

Klanganalyse eines Cembalos – der Laser macht's

Der vorliegende Artikel beschäftigt sich mit einer neuartigen Laser-Meßmethode an Instrumenten, die in der Firma Polytec GmbH mit Sitz in Waldbronn entwickelt wurde. Der Autor, Dieter Stehle, schrieb diesen Beitrag als Mitglied der Forschungsgruppe des hier beschriebenen Polytec Scanning-Vibrometers.

1. Musik und Wissenschaft

Seit einiger Zeit beschäftigen sich vermehrt Wissenschaftler und Meßtechniker mit der Klanganalyse von Musikinstrumenten. Die Faszination, die von dieser Verbindung zwischen Musik und Wissenschaft ausgeht ist beträchtlich, die Ergebnisse sind mehr als eindrucksvoll und versetzen nicht nur Laien immer wieder in Erstaunen. Als meine Diplomarbeit 1990 abgeschlossen war, hatte ich auch mein erstes Modalanalyse-System fertiggestellt. Damals war es nicht nur für mich die erste Möglichkeit, den Resonanzboden eines Cembalos schwingen zu sehen. Das System funktioniert heute nach wie vor und wird auch regelmäßig von Herrn Merzdorf in seiner Cembalowerkstatt eingesetzt. Er nutzt es sowohl zur Qualitätskontrolle als auch zur Entwicklung von Neukonstruktionen. Das System arbeitet mit sogenannten Piezoaufnehmern, das sind Kristalle die unter Einwirkung von Kräften elektrische Spannungen erzeugen. Heute arbeitet man, wie in vielen Bereichen, mit dem Laser. Dieser Artikel soll zum einen die Ergebnisse der letzten Jahre darstellen und zum anderen

die Möglichkeiten eines neuen nach dem Laserprinzip arbeitenden Systems vorstellen.

1.1 Modalanalyse – was ist das?

Das Schlagwort Modalanalyse macht seit längerem die Runde. Was steckt eigentlich dahinter, was ist Modalanalyse und was kann die Lasertechnik in der Modalanalyse bewirken? Der Begriff Modalanalyse umfaßt die Ermittlung und Interpretation der modalen Größen. Die modalen Größen sind die Eigenschwingungsgrößen des Systems, die zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens desselben von fundamentaler Bedeutung sind. Soweit die klassische Definition der Modalanalyse.

Eigenschwingungsgrößen sind die Merkmale eines schwingungsfähigen Gebildes. Ein solches schwingungsfähiges Gebilde kann z.B. ein Musikinstrument sein. Die Merkmale sind nichts anderes als das, was man gemeinhin die Frequenzen bzw. Eigenfrequenzen des Systems nennt. Da ein Musikinstrument nicht alle Töne gleich hervorbringt, besitzt es – wie alle mechanischen Gebilde – Frequen-

zen, die ihm eigen sind. Diese Eigenfrequenzen gilt es zu ermitteln und dem Ort ihres Auftretens am Instrument zuzuordnen.

Im Bereich des Musikinstrumentes bedeutet dies z.B. den Resonanzboden eines Cembalos oder den Korpus einer Violine zu untersuchen und dabei aussagekräftige Schwingungsbilder zu erstellen. Diese Schwingungsbilder helfen dem Instrumentenbauer, Konstruktionsänderungen dahingehend vorzunehmen, daß bestimmte Frequenzen unterstützt, andere hingegen gedämpft werden sollen. Dadurch kann das Instrument klanglich abgestimmt werden. Die Möglichkeiten, die sich daraus ergeben, sind enorm. Zum einen können Instrumente alter Meister klanglich nachgebildet werden, zum anderen kann der Instrumentenbauer seinem Instrument eine charakteristische Note geben, die seinen klanglichen Vorstellungen entsprechen.

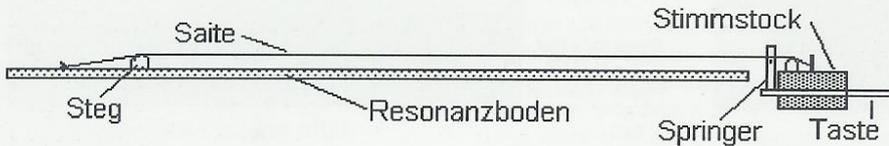
2. Klangentstehung

Das Wichtigste an einem Instrument ist natürlich sein Klang. Dieser Klang begründet sich in dem mechanischen Aufbau des Instruments. Vergleicht man eine Violine mit einem Cembalo, einem Klavier oder einer Gitarre, so haben diese Instrumente einen ganz unterschiedlichen Klang, bei näherer



Abgebildet ist das komplette Polytec-Scanning-Vibrometer mit Vibrometer-Controller, Scanning-Kopf, 50 MHz-PC und Steuereinheit.

Betrachtung stellt man aber fest, daß sie den gleichen mechanischen Aufbau besitzen, sich lediglich die Abmessungen der Einzelteile sowie die Anregung der Saiten unterscheiden. Ich will dies am Beispiel des Cembalos erläutern:



Schnitt durch ein Cembalo (schematisch).

Drückt man die Taste, so bewegt sich der Springer aufwärts. An seinem oberen Ende befindet sich der Kiel. Dieser beginnt die Saite zu spannen, bis die Spannung so groß ist, daß der Kiel nach unten weggedrückt wird. Zu diesem Zeitpunkt ist die Saite wieder frei und beginnt zu schwingen. Da die Saite nur an einem Ende gezupft wird, bildet sich ein Knick aus. Dieser Knick bleibt erhalten und wird zwischen dem Stimmstock und dem Steg hin und her geworfen. Beim Kammerton a' geschieht dies 440 mal pro Sekunde. Immer dann, wenn der Knick aber vom Steg reflektiert wird, wird ein Teil der Schwingungsenergie auf den Steg und damit auf den Resonanzboden übertragen. Wie viel Energie übertragen wird, hängt von der Ankopplung der Saite am Steg ab. Ist die Ankopplung gut, wird viel Energie übertragen. Dies bedeutet, daß der Ton laut und kurz klingt. Auch hier gilt der Grundsatz: „Weniger ist oft mehr.“ Ist die Ankopplung schlecht, so heißt das, daß der Ton leise und lang klingt und damit das Volumen des Instrumentes gar nicht zum Tragen kommt. Die Saite schwingt aber nicht nur in einer Frequenz, sondern erzeugt durch die knickartige Schwingung eine ganze Reihe von Obertönen. Der Steg, bzw. die Ankopplung der Saite an den Steg, überträgt manche Obertöne gut, andere weniger gut oder gar nicht. Dies bedeutet, daß der Resonanzboden nicht von allen Obertönen angeregt wird. Meßtechnisch kann man folglich ein Instrument so beschreiben:

2.1 Der Resonanzboden

Dem Resonanzboden kommt bei allen Instrumenten eine besondere Rolle zu. Denn er ist es, der den größten Einfluß auf den Klang ausübt. Läßt man spieltechnische Eigenschaften wie Gängigkeit der Tasten oder statische

Eigenschaften wie Stimmhaltung außer Acht, so ist es der Resonanzboden, der gute von weniger guten Instrumenten unterscheidet. Er wandelt die eindimensionale Schwingung der Saite in eine zweidimensionale Flächenschwingung um. Erst dadurch wird der Klang für den Menschen wahrnehmbar. Diese Umwandlung ist aber so komplex, daß es dafür in der Wissenschaft keine rechnerische Lösung mehr gibt. Deshalb beschreibt man die Eigenschaften des Resonanzbodens mit der sogenannten Übertragungsfunktion, die gemessen werden kann.

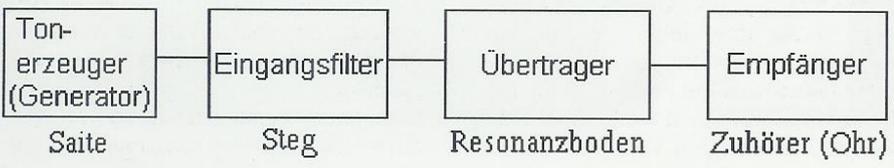
2.2 Die ideale Übertragungsfunktion

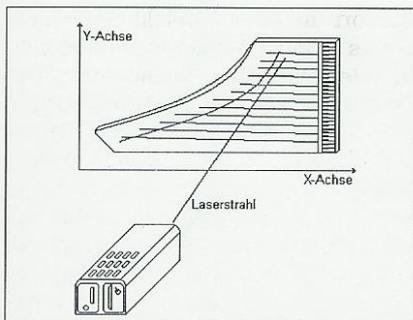
Die Übertragungsfunktion ist das Ergebnis der Modalanalyse und setzt sich aus den gemessenen Eigenfrequenzen zusammen. Wie soll diese Übertragungsfunktion eigentlich aussehen? Gibt es eine ideale Übertragungsfunktion? Man hört, daß die lineare Übertragungsfunktion angestrebt werden soll. Dies ist zum einen richtig, wenn es sich um eine HiFi-Anlage handelt. Denn dort will der Zuhörer, daß seine Musikanlage den Inhalt einer Schallplatte oder CD unverfälscht wiedergibt. Hier ist in der Tat eine lineare Übertragungsfunktion wünschenswert. Für den Musikinstrumentenbau aber wäre die lineare Übertragungsfunktion katastrophal, denn dies würde bedeuten, daß aus einem Cembalo, einer Violine oder einem Klavier nur noch das Schnarren von Stahl- und Messingsaiten zu hören wäre. Die ideale Übertragungs-

funktion in einem objektiven Sinne gibt es nicht. Für jedes Instrument, für jeden Geschmack und für jeden Verwendungszweck muß die Übertragungsfunktion unterschiedlich aussehen. Ein Cembalo, das in einem Musiksaal gespielt wird, muß tragfähiger sein als jenes, das zuhause im Wohnzimmer steht. Der eine mag einen kräftigen Baß, der andere hört lieber die schwirrenden Obertöne. Wie kann man nun ein Instrument dazu bringen, daß es so klingt, wie man es gerne hätte? Dazu muß erst einmal der Klang vermessen werden.

3. Meßaufbau mit Laserstrahl

Das Instrument wird spielfertig aufgebaut, da es sinnlos wäre, den Resonanzboden eines Cembalos analysieren zu wollen, ohne die gespannten Saiten, die dem Resonanzboden eine Vorspannung geben, zu berücksichtigen. Das Instrument wird an einem Punkt auf dem Steg angeregt. Dies kommt der natürlichen Anregung durch die Saite am nächsten. Nun wird versucht, an möglichst vielen Punkten auf dem Resonanzboden die Schwingung zu erfassen. Dies ist mit den herkömmlichen Piezoaufnehmern mühsam und zeitaufwendig. An diesem Punkt setzt die Lasermeßtechnik an. Ein Laserstrahl kann die Schwingungen des Systems berührungslos aufnehmen. Dadurch entstehen keinerlei Verfälschungen des Systems durch zusätzlich aufgeklebte Massen. Ein weiterer Vorteil des Laserstrahls ist seine Fokussierbarkeit. Wer schon einmal ein Klavier oder Cembalo mit Beschleunigungsaufnehmern versehen hat, weiß ein Lied davon zu singen, wie störend gespannte Saiten oder Stege auf dem Resonanzboden sein können. Ein Laserstrahl hingegen, kann so fokussiert werden, daß er nur Reflexionen der Oberfläche des Resonanzbodens aufnimmt. Er kann sozusagen durch die Saiten hindurch, oder besser gesagt, um die Saite herum sehen. Wird der Laserstrahl zusätzlich über zwei Spiegel gelenkt, die sich vertikal und horizontal drehen lassen, so kann er an alle Stellen des Instrumentes gebracht werden, ohne den Meßaufbau auch nur im Geringsten zu verändern. Dies hat den Vorteil, daß eine Messung, die bisher Stunden oder gar Tage dauerte, in wenigen Minuten abgeschlossen ist; und das mit einer Präzision, die mit herkömmlichen Mitteln gar nicht, oder nur schwer zu erreichen ist.





Meßaufbau der Modalanalyse an einem Cembalo

4. Die Messung

Wird nun das Instrument am Steg mit einem Impuls angeregt, so nimmt der Laserstrahl einen Signalverlauf auf, der der Geschwindigkeit der Schwingung proportional ist. Dieser Signalverlauf wird ebenso wie der Anregungsimpuls selbst digitalisiert und einem Rechner zugeführt. Der Computer errechnet daraus mittels einer Schnellen Fourier Transformation (FFT) ein Spektrum. Dieses Spektrum gibt Auskunft darüber, bei welcher Frequenz das Instrument an diesem Punkt wie stark schwingt und wird dem Auftreffpunkt des Laserstrahls auf dem Resonanzboden zugeordnet. Systematisch wird der Resonanzboden Punkt für Punkt abgetastet. Der Laserstrahl wird dabei nicht von Hand, sondern per Computersteuerung über den Resonanzboden geführt. Insgesamt können somit $2^{15} = 16384$ Punkte erfaßt werden. Wenn alle Punkte erfaßt sind, ist auch der Klang des Instrumentes klassifiziert. Als Ergebnis haben wir nun eine Reihe von Spektren, die einzelnen Punkten zugeordnet sind. Daraus läßt sich das Leistungsspektrum errechnen, indem alle Spektren aufaddiert werden. Dieses Leistungsspektrum gibt zwar Auskunft über die Intensität der Klangustrahlung eines Instrumentes, sagt aber noch nicht viel über das Schwingungsverhalten des Resonanzbodens aus. Da der Mensch nicht in der Lage ist, diese Vielzahl von Spektren auszuwerten, muß der Rechner diese Daten so aufbereiten, daß jeder das Ergebnis erkennen und interpretieren kann.

Da bekanntlich ein Bild mehr sagt als tausend Worte, oder besser gesagt, eine Farbgrafik mehr aussagt als 16384 Spektren, wird im Computer ein sogenanntes Falsch-Farben-Bild erzeugt. Dieses Bild zeigt, farblich kodiert, das Schwingungsverhalten des Resonanzbodens bei einer bestimm-

Laser und Interferometer

Der Laserstrahl arbeitet nach dem Interferenzprinzip. Dies bedeutet einfach ausgedrückt, daß der Strahl geteilt und wieder zusammengeführt wird. Wenn sich der Abstand des Objektes ändert, entstehen helle und dunkle Streifen in Längsrichtung des Strahles. Ändert sich der Abstand um den Betrag der halben Wellenlänge des Laserlichtes – dies sind nur einige Millionstel Millimeter (genau 318nm) – wird von der Empfangsoptik ein Hell-Dunkel-Übergang wahrgenommen. Diese Hell-Dunkel-Übergänge können mit einem sog. Streifenzähler erfaßt und gespeichert werden.

Der Laserstrahl nimmt aber nicht, wie man erwarten würde, die Amplitude der Schwingung auf, sondern die Geschwindigkeit der Schwingung. Dies geschieht, indem der Laserstrahl mit einer bestimmten Frequenz moduliert wird. Die Amplitude läßt sich daraus leicht errechnen. Durch diesen technischen Trick können sogar kleinste Amplituden erfaßt werden, die sich über nur 8 Millionstel Millimeter (8nm) erstrecken.

ten Frequenz. Die Aussage des Bildes hat aber nicht nur qualitativen Charakter, sondern vor allem quantitative Aussagekraft. Dies bedeutet, daß hinter der Farbcodierung physikalische Größen wie Amplitude, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Phase stehen. Auch die Übertragungsfunktion, in der ein System vollständig charakterisiert ist, kann so ausgegeben werden. Dreidimensionale Darstellungsformen wie Gitternetz und farblich kodierte Füllmuster (siehe Bild 6) sind ebenfalls möglich.

5. Ergebnisse und Geheimnisse

In den letzten Jahren wurden eine Menge Messungen mit Piezoaufnehmern gemacht und konnten mit dem neuen Lasermeßsystem nachvollzogen und somit verifiziert werden. Es konnten viele Erkenntnisse aus den Messungen und Analysen gewonnen werden und wurden bei der Konstruktion neuer Cembali berücksichtigt. Dadurch konnten die Klangeigenschaften erheblich verbessert und verfeinert werden. Mit diesem Meßsystem hat man zum erstenmal auch ein Werkzeug zur Hand, mit dem man den Klang bestimmen und den Einfluß von Holzbehandlungsmethoden direkt messen und vergleichen kann. Vielen Gerüchten über gesalzenes Holz oder besondere Schimmelpilze, geheimnisvolle Lackmischungen oder speziellen Holzleime kann man damit auf den Grund gehen. Auch die Rätsel und Geheimnisse, die uns Stradivari mit seinen Violinen hinterließ, können nun genau erforscht werden. Zahlreiche Instrumentenbauer haben auch heute ihre geheimen Emulsionen und andere Mittelchen, mit denen sie ihr Holz behandeln. In diesem Zusammenhang will ich auch die künstliche Alterung von Holz mit ra-

dioaktiver Gammastrahlung erwähnen. Ende der fünfziger Jahre wurden Experimente durchgeführt, wonach Holz bei Bestrahlung mit Gammastrahlen von seiner Struktur her wesentlich gealtert sein soll. In den Jahren 1989 und 1990 wurden diese Experimente von Diplomanden des Instituts für Angewandte Physik in Karlsruhe, an dem auch ich im gleichen Zeitraum meine Diplomarbeit anfertigte, wiederholt. Die Ergebnisse waren damals bescheiden und lagen innerhalb der Fehlergrenzen. Mittlerweile konnte jedoch mit Hilfe der Modalanalyse eine Frequenzverschiebung zu tieferen Frequenzen festgestellt werden. Zur radioaktiven Strahlung sei bemerkt, daß die Bestrahlungsstärke so gering sein muß, daß keinerlei Reststrahlung vom Instrument ausgehen darf. Die Strahlungsdosis muß demnach über die Bestrahlungszeit geregelt werden, die im Bereich von einigen Tagen liegt.

All diese Versuche können jetzt angegangen und deren Einflüsse auf das Resonanzholz untersucht werden. Aber eines sollte man immer berücksichtigen: Aus einem schlecht geschliffenen Resonanzboden wird auch durch diese Methoden kein gut klingendes Instrument. Denn es sind die mechanischen Eigenschaften, die für den Klang ausschlaggebend sind. Die Holzbehandlungsmethoden sind lediglich für feine Nuancen des Klangs verantwortlich.

Es kommt also darauf an, wie der Resonanzboden aufgebaut wird, wo die Unterzüge verlaufen, wie sie den Resonanzboden versteifen, wie er geschliffen ist, wo und wie er ausgearbeitet ist, wie die Stege sich erstrecken etc.

Viele Messungen sind nötig bis man einen Kompromiss zwischen einem

klanglich guten und einem statisch ausreichenden Ergebnis erhält. Denn der Resonanzboden soll nicht nur gut klingen, sondern muß auch der Zugkraft der Saiten widerstehen können. Die Modalanalyse kann also keineswegs handwerkliches Geschick ersetzen, sie liefert aber Ansatzpunkte, wohin der Weg zu einem besseren Klang führt. Das heißt, sie kann feststellen, welche Veränderungen sich stark und welche sich weniger oder gar nicht auf den Klang auswirken.

6. Modalanalyse und die alten Meister

Auch alte Meister kannten, oder besser gesagt, konnten Modalanalyse. Wie man weiß, klopfte man früher, wie auch heute noch, immer wieder auf die Resonanzböden der Violinen, um den Klang zu prüfen und sie danach weiter auszuarbeiten. Stege läßt man auf harte Oberflächen fallen und begutachtet deren Klang beim Auftreffen. Das Gehör ist das Meßinstrument. Demnach war die Modalanalyse damals nicht nur ein gebräuchliches Meßverfahren sondern auch eine Kunst. Denn je untrüglicher das Gehör, desto besser das Meßinstrument. Modalanalyse ist also nichts neues. Sie erscheint nur in einem an-

deren Licht, nämlich in dem der Meßtechnik.

Ende des 18. Jahrhunderts streute der Physiker F. F. Chladni feines Pulver auf einen Resonanzboden und erhielt die nach ihm benannten Chladni'schen Figuren. Versetzt man den Resonanzboden in Schwingung, so sammelt sich das Pulver an jenen Stellen, wo keine Bewegung stattfindet, nämlich entlang den Knotenlinien. Dadurch konnten zum ersten mal komplexe Schwingungsformen sichtbar gemacht werden. Diese Methode zeigt aber nur die Schwingungsform einer Frequenz. Außerdem muß sich das System im eingeschwingenen Zustand befinden. Der Einschwingvorgang, der aber charakteristisch für das jeweilige Instrument ist, bleibt unberücksichtigt. Deshalb ist es wichtig, daß die Anregung impulsförmig stattfindet. Heute ist es möglich beide Vorteile zu vereinen. Sichtbare Schwingungen bei impulsförmiger Anregung.

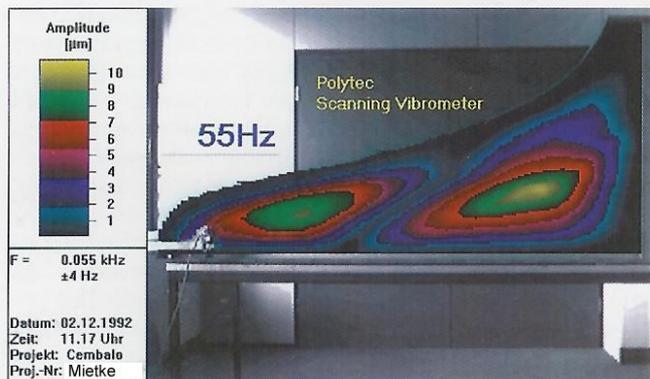
7. Schwingungsbilder

Die Schwingungsbilder wurden im Applikationslabor der Firma Polytec erstellt. Im Meßsystem ist eine Videokamera integriert, die das zu vermessende Cembalo aufnimmt. Das Ergeb-

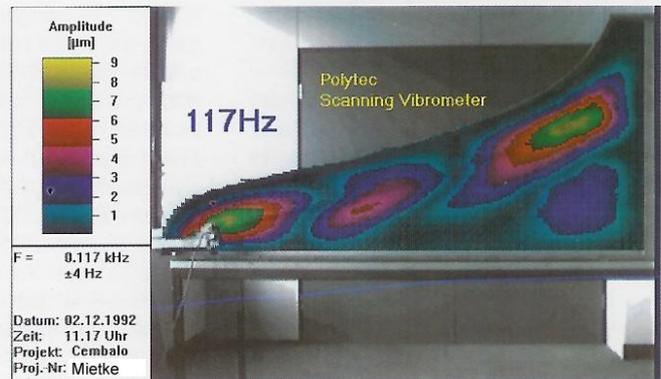
nis der Messung wird anschließend dem Videobild überlagert. So findet eine eindeutige Zuordnung des Schwingungsbildes zum Meßobjekt statt. In der dreidimensionalen Darstellung geht diese Zuordnung zwar verloren, man gewinnt jedoch einen räumlichen Eindruck der auftretenden Schwingung. Alle nachfolgend aufgeführten Schwingungsbilder wurden aufgrund einer einzigen Messung erstellt, die ca. 70 Minuten dauerte. Dabei wurden rund zehntausend Meßpunkte aufgenommen. Angeregt wurde mit einem Hubmagneten, welcher einen kurzen, kräftigen Stoß am oberen Ende des Steges (links im Bild) erzeugt.

Die Schwingungsbilder zeigen das typische Verhalten des Resonanzbodens eines Cembali. Eine Grundmode, bei der der Resonanzboden im gesamten schwingt, konnte nicht beobachtet werden, und findet wegen der Form des Bodens nicht statt.

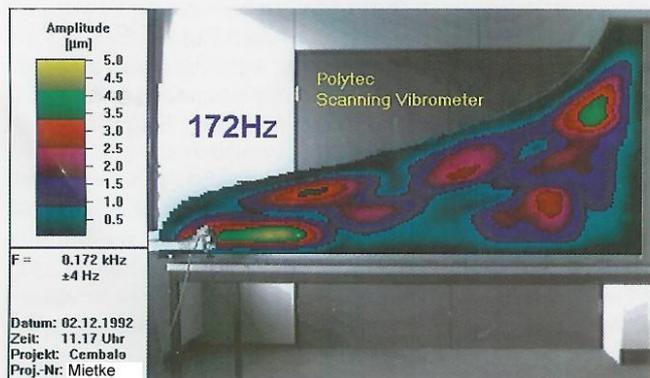
1. Bild: Die tiefste Frequenz beginnt bei 55 Hz. Es ist eine sogenannte zweier Mode, da sie aus zwei Schwingungszentren besteht, die gegenphasig schwingen. Gegenphasig bedeutet, daß sich das eine Zentrum aufwärts bewegt, während sich das andere abwärts bewegt.



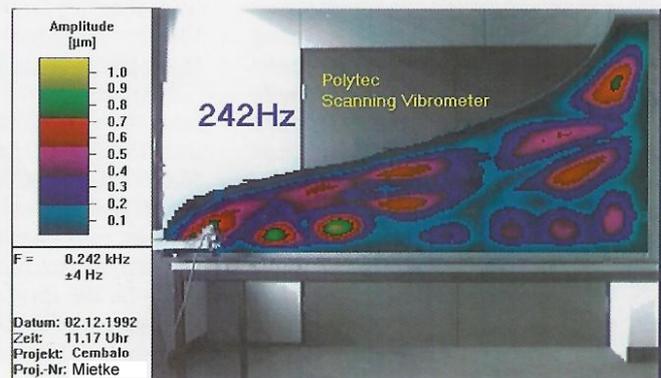
1. Bild



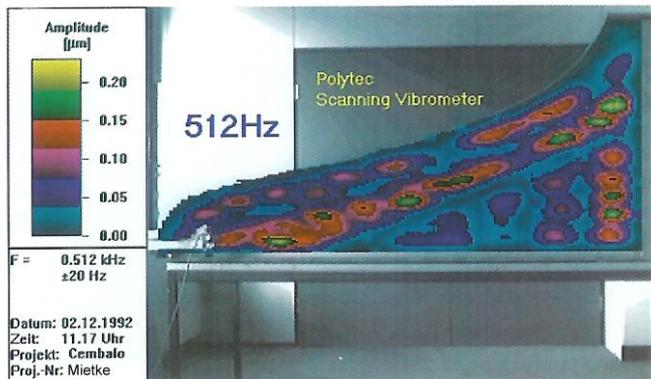
2. Bild



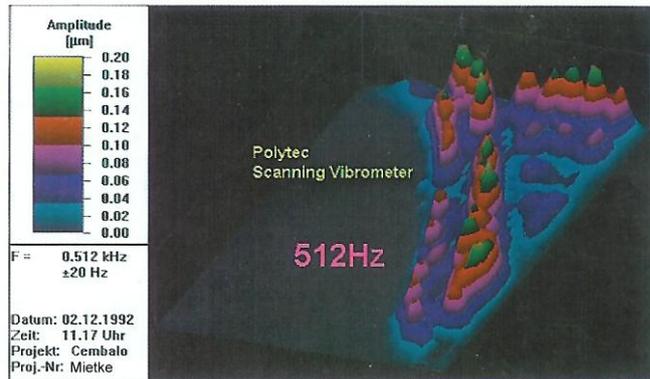
3. Bild



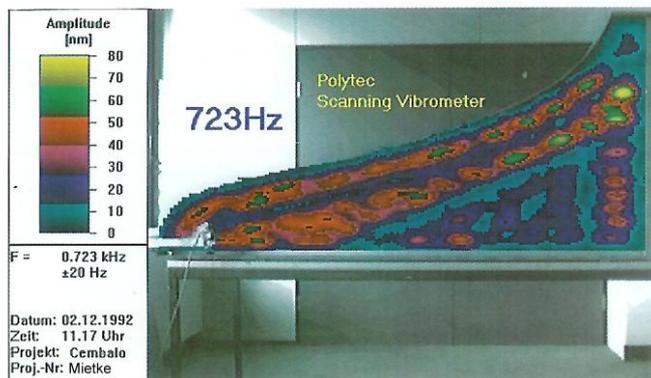
4. Bild



5. Bild



6. Bild



7. Bild

2. Bild: Eine Vierermode zeigt sich bei 117 Hz. In diesem Bild wird das Videobild nicht vollständig vom Ergebnis überdeckt. Dies ist einstellbar und vor allem dann hilfreich, wenn sich der Aufbau des Resonanzbodens sehr komplex gestaltet. Dadurch läßt sich die Lage des Steges (schwarzer Schatten quer durch die Moden) eindeutig bestimmen. Beeindruckend ist hier, daß der Steg trotz seiner Steifigkeit bei diesen Frequenzen mitschwingt.

3. Bild: Bei 172 Hz beginnen die Moden komplizierter zu werden. Der Steg hat Schwierigkeiten mitzuschwingen. Deshalb verlagern und verzerren sich die Schwingungszentren. Der mechanische Aufbau des Resonanzbodens macht sich bemerkbar.

4. Bild: 242 Hz Auch die Stege, die an der Unterseite angebracht sind, beeinflussen langsam das Schwingungsverhalten. Die Schwingung erreicht eine Komplexität, die nicht mehr unbedingt vorherzusehen ist.

5. Bild: 512 Hz. Die Schwingungszentren wandern immer enger zusammen. Alle Stege, egal ob auf der Ober- oder Unterseite sind nun als Knotenlinien erkennbar. Ein Blick auf die Skala zeigt, daß die Auslenkung des Resonanzbodens kleiner als ein tausendstel Millimeter beträgt.

6. Bild: Dieselbe Frequenz, jedoch 3-dimensional dargestellt. Das Schwingungsbild ist so gedreht, als ob man schräg von hinten auf das Instrument schauen würde. Deutlich erkennt man die Wellentäler, die die Lage der Stege signalisieren.

7. Bild: 723 Hz Die Schwingungszentren liegen nun so dicht neben einander, daß die Stege keinen Einfluß mehr darauf haben. Dies ist wahrscheinlich auch der Grund warum die hohen Frequenzen bei jedem Cembalo vorhanden sind. Gute, tragfähige Instrumente aber zeichnen sich durch ihr reichhaltiges Untertonspektrum aus.

8. Schlußbemerkung

Mit der Lasermeßtechnik ist es zum ersten mal möglich sovielen Messungen in einem angemessenen Zeitrahmen durchzuführen, wie nötig sind, um Klangeinflüsse nachzuweisen. Der

zeitbegrenzende Faktor ist nämlich nicht mehr das Umsetzen und Anbringen von Meßsensoren, sondern es sind die physikalischen Abtastgesetze. Dies heißt, daß man mit einem minimalen Zeitaufwand ein Maximum an Informationen über das Meßobjekt gewinnt. Durch die exakt festgelegte Wellenlänge des Laserlichts reicht die Genauigkeit bis in den Bereich von einigen Millionstel Millimeter. Erst dadurch können präzise Vergleiche zwischen den Behandlungsmethoden angestellt werden. Wie sich der Klang der Instrumente verbessert, wird sich in den kommenden Jahren herausstellen, sofern sich Lasermeßtechnik und Modalanalyse durchsetzen.

Literatur:

H.G. Natke: „Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse“. Vieweg Verlag Braunschweig 1988.
Kottnick, Kenneth, Marschall und Hendrikson: „Die Akustik des Cembalos“ Spektrum der Wissenschaft 4/1991.