

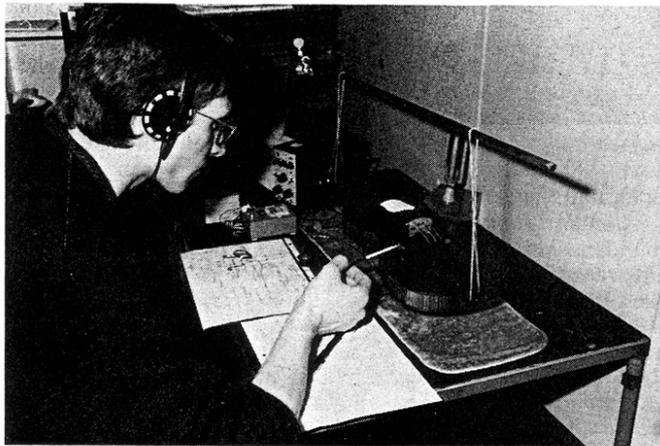
Modalanalyse im Geigenbau – Vom praktischen Nutzen physikalischer Forschung im Musikinstrumentenbau. Teil I: Grundlagen

Grundlage des vorliegenden dreiteiligen Artikels von Martin Schleske bildet ein Vortrag, den er im Rahmen der Jahreshauptversammlung des VDG in Bamberg 1991 vor der Interessensgruppe „Neubau“ gehalten hat.

Zusammenfassung

Der erste Teil dieser Serie soll zu einem grundsätzlichen Verständnis der Modalanalyse verhelfen. Es werden dabei Ziel und Zweck der physikalischen Forschung für die Geigenbaupraxis

können. Physikalisch gesehen handelt es sich dabei um *Quelle* → *Medium* → *Empfänger* (vgl. Roederer 1977). *Quelle* ist hier der Musiker und das Instrument, das die Musik erzeugt. *Medium* ist die Luft, die den Schall weiterleitet.



Das Instrument (hier: D. Montagnana 1740) ist elastisch an Gummibändern aufgehängt, um reproduzierbare Versuchsbedingungen zu schaffen. Der Kopfhörer dient zur zusätzlichen Kontrolle der Impulsgüte und zu einem ersten Lokalisieren von Schwingungsbüchen

veranschaulicht. Einfachere Methoden von Schwingungsuntersuchungen haben in Geigenbauwerkstätten bereits eine lange Tradition. Schließlich sollen die technische Seite der Modalanalyse sowie unterschiedliche Darstellungsmöglichkeiten der Ergebnisse beschrieben werden.

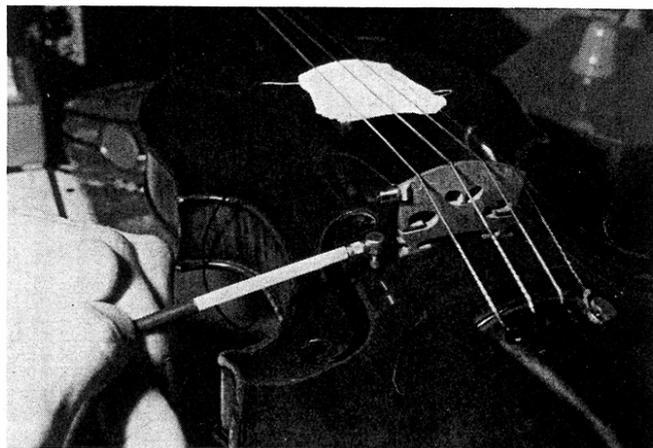
Im zweiten Teil wird als ein erstes Ergebnis der Modalanalyse die Funktion der Geige mit ihren unterschiedlichen Resonanzmechanismen beschrieben sein. Aus dem grundsätzlichen Verständnis über Zusammenhänge von Eigenschwingungsformen und Schallabstrahlung der Geige ergibt sich ein Gütekriterium, das zwischen klanglich guten und schlecht bewerteten Instrumenten beobachtet werden konnte.

Und im letzten Teil werden schließlich Konsequenzen für Konstruktion und Bauweise diskutiert. Das zum Schluß ausführlich beschriebene Schwingungsverhalten einer klanglich als hervorragend eingestuften Geige von Domenico Montagnana aus dem Jahre 1740 bestätigt die theoretisch gewonnenen Beurteilungskriterien aus der Modalanalyse und liefert eine anspornende Referenz dafür, was an Schwingungsformen und damit an Klangfülle möglich ist.

Wo ist die Modalanalyse einzuordnen? Die beteiligten physikalischen Systeme

Betrachten wir zunächst einmal die beteiligten physikalischen Systeme, die dafür nötig sind, daß wir Musik hören

Rechts: Beschleunigungsaufnehmer mit Wachstropfen an zusätzlichem Holzklötzchen an der Stegoberkante; Impulshammer mit Kunststoffkappchen zum Schutz des Lackes



Empfänger ist der Zuhörer, der die Musik wahrnimmt und verarbeitet. Wir haben es also mit einer Kette von Systemen zu tun: Instrument → Luft → Zuhörer. Was diese Systeme verbindet, ist eine bestimmte Art und Form von Schwingungen, genannt Schall, die sich von einem Punkt zum anderen in Form von Wellen fortpflanzt und auf die unser Gehör anspricht. All diese Systeme sind Gegenstand physikalischer Untersuchungen. Der *Empfänger* (Zuhörer) bildet das Interesse der *Psychoakustik*: Auf welche Weise werden die vom Musikinstrument erzeugten Klangmuster vom Gehör wahrgenommen und im Gehirn interpretiert? Das *Medium* (Luft) bzw. die Begrenzungen (Wände, Decke, Böden etc.), die die Fortpflanzung des Schalls durch Reflexion und Absorption der Schallwellen erheblich beeinflussen, bilden das Interesse der *Raumakustik*. Die *Quelle* (Instrument) schließlich bildet das In-

teresse der *Schwingungsanalyse*. Hier ist die Modalanalyse anzusiedeln. An der Quelle unterscheiden wir verschiedene Komponenten: (1) Der primäre Anregungsmechanismus: bei der Geige das Streichen der Saite mit dem Bogen. Dadurch wird Energie in das Instrument eingeleitet. (2) Das eigentliche Schwingungselement: bei der Geige die Saite. Hier wird die musikalische Tonhöhe bestimmt und es werden Obertöne geliefert, die dem Ton eine charakteristische Klangfarbe geben. (3) Der Resonator: bei der Geige der Korpus. Seine Aufgabe ist es, die Schwingungen der Saite effektiver in Schallschwingungen der umgebenden Luft umzusetzen. Die Modalanalyse ist ein Werkzeug, das dazu geeignet ist, die Schwingungseigenschaften des Geigenkorpus genauer „unter die Lupe“ zu nehmen. Wozu dies? Das mag im einzelnen alles „schön und gut“ sein, der Geigen-Neubauer wird jedoch zunächst ganz pragmatisch fragen, ob die physikalische Forschung, in unserem Fall die Modalanalyse, für den Instrumentenbau denn irgendeinen praktischen Nutzen hat.

Wozu Schwingungsuntersuchungen an der Geige? Vom möglichen Nutzen der physikalischen Forschung

Die Geige ist ein Gebilde, das eine gewisse Faszination auf Menschen mit unterschiedlichem Interesse und unterschiedlicher Fragestellung ausübt. Der *Geigenbauer* ist zu allererst einmal Handwerker. Er richtet sein Augenmerk zunächst auf die praktische Ausführung und künstlerische Gestaltung der Geige: Ist das Modell harmonisch, sagt es etwas aus? Hat der Umriß Schwung, der Lack Transparenz und Leuchtkraft...?

Der *Musiker* bewertet das Instrument primär hinsichtlich musikalisch-spieltechnischer Kriterien. „Auf diesem Instrument kann man zaubern, der Ton ist so flexibel...“, schwärmte vor kurzem eine Solistin, als wir uns über ihr Instrument unterhielten.

Der *Physiker* schließlich ist an physikalischen Gesetzmäßigkeiten interessiert,

untersucht Resonanzeigenschaften, sucht Zusammenhänge etwa zwischen Schwingungsformen und Abstrahlung etc.

Die Geige provoziert häufig Verständigungsprobleme, die daher rühren, daß Musiker, Physiker und Geigenbauer ihre jeweils eigenen Sprachen entwickelt haben und es ein äußerst schwieriges Unterfangen ist, dies jeweils übersetzen zu wollen. Wie etwa läßt sich die Beschreibung eines Cellisten, der Klang seines Instrumentes habe „eine Wolke“, physikalisch in E-Modul und Verlustfaktor oder im Geigenbauerjargon durch irgendein Ausarbeitungsprinzip etc. ausdrücken? Wenn die Geige als *Musikinstrument* hinsichtlich musikalischer Kriterien bewertet wird, besteht eine Schwierigkeit darin, Klangempfinden in Worte zu übersetzen und klar zu charakterisieren. Wenn die Geige als *physikalisches System* physikalischen Gesetzmäßigkeiten unterliegt, so besteht eine Schwierigkeit darin, diese in Anweisungen für die Geigenbaupraxis zu übersetzen. Der Geigenbauer ist herausgefordert, beides, Musicus und Forschergeist, in sich zu vereinen. Wenn er nun aus handwerklicher Perspektive fragt, ob die physikalische Forschung hilfreich sein kann, so bedarf es zunächst einer entscheidenden Einschränkung hinsichtlich dessen, was die Physik kann und was sie grundsätzlich nicht kann. Was die physikalische Forschung *nicht* leistet und auch nicht leisten kann, ist eine *Wertung* von Instrumenten, auch wenn dies immer wieder behauptet wird¹. Hinter einer musikalischen Wertung steht die Frage nach subjektivem Klangempfinden. Das heißt aber, das Werturteil ist abhängig vom urteilenden Subjekt: Geigenbauer, Musiker, Hörer. Die Wertung eines Instrumentes obliegt zunächst einmal dem Geigenbauer, der

das Instrument herstellt, dann dem Musiker, der mit seinem Instrument kommuniziert und schließlich dem Geschmack des Zuhörers, der den Klang wahrnimmt. Erst wenn dieser Prozeß abgeschlossen ist und ein vielfältiges subjektives Werturteil über ein Instrument gewonnen wurde, kann der Physiker versuchen, durch objektive Messungen den Unterschied zwischen verschiedenen bewerteten Instrumenten herauszufinden und zu quantifizieren. Erst dann kann er darüber etwas aussagen, welche Klangeigenschaften offensichtlich als gut und welche als schlecht gewertet werden. Erst jetzt kann auch der Zusammenhang zwischen diesen Klangeigenschaften und den physikalischen Gesetzmäßigkeiten, der Funktion des Instrumentes, untersucht werden. Mehr kann die physikalische Forschung nicht beitragen. Sinn und Ziel der physikalischen Forschung im Bereich der Musikinstrumente ist die Erkenntnis, wie diese funktionieren. Es geht also zunächst nicht darum, das Instrument zu bewerten, sondern darum, seine Funktion zu begreifen. Und genau hier kann die Modalanalyse sehr hilfreich sein.

Was ist Ziel und Zweck der Modalanalyse? Die Modalanalyse als Werkzeug

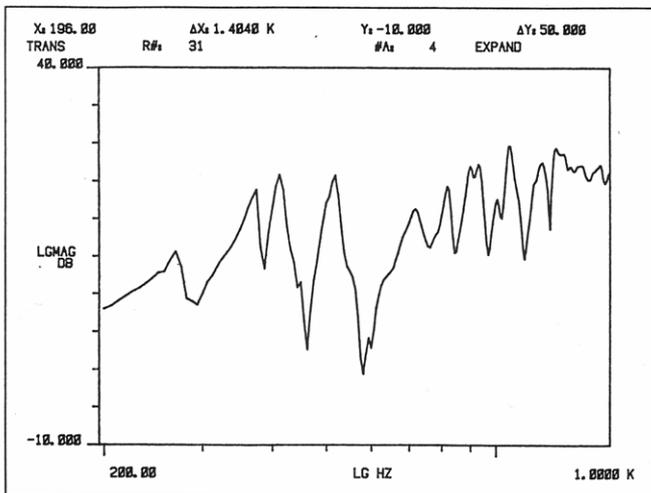
Die Geige ist ein Gebilde, das Schall abstrahlen soll. Dieser soll als Musik empfunden werden, also einen bestimmten Charakter haben. Der Geigenkorpus wird zum Schwingen angeregt und antwortet auf diese Anregung mit seinen individuellen Resonanzeigenschaften. Seine Resonanzeigenschaften bestimmen den Klangcharakter. Stellt man die Frage nach dem Klang der Geige, so ist es also hilfreich, Kenntnisse über deren Resonanzeigenschaften zu gewinnen.

Unter Resonanzeigenschaften verste-

hen wir die Beschaffenheit der vielen Resonanzen oder Eigenschwingungen des Instrumentes. Die Eigenschwingungen haben unterschiedliche Frequenzen und Schwingungsformen. Die Eigenschwingungsformen werden als *Moden* bezeichnet. Anhand der Modalanalyse lassen sich diese Moden identifizieren und sichtbar darstellen. Die Modalanalyse ist ein Werkzeug, das mit Hilfe eines Computers die Resonanzeigenschaften beliebiger mechanischer Strukturen sichtbar macht (wie etwa der Schnellmesser ein Werkzeug ist, das die Stärken der Ausarbeitung sichtbar macht). Durch die Modalanalyse läßt sich somit erkennen, wie das Instrument schwingt, also Kenntnis über seine Funktion gewinnen (s. Teil II). Die Modalanalyse kann zu einem sinnvollen Werkzeug für den Geigenbauer werden, wenn er die Veränderungen des Schwingungsverhaltens beobachtet und durch gezielte Experimente während der Arbeitsgänge lernt, einzelne Resonanzen und deren Schwingungsformen gezielt zu beeinflussen (s. Teil III). Diese Methode gestattet es, den Klangcharakter bewußt zu gestalten und so etwas wie eine klangliche Maßarbeit zu verwirklichen – eine Arbeitsweise, die im Geigenbau natürlich nichts Neues ist, sondern im weitesten Sinne seit jeher angewandt wird.

Im Geigenbau bereits gängige Methoden der „Modalanalyse“

Klopföne als Kriterium für die Materialauswahl: Bereits beim Prüfen der Materialeigenschaften während der Holzauswahl wendet der Geigenbauer eine Form der Modalanalyse an: Wird das ungefugte Brettchen an bestimmten Punkten festgehalten und an anderen Stellen mit dem Finger angeklopft, so werden glöckchenartig charakteristi-



FREQUENCY AND DAMPING					
MODE NO.	FREQUENCY		DAMPING		
	HZ	R/S	%	HZ	R/S
1	275.000	1.728 K	3.515	9.673	60.775
2	375.000	2.356 K	825.257 m	3.085	19.445
3	412.500	2.592 K	2.673	11.031	68.311
4	425.000	2.670 K	1.317	5.598	35.160
5	512.500	3.220 K	2.584	13.245	83.222

LARGEST MODE USED: 5

sche Töne (die Eigenfrequenzen) des Brettchens hörbar. Diese einfache Form der Modalanalyse gestattet bereits wesentliche Rückschlüsse auf die Tonholztauglichkeit des verwendeten Holzes, sofern man bewußt auf die Frequenz² und die Nachklingzeit der hörbar gemachten Eigentöne achtet. Die Tonhöhe gibt ein Maß für das Verhältnis von Steifigkeit und Masse an. Ein steifes und zugleich leichtes Holz hat einen hohen Eigenton. Genau das ist es, was der Instrumentenmacher vom Material verlangt: Es soll möglichst leicht sein, denn dann kann es leichter zum Schwingen gebracht werden, und es soll möglichst steif sein, damit es die Schwingungen nicht „abfedert“, sondern eine möglichst große Fläche von der Schwingungsbewegung erfährt. Haben die Holzbrettchen gleiche Abmessungen, so kann das Holz mit dem höheren Eigenton später dünner ausgearbeitet werden. Es hat damit also eine geringere Masse und somit bessere Schwingungseigenschaften. Außerdem wird man gewöhnlich das Brettchen mit der längeren Nachklingzeit wählen, weil hier die inneren

Abb. 1 (links): Übertragungsfunktion, wie sie auf dem Computerbildschirm erscheint. Deutlich sind die Eigenfrequenzen des Instruments als Spitzen erkennbar. – Abb. 2: Frequenz- und Dämpfungstabelle des Analysators; hier: die ersten fünf Eigenfrequenzen einer Geige von J. B. Guadagnini

Reibungsverluste geringer sind (vgl. H. A. Müller 1986). Eine andere Methode, mit Hilfe einer einfachen Klanganalyse mechanische Eigenschaften – in diesem Fall der Stimmstöcke – zu überprüfen, besteht darin, verschiedene identisch gefertigte Stimmstock-Rohlinge, welche dieselben Abmessungen haben, fallen zu lassen und die Tonhöhen beim Aufschlagen auf die Tischplatte zu vergleichen. Es wird dabei der Eigenton der ersten Biegeschwingung hörbar. Je höher er ist, desto größer ist die Biegesteifigkeit des Stimmstockes. Die Tonhöhe verhält sich proportional zur Schallgeschwindigkeit bzw. proportional zur Wurzel der Steifigkeit. Das heißt, daß ein Stimmstock, dessen Eigenton um einen musikalischen Halbton höher ist, was gleichbedeutend ist mit einer 6%

höheren Frequenz, eine um 6% höhere Schallgeschwindigkeit bzw. um knapp 13% höhere Steifigkeit hat. Beträgt der Frequenzunterschied eine kleine Terz, was je nach Material und Spaltgenauigkeit durchaus gewöhnlich ist, so ist seine Schallgeschwindigkeit um 18% höher, seine Steifigkeit gar knapp 40% (!) größer (gleiche Masse der beiden Stimmstöcke jeweils vorausgesetzt). Er wird die Schwingungen wesentlich besser übertragen, als der Stimmstock mit dem tieferen Eigenton und wird diesem in der Regel überlegen sein.

Glasröhrchen als Hilfsmittel für die Abstimmung: Eine von Fuhr um die Jahrhundertwende bekannt gemachte Methode ermöglicht bereits eine einfache Modalanalyse am fertigen Instrument. Dazu setzt man lediglich ein dünnwandiges, ca. 15 cm langes Kapillarglasröhrchen an verschiedenen Punkten des Korpus' auf und rutscht mit den leicht befeuchteten Fingern an ihm entlang in Richtung Instrument. Die dabei hörbaren Quietschtöne sind die Eigentöne des Instrumentes. Sie sind, je nach Anregungspunkt (Abstand vom Schwingungsbauch), mehr oder wenig gut hörbar. Diese einfache, aber um so wirkungsvollere Methode ermöglicht bereits ein Abstimmen der verschiedenen Resonanzen des fertigen Instrumentes, ferner ein Vergleichen zwischen verschiedenen Instrumenten und ein Überwachen möglicher Veränderungen am Instrument im Laufe der Zeit.

Chladnische Klangfiguren als Kriterium für die Ausarbeitung: Durch Carleen M. Hutchins gewann die Methode der Plattenabstimmung mittels der sog. Chladnischen Klangfiguren stark an Popularität in Geigenbauwerkstätten. Dabei werden die Platten während des Ausarbeitens immer wieder mit Pulver bestreut und durch einen Lautsprecher, der von einem Sinusgenerator angetrie-

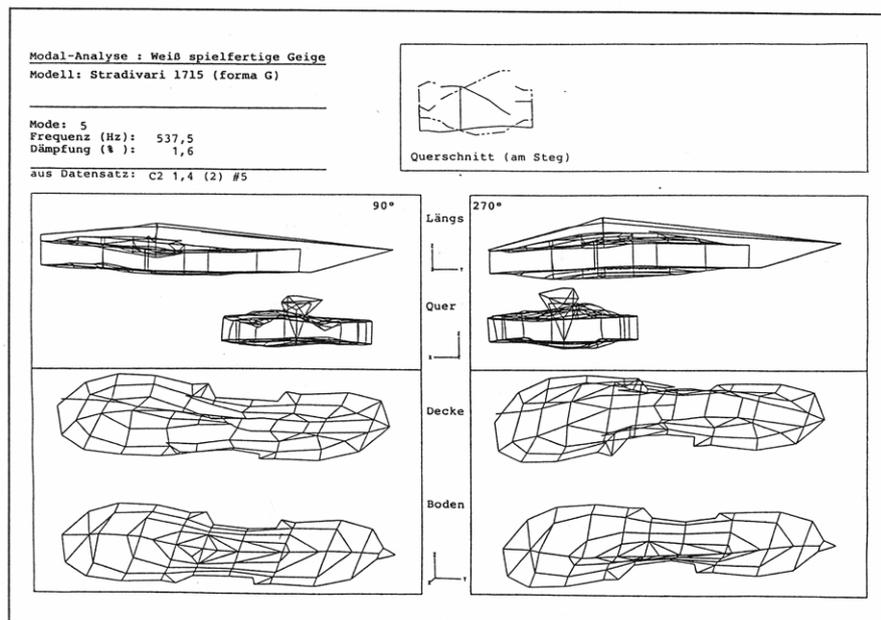


Abb. 3: Eigenschwingungsform bei 537 Hz; beim jeweiligen Schwingungsmaximum (links/rechts) „eingefroren“; hier: typische Hauptkorpusresonanz

ben und unterhalb der auf Schaumstoffstützen gelagerten Platten positioniert wird, zu Schwingungen angeregt (s. Hutchins 1978). In den Resonanzfrequenzen der Platte gerät das Pulver stark in Bewegung. Entlang der Knotenlinien bleibt es liegen, während die Bestäubung von allen bewegten Stellen weggeschleudert wird. So zeichnen sich die Eigenschwingungsformen der freien Platte ab³. Die Interpretation der dabei gewonnenen Ergebnisse provoziert in der Fachwelt deutliche Meinungsverschiedenheiten. Vielfach werden Thesen aufgestellt bezüglich „idealer musikalischer Intervalle“ zwischen den einzelnen Moden oder zwischen Boden und Decke – oder etwa bezüglich idealer Formen, welche die Knotenlinien einnehmen sollen. Die Methode ist insofern umstritten, als das fertige Instrument völlig anderen Bedingungen unterliegt als die freien Platten. Es bilden sich daher in Frequenz und Form völlig andere Eigenschwingungsformen heraus als bei den schwach gedämpften freien Platten. Dennoch hat diese Methode einiges für sich: Da die Eigenfrequenzen (Eigentöne) der freien Plattenschwingungen von der Masse und der Nachgiebigkeit der Platten abhängen, beinhalten die Eigenfrequenzen und deren Schwingungsformen eine quantitative Aussage über die Masse-Steife-Verteilung der Platten. Die Verteilung der Masse und Steifigkeit ist eine Folge der Materialauswahl, der Wölbungsform, der Ausarbeitung und anderer bauweisebedingter Kriterien. Die Masse-Steife-Verteilung ist aber ebenso für die Ausbildung der Eigenschwingungsformen des fertigen Instrumentes und damit für dessen Klangcharakter verantwortlich. Insofern kann das Ausarbeiten nach Eigentönen dem Geigenbauer eine zusätzliche Information liefern. Bei ent-

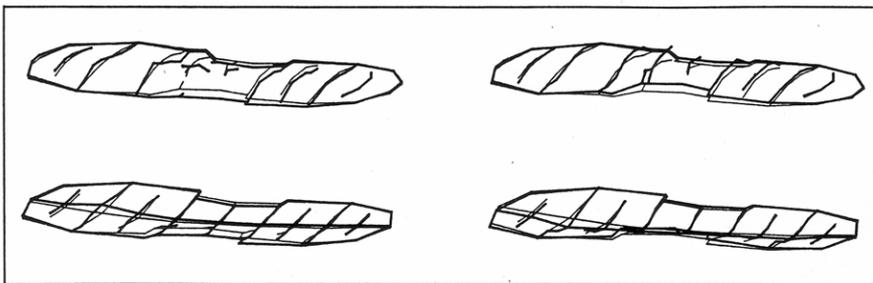


Abb. 4: Typische Hauptkorpusresonanz einer Geige von J. B. Guadagnini bei 512 Hz. Oben: Decke, unten: Boden. Dünne Linie: Ruhelage, dicke Linie: Auslenkung. Links und rechts jeweils gegenphasiges Schwingungsmaximum

sprechender Erfahrung läßt sich dadurch der Klangcharakter eher vorher-sagen und bewußter gestalten. Ein Erfahrungsaustausch über Konstruktion und Plattenabstimmungen im Werdegang mit anschließendem gemeinsamen Hörvergleich der fertigen Instrumente würde die Klangkunst des Neubaues sicherlich fördern.

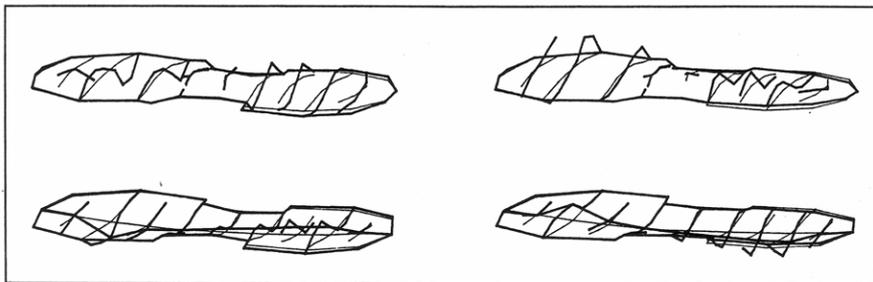


Abb. 5: Plattenresonanz einer Geige von J. B. Guadagnini bei 900 Hz. Oben: Decke, unten: Boden. Dünne Linie: Ruhelage, dicke Linie: Auslenkung. Links und rechts jeweils gegenphasiges Schwingungsmaximum

Wie diese Methoden zeigen, ist die „Modalanalyse“ für den Geigenbauer an sich nichts grundsätzlich Neues, al-

lerdings haben die beschriebenen Beispiele ihre Grenzen:

- Genaugenommen handelt es sich, wie etwa beim Anklopfen, zunächst nur um eine Frequenzanalyse, d. h. die Vorstellung über die dazugehörige Schwingungsform bleibt vage.
- Das Erkennen von Schwingungsformen mittels Chladnischer Klangfiguren ist lediglich bei einfachen, schwach bedämpften Strukturen möglich, nicht aber am fertigen Instrument.

Wie aber bereits ausgeführt, ist das

Schwingungsverhalten des fertigen Instrumentes von eigentlichem Interesse. Die Modalanalyse im engeren Sinn ist hierfür eine elegante Methode.

Die Methode der Modalanalyse

Physikalisches Prinzip: Das Meßprinzip der Modalanalyse basiert auf einer

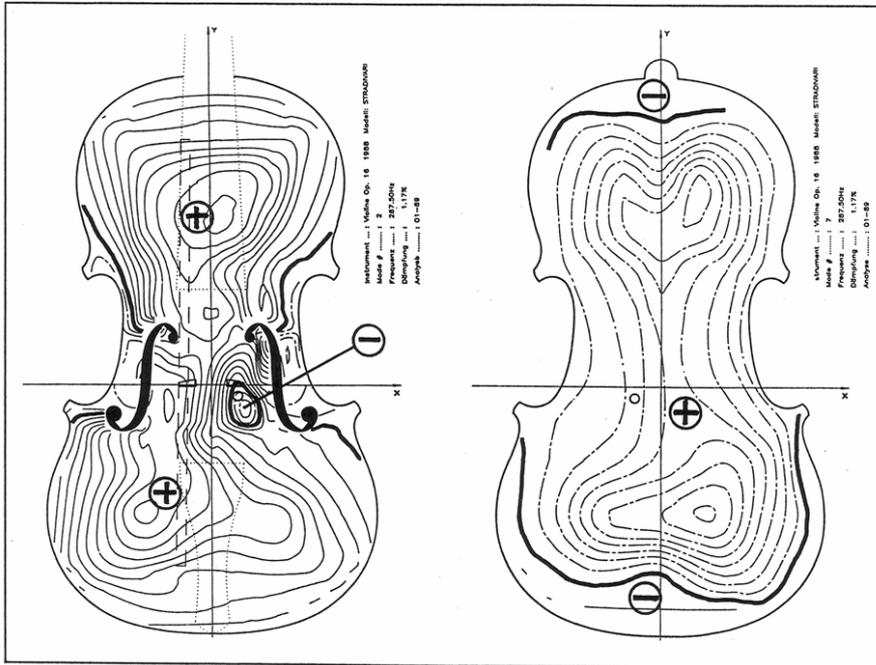


Abb. 6: Amplitudenlinien. Hier: Schwingungsform der Helmholtzresonanz bei 287 Hz einer weiß spielfertigen Geige (links: Decke, rechts: Boden)

physikalischen Gesetzmäßigkeit, die wir bereits bei dem angeklopften Holzbrettchen kennengelernt haben: Eine Struktur, die durch einen Impuls, z. B. ein kurzes Klopfen, angeregt wird, reagiert auf diese Anregung mit ihren Eigenschwingungen⁵. Genau diese Eigenschwingungen sind es, die analysiert werden sollen, denn sie bestimmen den Klang des Instrumentes. Das Prinzip der Modalanalyse lautet also ganz einfach: Klopfe einen Körper an einer Stelle an und messe, wie er an einer anderen Stelle schwingt⁶.

Geometrie: Der Computer weiß natürlich nicht, wie eine Geige aussieht.

Daher wird über das gesamte Instrument ein räumliches Koordinatensystem gedacht, mit dessen Hilfe die Geometrie der Geige festgelegt wird. Dazu wird eine Vielzahl von Punkten in eine Koordinaten-Tabelle des Rechners eingeschrieben. Die Punkte werden sinnvoll miteinander verbunden, so daß spinnwebähnlich das räumliche Bild einer Geige entsteht. Die Koordinatenpunkte geben gleichzeitig diejenigen Stellen an, an denen anschließend die Messungen durchgeführt werden. In unserem Fall wurden 208 Meßpunkte festgelegt, die, je nach Freiheitsgrad, in einer, zwei oder drei Raumrichtungen angeregt wurden. Um das Schwingungsverhalten des gesamten Instrumentes in all seinen Eigenschwingungsformen erfassen zu können, um also

eine vollständige Modalanalyse vornehmen zu können, muß an jedem Meßpunkt eine eigene Messung erfolgen. Zur Verbesserung der Meßgenauigkeit wird jede Messung mehrmals durchgeführt, um das Ergebnis anschließend zu mitteln.

Messung: Zur Messung mittels Impulsanregung erforderlich ist ein kleines Impuls-Hämmerchen, in dessen Kopf ein Kraftaufnehmer eingebaut ist. Somit läßt sich eine definierte Kraft in den Korpus einleiten. Außerdem ist ein Gerät notwendig, mit dem die Schwingungsantwort der Struktur gemessen werden kann, in unserem Fall ein 1 Gramm schwerer piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer. Die Fotografien 1 und 2 zeigen den Meßaufbau sowie Beschleunigungsaufnehmer und Hammer. Beide Signale werden nun nach Fourier analysiert: Der Computer berechnet, aus welchen sinusförmigen Teilschwingungen sich das zeitlich abklingende Impulsantwortsignal zusammensetzt. Dieses Verfahren beruht auf einem mathematischen Theorem, das J. B. Fourier (1760–1830) formuliert hat und wird nach ihm als Fourier-Analyse benannt. Bei der Fourier-Analyse benannt. Bei der Fourier-Analyse wird eine Zeitfunktion in eine Frequenzfunktion⁸ umgewandelt. Man erhält ein Frequenzspektrum. Der Analysator wird entsprechend FFT-Analysator genannt (Fast-Fourier-Transformation). Der Analysator bildet das Verhältnis von Impuls-Spektrum und Antwort-Spektrum, bzw. das Verhältnis von Kraft und Beschleunigung für jede gewünschte Frequenz: die sog. Übertragungsfunktion. Beispiel einer solchen Übertragungsfunktion – hier an einer Geige von J. Guadagnini – zeigt Abb. 1. Führt bei einer bestimmten Frequenz eine kleine Kraft zu einer relativ dazu großen Auslenkung, so liegt bei dieser Frequenz eine Resonanzfrequenz vor, die im Spektrum als Spitze erscheint. Diese Resonanzspitzen sind in Abb. 1 deutlich zu erkennen. Hier wurden vom Analysator also als Teilschwingungen im Antwortsignal Eigenschwingungen des Korpus entdeckt: verschiedene Resonanzen. Jede dieser Resonanzen hat ihre eigene Schwingungsform, wie wir es bereits von den Chladnischen Klangfiguren kennen, d. h. sie hat Bereiche, wo sie in Ruhe bleibt (Knotenlinien) und Bereiche maximaler Auslenkung aus der Ruhelage (Schwingungsbäuche). Verschiebt man nun die Meßstelle, so verändert sich die Stärke des Antwortsignals. Je nach Schwingungsform erhält man mit zunehmender Annäherung an eine Knotenlinie kleinere Amplituden⁹, im Bereich eines Schwingungsbauches große Amplituden. Daraus ist

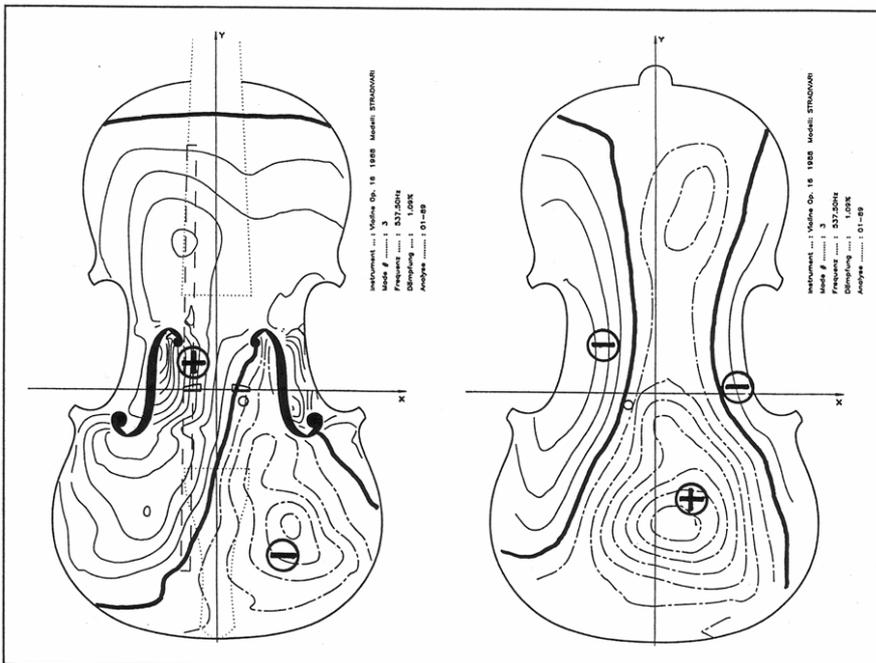


Abb. 7: Amplitudenlinien. Hier: Schwingungsform der typischen Hauptkorpusresonanz bei 537 Hz einer weiß spielfertigen Geige (links: Decke, rechts: Boden)

ersichtlich, daß die Schwingungsamplituden des Geigenkorpus abhängig sind, sowohl von der Frequenz (liegt sie in der Nähe der Eigenfrequenz einer Mode?), als auch vom jeweiligen räumlichen Punkt (ist er in der Nähe eines Schwingungsbauches?).

Theoretisch leitet man an einem definierten Punkt mit dem Hammer einen kurzen Impuls in den Korpus ein und mißt gleichzeitig an allen anderen Punkten relativ zur eingeleiteten Kraft die Schwingungsantwort. Praktisch jedoch erfolgen die Messungen nacheinander¹⁰, werden abgespeichert und später zur Auswertung wieder eingelesen. Außerdem erfolgen die Messungen entsprechend dem Reziprozitätsgesetz¹¹ in unserem Fall derart, daß die Beschleunigung (Antwortsignal) an einem festen Punkt, dem sog. Driving-point, gemessen und die Struktur nacheinander in allen Meßpunkten mit dem Hammerimpuls angeregt wird¹².

Es erwies sich für eine realistische Messung als ein entscheidendes Kriterium, daß die Richtung der Beschleunigungsmessung in Richtung der tatsächlichen Bogenstrichsrichtung erfolgt. Andernfalls werden Moden gemessen und ausgewertet, die im „Betriebszustand spielen“, gar nicht oder nicht in dem Maß angeregt werden (Position des Aufnehmers s. Foto 2).

Auswertung: Die abgespeicherten Übertragungsfunktionen aller Meßpunkte werden nach Beendigung der Messungen vom Rechner eingelesen. Sie enthalten die charakteristischen Resonanzspitzen. Die Resonanzen, die nun ausgewertet werden sollen, werden dem Analysator in eine Frequenz- und Dämpfungstabelle (Abb. 2) eingeschrieben. Anschließend ermittelt der Rechner für jeden Meßpunkt Schwingungsamplituden und Phasen¹³ der entsprechenden Resonanzen.

Darstellung:

(1) Bewegungsbilder:

Aus diesen real gemessenen Daten hat der Rechner nun genügend Informationen, um die im Bildschirm abgebildete Geige ähnlich einem Zeichentrickfilm schwingen zu lassen. Es werden deren tatsächliche Bewegungen in Zeitlupe und mit übertrieben großen Verformungen sichtbar gemacht. Diese „Bewegungsbilder“ schulen das Vorstellungsvermögen und das Gefühl für das Schwingungsverhalten des Instrumentes. Sie wirken zunächst sehr beeindruckend. Abb. 3 und 5 zeigen solche „Bewegungsbilder“, die als Ausdruck für diesen Artikel bei maximaler Auslenkung jeweils „eingefroren“ wurden. Abb. 3 zeigt einige Darstellungsmöglichkeiten. Das Instrument läßt sich aus jeder gewünschten Perspektive schwin-

gend auf dem Bildschirm betrachten. Auch die Darstellung einzelner Schnitte (z. B. Querschnitt am Steg) hilft, die jeweilige Schwingungsform zu veranschaulichen. Ebenso lassen sich Decke, Boden oder beliebige andere Bereiche in ihrem Schwingungsverhalten am fertigen Instrument einzeln abbilden. Abb. 4 und 5 zeigen Decke und Boden in den maximalen Auslenkungen der jeweiligen Eigenschwingungsform aus der Ruhelage. Abb. 4 stellt die typische Hauptkorpusresonanz einer Geige von J. Guadagnini bei 513 Hz dar und Abb. 5 eine der Plattenresonanzen derselben Geige bei 900 Hz. Derartige Einzeldarstellungen ermöglichen zwar eine differenzierte Auswertung, um jedoch konkrete bauweisebedingte Veränderungen im Neubau vornehmen und überwachen zu können, hat sich diese Darstellungsart als zu ungenau erwiesen.

(2) Höhenlinien:

Eine für diese Anwendung geeignetere Darstellung zeigen Abb. 6 und 7. Es handelt sich dabei um von einem rechnergesteuerten Plotter ausgezeichnete „Höhenlinienbilder“. Jede Höhenlinie stellte jeweils für jede Mode extra all diejenigen Punkte dar, die bezüglich der Ruhelage dieselbe maximale Auslenkung haben. Vergleichbar sind sie mit den Höhenlinien einer Landkarte, die ebenso all diejenigen Punkte mar-

kieren, die bezüglich eines bestimmten Niveaus dieselbe Höhe haben. Da die maximale Auslenkung einer Schwingung aus der Ruhelage als *Amplitude* bezeichnet wird, handelt es sich beim Höhenlinienbild genauer gesagt um ein Amplitudenlinienbild¹⁴. Die „Höhenlinien“ sind also Linien gleicher Amplituden. Sie charakterisieren in ihrer jeweiligen Form, Anzahl und Verteilung, die jeweilige Mode. Die Amplitudenlinien (Abb. 6 und 7) zeigen also die Schwingungsformen des Instrumentes bei der jeweiligen Frequenz. Die dicken Linien bezeichnen die Knotenlinien, also diejenigen Bereiche, die in Ruhe bleiben. Die durchgezogenen Linien bezeichnen die Schwingungsamplituden in die eine Richtung, die gestrichelten Linien bezeichnen die Schwingungsamplituden in die andere (gegenphasige) Richtung. Das Instrument muß aufgeklappt gedacht werden, das heißt, Decke und Boden werden beide von außen betrachtet. Wenn also (etwa in Abb. 6) die gesamte Decke, mit Ausnahme einer kleinen Insel um den Stimmstock, aus durchgezogenen Linien und der gesamte Boden aus gestrichelten Linien besteht, so heißt dies, daß sich die Decke bei dieser Mode entsprechend der Amplitudenlinien nach oben bewegt, während sich gleichzeitig der Boden nach unten bewegt. Beide schwingen hier also gleichzeitig nach außen und anschließend gleichzeitig nach innen. Die nach außen schwingenden Bereiche sind zusätzlich mit einem „+“, die nach innen schwingenden Bereiche mit einem „-“ gekennzeichnet. Man vergleiche hinsichtlich der unterschiedlichen Darstellungsarten das „eingefrorene“ Bewegungsbild Abb. 3 mit dem Amplitudenlinienbild Abb. 7. Beide wurden aus denselben modalen Daten erzeugt, stellen also exakt dieselbe Mode dar. Es handelt sich in diesem Fall um die typische Hauptkorpusresonanz einer durchschnittlichen weißen neuen Geige¹⁵. □

Literatur

Hutchins, C. M.: Checking Eigenmodes of Free Violin Plates During Instrument Construction. In: Hutchins, C. M. (Hrsg.): *Acoustics for the Violin Maker*, Catgut Acoustical Society, Montclair 1978, New Jersey, S. 23.

Müller, H. A.: How the violin maker chooses the wood and what the procedure means from a physical point of view. *Catgut Acoustical Society Symposium 1986*.

Müller, H. A.: Kleine Einführung in die Modalanalyse. Unveröffentlichter Vortrag, VDG-Jahreshauptversammlung, Bamberg 1991.

Müller, H. A.: Skriptum zum Physikunterricht an der Geigenbauschule Mittenwald (unveröffentlicht).

Roederer, J. G.: *Physikalische und psychoakustische Grundlagen der Musik*. Berlin 1977.

Anmerkungen

- 1) Dies führte mein Lehrer, der Physiker Helmut A. Müller, in seinem Vortrag „Kleine Einführung in die physikalische Forschung im Geigenbau“, gehalten auf der Jahreshauptversammlung des VDG, Bamberg 1991, ausführlich aus.
- 2) Die Frequenz f gibt die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde an und wird in Hertz (Einheitszeichen: Hz) gemessen; sie ist ein Maß für die musikalische Tonhöhe.
- 3) E. E. F. Chladni (1756–1827) hat solche Schwingungsbilder seinerzeit mit feinem Sand oder Lycopodiumpulver (Bärlappsporen) auf schwingenden Platten und Membranen sichtbar gemacht.
- 4) Experimente, bei denen die Platten auf einen starren Stahlrahmen mit Zargenhöhe geklemmt wurden, zeigten, daß die Randbedingungen der Platten im spielfertigen Zustand, also auf den Zargenkranz aufgeleimt, weder als frei, noch viel weniger als starr angesehen werden können. Ebenso aufgrund des eingeklemmten Stimmstocks, der Saitenspan-

nung und des Stegdruckes unterliegt das fertige Instrument anderen Bedingungen.

- 5) Der angeregte Körper (etwa ein angeklopftes Glas) führt dabei *freie* Schwingungen aus. Die Frequenz dieser Schwingung hängt bei geringer Dämpfung nur von der Masse und der Nachgiebigkeit ab.
- 6) Andere Meßmethoden (für schwere Strukturen), so etwa die Anregung mittels Shaker und eingeleitetem Rauschen, sollen hier nicht weiter ausgeführt werden.
- 7) Schwingungsausschlag in Abhängigkeit von der Zeit („Ausschwingung“).
- 8) Schwingungsausschlag in Abhängigkeit von der Frequenz (sog. Spektrum)
- 9) Die Amplitude ist die maximale Auslenkung einer Schwingung (Scheitelwert).
- 10) Die große Zahl der Beschleunigungsaufnehmer wäre zu teuer und würde im Falle des Geigenkorpus durch ihre große Gesamtmasse das Meßergebnis erheblich verfälschen.
- 11) Vertauschbarkeit von Ursache und Wirkung: Die in Punkt B gemessene Antwort durch die Anregung in A ist ebenso groß, wie sie in Punkt A sein würde, wenn dieselbe Anregung in B stattfände.
- 12) Dadurch wird eine Beschädigung des Lackes vermieden, der durch das ständige Versetzen des Beschleunigungsaufnehmers in Mitleidenschaft gezogen würde.
- 13) Die Phase bezeichnet den Zustand der momentanen Auslenkung. Im Resonanzfall handelt es sich um eine stehende Welle. Es gibt dann nur zwei Phasenzustände, nämlich „gleichphasig“ (alle Teilchen, die gleichzeitig in die gleiche Richtung wie die Anregung schwingen, also z. B. alles nach innen) und „gegenphasig“ (alle Teilchen, die gleichzeitig genau entgegen der Richtung der Anregung schwingen, also z. B. alles nach außen).
- 14) Diese Bilder werden aus den modalen Daten mittels eines dafür im Hause Müller-BBM von Herrn Dipl.-Ing. Hans Meissner geschriebenen Interpolationsprogrammes erzeugt.
- 15) Vgl. zu Methoden der Modalanalyse den ausführlichen und allgemeinverständlichen Forschungsbericht der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig 1991.