

Optimierung von Gitarren mittels Modalanalyse

Gunter Ziegenhals

Vortrag auf dem 4. Seminar des FAMA in der DEGA, 20.10.-21.10.1995 Klingenthal/Zwota
Institut für Musikinstrumentenbau an der TU Dresden, post@ifm-zwota.de (veröffentlicht September 2011)

Einleitung

Dieser Artikel beruht auf einem Vortrag, gehalten auf dem 4. Seminar des Fachausschusses Musikalische Akustik (FAMA) in der DEGA am 20. und 21.10.1995 Klingenthal/Zwota. Derartige Seminare führt der Fachausschuss seit Beginn der 1990er Jahre in lockerer Folge durch. Um möglichst viele Vortragende, insbesondere auch aus den Reihen von Industrie und Handwerk zu gewinnen, wird meist auf die Bitte um Einreichung eines Vortragsmanuskriptes für einen Tagungsband verzichtet. So auch zu diesem Seminar. Nach doch recht langer Zeit entschlossen wir uns, den Vortrag nunmehr auch in schriftlicher Form vorzulegen. Auf die Einbindung späterer, ggf. auch widersprüchlicher eigener Erkenntnisse wurde hierbei bewusst verzichtet!

Problemstellung

Die Musikinstrumentenindustrie ist in Deutschland ein relativ kleiner Zweig. Es existieren ca. 1500 Firmen (Industrie und Handwerk) mit etwa 12000 Beschäftigten. Entsprechend ist die Innovationskraft oft nicht ausreichend, eigene spezielle Entwicklungssysteme zu schaffen. Vielmehr wird immer wieder nach Möglichkeiten gesucht, Lösungen anderer Bereiche mit verhältnismäßig geringem Aufwand auf die Belange der Musikinstrumentenindustrie zu übertragen. Ein sehr schönes Beispiel dafür stellt die Nutzung der Modalanalyse im Musikinstrumentenbau dar. Sie hielt in der zweiten Hälfte der 1980er Jahre Einzug in die Methoden der Musikinstrumentenforscher. Obwohl bereits in früheren Arbeiten die Anwendung der vollständigen Modalanalyse erwähnt wird, beginnt die breite Anwendung im Musikinstrumentenbau mit den Arbeiten im Labor für Musikalische Akustik an der PTB Braunschweig Ende der 1980er Jahre. Für eine Vielzahl von Anwendungen wurde die Nützlichkeit und Brauchbarkeit der Methodik bewiesen. Während diese Arbeiten sich vorrangig der Anpassung des Verfahrens und der Verbesserung des Verständnisses der Funktion der Instrumente widmeten, konzentrierte sich SCHLEBKE (1992) bereits auf die Ableitung praktischer Folgerungen für den Geigenbau. Im Falle der Gitarre als Komplettinstrument lagen zum Zeitpunkt der Projektvorbereitung noch keine systematischen Untersuchungen zur Anwendung der Modalanalyse, mit dem Ziel der Vorhersage positiver Veränderungen insbesondere an Serieninstrumenten vor. Die Idee zum Projekt geht auf E. MEINEL zurück, der diese im Ergebnis seiner Untersuchungen an Gitarrenhälsen (MEINEL 1992) ableitete. Die Vorbereitung und Durchführung des Projektes oblag dann dem Autor.

Der Grundgedanke des Projektes lag darin, an einer Stichprobe von vier Instrumenten im Ergebnis von Frequenzkurvenmessungen und einer ersten Modalanalysemessreihe konstruktive Veränderungen (hier Änderung von Teilen der Beleistung) vorzuschlagen, diese auszuführen und das Ergebnis anhand von messtechnischen Analysen und Bewertungen durch Musiker und Zuhörer zu überprüfen. Neben den Modalanalysen umfasste das Projekt deshalb auch eine Vielzahl von Aktivitäten zur Bewertung der Frequenzkurve sowie

zu Methodik und Ergebnissen von Hör- und Spieltests. Letzteres diskutierte der Autor in zwei Beiträgen auf der DAGA (ZIEGENHALS 2005 und 2006). Der Frequenzkurve und daraus abzuleitender Merkmale widmete sich ein zweiter Vortrag von ZIEGENHALS auf dem Seminar 1995 (Dieser Vortrag befasst sich mit Frequenzkurvenanalysen und subjektiven Tests an Gitarren. Insbesondere ging es um die Auswahl von Frequenzkurvenmerkmalen, die die Bewertung durch Spieler und Hörer gut widerspiegeln. Wie bereits eingangs begründet, wurde auch für diesen Vortrag keine schriftliche Fassung angefertigt. Auf eine nachträgliche Veröffentlichung des Vortrages wird verzichtet, da der Inhalt in deutlich erweiterter Form in Ziegenhals, G.: Subjektive und objektive Beurteilung von Musikinstrumenten. Eine Untersuchung anhand von Fallstudien, Dissertation TU Dresden 2010, Studententexte zur Sprachkommunikation Band 51 TUDpress 2010, ISBN 978-3-941298-71-2, sehr ausführlich behandelt wird.). Im Folgenden werden nur die in Zusammenhang mit den Modalanalysen stehenden Aspekte betrachtet.

Bemerkung: Nicht zuletzt aufgrund der angeführten Veröffentlichungen konnte die Methodik der Modalanalyse den Seminarteilnehmern als bekannt vorausgesetzt werden. Deshalb und in Anbetracht der für die Vorträge veranschlagten Zeit wurde auf eine Darlegung der Grundlagen der Modalanalyse verzichtet.

Untersuchungsobjekte

Für die Arbeiten zum Projekt wurden 10 Instrumente aus dem Fundus des IfM ausgewählt. Sie bildeten die Hauptgruppe der untersuchten Instrumente:

- Referenz 1: Japanisches Industrieinstrument, welches in früheren Tests stets sehr gut beurteilt wurde.
- Referenz 2: Vogtländisches Meisterinstrument mit im Verhältnis größerem Korpus.
- Referenz 3: Versuchsmuster aus dem IfM mit ovalem Schallloch (Weißinstrument).
- Referenz 4: Japanisches Industrieinstrument, welches in früheren Untersuchungen stets mittelmäßig beurteilt wurde.
- Referenz 5: Finnische Industriegitarre mit im Verhältnis größerem Korpus, und auffallend dunkler Klangfärbung. Die Urteile früherer Tests waren sehr differenziert.
- Modell 1 ... 4: Versuchsmuster (Weißinstrumente) aus dem Bestand des IfM; für den Umbau vorgesehen.
- Modell 5: Älteres Industrieinstrument aus dem Bestand des IfM, auffallend dicke Lackierung, in früheren Tests sehr schlecht beurteilt. Als Reserve für den Umbau vorgesehen.

Die Referenzinstrumente sollten als Vergleichsgruppe zur Beurteilung der Wirkung der Umbauten dienen. Zusätzlich zu diesen fünf Instrumenten wurden im Zeitraum der Projektbearbeitung gewonnene Messdaten von 73 weiteren Konzertgitarren einbezogen.

Einführende Modalanalysen

Für die Erstellung der Modalanalysen fand das System STAR der Fa. SMS in der PC Version 4.1. Verwendung. Das der Modalanalyse zu Grunde gelegte Gitternetzmodell der Gitarre bestand aus 33 Boden-, 24 Hals- und 201 Deckenpunkten. Abbildung 1 zeigt das Modell. Die Messungen erfolgten bei wandernder Impulshammererregung (PCB Miniaturimpulshammer 086C80) und festem Aufnehmerpunkt. Der Beschleunigungssensor (PCB 309A) war an Gitterpunkt 22, unterhalb des Stegs, mittels Wachs befestigt.

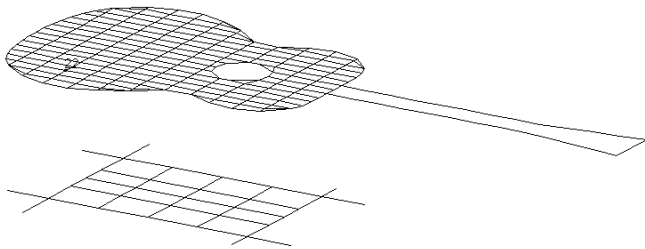


Abbildung 1: Gitternetzmodell für die Modalanalyse

In der Strukturdynamik insbesondere bei FEM Anwendungen geht man davon aus, dass mindestens 10 Stützstellen zur Beschreibung pro Wellenlänge einer Schwingung notwendig sind. Das absolute (theoretische) Minimum sind vier Stützstellen pro sinusförmiger Wellenperiode. Geht man mit diesen Überlegungen an die Betrachtung der Schwingungsbilder von Gitarrendecken in FLETCHER 1991 (aufgenommen mit holografischem Verfahren), so kommt man zu dem Schluss, dass mit dem gewählten Modellraster modalanalytische Untersuchungen über 800 Hz nicht mehr sinnvoll sind. Die Frequenzauflösung wurde auf 1 Hz eingestellt.

Von allen 10 Instrumenten der Hauptinstrumentengruppe erstellten wir vollständige Modalanalysen. Neben Listen mit Frequenz und Dämpfung der einzelnen Moden liefert STAR Computeranimationen der Schwingungsformen anhand des Drahtmodells.

Für alle Instrumente wurde das gleiche Modell verwendet. Da die Instrumente in ihren Abmessungen differieren, entsteht für einige Instrumente eine geometrische Differenz zwischen Instrument und Modell. Für die reine Modalanalyse ergibt sich daraus kein Fehler, da das Drahtmodell nur der Visualisierung der Ergebnisse dient. Erst bei Modellmanipulationen wirken sich diese Fehler aus, da Wirkungen von Zusatzmassen, Zusatzleisten u.a. anhand der Geometriedaten berechnet werden. Das Modell war jedoch an die baugleichen, für den Umbau vorgesehenen Instrumente Modell 1...4 angepasst. Da nur an diesen Instrumenten Manipulationen berechnet wurden, ergab sich also kein Fehler.

Auswahl der zu manipulierenden Merkmale

Im gewählten Frequenzbereich der Modalanalyse weist die Frequenzkurve der Gitarre typischerweise drei markante Hauptresonanzen auf, bei ca. 100 Hz, bei ca. 200 Hz und bei ca. 400 Hz. Die Wirkung der drei Resonanzen findet sich im Verlauf von Lautstärke (repräsentiert durch $L(A,F)_{\max}$) und Klangdauer (repräsentiert durch die Verweilzeit T des Schallsignals im Bereich von 40 dB unterhalb des Anschlagmaximums) für eine chromatische

Einzeltonreihe deutlich wieder (Abbildung 2). Im Bereich von Resonanzen steigt $L(A,F)_{\max}$ deutlich aber T geht zurück. Das ist völlig verständlich, da bei hoher Abstrahlung die beim Anzupfen eingetragene Energie schnell verbraucht ist. Die Ursprünge der ersten beiden Peaks wurden erstmals von MEYER (1974) gefunden. Sie gehen auf die sogenannte Helmholtzresonanz, einer Kombination aus Hohlraum- und Korpussschwingung bzw. die erste Deckenresonanz zurück. Die aus der Modalanalyse gewonnenen Schwingungsbilder der beiden Moden (Abbildung 3) ähneln sich stark und variieren von Instrument zu Instrument praktisch nicht.

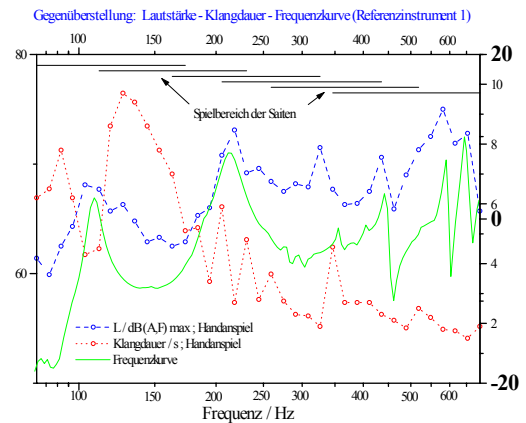


Abbildung 2: Frequenzkurve sowie $L(A,F)_{\max}$ und T im Bereich bis 700 Hz

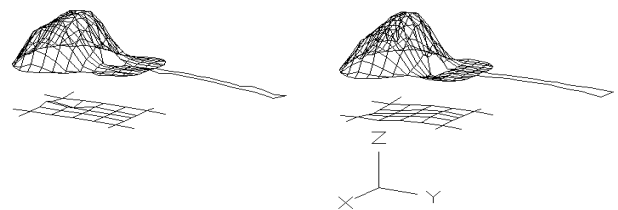


Abbildung 3: Schwingungsbild der Modalanalyse für die Helmholtzresonanz (links) und die erste Deckenresonanz (rechts) einer Gitarre

Vergleiche der Resonanzen der Frequenzkurve und die im Ergebnis der Modalanalyse gefundenen Modenfrequenzen ermöglichen eine recht gute Zuordnung der Moden zu den Resonanzen. So findet man, dass die für die dritte Resonanz verantwortlichen Moden im Gegensatz zu den für die ersten beiden Resonanzen zuständigen Moden deutliche Unterschiede aufweisen (Abbildung 4).

Neben den Frequenzkurvenmessungen und Modalanalysen führten wir mit den Instrumenten zunächst auch verschiedene Spiel- und Hörtests durch. Im Ergebnis zeigte es sich, dass die für den Umbau vorgesehenen Modelle zu den eher schlecht beurteilten Instrumenten gehörten. Eine Ausnahme bildete das Instrument Modell 3. Einen deutlichen Spitzenplatz nimmt Referenzinstrument 2 ein. Die schlechten Bewertungen zeigten sich u. a. auch in den Merkmalen der dritten Resonanz der Frequenzkurve. Es lag also nahe, die Manipulationen auf Veränderungen an der entsprechenden Mode zu konzentrieren. D. h. die Veränderungen zielen auf die positive Veränderung der Merkmale der dritten Resonanz der Frequenzkurve. Hauptziel ist, ihre Abstrahlung zu erhöhen.

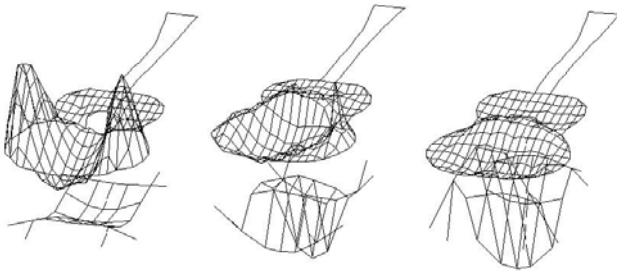


Abbildung 4: Für die dritte Resonanz der Frequenzkurve verantwortliche Moden dreier Gitarren

Berechnung der Manipulationen

Die Drahtmodelle der Modalanalyse liefern oft nur als animierte Bilder anschauliche Ergebnisse. Wir stellen deshalb im Folgenden die Ergebnisse in vereinfachter Form dar. Abbildung 5 zeigt eine solche vereinfachte Form für das Ergebnis der Modalanalyse an Referenzinstrument 2 für die dritte Deckenmode, die verantwortlich ist für die dritte Resonanz der Frequenzkurve.

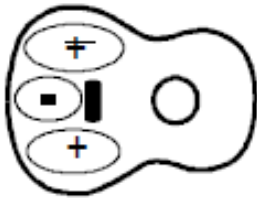


Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung der Schwingungsform der Mode der dritten Hauptresonanz, Referenzinstrument 2

Gleichphasige Schwingungsbereiche sind mit gleichen Vorzeichen versehen. Gleichphasigkeit bedeutet, dass die Bereiche gleichzeitig nach außen bzw. gleichzeitig nach innen schwingen.

Abbildung 6 zeigt nun in vereinfachter Form die Moden der dritten Resonanz. Neben den Modenfrequenzen sind auch die Frequenzen der Frequenzkurvenresonanzen angegeben. Vergleicht man die Formen der Moden um 400 Hz insbesondere im Vergleich zu dem Spitzeninstrument Referenz 3, so erkennt man, dass bei Referenz 2 die Mode viel unsymmetrischer ausgeprägt ist. Asymmetrie der Mode, bedingt eine bessere Abstrahlung, da der Effekt des akustischen Kurzschlusses verringert wird. Bei eher symmetrischen Schwingungsformen schwingen etwa gleich große Flächen gegeneinander. Hierdurch wird die Abstrahlung nicht begünstigt, da akustische Kurzschlüsse entstehen, ähnlich dem Phänomen gegenphasig angeschlossener Lautsprecherboxen. Streng trifft dies aber nur für Modell 1 und 2 zu. Modell 3 hat ausgeprägte Asymmetrien in der Mode um 400 Hz, wird aber andererseits auch sehr gut bewertet. Modell 4 weist Asymmetrien und trotzdem schlechte Merkmalswerte auf.

Nummehr wurden Manipulationen mit Hilfe der entsprechenden Funktion im System STAR berechnet. Die ersten Versuche betrafen Modell 1 und 2. Die Strategie bestand in der Zerstörung der Symmetrie der Mode um 400 Hz. Die Manipulation geschah am Computer derartig, dass mit dem Modul STRUC Zusatzleisten im Computermodell simuliert wurden. Den Leisten wurden folgende Materialdaten (Fichte) zugeordnet

- $E = 11,5 \text{ GPa}$
- $\rho = 450 \text{ kg/m}^3$.

Die Leisten im Berechnungsmodell waren als Rechteckbalken ausgeführt. Die Modellrechnungen zeigten, dass recht dicke und hohe Leisten (5 mm x 15 mm) notwendig sind, um überhaupt deutliche Veränderungen zu erreichen. Nach etlichen Versuchen, wurden letztlich Varianten mit je einer Zusatzleiste gefunden, die die gewünschten Asymmetrien in Hauptmode 3 einbringen ohne aber die ersten beiden wichtigen Hauptmoden (um 100 Hz und um 200 Hz) wesentlich zu verändern.

Modell 1

Modenfrequenz 426 Hz

3. Peakfrequenz Frequenzkurve
414 Hz

Modell 2

Modenfrequenz 406 Hz

3. Peakfrequenz Frequenzkurve
397 Hz

Modell 3

Modenfrequenz 412 Hz

3. Peakfrequenz Frequenzkurve
414 Hz

Modell 4

Modenfrequenz 413 Hz

3. Peakfrequenz Frequenzkurve
414 Hz

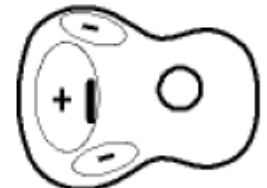
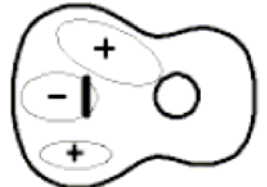
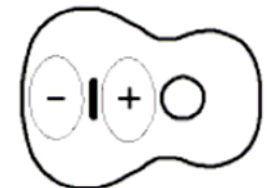
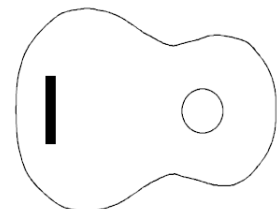


Abbildung 6: Modenformen und Frequenzen der dritten Frequenzkurvenresonanz der Modelle 1 bis 4 im Ausgangszustand

Abbildung 7 zeigt Lage und Abmessungen der Zusatzleisten für Modell 1 und 2. Die Leisten wurden auch beim späteren Umbau eckig und nicht mit schräg auslaufenden Enden, wie im Gitarrenbau üblich, hergestellt, um nahe am Modell zu bleiben. In Abbildung 7 wird von außen auf die Decke geblickt.

Modell 1

Dicke: 5mm
Höhe 15 mm
Länge: 120 mm



Modell 2

Dicke: 5mm
Höhe 20 mm
Länge: 270 mm

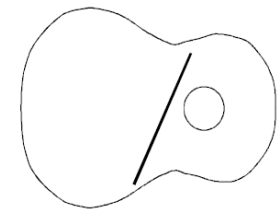


Abbildung 7: Lage und Abmessungen der berechneten Zusatzleiste für Modell 1 und 2

Ein Problem gab uns Modell 3 auf. Es wurde gut beurteilt und zeigte auch unsymmetrische Moden wo sie erwartet werden. Zudem wies das Instrument eine auffällige Deckenwölbung auf. Wir vermuteten eine besondere Beleistung oder eine extrem ausgearbeitete Decke. Die Wölbung führte ursprünglich auch zur Auswahl des Instrumentes für die Untersuchungen. Da keine Ansatzpunkte für eine Verbesserung aufgefunden wurden, entschlossen wir uns das Instrument zunächst zu öffnen und dann zu entscheiden. Als Ursache für die extreme Wölbung stellte sich eine gebrochene Leiste heraus, die offenbar auch für den guten Klangeindruck verantwortlich zeichnet. Wir einigten uns die gebrochene Leiste zu reparieren und die Reparatur am Computermodell nachzustellen.

Modell 4, Variante 2

Modenfrequenz 364 Hz

Kein Peak in Frequenzkurve

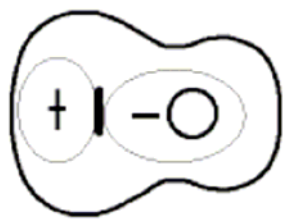
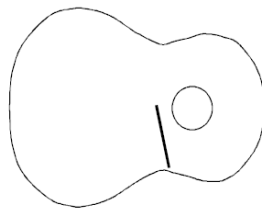


Abbildung 8: Modenformen der alternativ gewählten Quelle der (hier fehlenden) dritten Hauptresonanz der Frequenzkurve, Modell 4

Bei Modell 4 identifizierten wir zunächst eine Mode bei 413 Hz (Abbildung 6) und einen entsprechenden Peak in der Frequenzkurve als gesuchtes Paar der dritten Deckenmode. Die Mode erfüllt nun die Asymmetrieforderung liefert aber schlechte Merkmalswerte. Wir kamen zu dem Schluss, dass die eigentliche dritte Deckenmode bei 364 Hz liegt, aber wegen der Symmetrie nicht abgestrahlt (Abbildung 8), die dritte Hauptresonanz der Frequenzkurve also fehlt. Es wurden deshalb Veränderungen durchgeführt, die die Frequenz der Mode anheben und gleichzeitig die Symmetrie zerstören. Das beste Ergebnis zeigte eine Kombination von zwei Zusatzleisten, die schließlich gewählt wurde. Abbildung 9 stellt die im Ergebnis der Berechnungen ausgewählten Manipulationen der Modelle 3 und 4 dar.

Modell 3

Lage der reparierten Leiste



Modell 4

2 Leisten
Dicke: 4mm
Höhe 10 mm
Länge: 75 mm

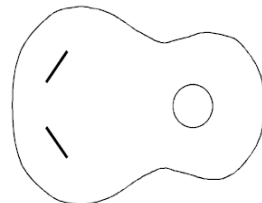


Abbildung 9: Lage und Abmessungen der reparierten Leiste bzw. der berechneten Zusatzleisten für Modell 3 und 4

Ergebnisse der Manipulationen

Die Umbauten führte ein versierter Gitarrenbaumeister aus der Region aus. Vorsichtig löste er den Boden durch Abfräsen des Zargenrandes ab, setzte die Zusatzleisten ein und verschloss den Boden sorgfältig. Kreuzen die Zusatzleisten bereits vorhandene Leisten so wurden die Zusatzleisten passend ausgespart. Da die Zusatzleisten wesentlich größere Querschnitte als die vorhandenen

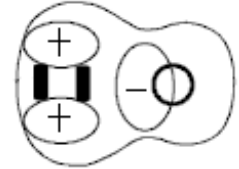
aufweisen und die Ausparungen mit den vorhandenen Leisten fest verklebt, quasi aufgefüllt werden, sollte der Fehler gegenüber der Modellrechnung gering bleiben. Alle Zusatzleisten weisen stehende Jahrringe auf.

Abbildung 10 stellt berechnete und nach dem Umbau gemessene Modenfrequenzen und Formen der Modelle 1 und 2 gegenüber.

Modell 1

Modellrechnung

Modenfrequenz 418 Hz



Messung nach Umbau

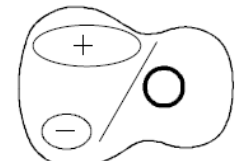
Modenfrequenz 412 Hz



Modell 2

Modellrechnung

Modenfrequenz 405 Hz



Messung nach Umbau

Modenfrequenz 408 Hz

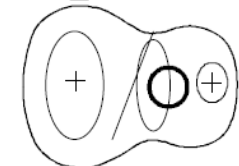


Abbildung 10: Modenformen und Frequenzen der dritten Frequenzkurvenresonanz der Modelle 1 und 2 entsprechend des geplanten Umbaus berechnet und nach Umbau gemessen

Abbildung 11 bis Abbildung 14 zeigen vergleichend die Frequenzkurven vor und nach dem Umbau. Betrachtet man zunächst die Messergebnisse im Überblick fallen folgende Fakten ins Auge:

- Die Unterschiede in den Frequenzkurven sind deutlich.
- Berechnete und gemessene Modenfrequenzen stimmen recht gut überein.
- Berechnete und gemessene Modenformen liegen deutlich auseinander.

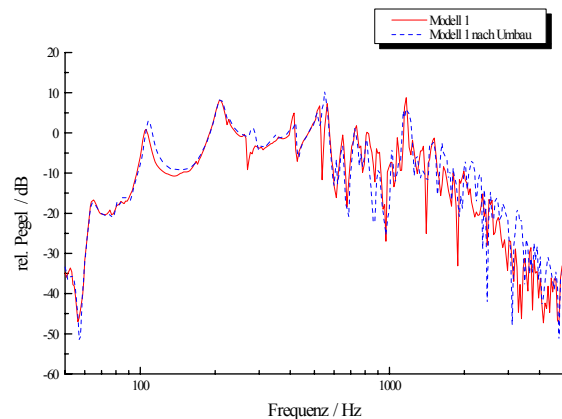


Abbildung 11: Frequenzkurven vor und nach Umbau im Vergleich, Modell 1

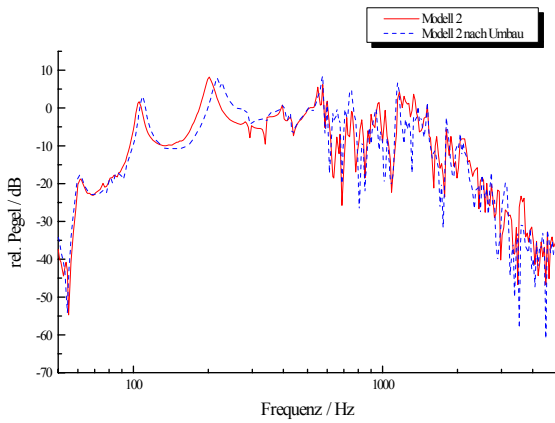


Abbildung 12: Frequenzkurven vor und nach Umbau im Vergleich, Modell 2

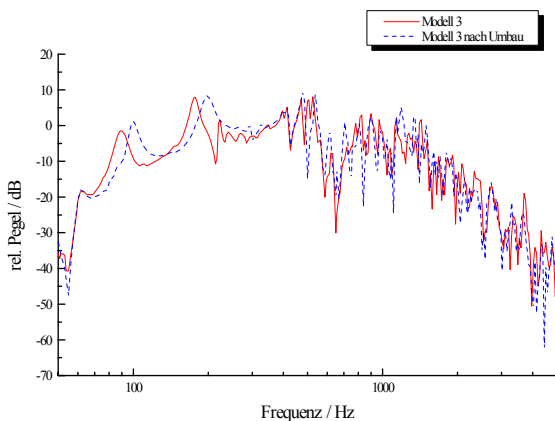


Abbildung 13: Frequenzkurven vor und nach Umbau im Vergleich, Modell 3

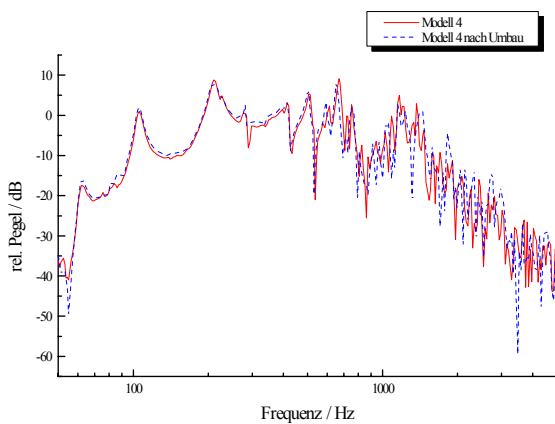


Abbildung 14: Frequenzkurven vor und nach Umbau im Vergleich, Modell 4

Wir wollen nun im Folgenden die Ergebnisse für die vier umgebauten Modelle diskutieren. Neben Berechnung und Messung gehen auch nach dem Umbau durchgeführte subjektive Tests ein.

Modell 1

Die Rechnung mit dem Computermodell zeigte für die Mode der dritten Resonanz infolge der vorgesehenen Zusatzleiste eine Störung der Symmetrie. Neben der Mode bei 400 Hz wird aber auch die Symmetrie der Mode um 370 Hz gestört, wodurch diese angehoben und an die 400 Hz Mode heran geschoben wird. Wir

versprochen uns davon insgesamt eine Verstärkung der dritten Resonanz.

Die verschiedenen Analysen nach dem Umbau zeigen, dass die Zusatzleiste sich wie vorgesehen praktisch nicht auf die Frequenzen der ersten beiden Resonanzen auswirkt. Hier stimmen Modalanalyse vor und nach dem Umbau, Prognoserechnung und Frequenzkurven in ihren Ergebnissen überein. Bzgl. der dritten Resonanz liefert die Frequenzkurve die Aussage, dass diese nach dem Umbau zwar wie vorgesehen verbreitert, und damit der Bereich um 400 Hz insgesamt angehoben wird, die 3. Resonanzspitze selbst jedoch an Pegel einbüßt. Die Modalanalyse weist nach, dass die Mode der dritten Resonanz tatsächlich in ihrer Symmetrie gestört ist, jedoch in anderer Form als die Ergebnisse der Modellrechnung vorhergesagen. Die Hauptanteile der deutlichen Verbesserung von Modell 1 beruhen auf Pegelgewinnen oberhalb 2 kHz. Hier wirkt die Zusatzleiste dosiert versteifend und hebt offensichtlich die Schwingfähigkeit der höheren Moden an. Dieser Bereich wurde aber von der Modalanalyse nicht erfasst und war somit auch nicht Gegenstand der Aktivitäten.

Modell 2

Die Moden der ersten beiden Frequenzkurvenhauptresonanzen werden infolge des Umbaus, wie hier als Nebeneffekt erwartet, in ihrer Frequenz deutlich angehoben. Die berechnete Frequenzerhöhung stimmt mit den Messwerten überein. Die Form der Moden bleibt unverändert. Die Frequenzerhöhung der ersten beiden Moden ist eigentlich unerwünscht. Gegenmaßnahmen wären aber möglich. Diese sind aber nicht in jedem Falle der Modellvariation zugänglich. Z.B. vergrößert eine Zargenerhöhung das im Korpus eingeschlossene Luftvolumen und senkt damit die Frequenz der Mode der ersten Resonanz ab. Eine Vergrößerung des Luftvolumens kann aber im vorliegenden System nicht nachgebildet werden.

Laut Modellrechnung wird die Symmetrie der 400 Hz-Mode erheblich gestört, ohne jedoch die Frequenz zu verändern. Die Frequenzkurvenmessung und eine erneute Modalanalyse bestätigen dies. Jedoch fällt die Symmetriestörung der Mode gering aus. Insgesamt erhöht sich die Abstrahlung im Bereich um 400 Hz. Dies führt zu verbesserten Werten der Merkmale. Wie bereits bei Modell 1 führt die versteifende Wirkung der Zusatzleiste zur Verbesserung der Abstrahlung ab 2 kHz. Modell 2 zeigt vollständige Übereinstimmung der über die Modellvariation vorhergesagten Veränderungen auf die Frequenzkurve. Dies stellt das gelungenste Experiment der Gesamtarbeit dar.

Modell 3

Wie erwartet hat sich nach dem Umbau (Reparatur) die Bewertung verschlechtert. Allerdings stellt Modell 3 dann noch ein gutes Instrument innerhalb der Stichprobe dar. Hauptursache für die schlechtere Bewertung ist das Ansteigen der Frequenzen der ersten und zweiten Hauptresonanz, welches negativ bewertet wird. Da die Resonanzen aber vor dem Umbau extrem niedrig lagen, sind die Werte auch nach dem Umbau noch gut bzw. befriedigend. Die Verschiebung der zweiten Resonanz nach oben führt andererseits zu einer Verstärkung der Abstrahlung in den Bereichen 200 Hz ... 800 Hz und 220 Hz ... 450 Hz. Dies führt hier zu einer Urteilsverbesserung. Die Verschiebung der Modenfrequenzen zeigt sich analog in der Computermodellvariation.

Frequenz und Pegel der dritten Resonanz werden praktisch nicht beeinflusst. Die Modenform jedoch zeigt ein etwas verändertes Bild, welches eigentlich auf eine "Symmetrierung" der Mode

hinweist. Interessant ist der Pegelrückgang im Bereich 2 kHz ... 5 kHz trotz einer eigentlich vorgenommenen Versteifung analog zu den Modellen 1 und 2.

Modell 4

Die beiden Zusatzleisten stellen die geringste Veränderung aller vier Modelle dar. Für die Mode der zweiten Resonanz überwiegt die Massewirkung der Zusatzleisten. Dadurch kommt es zu einer geringen Absenkung der Frequenz. Hauptresonanz 1 wird praktisch nicht beeinflusst. Die Abstrahlung der Mode der dritten Hauptresonanz wurde geringfügig verbessert, deren Frequenz nicht verändert, die Abstrahlung des Gesamtbereiches um 400 Hz um etwa 1 dB angehoben. Modell 4 verändert seine Bewertungsstellung innerhalb der Stichprobe im Ergebnis des Umbaus nicht. Die prognostizierten und schließlich auch gemessenen Veränderungen liegen durchweg im Fehlerbereich der Aussagen, was bei dem kleinen Eingriff nicht verwundert. Es wurde eine solche kleine Veränderung jedoch bewusst in das Projekt eingebaut, um die untere Grenze der Vorhersagesicherheit zu testen.

Diskussion

Die im vorangehenden Abschnitt geführte Diskussion verweist für die speziell betrachtete dritte Hauptresonanz der Frequenzkurve und die für diese verantwortliche Mode der Gitarre auf eine eher geringe Übereinstimmung zwischen Modellrechnung und gemessenem Resultat. Die Nichtübereinstimmung betrifft in erster Linie die berechnete Modenform, weniger die Modenfrequenzen. Aber gerade um die Modenform und ihre Wirkung auf die Abstrahlung ging es ja gerade. Für die ersten beiden Resonanzen sieht es hier deutlich besser aus. Hier liegt aber auch eine deutlich einfachere Modenform vor.

Obwohl die Ergebnisse nur in einem Fall wirklich den konkreten Erwartungen hinsichtlich der Mode zur dritten Hauptresonanz entsprachen, führte die Grundzielstellung der Störung von Schwingungssymmetrien tendenziell zu einer Verbesserung der Gesamtbewertung der Instrumente.

Die vorgenommenen Manipulationen stellen nun im Vergleich zu üblichen Diskussionen im Gitarrenbau in Bezug auf Feinheiten der Beleistung, auch hinsichtlich der beiden kleinen Leisten bei Modell 4, doch deutliche Eingriffe dar. Es ist nun für eine Gesamtbewertung der Versuche wichtig, die gemessenen Veränderungen an sich zu bewerten. Wie groß ist ihre Wirkung? Sind sie vielleicht zwar eindeutig (und reproduzierbar) messbar aber nicht wahrzunehmen? Für eine Antwort auf die letzte Frage fehlen Informationen zum Wahrnehmungsschwellwert von Änderungen in den Merkmalen. Als Alternative wählten wir einen Vergleich der Streuung der Frequenzkurvenmerkmale für vier Gitarrenstichproben mit den im Zusammenhang mit den Manipulationen an den vier Modellen festgestellten Veränderungen. Die vier Stichproben setzen sich wie folgt zusammen:

- STP1 – Es handelt sich um die eingangs bereits beschriebene Stichprobe von 10 Instrumenten.
- STP2 – 45 Instrumente der Preisklasse um 700,- DM und dazu drei deutlich teurere (R2000) und drei preiswerte Instrumente R200. Bei der Stichprobe handelt es sich um jeweils drei Exemplare eines Herstellermodells!
- STP3 – 6 Instrumente des gleichen Modells eines Herstellers

- STP4 – 16 Instrumente des gleichen Modells eines Herstellers jedoch mit sehr unterschiedlichen Deckenmaterialien.

Abbildung 15 gibt einen Einblick in die Streuung des hier zentral betrachteten Merkmals L_3 (Pegel der dritten Hauptresonanz) im Vergleich zur entstandenen Veränderung des Merkmals im Ergebnis der Manipulationen. Für die Modelle markiert der grüne Balkenbereich die Veränderung, sonst die Streubreite. Die Pfeile weisen auf die Richtung der Veränderung hin.

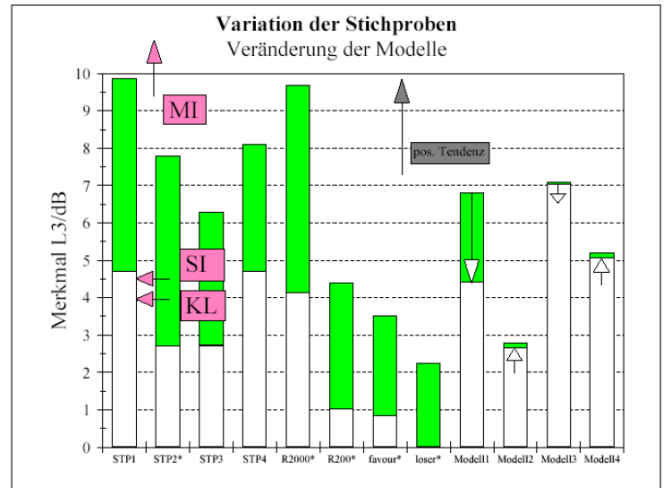


Abbildung 15: Variation des Merkmals L_3

Mit „favor“ und „loser“ wurden die in einem subjektiven Test innerhalb STP2 am besten bzw. am schlechtesten bewerteten Modelle bezeichnet. MI steht für ein Meisterinstrument, SI und KL repräsentieren zwei extrem billige Instrumente. Die hier für L_3 dargestellte Tendenz setzt sich im Wesentlichen auch in allen anderen betrachteten Merkmalen fort. Lediglich im Bereich höherer Frequenzen sind die Wirkungen der Manipulationen im Verhältnis etwas größer. Die Betrachtung der Serienstreuung liefert uns folgende Aussagen:

- Es ist zu erwarten, dass die vorgenommenen Manipulationen für eine Serie keine Wirkung zeigen, da sie offensichtlich weitestgehend in der Serienstreuung untergehen.
- Die Anwendung des Verfahrens zur Veränderung im Bereich „Nuancen“ ist offensichtlich nicht möglich. Deutliche Eingriffe in die Konstruktion sind notwendig, um sichere Trends zu erreichen.
- Eine ausgewogene Veränderung der Merkmale ist zweifellos nur in mehreren Verfahrensschritten zu erreichen. Bei Anwendung moderner Verfahren ist an dieser Stelle bei Instrumentenmachern eine gewisse Ungeduld zu verzeichnen.

Über das konkret beschriebene Projekt hinaus liefern die Analysen zwei weitere interessante Aussagen:

- Der Wertebereich von L_3 für die subjektiv sehr gut bewerteten Instrumente „favor“ aus STP2 ist ein Hinweis darauf, die Bedeutung des Merkmals L_3 nicht zu überschätzen. Andererseits bestätigte sich die generelle Aussage zum Gut-Trend des Merkmals.

- Teure Serieninstrumente sind offenbar kein Garant für gleiche Qualität. Obwohl sie im Mittel gut abschneiden ist die Gefahr, dass der (unerfahrene) Kunde ein Instrument erhält, das unter Umständen einige Kategorien schlechter ist, größer, als die Chance in einer billigen Serie ein gutes Instrument zu finden.
- Der Einfluss des (Decken-)Materials ist offenbar weitaus geringer als bisher angenommen (STP4).

Auf die letztere Folgerung hinweisende Beobachtungen wurden im IfM bereits 1982 gemacht, damals aber auf andere Einflüsse zurückgeführt. MEINEL bestimmte im Rahmen einer nicht veröffentlichten Arbeit die elastischen Eigenschaften von rund 50 Sperrholzdecken über Biegeversuche und ließ Serieninstrumente mit Decken sehr unterschiedlicher Eigenschaften komplettieren. Er stellte in Messungen praktisch keine Unterschiede fest, die mit den Deckeneigenschaften korrelierten. MEINEL führte das auf die schlechte Beherrschung der einheitlichen Qualität in der Serienproduktion zurück. Aus der Sicht unserer aktuellen Resultate und unter Berücksichtigung der weiterentwickelten Mess- und Auswertetechnik kann man diese Resultate jedoch zumindest als ein zweites Ergebnis dahingehend werten, dass der Materialeinfluss gegenüber Konstruktion und Herstellung deutlich zurücksteht.

Insgesamt kann man einschätzen, dass die Modalanalyse zweifellos ein wertvolles Hilfsmittel darstellt, die Vorgänge bei der Klangbildung der Gitarre (und anderer Saiteninstrumente) besser zu verstehen. Für den Einsatz als Entwicklungswerkzeug sollte man die Erwartungen, zumindest beim gegenwärtigen Entwicklungsstand, aber nicht zu hoch setzen.

Literatur

Fletcher; Rossing: The Physics of Musical Instruments, Springer-Verlag New York, Berlin, Heidelberg 1991

Jansson, E.; Meinel, E.: Zum Einfluß des Halses auf die Schwingungen des Gitarrenkorpus – Das Musikinstrument, Frankfurt/M. 41(1992)8, S.48-52

Meyer, J.: Die Abstimmung der Grundresonanzen von Gitarren Das Musikinstrument, 23(1974)2 S. 179-186

Meyer, J.: Akustik der Gitarre in Einzeldarstellungen – Verlag E. Bochinsky 1985

Schleßke, M.: Modalanalyse im Geigenbau - Vom praktischen Nutzen physikalischer Forschung im Musikinstrumentenbau – Das Musikinstrument, Frankfurt/M.; Teil I: Nr.2-3/1992 S. 98-106, Teil II: Nr. 6/1992 S. 10-14, Teil III: Nr. 7/1992 S. 58-61

Wogram, K.: Schwingungsuntersuchungen an Musikinstrumenten mit Hilfe der Modalanalyse – Instrumentenbau-Zeitschrift, Siegburg, Teil I: Nr. 1/1991 S.44-48, Teil II: Nr. 2-3/1991 S.115-125

Wogram, K.: Die Anwendung der Modalanalyse bei Musikinstrumenten – Instrumentenbau-Zeitschrift, Siegburg, Teil I: Nr. 5/1991 S. 58-63, Teil II: Nr. 6/1991 S. 36-40

Ziegenhals, G.: Vergleich von Hörtests aus Spieler- und Zuschauerperspektive – Fortschritte der Akustik DAGA '95

Ziegenhals, G.: Zur Beurteilung von Gitarren aus Spieler- und Zuschauerperspektive – Fortschritte der Akustik DAGA '96

Ein dieser Veröffentlichung zugrunde liegendes Forschungsprojekt wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft gefördert.