

Die Modalanalyse als akustisches Werkzeug im Geigenbau

Martin Schleske, Geigenbaumeister und Dipl.-Physik-Ing. (FH)
Meisteratelier für Geigenbau, Georg-Hellmair-Platz 382, 86899 Landsberg am Lech, Germany

Zusammenfassung

Die Modalanalyse ist ein faszinierendes akustisches Werkzeug zu Erforschung der individuellen Schwingungsformen von Geigen. Indem das individuelle Schwingungsverhalten sichtbar wird, werden die historischen Altmeister dem heutigen Geigenbau zu lebendigen Quellen der Inspiration.

Ein Werkzeug der akustischen Forschung des Meisterateliers für Geigenbau Martin Schleske ist die Modalanalyse. Sie erlaubt es, den individuellen akustischen Fingerabdruck außergewöhnlicher Instrumente zu erfassen.



Abb. 1: Modalanalyse einer Cellodecke im Werdegang. Der mit Linearkugellagern und Wegaufnehmern ausgestattete Koordinatenmesstisch dient der exakten Messpunktebestimmung.

ERFORSCHUNG DER PRIMÄRFUNKTION

Ursprünglich kommt diese Methode aus der Luft- und Raumfahrt. Erste Anwendungen waren damals etwa die Schwingungsanalysen von Flugzeugtragflächen oder Satelliten. Während heute bei vielen technischen Anwendungen (z.B. im Fahrzeugbau)

das Schwingungsverhalten der Struktur nur eine untergeordnete Funktion darstellt, verhält es bei der Geige anders: Das Zusammenspiel sämtlicher Eigenschwingungen bestimmt die Klangfarben, die Ansprache, die Tragfähigkeit, die Dynamik – und damit die Primärfunktion des Instrumentes.

IN WELCHEM ZUSTAND WIRD DIE ANALYSE DURCHGEFÜHRT?

Prinzipiell können die Eigenschwingungen der Struktur in beliebigen Fertigungszuständen analysiert werden.

Es spielt für die Anwendung der Modalanalyse keine Rolle, ob das Instrument im spielfertigen Zustand (mit aufgezogenen Saiten) oder im Werdegang (z.B. die freie Decke, mit und ohne Bassbalken) analysiert wird.

Bei Restaurationen und bei der Neuanfertigung werden im Meisteratelier für Geigenbau Martin Schleske häufig einzelne Fertigungszustände in ihrem Schwingungsverhalten analysiert, denn die freien Platten weisen andere Eigenschwingungen auf als das fertige Instrument.



Abb. 2: Modalanalyse einer Cellodecke von Antonio Stradivari. Überprüfen des neuen Bassbalkens.

Die Analyse der Eigenschwingungen des weißen Instrumentes ist äußerst hilfreich, um anhand des Resonanzprofils (der sog. Übertragungsfunktion) den Klang des werdenden Instrumentes abschätzen zu

können. So lässt sich etwa während der Ausarbeitung von Decke und Boden durch Analyse der entstehenden Eigenfrequenzen verlässlicher einschätzen, wann ein klangliches Idealmaß der Masse-Steifigkeits-Verteilung erreicht ist.



Abb. 3: Ansicht auf den Messplatz zur Modalanalyse von Streichinstrumenten.

WIE FUNKTIONIERT DIE MODALANALYSE?

Im Meisteratelier für Geigenbau Martin Schleske wird das Instrument mit Hilfe eines kleinen Impulsgebers an ca. 600 Messpunkten angeregt. Die Schwingungsantwort wird durch einen Miniatursensor aufgezeichnet.



Abb. 4: Modalanalyse einer Violine von Antonio Stradivari aus dem Jahr 1731.

Die Signale des Impulsgebers und des Aufnahmesensors werden mit einem sog. Fourier-Analysator weiterverarbeitet. Für jeden Messpunkt wird eine sog. Übertragungsfunktion berechnet. Ein Beispiel dafür ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Für die vollständige Modalanalyse einer Geige werden in allen Raumrichtungen die Übertragungsfunktionen jeweils an unterschiedlichen Koordinatenpunkten gemessen.

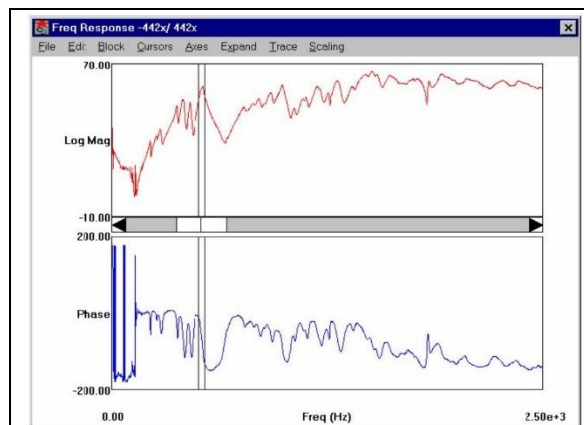


Abb. 5: Übertragungsfunktion einer Geige. Aufgetragen ist das Verhältnis von Schwingungsantwort zu anregender Kraft als Funktion der Frequenz. Oben: Schwingungspegel (log. Mag.), unten: Phase.

Die Messpunkte werden mit Hilfe eines auf Linearwellen kugelgelagerten Koordinatenmesstisches ermittelt und an den Computer übertragen. Weist das Instrument bei einer bestimmten Frequenz eine starke „dynamische Beweglichkeit“ auf, so genügt bereits eine geringe anregende Kraft, um eine große Schwingungsantwort hervorzurufen.

Somit berechnet der Computer für die Kurve der Übertragungsfunktion an dieser Frequenz einen entsprechend hohen Wert. Die Resonanzen erscheinen als lokale Maximalwerte bzw. werden als „Resonanzspitzen“ sichtbar.

Anschließend werden aus sämtlichen gemessenen Übertragungsfunktionen die Eigenschwingungsformen des Instrumentes errechnet. Nachfolgend ist die Oberfläche des Modalanalyse-Programms dargestellt. Geöffnet sind Fenster für Einzelmessungen, Definition von Koordinaten und Gitternetzlinien, sowie Drahtgitter-Modell.

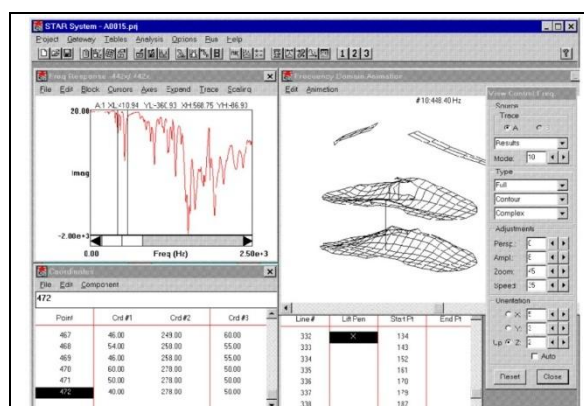


Abb. 6: Oberfläche des Modalanalyse-Programms zur Auswertung der Messungen, Geometriedefinition, sowie Berechnung und Darstellung der Schwingungsformen.

Als Ergebnis der Geometriedefinition und der Schwingungsmessungen werden nun die Schwingungsformen durch eine Drahtgitter-Animation in Zeitlupendarstellung auf dem Monitor sichtbar gemacht.

AKUSTIKEXPERTISEN

Bei der Erstellung von Akustikexpertisen wird das Instrument stets im spielfertigen Zustand untersucht. Es müssen dabei nicht zwingend Änderungen des Instrumentes vorgenommen werden. Im Meisteratelier für Geigenbau Martin Schleske wird die Modalanalyse als ein die Intuition ergänzendes Diagnosewerkzeug bei der Klangeinstellung und dem Neubau von Streichinstrumenten eingesetzt.

ERGEBNISSE

Eine gute Geige weist über 80 spezifische Eigenschwingungen in ihrem Spielbereich auf. Jede Eigenmode ist durch charakteristische Schwingungsbäuche gekennzeichnet, an denen sie Maximalauschläge hat und Knotenlinien, an denen sie in Ruhe bleibt.

Die Ergebnisse der experimentellen Modalanalyse lassen sich wahlweise als „Schwingungslandkarten“ oder durch Bildschirmanimation darstellen. Indem die Modalanalyse die Eigenschwingungsformen (sog. Moden) sichtbar macht, entsteht ein grundsätzliches Verständnis für die Resonanzen des Instrumentes. Damit wird der Klang des Instrumentes nicht nur hörbar, vielmehr wird dessen Ursache sichtbar. So wächst ein intuitives Empfinden für die klangbestimmenden Schritte im Werdegang des Instrumentes – etwa die Formgebung der Wölbung, die Ausarbeitung, oder die Gestaltung des Bassbalkens.

Es handelt sich bei den Schwingungsbewegungen nicht um eine numerische Simulation, sondern um das gemessene Schwingungsverhalten des tatsächlichen Instrumentes. Die Amplituden werden stark vergrößert, die Schwingungsfrequenz stark verlangsamt dargestellt.

Die dynamischen Animationen zeigen die Eigenschwingungen einer Geige am Beispiel eines Instruments von Antonio Stradivari aus dem Jahre 1712. Es stellt sich eine beeindruckend hohe Modendichte von über 65 Resonanzen im Frequenzbereich bis 2000 Hz heraus. Vier der typischen Korpusresonanzen dieses Instrumentes sind in der nachfolgenden Abbildung als „Schwingungslandkarten“ (jeweils links) und als Drahtgitter bei maximalen Auslenkung überlagert mit der Ruhelage (jeweils rechts) dargestellt:

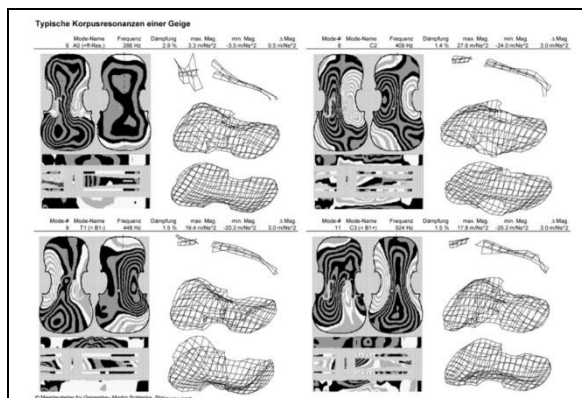


Abb. 7: Die typischen Eigenschwingungsformen der Korpusresonanzen. Messung mittels experimenteller Modalanalyse (595 Übertragungsfunktionen). Darstellung durch „Schwingungslandkarten“: Interpolation und Höhenlinienplot mit Linien gleich Amplituden (Höhenlinien). Ansicht der Platten von außen. Phasenkonvention:

Als gleichphasig gelten gleichzeitig expandierende (schwarz-grau) bzw. gleichzeitig komprimierende (weiß-grau) Korpusbereiche. Knotenlinien entsprechend zwischen schwarzer und weißer Höhenlinie. Jeweils links Decke, rechts Boden, darunter Zargen der Bassbalkenseite, Seitenansichten und Draufsicht von Saitenhalter und Griffbrett, Zargen der Stimmstockseite. Drahtgitter und Animation: Jeweils Saitenhalter und Griffbrett (oben), Decke (Mitte), Boden (unten). Nulllage und maximale Auslenkung. Instrument: A0015: Stradivari 1712 "Schreiber".

INDIVIDUELLE AKUSTISCHE EIGENSCHAFTEN EINES MEISTERS ODER EINER SCHULE

Unsere Modalanalysen an verschiedensten Geigen von Antonio Stradivari zeigen, dass eine deutliche Übereinstimmung in der Ausbildung wesentlicher Korpusresonanzen erkennbar ist.

Frequenzintervalle und Kopplungen zwischen den Moden sind auffallend ähnlich. Im Gegensatz dazu ist etwa das Frequenzintervall zwischen den beiden Hauptkorpusresonanzen (T1 und B1) bei Guarneri del Gesù wesentlich größer. Die Kenntnis solcher und ähnlicher akustischer Merkmale verschiedener Meister oder Schulen ist eine hilfreiche Ergänzung zur traditionellen, rein stilistischen und konstruktiven Beschreibung von Streichinstrumenten. Für die gezielte klangliche Arbeit im Neubau hochwertiger Streichinstrumente ist die Kenntnis der für einen Meister typischen akustischen Eigenschaften eine wesentliche Leitlinie.

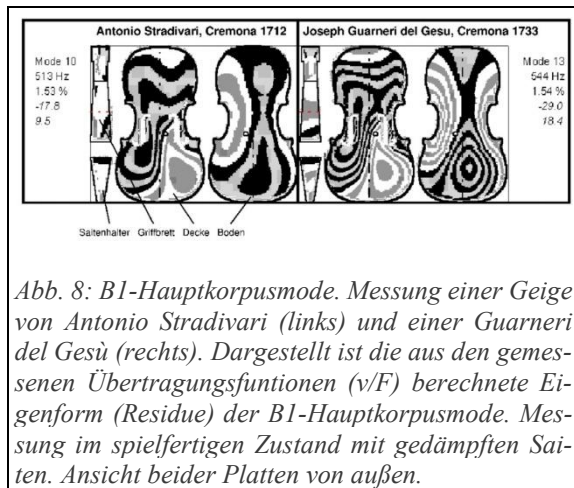


Abb. 8: B1-Hauptkorpusmode. Messung einer Geige von Antonio Stradivari (links) und einer Guarneri del Gesù (rechts). Dargestellt ist die aus den gemessenen Übertragungsfunktionen (v/F) berechnete Eigenform (Residue) der B1-Hauptkorpusmode. Messung im spielfertigen Zustand mit gedämpften Saiten. Ansicht beider Platten von außen.

INTERPRETATION

Die Schwingungsform der B1-Mode ist bei beiden Geigen relativ ähnlich ausgebildet. Die Guarneri del Gesù weist hier jedoch stärkere Korpusamplituden auf, bei der Stradivari hingegen koppelt die B1-Mode mit einer Griffbrett-Torsion, weshalb die B1-Mode in zwei wirksam strahlende Moden (bei 512 und 523 Hz) aufgespalten ist.

Die Dämpfung der B1-Mode ist bei beiden Geigen sehr ähnlich (Stradivari 1.53%; Guarneri 1.54%). Dies ist ein hilfreiches Kontrollmaß für die akustische Wirkung des verwendeten Geigenlackes.

Die Eigenfrequenz dieser Schwingungsmode beider Geigen ist mit 512 Hz (Stradivari) und 544 Hz (Guarneri del Gesù) relativ unterschiedlich. Diese Eigenfrequenz ist eine wirksame Richtschnur für die Klangfarbe des Instrumentes, denn die B1-Mode kann als eine Art „modales Barometer“ für die Konstruktion des Instrumentes erachtet werden.

Technische Details zu den Abbildungen: Linienabstand = $5(\text{Hz} \cdot \text{m}) / (s \cdot N)$. Der Linienabstand ist definiert als Abstand zwischen je zwei benachbarten gleichartigen Höhenlinien (die Amplituden werden also in Absolutwerten dargestellt.) Phasenkonvention: Jeweils expandierende bzw. komprimierende Plattenbereiche des Korpus‘ gelten als gleichphasig und sind entsprechend mit gleichartigem Raster (also grau-weiß oder grau-schwarz) dargestellt.

Bezeichnung neben den Eigenformen: Mode-#; Frequenz (Hz); Dämpfung (%); max. neg. Residue-Mag; max. pos. Residue-Mag. ($\text{Hz} \cdot \text{m}) / (s \cdot N)$.

FEHLERDIAGNOSE AN VORLIEGENDEN PROBLEMINSTRUMENTEN

Durch Messung einer Vielzahl unterschiedlicher Instrumente entstand in unserm Labor eine umfangreiche Datenbank der typischen akustischen und konstruktiven Eigenschaften von Geigen, Bratschen und Violoncelli.

Durch Kenntnis derjenigen Schwingungseigenschaften, die sich für gute Instrumente als typisch erweisen, stellt die Modalanalyse an Probleminstrumenten ein wirkungsvolles Diagnosewerkzeug dar. Indem modale Anomalitäten (etwa in der Verteilung der Schwingungsamplituden charakteristischer Moden) sichtbar werden, lassen sich Rückschlüsse auf konstruktive oder einstellungsbedingte Mängel (Stimmstock, Steg, etc.) schließen.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Schönheit der Modalanalyse besteht im Grunde darin, dass sie es möglich macht, den großen alten Meistern über die Schulter zu schauen. So werden die altitalienischen Vorbilder wie Stradivari, Montagnana, Guadagnini oder Guarneri zu inspirierenden Lehrern meiner täglichen Werkstattarbeit.

Der akustische Fingerabdruck dieser großen Meister zeigt eine Genialität, die ein bleibender Ansporn und eine unbestechliche Prüfung meines eigenen Schaffens und Lernens ist. Dennoch stehe ich ihnen nicht unterwürfig gegenüber. Auch wenn es in meinen Anfangsjahren reizvoll war, mithilfe akustischer Werkzeuge Klangkopien berühmter Instrumente zu fertigen und dazu die Resonanzprofile der großen Meisters detailliert zu erforschen, habe ich im Laufe der Jahre meine eigene künstlerische und klangliche Handschrift entwickelt.

ZUR VERTIEFUNG

Schleske, Martin: Eigenmodes of Vibration in the Working Process of a Violin. CAS Journal Vol.3, No.1, (Series II), May 1996.

Schleske, Martin: Empirical Tools in Contemporary Violin Making: Part I. Analysis of Design, Materials, Varnish and Normal Modes. CAS Journal Vol. 4, No.5 (Series II), May 2000.