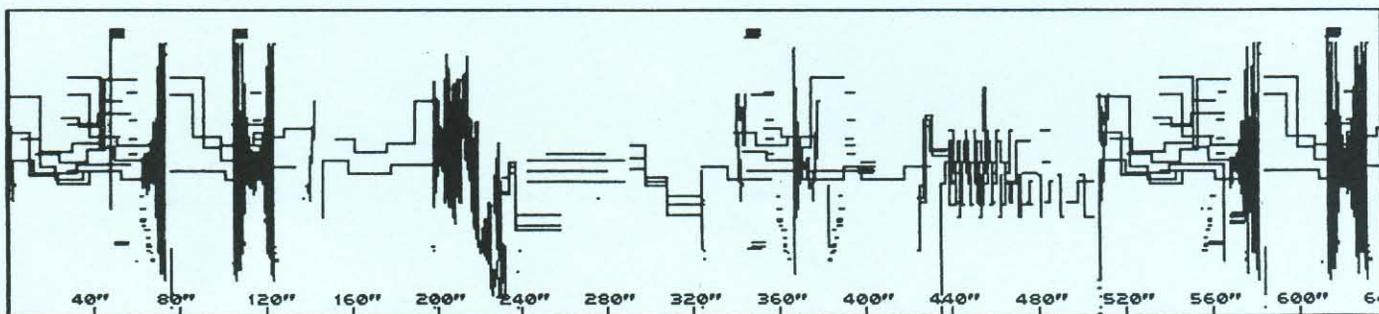


INSTITUT FÜR ELEKTRONISCHE MUSIK  
AN DER HOCHSCHULE FÜR MUSIK UND DARSTELLENDEN KUNST IN GRAZ

GREGOR WIDHOLM

NACH DEM VORTRAG VOM 29.1.91 AM INSTITUT FÜR ELEKTRONISCHE MUSIK IN GRAZ

**HOLOGRAPHIE, CAD UND  
MODALANALYSE IM DIENSTE  
DER MUSIK**



BEITRÄGE ZUR ELEKTRONISCHEN MUSIK 2

Die Reihe "Beiträge zur Elektronischen Musik" stellt Arbeiten des Instituts für Elektronische Musik zu den Themenbereichen Akustik, Computermusik, Musikelektronik und Medienphilosophie vor. Dabei handelt es sich meist um Ergebnisse von Forschungsarbeiten am Institut oder um überarbeitete Vorträge von Institutsmitarbeitern.

Darüberhinaus soll hier eine Diskussionsplattform zu den genannten Themen entstehen. Beiträge zu diesem Forum sollen in deutscher oder in englischer Sprache verfaßt sein. Diese können auch eine Beschreibung von noch nicht fertiggestellten Projekten und Ideen darstellen.

Beiträge bzw. Anfragen über bisher erschienene Artikel richten Sie bitte an die umseitige Kontaktadresse.

Die Redaktion behält sich das Recht vor, Arbeiten abzulehnen. Mit der Einsendung erklärt sich der Autor mit dem Abdruck einverstanden.

Wir hoffen, daß die Schriftenreihe "Beiträge zur Elektronischen Musik" eine Anregung für Ihre wissenschaftliche und künstlerische Arbeit bietet.

Robert Höldrich & Andreas Weixler  
(Redaktion)

The series "Beiträge zur Elektronischen Musik" (contributions to electronic music) presents papers by the Institute for Electronic Music on various topics such as acoustics, computer music, music electronics, and media philosophy. The contributions present either results of research work performed at the Institute or edited lectures held by members of the Institute.

Moreover, the series shall establish a discussion forum for the mentioned fields. Articles for this magazine shall be written in either English or German. The contributions can also deal with the description of projects and ideas that are still in preparation and not yet finished.

Contributions, resp. inquiries about articles published so far, please send to the address mentioned next page.

The right to refuse the publication of contributions is reserved to the editors. The transmittal of a paper confirms the author's consents for publication.

We hope that the series "Beiträge zur Elektronischen Musik" will prove a stimulus for your scientific and artistic work.

Robert Höldrich & Andreas Weixler  
(the editors)

Impressum:

- Herausgeber: Institut für Elektronische Musik (IEM)  
an der Hochschule für Musik und darstellende Kunst in Graz
- Redaktion Robert Höldrich, Andreas Weixler
- Titelblatt: Unter der Verwendung der graphischen Darstellung der  
Komposition "Natté" von Helmut Dencker mit freundlicher  
Genehmigung des Komponisten.
- Druck: Hochschule für Musik und darstellende Kunst in Graz  
© 1993
- Erscheinungsort: Graz, Österreich
- Kontaktadresse: Institut für Elektronische Musik  
an der Hochschule für Musik und darstellende Kunst in Graz  
Jakoministr. 3-5  
A-8010 Graz, Österreich  
Tel.: ++43/ 316 / 389-7010 (Sekretariat)  
Fax: ++43/ 316/ 32 5 04

GREGOR WIDHOLM

NACH DEM VORTRAG VOM 29.1.91 AM INSTITUT FÜR ELEKTRONISCHE MUSIK IN GRAZ

**HOLOGRAPHIE, CAD UND  
MODALANALYSE IM DIENSTE  
DER MUSIK**

### Abstract

Nach einem kurzen geschichtlichen Überblick über erfolgreiche und weniger erfolgreiche Versuche berühmter Persönlichkeiten, die Funktionsweise der Musikinstrumente zu verstehen und naturwissenschaftlich zu erklären, wird der Stand der Technik anhand der neuesten Computerverfahren, die derzeit in den Forschungslabors angewandt werden um die Qualität von Musikinstrumenten objektiv zu beurteilen, näher erläutert. Für Streichinstrumente sind dies die Holographie und verschiedene Resonanzmessungen, für Blasinstrumente verfeinerte Eingangsimpedanzmessungen und für die Schlaginstrumente (aber auch für Klavier, Orgelpfeifen und überhaupt alle Arten von Musikinstrumente) die Modalanalyse (Videofilm). Kurz gestreift werden ein Computersystem zur (soweit als möglich) gehörrechten graphischen Darstellung musikalischer Klänge (auch im Bereich der Mikrostrukturen eines musikalischen Klanges) mit dessen Hilfe wichtige Aussagen über die Klangqualität eines Musikinstrumentes im stationären und im transienten Bereich möglich sind und der Versuch mittels CAD Holzblasinstrumente zu optimieren.

Da ein Musikinstrument zwar nur eine objektive Qualität, aber durchaus mehrere subjektive Qualitäten besitzen kann (verschiedene Musiker beurteilen ein und dasselbe Instrument unterschiedlich, nicht jedes Instrument ist für jeden Musiker geeignet), wird gezeigt, wie mittels Computersimulation die subjektive Qualität eines bestimmten Instrumentes für einen bestimmten Musiker errechnet werden kann.

### Abstract

First, a short historical survey of more and less successful experiments of famous persons on the understanding of the functioning of musical instruments and, consequently, the scientific explanation thereof, is given. Following, the newest computer techniques that are presently at use in laboratories and that aim at the objective assessment of musical instruments are commented upon in detail. These methods include holography and various resonance measurements for string instruments, improved input impedance-measurements for wind-instruments, and modal analysis (video-tape) for percussion instruments. Modal analysis is also used for piano, organ-pipe, and generally for all instruments.

In brief, two methods are discussed. The first is a computerized system for the (as far as possible) hearing-adequate graphic presentation of musical sounds (even for the microstructures of sounds). This system makes possible important statements about the sound quality of a musical instrument in the stationary and transient range. The second method deals with the experiments to optimize woodwind instruments by means of CAD.

Since a musical instrument can only have one objective quality but easily more than one subjective quality, i.e., different musicians judge differently about one and the same instrument, and not every instrument is equally suited for each musician, it is shown how, via computer simulation, the subjective quality of a specific instrument can be calculated for specific musicians.

## HOLOGRAPHIE, CAD UND MODALANALYSE IM DIENSTE DER MUSIK

Gregor Widholm  
Institut für Wiener Klangstil  
Hochschule für Musik und darstellende Kunst in Wien

*Der Beginn aller Wissenschaften ist das Erstaunen,  
daß die Dinge sind, wie sie sind!*

Dieser Ausspruch des antiken griech. Philosophen *Aristoteles*, der sicherlich auch heute noch für viele Fachgebiete gilt, trifft in besonderem Maße für die Musikinstrumentenakustik zu. Wurden doch die Musikinstrumente über Jahrhunderte hinweg aufbauend auf der handwerklichen Erfahrung der Instrumentenmacher mit rein empirischen Methoden und unter Einbeziehung ästhetischer Gesichtspunkte (man denke z.B.: an die Violinen) ohne Zutun der Akustik zu ihrer heutigen Höhe entwickelt. Es gab deshalb immer schon Wissenschaftler, die ihren Geheimnissen auf die Spur kommen wollten.

### Kurzer geschichtlicher Überblick

Den frühesten Hinweis auf eine "naturwissenschaftliche" Beschäftigung mit Musik und Musikinstrumenten besitzen wir -wie könnte es anders sein- von den "alten Griechen": *Pythagoras von Samos* und sein Kreis machten getreu nach ihrem Motto "*Alles ist Zahl*" eine wichtige Entdeckung: Musikalische Intervalle lassen sich am Monochord als Verhältnisse ganzer Zahlen darstellen (Oktave 2:1, Quinte 3:2, Quarte 4:3, usw).

So richtig "entdeckt" als Objekt experimentellen Suchens und naturwissenschaftlicher Forschungstätigkeit wurden die Musikinstrumente allerdings erst in der Renaissance.

Machte sich der Wolfenbüttler Hofkapellmeister *Michael Praetorius* zwischen 1610 und 1615 so seine Gedanken über die Temperaturabhängigkeit der Blasinstrumente und des Regals (kleine Orgel), und konnte damals genausowenig eine logische Erklärung dafür finden wie für die Tatsache, daß Doppelrohrblatt-Instrumente mit enger zylindrischer Bohrung (z.B.: das *Krummhorn*) eine Oktave tiefer klingen als gleichlange *Pommern* oder *Dulziane* (in seinem Werk "*Syntagma Musicum*" über das damalige Instrumentarium beschäftigte er sich mit diesem Phänomen ausführlich), so beschrieb *Galileo Galilei* 1638 in seinen "*Discorsi*" (Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige...), daß sich die Schwingungszahl (Tonhöhe) einer Saite umgekehrt proportional zu ihrer Länge verhält. Darüber hinaus hatte sein Vater (der Komponist, Lautenspieler, Sänger und Musiktheoretiker *Vincenzo Galilei*) herausgefunden, daß die Intervallverhältnisse bei konstanter Saitenlänge dem Quadrat der Kraft proportional sind, mit dem die Saite gespannt wird.

Diese Erkenntnisse faßte der französische Mathematiker, Philosoph und Musiktheoretiker *Marin Mersenne* in Form mathematischer Gesetze zusammen. Mersenne, der gemeinsam mit *Rene Descartes* experimentierte und die Schwingungen von Saiten untersuchte, entdeckte auch als erster die Obertöne musikalischer Klänge und ihr ganzzahliges Verhältnis zum Grundton, also der tiefsten Schwingung. Darüber hinaus hat er im Zuge seiner Experimente zur Schallausbreitung zum ersten Male die Schallgeschwindigkeit in Luft gemessen; zwar ungenau - aber immerhin!

In seinem 1636 erschienenen Hauptwerk "*Harmonie Universelle*" beschreibt er die Ergebnisse seiner akustischen Untersuchungen. *Mersenne* entwickelte damit die Grundlagen für den mathematischen Apparat der partiellen Differentialgleichung und ihre Anwendung, die dann von den großen Physikern des 18. Jh. ausgearbeitet wurden.

Und damit kommen wir nach einer Phase des experimentellen Suchens und Entdeckens wichtiger Gesetzmäßigkeiten im 18. und 19. Jh. in eine theoretisch orientierte Phase der akustischen Forschung, bei der die Musikinstrumente ungeachtet ihrer eigentlichen Zweckbestimmung nur als reizvolles Demonstrationsobjekt für physikalische Gesetze dienen.

Als wichtige Namen seien hier: *Leonhard Euler*, *Joseph Luis Lagrange* und *Daniel Bernoulli* genannt, der 1770 erstmals Wellengleichungen für Hörner aufstellte, nachdem *Newton* und *Leibnitz* die grundlegenden Bewegungsgesetze formuliert hatten. Diese Wellengleichungen gerieten alsbald wieder in Vergessenheit um bis 1919 insgesamt vier Mal (!) wiederentdeckt und neuformuliert zu werden.

Der Physiker und Arzt *Felix Savart* beschäftigte sich allerdings auch mit den praktischen Fragen des Instrumentenbaues, nämlich: Wie hoch sollen Decke und Boden einer Violine vor dem Zusammenbau klingen (welche Frequenzen sollen die Hauptresonanzen der Platten besitzen), um ein gutes fertiges Instrument zu ergeben.

Für seine Experimente benützte er unter anderem die von seinem Freund *Ernst Chladni* entwickelte Methode, die in Form der berühmten "*Chladnischen Figuren*" die Schwingungsformen von Platten sichtbar machte (Abb. 1).

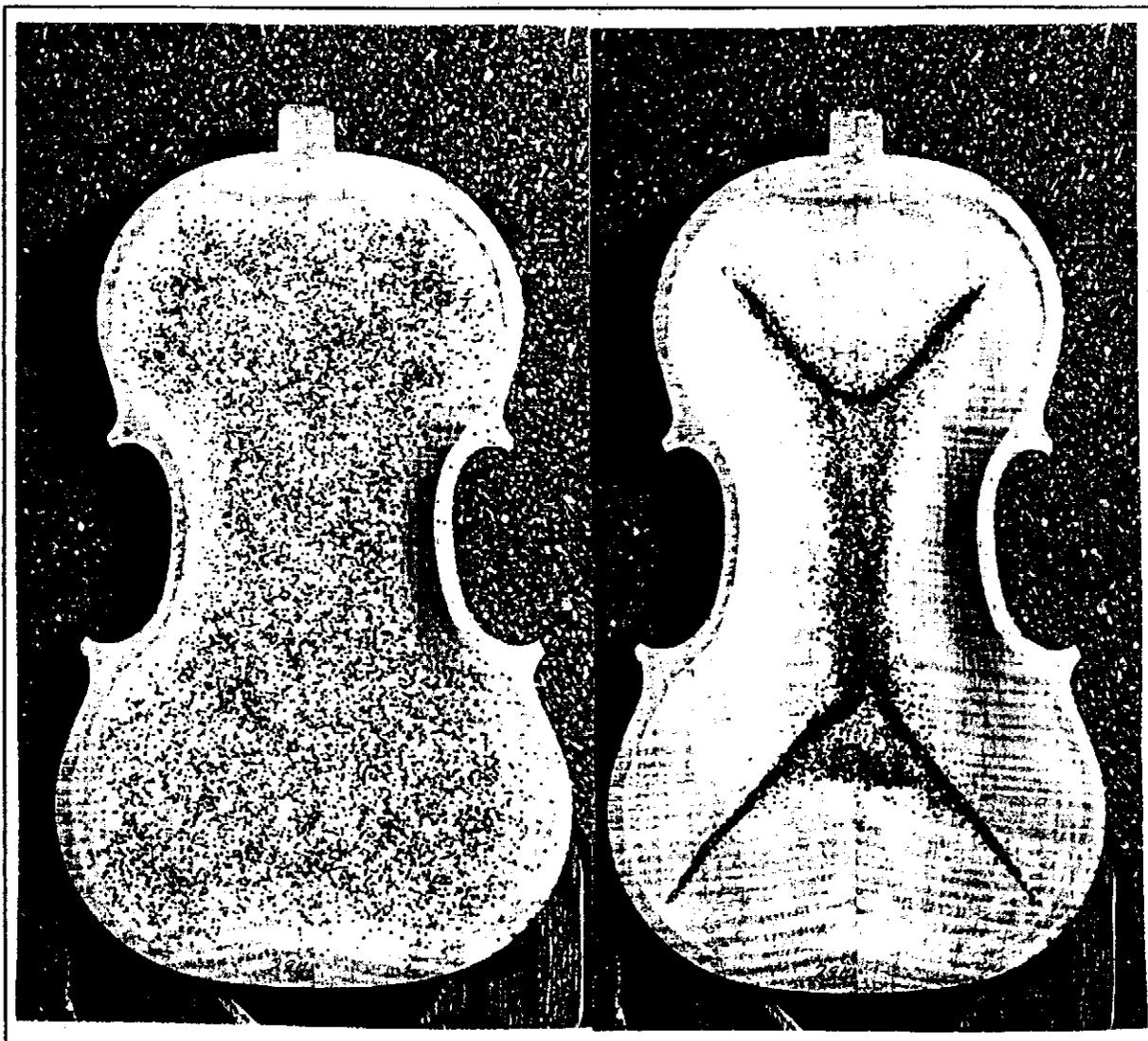


Abb. 1: Chladnische Figuren. Wird auf einer Violinplatte feines Pulver verteilt und diese Platte in Schwingung versetzt, so wird das Pulver an diejenigen Stellen der Platte transportiert, an denen Schwingungsknoten liegen. Links die Platte in Ruhe, rechts nach der Vibration.

Darüberhinaus wies Savart nach, daß der Klang der "gestrichenen" Saite sehr viele Teiltöne besitzt.

Savart wie auch Chladni betätigten sich auch als Musikinstrumentenerfinder beziehungsweise Musikinstrumentenbauer, allerdings mit weniger Erfolg. Savart's Trapezgeige konnte sich nicht durchsetzen und Chladni's Instrumente fanden ebenfalls nicht viele Freunde.

Die überragende Forscher-Persönlichkeit auf dem Gebiete der Musikalischen Akustik im 19. Jahrhundert war jedoch *Hermann von Helmholtz*. Neben physikalischen Untersuchungen (wie zum Beispiel über die Interaktion von Bogen und Saite bei den Violinen) und physiologischen Arbeiten (z.B.: über die Schwingungen der Basilmembran, "Ortstheorie") schuf er erstmals auch die Grundlagen zu einer fundierten klang-ästhetischen Bewertung der Musikinstrumente.

Auf seine 1863 erschienene "*Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*" beziehen sich viele der wichtigen Arbeiten des 20. Jahrhunderts.

Die Erfindung der Elektronenröhre und des Mikrophons zu Beginn unseres Jahrhunderts brachte schließlich den entscheidenden Fortschritt in der Entwicklung der Meßtechnik, die es ab nun gestattete, relativ genaue und sichere Meßergebnisse von detaillierten Untersuchungen zu bekommen.

Grundsätzlich beschäftigte man sich in den 20er und 30er Jahren (vorwiegend in Amerika) noch mit Untersuchungen an Musikinstrumenten, während durch die Arbeiten *Carl Stumpf's* die Sprache als Forschungsobjekt immer mehr an Bedeutung gewann und die musikalische Akustik zurückdrängte. Ausnahmen bilden die Arbeit von *Heinrich Backhaus* 1932 "*Über die Bedeutung der Ausgleichsvorgänge in der Akustik*", von *Schumann* 1940 über "*Die Physik der Klangfarben*" und von *Frederik Saunders* 1940 über die "*Klänge einiger Blasinstrumente*".

Die Sprachforschung erfreute sich dann bis in die 50er Jahre großer Aufmerksamkeit. In Europa hatte man durch den ersten und zweiten Weltkrieg sowieso andere Sorgen. Erst in den späten 50er, den 60er und anfangs der 70er Jahre begann man sich wieder intensiver mit der Akustik der Musikinstrumente auseinanderzusetzen (z.B.: *Jürgen Meyer: "Akustik der Holzblasinstrumente in Einzeldarstellungen" 1966, und "Akustik und musikalische Aufführungspraxis" 1972*).

Der Einsatz des Transistors in der Meßtechnik tat ein Übriges und mit dem Einsatz von Personal Computern und Signalprozessoren explodierten förmlich die Forschungsaktivitäten Mitte der 80er Jahre auf dem Gebiete der Musikinstrumentenakustik.

Im Folgenden möchte ich der Übersichtlichkeit halber nach Blasinstrumenten und Streichinstrumenten getrennt vorgehen, obwohl bezüglich der Meßverfahren selbstverständlich einige Parallelen vorhanden sind.

## BLASINSTRUMENTE

Schon sehr früh stieß man auf das Problem der Reproduzierbarkeit von Musikinstrumentenklängen bei menschlicher Anregung. Darüber hinaus wurde die Qualität ein und desselben Instrumentes von verschiedenen Musikern oft unterschiedlich beurteilt. Man war daher bestrebt, künstliche Anregungsvorrichtungen zu konstruieren.

## KÜNSTLICHE ANREGUNG

1941 untersuchte *Daniel Martin* [1] mit einer Kamera und einem Glasmundstück die Lippenschwingungen während des Trompetenspiels. Dabei konnte er nachweisen, daß bei tiefen Tönen Ober- und Unterlippe etwa gleich stark (aber mit unterschiedlicher Phase) ausschlagen, bei Tönen des mittleren Registers die Oberlippe etwas mehr beiträgt, während bei hohen Tönen sich die Unterlippe fast nicht bewegt und der Öffnungs- und Schließvorgang ausschließlich von der Oberlippe getragen wird (Abb. 2).

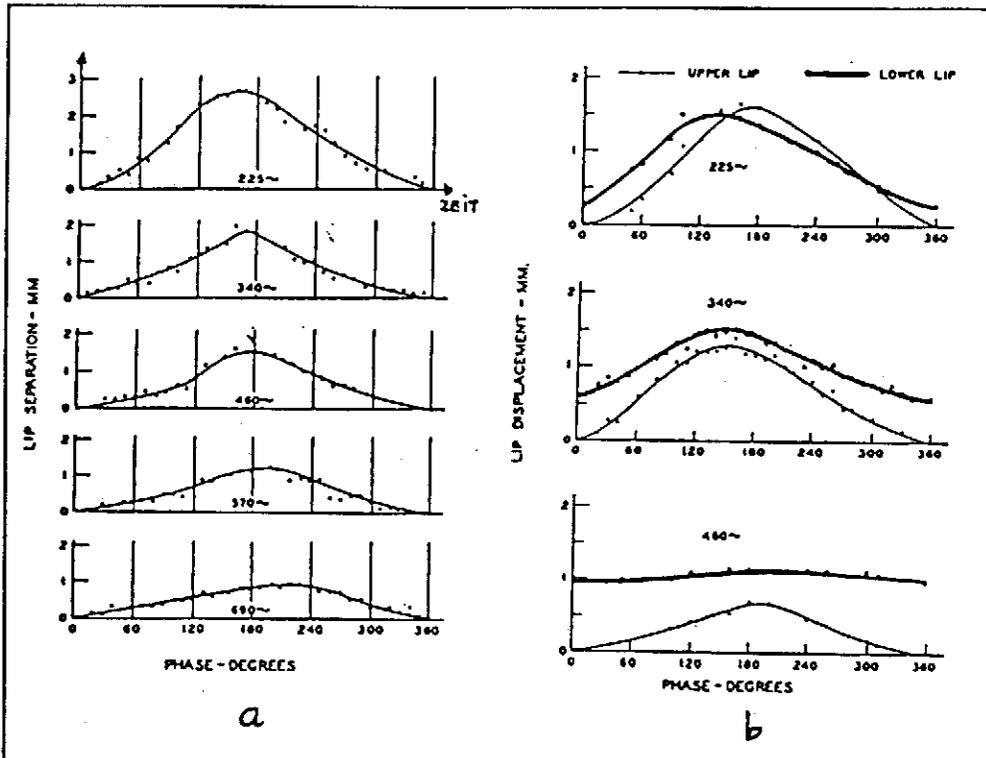


Abb. 2: Lippenschwingung in einem Trompetenmundstück.

Abb. a) zeigt den Abstand der Lippen zur gedachten Mittelachse des Mundstückes in Millimeter auf der senkrechten Achse für verschiedene Töne und einem Zyklus.

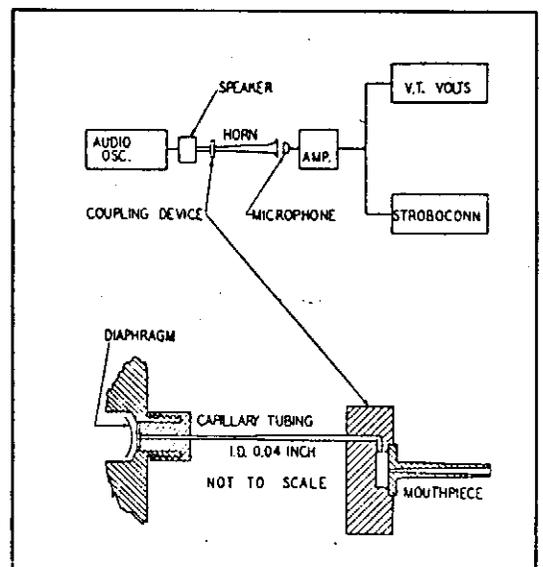
Abb. b) zeigt den Abstand von Ober- und Unterlippe von der Mundstücksachse während eines Zyklus (0 bis 360° auf der waagrecht Achse).

Bei tiefen Tönen tragen beide Lippen etwa gleichviel zur Schwingung bei, bei hohen Tönen bewegt sich die Unterlippe kaum, es schwingt ausschließlich die Oberlippe.

Aufgrund seiner (übrigens auch heute noch gültigen Erkenntnisse) versuchte er einen Anregungsmechanismus mit Gummilippen zu bauen. Da die Elastizität dieser Gummilippen aber nur einen Bruchteil der Elastizität menschlicher Lippen aufwies, blieb's bei dem Versuch.

1946 konstruierte *John Webster* [2] dann die erste funktionierende künstliche Anregungsvorrichtung (Abb. 3). Ein Sinusgenerator wurde über einen Lautsprecher und einer Kapillare an das Mundstück gekoppelt. Webster wollte damit die Intonation von Trompeten messen, was ihm allerdings nur zum Teil gelang, weil zum einen der Frequenzgang des Lautsprechers in die Messung miteinflöß und zum anderen das zusätzliche Volumen des Kapillarröhrchens die Resonanzlagen verschob.

Abb. 3: Blockscheema der ersten funktionierenden Anregungsvorrichtung für Blechblasinstrumente nach J. Webster.



1952 ersetzten die Japaner *Igarashi* und *Koyasu* [3] das Kapillarröhrchen erstmals durch eine "Drahtleitung". Dadurch konnte das ansonst so störende zusätzliche Volumen des Röhrchens eliminiert werden.

Etwas mehr Erfolg hatten *John Coltman* [4], der mit einem Kolben direkt in das Mundstück ging (Abb.4) und *Josef Merhaut* (1968) [5], der noch eine beschichtete Membran dazwischen schaltete (Abb.5). Mit der Spielpraxis nicht übereinstimmende Werte waren aber auch hier an der Tagesordnung, da die Frage des zusätzlichen Volumens und der Frequenzgänge der mechanischen Komponenten nicht ausreichend in den Griff zu bekommen war.

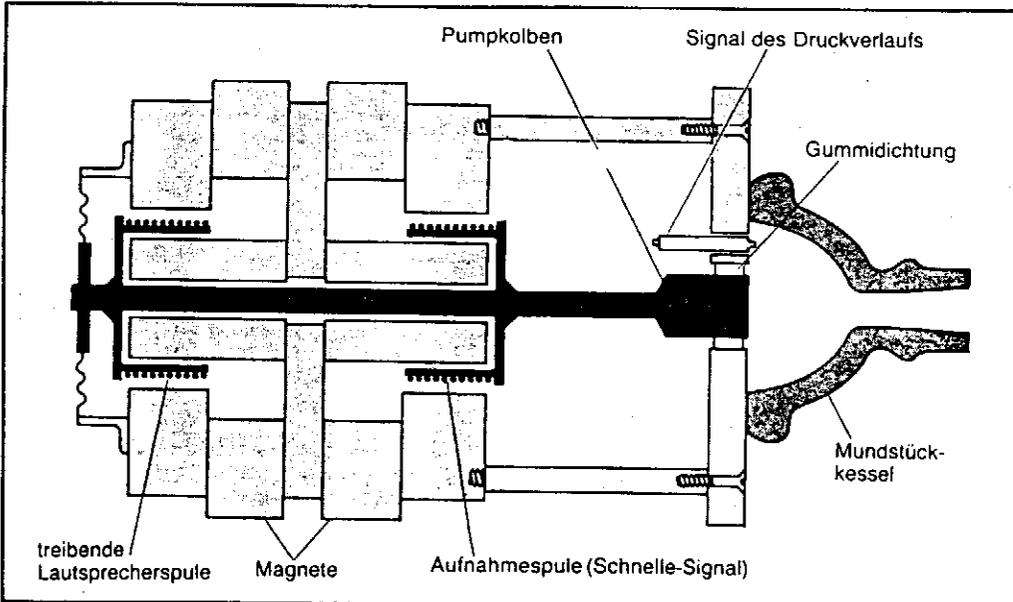
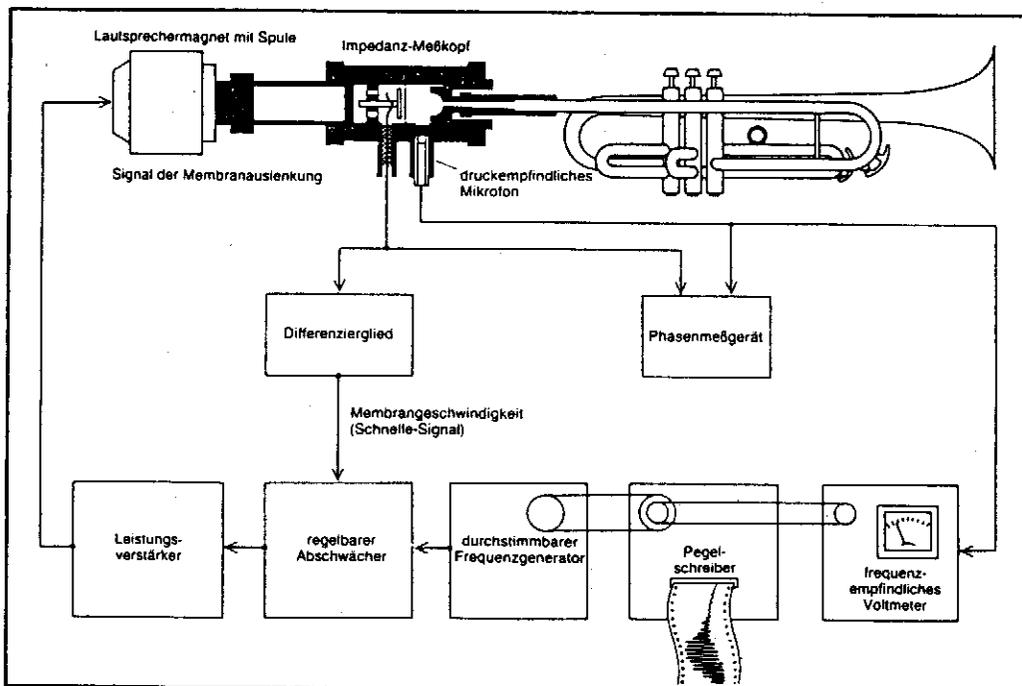


Abbildung 4: Vorrichtung zur Messung der Eingangs-impedanz nach John Coltman.

Abb. 5: Vorrichtung zur Messung der Eingangs-impedanz nach Josef Merhaut. Der oszillierende Luftstrom im Mundstück wird dadurch erzeugt, daß die Schallwellen eines Lautsprechers eine mit Aluminium beschichtete Mylar-Membran periodisch auslenken, so daß diese ihrerseits die Luft in das Mundstück pumpt.



Eine interessante Variante entwickelte in den 70er Jahren *Joshinori Ando* [6], der an der University of Design in Kyushu für die Firma Yamaha einige Forschungsprojekte durchführte. Er übertrug mittels eines Hebels die Bewegung einer Lautsprechermembran auf ein Schubventil und bildete so die Ventilfunktion der Lippen nach. Dies funktioniert allerdings nur bei tiefen Frequenzen, also dem unteren und teilweise dem mittleren Register von Hörnern. Die Mechanik muß immer wieder nachjustiert werden (Abb.6).

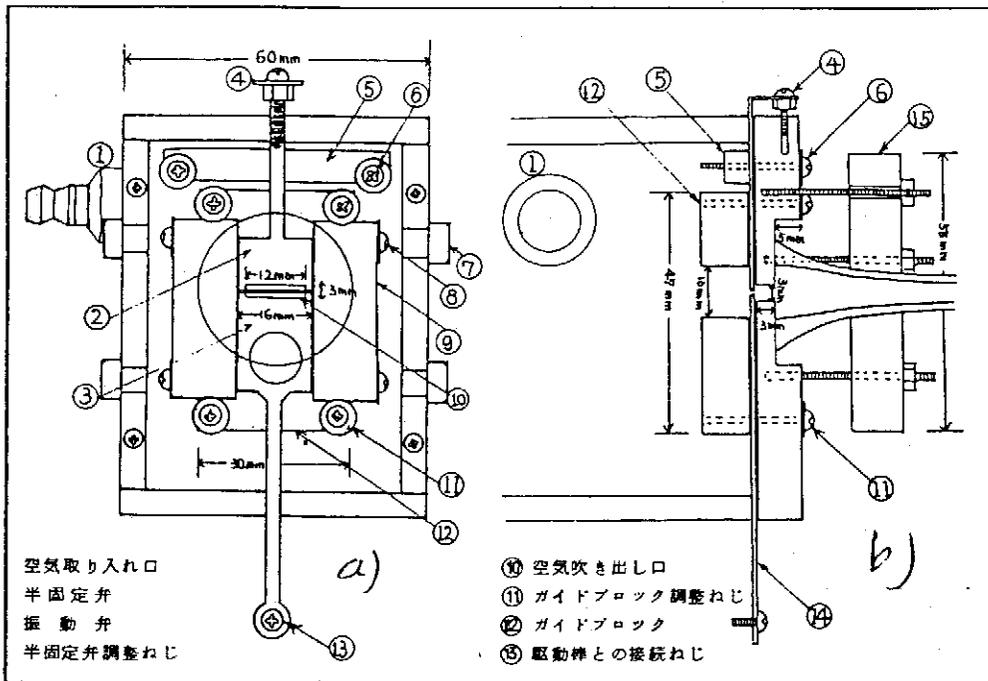
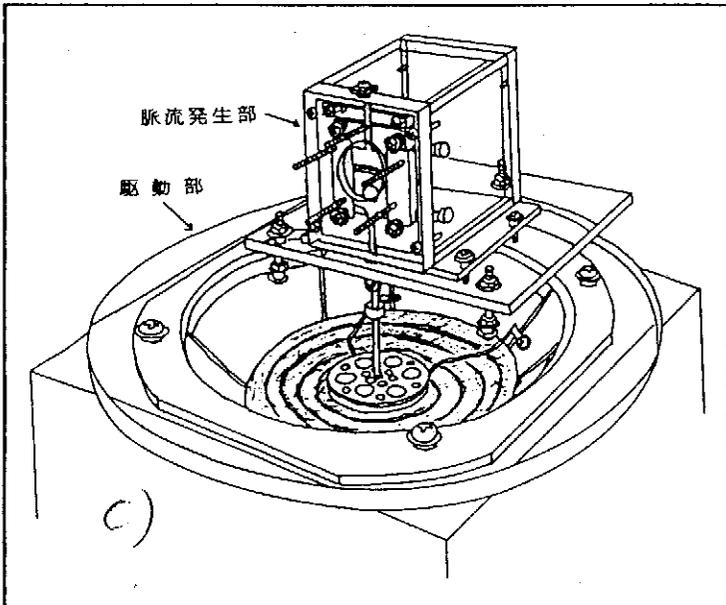


Abbildung 6:  
Künstliche  
Anregungs-  
vorrichtung  
nach Yoshinori  
Ando.  
Eine mit der  
Lautsprecher-  
membran  
verbundene  
Schubstange  
bewegt ein  
Ventil, das die  
Funktion der  
Bläser-lippen  
übernimmt.  
a) Vorderansicht,  
b) Seitenan-  
sicht,  
c) Gesamtan-  
sicht.



Seit der Entwicklung des Ionophons durch Fransson und Jansson (1975) [7], bei dem die Anregung des Instrumentes mittels ionisierter Luft vorgenommen wird, ist diese Methode stark in den ehemaligen Ostblockstaaten vertreten. Der Vorteil liegt in der völligen Masselosigkeit der Anregung, nachteilig wirkt sich allerdings die geringe Leistung aus.

Wir bauten 1980 einen künstlichen Bläser auf Lochsirenenbasis, wie dies erstmals von Klaus Wogram [8] 1971 an der PTB in Braunschweig versucht wurde [9]. Seit den Arbeiten von Daniel Martin weiß man, daß die Lippen-

spaltfläche, durch die die Luft von der Mundhöhle in das Mundstück gelangt (die Bläserlippen fungieren dabei als Ventil) von Null beginnend bis zum Maximum ansteigt und wiederum gegen Null geht. Diese annähernd sinusförmige Flächenänderung wird erreicht, indem in einen halb offenen Zylinder, der auf einer Antriebswelle sitzt und als "Rotor" dient, sechzehn gleichgroße quadratische Schlitze mit der Seitenlänge "a" im Abstand "a" gefräst werden. (Abb.7). In einem exakt darüber gepaßten Gehäuse wird genau in der Ebene der Rotorschlitze ein um 45° gedrehtes Quadrat mit einer Seitenlänge von "b" gefräst, wobei

$$b = \frac{a}{\sqrt{2}}$$

Durch den Schlitz des Gehäuses wird dadurch ein sinusförmig modulierter Luftstrom in das Mundstück gepreßt. Die Frequenz des Anregungssignals ist direkt proportional zur Drehzahl des Rotors. Mit diesem "künstlichen Bläser" können die Instrumente bezüglich des Klanges untereinander verglichen werden, allerdings sind Aussagen über die Intonation und Ansprache nur indirekt und nicht in der für die Spielpraxis notwendigen Auflösung möglich.

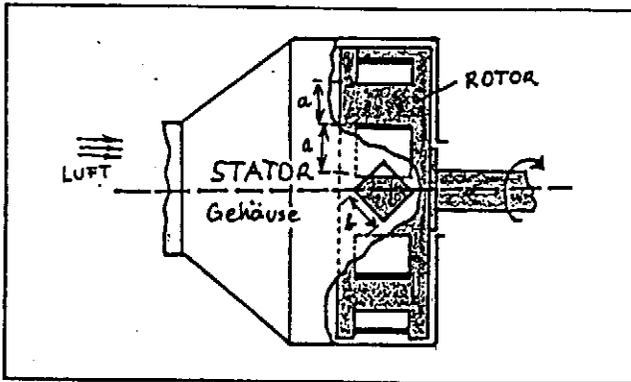
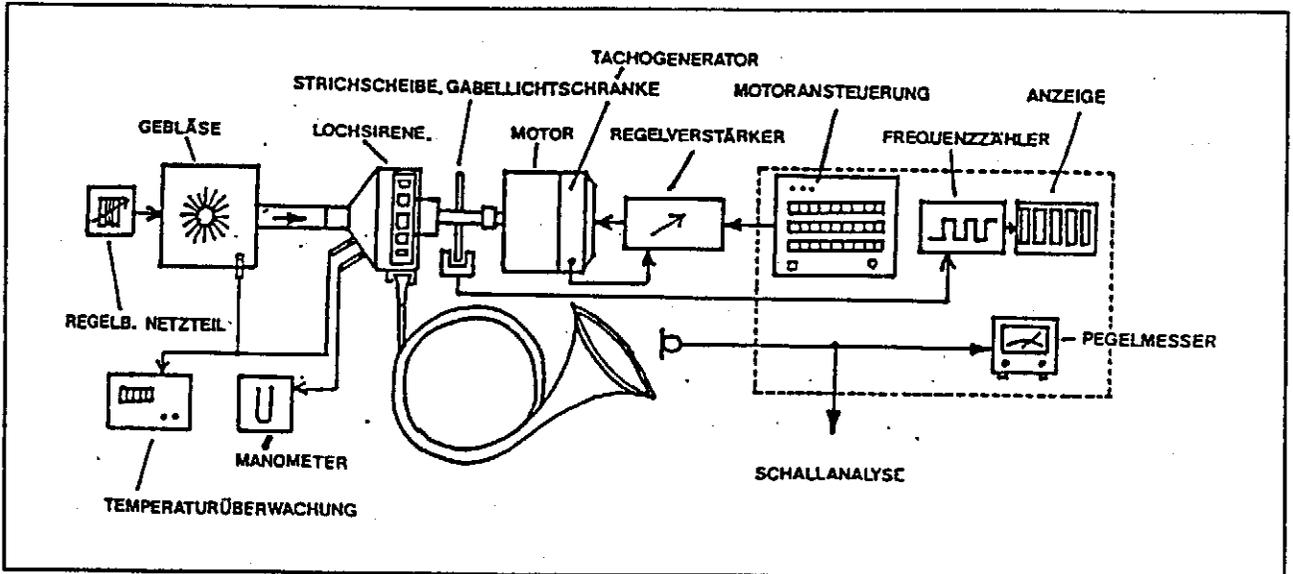


Abbildung 7: Künstlicher Bläser des Institutes für Wiener Klangstil.

a) Detail Rotor.

Darunter:  
b) Blockscheema der Anregungsvorrichtung.



## DIE EINGANGSIMPEDANZMESSUNG

1978 gelang es der Gruppe um *John Bowsher* an der University of Surrey erstmals exakt die "Schall-Schnelle" mit einem im Mundstück einer Posaune plazierten "Hitzedrahtanemometer" zu messen [10]. Diese Methode ist zwar die einzige, bei der die Impedanz wirklich gemessen werden kann (alle anderen Messungen sind nur Ersatzmessungen), allerdings erfordert das Hitzedrahtanemometer einen erheblichen Rechenaufwand zur Korrektur. Überdies ist durch die Montage des Drahtes innerhalb des Mundstückes die Messung nicht "zerstörungsfrei" und somit in der Praxis nicht vertretbar. Welcher Musiker läßt sich schon sein Mundstück zersägen?

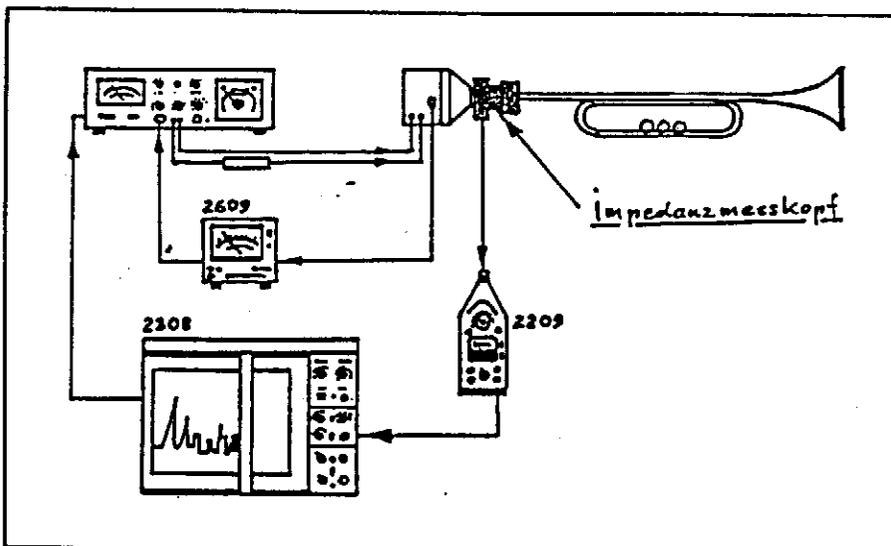


Abbildung 8: Blockschema der am Institut für Wiener Klangstil entwickelten Eingangsimpedanzmeßmethode auf analoger Basis. Dabei wird das Instrument mit einem Gleitsinus konstanter Amplitude angeregt. Amplitudenmaxima im Mundstück zeigen die Existenz stehender Wellen im Instrument an. Bei diesen Frequenzen liegen die spielbaren Naturtöne.

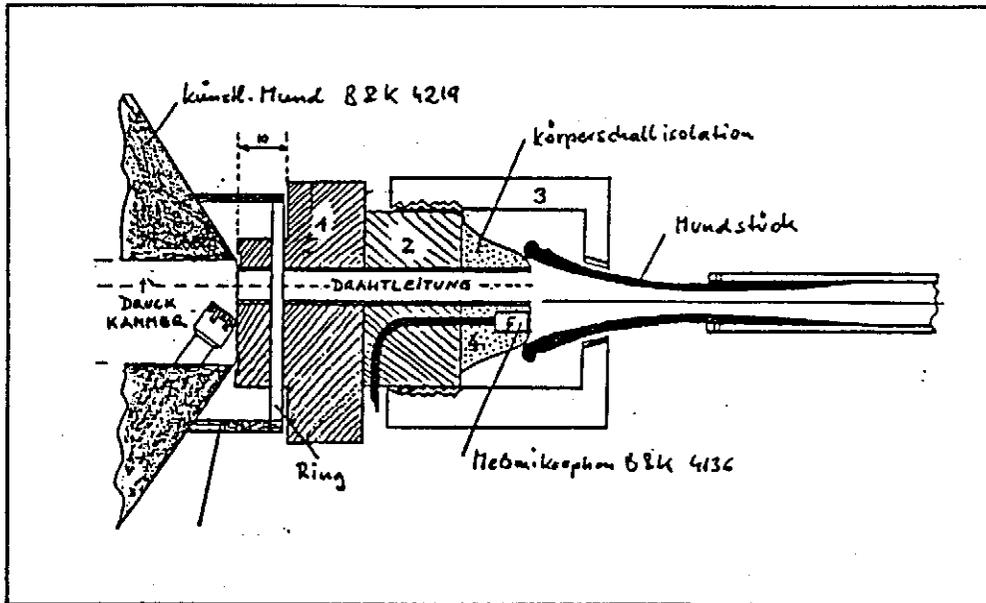
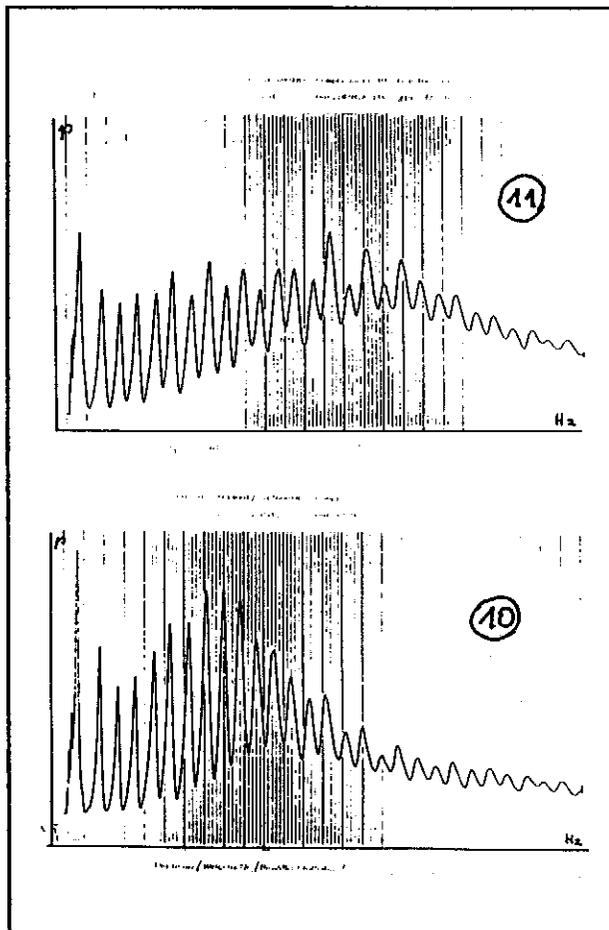


Abbildung 9:

Schnitt durch den am Institut für Wiener Klangstil entwickelten Impedanzmeßkopf.

1983 entwickelten wir daher eine Meßanordnung (damals noch auf analoger Basis) zur Eingangsimpedanzmessung, bei der die Originalmundstücke der Musiker verwendet werden können. (Abb.8 und 9). Dabei wird das Instrument mit einem Gleitsinus konstanter Amplitude angeregt und gleichzeitig der Schalldruck in der Lippebene des Mundstückes gemessen. Mit Hilfe einer Drahtleitung wurde das Problem des Kapillarvolumens eliminiert und ein in das Mundstück hineinragender Teil simulierte die Volumsverdrängung im Mundstück durch die Musikerlippen.



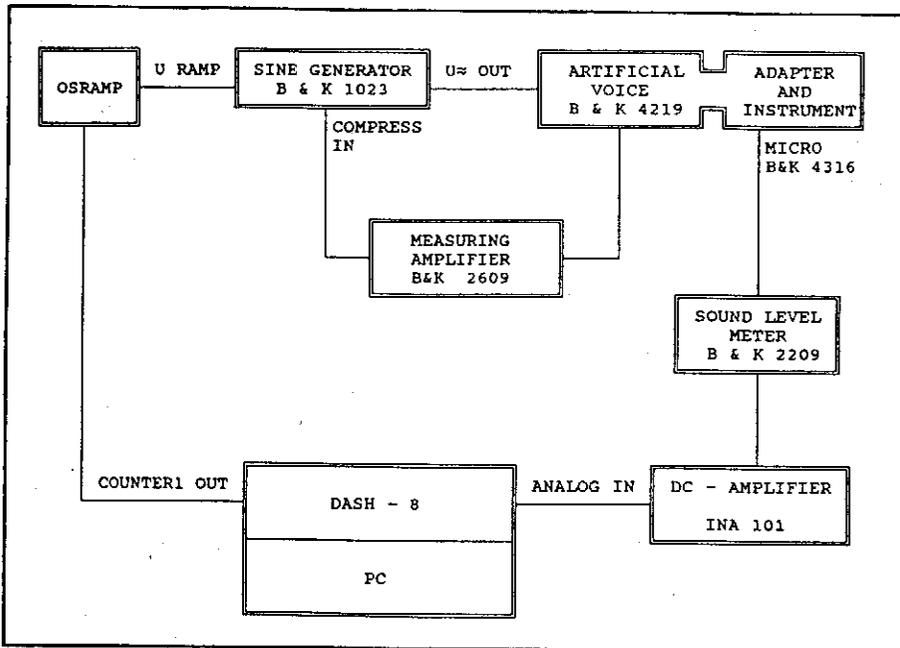
Bei all den Frequenzen, wo der Impedanzwert (=Schalldruck in der Lippebene im Mundstück) ein Maximum aufweist, existiert eine *stehende Welle* im Instrument ("die Luftsäule im Instrument steht in Resonanz zur Anregung"). Dort -und nur dort- kann der Musiker einen Ton spielen.

Die Lage der Impedanzspitzen gibt daher die "Stimmung" des Instrumentes an. Die Höhe und Ausprägtheit der Spitzen lassen in Zusammenhang mit den Minima auf die "Ansprache" schließen. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die Kurven für ein schlechtes und ein gutes Instrument.

Abbildung 10: Impedanzkurve ("Akustische Visitenkarte") eines Wiener Horns.

Abbildung 11: Impedanzkurve eines qualitativ schlechten Wiener Horns. Ungenau eingebaute Ventile lassen etliche Töne schlecht "ansprechen" (man beachte die niedrigen und sehr unterschiedlichen Amplitudenwerte!) der einzelnen Naturtöne.

Die Intonationsbeurteilung aus solchen Plots war allerdings etwas mühsam, da die Frequenz der Maxima in Abhängigkeit von der gewählten Auflösung nur relativ ungenau aus den Plots abgelesen werden konnte.



1988 wurde die gesamte Meßanordnung auf digitaler Basis neu konzipiert [11]. Ein PC steuerte den Rampen-generator ("Osramp"), der wiederum den noch analogen Sinusgenerator ansteuerte. Ein eigener Kompressorkreis sorgte für eine über die Frequenz gleichbleibende Amplitude des Anregungssignals. Das vom in der Lippebene des Mundstückes plazierten Mikrofon kommende Meßsignal wurde

Abbildung 12: Blockscheema der am Institut für Wiener Klangstil entwickelten computergesteuerten Eingangsimpedanzmessung.

gleichgerichtet und in Form der "Zeigerspannung" des Meßverstärkers über eine Datenerfassungskarte in den PC eingelesen (Abb. 12).

Die solcherart erfaßten "Rohdaten" ermöglichen in der Folge auf einfachem Weg die Beurteilung der *Inneren Stimmung* des gemessenen Instrumentes, also die musikalisch "richtige" Lage der Naturtöne zueinander (Abb 13 und 14).

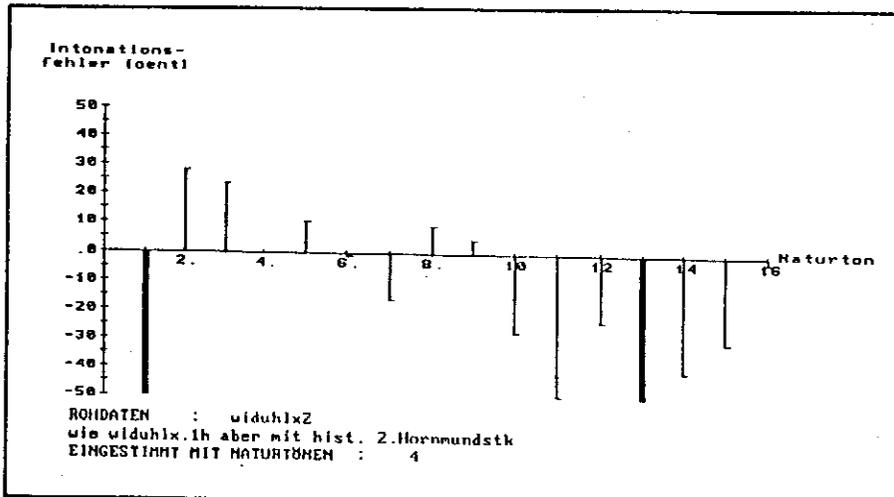


Abbildung 14: Graphische Darstellung der Intonationsfehler in Cent.

Auf der waagrechten Achse sind die Naturtöne entsprechend ihrer Ordnungszahl von 1 (Pedalton mit etwa 43 Hz) bis 16 (c3 notiert mit etwa 700 Hz) aufgetragen. Als Referenz dient die temperierte Stimmung.

Nachdem manche Musiker aus der Kenntnis ihres Instrumentes heraus mit ganz bestimmten Tönen einstimmen (und nicht immer mit dem "a1"), war im "Menü" auch die Wahlmöglichkeit vorgesehen, nach beliebigen Naturtönen einzustimmen.

Impedanzkurve und Intonationsbeurteilung gelten in dieser Form allerdings nur für eine "sinusförmige" Anregung (in der Praxis entspricht dies etwa dem "piano") und nicht unbedingt für einen "forte" oder "fortissimo"-Ton, bei dem der Musiker mit einem relativ breitbandigen Spektrum anregt (10 bis 40 Teiltöne).

KOMMENTAR : Widuhl.1 plus Hand  
 EINGESTIMMT NACH NATURTÖNEN : 6

NATUR TON	TEMPERIERT		MAXIMUM		INTONATIONS FEHLER cent	IMPEDANZ DIFFERENZ AU	GÜTE
	FREQUENZ Hz	IMPEDANZ AU	FREQUENZ Hz	IMPEDANZ AU			
( 1 c	46.6	806.4	42.9	812.4	-137.4	-6.6	- )
2 c	93.1	840.2	99.0	849.0	123.7	-13.8	5.40
3 G	139.5	875.5	141.1	875.9	-6.2	-5	8.85
4 c	186.2	927.6	186.8	926.4	16.6	-1.4	10.89
5 e	234.6	976.3	234.8	977.8	2.9	-2.7	12.71
6 g	279.0	1022.0	278.6	1020.1	.0	.0	14.05
( 7	331.8	1060.3	328.4	1076.4	-14.6	-16.7	14.04 )
8 c	372.4	1141.0	374.8	1155.8	11.9	-17.0	16.45
9 d	418.0	1190.3	418.4	1193.5	4.0	-8.7	17.56
10 e	469.2	1283.5	465.6	1311.8	-11.9	-30.5	16.32
( 11	526.7	1137.8	509.1	1328.5	-55.7	-195.2	19.97 )
12 g	558.0	1466.0	553.3	1514.7	-12.5	-50.0	19.54
( 13	626.3	1297.4	597.9	1494.7	-80.1	-197.6	21.69 )
14 b	663.6	1291.7	642.5	1575.0	-57.2	-283.3	22.44
15 h	703.0	1299.0	687.7	1655.0	-40.0	-358.0	22.61
16 c	744.8	1474.7	736.0	1605.8	-20.7	-131.3	-

Abbildung 13:  
 Intonationstabelle  
 mit den  
 Sollfrequenzen  
 der gleichschwebend  
 temperierten Stim-  
 mung und den  
 tatsächlichen  
 "Istfrequenzen",  
 sowie der  
 Intonations-  
 abweichung der  
 einzelnen  
 Naturtöne.

Bei Fortissimo-Klängen weist der Grundton gegenüber den höheren Teiltönen oftmals eine geringere Amplitude auf. In solchen Fällen ist daher nicht ein einziger Impedanzwert für die Intonation und Spielbarkeit eines Tones maßgeblich, sondern die Summe aller Werte für die Frequenzen, bei welchen die Teiltöne des Anregungsspektrums liegen.

Ist zum Beispiel für ein a1 im "Piano" der Impedanzwert bei 440 Hz maßgeblich (möglicherweise liegt das Maximum bei 443 Hz, dann ist dieser Ton um 6 Cent zu hoch), so ist für denselben Ton im "Fortissimo" die Summe der Werte bei 440, 880, 1320 Hz usw. ausschlaggebend.

Allerdings stimmt diese Art der Intonationsberechnung noch immer nicht ganz mit der Spielpraxis überein, da eine einfache Summenbildung ein Anregungsspektrum impliziert, dessen Teiltöne gleich hohe Amplitudenwerte besitzen. Bei der Summenbildung muß daher eine Gewichtung vorgenommen werden, die der Amplitudenverteilung des Anregungsspektrums entspricht. Wir führen dies entsprechend der nachfolgenden Formel durch:

$$S_a = \frac{\sum (P_{a,i}) \cdot W_i}{\sum (W_i)}$$

Diese Methode hat den Vorteil, daß einerseits die Änderungen der Intonation und Ansprache eines Instrumentes in Abhängigkeit von der Dynamik untersucht werden können (z.B.: ein Ton spricht im Piano gut, im Fortissimo aber schlecht an, oder wird zu tief), und andererseits das individuelle Anregungsspektrum des einzelnen Musikers berücksichtigt werden kann (Abbildung 15 nächste Seite).

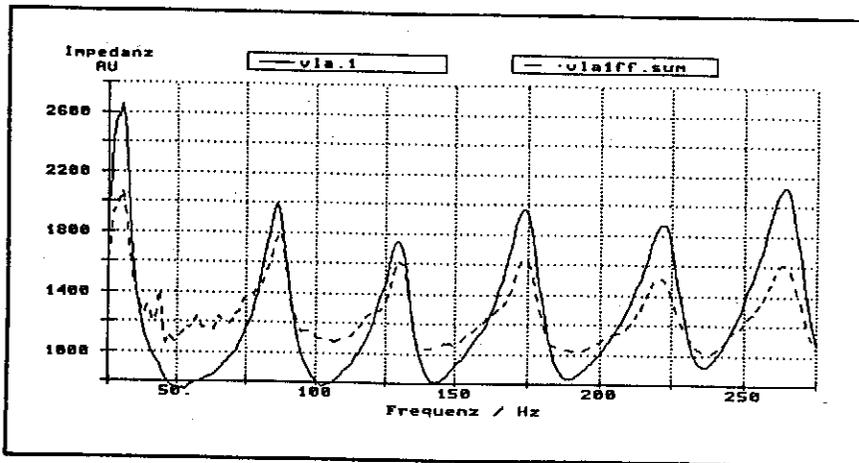


Abbildung 15:  
Vergleich Rohdaten  
(ausgezogene Kurve)  
mit einer gewichteten  
Summenkurve (punk-  
tierte Linie) des selben  
Instrumentes.

## DIE IMPULSMESSUNG

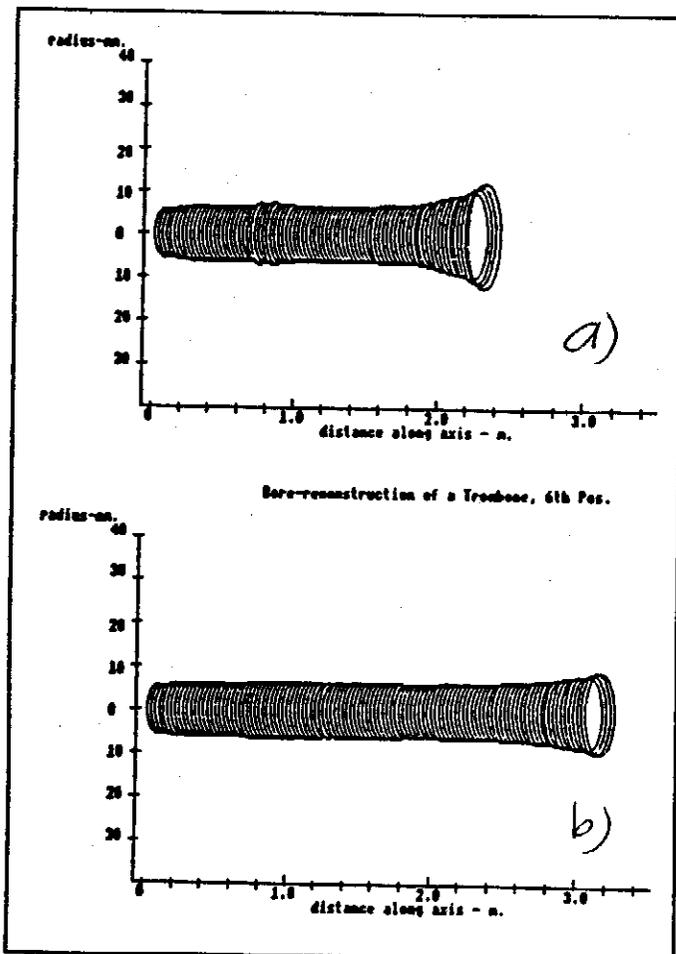


Abbildung 16: Mensurkonstruktion nach der Methode J. Bowsher's für eine Tenorposaune in zwei verschiedenen Stellungen des Zuges.

Deutlich sind die Mensurveränderungen in Abhängigkeit von der Zugstellung zu erkennen.

a) Position eins, b) Position 6.

Bei dieser Meßmethode, die erstmals von J. Bowsher 1987 [12] angewendet wurde ist der Ansatz ein anderer: In das Mundstück wird ein kurzer Impuls (oder Ton-Burst) eingebracht und gleichzeitig mit dem Anregungssignal die Reflexionen (in der Lippenebene des Mundstückes) aufgezeichnet.

Aus der Form der Zeitfunktion und der Reflexionen des Anregungsimpulses kann in der Folge auf die Länge des Instrumentes, die Form der Mensur (Abb. 16) und eventuelle *Störstellen* im Inneren der Instrumentenröhre geschlossen werden (Abb. 17).

Diese Art der Impulsmessung liefert auch wertvolle Informationen für die Instrumentenbauer. So kann zum Beispiel die Lage unerwünschter Verengungen oder Erweiterungen (Abb.18) oder auch schlechter Lötstellen lokalisiert und mangelhaft eingepaßte Ventile nachgewiesen werden, wie Klaus Wogram in seinen Arbeiten zeigt [13].

Beide Methoden, die Impulsmessung und die Messung der Eingangsimpedanz mit Gleitsinus haben ihre Vor- und Nachteile. Die Impulsmessung benötigt nur wenige Sekunden und liefert Informationen über die Ansprache und das "Innenleben" des Instrumentes.

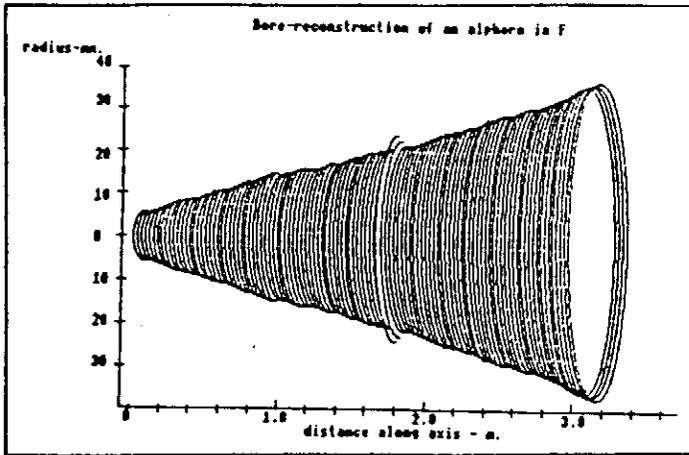
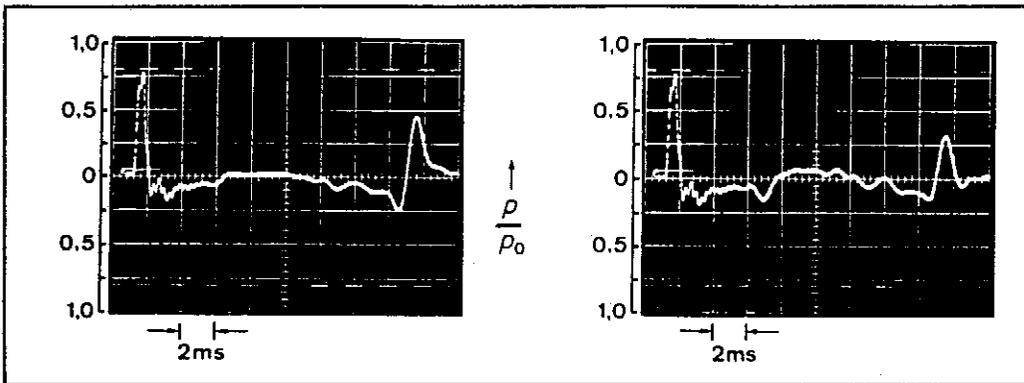


Abbildung 17: Messurekonstruktion und Störstellenanalyse nach John Bowsher für ein Alphorn in F.

Abbildung 18 (unten): Impulsecho-grammeiner Tenorposaune nach Klaus Wogram. Links: geringe Störungen, gute Ansprache. Rechts: viele Störungen, schlechte Ansprache. Die Zeit läuft von links nach rechts. Der erste Impuls ist der Anregungsimpuls, der zweite Impuls die vom Schalltrichter kommende Reflexionen. Je höher die Amplitude des reflektierten Impulses, desto besser spricht im allgemeinen der Ton an.



Informationen über die Intonation sind nur über Umwege und sehr ungenau zu bekommen. Die Messung mit Gleitsinus ist relativ zeitaufwendig (je nach Frequenzbereich etwa drei bis fünf Minuten), liefert dafür exakte Werte zur Intonation, Aussagen zur Ansprache können nur indirekt gemacht werden. Auf Störstellen kann in extremen Fällen geschlossen werden, ihre Lage ist allerdings nicht lokalisierbar.

Bei dem am Institut für Wiener Klangstil 1990 entwickelten Computersystem "BIAS" zur Beurteilung der musikalischen Qualität von Blechblasinstrumenten ("BIAS" = Blas Instrumenten Analyse System) haben wir versucht, die Vorteile beider Methoden zu vereinen [14].

Grundsätzlich wird das Instrument mit Gleitsinus angeregt um genaue Daten zur Intonationsbeurteilung zu bekommen. Im Anschluß daran wird jedoch mit Hilfe der "Inversen Fourier-Transformation" und der Hilbert-Transformation aus den Rohdaten die Impulsantwort errechnet. Dies dauert weniger als eine Sekunde und gibt mit ausreichender Genauigkeit Aufschluß über eventuell vorhandene Störstellen im Instrument (Abb. 19).

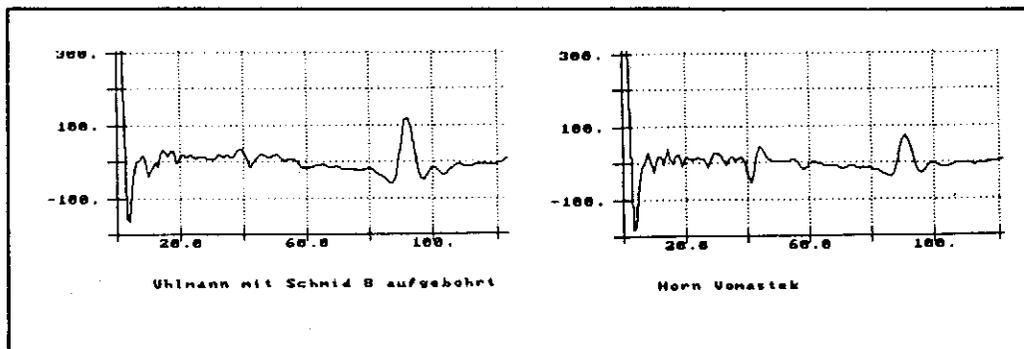
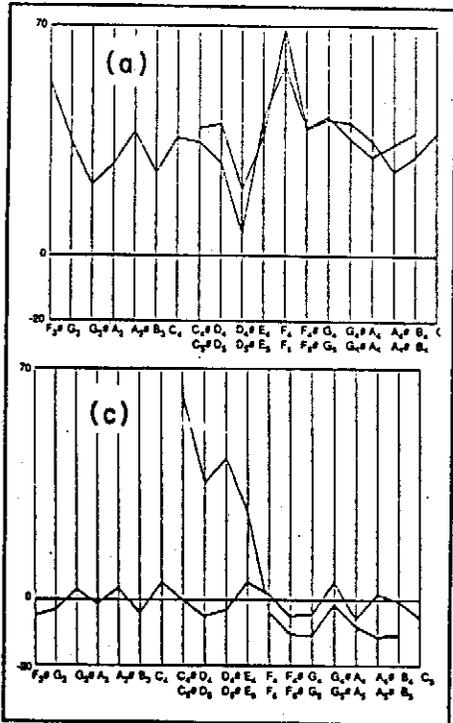


Abb. 19: Mit BIAS errechnete Impulsantwort eines guten (links) und eines schlechten Horns (rechts).

Um die Meßdauer zu verkürzen arbeiten wir derzeit an einer Version von BIAS, bei der die Anregung mit Gleitsinus durch eine Anregung mit "Rauschen" substituiert wird.

## CAD - COMPUTER AIDED DESIGN



A. Barjau und J. Martinez aus Barcelona stellten 1989 ein modifiziertes und mit neuen Algorithmen versehenes CAD-Programm zur Verbesserung aber auch Neukonstruktion von Holzblasinstrumenten vor [15]. Das Programm kalkuliert nach Vorgabe der gewünschten Länge, Mensur und allfälliger ergonomischen Einschränkungen das Design (Durchmesser und Platzierung) der einzelnen Tonlöcher. Neu daran ist die Berücksichtigung der *Überblas-Register*, ein Intonations- und Klangproblem, mit dem alle Instrumentenmacher kämpfen. Die Kalkulation der einzelnen Tonlöcher wird der Reihe nach, beginnend mit dem tiefsten Ton, abgearbeitet, wobei bestimmte Griffkombinationen vorgegeben werden können. Bisher wurden erst Versuche zur Verbesserung bestehender Instrumente durchgeführt (Abb.20).

Abbildung 20: Intonationskurven einer Pardo tenora (a) und des mit dem Programm "DISTEN" verbesserten Instrumentes (c).

## STREICHINSTRUMENTE SCHWINGENDE PLATTEN

Während es bei den Blasinstrumenten hauptsächlich um die Länge und Form der schwingenden Luftsäule geht, also im wesentlichen um die Erfassung der Schwingungsformen *longitudinaler Wellen*, liegt bei Streichinstrumenten und Schlaginstrumenten das Schwergewicht naturgemäß auf den *transversalen Schwingungen* von Platten.

Wie schon zu Beginn des Artikels erwähnt, beschäftigte sich *Felix Savart* ausführlich mit den Resonanzen der Geigendecken und Böden in nicht zusammengebautem Zustand. Durch "Klopfen" (wie es die Geigenbauer auch heute noch machen) stellte er die Hauptresonanz fest und kam zu dem Schluß, daß bei guten Violinen die erste Resonanz der Decke zwischen C<sub>3</sub> und D<sub>3</sub> liegen sollte, die des Bodens um einen Halbton höher. Diese Aussage erwies sich allerdings nur für bestimmte Instrumententypen als gültig und konnte keinesfalls zu Voraussagen über die Qualität aller Violinen herangezogen werden.

## DIE CHLADNI-FIGUREN

Zur selben Zeit entdeckte *Ernst Chladni*, daß sich auf schwingende Platten gestreutes feines Pulver an den Stellen sammelt, an denen die Knotenlinien liegen. Damit konnte man die Schwingungsformen des Violinkorpus in Abhängigkeit von der Frequenz sichtbar machen (Abbildung 1).

Darüber hinaus war der Einfluß einzelner Bauteile auf die "Schwingungsmoden", sowie Veränderungen der Korpuschwingungen nach Eingriffen des Geigenbauers darstellbar geworden. Die "Chladni-Methode" wird von Geigenbauern, weil einfach und ohne großen technischen Aufwand durchführbar, auch heute noch gerne benutzt. Einschränkend muß allerdings festgestellt werden, daß mit dieser Methode keine Beurteilung der Qualität eines Instrumentes möglich ist. Chladni-Figuren lassen keine exakten Schlüsse auf Schwingungsamplituden zu und können daher bestenfalls für vergleichende Experimente und zur Bestandsaufnahme herangezogen werden.

## DIE RESONANZMESSUNG

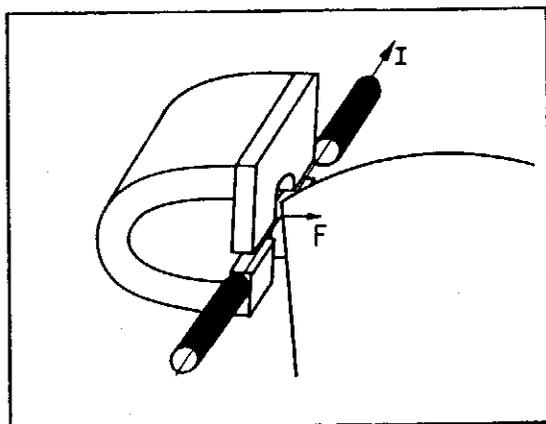


Abbildung 21: Schematische Darstellung des elektromagnetischen Wandlerelementes zur Anregung von Violinen nach Heinrich Dünwald. An der Stegkante bei der e-Saite wird die Geige durch einen stromdurchflossenen Draht, der sich in einem Magnetfeld befindet, sinusförmig angeregt.

Einen praxisnäheren Ansatzpunkt findet man in den Arbeiten von *Heinrich Dünwald* [16]. Er verbesserte ein in der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts entwickeltes Meßverfahren, bei dem die zu untersuchende Violine mittels eines elektromagnetischen Wandlers am Steg (bei der e-Saite) mit einem Gleitsinus angeregt wird (Abb.21). Der vom Korpus abgestrahlte Schall wird gespeichert und zur Anregungsfrequenz in Beziehung gesetzt. Das Resultat ist eine Resonanzkurve, die das akustische Verhalten des Instrumentes exakt wiedergibt (Abb.22).

*Dünwald* kann durch Weiterverarbeitung dieser Daten mit seinem Verfahren zwischen guten und schlechten Violinen unterscheiden, ohne daß dabei geschmackliche Beurteilungskriterien miteinfließen. Einige der Resonanzspitzen können zudem verschiedenen Teilen des Instrumentes eindeutig zugeordnet werden und dem Instrumentenbauer Hilfestellung bei der Verbesserung von Geigen geben.

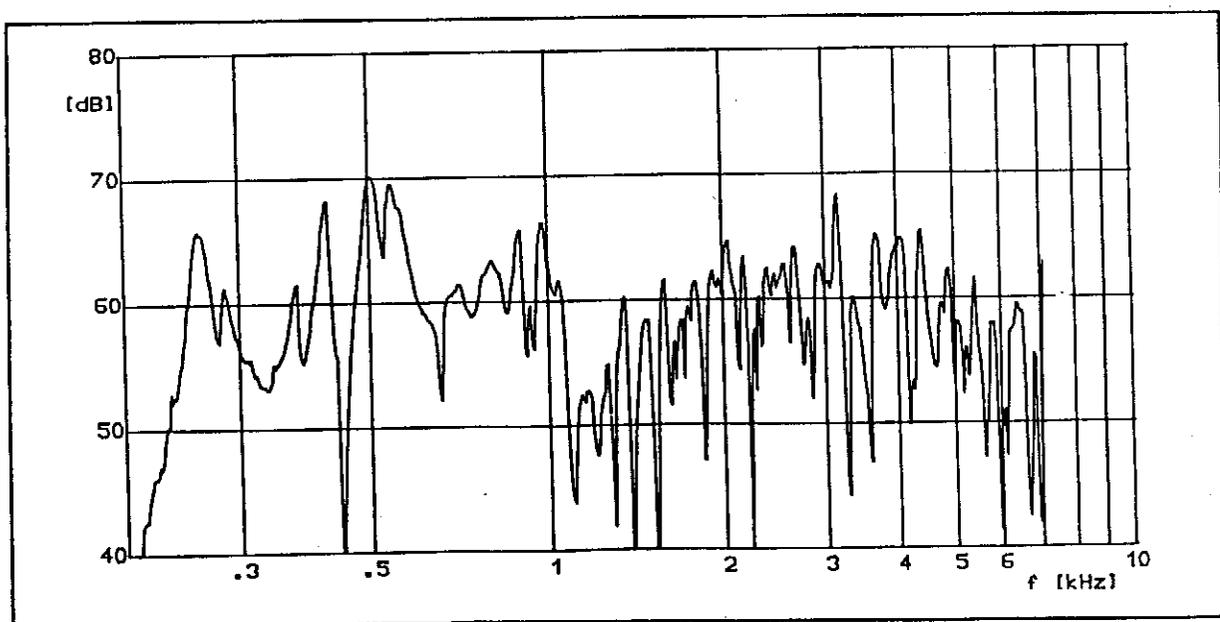
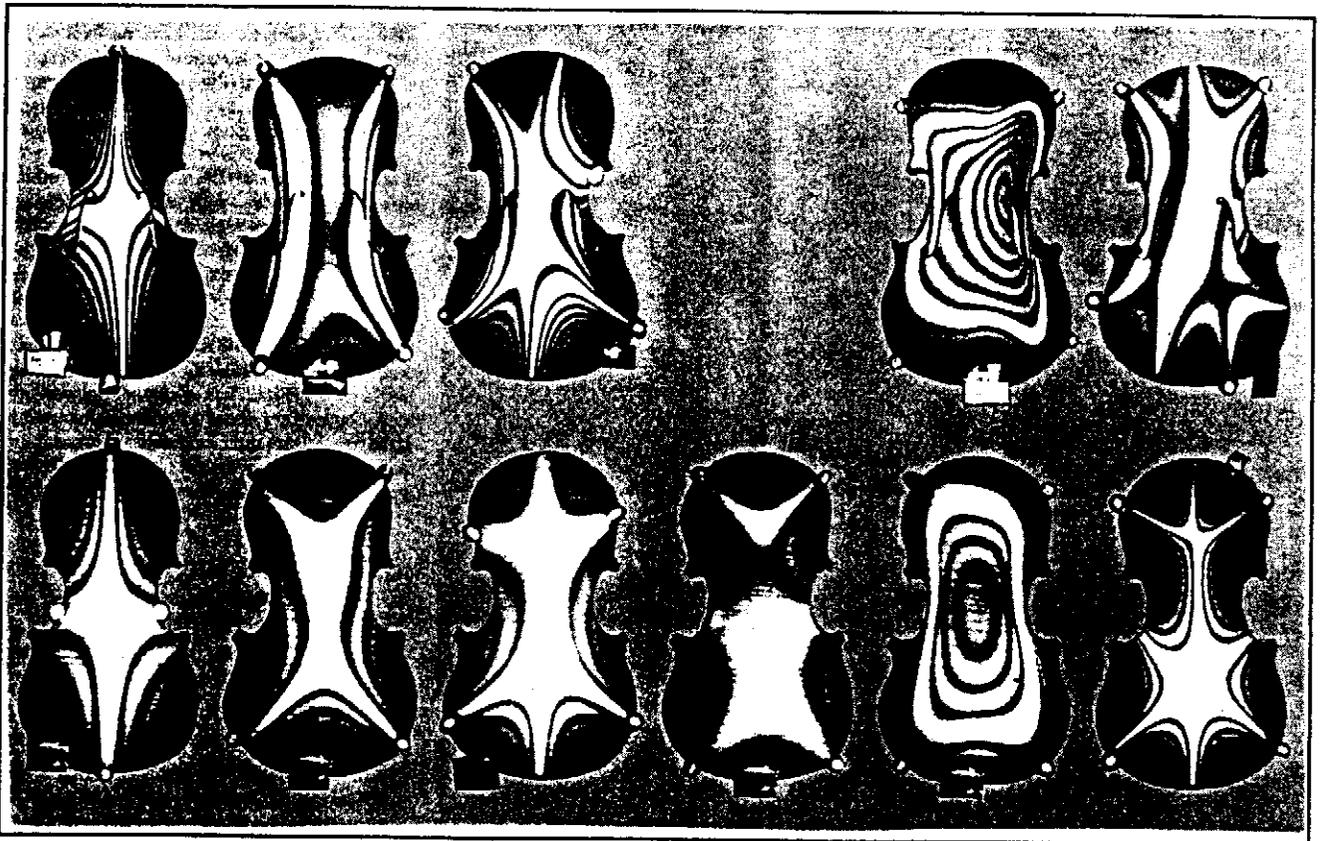


Abbildung 22: Resonanzkurve einer Stradivari, gemessen nach dem Dünwald-System mit einem am "VUZORT" in Prag entwickelten Wandlerelement.

Am Research Institute of Sound and Picture ("VUZORT") in Prag ist derzeit ein neu entwickeltes Expertensystem in der Erprobungsphase, das aufgrund der Resonanzkurven automatisch die Qualität von Violinen richtig erkennt [16].

## DIE HOLOGRAPHIE

Mit der Entwicklung holographischer Methoden in der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts fand dieses optische Verfahren Eingang in die Musikinstrumentenforschung [17]. Eine Holographie ist im Grunde die Aufnahme des Interferenzmusters zweier kohärenter Lichtstrahlen, wobei einer der beiden mit Objektinformation moduliert wird. Da der Lichtstrahl in der Umgebung der Knotenlinien am wenigsten beeinflusst wird, erscheinen diese in den Abbildungen als hell. Bei den Chladnischen Figuren ist es genau umgekehrt: das Pulver sammelt sich an den Knotenlinien, sie sind daher dunkel abgebildet. Im Prinzip liefert die holographische Interferometrie der Chladni-Methode sehr ähnliche Bilder, allerdings mit einer wesentlich besseren Auflösung in einem viel weiteren Frequenzbereich (Abb.23).



*Abbildung 23: Holographische Interferometrie. Wie ein Fingerabdruck kennzeichnen die Aufnahmen die akustischen Eigenschaften einer Violonplatte. Oben sind die Schwingungsmustereiner Decke, die bereits mit F-Löchern und Baßbalken versehen ist, zu sehen und unten die des Bodens. Die Abbildung zeigt die Schwingungsformen für die ersten sechs Moden. Mode vier kommt bei der Decke nicht vor.*

Die Untersuchungen mittels Holographie beschränkten sich naturgemäß nicht nur auf Streichinstrumente. Gitarren, Pauken, Klangstäbe und Glocken sind ausgezeichnete Objekte um mittels dem Verfahren der holographischen Interferometrie die Schwingungsstrukturen an Musikinstrumenten sichtbar zu machen (siehe Abb. 24 auf der nächsten Seite).

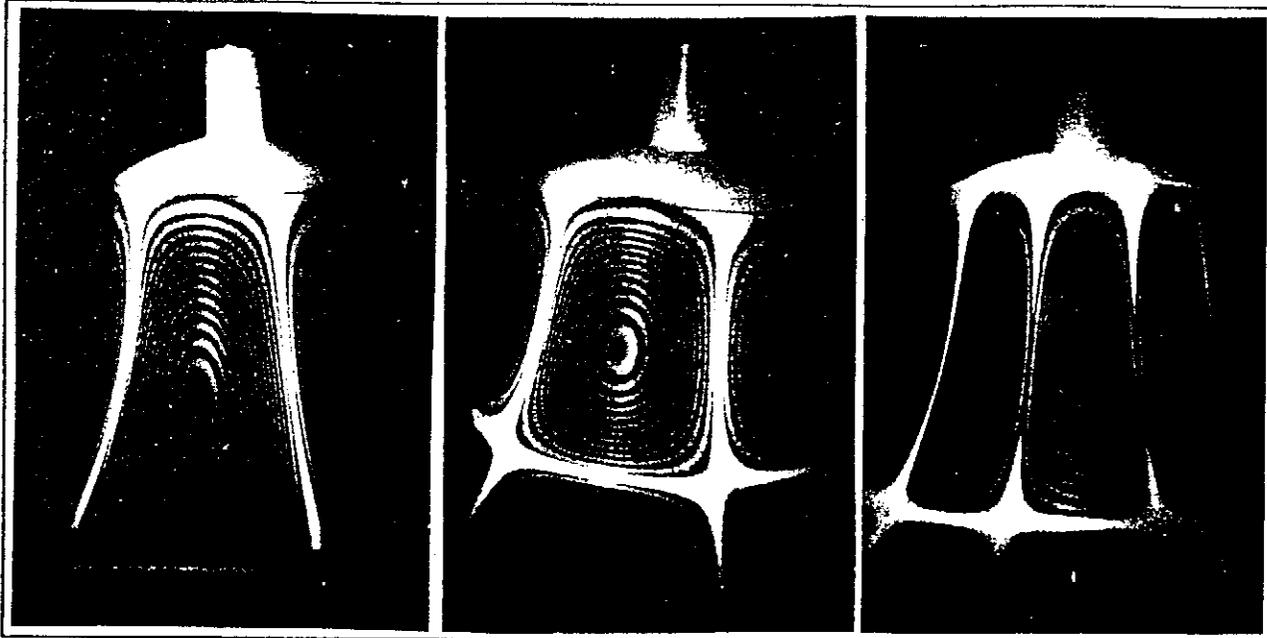


Abbildung 24: Schwingungsformen bei drei verschiedenen Moden einer Handglocke in g<sub>2</sub>.

### DIE MOIRÉ TOPOGRAPHIE

H. Neugebauer, Primarius an einer Klinik in Wien, machte diese in der Medizin (Orthopädie) angewandte Technik zum Sichtbarmachen von Haltungsschäden für den Geigenbau nutzbar [18]. Dieses "berührungslose" Verfahren beruht auf dem "Moiré-Effekt", den erstmals Lord Raleigh vor mehr als hundert Jahren beschrieben hatte: Wenn zwei Raster übereinander liegen, kommt es zur Bildung sogenannter Moiré Linien, die unter bestimmten Voraussetzungen als Höhenschichtlinien (Isohypsen) gesehen werden können. Dieses Verfahren ("Violinometer") ist wesentlich einfacher durchzuführen als die grundsätzlich technisch recht aufwendigen holographischen Methoden und liefert mit seinen in einem Abstand von 1.5 Millimeter positionierten Höhenschichtlinien ein exaktes Abbild von Decken- und Bodenwölbungen. Das Violinometer ist daher nicht nur zur Dokumentation geeignet, sondern stellt durch seine leichte Handhabbarkeit (es gibt auch eine transportable Version) eine wertvolle Hilfe für den Geigenbauer dar (Abb.25).

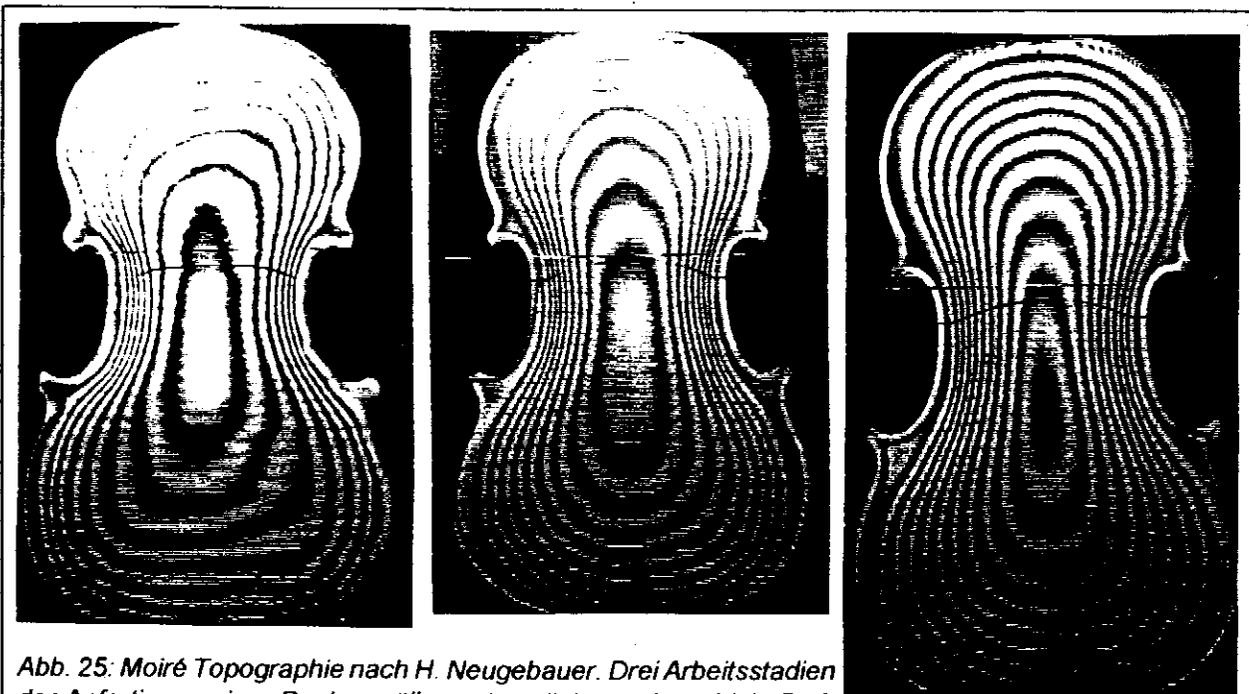


Abb. 25: Moiré Topographie nach H. Neugebauer. Drei Arbeitsstadien der Anfertigung einer Deckenwölbung (von links nach rechts). Grob abgestochen, Wölbung knapp vor der Vollendung, fertige Violindecke.

## DIE MODALANALYSE

Wie die vorhin beschriebenen Untersuchungsmethoden wurde auch dieses Verfahren, das ursprünglich zur Materialprüfung bei Metallen und Kunststoffen entwickelt wurde, für die Erforschung der Musikinstrumente nutzbar gemacht [19]. Die Abbildung 26 zeigt die apparativ recht aufwendige Meßanordnung an der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig (allerdings anhand eines Sonderfalles, der Messung des Schallfeldes innerhalb einer Querflöte) [20].

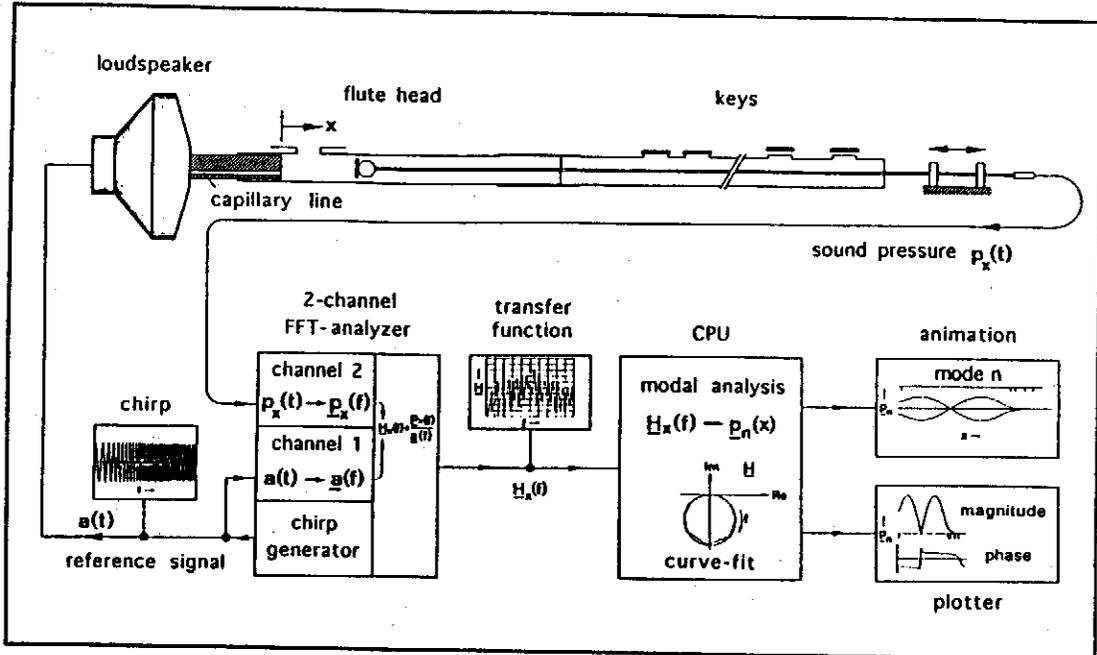


Abb. 26: Meßanordnung zur Erfassung des Schallfeldes innerhalb einer Querflöte mittels Modalanalyse.

Meist wird der zu untersuchenden Körper mit einem Raster überzogen, an dessen Kreuzungspunkten Schwingungsaufnehmer befestigt werden. Anschließend wird der Körper entweder mit einem speziellen Impuls-Hammer oder mit einem Schwingerreger in Schwingung versetzt und das Anregungssignal gleichzeitig mit den an den Rasterpunkten auftretenden Schwingungssignalen in einen PC eingelesen und weiterverarbeitet. Ist die Schwingungscharakteristik des Prüfobjektes solcherart erfaßt, kann mittels Simulation jeder Parameter des Prüfobjektes beliebig verändert und die Auswirkung auf sein Schwingverhalten vorausgesagt werden. Gleichfalls kann die Schwingbewegung am Bildschirm oder auf Video sichtbar gemacht werden. Dieses Verfahren hat sich bisher bei großen und aufwendig herzustellenden Resonanzkörpern, wie zum Beispiel Resonanzböden von Flügeln (Abb.27), bestens bewährt [21].

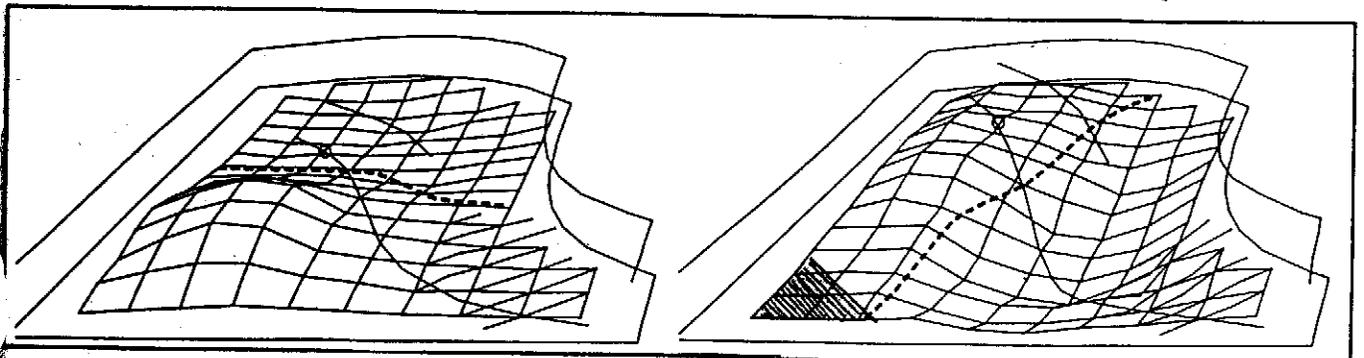


Abb. 27: Modalanalyse an einem Flügelresonanzboden nach K. Wogram. Links: Originalresonanzboden mit seiner zweiten Schwingungsmode bei 90 Hz. Rechts: Simulation einer Versteifung links vorne im Bassbereich, die zweite Mode liegt nun bei 100.8 Hz.

Aber auch bei Klanghölzern (Abb.28) oder zur Untersuchung von parasitären und zumeist unerwünschten Schwingungen bei Blechblasinstrumenten (Abb.29), Orgelpfeifen oder Drums (Abb.30) leistet die Modalanalyse gute Dienste.

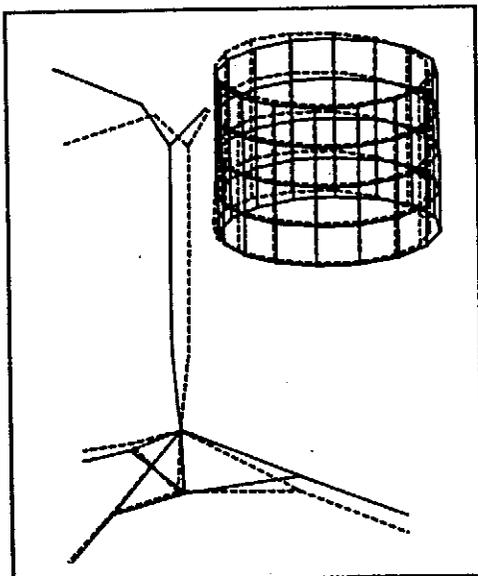
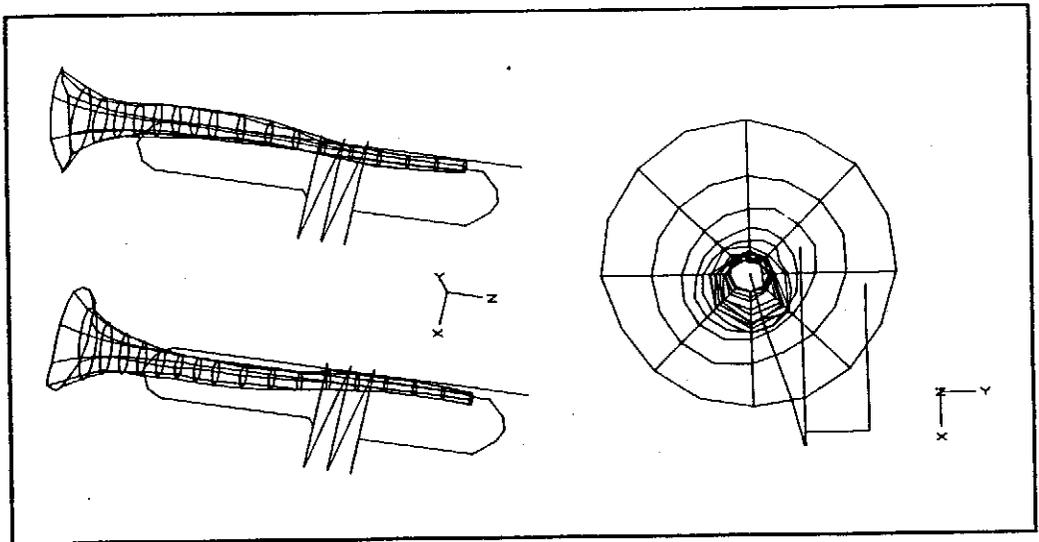
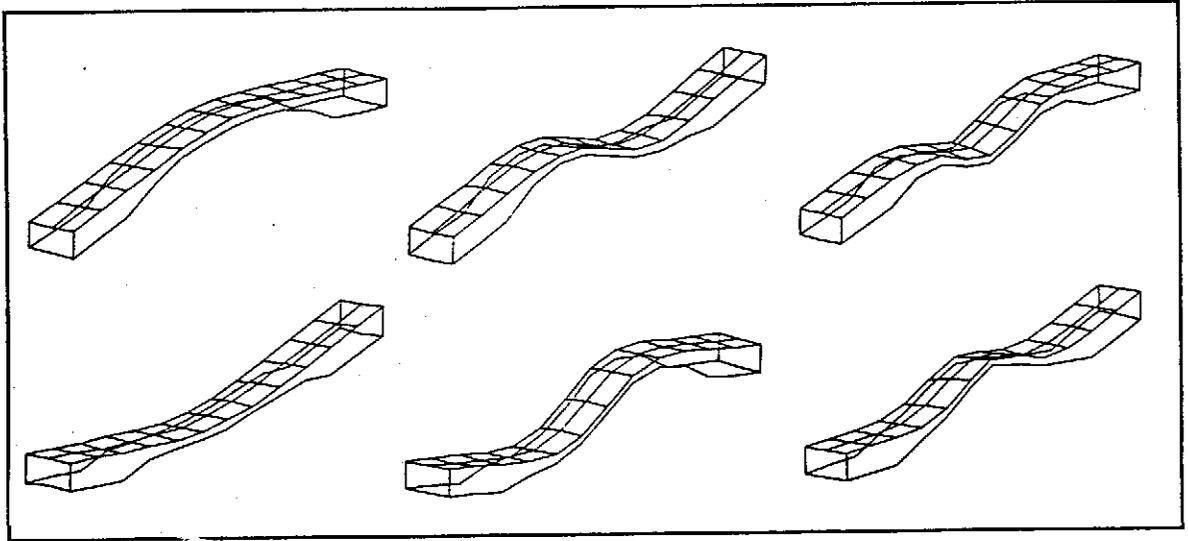


Abbildung 28 (oben): Die untersten drei Eigenmoden eines Klangstabes nach Ingolf Bork.

Abbildung 29 (mitte): Parasitäre Schwingungsformen (Biegeschwingung mit 700 Hz) eines Trompetenschallstückes nach Klaus Wogram.

Abbildung 30 (links): Parasitäre Schwingungsform, die durch die Verkoppelung von Trommel und Stativ entsteht.

## LITERATUR

- [1] D. W. Martin: Lip Vibrations in a Cornet Mouthpiece. *Jasa* Vol. 17, p 305-308, 1942.
- [2] J. Webster: An Electrical Method of Measureing the Intonation of Cup-Mouthpiece Instruments. *Jasa* Vol. 19, No. 5, p 902-906.
- [3] J. Igarashi / M. Koyasu: Acoustical Properties of Trumpets. *Jasa* Vol. 25, No. 1, p 122-128.
- [4] J. Coltman: Sounding Mechanism of the Flute and Organ Pipe. *Jasa* Vol. 44, p 983-992, 1968.
- [5] J. Merhaut: Method of Measuring the Acoustical Impedance. *Jasa* Vol. 45, p 331, 1969.
- [6] Y. Ando / J. Tanaka: An Investigation on Effect of Wall Material of Brass Wind Instruments. *Journal of the Acoustical Society of Japan*. p 331-332 (japanisch).
- [7] F. Fransson / E. Jansson: The STL-Ionophon: Transducer Properties and Construction. *Jasa* Vol. 58, No. 4, p 910-915.
- [8] K. Wogram: Ein Beitrag zur Ermittlung der Stimmung von Blechblasinstrumenten. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1972.
- [9] G. Widholm: Meßmethoden zur objektiven Beurteilung der Qualität von Blechblasinstrumenten. *Alta Musica* Bd. 8, p 129-148, Graz 1985.
- [10] R. Pratt / J. Bowsher: The Measurement of the Acoustic Impedance of Brass Instruments. *Acustica* Vol. 38, No. 4, p 236-246, 1977.
- [11] T. Ossman / H. Pichler / G. Widholm: A Computer Aided Test System for Brass Instruments. AES Convention, Preprint No. 2834, New York 1989.
- [12] J. Bowsher: Impulse Measurements on Wind Instruments. *Das Instrumentalspiel*, p 55-76. Wien 1989.
- [13] K. Wogram: Akustische Auswahlkriterien bei Blechblasinstrumenten. *Das Instrumentalspiel*. p 119-136. Wien 1989.
- [14] W. Winkler / G. Widholm / H. Pichler: Computer Aided Measurements and Theoretical Models of Interaction of Musicians and Brass Instruments. AES Convention, Preprint No. 3338, Wien 1992.
- [15] A. Barjau / J. Martinez: Reed Woodwinds Redesign. A CAD Approach. Proceedings of the 13. ICA Congress, Vol. 3, p 95-98, Belgrad 1989.
- [15] H. Dünwald: Ableitung objektiver Qualitätsmerkmale aus Messungen an alten und neuen Geigen. *Qualitätsaspekte bei Musikinstrumenten*, p 77-85, Celle 1988.
- [16] P. Bazant / J. Stepanek: Frequency Curve of Violin and its Information Contents. 28. Akusticka Konferenc, Strpske Pleso, 1989.
- [17] C. M. Hutchins: Klang und Akustik der Geige. *Die Physik der Musikinstrumente (Spektrum der wissenschaft)*. p 64-77, Heidelberg 1988.

- [18] H. Neugebauer: Moiré-Topographie und Geigenbau. Das Orchester, Heft 3, p 276-279. Mainz 1992.
- [19] I. Bork: Schwingungsformen und Klangbewertung bei Schlaginstrumenten. Das Instrumentalspiel, p 187-198, Wien 1989.
- [20] I. Bork: Modal Analysis of sound Fields of Musical Instruments. AES Convention, Preprint Nr. 3243, Wien 1992.
- [21] K. Wogram: Zeitstrukturen bei Klavierklängen. das Instrumentalspiel, p 199-214, Wien 1989.

**Bisher erschienen folgende "Beiträge zur Elektronischen Musik":**

<b>B.E.M. 1</b>	<b>HARALD FRIPERTINGER</b>	<b>ENUMERATION IN MUSICAL THEORY</b>	<b>1992</b>
<b>B.E.M. 2</b>	<b>GREGOR WIDHOLM</b>	<b>HOLOGRAPHIE, CAD, UND MODALANALYSE IM DIENSTE DER MUSIK</b>	<b>1993</b>