Referenzgitarren des IfM – Frequenzkurven, Moden, Anhängigkeiten

Gunter Ziegenhals veröffentlicht September 2022

Westsächsische Hochschule Zwickau – Studiengang Musikinstrumentenbau, musikinstrumentenbau@fh-zwickau.de

Einleitung

Will man die Funktion der Zupf- und Streichinstrumente verständlich beschreiben oder gar die aktive Beeinflussung der akustischen Eigenschaften der Instrumente diskutieren, so kommt man um die Kenntnis des Schwingungsverhaltens der Objekte nicht umhin. Typischerweise wird das Schwingungsverhalten eines Objektes über seine Moden charakterisiert. Genauere Kenntnisse über diese Moden erhält mittels Modalanalysen. Dies sind allerdings sehr aufwendige Messungen. Nun ist bekannt, dass im Bereich der Modenfrequenzen besonders große Schwingungsamplituden (Resonanzen) entstehen, die in der Regel zu einem markanten Anstieg der Schallabstrahlung führen. Man sollte also prinzipiell aus dem Ergebnis von Messungen des Übertragungsverhaltens der Instrumente und dort auftretender Resonanzen auf das Vorhandensein von Moden schließen können. Bei Zupf- und Streichinstrumenten wird das Übertragungsverhalten mittels der sogenannten Frequenzkurve (siehe hierzu [1]) beschrieben. Da man aber aus der Frequenzkurve (FK) in Bezug auf die Moden nur Informationen zu Frequenzlage und Dämpfung bekommt, ist es wünschenswert, dass man eine gewisse Ordnung der Moden kennt. Anhand der Reihenfolge der Resonanzen wären dann Rückschlüsse auf die jeweilig zur Resonanz gehörigen Schwingungsform möglich.

Für einfache homogene schwingfähige Systeme wie Membranen, Stäbe oder Rechteckplatten lässt sich eine solche Ordnung relativ einfach erstellen. Man charakterisiert zunächst die Biegemoden über die auftretenden Knotenkreise, Knotendurchmesser bzw. Längs- und Querkontenlinien. Dazwischen ordnen sich noch Torsionsmoden an. Aber schon, wenn man Stäbe und Rechteckplatten aus dem Werkstoff Holz, der eben nicht DIN-gerecht im Walde wächst, einbezieht, mogeln sich infolge holzspezifischer Inhomogenitäten schon mal Torsionsmoden in der Resonanzabfolge zwischen die Biegemoden an Stellen, an die sie eigentlich nicht gehören. Schnell kommt man dadurch zu falschen Schlussfolgerungen.

Wie sieht es aber erst bei solch komplizierten Schwingern wie Zupf- und Streichinstrumente aus? Neben der Holzproblematik führen Ausarbeitungen an Decke und Boden oder die Beleistung zu zusätzlichen, deutlichen Einflüssen auf die Moden. Dennoch bemüht man sich insbesondere bei den Geigen um eine umfassende Nomenklatur der Moden. Man unterscheidet nach den hauptsächlich schwingenden Teilen: die Luft-Moden im Korpus, Deckenmoden, Bodenmoden Korpusmoden …: Diese „Nomenklatur“ für Geigenmoden wird z. B. in [2] beschrieben. Auch an Gitarren sind entsprechende Untersuchungen bekannt. Sie führen allerdings nicht in gleichem Maße auf eine so strenge Ordnung. Auch hierzu sei auf [2] verwiesen. Aber selbst wenn man prinzipiell ähnliche Moden bei verschiedenen Geigen oder Gitarren findet, so ist einerseits nicht von gleicher Frequenzlage (selbst wenn man gewisse Toleranzen einbezieht) und andererseits nicht von vergleichbarer Abstrahlung im allgemeinen Fall auszugehen.

Die aufgeworfene Diskussion ist natürlich auch in Bezug auf die vom Autor derzeit bearbeiteten Untersuchungen an Studenteninstrumenten interessant. Die bisher dargelegten Fakten drängen zu dem Schluss, dass ohne die Einbeziehung von Modalanalysen, zumindest für einen Teil der Objekte, keine wirklichen Aussagen möglich sind. Im Falle der betrachteten Studenteninstrumente liegen Modalanalysen nicht vor. Bisherige Veröffentlichungen bezogen sich auf studentische Arbeiten Streichinstrumente. Die Problematik Moden wurde dabei aufgrund der rein statischen Analyse der Frequenzkurven ausgeklammert [3], [4]. In einer folgenden Veröffentlichung soll es nun um Studentenarbeiten Gitarren gehen und zumindest die unteren Moden in die Diskussion einbezogen werden. Deshalb wird der Zusammenhang zwischen Frequenzkurve und Moden bei Gitarren in dieser Veröffentlichung zunächst anhand einer Stichprobe von im Institut für Musikinstrumentenbau e.V. (IfM) verfügbaren Gitarren beleuchtet. Für fünf der Instrumente liegen auch entsprechende Ergebnisse einer Modalanalyse vor.

Stichprobe und vorgenommene Messungen

In Zusammenhang mit wiederkehrenden Messungen, neuen Ideen, neu beschaffter oder auch reparierter Messtechnik usw. ist es sinnvoll, Referenzobjekte dauerhaft verfügbar zu haben. Im Falle von Forschungen zu Musikinstrumenten und ihrer Herstellung sind natürlich entsprechende Instrumente dafür wünschenswert. Mitte der 1990er Jahre begann man deshalb am IfM, einen Bestand an dauerhaft verfügbaren Referenzinstrumenten aufzubauen. Ab 1999 stand dafür auch ein klimatisierter Lagerraum (21°C, 50 % rel. Luftfeuchte) zur Verfügung. Die Referenzinstrumente sind Eigentum des IfM, was eine sichere Verfügbarkeit garantiert. Sie entstanden im Rahmen von Projekten bzw. wurden in solchen als Vergleichsobjekte angekauft.

Die Sammlung von Referenzinstrumenten begann mit fünf Gitarren, die bereits als Institutseigentum vorhanden waren. Es handelt sich um folgende Referenzgitarren (RG):

- RG 1 **Takamine** Modell C-128, Baujahr: 10/1979
- RG 2 **Meisterinstrument**, Hersteller: Armin Gropp, Baujahr: 9/1977
- RG 3 **Versuchsmuster** mit ovalem Schallloch (Weißinstrument), Baujahr: ca. 1975; Hersteller: Musima
- RG 4 **Marlin** Modell MC 315, Baujahr: ca. 1975
- RG 5 **Landola** SL 3 Nr.: 151472, Baujahr: ca. 1975

Betrachtet man drei Konstruktionsmerkmale:

- Zargenhöhe h_Z – Typisch um 100 mm,
- Korpuslänge l_K – Typisch um 480 mm,
- Breite des Unterbugs B – Typisch um 370 mm,

so stellen RG 1, RG 3 und RG 4 recht typische Vertreter der klassischen Gitarre dar. Bei RG 2 und RG 5 hingegen handelt es sich um ungewöhnlich große Ausführungen.

- RG 2: h_Z = 120 mm, l_K = 495 mm, B = 385 mm
- RG 5: h_Z = 100 mm, l_K = 480 mm, B = 390 mm

Abbildung 1 zeigt zwei der fünf ersten Referenzgitarren.

Abbildung 1: Referenzgitarre 1 (links) und 2 (rechts)

Als eine der ersten Maßnahmen wurden von diesen fünf Instrumenten Modalanalysen angefertigt. Hierfür standen ein Modalanalysesystems STARstruct® 5.2 sowie ein Analysator ONO SOKKI CF 6400 zu Verfügung. Die Basis der Modalanalyse stellt ein Gittermodell der untersuchten Struktur dar. Für die Untersuchungen entstand ein Gittermodell mit 262 Punkten (***Abbildung 2***). Das Rastermaß der Decke beträgt 2 x 4 cm^2, des Bodens 4 x 8 cm^2. Da das Raster für alle Instrumente verwendet wurde, diese aber nicht die gleiche Größe aufweisen, entstehen bei den beiden größeren Instrumenten kleine Verzerrungen im Raster.
Für die Messungen wurde die Variante „fixed response“, d. h. eine fester Aufnehmerort und von Punkt zu Punkt wandernder Impulshammer-Anschlag (Hammer PCB 086C80), verwendet. Der Aufnehmer (PCB 309A) befand sich am markierten Gitterpunkt 22 (***Abbildung 2***).
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. Unter dieser Maßgabe orientierte sich das Raster an Veröffentlichungen zu Schwingungsformen der Gitarrendecke [2]. Es wurde so gewählt, dass die wichtigsten Moden gut erfasst werden können. Zugleich begrenzt diese Wahl den zu betrachteten Frequenzbereich auf 800 Hz. Modalanalytische Untersuchungen darüber hinaus würden ein verfeinertes Raster erfordern.
Das System STARstruct® ist im IfM nach wie verfügbar, auch wenn schon lange keine Messwerte mehr damit aufgenommen werden. Nachträgliche, ergänzende Analysen alter Messdaten sind aber nach wie vor jederzeit möglich und gingen auch als Basis in die hier vorgenommene Diskussion ein.

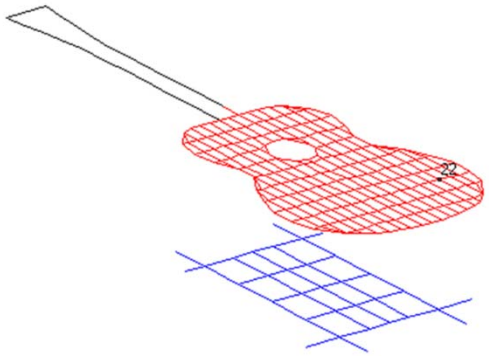


Abbildung 2: Verwendetes Gitternetzmodell für Modalanalysen Gitarre

Die Stichprobe der Referenzgitarren des IfM ist bis 2011 auf 39 Exemplare angewachsen. Die letzte Aufnahme der Frequenzkurven aller 39 Instrumente erfolgte im Zeitraum Oktober 2010 bis August 2011. Neben den Modalanalysen bauen die hier beschriebenen Arbeiten auf diesen Messungen auf.

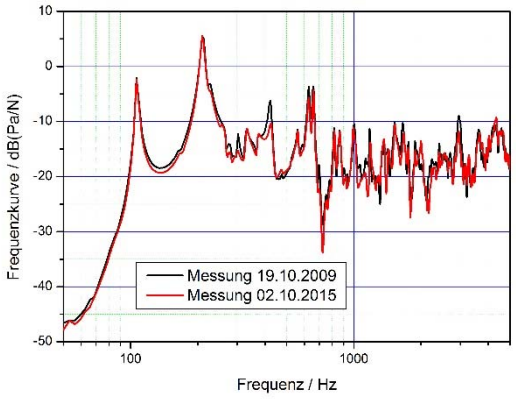


Abbildung 3: Vergleich zweier Frequenzkurven RG 1, aufgenommen im Abstand von sechs Jahren

Die Untersuchungen zogen sich also über mehr als 20 Jahre hin. Sind Messungen an gleichen Objekten über einen solch langen Zeitraum noch vergleichbar? Anhand der Ergebnisse entsprechender Reproduzierbarkeitsmessungen kann man die Frage durchaus mit ja beantworten, wobei es natürlich Dinge zu beachten gilt, z. B. wenn zwischenzeitlich Änderungen am Messregime vorgenommen wurden. ***Abbildung 3*** zeigt die erste und die letzte Frequenzkurvenmessung von RG 1 im Rahmen einer solchen Reproduzierbarkeitsuntersuchung. Man erkennt durchaus geringe Differenzen, die durch einen Restklimaeinfluss [5] und die natürlichen Veränderungen im Holz

durch Alterung zu erklären sind. Beide Effekte wirken aber permanent auf Musikinstrumenten ein und müssen deshalb bei Untersuchungen immer im Sinne eines „Restrauschens“ einkalkuliert werden.

Abbildung 4 stellt die mittleren Frequenzkurven der 39 Referenzgitarren und der Teilstichprobe der ersten fünf dar. Es zeigt sich der typische Verlauf für Konzertgitarren. Zwei ausgeprägte Resonanzbereiche bei 100 Hz und 200 Hz gefolgt von einem weiteren, wenn auch etwas niedrigerem Resonanzbereich um 400 Hz. Verlaufen bis dahin die Kurven beider Stichproben annähernd gleich, so liegt der folgende Peak in der Gesamtstichprobe um 560 Hz, für die Gruppe der fünf Instrumente etwa um 100 Hz höher.

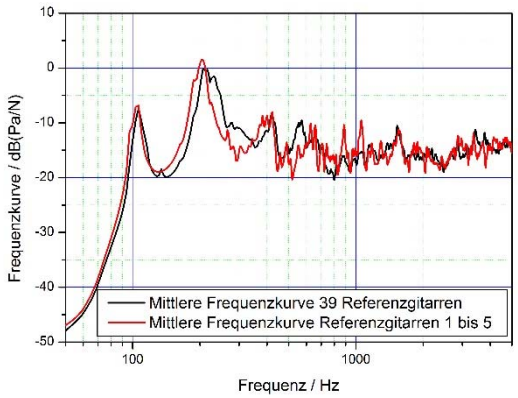


Abbildung 4: Mittlere Frequenzkurven der fünf speziell betrachteten Instrumente und aller 39 Referenzgitarren

Die nächsten markanten Resonanzen finden sich erst oberhalb der diskutierten Analysegrenze in Sachen Moden von 800 Hz. Natürlich muss man davon ausgehen, dass einzelne Instrumente in der Frequenzkurve Resonanzen aufweisen, die von den Hauptpeaks der mittleren Verläufe abweichen. Da es sich aber um eine energetische Mittelung von Pegelverläufen handelt, werden diese weniger ausgeprägt auftreten.

Frequenzkurvenresonanzen und Moden

Im Folgenden soll es nun um das Hauptanliegen dieses Beitrages, den Zusammenhang zwischen den Resonanzen der Frequenzkurve und den Moden der klassischen Gitarre gehen. Aus den mittleren Kurven in ***Abbildung 4*** und den Einzelmessungen in ***Abbildung 3*** stechen jeweils die beiden unteren Resonanzen sehr deutlich hervor. Das optische Hervorstechen ist nun zweifellos auch auf die logarithmische Teilung der Frequenzachse zurückzuführen, aber dies entspricht nun mal dem Aufbau unseres musikalischen Tonsystems. Aus cleveren Experimenten aus der Zeit vor der Verfügbarkeit moderner Modalanalysesysteme sind die Ursprungsmoden der beiden Resonanzen bereits seit langem bekannt. Hierzu sei auf [6] verwiesen. Danach wird die Mode um 100 Hz vorrangig von der Luftschwingung im Hohlraum der Gitarre bestimmt, wobei die Nachgiebigkeit der Wand, also Decke und Boden, einen Einfluss ausübt. Die Schwingungsform, beobachtet auf Decke und Boden, sollte also eine „Pumpmode“ sein. Die Mode um 200 Hz stellt sich als tiefste Deckenschwingung heraus, die ihrerseits durch die Steifigkeit des eingeschlossenen Luftvolumens beeinflusst wird. Im Ergebnis der Modalanalyse erwartet man hier eine reine Deckenschwingung, die, da es sich um die tiefste Deckenmode handeln soll, keine inneren Knotenlinien aufweisen dürfte. Lediglich der eingespannte Rand bildet eine umlaufende Knotenlinie. Führt man nun Modalanalysen durch, so entsprechen die Ergebnisse für diese beiden Moden prinzipiell den oben getroffenen Erwartungen. Wieso prinzipiell? Nun, oft bewegt sich der Boden bei der Resonanz um 100 Hz nur mit sehr geringer Amplitude, so dass sie praktisch nicht sichtbar wird. Andererseits findet sich in Zusammenhang mit der ersten Deckenmode häufig eben doch ein sichtbares Mitbewegen des Bodens. Bei den betrachteten fünf Instrumenten (RG 1 bis RG 5) ergab die Modalanalyse für RG 3 Modenformen, die der beschriebenen Idealvorstellung am besten entsprechen.

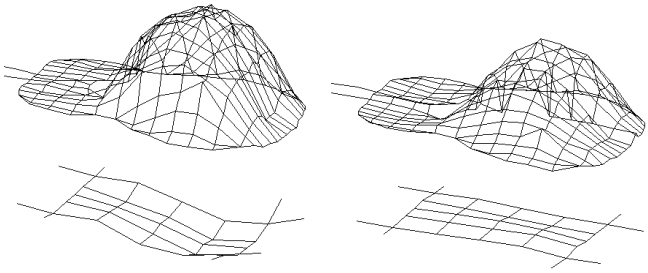


Abbildung 5: Moden zu den ersten beiden Frequenzkurvenresonanzen f_1 = 103 Hz (links) und f_2. = 203 Hz, RG 3

Neben der Identifikation der Moden wird in [6] auch darauf eigegangen, wie man diese bautechnisch beeinflussen kann. Für die ersten beiden Resonanzen der Frequenzkurve kann man die Problematik also als bereits seit langem gelöst ansehen.

Die folgenden Betrachtungen sollen nun vorrangig an den beiden Gitarren RG 1 und RG 2 erfolgen. Aus ***Abbildung 1*** und den zugehörigen Erläuterungen geht deutlich hervor, dass es sich um zwei sehr unterschiedliche Konzertgitarren handelt.

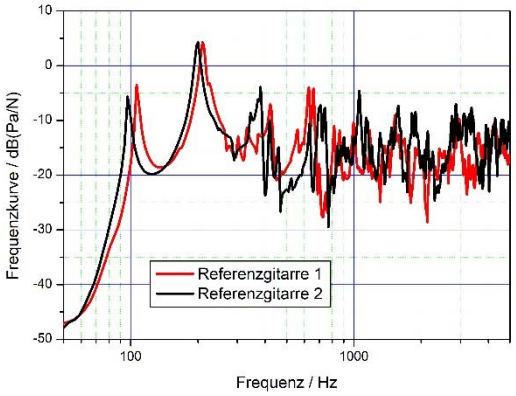


Abbildung 6: Frequenzkurven RG 1 und RG 2 im Vergleich

Dies spiegelt sich natürlich auch im Vergleich der Frequenzkurven beider Instrumente wider (***Abbildung 6***). Zur besseren

Orientierung findet man in ***Abbildung 7*** zusätzlich die Frequenzkurve von RG 1 mit eingetragenen Frequenzen der markantesten Resonanzen. Für RG 2 liegen die ersten beiden Resonanzen bei 97 Hz bzw. 199 Hz.

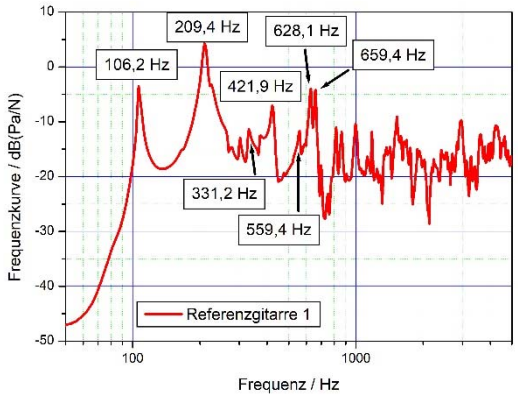


Abbildung 7: Frequenzkurve RG 1

Die nächsten ausgeprägtem Resonanzen findet man bei beiden Instrumenten wie schon in den mittleren Frequenzkurven (***Abbildung 4***) im Bereich um 400 Hz. Modalanalysen liefern allerdings bereits bei um 270 Hz für beide Instrumente eine deutliche Mode. ***Abbildung 8*** stellt sie für RG 1 dar. Für RG 2 finden wir die Mode bei 240 Hz. Man erkennt hier schon einen ersten deutlichen Unterschied. Es handelt sich um die zweite Deckenmode mit einer Längs-Knotenlinie. Der Boden ist praktisch in Ruhe und die Modenform ist deutlich antimetrisch. Deshalb strahlt ihre Schwingung kaum Schall ab. Aus diesem Grund kann man sie in der Frequenzkurve nur bei günstiger Lage zu den benachbarten Resonanzen ansatzweise erkennen. In der Frequenzkurve von RG 1 ist dies der zweite, ganz kleine Peak links neben der markierten Resonanz bei 331 Hz.

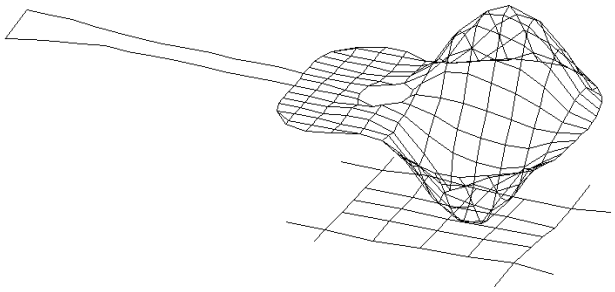


Abbildung 8: 2. Deckenmode, *f* = 298 Hz, RG 1

Es gibt aber, wie häufig in Sachen Musikinstrumente, Ausnahmen. Eine solche fanden wir beispielsweise bei RG 3. Ihre Frequenzkurve zeigt eine deutlich ausgeprägte Resonanz bei 270 Hz, die eindeutig auf die zweite Deckenmode zurückgeht (***Abbildung 9***). Die Ursache für diese „Ausnahme“ findet man, wenn man sich die Schwingungsform der zweiten Deckenmode anschaut (***Abbildung 10***). Sie zeigt, im Gegensatz zum typischen Fall, eine deutlich unsymmetrische Form. Diese begünstigt die Schallabstrahlung. Eine Besonderheit von RG 3 ist ein sehr breites, ovales Schallloch.

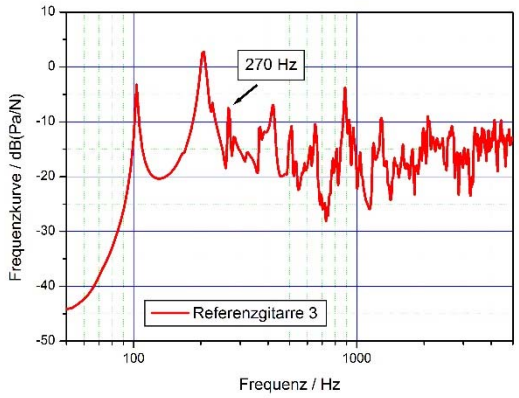


Abbildung 9: Frequenzkurve RG 3, ungewöhnlich ist die Resonanz bei 270 Hz

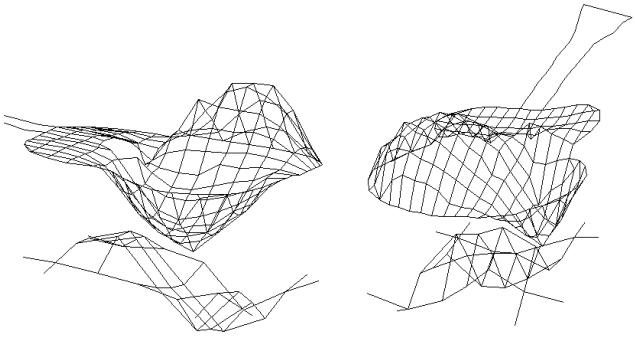


Abbildung 10: Schwingungsform zweite Deckenmode RG 3 bei 270 Hz

An der Schwingungsform fällt darüber hinaus noch ein zweites Merkmal auf. Es handelt sich hier eigentlich um keine reine Deckenmode oder eine Mode bei der hauptsächlich die Decke schwingt. Vielmehr ist der Boden deutlich mit einer ebenfalls nicht sehr symmetrischen Schwingung beteiligt.

Die Formen der bisher besprochenen, typischen ersten drei Gitarrenmoden fallen bei allen klassischen Gitarren mehr oder weniger gleich aus, insbesondere hinsichtlich ihrer Reihenfolge. Die Identifikation bei der Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Frequenzkurvenresonanzen (also dem Übertagungsverhalten) und den Instrumentenmoden ist relativ einfach und sicher. Geht man in der Frequenz weiter nach oben wird das zunehmend schwieriger. Dies zeigt sich bereits sehr schön bei der folgenden Resonanz der Frequenzkurve bzw. den zugehörigen Moden. Sie liegt, wie schon erwähnt, im Bereich um 400 Hz. Für RG 1 und RG 2 findet man sie bei 420 Hz (RG 1) bzw. 370 Hz (RG 2). Die Resonanz bei RG 2 ist dabei deutlich stärker ausgeprägt. Schaut man sich die zugehörigen Moden an, ***Abbildung 11***, so findet man vom Typ her sehr verschiedene Modenformen. Bei RG 1 handelt es sich um eine Mode mit je einer Längs- und einer Querknotenlinie, bei RG 2 um eine Schwingung mit zwei Längskno-

tenlinien der Decke. Weiterhin sind beide Moden mit deutlichen Bodenbewegungen verbunden, also eigentlich Korpusmoden.

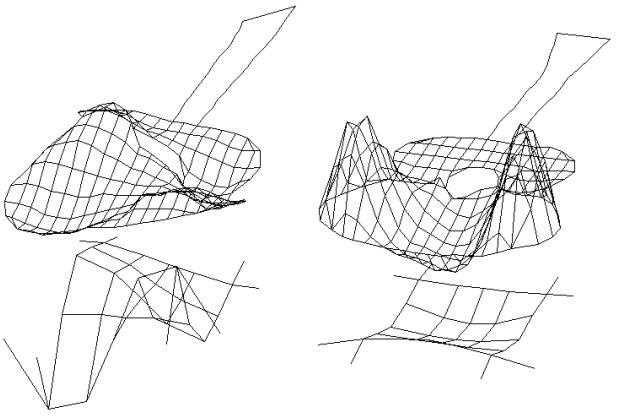


Abbildung 11: Moden für RG 1 und RG 2 zur dritten, deutlich ausgeprägten Resonanz der Frequenzkurve links RG 1 f_3 = 429 Hz, rechts RG 2 f_3 = 363 Hz

Beim Vergleich mit der Frequenz kurve ist zu beachten, dass sich die Frequenzen der Moden und der Resonanzen der Frequenzkurve häufig geringfügig unterscheiden. Eine Ursache liegt unter anderem darin, dass Modalanalyse und FK-Messungen etliche Jahre auseinanderliegen und das Holz in dieser Zeit alterte. ***Abbildung 11*** zeigt eindeutig, dass die im Bereich um 400 Hz dominierenden Resonanzen bei den beiden Instrumenten nicht vom gleichen Typ sind, nicht die gleiche, prinzipielle Schwingungsform aufweisen. Beide verbindet aber eine unsymmetrische Verteilung der Bewegung, ungleich große Flächen der Decke schwingen gegeneinander. Dies begünstigt die Schallabstrahlung.

In diesem Zusammenhang entsteht natürlich sofort die Frage, inwieweit man aus den Ergebnissen der Modalanalyse auf die Stärke der Abstrahlung folgern kann. Es wurde schon diskutiert, dass die Verteilung der schwingenden Fläche und ihre Schwingungsphasen zueinander prinzipielle Aussagen zur Schallabstrahlung erlauben. Die Schallabstrahlung wird aber auch sehr stark von der Schwingungsamplitude bestimmt. Hierzu liefert die Modalanalyse keine Aussagen. Entsprechende Informationen würde eine experimentelle Betriebsschwingungsanalyse oder eine Berechnung anhand der Ergebnisse der Modalanalyse bei vorgegebener Erregung liefern. Beides wurde im Zusammenhang mit diesen Untersuchungen nicht durchgeführt. Die Frequenzkurven weisen aber darauf hin, dass die Mode um 400 Hz bei RG 2 stärker angeregt wird als bei RG 1.

Betrachtet man weiterführend ***Abbildung 6*** etwas genauer, so ist zu erkennen, dass beide Instrumente jeweils in unmittelbarer Frequenznähe der Maxima des jeweils anderen im Bereich um 400 Hz selbst eine, wenn auch schwächere Resonanz aufweisen. ***Abbildung 12*** zeigt die zugehörigen Moden. Beide Moden haben eine nahezu identische Schwingungsform der Decke mit einer Querknotenlinie, jedoch sind sie in Bezug auf den Boden phasengedreht. Die Abstrahlung der Variante von RG 2 erweist sich im Ergebnis der Frequenzkurvenmessung wieder als günstiger.

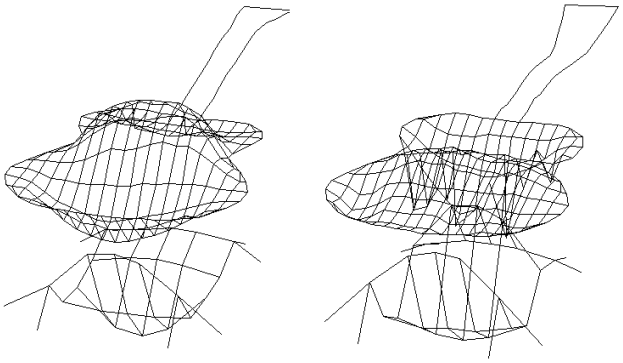


Abbildung 12: Moden für RG 1 und RG 2 in Frequenznähe der Maxima um 400 Hz des jeweils anderen Instrumentes, links RG 1 f = 366 Hz, rechts RG 2 f = 410 Hz

Wie schon mehrfach erwähnt, fällt es immer schwerer vergleichbare Modenformen zu finden, wenn man im Vergleich der Messreihen zu den beiden Instrumenten in der Frequenz nach oben geht. Als letztes seien dazu hier die Moden zu den Resonanzen nahe 620 Hz angeführt. ***Abbildung 13*** zeigt die Modenformen. Sie fallen doch deutlich unterschiedlich aus.

Die gezeigten Beispiele und eine weitere Auswertungen der vorgenommenen Modalanalysen zeigen, dass eine systematische Reihung der Gitarrenmoden, z. B. nach Längs- und Querknotenlinien, wie man sie u. A. bei der Rechteckplatte anwendet, nicht möglich ist. Dies gilt insbesondere, wenn nicht absolut identisch gebaute Instrumente vergleichend betrachtet werden sollen. Die baulichen Eigenheiten wirken sich zu unterschiedlich auf die einzelnen Moden aus. Neben den eigenen Untersuchungen sei zu diesem Phänomen beispielhaft auf zwei Arbeiten von FLEISCHER, [7] und [8], verwiesen.

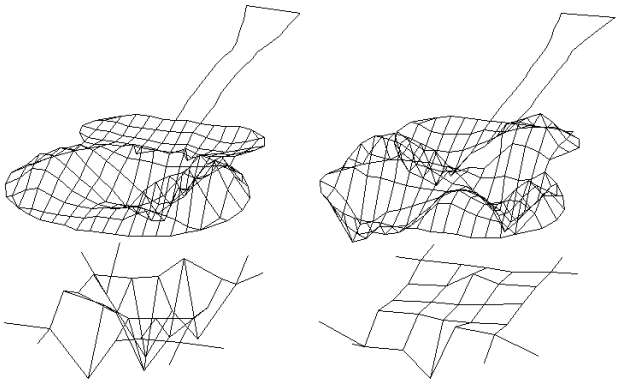


Abbildung 13: Moden für RG 1 und RG 2 zu den Resonanzen bei 620 Hz, links RG 1 f = 623 Hz, rechts RG 2 f = 618 Hz

Diese Erkenntnis erschwert natürlich Bemühungen, auf bestimmte klangliche Unzulänglichkeiten bauseitig zu reagieren. Letztlich ist es unserem Gehör gleichgültig, welche Mode auf welche Frequenzbereiche wirkt. Aber für Eingriffe ist die Kenntnis der Modenformen wichtig. Dies würde in letzter Konsequenz bedeuten, dass für jedes Instrument im speziellen Fall für eine messtechnisch gestützte Veränderung eine Modalanalyse erforderlich ist. Dieser Aufwand ist aber natürlich

unrealistisch. Es erscheint deshalb wichtig zu klären, inwieweit über die Kenntnis von Merkmalen der unteren Moden, die aufgrund der Einfachheit der Schwingungsformen relativ leicht zu manipulieren sind, Rückschlüsse auf höhere Frequenzbereiche möglich sind.

Die ersten drei starken Resonanzen der Frequenzkurve

Schaut man die mittlere Frequenzkurve aller 39 Referenzgitarren in ***Abbildung 4*** an, so sind oberhalb der ersten beiden Resonanzen bestimmte Bereiche besonders ausgeprägt: um 400 Hz, um 600 Hz – 700 Hz und höher bei 1 kHz. Um diese Beobachtung näher zu beleuchten sind in ***Abbildung 14*** neben der mittleren Frequenzkurve der Stichprobe Referenzgitarren auch die zugehörigen Minimal- und Maximalkurven eingetragen. Es ist deutlich zu sehen, dass neben den beiden ersten Resonanzen sich der Bereich um 400 Hz auch in den Minima immer noch abhebt. Höhere Bereiche fallen dagegen offenbar bei hinreichend vielen Instrumenten ab. Nun ergaben Diskussionen mit Instrumentenbauern und Gitarristen, dass man den Tönen im Bereich um 400 Hz, also der oberen Hälfte der eingestrichenen Oktave eine besondere Bedeutung beimisst. Es fiel dabei auch der Ausdruck „hier liegen die Haupttöne“. Es erscheint deshalb sinnvoll, zunächst beschränkt auf die ersten drei Maxima der Frequenzkurve, die Korrelation ihrer Merkmale, Frequenz f_n und Pegel L_n (n = 1, 2, 3) zu betrachten.

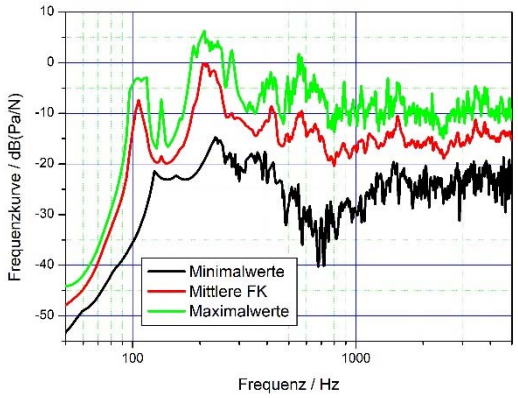


Abbildung 14: Mittlere Frequenzkurve sowie Maximal- und Minimalwerte über alle Kurven für die Stichprobe Referenzgitarren

Für eine entsprechende Auswertung wurden drei Suchbereiche definiert, in denen nach diesen ersten drei Maxima zu suchen ist:

- Resonanz 1 – Suchbereich 50 Hz … 150 Hz
- Resonanz 2 – Suchbereich 150 Hz … 270 Hz
- Resonanz 3 – Suchbereich 300 Hz … 500 Hz

Betrachten wir zunächst die Korrelationen der Merkmale. Die Korrelationskoeffizienten für die Merkmale f_1, f_2, f_3 und L_1, L_2, L_3 stellt ***Tabelle 1*** dar. Die Werte, die den Grenzwert für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % übersteigen, sind fett dargestellt.

Tabelle 1: Korrelationskoeffizienten zwischen den Merkmalen f_n und L_n (n = 1, 2, 3) der Frequenzkurven Stichprobe 39 Referenzgitarren des IfM, $r_{g,\,5\%}$ = 0,325

Merkm.	f_1	f_2	f_3	L_1	L_2	L_3
f_1	1	**0,737**	0,272	-0,101	-0,307	**-0,338**
f_2	**0,737**	1	**0,358**	-0,173	**-0,426**	-0,216
f_3	0,272	**0,358**	1	-0,168	-0,016	-0,116
L_1	-0,101	-0,173	-0,168	1	-0,045	0,031
L_2	-0,307	**-0,425**	-0,016	-0,045	1	**0,389**
L_3	**-0,338**	-0,216	-0,116	0,031	**0,389**	1

Zunächst zeigt sich eine deutliche positive Korrelation zwischen f_1 und f_2. Dies war aufgrund der praktisch gleichen Schwingungsform der Decke bei beiden Moden zu erwarten. Weiterhin entspricht das auch den in [6] dargelegten Methoden zur Abstimmung der beiden Moden. Weiterhin zeigen sich Korrelation zwischen f_2 und f_3, f_2 und L_2, L_2 und L_3 sowie f_1 und L_3, wobei unterschiedliche Tendenzen vorliegen.
Versuchen wir diese Korrelationen zu verstehen. f_2 und f_3 korrelieren positiv miteinander. Steigt f_2 so steigt auch f_3. Auf den ersten Blick sollte das nicht verwundern, da beide auf Deckenschwingungen beruhen und Veränderungen an der Decke beide betreffen. Allerdings erwartet man auch, dass aufgrund der sehr unterschiedlichen Schwingungsformen konstruktive Differenzierungen nicht so einheitlich auf beide Moden wirken. In derartigen Fällen ist es oft hilfreich, sich die Verteilung der beteiligten Größen anzuschauen. Diese ist in ***Abbildung 15*** zu sehen.

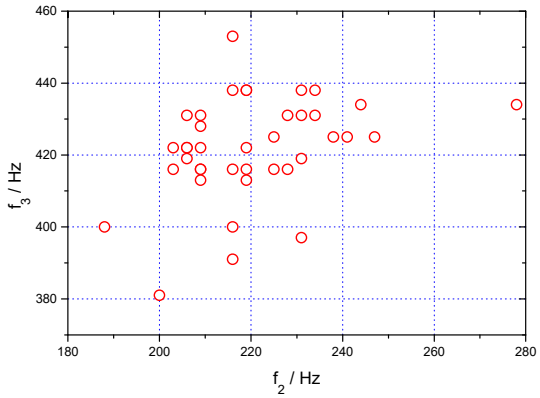


Abbildung 15: Verteilung der Merkmale f_2 und f_3 der Stichprobe Referenzgitarren

An der Verteilung fällt auf, dass offenbar insbesondere drei Objekte zur Korrelation beitragen, die beiden Instrumente zu den Punkten links unten, sowie das Instrument zum Punkt ganz rechts. Bei allen drei Objekten handelt es sich um etwas untypische Vertreter der klassischen spanischen Gitarre. Die beiden Punkte unten links gehören zu den außergewöhnlich großen Exemplaren RG 2 und RG 5. Bei dem Instrument zum Punkt ganz rechts handelt es sich um eine ¾ Gitarre mit

- h_Z = 84 mm, l_K = 451 mm, B = 385 mm

Diese Informationen führen zu dem logischen Schluss, dass bei größeren Instrumenten mit größeren Deckenflächen deren Modenfrequenzen fallen, was aus schwingungstechnischer Sicht korrekt ist. Zugleich weist die Verteilung von f_2 und f_3 darauf hin, dass der Effekt offenbar nur bei deutlichen Größenunterschieden der Instrumente zum Tragen kommt. Und tatsächlich, nimmt man diese drei Instrumente aus der Statistik, so verschwindet die Korrelation ($r = 0{,}173$) zwischen f_2 und f_3, die anderen vier bleiben jedoch erhalten.

Die negative Korrelation zwischen f_2 und L_2 sagt aus, dass sich L_2 mit wachsendem f_2 verringert. Die Frequenz der ersten Deckenresonanz kann erhöht werden durch Verringerung der schwingenden Masse, z. B. des Steges, oder durch Erhöhung der Steifigkeit. Häufig, aber nicht immer, ist es der Steifigkeits-Effekt. Eine erhöhte Steifigkeit erfordert eine höhere Erregungskraft, was die Schwingungsamplitude, in der Übertragung repräsentiert durch L_2, (bei gleicher Kraft) senkt. Damit lässt sich auch diese Korrelation zunächst gut erklären.

Die positive Korrelation L_2 mit L_3 ist ebenfalls überaus einleuchtend. Die Resonanzen bei f_2 und f_3 gehen beide auf Moden mit (allerdings nicht ausschließlich) Deckenbewegungen zurück. Maßnahmen, die eine Deckenbewegung begünstigen, werden also sicherlich beide Moden und damit beide Übertragungspegel positiv beeinflussen. Dies gilt natürlich auch in der Gegenrichtung.

Betrachtet man die Verteilung der Merkmale der beiden zuletzt diskutierten Korrelationen, so setzen sich auch einzelne, besondere Instrumente von den Punktwolken ab, sie beeinflussen jedoch nicht in besonderem Maße die Korrelation wie im Falle $f_2 - f_3$. Anders sieht das bei der noch offenen Korrelation f_1 mit L_3 aus. Sie besagt, dass L_3 bei steigender f_1 fällt. Ist also die Hohlraumresonanz höher abgestimmt, wirkt sich das negativ auf die Übertragung im Bereich um 400 Hz aus. Wieso gerade die Luftschwingung im Korpus einen besonderen Einfluss ausüben soll, erschließt sich nicht. Wenn auch f_2 korrelieren würde, sehe das schon anders aus, da dann auf einen Einfluss auf die Deckenschwingung, siehe obige Diskussion, geschlossen werden könnte. Für $f_2 - L_3$ zeigt sich ein Korrelationskoeffizient $r = -0{,}216$, der zwar tendenziell in die gleiche Richtung weist, aber eben keinen gesicherten Zusammenhang anzeigt. Betrachten wir also erneut die Verteilung der Merkmale, diesmal f_1 und L_3 (***Abbildung 16***). Man erkennt wieder eine recht kompakte Punktwolke mit zwei „Ausreißern“. Der Punkt ganz rechts steht wieder für die ¾-Gitarre. Aufgrund des kleinen Korpus geht die Hohlraumresonanz und damit f_1 extrem nach oben. Der Punkt ganz unten repräsentiert das mit Abstand billigste Instrument. Es weist eine laminierte Decke auf. Nimmt man nun diese beiden Instrumente aus der Statistik so ergeben sich Korrelationen für f_1 und L_3 bzw. f_2 und L_3 mit gleicher Tendenz, aber ohne Überschreitung des Entscheidungsgrenzwertes:

$r(f_1\text{-}L_3) = 0{,}305$ sowie $r(f_1\text{-}L_3) = 0{,}300$

Es liegt also wahrscheinlich ein schwacher, aber statistisch nicht gesicherter Zusammenhang vor.

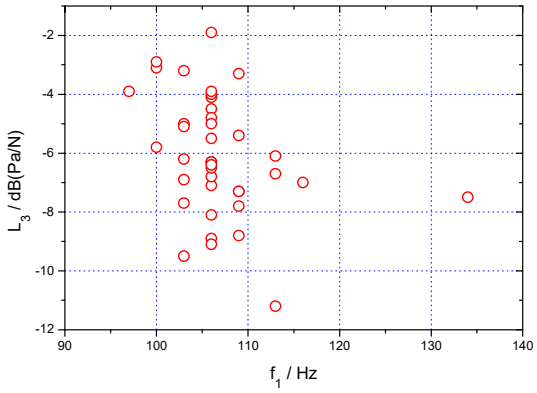


Abbildung 16: Verteilung der Merkmale f_1 und L_3 der Stichprobe Referenzgitarren

Die vorgenommene Ausblendung von Instrumenten, die in bestimmten Merkmalen von den typischen Werten der Stichprobe abweichen, um offene Fragen zu klären, führt nun zu einer grundlegenden Überlegung. Sollte man auf derartige Objekte in Stichproben generell verzichten? Zumindest für den Problemkreis Musikinstrumente kann man die Frage klar mit nein beantworten. Aufgrund vieler subjektiver Einflüsse, die häufig die Arbeiten auslösen, weiß man oft nicht, wonach man eigentlich sucht. „Extremobjekte“ können hier meist Hinweise zu Zusammenhängen liefern. Man muss sich jedoch der Wirkung von Extremobjekten bewusst sein und darf sich durch sie nicht auf falschen Fährten lenken lassen. Im Zweifelsfall sind zusätzlich Untersuchungen unter Ausklammerung der Objekte angezeigt, wie hier dargelegt.

Resonanzmerkmale und Hauptabmessungen der Gitarren

Nachdem die Zusammenhänge zwischen den sechs Resonanzmerkmalen f_n und L_n ($n = 1, 2, 3$) unter die Lupe genommen wurden, soll nun die Korrelation zwischen diesen Merkmalen und den Hauptabmessungen der Instrumente betrachtet werden. Im Anhang befindet sich eine Abbildung mit den Hauptabmessungen. Dies sind Werte, die in Diskussionen mit Gitarrenbauern als die Hauptmaße einer Gitarre herausgearbeitet wurden. Unter der Abbildung im Anhang findet man eine Tabelle mit den berechneten Korrelationskoeffizienten. In der Tabelle sind die Symbole und eine Benennung der Maße angegeben. Das Meiste erklärt sich aus Bild und Tabelle von selbst. Man sieht, dass für die Betrachtung nicht alle Maße verwendet wurden. Die Deckenstärke ist nicht im Bild vermerkt. Verwendet wurde eine mittlere Deckenstärke, bestimmt aus mindestens fünf Messungen mittels Bügelmessuhr. Der Begriff „Griffbrett S“ steht für die Breite des Griffbrettes am Sattelbund. Die Mensurlänge kennzeichnet die frei schwingende Länge der Saiten zwischen Sattelbund und Stegeinschub. Die bei fast allen Instrumenten vorhandene Mensurkorrektur im Bereich 1 mm … 2 mm zwischen E- und e^1-Saite blieb hier unberücksichtigt. Die Schalllochdurchmesser der beiden nicht kreisförmigen Schalllöcher der Instrumente RG 2 und RG 3 entsprechen einem flächengleichen Kreis.

Zu bemerken ist noch, dass für diese Korrelationsbetrachtung die Instrumente RG 36 bis RG 39 nicht herangezogen wurden. Diese weisen Decken mit alternativen Materialien auf. Deren Einfluss sollte hier nicht wirksam werden.

Sofort springt ins Auge, dass bei einer Vergrößerung der Instrumente alle drei Resonanzfrequenzen sinken, wobei die statistische Sicherheit für f_1 und f_2 deutlich größer ist. Interessant ist, dass, obwohl die Schwingung der zugehörigen Moden nur bis zur Taille reicht (***Abbildung 5***), die Größe des Oberbugs einen eindeutigen Einfluss ausübt. Dies ist ein Indiz für die Wirkung des Luftvolumens im Korpus auf die Moden. Wird das Schallloch vergrößert, so erhöht sich die Helmholtzresonanz der Luft im Korpus und zugleich wird die Steifigkeit der Decke verringert. In diesem Zusammenhang zeigt sich, dass zumindest für f_2 der Steifigkeitseffekt überwiegt.
Etwas merkwürdig erscheint die deutliche Korrelation zur Griffbrettbreite. Hier ist offenbar wieder ein Blick auf die Verteilung angebracht. ***Abbildung 17*** zeigt diese für den Fall der höchsten Korrelation, Griffbrettbreite am Sattelbund – f_2.

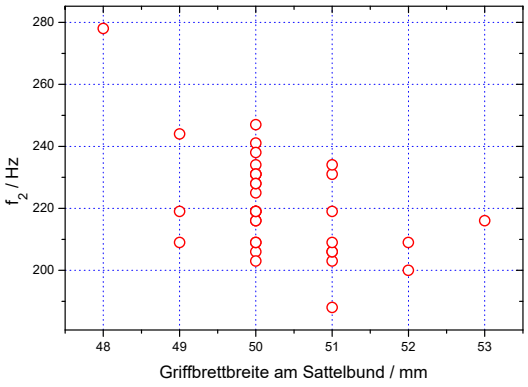


Abbildung 17: Verteilung Griffbrettbreite am Sattelbund und f_2 der Stichprobe Referenzgitarren

Deutlich sticht eigentlich nur der Punkt links oben heraus. Dabei handelt es sich wieder mal um die ¾-Gitarre. Nehmen wir diese aus der Statistik, so fällt der Korrelationskoeffizient auf r = -0,382, bleibt aber somit immer noch über dem Grenzwert $r_{g,5\%}$. Eine Erklärung des Phänomens muss man an dieser Stelle schuldig bleiben.
Deutlich weniger Zusammenhänge stellen sich in Bezug auf die Resonanzpegel dar. Für L_1 zeigen sich Korrelationen zur Mensur und Größe des Oberbugs. Hier soll nur der Aspekt Oberbug(Breite) beleuchtet werden. Die entsprechende Verteilung zeigt ***Abbildung 18***. Sofort keimt der Verdacht auf, dass es wieder der eine Punkt links unten ist, der die Korrelation befeuert. Es handelt sich erneut um das ¾-Instrument. Ohne dieses Objekt ergibt sich r = 0,23. Es verbleibt eine statistisch unsichere, leicht steigende Tendenz, die man auch rein optisch aus der Verteilung schließen kann. Andererseits ist ersichtlich, dass L_1 auch bei nur minimaler Variierung des Oberbugs deutlich unterschiedliche Werte annehmen kann. Es muss also weitere Einflussfaktoren geben, die sich aus der hier vorgenommenen Betrachtung nicht erschließen.

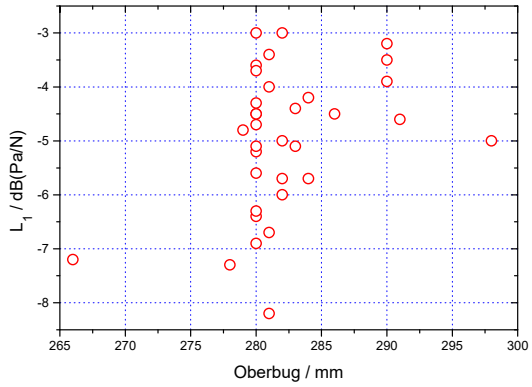


Abbildung 18: Verteilung Oberbugbreite und L_1 der Stichprobe Referenzgitarren

Abschließend sei der Zusammenhang Unterbug – L_3 diskutiert. ***Abbildung 19*** liefert die zugehörige Verteilung.

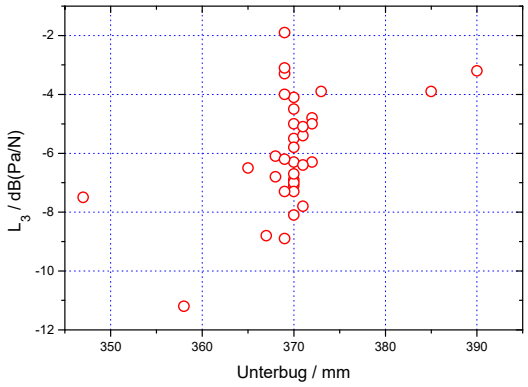


Abbildung 19: Verteilung Unterbugbreite und L_3 der Stichprobe Referenzgitarren

Die Verteilung der Werte in **Abbildung *19*** spricht für sich selbst. Die eindeutige Korrelation wird durch vier Objekte hervorgerufen, die ¾-Gitarre ganz links, das Billiginstrument (RG 22) links unten sowie die beiden größeren Ausführungen (RG 2 und RG 5) oben rechts. Man benötigt wohl keine Extrarechnung, um zu erkennen, dass die gesicherte Korrelation verschwindet, werden diese vier Objekte ausgeklammert. Viel interessanter ist aber eine andere Beobachtung. Es gibt offenbar mindestens zwei Wege, um L_3 zu beeinflussen. Die innerhalb der Stichprobe auftretende Variation des Unterbugs verändert L_3 im Bereich um 6 dB. Dies ist erheblich hinsichtlich der Wahrnehmung. Eine Veränderung in gleicher Größenordnung ist aber offenbar auch bei praktisch konstantem Unterbug auf anderem Weg zu erreichen, der uns aber erneut hier verborgen bleibt.

Einfluss auf weitere Frequenzkurvenmerkmale

In [1] werden weitere vier Frequenzkurvenmerkmale angegeben, die Korrelationen zu Urteilen von Spielern und Zuhörern

in Bezug auf untersuchte Gitarren aufweisen. Es handelt sich um Summenpegel (***Ls***) in folgenden Frequenzbereichen:

- 50 Hz … 200 Hz – Bassbereich
- 800 Hz … 1,2 Hz – Bereich der Klarheit
- 2 kHz … 5 kHz – Bereich der Helligkeit
- 50 Hz … 5 kHz – Gesamtübertragung

Entsprechende Korrelationsbetrachtungen zu den hier angegebenen Maßen liefern für die Stichprobe Referenzgitarren folgende Ergebnisse

- Der **Bassbereich** kann praktisch mit allen Maßnahmen angehoben werden, die f_1 und f_2 absenken.
- Der Summenpegel im Bereich **Klarheit** korreliert lediglich mit der Zargenhöhe und das positiv.
- Die **Helligkeit** lässt sich durch Vergrößern der schwingenden Fläche des Unterbugs anheben. Dies betrifft für unsere Maße den Unterbug an sich und damit verbunden eine Vergrößerung des Gesamtkorpus sowie das Konstruktionsdetail Schallloch „nach oben schieben“.
- Die **Gesamtübertragung** reagiert praktisch auf die gleichen Maßnahmen wie die Helligkeit.
- Aus Interesse wurde zusätzlich der **spektrale Centroid** der Frequenzkurve betrachtet, da er häufig als Merkmal Verwendung findet. Hier zeigen sich keine Zusammenhänge zu den Hauptabmessungen.

Fazit

Untersuchungen an fünf Referenzgitarren des IfM zeigten, dass aus der Reihenfolge der in einer Frequenzkurve beobachteten Resonanzen, außer im Falle der beiden ersten, nicht auf die zugehörigen Moden geschlossen werden kann.
Es erschien deshalb sinnvoll, als ersten weiterführenden Schritt die Zusammenhänge zwischen den ersten drei Resonanzen der Frequenzkurve zu beleuchten. Methoden zur gezielten Manipulation der Moden zu den ersten beiden Resonanzen sind bekannt [6], so dass bei Kenntnis dieser Zusammenhänge auch die dritte Resonanz und damit die Abstrahlung in diesem Bereich aktiv beeinflussbar wäre. Die Untersuchungen erfolgten an 39 Referenzinstrumenten des IfM. Es zeigten sich allerdings außer für f_1 und f_2 nur tendenzielle, aber keine wirklich statistisch gesicherten und erklärbaren Korrelationen.
Eine dritte Untersuchung versuchte Zusammenhänge zwischen den Merkmalen der ersten drei Frequenzkurvenresonanzen und den Hauptabmessungen der Instrumente herzustellen. Eindeutige Ergebnisse zeigen sich wiederum für f_1 und f_2. In Bezug auf f_3 stimmen zwar die Tendenzen, aber die deutliche Aussage wie für die anderen beiden Frequenzen ist nicht mehr gegeben. Merklich schlechter sieht es für die Resonanzpegel aus. Ein wirklich nachvollziehbar sicherer Zusammenhang konnte nur zwischen der Unterbuggröße und L_3 erkannt werden. Zusammenhänge mit praktischem Wert findet man hingegen, wenn man die Hauptabmessungen zu gröberen, allgemeineren Merkmalen der Frequenzkurve in Verbindung setzt. Gemeint sind Bereichspegel, die für bestimmte Aussagen wie Bassbereich oder Helligkeit stehen.

Das letztere Ergebnis lässt Versuche zu weiteren Vergröberung der Betrachtung der Frequenzkurve in Form der Faktorenanalyse, wie in [3] und [4] angewandt und auch für den Fall der Gitarre bereits praktiziert [9], als sinnvoll erscheinen. Insbesondere sind die vergröberten Betrachtungen nützlich, wenn, wie im Falle der untersuchten Studenteninstrumente, [3] und [4], Ergebnisse von Modalanalysen und/oder Maßangaben zunächst bzw. dauerhaft nicht zur Verfügung stehen. Dies trifft auch auf eine Stichprobe klassischer Gitarren, gefertigt von Studenten der WHZ im Zeitraum 2013 bis 2020, zu. Neben den Frequenzkurven und Typbezeichnungen standen für eine erste Auswertung keine weiteren Informationen zur Verfügung. Dieser Stichprobe wird sich eine Folgeveröffentlichung widmen.

Literatur

[1] Ziegenhals, G.: Subjektive und objektive Beurteilung von Musikinstrumenten. Eine Untersuchung anhand von Fallstudien. Dissertation TU Dresden 2010. Studientexte zur Sprachkom. Band 51 TUDpress 2010

[2] Fletcher, N.H., Rossing, T.D., The Physics of Musical Instruments. Springer, New York 1991

[3] Ziegenhals, G.: Akustische Untersuchungen studentischer Arbeiten – Violinen. Fortschritte der Akustik – DAGA 2021

[4] Ziegenhals, G.: Akustische Untersuchungen studentischer Arbeiten – Bratschen und Celli. https://www.fh-zwickau.de/aks/musikinstrumentenbau/forschung/veroeffentlichungen/

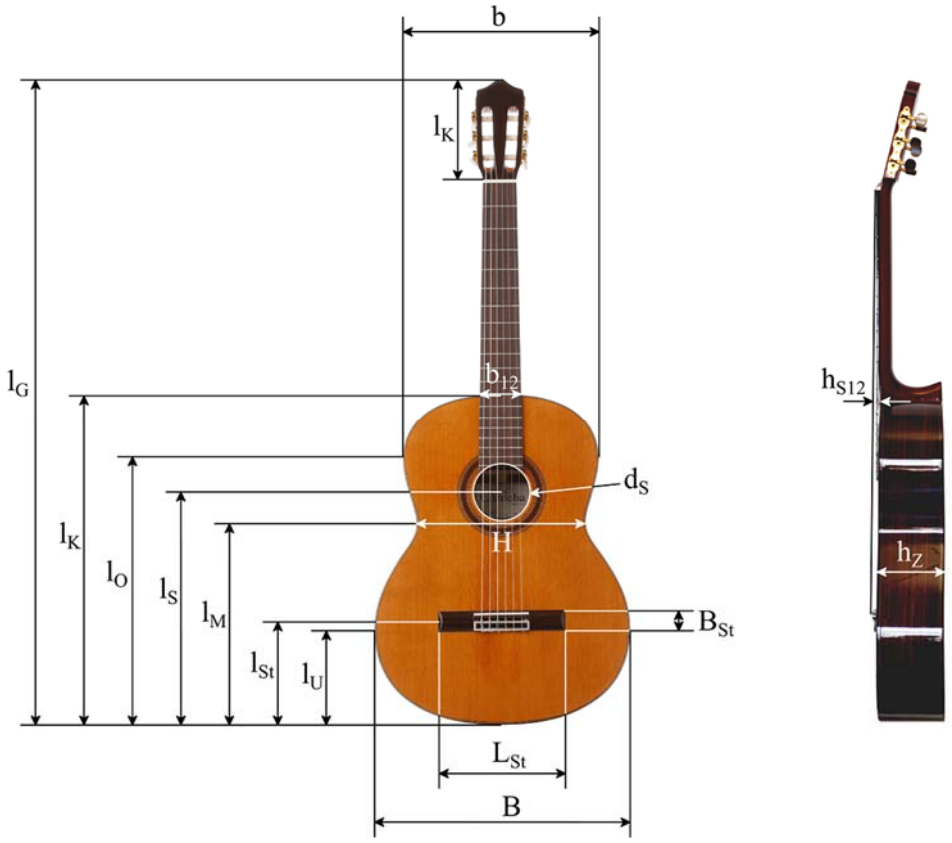
[5] Ziegenhals, G.: Klimatische Einflüsse auf die Ergebnisse von Frequenzkurvenmessungen. Fortschritte der Akustik – DAGA 2016

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

[7] Fleischer, H.: Admittanzmessungen an akustischen Gitarren. Forschungs- und Seminarberichte aus dem Gebiet Technische Mechanik und Flächentragwerke 01/97

[8] Fleischer, H.: Schwingungen akustischer Gitarren. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/98

[9] Ziegenhals, G.: Relevante Einflüsse der Holzqualität der Böden von Gitarren und Celli auf die akustischen Eigenschaften der Instrumente. Fortschritte der Akustik – DAGA 2015



Hauptabmessungen der Gitarre

	Symbol	f_1	f_2	f_3	L_1	L_2	L_3
Gesamtlänge	l_G	**-0,77782**	**-0,41927**	-0,30421	0,26903	0,1211	0,25832
Mensurlänge	-	**-0,65796**	**-0,59907**	-0,19205	**0,40101**	0,27158	0,04801
Schalllochdurchm.	d_S	-0,24886	**-0,52618**	-0,23801	0,10992	0,05064	0,15352
Zargenhöhe	h_Z	**-0,48629**	**-0,45052**	**-0,48068**	0,10191	0,28412	0,2254
Länge Unterbug	l_U	-0,11693	0,00921	-0,14443	0,10403	-0,1089	0,22804
Länge Steg	L_{St}	**-0,6001**	-0,29209	**-0,41534**	0,1502	-0,02365	0,17196
Länge Taille	l_M	**-0,44544**	**-0,50517**	**-0,51589**	0,13118	0,00692	0,24315
Länge Schallloch	l_S	**-0,79383**	**-0,46774**	-0,07223	0,32642	0,22153	0,13808
Länge Oberbug	l_O	**-0,60641**	**-0,61905**	**-0,42709**	**0,36052**	0,03421	-0,06323
Korpuslänge	l_K	**-0,8171**	**-0,52359**	-0,28151	0,31089	0,27213	0,22609
Breite Unterbug	B	**-0,71701**	**-0,57869**	-0,33478	0,14845	0,15884	**0,48187**
Breite Taille	H	-0,27497	**-0,44633**	-0,02256	-0,00329	0,0913	0,30244
Breite Oberbug	b	**-0,44471**	**-0,68144**	-0,18275	**0,34566**	0,06965	0,08434
Deckenstärke	-	0,32588	**0,44125**	-0,07241	-0,05408	-0,10334	-0,27072
Griffbrett S	-	**-0,43393**	**-0,53215**	**-0,53083**	0,33224	0,32857	0,07034
Griffbrett 12B	b_{12}	**-0,46407**	**-0,39101**	-0,22509	0,26152	**0,34277**	0,12791
Masse	-	-0,17285	-0,30215	-0,21104	0,20934	0,02078	-0,14893

Tabelle der Korrelationskoeffizienten zwischen Merkmalen der Frequenzkurven-Resonanzen 1 bis 3 mit den Hauptmaßen der Stichprobe Referenzgitarren. Berücksichtigt sind 35 Instrumente. Überschreitungen von $r_{g,\,5\%} = 0{,}34$ sind fett dargestellt. Die Darstellung oben beinhaltet nicht alle Maße und nicht alle im Bild eingetragene Größen wurden verwendet. Die Bezeichnungen sind historisch entstanden und wurden für diese Veröffentlichung nicht verändert. Griffbrett S – Griffbrettbreite am Sattelbund, Griffbrett 12B – Griffbrettbreite am 12. Bund. B_{St} wurde nicht betrachtet.