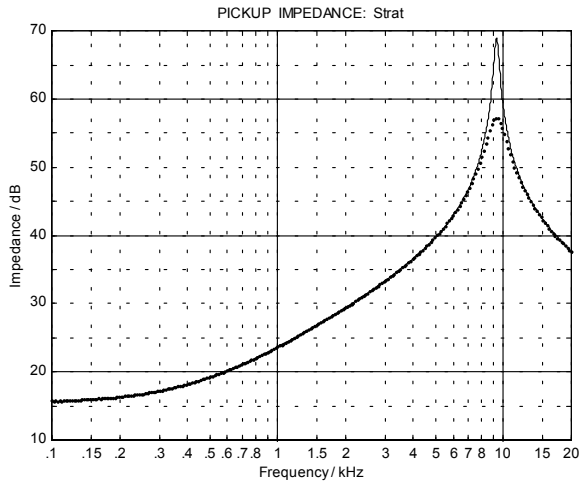
ESB-Stromquelle jede (übereinstimmende) Charakteristik angenommen werden kann.

Bei einem wirbelstrombedämpften TA ergibt die Anregung durch eine Sendespule ein ziemlich kompliziertes System, weil nun drei gekoppelte Spulen vorliegen: Die Sendespule, die TA-Spule, und die Kurzschlußwicklung. Zwischen ihnen gibt es drei unbekannte Kopplungsfaktoren, wodurch bei der Simulation zu viele Freiheitsgrade entstehen. Um den Aufwand zu begrenzen ist es sinnvoll, nur die Feldeinkopplung in die TA-Spule zu simulieren, d.h. die *direkte* Kopplung zwischen Sendespule und Kurzschlusswicklung zu ignorieren. In **Abb. 3.2** sind für einen Gibson P90 das Messergebnis und die Berechnung auf der Basis von ESB3 gegenübergestellt (die Hoyer stand für diese Messungen nicht zur Verfügung). Die Übereinstimmung ist so gut, dass eine aufwändigere Simulation nicht weiter verfolgt wurde.

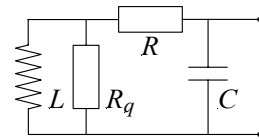
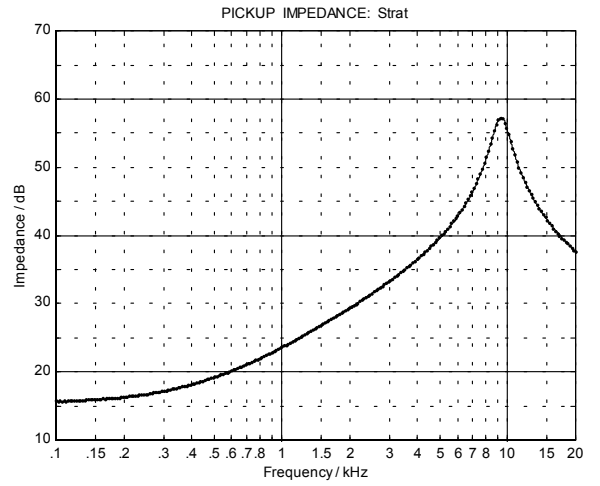
Die in **Abb. 3.1** und **3.2** dargestellte Bandpasscharakteristik erweckt den Eindruck, als würde eine Elektrogitarre hauptsächlich mittlere Frequenzen übertragen. Wie schon erläutert, ist hierfür die gewählte Feldeinkopplung verantwortlich. Spektralanalysen von Gitarrensensoren haben jedoch gezeigt, dass anstelle eines Bandfilters ein **Tiefpass** das besser verständliche Ersatzschaltbild darstellt. Zwar kann kein Magnet-TA Gleichspannung liefern, aber ab etwa 100 Hz ist die Tiefpasscharakteristik geeignet. In **Abb. 3.3** ist ein Terzspektrum vom mittleren TA einer Stratocaster dargestellt. Die linke Hand dämpft die Saitenschwingung leicht ab, so dass nur wenig tonale Anteile entstehen, die rechte Hand schlägt mit einem Plektrum alle Saiten an. Im Bereich ab etwa 100 Hz zeigt die Terzanalyse tatsächlich Tiefpass-, und nicht Bandpassverhalten. Dass Übertragungsfunktion (Systemgröße) und Terzspektrum (Signalgröße) eigentlich zwei verschiedene Dinge sind, sollte für theoretische Betrachtungen beachtet werden.

Um vom Bandpass- zum Tiefpassverhalten zu gelangen, muss lediglich dem Erregerstrom I des ESB eine $1/f$ -Charakteristik gegeben werden. Ergänzend ist noch die Gitarrenelektrik zu berücksichtigen, die häufig aus einem Lautstärkepotentiometer (250k Ω –1M Ω) und einem Klangpotentiometer (250k Ω –1M Ω , in Reihe mit einem Kondensator von ca. 20nF) besteht. Bei zugeordnetem Klangpotentiometer liegt der Kondensator parallel zum TA und bedämpft die Höhen, bei aufgedrehtem Klangpotentiometer ist nur der Widerstand wirksam.

Abb. 3.4 zeigt das Tiefpassübertragungsverhalten einer USA-Standard-Stratocaster, belastet mit unterschiedlichen Kabelkapazitäten. Der Einfluss des Kabels ist erheblich, aber natürlich können dieselben Effekte auch durch Parallelschalten einfacher Kondensatoren erreicht werden. Hals- und Mitten-TA haben gleiche Daten, sind aber durch die Potentiometer unterschiedlich belastet, wodurch sich eine unterschiedliche Resonanzüberhöhung ergibt. Der Steg-TA hat mehr Windungen und somit eine niedrigere Resonanzfrequenz. **Abb. 3.5** zeigt ähnliche Darstellungen für verschiedene Gitarren, jeweils mit 680pF Kabelkapazität belastet. Beim Anschluss an einen Verstärker ist dessen Eingangswiderstand als weitere Belastung zu berücksichtigen; bei typischen Röhrenverstärkern ist mit 1M Ω zu rechnen (im Bild nicht berücksichtigt).



ESB1



ESB2

Abb. 2.1: TA-Impedanz, ESB1, Stratocaster
Messung (...), ESB-Rechnung (—).

Abb. 2.2: TA-Impedanz, ESB2, Stratocaster
Messung (...), ESB-Rechnung (—).

Impedanzordinate: 20dB = 1kΩ, 40dB = 100kΩ, 60dB = 1MΩ etc.

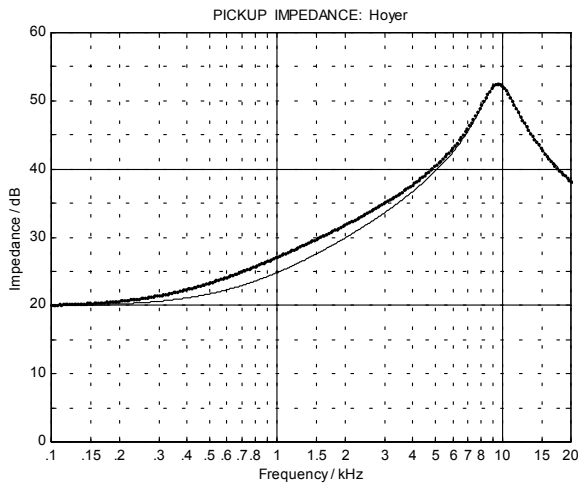


Abb. 2.3: TA-Impedanz, ESB2, Hoyer

Messung (...), ESB-Rechnung (—). Impedanzordinate: 20dB = 1kΩ, 40dB = 100kΩ, 60dB = 1MΩ etc.
Der TA wurde in Abb. 2.3 mit 0pF, in Abb. 2.4 mit 0, 330, 707, 4700pF belastet.

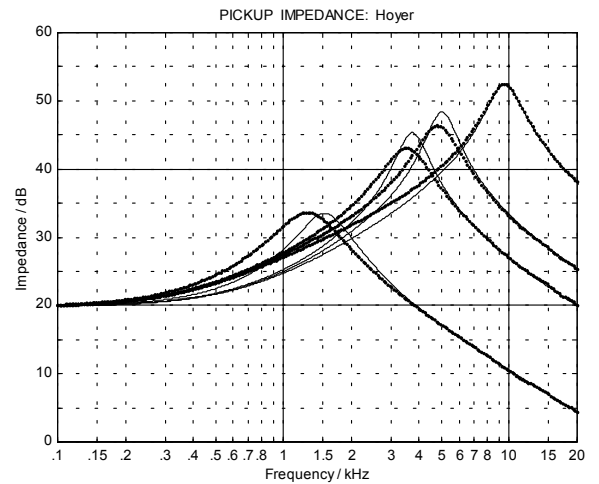
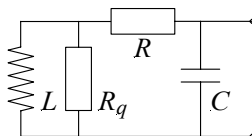


Abb. 2.4: TA-Impedanz, ESB2, Hoyer

Abb. 2.5: ESB2
Hoyer-TA mit Deckel



$$L = 2,17 \text{ H} \quad R = 9850 \text{ } \Omega$$

$$R_q = 540 \text{ k}\Omega \quad C = 125 \text{ pF}$$

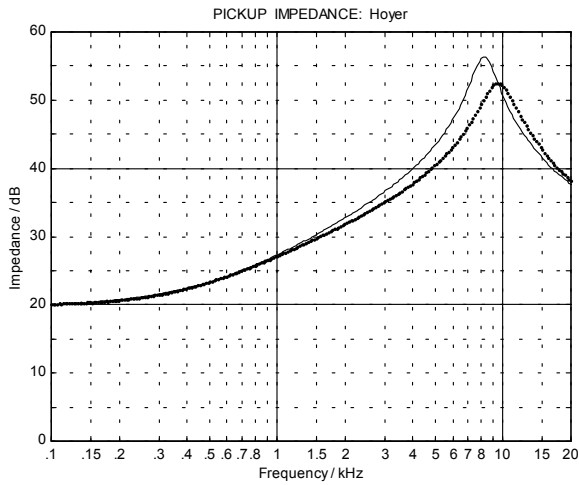


Abb. 2.6: TA-Impedanz, Messung Hoyer, mit (...) / ohne (—) Deckel

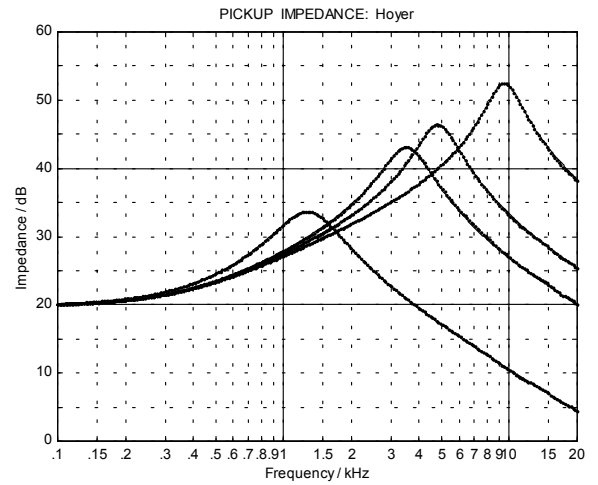
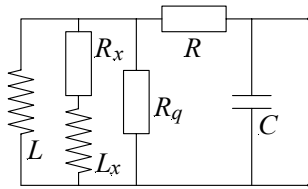


Abb. 2.7: TA-Impedanz, ESB3, Hoyer mit Deckel, Messung und Rechnung sind gleichwertig

Abb. 2.8: ESB3 Hoyer-TA mit Deckel



$$\begin{aligned}
 L &= 3,2 \text{ H} \\
 L_x &= 7,7 \text{ H}, \quad R_x = 120 \text{ k}\Omega \\
 R_q &= 729 \text{ k}\Omega \\
 R &= 9850 \text{ }\Omega \\
 C &= 125 \text{ pF}
 \end{aligned}$$

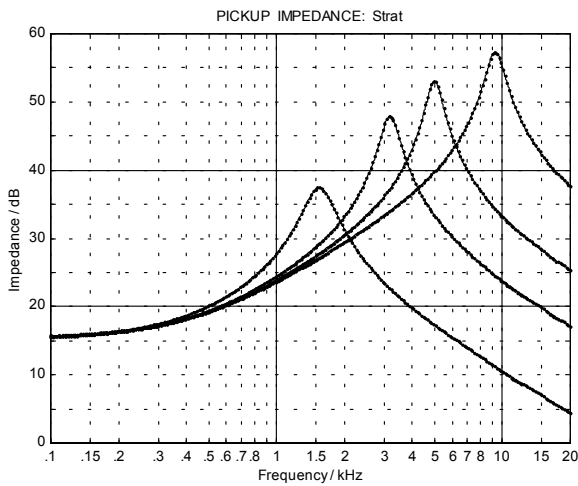


Abb. 2.9: TA-Impedanz Stratocaster, ESB2.

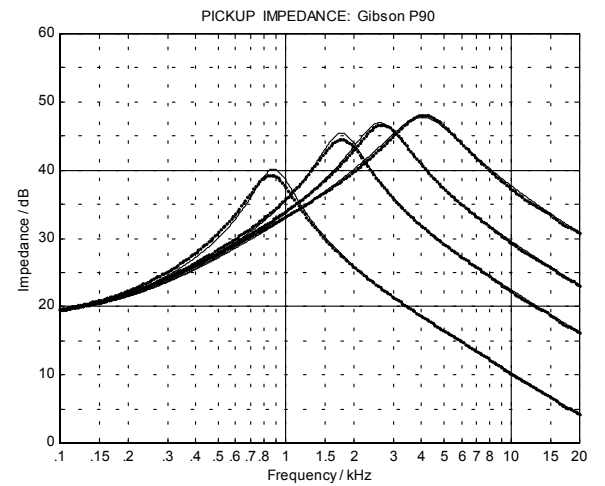


Abb. 2.10: TA-Impedanz Gibson P90, ESB2.

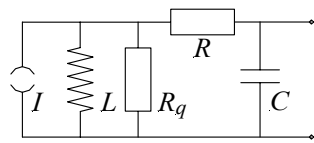
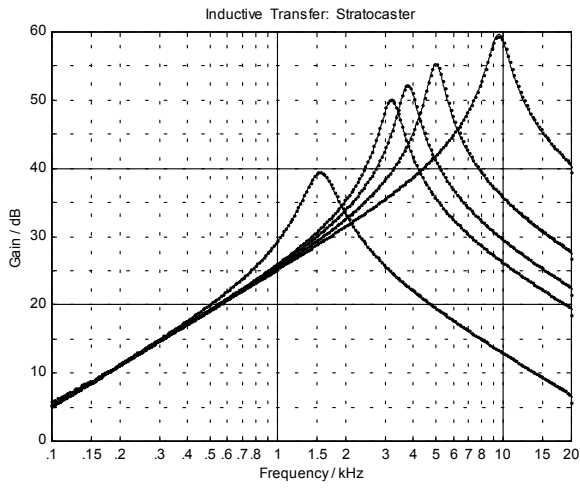


Abb. 3.1: Transfercharakteristik Stratocaster, ESB2.

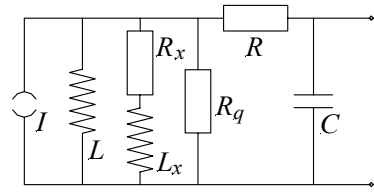
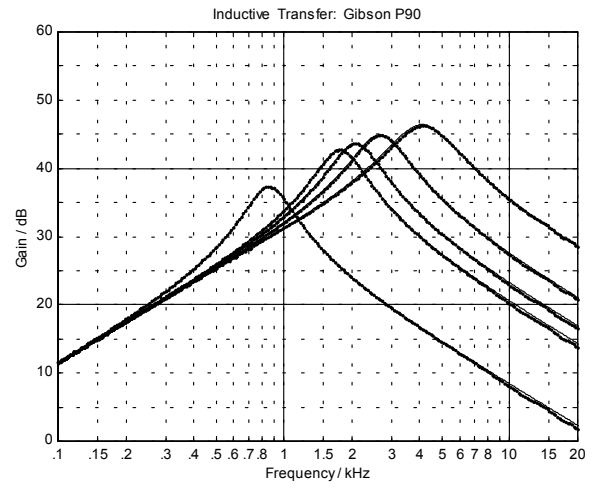


Abb. 3.2: Transfercharakteristik Gibson P90, ESB3.

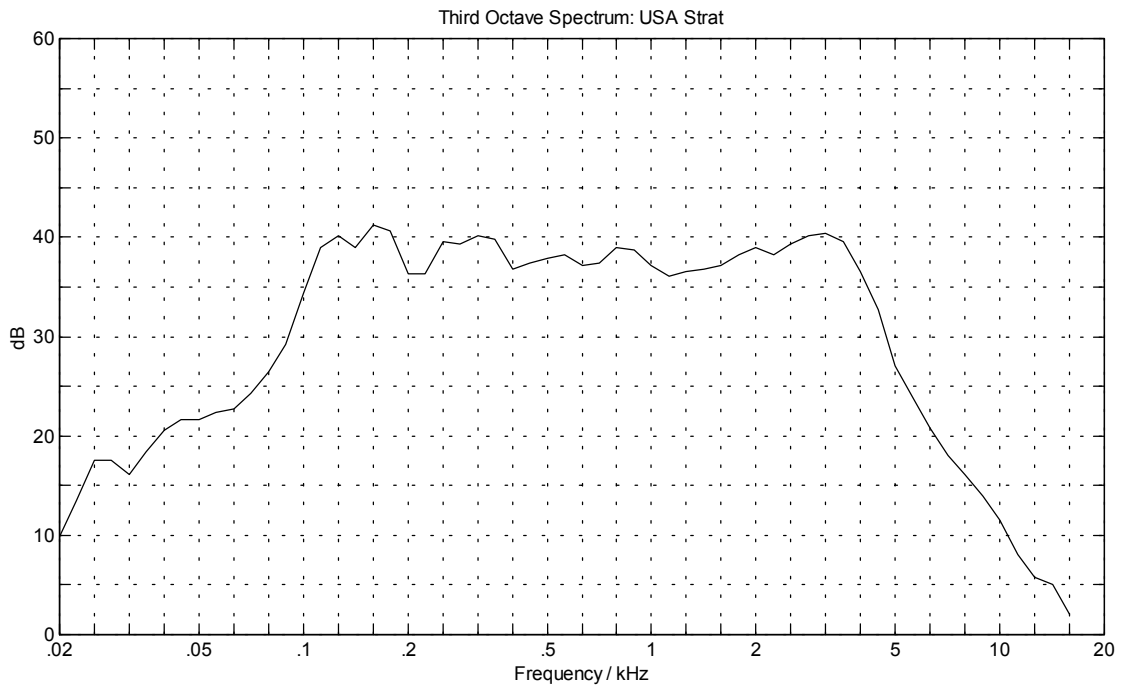


Abb. 3.3: Terzspektrum, Stratocaster, mittlerer TA, Saiten abgestoppt.

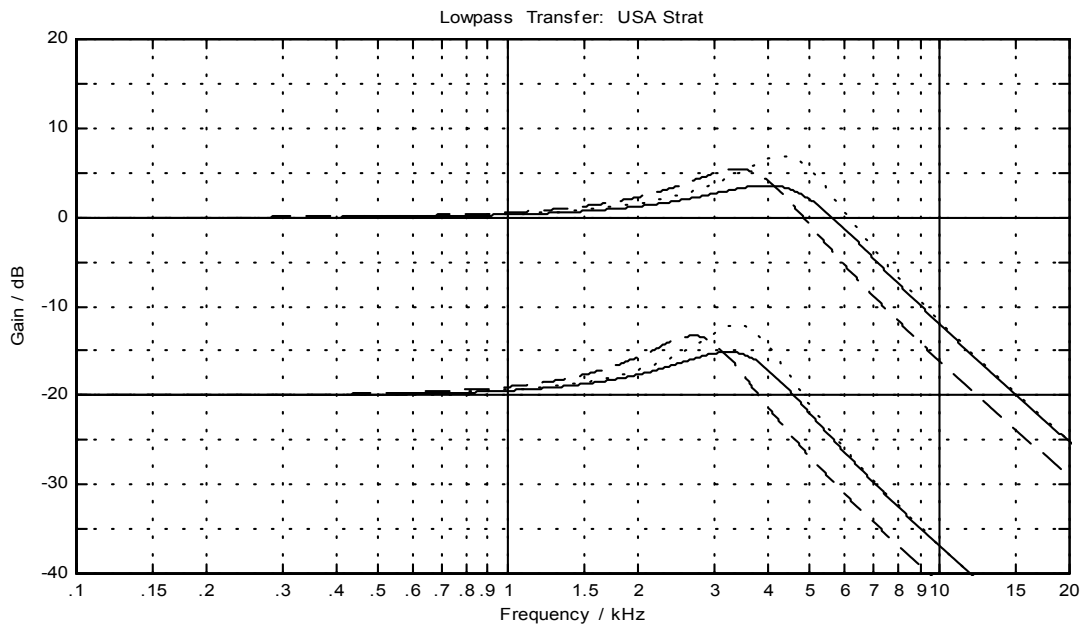


Abb. 3.4: Stratocaster, Tiefpaßübertragung, 330pF (oben) bzw. 680pF Kabel (unten, 20dB abgesenkt). Hals-TA (—), Mitten-TA (....), Steg-TA (----). Grundverstärkung auf 0dB bzw. -20dB normiert.

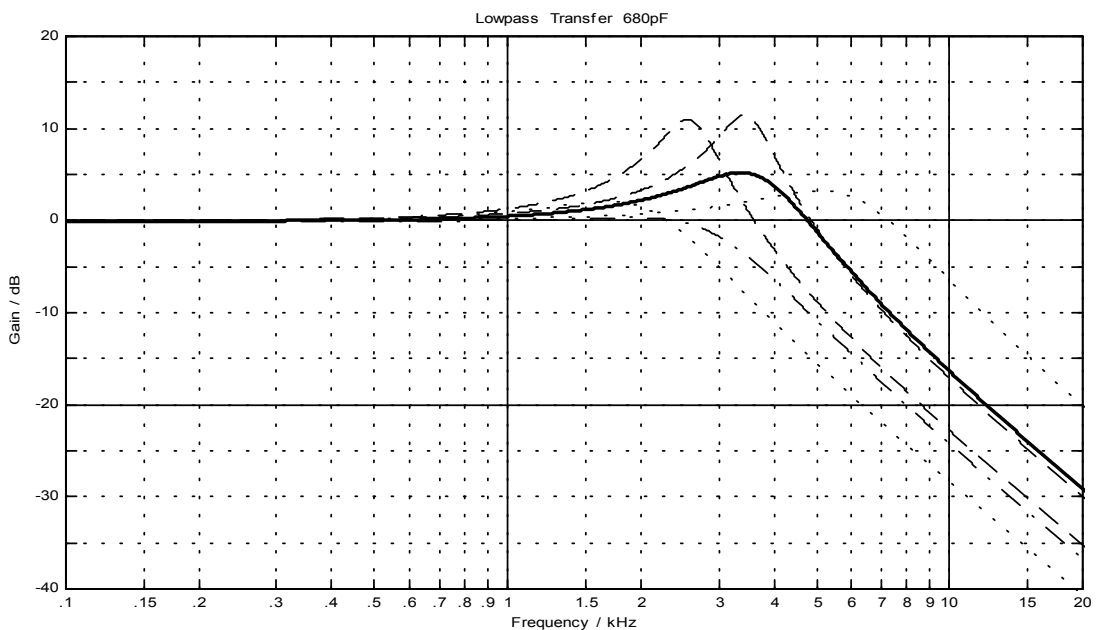


Abb. 3.5: Tiefpaßübertragung: Gretsch Tennesseean (.... 5kHz Resonanz), Telecaster (--- 3.5 kHz), Jazzmaster (--- 2.6 kHz), Stratocaster 70er (—), Sheraton (-.-.-), Gibson P90 (....), jeweils 680pF Last. Alle Kurven sind vertikal so verschoben, daß sie bei tiefen Frequenzen durch 0dB gehen.

Weiterführende Literatur:

Führer A., Heidemann K., Nerretter W.: Grundgebiete der Elektrotechnik, Hanser 1997

Feldtkeller R., Nonnenmacher W.: Einheitliche elektr. Ersatzschaltbilder für elektroakust. Wandler, AEÜ 8, 1954

Feldtkeller R., Bosse G.: Einführung in die Technik der Nachrichtenübertragung, Wittwer 1968

Feldtkeller R.: Theorie der Spulen und Übertrager, Stuttgart 1971

Lemme H.: Elektrogitarren-Sound, Pflaum 1995

Zollner M., Zwicker E.: Elektroakustik, Springer 1998

<http://www.fh-regensburg.de>, → Fachbereich Elektrotechnik, → Akustik-Labor

Ein Beitrag zur Analyse der Klangformung im Anfangszustand von gezupften Klängen, dargestellt an Hand von Gitarrenklängen damit zusammenhängende instrumentenbauliche Probleme

Edgar Lieber

Erich Ohser Str. 10, D-08525 Plauen, Rentner, bis 1984 Mitarbeiter des Institutes für Musikinstrumentenbau Zwota

Summary

Während des Beginns der Tonempfindung 0,01 bis 0,03 s nach dem Anzupfen existieren im Gitarrenklang neben den von der Saite initiierten und vom Korpus modifizierten quasistationären Klanganteilen noch merklich Transienten, die vom Korpus und der Luftsäule des Schall-Lochs her rühren und trotz ihrer kurzen Dauer den Klangeindruck merklich beeinflussen. Die Klangbildung wird analytisch verfolgt.

Es wird diskutiert, wie der Instrumentenbau auf diesen Sachverhalt reagiert.

1. Grundsätzliches zur Klangwahrnehmung

Nach dem Anzupfen

- 1 ms Beginn der Hör-Erkennung
- 10 ms bis 30 ms Beginn der Tonempfindung

2. Verwendetes Modell

Vereinfachtes Modell nach Griffen et al (Lit. 1). Korpus als rechteckiger Kasten mit Schall-Loch. Koordinatensystem x, y (Deckenkoordinaten), z (Schwingungskordinate Decke), u (do im Schall-Loch). Decke nicht ausgearbeitet, um Unterschiede zur ausgearbeiteten Decke zu zeigen. Tabelle 1 gibt die in die Rechnung eingegangenen Korpusparameter wieder, weiter auch die den Randbedingungen „Decke allseitig drehbar an den Rändern gelagert“ entsprechenden Eigenzustände der Deckenschwingung, die durch n, m gekennzeichnet sind. Gegenüber der ausgearbeiteten berippten Decke liegen deren Eigenresonanzen gem. (Lit. 2) sehr ungünstig. Tabelle 1 zeigt auch die Dämpfungskonstanten für Klangholz, die sehr beträchtlich sind und mit steigender Frequenz stark ansteigen.

3. Entwicklung der Theorie

Die Theorie geht von der partiellen Differentialgleichung der anisotropen biegesteifen Rechteck-Platte aus. Es werden die den o.a. Randbedingungen entsprechenden Eigenzustände bestimmt, die eine zweifache Mannigfaltigkeit n, m darstellen sowie die Decken-Eigenresonanzen f_{nm} . Folgende Fakten müssen in der Differentialgleichung für die Deckenschwingung $z(x, y, t)$ noch berücksichtigt werden, wodurch diese nicht mehr homogen ist:

- Der periodisch variable Stegdruck der gespannten Saite stellt für die Decke eine antreibende Wechsellastkraft dar. Die N Eigenfrequenzen der Saite wirken damit auf die n, m Eigenzustände der Decke.
- Der Korpusinhalt wird durch die Deckenschwingung periodisch komprimiert und dilatiert. Hier stößt man auf das Integral $\iint dx dy z$, das nur für

ungerade n, m von Null verschieden ist und mit n, m schnell sehr klein wird.

- Die Luftsäule im Schall-Loch muss mitbewegt werden. Durch Variierung des Schall-Loch-Radius und des Korpusvolumens lässt sich deren Frequenz und Dämpfung gut einstellen (Eigenfrequenz etwa 110 Hz, Dämpfungskonstante 11,0 s).

Die Lösung dieser inhomogenen z/u -verkoppelten Differentialgleichung führt bei bekannter Saitenzugkraft (Stegdruckkraft) und vorgegebener Anzupfkraft zur Admittanzkurve, die nun aber sämtliche n, m -Zustände enthält, was bei der Abstrahlung nicht der Fall ist.

Letztere geschieht über das Rayleighsche Integral das wiederum das o.a. Integral enthält, wodurch die ungeraden n, m bevorzugt abgestrahlt werden.

Tabelle 1: Gemessene bzw. ermittelte Korpusparameter Decke, Klangfichte

E-Modul längs Faserrichtung (x-Richtung) / MPa	12000
Dazu gehörige Poisson-Konstante	0,33
E-Modul quer Faserrichtung (y-Richtung) / MPa	1000
Dazu gehörige Poisson-Konstante	0,33
Dichte der Decke / kg/m ³	450
Korpuslänge / m	0,487
Korpusbreite / m	0,357
Korpushöhe / m	0,088
Deckendicke / m	0,005

Zustand	Frequenz/Hz	Nach Elejabarrietta (Lit.2)	Dämpfungskonstante 1/s
1/1 --	89,3	(148 * 72	40
1/2	182,4	(191	47
2/1	243,6	(282	47
1/3 --	321,8	(252 * 215	69
2/2	359,0	(464	76
3/1 --	492,2	(327 * 233	80
1/4	510,9	(331	84
2/3	522,3		86
3/2	620,9		100
3/3	807,6		217

Angriff am Steg Ton E $x = 0,172$ m $y = 0,157$ m
 Angriff am Steg Ton g $x = 0,172$ m $y = 0,180$ m
 Korpusvolumen $0,014$ m³, Luftdruck $10,134 \times 10^4$ Pa

Werte mit Klammer davor nach Elejabarrietta (Lit. 2), Werte mit * desgl. Nach Elejabarrietta, aber unbearbeitete Decke.

Die mit – bezeichneten Werte gehen in die Abstrahlung ein, d.h. Zustände mit rein ungeraden Termen, s. Rayleighsches Integral. Alle Zustände gehen mit allerdings sehr unterschiedlicher Intensität in die Admittanz-Werte der

Decke ein, was bezüglich Abstrahlung nicht zu irrigen Schlussfolgerungen führen darf. Durch die Ausarbeitung der Decke und ihre Berippung wird eine gewisse „Harmonisierung“ erreicht, d.h. die für die Abstrahlung zuständigen Zustände rücken tiefer und liegen gleichmäßiger als bei der unbearbeiteten Decke. Dies erhöht die Klangquali-

tät. Die Erniedrigung der Frequenzen der Eigenzustände führt auch in Frequenzbereiche niedriger Dämpfung, was ebenfalls zu einer Verbesserung des Gitarrenklangs führt, da es das musikalische Gedächtnis für die schnell abklingenden Transienten stützt, die sehr wesentlich zu den aktiven Klangbestandteilen beitragen.

Tabelle 2: Normierte Partial-Schalldrücke Ton E 82,4 Hz
Eine Einheit beträgt 0,0016 Pa bei Anzupfkraft 1 N in den Zeiten nach dem Anzupfen

	0,001 s	0,01 s	0,03 s	0,1 s	1,0 s
<u>Quasistationär</u>					
Abstrahlung durch Erregung des Korpus zu erzwungenen Schwingungen					
~p Effektiv-Wert	1,000	1,000	0,994	0,956	0,656
Klirrfaktor	0,919	0,919	0,917	0,912	0,839
Abstrahlung durch Erregung des Schall-Lochs zu erzwungenen Schwingungen					
~p Effektiv-Wert	0,045	0,045	0,045	0,045	0,039
Klirrfaktor	0,446	0,446	0,444	0,439	0,377
<u>Transienten</u>					
Decke, Zustände					
1/1, 89,3 Hz	1,188	0,875	0,381	0,023	< 1/10 ⁸
1/3 321,8 Hz	0,188	0,063	0,023	0,00019	do
3/1 492,2 Hz	- 0,188	- 0,063	- 0,016	- 0,00006	do
3/3 807,6 Hz	0,049	0,0068	0,00009	do	do
Schall-Loch, Eigenschwingung (109 Hz)					
	- 0,399	- 0,363	- 0,291	- 0,138	- 0,000007
Schall-Loch, Anregung durch Zustand 1/1					
87,3 Hz	0,183	0,128	0,057	0,0036	do

4. Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden mittels eines vereinfachten Gitarren-Modells erzielt, mit dem gezeigt werden konnte, was der Instrumentenbauer zu tun hat, um ein klangvolles Instrument zu erhalten.

Wichtig ist zu erkennen, dass der Gitarrenklang aus einem quasistationären und einem transienten Anteil besteht. Letzterer existiert nur kurze Zeit.

Die quasistationären Anteile bestehen aus der Abstrahlung durch Anregung des Korpus und des Schall-Lochs zu erzwungenen Schwingungen, die von der angezupften Saite ausgelöst werden. Der Schall-Loch-Anteil beträgt

- beim Ton E 4,5 %
- beim Ton g 1,34 %

des Korpus-Anteils. Der Abklingvorgang richtet sich schließlich nach dem Dämpfungsverhalten der Saitenteiltöne. Nach 1 s ist die Abstrahlung wie folgt abgeklungen:

- beim Ton E auf 65,6 %
- beim Ton g auf 55,0 %

Da der Dämpfungsfaktor der Saitenteiltöne mit wachsender Ordnungszahl stark ansteigt, nimmt der Klirrfaktor bis zu 1 s Klangdauer kontinuierlich ab:

- beim Ton E von 0,010 auf 0,839
- beim Ton g von 0,744 auf 0,681

Der höhere Klirrfaktor des Tons E liegt an der schlechten Abstrahlung des Grundtons durch den Korpus im Bereich 82,4 Hz. In diesem Fall ist der Grundton wesentlich schwächer als der 2. Teilton.

Die Abstrahlung durch das Schall-Loch ist wesentlich grundtöniger:

- beim Ton E Klirrfaktor 0,446
- beim Ton g Klirrfaktor 0,164

Dies macht einen Teil des Gitarrenklangs aus. Ein weiteres Charakteristikum des Gitarrenklangs sind die kurzlebigen Transienten-Anteile. Sie entstehen durch Anregung Decke und des Schall-Lochs zu Eigenschwingungen durch den anfänglichen „Bang“, den Saitenanschlag. Entsprechend dem Faktor $\int \int dx \times dy \times z$ des Rayleighschen Abstrahlungsintegrals werden hauptsächlich die Deckenmoden mit rein ungeraden Termen abstrahlwirksam, d.h. die Zustände 1/1, 1/3, 3/1, 3/3 etc., von diesen wiederum hauptsächlich der Grundzustand 1/1. Diese Eigenschwingungen klingen wegen der hohen Dämpfung des Klangholzes rasch ab und sind ab 0,1 s nur noch in Spuren existent. Die Schall-Loch-Eigenschwingung besteht jedoch wegen der geringeren Dämpfung länger. Die Transienten tragen wesentlich zum Klangeindruck bei, obwohl sie nur kurz existieren. Offenbar sorgt das musikalische Gedächtnis für eine Bewahrung des Klangeindrucks, obwohl bei länger anhaltenden Tönen der Klang wesentlich an Information verliert. Bei schnellen Läufen, staccato-Anspiel tragen die Transienten wesentlich zum richtigen Klangeindruck bei.

Durch Bearbeitung der Decke (Ausarbeitung, Berippung) stellt der Instrumentenbauer die Eigenresonanzen der Decke tiefer und gleichmäßiger in der Lage ein. Diese „Harmonisierung“ führt zur Intensivierung der Transienten in der Erkennungszeit 0,01 bis 0,03 s, da im tieferen Bereich die Dämpfung des Klangholzes geringer ist. Der Instrumentenbauer kann auch Frequenz und Dämpfung des Schall-Lochs nach Belieben beeinflussen.

Die Analyse des vereinfachten Modells zeigt, dass der erzielbare Klang wegen der schwächer ausfallenden Transienten schlechter sein müsste und gibt die Möglichkeiten vor, wie dieser verbessert werden kann.

References

- Lit 1 S. Griffin, H. Luo, S. Hanaguld
Acoustic Guitar-Function-Model including Symmetric and Assymmetric Plate-Modes
acta acustica Vol 84 (1998) p 563 - 569
- Lit 2 M.J. Elejabarrietta, A. Ezcurra, C. Santamaria
Vibrational behaviour of the guitar soundboard analysed by the Finite Element Method
acta acustica Vol 87 (2001) p 128 – 136
- Lit 3 E. Lieber
EVALUATION OF ACOUSTIC QUALITY OF PLUCKED STRINGS BY MEANS OF PHYSICAL AND GEOMETRIC PARAMETERS
ISMA 97 EDINBURGH
Tagungsband, BOOK 1 p 50 – 54
- Lit 4 E. Lieber
STIFFNESS OF STRINGS; SIGNIFICANCE IN MUSICAL ACOUSTICS 2 ND CONVENTION OF THE EUROPEAN ACOUSTICS ASSOCIATION; FORUM ACUSTICUM 1999
Tagungs-CD-Rom

Tabelle 3: Normierte Partial-Schalldrücke Ton g 196 Hz
Eine Einheit beträgt 0,0137 Pa bei Anzupfkraft 1 N

	0,001 s	0,01 s	0,03 s	0,1 s	1,0 s
<u>Quasistationär</u>					
Abstrahlung durch Erregung des Korpus zu erzwungenen Schwingungen					
~p Effektiv-Wert	1,000	0,985	0,917	0,934	0,555
Klirrfaktor	0,747	0,741	0,738	0,733	0,681
Abstrahlung durch Erregung des Schall-Lochs zu erzwungenen Schwingungen					
~p Effektiv-Wert	0,0134	0,0133	0,0131	0,0124	0,080
Klirrfaktor	0,164	0,163	0,163	0,161	0,148
<u>Transienten</u>					
Decke, Zustände					
1/1, 89,3 Hz	0,350	0,241	0,109	0,007	< 1/10 ⁸
1/3 321,8 Hz	0,095	0,051	0,014	0,0001	do
3/1 492,2 Hz	0,029	0,029	0,029	0,0001	do
3/3 807,6 Hz	0,029	0,001	0,00005	do	do
Schall-Loch, Eigenschwingung (109 Hz)					
	- 0,226	- 0,212	- 0,168	- 0,080	- 0,006
Schall-Loch, Anregung durch Zustand 1/1					
87,3 Hz	- 0,080	- 0,058	- 0,277	- 0,002	do

Erfahrungen bei der Zusammenarbeit mit Instrumentenmachern

Walther Krüger

Es ist das Vorrecht des Alters, resümierend Lebenserfahrungen - abgerundet durch philosophische Überlegungen - zu präsentieren. Von diesem Vorrecht möchte ich in diesem Vortrag – gewissermaßen als Marginalie zum Thema der Jubiläumskonferenz aus Anlass des 50. Gründungstages des IfM - Gebrauch machen.

Beginnen möchte ich mit einem Zitat:

"...Je älter... ein Gewerbe ist, umso schwerer hat es die Wissenschaft sich in ihm durchzusetzen und die ältesten sind die fortschrittsfeindlichsten. Dies rührt daher, dass jene ältesten Berufe erfüllt sind von Gedanken und Handgriffen, welche durch viele Jahrhunderte ihres vorwissenschaftlichen Zustandes herrschend gewesen waren. Sie sind vorhanden und - wie man sagt – bewährt, d.h. man gelangt durch sie zum Ziel... und noch heute wird der Gedanke, Kunstwerke durch Anwendung der Wissenschaft besser und wirksamer zu gestalten, mit Hohngeschrei empfangen und insbesondere die Künstler, welche dadurch die allergrößte Förderung erfahren würden, lehnen ihn mit moralischer Entrüstung... ab."

Diese bemerkenswerte Aussage, die - wie man meinen möchte - direkt auf unser Problem, nämlich den Musikinstrumentenbau, zugeschnitten ist, stammt von dem Chemie-Nobelpreisträger Wilhelm Ostwald und ist aus dem Jahre 1932 /1/. Denn in der Tat in einer Art "Trial und Error"- Verfahren hatte sich der Musikinstrumentenbau ohne jede theoretische oder messtechnische Grundlage in einem jahrhundertlangen Auswahlverfahren auf ein derartig hohes Niveau entwickelt, dass die damals und früher produzierten Instrumente uns noch heute ehrfurchtsvollen Respekt einflößen. Angesichts der geforderten Präzision der Aussagen muss man ganz klar zugeben, dass zum Zeitpunkt der Veröffentlichung - also in den 30er Jahren des vorigen Jahrhunderts - weder die theoretischen Grundlagen zur Kenntnis der Wirkungsweise und noch viel weniger der Stand der akustischen Messtechnik ausreichten, um gezielten Einfluss auf die Qualität der erzeugten Musikinstrumente nehmen zu können.

Und so ist es denn nur folgerichtig wenn etwa um diese Zeit der Gründer des Institutes, Hermann Meinel, von seinem Lehrer, dem damals in der Instrumentenakustik profilierten Akustiker, Professor Backhaus, den gutgemeinten Rat erhielt: "Sie möchten also auch selbst aus Ihren Arbeiten Nutzen für den Instrumentenbau ziehen? Seien Sie froh, wenn das einmal Ihre Enkel können". Und Meinel fährt in seinem Artikel aus dem Jahr 1974 /2/ - in dem dieser Vorfall zitiert ist - fort: "Käme aber heute ein jüngerer Physiker und zugleich tüchtiger Instrumentenbauer mit den gleichen Absichten... zu mir,... würde ich ihm trotz der inzwischen gemachten wissenschaftlich-technischen Fortschritte das Gleiche sagen".

Es ist keine Frage, dass in unserer heutigen Zeit das Urteil anders lauten müsste. Aber, wenn wir ehrlich sind, müssen wir einräumen, dass eine durchgreifende Wende in der Situation frühestens in der Mitte der 80er Jahre zu verzeichnen ist mit der Einführung computergestützter Messverfahren und der Möglichkeit in Echtzeit zu messen. Damit ist nichts gegen erste Erfolge auf diesem Gebiet seit

den ersten Nachkriegsjahren gesagt, die der sprunghaften Entwicklung der elektronischen Messtechnik zu schulden ist.

Immerhin: als ich im Jahre 1956 meine Arbeit im IfM aufnahm, hatte sich so viel noch nicht geändert. Bemerkenswerterweise endete mein erster Versuch auf dem neuen Arbeitsgebiet mit einer Bauchlandung, die - wie so oft im Leben missglückte Unternehmungen - aber zu längerem Nachdenken führte und letzten Endes auch - wie ich zu behaupten wage - zu den richtigen Schlussfolgerungen. Dies hat nun unmittelbar mit meinem heutigen Thema zu tun. Ich hatte die Aufgabe eine Anblasvorrichtung für Klarinetten zu bauen, die einer meiner Vorgänger halbfertig hatte liegen lassen: Das Gerät sollte in einer vom damaligen Institutsdirektor inszenierten Vorführung - heute würde man sagen: in einer Show - den hiesigen Instrumentenmachern ad oculis demonstrieren, was alles möglich ist. Der Versuch, längere Zeit einen stabilen Ton zu erzeugen scheiterte jedoch kläglich an der Luftversorgung aus einer Pressluftflasche über ein Reduzierventil, die natürlich viel zu "hochohmig" reagierte, um es in der Sprache der Nachrichtentechniker zu sagen. Wenig später gelang es mir, mit Hilfe von regelbaren Schaufelradgebläsen, die ich von meiner Beschäftigung mit der Hochvakuumtechnik von der Glasbläserei her kannte, das Problem in den Griff zu kriegen.

Was hatte ich aus dem Debakel unfreiwillig gelernt? Blasinstrumente (und Musikinstrumente überhaupt) sind hochsensibile und hochgezüchtete Mechanismen. Wer sich mit ihnen als Musiker, Instrumentenmacher oder Akustiker auseinandersetzen will, ist auf umfassende Hilfe angewiesen, die er von sachkundigen Partnern einholen muss. Ausgehend von solchen Überlegungen habe ich es mir die restlichen über vierzig Jahre meiner Berufstätigkeit zum Prinzip gemacht, alle meine Aufgaben in engem Kontakt mit Instrumentenmachern und Musikern zu lösen.

Damit das gelingt, muss man sich einiger Tatsachen bewusst werden:

- Die Terminologie der wissenschaftlich-technische Fachsprache und der Sprache der Musiker oder Handwerker sind grundsätzlich unterschiedlich und ziemlich inkompatibel zueinander.
- Mit dem in den exakten Wissenschaften gebräuchlichen Mechanismus mathematischer Formulierungen können Handwerker und Musiker nichts anfangen.
- Die Darstellung experimenteller oder theoretischer Zusammenhänge in Diagrammform ist dem angesprochenen Personenkreis ungewohnt. (Allerdings hat sich an dieser Situation mindestens seit der wachsenden Bedeutung des Zeitverlaufes von Börsenkursen für die Allgemeinheit einiges verbessert).

Dem Akustiker bleibt nichts anderes übrig, als sich mit diesen Umständen abzufinden, sich im Sprachgebrauch und in der Wahl seiner Kommunikationsmittel anzupassen und einfache und im Werkstattgebrauch praktikable Lösungen zu suchen.

Einige Beispiele um mich verständlich zu machen:

1. Zur Frage der Terminologie: Die Interpretation des Begriffs Kreisgüte Q.

Die Kreisgüte Q ist in der Nachrichtentechnik ein äußerst nützlicher Begriff, der Aussagen zum Dämpfungsverhalten von Schwingkreisen ermöglicht. Auch zur Anwendung bei mechanischen Schwingern der musikalischen Akustik ist er deshalb gut geeignet.

Irgendwann einmal im Verlaufe seiner Ausbildung lernen Physiker und Techniker beim Studium von Schwingungsproblemen, dass die Kreisgüte zur Beschreibung des Dämpfungsverhaltens Q beschrieben werden kann als Quotient der Größe π und des Logarithmischen Dekrements δ , oder auch als die Hälfte des Produktes aus Kreisfrequenz der Resonanz mit der Abklingkonstanten k.

Wenn man es etwas anschaulicher haben will, kann man auch sagen, dass die Kreisgüte Q die Anzahl der Oszillationen beschreibt, nach welcher unter Einwirkung einer Dämpfung die Amplitude einer Schwingung auf den Wert $(1/e^\pi)$ des Anfangswertes abgeklungen ist.

Der Praktiker lernt, dass man die Kreisgüte messen kann durch Bestimmung der Resonanzfrequenz f_0 und der an beiden Flanken um $1/\sqrt{2}$ unterhalb des Amplitudenmaximums liegenden Frequenzen. Man bildet die Differenz aus den beiden Messwerten, bestimmt so die sog. Halbwertsbreite Δf und bildet den Quotienten $f_0/\Delta f$ der identisch ist mit der Kreisgüte Q.

Mit alledem kann ein Musiker oder Instrumentenmacher nichts anfangen. Man muss eine brauchbare Übersetzung in die musikalische Gedankenwelt finden. Das gelingt, wenn man den Intervallfaktor I einführt, als Verhältniszahl der Frequenzen von musikalischen Intervallen: Also etwa $3/2$ für die Quinte, $3/4$ für die Quarte, $5/4$ für die große Terz. Damit gelingt es die Formel für Q so umzuformen, dass sich eine einfache Beziehung zur Berechnung der Kreisgüten aus den Halbwertsbreiten in Form musikalischer Intervalle ergibt:

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f}$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{f_o + f_u}{f_o - f_u} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{I + 1}{I - 1} \right)$$

mit

$$I = \frac{f_o}{f_u}$$

Man kann für I auch die Werte einsetzen, die man aus der Definitionsgleichung der gleichschwebend temperierten Stimmung erhält und auf diese Weise im cent-Bereich Q-Werte berechnen (Tabelle 1).

Auf diese Weise kann man einem naturwissenschaftlich weniger bewanderten Personenkreis einen Zugang zum Begriff der Kreisgüte vermitteln, der ja z. B. für die Kooperationsmöglichkeit der verschiedenen Schwingungsmoden im Rohr eines Blasinstrumentes von fundamentaler Bedeutung ist.

Bekanntlich liegen die Kreisgüten der Rohrresonatoren zwischen 30 (Flöten und Klarinetten) und etwa 15 (Oboen und Fagotte), dem entsprechen Halbwertsbreiten zwischen etwa 60 bis 100 cent. Schätzt man das Frequenzband innerhalb dessen eine Kooperation der Moden noch funktionieren kann, ohne dass ein zu großer Energieentzug erfolgt auf etwa $1/3$ der Halbwertsbreite, so müssen die Moden besser als 20 cent (Flöten, Klarinetten) bzw. 30 cent (Oboen, Fagotte) angeglichen werden.

Eine funktionierende Modenangleichung ist bekanntlich nicht nur Voraussetzung für stimmende und "gut stehende" Töne, sondern auch für die Möglichkeit einer expressiven Klangformung - wenn man so will: für Instrumente, die "singen".

Intervall / cent	I	Q
Quinte	3/2	2,5
Quarte	4/3	3,5
gr. Terz	5/4	4,5
kl. Terz	6/5	5,5
Ganzton	9/8	8,5
Halbton	16/15 (1.0666)	15,5
Oktave	2/1	1,5
Duodezime	3/1	1
100 cent	1.0595	17,3
80 cent	1.0473	21,6
60 cent	1.0353	28,8
40 cent	1.0234	43,2
20 cent	1.0116	86,7
10 cent	1.0058	172,9

Tabelle 1: Intervallfaktor und Kreisgüte

2. Zur Benutzung von Formelmechanismen: Korrektur der Tonlochpositionen bei Blasinstrumenten.

Eine Hauptaufgabe mit fundamentalem Charakter ist im Blasinstrumentenbau die Einrichtung einer musikalisch brauchbaren Stimmung. Die notwendigen Korrekturen können zweierlei Art sein:

- Die Fehler treten für ein bestimmtes Tonloch in allen Registern in gleicher Weise auf. Sie sind durch einfache Neupositionierung des Tonloches zu beheben.
- Die Fehler treten in unterschiedlichen Registern in unterschiedlicher Form und - schlimmstenfalls - in unterschiedlicher Richtung auf.

Die Fehler der ersten Art sind leichter zu beheben. Man benötigt einen Zusammenhang zwischen der Größe der auftretenden Abweichung und der erforderlichen Längskorrektur. Die Zusammenhänge sind grundsätzlich bekannt aber für den Instrumentenmacher wenig applizierbar. "Ich

kann mich doch nicht mit einem Taschenrechner in die Werkstatt stellen, wenn ein Musiker etwas korrigiert haben will" hat mir ein durchaus seriöser Instrumentenmacher einmal auf entsprechende Hinweise erwidert. Man muss es einfacher machen. Das soll das folgende Beispiel erläutern:

Ausgangspunkt ist Gleichung (1), die man aus der Definitionsgleichung der gleichschwebenden Stimmung als Näherung bei kleinen Stimmungsabweichungen n herleiten kann.

$$n = 1731 \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad (1)$$

aus $f = k \cdot \frac{1}{l}$

mit $k = \frac{m \cdot c}{2l}$

folgt

$$\frac{df}{dl} = -k \cdot \frac{1}{l^2} = -\frac{f}{l}$$

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

mit

$$c = f \cdot \lambda$$

folgt:

Für Flöten, Doppelrohrblattinstrumente, Saxophone:

$$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} \quad (3)$$

aus (2)

$$\Delta l = -n \cdot \frac{1}{1731} \cdot \frac{c}{2f} \quad (4)$$

Mit

$$c = 340 \text{ ms}^{-1}$$

$$\Delta l / m \approx -0,1 \cdot n \cdot \frac{1}{f}$$

$$\Delta l / mm \approx -100 \cdot n \cdot \frac{1}{f} \quad (5)$$

Für Klarinetten:

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{4f}$$

$$\Delta l / mm \approx -50 \cdot n \cdot \frac{1}{f}$$

$$\Delta l / mm \approx -100 \cdot n \cdot \frac{1}{2f} \quad (6)$$

Durch Differentiation der Grundgleichung zur Bestimmung der Resonanzfrequenzen in Rohren in Abhängigkeit von der Länge ergibt sich ein einfacher Zusammenhang zwischen der relativen Frequenzänderung und der relativen Längenänderung des Rohres (2). Nimmt man noch einen Ausdruck für die Bestimmung der Resonanzfrequenzen aus den Rohrlängen zu Hilfe (3), so findet man sehr schnell äußerst nützliche und einfache Formeln für die notwendigen Korrekturlängen für Flöten und die Doppelrohrblattinstrumente einerseits (5) und die Klarinette andererseits (6). Dabei wird von dem glücklichen Zufall Gebrauch gemacht, dass die Hälfte der Schallgeschwindigkeit c fast genau 1/10 des Zahlenfaktors in (1) ausmacht. Mit den Gleichungen (5) und (6) lassen sich in der Tat ohne Rechenhilfsmittel erforderliche Korrekturen im Kopf errechnen, sofern man eine Frequenztafel zur Hand hat - wenn man die nicht ebenfalls im Kopf hat - was bei Akustikern mit hinlänglicher Praxis vorkommt. Ob man dann nicht doch lieber zum Taschenrechner greift, bleibt dem Einzelnen überlassen.

3. Zur Benutzung von Diagrammen: Korrektur von Registerfehlern in Blasinstrumenten

Die Korrektur von Registerfehlern ist komplizierter. Abgesehen, dass es für Metallblasinstrumente inzwischen hierfür ausgezeichnete Softwarelösungen gibt, möchte ich hier wenigstens an eine einfache Methode erinnern, die mir in der Vor-Computerära gute Dienste geleistet hat und auch heute noch mit Nutzen an der Werkbank gebraucht werden kann. Auf der Ordinate werden die relativen Rohrlängen aufgetragen, auf der Abszisse Frequenzen mit den Ordnungsnummern der einzelnen Eigenschwingungsmoden des Instrumentes. Hyperbeln markieren den Verlauf der Nulldurchgänge der stehenden Wellen im Rohr. Nach dem Satz von Rayleigh bewirken Querschnittsvergrößerungen an Druckbäuchen Vertiefungen der zugehörigen Eigenmoden, an Druckminima aber Frequenzerhöhungen. Legt man nun Geraden parallel zur Abszisse bei verschiedenen relativen Rohrlängen, so kann man leicht eine Abschätzung der Wirkung von Querschnittsänderungen an unterschiedlichen Stellen im Rohr vornehmen. Natürlich lassen sich ähnliche Diagramme auch für die Holzblasinstrumente herstellen. Da kaum höhere Schwingungsmoden oberhalb der vierten benutzt werden sind sie sogar noch viel einfacher. Man hat allerdings dabei zu berücksichtigen, dass Korrekturen nur oberhalb der Sequenz der Tonlöcher vorgenommen werden können, wenn man erreichen will, dass

alle Töne des Spielbereiches in gleicher Weise davon betroffen werden, was natürlich durchaus nicht immer der Fall sein muss, aber immerhin die Regel sein dürfte.

Abschließend möchte ich nochmals auf das eingangs erwähnte Zitat zurückgreifen. Am Schluss eines Referates zur Wirkungsweise von Blasinstrumenten, den ich in Michaelstein gehalten hatte, kam ein Instrumentenmacher - ich glaube es war ein Cembalobauer - voller Empörung und im vollen Bewusstsein seiner handwerklichen Überlegenheit auf mich zu und erklärte wütend: "Sie werden es niemals schaffen mit Ihren Formeln und Methoden ein hochwertiges Instrument zu konstruieren". Er hatte offensichtlich nicht verstanden, dass das gar nicht meine Absicht war und ist. Zum Bau eines wirklich guten Instrumentes ist dreierlei unabdingbar notwendig:

- gediegene kunsthandwerkliche Ausbildung
- solide musikpraktische Erfahrung im Umgang mit dem Instrument in allen Anforderungsbereichen und Anforderungssituationen.
- fundierte theoretische Kenntnisse der Wirkungsweise des Instrumentes einschließlich von präzisen Erkenntnissen zur gezielten Beeinflussung der Spieleigenschaften

Es kommt nur äußerst selten vor, dass diese drei Voraussetzungen in einer Person vereinigt sind. Wenn dies aber nicht der Fall ist, so bleibt einzig der Weg, das im Teamwork mit ausgiebiger Kommunikation und Information zu erreichen.

Lassen Sie mich abschließend auch eine Prognose wagen:

Ich glaube, dass dies noch eine ziemlich lange Zeit so bleiben wird.

Literatur:

- /1/ W.Ostwald "Die Lehre vom Erfinden" in:
Feinmechanik und Präzision 9 (1932) S.163
- /2/ H.Meinel "Musikalisch-technische Probleme des
Geigenbaus in CASNL 23 (1975) p.27

Zur Impulsantwort bei Blechblasinstrumenten

Probleme bei Messung und Interpretation

Klaus Wogram
PTB - Braunschweig

1. Einleitung

Im Rahmen der Weiterentwicklung von Blechblasinstrumenten hinsichtlich ihrer klanglichen und spieltechnischen Qualität gewinnt die Impulsantwort der Instrumente zunehmend an Bedeutung. Sie ist diejenige Größe, aus der nahezu alle akustischen und spieltechnischen Eigenschaften des untersuchten Instrumentes abgeleitet werden können.

Definiert ist die Impulsantwort bei Blechblasinstrumenten als diejenige akustische Größe, die im Mundstückskessel entsteht, wenn man einen idealen Impuls als Druckstoß in das Blechblasinstrument in der Lippenebene des Bläser einleitet. Dieser Druckstoß, der im Idealfall einem Dirac-Stoß mit unendlich kleiner Impulsbreite und damit unendlich breitem und kontinuierlichem Spektrum entspricht, wandert in der Luftsäule des Instrumentenrohres entlang bis zur Öffnung des Schalltrichters (Stürze) und wird dort teilweise als Schallwelle abgestrahlt, größtenteils aber reflektiert und wandert als Echo zum Mundstückrand zurück.

Hier triggert dieses Echo die Schwingungen der Bläserlippen und erleichtert die Entstehung des Instrumentenklanges, vorausgesetzt, das Echo trifft synchron mit der aus der entsprechenden Resonanz der Luftsäule abgeleiteten Schwingung ein. Der Bläser empfindet also quasi die Impulsantwort direkt an seinen Lippen, so dass dieser Größe sowohl eine Bedeutung für die Klangentfaltung des Instrumentes als auch für die Ansprache und die Intonation bzw. Stimmung zukommt.

Die Impulsantwort kann durch inverse Fouriertransformation in die Resonanzkurve des Instrumentes umgewandelt werden, die wiederum nach Normierung den Verlauf der Eingangsimpedanz über der Frequenz wiedergibt. Mit diesen Größen wird hauptsächlich in der Musikinstrumentenakustik gearbeitet.

2. Bestimmung der Impulsantwort

Im Prinzip ist die messtechnische Bestimmung der Impulsantwort bei Blechblasinstrumenten relativ einfach; man schickt einen genau bekannten akustischen Druckimpuls in das Mundstück und misst die Reaktion des Instrumentes. Doch leider ist die praktische Durchführung nicht ganz so einfach, auch hier liegt die Schwierigkeit im Detail bzw. bei der Meßmethode. Zunächst muss man das akustische Signal im Mundstück erzeugen, das im Spielbetrieb durch die zeitlich variable Impedanz der Bläserlippen rückseitig "verschlossen" ist. Will man den Einfluss dieser Impedanz ausschalten, dann bleibt nur die Einleitung des Anregungsimpulses über eine quasi unendlich lange Rohrleitung vor dem Mundstück. Damit ist dann sichergestellt, dass eine erneute Reflexion des rücklaufenden Echoimpulses an der Impedanz in der Ebene des Mundstückrandes nicht statt findet. Diese Methode haben Elliott und Bowsher [1] verwendet, bei der sowohl der Schalldruck als auch die Schallschnelle direkt im Mundstückskessel gemessen werden.

Wogram [2] ist bereits 1972 einen anderen Weg gegangen, bei dem die Impedanz in der Lippenebene der realen Lippenimpedanz dadurch nachgebildet wird, dass eine Bohrung in dem Verschluss in der Lippenebene durch eine Vielzahl von sehr kleinen Kapillarröhrchen gefüllt wird. Bei geeigneter Dimensionierung erhält man einen sehr geringen Reflexionsfaktor für die rücklaufende Welle (nahezu Anpassung) und gleichzeitig eine sehr hohe Impedanz für das eingangsseitig in diese Kapillarröhrchen eingeleiteten Anregungssignal. Da die Kapillare durch die Zwischenräume vieler dünner Metalldrähte geschaffen werden, ist das System als "Drahtleitung" bekannt geworden.

Bei der praktischen Umsetzung dieser Methode konnte die "Drahtleitung" mit 5 cm sehr kurz gehalten werden, so dass der Messkopf in einer geringen Größe realisiert werden konnte. Abb. 1 zeigt das Blockschaltbild des gesamten Messaufbaus mit dem "Drahtleitungsadapter" [3].

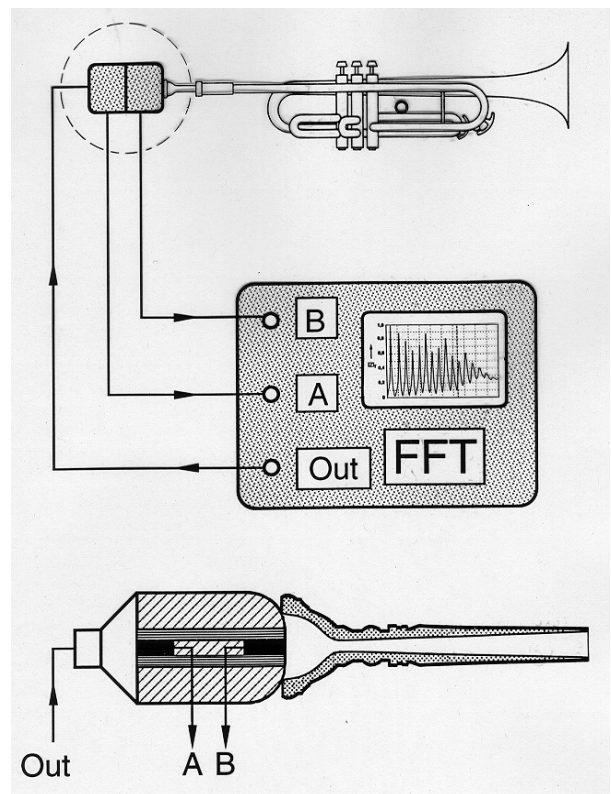


Abb. 1: Blockschaltbild des Messaufbaus

Me^{SS}Ko

Am Eingang, also vor der Membran des Miniaturlautsprechers sowie am Ausgang, also in der Lippenebene, sind zwei Miniaturmikrofone angebracht, mit denen sowohl das Anregungssignal (A) als auch die akustische Antwort (B) des Blechblasinstrumentes gemessen werden können. Von beiden Mikrofonsignalen wird die FFT berechnet und die Übertragungsfunktion als Resonanzkurve bzw. Eingangsimpedanz bestimmt. Die gesuchte Impulsantwort erhält man durch die inverse FFT der Übertragungsfunktion.

Als Anregungssignal dienen Rausch- oder Chirp-Signale, deren Frequenzkomponenten den Zeitfensterlängen und der FFT-Auflösung angepasst sind. Dadurch braucht das Anregungssignal nur diejenigen Komponenten zu beinhalten, die bei der FFT auch explizit berechnet werden. Außerdem kann das Anregungsspektrum in seiner oberen Frequenzgrenze so weit beschnitten werden, wie es der Instrumententyp vorgibt. Das ist für die normale B-Trompete üblicherweise 2000 Hz, da oberhalb dieser Grenze keine Resonanzen mehr auftreten. Abb. 2 zeigt die Resonanzkurve und die daraus abgeleitete Impulsantwort einer Trompete mit Mundstück.

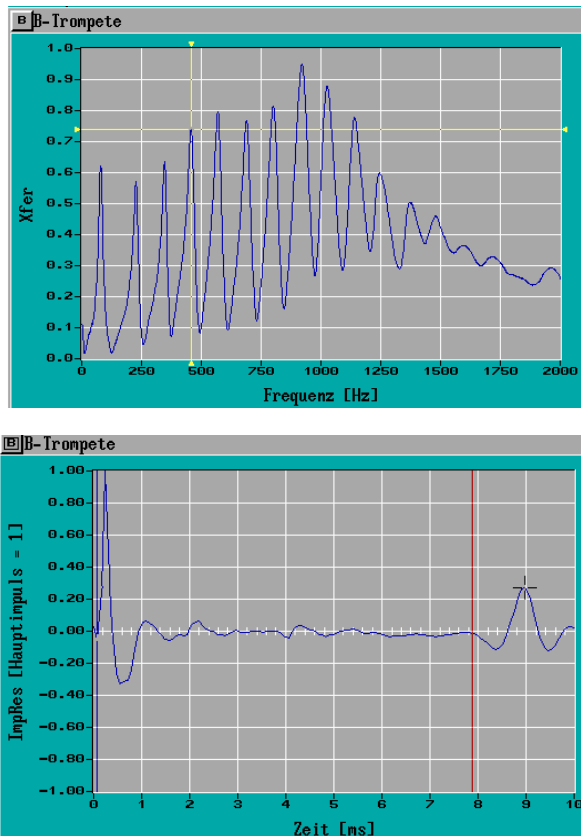


Abb. 2: Resonanzkurve und Impulsantwort einer B-Trompete

Obwohl das Schallsignal vor der "Drahtleitung" aufgrund deren sehr hohe Impedanz nur unwesentlich von der Art des angekoppelten Instrumentes beeinflusst wird, kann der Messfehler durch die Berücksichtigung des tatsächlich vorliegenden Spektrums des Anregungssignals weiter reduziert werden. Der Laufzeitfehler, der sich durch die Zwischenschaltung des "Drahtleitungsadapters" mit seiner Länge von 50 mm ergibt, beträgt $147 \mu\text{s}$ und wird als über der Frequenz ansteigender Phasenfehler berücksichtigt.

3. Praktische Nutzung und ihre Probleme

Anhand einiger Beispiele soll die praktische Nutzung der Meßmethode für die Impulsantwort erläutert werden.

Betrachten wir zunächst ein einfaches zylindrisches Rohr, so ergibt sich die in Abb. 3 wiedergegebene Impulsantwort. Das Rohr ist an seinem zweiten Ende geschlossen, so dass sich das von dieser Stelle herrührende Echo als positiver Impuls darstellt. Durch den Verschluss der "Auslassstelle" ist der Reflexionsfaktor nahezu +1, was man direkt

an der Amplitude des Echos ablesen kann. Die Koordinaten der drei Cursors sind in den rechts angeordneten Feldern wiedergegeben; hieraus lässt sich dann auch der geometrische Abstand zwischen ihnen errechnen. Er ist in dem untersten rechten Fenster unter "Δx in mm:" eingetragen. Öffnet man das Ende des Rohres, so stellt sich natürlich ein negativer Echoimpuls ein, wie ihn Abb. 4 wiedergibt. Wie gut sich auch kleine Änderungen des Durchmessers im Rohrverlauf in der Impulsantwort zeigen können, wird bei Betrachtung der Abb. 5 deutlich. Hier handelt es sich um die Impulsantwort eines 16 mm Rohres, das nach 62,5 cm zunächst eine Einengung auf 15 mm und nach 11,5 cm Länge eine Erweiterung auf den vorherigen Durchmesser von 16 mm aufweist. In der Impulsantwort sind die durch den blauen bzw. roten Cursor gekennzeichneten Störimpulse zu sehen. Die Amplitude des vom offenen Ende zurücklaufenden Echos ist stark reduziert, da die Messung ja am Eingang des Rohres erfolgt, und der Schall auf seinem Rückweg die beiden Störstellen in der Mitte des Rohres durchlaufen muss.

In Abb. 5 sind die beiden Störechos durch die Durchmessersprünge deutlich voneinander getrennt zu erkennen. Rücken die beiden Störungen nun aber immer stärker aufeinander zu, dann verschwimmen die Unterschiede, und man kann nicht sicher sein, wodurch die Störungen hervorgerufen werden.

Ein solcher Fall ist in Abb. 6 wiedergegeben, wo zwei Störungen in nur 3,3 cm Abstand voneinander liegen. Hier handelt es sich um eine Erweiterung mit nachfolgender Einengung. Dieser Sachverhalt kann nur noch erahnt werden. Dass die einzelnen Störimpulse eine endliche Breite aufweisen, wird durch die Frequenzbegrenzung des Anregungsspektrums verursacht.

Noch deutlicher zeigen sich die Probleme bei der Messung der Impulsantwort, wenn man vollständige reale Blechblasinstrumente untersucht. Betrachten wir das Ergebnis einer Analyse einer B-Trompete wie in Abb. 2 rechts, dann fällt auf, dass bereits der Anregungsimpuls nicht sehr schmal ist und zudem ein deutliches Ausschwingen zeigt. Der Grund liegt in der Resonanzwirkung des Mundstückes, das eine Filterung des Anregungsspektrums verursacht. Misst man die Resonanzkurve eines Trompetenmundstückes allein ohne Instrument, so erhält man z. B. das Ergebnis der Abb. 7.

Neben der Grundresonanz von ca. 869 Hz, die in erster Linie durch die Größe des Kesselvolumens und der Bohrung gegeben ist, zeigen sich noch weitere, aber schwächere Resonanzen, die der geometrischen Länge des Mundstückes in Verbindung mit der inneren Mensur zuzuordnen sind. Die Impulsantwort eines derartigen Resonators zeigt das bekannte Ausschwingen eines eindimensionalen Resonators, das durch die höheren Resonanzen gestört wird.

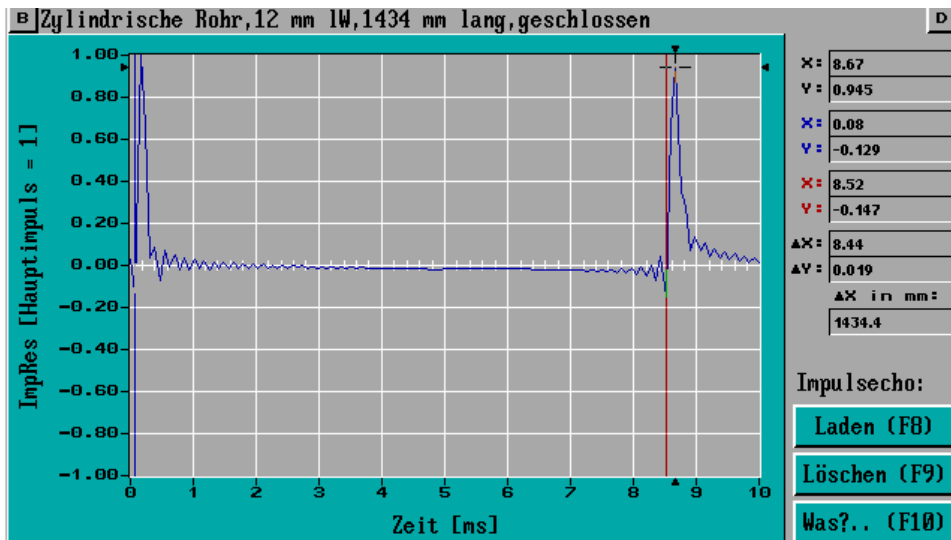


Abb. 3: Impulsantwort eines geschlossenen zylindrischen Rohres von 1434 mm Länge

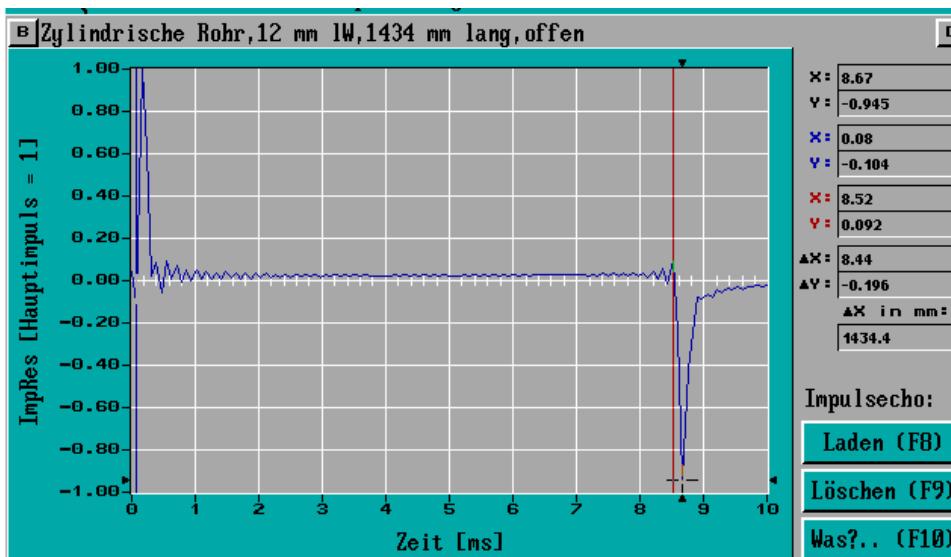


Abb. 4: Impulsantwort eines offenen zylindrischen Rohres von 1434 mm Länge

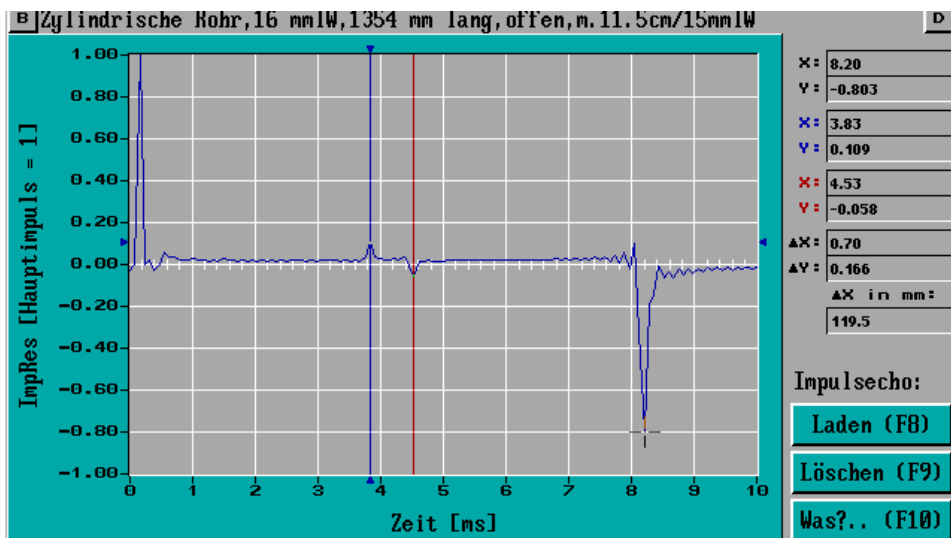


Abb. 5: Impulsantwort eines offenen zylindrischen Rohres mit Durchmesserstörungen

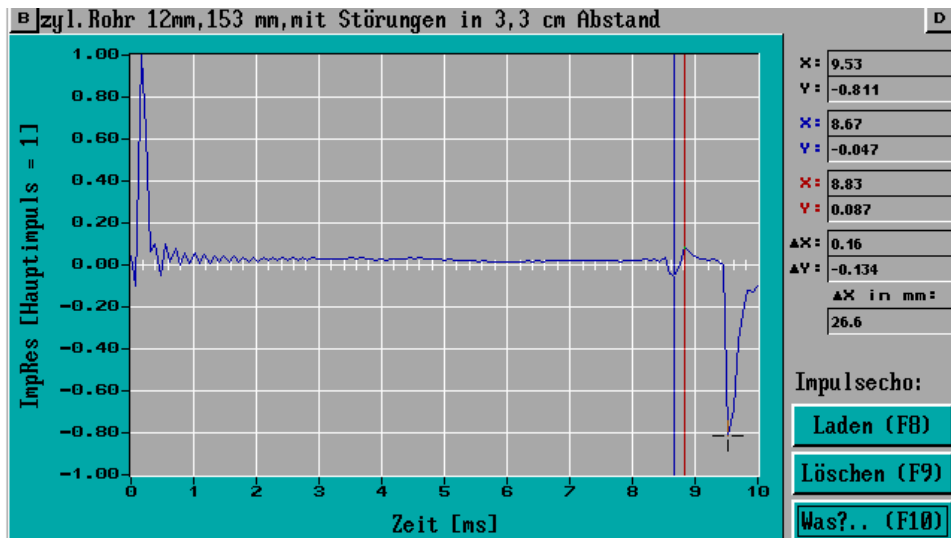


Abb. 6: Impulsantwort eines Rohres mit Durchmesserstörungen von 3,3 cm Abstand

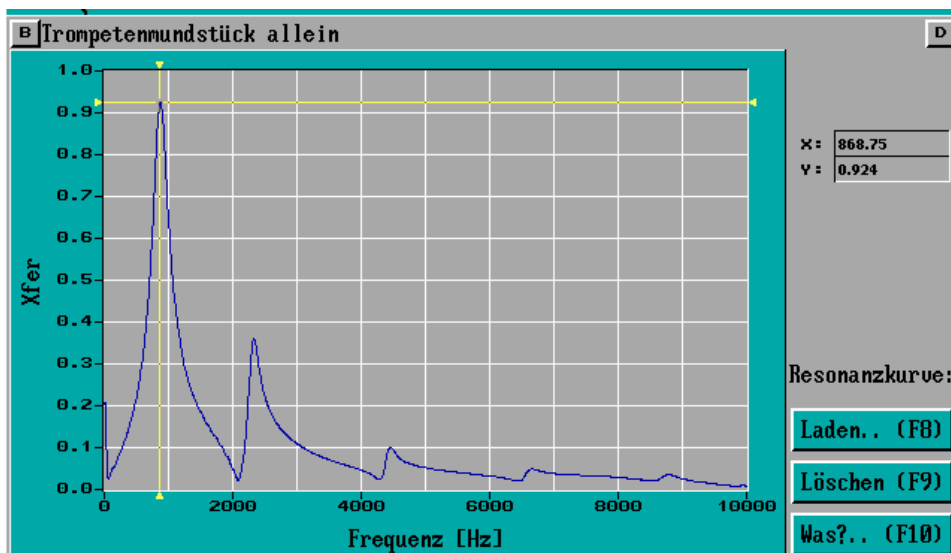


Abb. 7: Resonanzkurve eines Trompetenmundstückes allein

Abb. 8 zeigt die gemessene Impulsantwort des verwendeten Trompetenmundstückes. Die beiden Cursors markieren grob eine Wellenlänge des Ausschwingprozesses mit ca. 1,25 ms. Daraus kann man nun die Hauptresonanz des Mundstückes mit ca. 800 Hz ermitteln. Dies' kann nur ein grober Wert sein, zumal die höheren Resonanzen je nach Phasenlage eine Verzerrung der Zeitfunktion bewirken.

Koppelt man an das gemessene Mundstück ein zylindrische Rohr an, so erhält man die in Abb. 9 wiedergegebene Impulsantwort.

Durch die Resonanzfähigkeit des Mundstückes erhalten alle rücklaufenden Impulse die Form des veränderten Anregungsimpulses, der nach Durchlaufen des Mundstückes ein starkes Ausschwingen zeigt. Sollten z. B. im Bereich der ersten 45 cm Durchmesserstörungen vorliegen, dann könnte man diese durch die Mundstücksresonanz nicht mehr erkennen; sie werden durch den Ausschwingprozess verdeckt. Das Maß einer Beeinträchtigung der Aussage hängt von der Resonanzfrequenz und der Resonanzgüte des Mundstücksresonators ab, so dass eine Qualitätsaussa-

ge über den (vorderen Rohrbereich einer Tuba Mundrohr usw.) sehr viel problematischer ist als bei einer Trompete oder bei einem Waldhorn. Diese Aussage soll durch Messwerte an einem Rohr mit Tubamundstück dokumentiert werden, die in Abb. 10 wiedergegeben sind. Links ist die Impulsantwort des Tubamundstückes allein, und rechts die Impulsantwort des Mundstückes mit einem angekoppelten Rohr von 16 mm lichter Weite aufgetragen. Bei dem Rohr handelt es sich um dasjenige, das mit Durchmesserstörungen entsprechend Abb. 5 bereits ohne Mundstück gemessen worden ist. Der Vergleich von Abb. 5 und Abb.10 rechts zeigt, dass die Störungen bei Verwendung des Mundstückes nicht mehr erkannt werden können. Eine qualifizierte Aussage ist aus dieser so gemessenen Impulsantwort nicht abzuleiten!

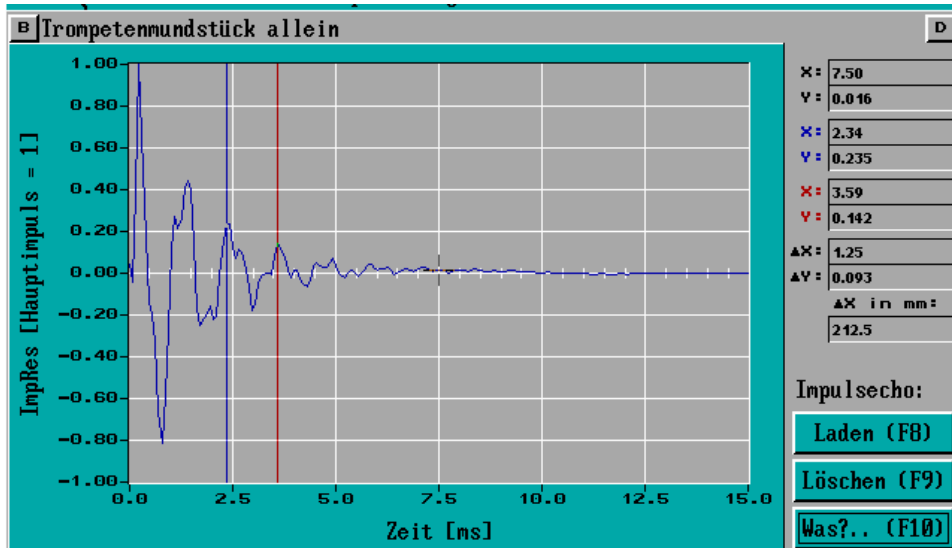


Abb. 8: Impulsantwort des Trompetenmundstückes von Abb. 7

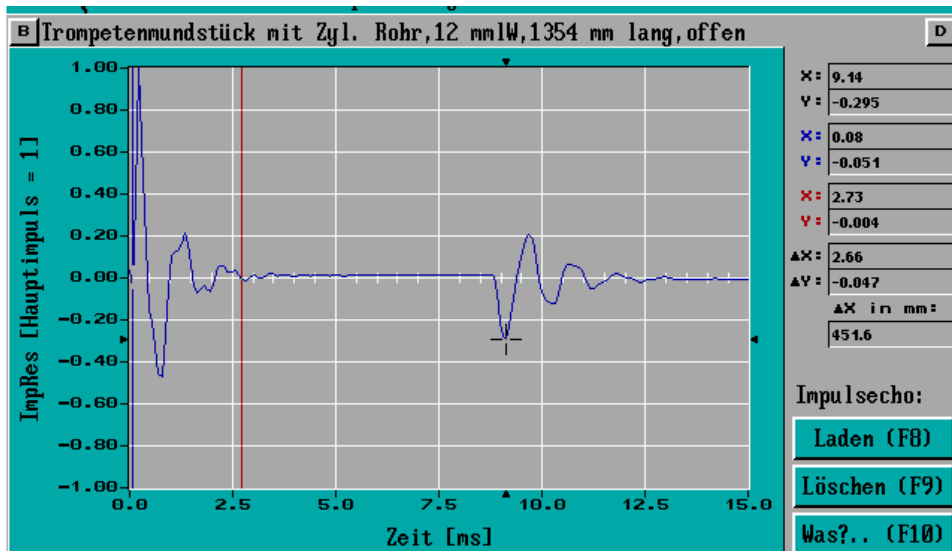


Abb. 9: Impulsantwort eines zyl. Rohres mit dem Trompetenmundstück von Abb. 7/8

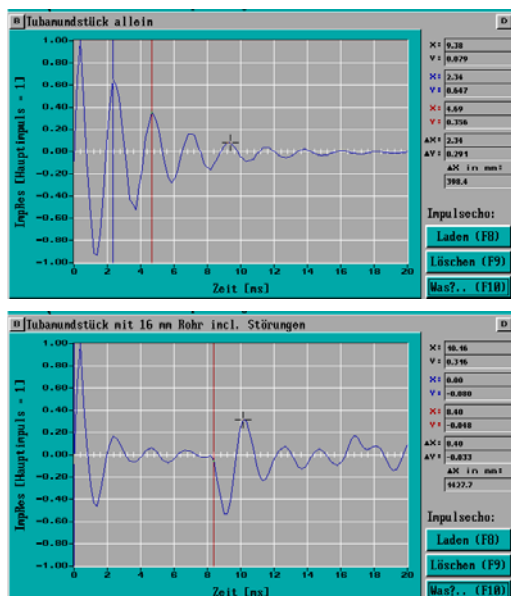


Abb. 10: Impulsantworten eines Tubamundstückes allein und mit zyl. Rohr

Abhilfe schafft in solchen Fällen nur eine Zerlegung des Instrumentes in seine Bestandteile, die dann einzeln gemessen werden. Oder man koppelt zwischen der Schallquelle und der zu untersuchenden Rohrstrecke ein zusätzliches zylindrisches Rohrstück ein, das die rücklaufenden Impulse quasi von den Anregungseigenschaften abkoppelt. Dies' trifft insbesondere für die Untersuchung von Rohrkrümmungen und Vertildurchgängen zu, bei denen es unerlässlich ist, Zusatzrohre zu verwenden.

Literatur

- [1] Elliott, St. und Bowsher, J. : Input and transfer response of brass wind instruments, J. Acoust. Soc. Am. 72(6), December 1982
- [2] Wogram, K.: Ein Beitrag zur Ermittlung der Stimmung von Blechblasinstrumenten, Diss. an TU-Braunschweig, 1972
- [3] Wogram, K.: Eine einfache akustische Meßmethode zur Beurteilung und Verbesserung von Intonation und Spielqualität bei Blechblasinstrumenten, 19. Musikinstrumentenbau-Symposium in Michaelstein, Band 60: Posaunen und Trompeten, Blankenburg 2000

Nachbarschaftsbelästigung durch Klavierspiel auf Flügeln und geeignete Gegenmaßnahmen

Heinrich Bücker Jülcherstr.10 / 41199 Mönchengladbach / Tel 02166-602635 / Fax 02166-681885
Stand 7.10.01, File PT280901

Wilhelm Busch formulierte vor etwa 150 Jahren: *Musik wird störend oft empfunden, da sie mit Geräusch verbunden.* Das Problem ist also uralte, aber immer noch aktuell. Auch heutzutage sind ständig zahlreiche Anwälte und Gerichte damit beschäftigt. Rechnet man einen Streitwert von nur 1000 DM im Durchschnitt, so ist der Problemkomplex heute auch wirtschaftlich nicht unbedeutend. Er dürfte bundesweit schätzungsweise im Millionen-DM-Bereich jährlich liegen.

Abhilfen:

- 1) Wohnungswechsel durchführen oder Klavierspielaufgeben (Resignation)
- 2) E-Piano mit Kopfhörer statt Klavier, Musik vom Kopfhörer kann Nachbarn nicht stören.
- 3) Ursache am Instrument beseitigen, je nach Art des Störwegs zum Nachbarn:
 - a) Störweg Luftschall: Luftschalldämmung zum Nachbarn verbessern
 - b) Störweg Körperschall: Schwingungskopplung zwischen Instrument und Fußboden unterbrechen.

Punkt 1 und Punkt 2 stellen für den Betroffenen einen echten Verlust dar und sind eigentlich keine Abhilfe, sondern eher eine Aktion von Verzweiflung oder Resignation. Luftschallprobleme (3a) sind in der Praxis seltener als Körperschallprobleme (3b), weil die Schalldämmung durch die massive Struktur von Wohnhäusern bei alten wie bei neuen Bauten meist im Rahmen des wirtschaftlich Machbaren akzeptabel ist. Problematisch sind i.a. nur einzelne Schwachpunkte wie Türen, innere Fenster und andere Mauerdurchbrüche wie Kabelschächte, aber auch Balken/Dielen-Holzdecken und dergleichen. Hierfür kann man aber mit bekannten Methoden i.a. leicht eine hinreichend gute Abhilfe schaffen.

Die Erörterung sei im folgenden deshalb auf das Körperschallproblem beschränkt. Auf dem Markt befinden sich dazu plattenförmige Unterleger, auf die man das Piano stellt, um Vibrationseinleitungen in den Fußboden zu mindern. Diese Unterleger bestehen aus einem mit Kunststoff getränkten Faserpaket, das eine gewisse geringe Elastizität hat, verbunden mit hoher innerer Dämpfung. Die Wirkung wird von den Benutzern oft als gering und unzureichend beschrieben. Dies ist nicht verwunderlich aus folgenden Gründen:

- a) Die innere Dämpfung des Unterlegers sorgt dafür, dass ein Teil der Vibrationskraft des Pianofußes direkt ungefedert auf den Boden wirkt. Die Zähigkeit des Kunststoffs bedämpft außerdem die Schwingungen des Pianokörpers und auch die der Saiten beim Spiel und verkürzt prinzipiell die Ausklingzeit der gespielten Töne, was den Wohlklang beeinträchtigt.
- b) Pianos stehen meist auf kleinen Rollen mit Auflagefläche von wenigen Quadratcentimetern (z.B. 10 qcm) und haben eine Masse im Bereich von 50 kg bis 150 kg. Daraus folgt ein entsprechender statischer Dauer-Druck an der Auflagefläche, der das Kunststoff-Material etwaiger Unterleger bedeutend verhärtet und die Eigenfrequenz des Feder-

Masse-Systems von Unterleger und Piano zu höheren Werten hin verändert. Ein wirksames Abfedern der Pianovibrationen im Unterleger ist aber nur oberhalb der Eigenfrequenz dieses Systems zu erwarten. So braucht man bei einer z.B. gewünschten Eigenfrequenz von 5 Hz und zwei Massen von je 30 kg eine Federkonstante von 30 N/mm. Marktübliche Unterlegplatten sind i.a. schon im neuen Zustand härter und verursachen höher liegende untere Grenzfrequenzen der Isolationswirkung.

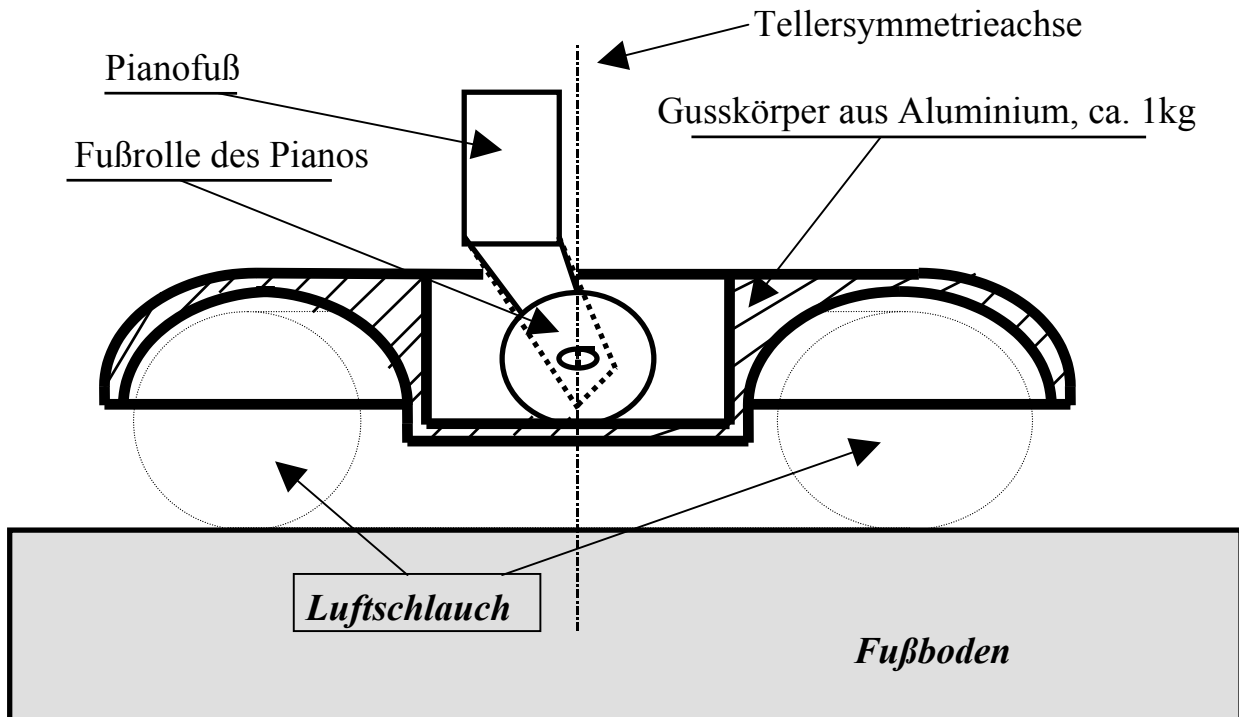
Es gilt also die Pianos auf eine extrem weiche Unterlage zu stellen, die nicht verhärtet kann. Unter den bekannten Federprinzipien schien deshalb eine pneumatische Federkonstruktion am günstigsten. Sie ist verglichen mit alternativen Prinzipien am leichtesten im Gewicht und frei von unerwünschten Nebeneffekten, wie z. B. Torsionsschwingungsübertragung auf Spiralfedern und am geringsten im Anspruch an Konstruktionsvolumen (Bauhöhe).

Der Pianist will ja die Pedale des Pianos in gewohnter Weise bedienen können, die Unterlage darf die Pedalhöhe über dem Fußboden also nur unbedeutend vergrößern. Die folgende Abbildung zeigt eine spezielle Luftfeder für Flügel, die sich in umfangreichen Experimenten in jeder Beziehung voll bewährt hat. Ein Flügel auf drei dieser Luftfedern stehend bildet ein Schwingensystem mit einer Eigenfrequenz von etwa einem Hz mit entsprechender Isolationswirkung für den Körperschall. An etwa 50 Erprobungsorten sank der in Nachbarwohnungen vorher störende durch Körperschallbrücken übertragene hörbare Klavier-Schallpegel unter die durch sonstige Umgebungsgeräusche bedingte subjektive Wahrnehmbarkeitsgrenze.

Die Luftfedern für Flügel bestehen aus speziell geformten Tellern aus Alu-Guss von etwa 1 kg Masse, unter denen ein Luftschlauch Größe 4"-300 auf dem Fußboden liegt. Der Luftschlauch hat ca. 0,3 bar Überdruck. Der Teller hat von oben gesehen eine zentrale Vertiefung, in der der Flügelfuß steht. Durch die Vertiefung erreicht man, dass der Flügel im Betrieb weniger als 1 cm höher steht, als ohne die Luftfeder. Man kann die Pedale also in gewohnter Weise benutzen. Dieses System ist leider nicht für Klaviere, sondern nur für Flügel brauchbar, weil nur diese stabil auf ihren drei weit auseinanderstehenden Füßen stehen, auch auf den weichen Luftfedern.

Die experimentelle Prüfung der Körperschall-Isolation durch die Luftfeder hat folgendes Problem: Mit Accelerometern messbarer Körperschall im Fußboden kommt auch aus der Raumluft. Dieser Anteil des Körperschalls ist naturgemäß nicht zu trennen vom Körperschall, der direkt vom Piano in den Fußboden geht. Die Verminderung der gemessenen Bodenvibration mit Piano auf Luftfedern gegenüber der Aufstellung des Pianos ohne Luftfedern betrug in unserem Institutsraum rund 40 dB. Um die Herkunft dieses Restpegels zu finden wurden folgende zwei Experimente (a) und (b) durchgeführt: Bei Experiment (a) spielt ein Piano im Versuchsraum. Dabei wird der Luftschallpegel gemessen und der Klavierton aufgenommen. Bei Experiment (b) wird diese aufgenommene Klaviertonfolge mit gleicher Lautstärke wie bei der Aufnahme in den Testraum eingespielt über vom

Luftfederelement (kreisrunder Teller, Querschnittsansicht)



Boden sorgfältig körperschallisoliert aufgestellte Lautsprecher. Dabei entstanden in unserm Institutsraum im Mittel etwa gleiche Vibrationspegel im Fußboden durch die Lautsprecher wie durch Musik vom Flügel, der auf Luftfedern stand.

Hieraus folgt, dass die meßbaren Bodenvibrationen im Fall (b) durch Schwingungsanregung des Bodens aus der Raumluft zustandekamen. Bodenvibration in dieser Größe kann bei Flügelaufstellung auf Luftfedern nicht über diese Federn angeregt sein. Die Federn können also als perfekte Körperschall-Isolation im Vergleich zur Luftschallanregung des Körperschalls im Boden gelten.

Bei Klavieren verhindert die hohe (ca. 50 cm über Boden) Schwerpunktslage wenige cm hinter der Rückwand, dass das Instrument bei direkter Aufstellung auf den weichen Tellern stabil steht, es hat die Neigung nach hinten umzukippen. Die Anwendung von Luftfedern bei Klavieren war nur derart machbar, dass das Klavier auf eine rechteckige Tischlerplatte von ca. 160 cm x 160 cm gestellt wurde, unter der an den vier Ecken je ein auf etwa 0,3 bar Überdruck aufgepumpter Schlauch lag. Dabei musste das Klavier mit seiner Rückfront von der Hinterkante der Platte mindestens etwa 20 cm entfernt bleiben um nicht mitsamt der Platte umzukippen. Die Platte in der genannten Größe erlaubt auch den Sitz des Pianisten auf ihr anzuordnen, so dass kein Problem in der Bedienung der Fußpedale aufkommt und das Ganze hinreichend stabil ist. Innenarchitektonisch dürfte jedoch für die meisten Benutzer wenig akzeptabel sein, dass das Klavier nicht mehr gewohnt bündig an der Zimmerwand steht, sondern mindestens 20 cm Abstand hat. Auch wird die große Bodenplatte nicht unbedingt als schön empfunden.

Nach den ersten Versuchen und Wirksamkeitsmessungen fiel auf, dass der Flügel auf den Luftfedern ein hörbar angenehmeres Klangbild vor allem im Bereich der oberen Basstasten bis hin zum Kammerton a hatte als ohne diese Luftfedern am gleichen Ort im gleichen Raum. Spektrale FFT-Analyse des Luftschalls ergab, dass gegenüber der ungedeckelten Normalaufstellung des Flügels im Teilton-Bereich von etwa 200 Hz bis 2000 Hz eine um etwa 0,5 s bis 1 s verlängerte Nachhallzeit T₆₀ messbar war bei gleicher Anfangsamplitude. Dies gab den Instrumenten in subjektiver Beurteilung einen volleren Klang. Eine Energiebetrachtung auf Basis der verlängerten Nachhallzeit führt zu dem Schluss, dass bei direkter Flügelaufstellung auf dem Fußboden etwa ein Viertel bis ein Drittel der nach dem Anschlag auf den Saiten vorhandenen kinetischen Energie im Fußboden für den Spieler unhörbar verloren geht und sich nicht in für ihn (wohl aber für gestörte Nachbarn) hörbaren Schall verwandelt. Durch die Aufstellung des Flügels auf annähernd verlustfreien weichen Luftfedern ist die nach dem Anschlag einer Taste vorhandene kinetische Saitenenergie gezwungen sich ganz in Luftschallenergie zu verwandeln (von inneren Reibungsverlusten im Flügel abgesehen) anstatt zum erheblichen Teil über die Flügelfüße in den Boden abzuwandern. Entsprechend verlängert sich die Ausklingzeit. Unterlegscheiben mit hoher innerer Dämpfung dagegen verkürzen die Ausklingzeit und verschlechtern somit die Klangwirkung.

In der Preislage sind Luftfedern bei ca. 400 DM und Platten-Unterleger aus Kunststoff unter 100 DM, jeweils für einen kompletten Satz von drei Elementen.

Schwingungsformen einer Stimmgabel

Ingolf Bork, Projekt 1.401
Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig
Markus Kosfelder, Volkswagen AG, Wolfsburg

Einleitung

Die Stimmgabel diente lange Zeit als Referenznormal für die Stimmung von Musikinstrumenten, wobei nicht nur die in der DIN1317 vorgeschriebene Norm-Stimmtonhöhe von 440 Hz ($\pm 0,5$ Hz $\approx \pm 2$ cent) Anwendung findet. Sie zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus: einfacher mechanischer Aufbau, leichte Handhabung, geringe Fertigungskosten, leicht zu transportieren, hohe Frequenzkonstanz, obertonarmes Klangspektrum und leichte Abstimmbarkeit. Diese Eigenschaften waren besonders vor dem Zeitalter der elektronischen Stimmgeräte der Grund für die weite Verbreitung unter Musikern. Aber auch in der Schwingungsmesstechnik dient sie heute noch (in verschiedenen Stimmungen) als Normal. Im Folgenden soll der Zusammenhang zwischen den Schwingungsformen der Eigenresonanzen und ihrer Schallabstrahlung durch eine modalanalytische Untersuchung belegt werden.

Klangspektrum

Beim Anschlag der Stimmgabel am Ende einer der beiden Zinken werden eine Vielzahl von Eigenschwingungen angeregt, die mit unterschiedlichen Zeitkonstanten ausklingen. Es handelt sich dabei im wesentlichen um so genannte Biegeschwingungen, die durch die Elastizität des Materials (meist ungehärteter Stahl) bedingt sind. Das Bestreben, nach einer Auslenkung aus der Ruhelage wieder die ursprüngliche Lage anzunehmen, wird durch innere Kräfte im Material hervorgerufen und nicht - wie bei der Saite - durch außen angelegte Zugkräfte. Ähnlich wie beim Xylophonstab [1] hat daher die Formgebung einen wesentlichen Einfluss auf das Klangspektrum, das ebenfalls durch unharmonisch liegende Obertöne bestimmt wird. Durch geeignete Wahl eines Schlägels kann die Anregung dieser störenden Klangbestandteile weitgehend unterdrückt werden [2]. Trotzdem sollen im Folgenden gerade diese Schwingungsformen genauer untersucht werden, um deren Entstehungsursachen besser verstehen zu können.

In Abb.1 ist der zeitliche Verlauf des Klangspektrums im Frequenzbereich bis 10 kHz dargestellt. Zur Messung wurde die Stimmgabel mit einem Metallstab angeschlagen, um auch die höheren Teiltöne gut anzuregen. Deutlich ist das ganz unterschiedliche Ausklingverhalten der einzelnen Teiltöne zu erkennen: Während der Grundton bei 440 Hz und der Teilton bei 2700 Hz relativ lange ausklingen, treten die meisten anderen Schwingungen nur kurzzeitig auf und sind im hier dargestellten Zeitbereich von 2 s bereits vollständig abgeklungen. Es stellt sich also nun die Frage, um welche Schwingungsformen es sich im Einzelnen handelt.

Modalanalyse der Stimmgabel

Messung

Zur Untersuchung der Schwingungsformen wurde das Verfahren der Modalanalyse eingesetzt [3][4]. Dazu wurde ein Gitter von Messpunkten so auf dem Messobjekt angeordnet, dass sich durch die Verbindungslinien die Kontur der Stimmgabel ergibt. Die Zinken haben einen rechteckigen Querschnitt von 8 mm x 15 mm, auf dem in verschiedenen Ebenen der Zinken jeweils 6 Messpunkte angeordnet sind: 4 auf den Ecken und 2 weitere auf der Mitte der längeren Seite. Die Messebenen haben einen Abstand von 10 mm voneinander. Die Länge der Zinken beträgt 120 mm. Während der Messung wurde die Stimmgabel auf ihrem zugehörigen hölzernen Resonanzkasten senkrecht aufgestellt, die unteren 36 mm des zylindrischen Stieles sind dabei von der hölzernen Fassung eingeschlossen. Die Anregung an den Messpunkten erfolgte mit einem Impulshammer mit integriertem Kraftaufnehmer, der zur besseren Wiederholbarkeit der Messungen als Fallpendel in einer Halterung verwendet wurde. Die Eckpunkte wurden in zwei zueinander senkrechten Richtungen (x und y) angeschlagen, um auch eine Analyse von Torsionschwingungen zu ermöglichen. Die Schwingungen wurden mit Hilfe eines Beschleunigungsaufnehmers am Stiel der Stimmgabel aufgezeichnet, da dort der Einfluss der zusätzlichen Masse von 1g vernachlässigt werden kann. Jeweils 4 Messungen wurden gemittelt und nach Überprüfung der Kohärenz gespeichert. Eine typische Übertragungsfunktion

$$H = \frac{a}{F} = \frac{\text{erzeugte Beschleunigung}}{\text{Anregungskraft}}$$

am Zinkenende ist in Abb.2 dargestellt; sie wurde mit Hilfe eines zweikanaligen FFT (Fast Fourier Transform) Analysators gewonnen.

Da bis 10 kHz gemessen werden sollte, ergab sich - bedingt durch eine 400 Linien FFT-Analyse - eine Zeitfensterlänge von 40 ms. Hierdurch werden alle ausklingenden Schwingungen am Fensterende stark beschnitten, was zu erheblichen Problemen bei der Analyse der entsprechenden Übertragungsfunktionen führt. Daher wurde zur Verminderung dieses Einflusses ein exponentielles Zeitfenster angewandt, wodurch zwar die langen Ausklingvorgänge der Grundschiwingung stark beeinträchtigt wurden, andererseits aber auch die kurzen Teilschwingungen relativ stark in die Bewertung eingingen. So erklärt es sich, dass in Abb.2 die Grundschiwingung nur relativ schwach ausgeprägt erscheint (markiert mit einem Quadrat), während die höheren Komponenten stärkere Pegel besitzen. Beim Vergleich dieser Übertragungsfunktion mit dem Klangspektrum fällt auf, dass offensichtlich nicht alle Resonanzen, die sich hier als Maximalwerte präsentieren, auch zu hörbaren Klanganteilen führen.

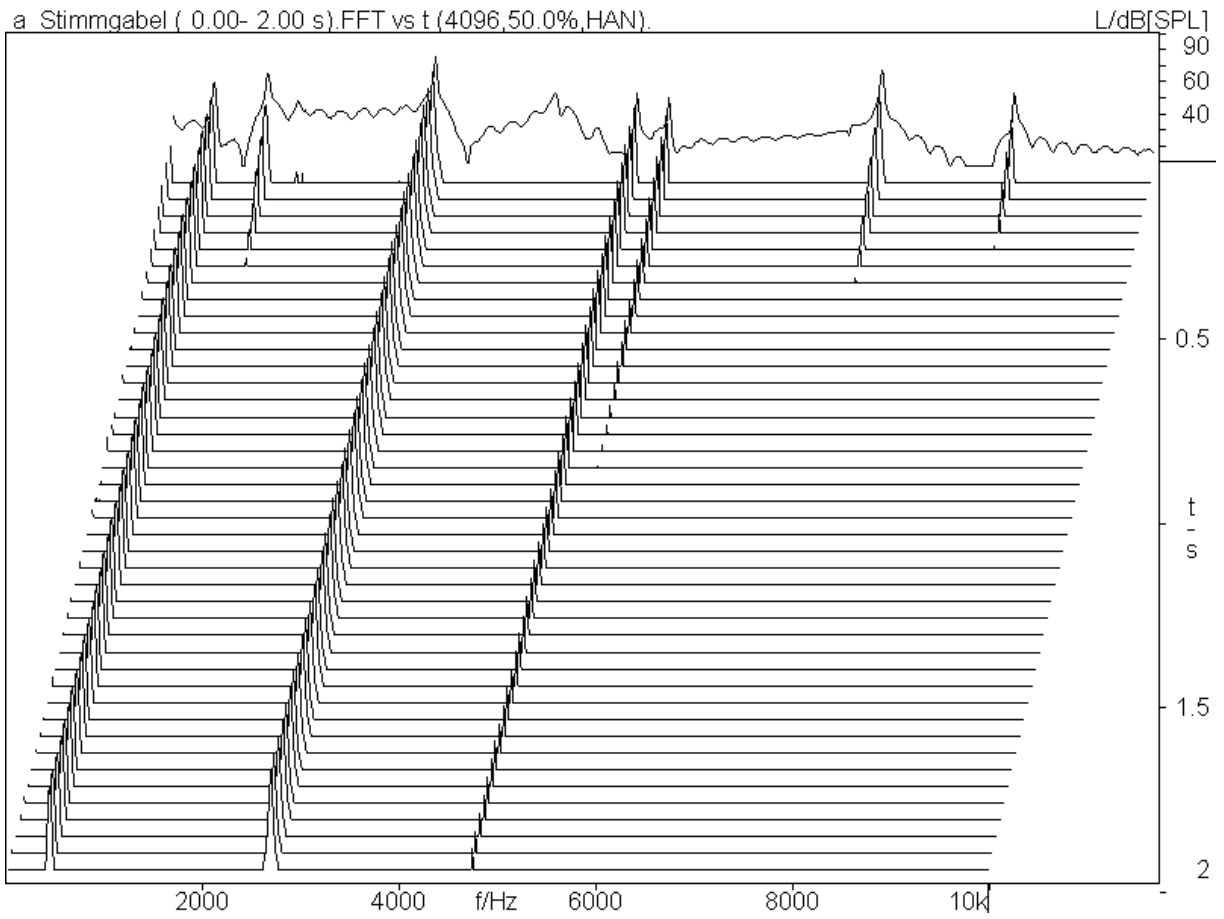


Abb. 1 Klangspektrum einer Stimmgabel, lineare Frequenzkala

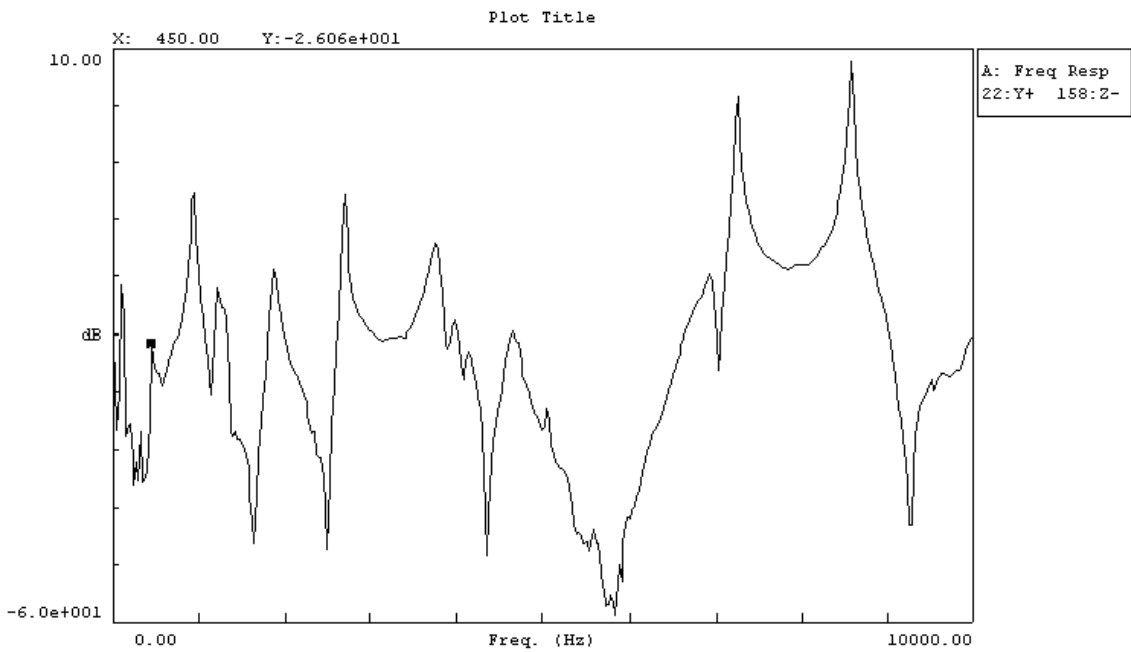


Abb. 2 Übertragungsfunktion gemessen am Zinkenende, 400 Spektrallinien in 25 Hz Abstand

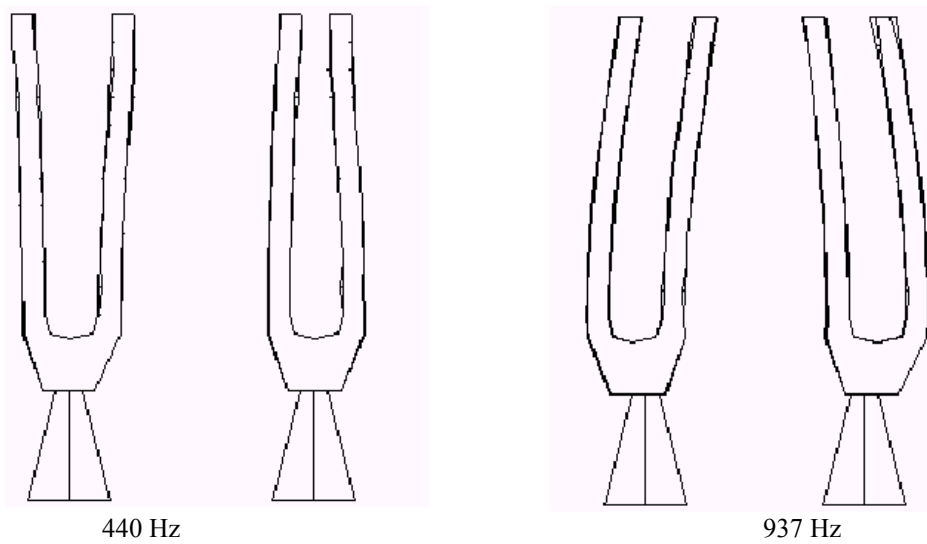


Abb. 3a Schwingungsformen der Stimmgabel

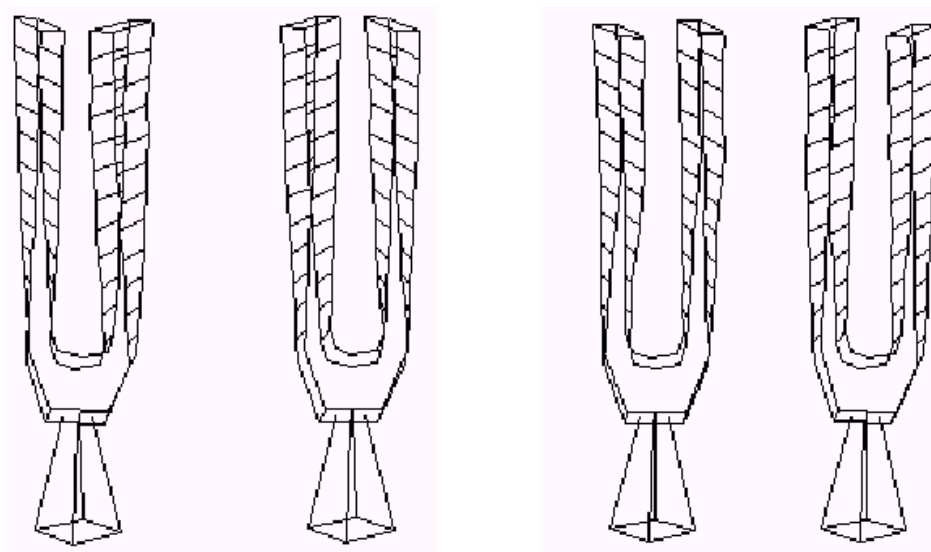
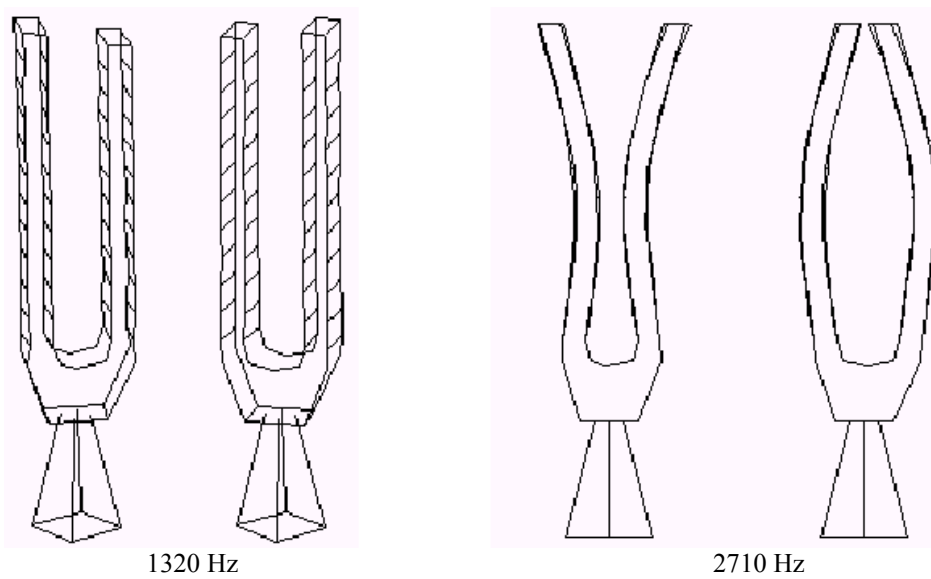


Abb. 3b Schwingungsformen der Stimmgabel

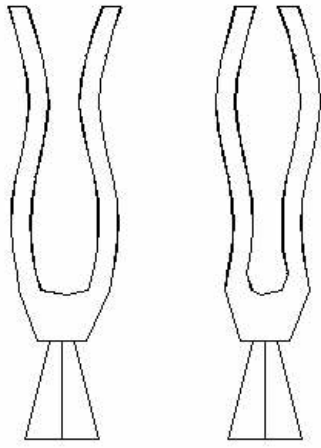


Abb. 3c Schwingungsformen der Stimmgabel

Analyse

Die Ergebnisse der Modalanalyse sind in den Bildern 3a-c zusammengestellt, wobei jeweils die beiden entgegengesetzten Extremzustände einer Schwingungsform (der so genannten "Mode") nebeneinander gezeichnet wurden. Die hier gewählte Auslenkungsamplitude ist nur zur Verdeutlichung der Formen stark übertrieben. Die Grundschwingung zeichnet sich durch Gegenbewegung der beiden Zinken aus, wobei der Stiel als Koppellement zwischen den beiden Zinken eine vertikale Schwingbewegung ausführt (Longitudinalschwingung), dessen Amplitude aber so gering ist, dass sie in dieser Darstellung nicht in Erscheinung tritt. Dagegen wird diese Schwingung gern ausgenutzt, um die Schallabstrahlung durch Ankopplung an eine große schwingungsfähige Platte (z. B. ein Tisch) zu verbessern, denn die geringe Oberfläche der Zinken erlaubt nur eine geringe Anregung der Luft. Zudem schwingt jede einzelne Zinke auch noch als akustischer Dipol und damit wirkt zwischen Vorder- und Rückseite ein akustischer Kurzschluss. Eine weitere Verbesserung der Schallabstrahlung kann dadurch erzielt werden, dass - wie im vorliegenden Fall - der Stiel auf der schwingungsfähigen Wand eines Hohlraumresonators befestigt wird, der auf die Frequenz der Stimmgabel abgestimmt ist.

Die Schwingungsform bei 937 Hz zeigt nach Abb.1 eine sehr kurze Ausklingzeit. Die Ursache liegt darin, dass hier der Stiel zu starken horizontalen Schwingungen angeregt wird, die von der Halterung bedämpft werden. Die Schwingung bei 1320 Hz tritt im Klangspektrum überhaupt nicht auf. Hier handelt es sich offensichtlich um ein Drehschwingung der ganzen Stimmgabel um den Stiel als Drehpunkt, die beim normalen Anschlag auf die Zinken auch nicht angeregt wird. Da bei der Modalanalyse auch auf die schmalen Seiten der Zinken geschlagen wurde, ist eine deutlich ausgeprägte Schwingungsform festzustellen.

Bei 2720 Hz zeigt die Stimmgabel wieder eine sehr lang ausklingende hörbare Mode, die eng mit der Grundmode verwandt ist. Hier schwingen die beiden Zinken mit jeweils einem zusätzlichen Knoten, d.h. die Enden bewegen sich entgegengesetzt zu den mittleren Bereichen der Zinken. Wie bei der Grundmode schwingt der Stiel vertikal und führt damit longitudinale Schwingungen aus, die durch angekoppelte Flächen wegen der ungünstigen Impedanzanpassung nur unwesentlich bedämpft wird.

Bei 4726 Hz und 5062 Hz handelt es sich um zwei komplementäre Torsionsschwingungsformen der einzelnen Zinken, die im ersten Fall gleichphasig ausgeführt werden, im zweiten Fall gegenphasig, d.h. die beiden Zinken zeigen entgegengesetzten Drehsinn. Bei 7243 Hz liegt wieder eine Biegeschwingung der beiden Zinken vor, die jedoch stärker bedämpft ist als die tiefen Biegemoden. Dies ist zum einen auf die effektivere Schallabstrahlung durch den wesentlich höheren Strahlungswiderstand bei hohen Frequenzen zurückzuführen, zum anderen aber auf den Dämpfungsmechanismus bei Biegeschwingungen: So nimmt die Ausklingzeit bei frequenzunabhängigem Dämpfungsfaktor η (ca. $2 \dots 6 \cdot 10^{-4}$) umgekehrt proportional zur Frequenz f ab [5]:

$$T_{60} \approx \frac{2,2}{\eta * f}$$

Zusammenfassung

Die Modalanalyse der Biegeschwingungsformen der Stimmgabel liefert einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den mechanischen Eigenschwingungen und dem abgestrahlten Schall. Besonders die symmetrischen Biegeschwingungen der beiden Zinken sind für die Schallabstrahlung von Bedeutung. Die wegen des niedrigen Strahlungswiderstandes bei tiefen Frequenzen schlechte Schallabstrahlung der wesentlichen Grundschwingung 440 Hz kann durch Übertragung über den Stiel verbessert werden. Da dieser longitudinale Schwingungen ausführt, ist eine Schwingungsübertragung auf eine angekoppelte schwingungsfähige Platte möglich, ohne die Schwingung spürbar zu bedämpfen oder zu verstimmen. Dies gilt für alle Moden mit gegenphasigen Zinkenbiegeschwingungen (Grundton, 2710 Hz, 7243 Hz). Bei Schwingungsformen, bei denen die Zinken gleichphasig (parallel) schwingen, führt der Stiel horizontale Bewegungen aus, die durch die Halterung bedämpft werden. Torsionsschwingungen sind für die Schallabstrahlung von untergeordneter Bedeutung.

Literatur:

- [1] Bork, I.: Abstimmung von Xylophonstäben, Instrumentenbau-Zeitschrift 45(1991) H.10, S.51-59,
- [2] Bork, I.: Dynamische Eigenschaften von Schlegeln für Schlaginstrumente, Instrumentenbau-Zeitschrift 48(1994), H.6, S.13-17,
- [3] Wogram, K.: Schwingungsuntersuchungen an Musikinstrumenten mit Hilfe der Modalanalyse, Teil I und II, Instrumentenbau-Zeitschrift, 45(1991) H.1 S44-48, H. 2/3, S115-122,
- [4] Wogram, K.: Anwendung der Modalanalyse bei Musikinstrumenten, Teil I und II, Instrumentenbau-Zeitschrift, 45(1991) H.4 S.58-63, H. 5, S.36-40,
- [5] Cremer, L. u. Heckl, M.: Körperschall, Springer Verlag, Berlin 1967.

50 Jahre Institut für Musikinstrumentenbau

Ein Rückblick auf 50 Jahre IfM anlässlich der Festveranstaltung im September 2001
Gunter Ziegenhals (Geschäftsführer des IfM)

Die Gründung

Das Institut für Musikinstrumentenbau Zwota wurde im Jahre 1951 als Prüfdienststelle des damaligen Deutschen Amtes für Material- und Warenprüfung (DAMW) der DDR gegründet. Die Entstehung ist dem erheblichen Engagement eines führenden Musikinstrumentenakustikers der damaligen Zeit, des aus Markneukirchen stammenden Dr. Hermann Meinel, zu danken. Nach den Vorstellungen seines Gründers, einem gelernten Instrumentenbauer, sollte das Institut durch seine Tätigkeit eigene und fremde Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Musikalischen Akustik für den Musikinstrumentenbau im oberen Vogtland nutzbar machen. Eine Urkunde belegt den Eintrag in das Register der Forschungseinrichtungen der ehemaligen DDR am 25. Juni 1951.

Womit befasst sich aber ein Institut für Musikinstrumentenbau, da doch der Musikinstrumentenbau traditionell handwerklich geprägt ist und von der Überlieferung lebt? Gemäß dem Status einer Prüfstelle bestand die Aufgabe des IfM zunächst vorrangig in der objektiven Beurteilung von Musikinstrumenten. Um diese Aufgabe zu erfüllen, war es notwendig, Forschungen zum besseren Verständnis der Funktionsweise der Instrumente vorzunehmen sowie Verfahren und Vorrichtungen zu ersinnen, die Messungen von wesentlichen (vorrangig akustischen) Qualitätsmerkmalen der Instrumente erlauben. 1959 erfolgte die Zuordnung des Institutes zur VVB Musik und Kulturwaren (später VEB Kombinat Musikinstrumente) als zentrale, industrienahere Forschungseinrichtung. Eine industrienahere Forschungseinrichtung ist es bis heute geblieben.

Statistisches aus fünf Jahrzehnten

Durchstöbert man die Archive des IfM mit statistischen Hintergedanken, so findet man Berichte zu insgesamt **892 Forschungsprojekten** (davon 281 Tasteninstrumente, 222 Zungeninstrumente, 109 Blasinstrumente, 97 Werkstoffforschung, Schwerpunkt Holz, 48 Schlaginstrumente, 41 Zupfinstrumente) über die in **242 Veröffentlichungen** berichtet wurde. Das mutet zunächst gewaltig an. Aber alle Daten würden auf ca. 8 Gbyte Datenträger und 50 DAT-Kassetten (100 h Tonaufzeichnung) Platz finden. Man könnte alles bequem in einer Aktentasche davontragen, wenn vorher jemand alle Daten digitalisiert hätte. Dafür fehlt aber momentan die Zeit, oder genauer gesagt das Geld.

War das erste Jahrzehnt vorrangig von grundlegenden Arbeiten zur Entwicklung von Messtechniken und zum physikalischen Verständnis der Funktion der Musikinstrumente geprägt, so änderte sich dies in den 60ern grundlegend. Neben einem wesentlich intensivierten Rationalisierungsmittelbau kam die Forschungsrichtung Materialeinsatz mit dem Schwerpunkt Holzwerkstoffe sowie eine Elektronikentwicklungsabteilung hinzu. Es ist heute fast vergessen, dass die Grundlagen der ersten REGENT-Verstärkerserie, die Orgelreihen IONIKA 5 und 6 sowie MATADOR im IfM gelegt wurden. Das KLAIVSET, ein

elektromechanisches Instrument, bei dem Tonzungen angerissen und ihre Schwingungen elektrisch aufgenommen und verstärkt werden, entstand im IfM. Auch die Entwicklung der ersten E-Gitarren-Mischpulte gehörte zu den Aufgaben des IfM. Ende der 60er Jahre wechselte die Elektronikentwicklung zum Klingenthaler Harmonikawerk.

In den 70er Jahren erweiterte man das Aufgabenfeld des IfM auf viele Bereiche der Kulturwarenindustrie bis hin zur industriellen Formgestaltung. So kreierten die Mitarbeiter des Institutes z. B. ein neues Tintenleitsystem für Füllhalter. Damit verbunden war eine Vergrößerung der Belegschaft; eine weitere Abteilung für technische Applikationen wurde geschaffen. Die 80er Jahre ließen das IfM auf über 80 Mitarbeiter anwachsen, die in 10 Betriebsteilen neben Zwota, Klingenthal und Markneukirchen in Plauen, Halle, Leipzig und Berlin tätig waren. Eine spezielle Mikroelektronikabteilung kam hinzu, die Psychoakustik hielt Einzug in die Arbeiten des IfM. Mit der Entwicklung und Überleitung der Technologie des roboterassistierten Polierens von Akkordeongehäusen im Klingenthaler Harmonikawerk gelang es schwere körperliche Arbeit zu beseitigen und gleichzeitig die Prozesse rationeller zu gestalten. Leider fielen die Anlagen Anfang der 90er einigen Maschinenstürmern zum Opfer, die darin ihre Arbeitsplätze gefährdet sahen. Die 90er schließlich führten das IfM zu seinen Wurzeln zurück. Bei stark reduzierter Mannschaft liegen die Hauptaufgaben wieder in der Beurteilung von Instrumenten, der Beschreibung ihrer Funktion sowie in Forschungen zu eingesetzten Materialien. Das Institut arbeitet mit ca. zehn Mitarbeitern schwerpunktmäßig an wissenschaftlichen und vorwettbewerblichen Projekten für den deutschen Musikinstrumentenbau, die maßgeblich vom Bundeswirtschaftsministerium über die Forschungsgemeinschaft Musikinstrumente gefördert werden.

Beispiele aus der Arbeit des Institutes

Den ersten im Archiv registrierten Bericht (1954) fertigte der Institutsgründer selbst unter dem Titel: Stellungnahme zum Bericht "Eine zusammenfassende Beschreibung elektroakustischer Musikinstrumente, ihrer Eigenarten und Anwendungsmöglichkeiten unter besonderer Berücksichtigung des Mixturtrautoniums". Dem Text kann man entnehmen, dass man der aufkommenden elektronischen Klangerzeugung eher skeptisch gegenüberstand.

Als eines der ersten Ergebnisse entstand bereits 1952 das noch heute von vielen Instrumentenherstellern genutzte "Elektrooptische Stimmgerät" (Abbildung 1). Sein Schöpfer war der brillante Erfinder Gerhard Rasch, der leider kurz vor unserer 50 Jahr - Feier verstarb. Das Stimmgerät muss zwar manuell auf den jeweiligen Zielton umgeschaltet werden, jedoch ist es bei einer Genauigkeit von ± 1 cent sehr unempfindlich gegen Störgeräusche und auch für kurze Töne, wie sie z. B. Xylophone erzeugen, geeignet.

Das von der Zeitdauer her längste Projekt waren die Arbeiten zum halb- und vollautomatischen Stimmen von Tonzungen. Es begann 1960 mit ersten grundlegenden Arbei-

ten und erstreckte sich bis in die 80er Jahre hinein. In der ersten Hälfte der 60er Jahre wurde in Zusammenarbeit verschiedener Entwicklungsstellen und Anwendern das halbautomatische Stimmen von Akkordeonstimmplatten (HAS) entwickelt und bis 1966 30 Anlagen im Klingenthaler Harmonikawerk (KHW) installiert. Halbautomatisches Stimmen hieß, dass die Tonzungen automatisch gestimmt wurden, das Einlegen und Wenden der Stimmplatten jedoch manuell erfolgte. Ab 1972 arbeiteten die ersten vollautomatischen Anlagen zum Stimmen von Akkordeontonzungen im KHW. Später passte man die Technologie und die Anlagen an die Blasharmonika und die Mundharmonika an. Alle Varianten der Anlagen basieren auf einem Patent von Gerhard Rasch.



Abbildung 1: Elektrooptisches Stimmgerät, entwickelt im IfM 1952



Abbildung 2: Prototyp eines 1988/89 im IfM entwickelten Kleinkeyboards

Von 1971 bis 1976 entwickelten die Forscher des IfM gemeinsam mit Fachleuten der Firma MUSIMA die RESONATA - Gitarrenserie. Die Instrumente zeichneten sich durch hervorragende Klangqualität aus. So wurde die Resonanzfläche und Zargenhöhe durch Analyse der Frequenzkurve sowie durch Lautstärkemessungen in umfangreichen Versuchsreihen optimiert. Veränderungen in der

Dimensionierung des Schallochs und des Resonanzraumes führten von den Tiefen bis in die höchsten Lagen zu klanglich ausgeglichenen Instrumenten. Auch in spieltechnischer Hinsicht konnten wesentliche Fortschritte erzielt werden. Das Ergebnis erwies sich am Markt als außerordentlich erfolgreich.

In Sachen elektronischer Tasteninstrumente ergab sich 1988/89 ein interessantes Zwischenspiel. Ein Team des IfM entwickelte in Zusammenarbeit mit dem Rationalisierungsbetrieb und dem Klingenthaler Harmonikawerk ein Kleinkeyboard (32 Tasten, vierstimmig polyphon mit Rhythmusgerät) bis zur Serienreife. Abbildung 2 zeigt den Prototyp. Das Instrument basierte auf dem Einchipmikrorechner U 88XX, der z.B. auch für die Steuerung von Waschmaschinen eingesetzt wurde. Im Gegensatz zu heute verfügbaren Ressourcen musste man dabei mit 4 kbyte ROM und 128 byte (!!!!!) RAM auskommen. Und es gelang!

Bereits 1960 wurde im IfM ein reflexionsarmer Raum (Freifeldraum) installiert. In den Jahren davor nutzte man in Ermangelung eines derartigen Messraumes die Reflexionseigenschaften von frischem Pulverschnee. Bei entsprechendem Winterwetter platzierte man die zu messenden Instrumente im geöffneten Fenster und hatte so einen vollwertigen Halbraum zu Verfügung (Abbildung 3). Das Mikrofon wurde mit einer kleinen Seilbahn, die zwischen Fenster und einem gegenüber befindlichen Baum gespannt war, bewegt. 1996 konnte dieser Messraum mit finanzieller Unterstützung des Sächsischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Arbeit sowie erheblichen Eigenleistungen grundlegend rekonstruiert werden.



Abbildung 3: Freifeldmessungen bei frischem Pulverschnee

Die Zeit um 1990

1990 wurde im Rahmen der Zergliederung des Forschungs- und Rationalisierungsbetriebes, dessen Bestandteil das IfM inzwischen geworden war, die Institut für Musikinstrumentenbau GmbH gegründet. Sie entsprach etwa dem Institut Mitte der 70er Jahre. 1993 gründete sich der Vogtländische Förderverein für Musikinstrumentenbau und Innovation e.V. (VFMI). Dieser übernahm das IfM von der Treuhandanstalt und führt es als eigene, industrie-nahe Forschungseinrichtung auf den Gebieten Musikinstrumentenbau und Musikalischer Akustik weiter. **Unser Dank geht an alle, die das Institut in der schwierigen Phase der Privatisierung (1990 bis 1993) und in den Folgejahren unterstützten und maßgeblich an der**

Gründung und Etablierung des VFMI e.V. beteiligt waren. Die Liste derer ist sehr lang. Es seien stellvertretend vier genannt: Das Bundeswirtschaftsministerium, das Sächsische Staatsministerium für Wirtschaft und Arbeit, der Bundesverband der deutschen Musikinstrumenten - Hersteller und nicht zuletzt die IHK Südwestsachsen Regionalkammer Plauen. Gefördert durch deren gemeinsame Aktivitäten konnte eine infrastrukturell außerordentlich bedeutsame Forschungseinrichtung, in der in dieser Beziehung sehr schwach entwickelten Region des sächsischen Vogtlandes, erhalten werden.

Das IfM heute

Das Institut verfügt über modernste technische Ausrüstungen, die in Verbindung mit der kumulierten Erfahrung der wissenschaftlichen Mitarbeiter eine effektive Zusammenarbeit mit den Herstellern von Musikinstrumenten bei der Lösung von Problemen auf musikalisch/akustischem und technischem Gebiet sichern. Als Forschungseinrichtung ist das IfM im In- und Ausland bekannt und etabliert. Neben den traditionell guten Kontakten zur PTB in Braunschweig entwickelte sich in den zurückliegenden Jahren auch eine vorteilhafte Zusammenarbeit mit der Uni der Bundeswehr in München Neubiberg. Für eine umfassende Untersuchung an Musikinstrumenten ist die Zusammenarbeit mit exzellenten Musikern unerlässlich. Hier haben wir in der Vogtland Philharmonie Greiz/Reichenbach seit nunmehr zehn Jahren einen zuverlässigen Partner.



Abbildung 4: Modalanalyse an einer Flöte in Spielhaltung

Wie bereits erwähnt, ist die Prüfung von Musikinstrumenten eine wesentliche Aufgabe des IfM. So entwickelten wir 1999 gemeinsam mit der Fa. Höfner einen Qualitätspass für Gitarren. Seitdem kommen permanent hochwertige Instrumente aus Bubenreuth (Baiersdorf) ins Vogtland zur Prüfung. Auch für "Warentester" war das IfM in den letzten Jahren mehrfach erfolgreich im Einsatz. 1999 betraute das Bundesministerium für Wirtschaft das IfM mit der Abwicklung des Deutschen Musikinstrumentenpreises (DMIP). Das IfM übernimmt hier die Aufgaben der Prüf- und Geschäftsstelle.

Die vorhandenen Kenntnisse werden aber auch außerhalb des Musikinstrumentenbaus eingesetzt. So bietet der VFMI e.V. mit seinem Institut Dienstleistungen auf den Gebieten Lärmschutz und Schwingungsanalyse an. U.a. wurden

bereits zahlreiche Lärmprognosen für die unterschiedlichsten Bauvorhaben im Raum Sachsen/Thüringen erstellt. Für Arbeiten in der Raum- und Bauakustik sowie der Schall- und Schwingungstechnik ist eine moderne Ausrüstung und entsprechendes Know-how vorhanden. Da hier in vielen Branchen, insbesondere im Baugewerbe ein erheblicher Bedarf besteht, sieht man für die Zukunft ein wichtiges Betätigungsfeld. Es darf nicht vergessen werden, dass Raum- und Bauakustik, Schall- und Schwingungsmesstechnik Probleme darstellen, die eng mit dem Musikinstrumentenbau und dem Spielen von Musikinstrumenten verbunden sind.

Gestützt auf die Erfahrungen im Rahmen des Projektes "Erkennung und Auswahl von einheimischem Resonanzholz durch Anwendung eines zerstörungsfreien Verfahrens zur Beurteilung der Holzstruktur" kann das IfM zusätzlich verschiedene Dienstleistungen, z. B. Gutachten zum Zustand von Holz, auch im verbauten Zustand, anbieten. Das fachlich anerkannte Verfahren der Holzstrukturanalyse mit Hilfe der Bohrnadeltechnik stellt in Verbindung mit weiteren visuellen als auch messtechnischen Einschätzungskriterien eine gesicherte Grundlage zur Prognose der Standsicherheit von Bäumen als auch der Festigkeitsbeurteilung von Holz im Zusammenhang mit der Baustatik dar. Darüber hinaus stellt die Bohrnadeltechnik als z. Z. einziges anwendungsbereites Verfahren, ein Prognoseinstrument zur Jahrringanalyse am stehenden Stamm von Nadelholz, beispielsweise für den Musikinstrumentenbau, dar.

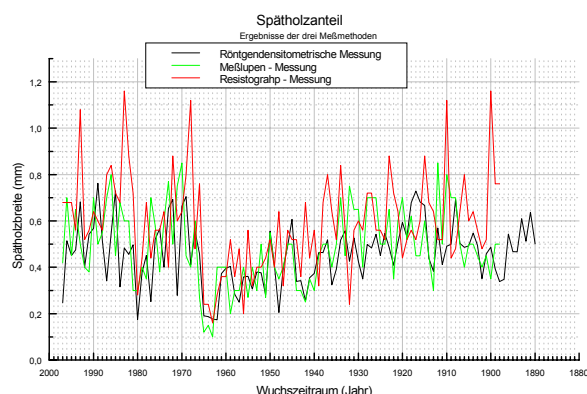


Abbildung 5: Folge der Spätholzanteile im Vergleich von drei Messverfahren; Röntgendensitometrie, Messlupe, Resistograph

Bei aller positiver Bilanz kann jedoch die Zusammenarbeit mit den regionalen Firmen noch nicht befriedigen. Im Verhältnis zu den ca. 120 Musikinstrumentenbauern der Region ist die Anzahl der entsprechenden Projekte und Aufträge zu gering. Es gilt wohl eben doch das Sprichwort wonach es "Am Fuße des Leuchtturms am dunkelsten ist". Mit dem Projekt "Musicon Valley", das auf der InnoRegion - Initiative des Bundesforschungsministeriums beruht, ist uns nun aber mittelfristig ein Instrument in die Hand gegeben worden, diese Situation nachhaltig zu verändern. In diesem Sinne kann man gespannt auf die nächsten 50 Jahre sein. Wie bemerkt doch „Kaiser Franz“ so treffend:

"Schau mer mal!"

Teilnehmerverzeichnis

Helmut Fleischer
Uni der Bundeswehr München
LRT 4
85577 Neubiberg
Tel.: 089/60042385

Judith Angster
IBP Institut für Bauphysik
Nobelstrs. 12
70569 Stuttgart
Tel.: 0711/9703405

Detlef Zscherpel
Gutenbergstr. 76
14467 Potsdam
Tel.: 0331/240028

Thomas Görne
Wiciefstr. 42
10551 Berlin (Tiergarten)
Tel.: 030/ 3968923

Doris Geller
Jahnstr. 12
67283 Obrigheim
Tel.: 06359/924221

Thomas Hempel
Otto-Hahn-Ring 6
München
Tel.: 089/63648962

Gunter Ziegenhals
Institut für Musikinstrumentenbau
Klingenthaler Str. 42
08267 Zwota
Tel.: 037467/23481

Helmut Lemme
Postfach 120925
80034 München
Tel.: 089/509008

Edgar Lieber
Erich-Ohser-Str. 10
08525 Plauen
Tel.: 03741/525124

Stefan Gruschka
Stettiner Str. 24
40595 Düsseldorf
Tel.: 0211/705751

Walther Krüger
Mozartweg 2
08258 Markneukirchen
Tel.: 037422/3034

Klaus Wogram
Phys.-Techn. Bundesanstalt
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
Tel.: 0531/5921530

H. Bückler
Jülicherstr. 10
41199 Mönchengladbach
Tel.: 02166/602635

Ingolf Bork
Phys.-Techn. Bundesanstalt
Bundesallee 100
Tel.: 0531/5921531

Manfred Zollner
E. Buchenberger Allee 14
93051 Regensburg
Tel.: 0941/920570

Horst Jürgensmann
Uhlgasse 37, Merl
53340 Meckenheim
Tel.: 02225/3625

Michael Baltrusch
Institut für Musikinstrumentenbau
Klingenthaler Str. 42
08267 Zwota
Tel.: 037467/23481

H.-M. Fischer
Westerstr. 3
72135 Dettenhausen

Christoph Wagner
Nogatweg 3
30916 Isernhagen NB
Tel.: 0511/777115

Götz Corinth
Tel.: 0671/77841
Fax: 0671/74199

R. Sato
Pianohaus SATO Meisterbetr.
Bohlweg 51
38100 Braunschweig
Tel.: 0531/48039720

Joachim Schneider
Zupfinstrumentenbaumeister
Bergstr. 36
08258 Markneukirchen
Tel.: 037422/2145

Klaus Eichelberger
Institut für Musikinstrumentenbau
Klingenthaler Str. 42
08267 Zwota
Tel.: 037467/23481

Friedrich Schetelich
Institut für Musikinstrumentenbau
Klingenthaler Str. 42
08267 Zwota
Tel.: 037467/23481

Frank Tarfeld
DLR, AS-WK
51147 Köln
Tel.: 02203/6012366

Eberhard Kreul
Zupfinstrumentenmachermeister
Hohe Str. 2
08265 Erlbach
Tel.: 037422/6152

Siegfried Eichhorn
Zupfinstrumentenbau
Richard-Wagner-Str. 12
08258 Markneukirchen
Tel.: 037422/2128

Eberhard Meinel
Westfälische Hochschule Zwickau
FB Angewandte Kunst Schneeberg
Studiengang Musikinstrumentenbau
Markneukirchen
Adorfer Str. 38
08258 Markneukirchen
Tel.: 037422/2094