

Eine erweiterte Stichprobe klassischer Gitarren

Die ersten drei Resonanzen der Frequenzkurven (FK)

Gunter Ziegenhals

veröffentlicht Juni 2024

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

Motivation

Mit der Motivation, die zur DAGA 2023 in Zweifel gezogene Sinnfälligkeit der Frequenzkurve zu untermauern, entstand für die DAGA 2024 ein Vortrag [1], der über Untersuchungen an einer, gegenüber der den Arbeiten zu von Studierenden gefertigten Instrumenten [2] deutlich erweiterten Stichprobe klassischer Gitarren berichtet. Zur ursprünglichen Stichprobe, 82 studentische Arbeiten und 14 Wettbewerbsinstrumente des DMIP 2016 (je zwei Messungen) kamen 39 Referenzinstrumente aus dem Bestand des IfM und 165 Instrumente aus drei Manufakturserien hinzu. Insgesamt stehen also 314 Frequenzkurven-Messungen für die Untersuchungen zur Verfügung. Leider ließ es die Umfangsbeschränkung des DAGA-Papers nicht zu, alle Aspekte hinreichend zu beleuchten. Auf eine Diskussion zur Korrelationen der Merkmale der ersten drei Resonanzen der Frequenzkurve, musste beispielsweise verzichtet werden. Diese soll nun erneut in Form einer ergänzenden Veröffentlichung nachgeholt werden.

Hinweise: In die in [1] erläuterten Auswertungen gingen in die Faktorenanalysen nur 125 der Manufakturinstrumente ein. Die Reduzierung machte sich erforderlich, da das verwendete Statistikprogramm bei der Auswertung von 314 Frequenzkurven permanent abstürzte.

Die Kenntnis von [1] wird in diesem Text vorausgesetzt.

Auf die verwendete Methodik der Frequenzkurvenmessung wird hier nicht eingegangen, sondern auf die angegebene Literatur verwiesen.

Extraktion der Merkmale f_n und L_n

Frequenzkurven von Gitarren weisen im Bereich bis etwa 450 Hz drei typische Resonanzen auf, darunter zwei sehr markante, im Bereich 100 Hz und um 200 Hz. Diese beiden Resonanzen beruhen bekanntermaßen auf der Hohlraummode sowie der ersten Deckenmode der Gitarre. Im Falle der klassischen Gitarre folgt eine weitere eindeutige Resonanz bei etwa 400 Hz. Sie ist in den meisten Fällen auf die dritte Deckenresonanz zurückzuführen [3].

Die ersten drei Resonanzen sollen anhand ihrer Merkmale Frequenz f_n und Pegel L_n ($n = 1, 2, 3$) diskutiert werden. Für eine entsprechende Auswertung wurden drei Suchbereiche definiert, in denen nach diesen ersten drei Maxima gefahndet wird:

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

Diese Bereiche haben sich bei der Betrachtung klassischer Gitarren bewährt. In Einzelfällen muss der Suchbereich geringfügig modifiziert werden. Um diese Fälle zu erkennen, ist gegenwärtig eine visuelle Plausibilitätsprüfung anhand der Frequenzkurven erforderlich.

Korrelationen der Merkmale

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 einen Zusammenhang bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % übersteigen, sind fett dargestellt.

Tabelle 1: Korrelationskoeffizienten zwischen den Merkmalen der ersten drei Resonanzen der Frequenzkurven der in diesem Artikel diskutierten Gesamtstichprobe, $r_{g, 5\%} = 0,112$

Merkm.	f_1	L_1	f_2	L_2	f_3	L_3
f_1	1	0,2943	0,7335	0,2137	0,1376	-0,271
L_1	0,2943	1	0,0598	0,3004	0,0035	0,2299
f_2	0,7335	0,0598	1	0,1438	0,2320	-0,197
L_2	0,2137	0,3004	0,1438	1	-0,197	0,1510
f_3	0,1376	0,0035	0,2320	-0,197	1	-0,093
L_3	-0,271	0,2299	-0,197	0,1510	-0,093	1

Es fällt auf, dass fast alle Merkmale miteinander korrelieren. Dies steht in gewissen Widerspruch zu den Ergebnissen anhand der kleineren Stichprobe [2]. Dort zeigte sich zwar auch ein deutlicher Zusammenhang zwischen der ersten und zweiten Resonanz der Frequenzkurve, aber die dritte erwies sich als zum großen Teil unabhängig. Zum Vergleich zeigt **Tabelle 2** der Werte aus [2].

Tabelle 2: Korrelationskoeffizienten zwischen den Merkmalen der ersten drei Resonanzen der Frequenzkurven der Stichprobe aus [2], $r_{g, 5\%} = 0,19$

Merkm.	f_1	L_1	f_2	L_2	f_3	L_3
f_1	1	0,4859	0,631	0,2222	0,0054	-0,249
L_1	0,4859	1	0,1721	0,3403	0,0719	0,2027
f_2	0,631	0,1721	1	0,1625	-0,007	-0,199
L_2	0,2222	0,3403	0,1625	1	-0,236	-0,068
f_3	0,0054	0,0719	-0,007	-0,236	1	-0,001
L_3	-0,249	0,2027	-0,199	.0,068	-0,001-	1

Der Vergleich beider Korrelationstabellen ergibt zunächst, dass sich quasi alle in der kleineren Stichprobe festgestellte Trends bestätigen. Typischerweise verstärken sie sich bei Erweiterung der Stichprobe, mit wenigen Ausnahmen. Dies sind die Zusammenhänge $f_1 - L_1, L_1 - L_2$ und $f_3 - L_2$, also 20 % der Fälle.

Zusammenhänge zwischen den f_n

Die starke Korrelation zwischen f_1 und f_2 , wie sie schon in [2] diskutiert und begründet wurde, bestätigt sich sehr deutlich. Anders bei $f_1 - f_3$ und $f_2 - f_3$. Hier finden wir bei der erweiterten Stichprobe plötzlich eindeutige Korrelationen, wenn

auch deutlich schwächer ausgeprägt als für $f_1 - f_2$. In [2] und [3] gibt es bereits dahingehende Diskussionen, dass sich auch bei der separaten Untersuchung der Referenzinstrumente eine Korrelation $f_2 - f_3$ zeigt, diese aber nach der Herausnahme zweier deutlich größerer Instrumente verschwand. Findet man hier ähnliche Verhältnisse? **Abbildung 1** und **Abbildung 2** stellen die beiden Verteilungen dar.

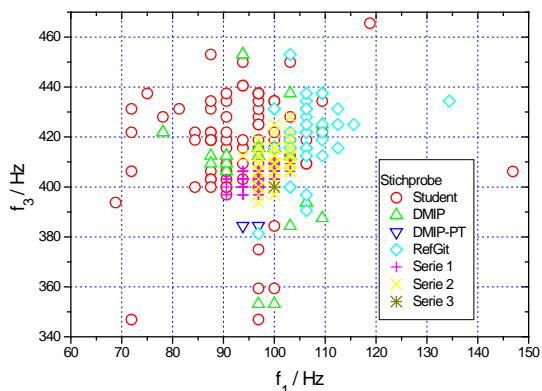


Abbildung 1: Verteilung der Resonanzfrequenzen f_1 und f_3 für die Gesamtstichprobe

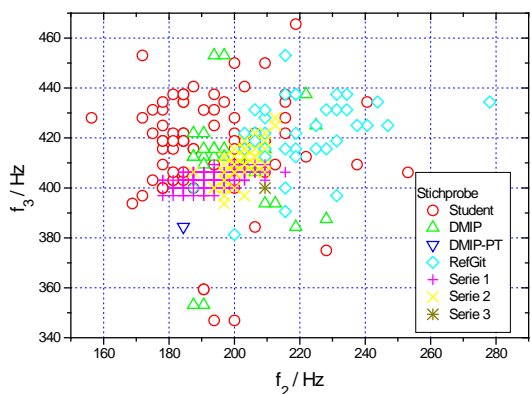


Abbildung 2: Verteilung der Resonanzfrequenzen f_2 und f_3 für die Gesamtstichprobe

Die beiden in [3] für die Korrelation $f_2 - f_3$ verantwortlichen Referenzgitarren fallen in der jetzigen Stichprobe nicht mehr aus dem Rahmen. Eines der beiden Instrumente, gut erkennbar bei $f_3 \approx 380$ Hz, liegt zwar etwas außerhalb der Hauptwolke, das zweite ist jedoch von Serie 1 praktisch eingebettet. In der aktuellen Stichprobe sind hingegen sechs Messpunkte interessant, die mit $f_3 < 360$ Hz. Zwei fallen in der Darstellung $f_2 - f_3$ zusammen. Nimmt man diese sechs Punkte aus der Statistik, verändern sich aber die Korrelationskoeffizienten gegenüber **Tabelle 1** nur geringfügig: $f_1 - f_3$: $r = 0,1146$ und $f_2 - f_3$: $r = 0,2364$. Die in [2] und [3] herausgearbeitete konstruktive Unabhängigkeit der Abstimmung der dritten Frequenzkurvenresonanz scheint sich nicht zu bestätigen. Als Argument gegen diese Vermutung lässt sich aber folgendes anführen: Das Gros der Instrumente entstammt aus Manufak-

turserien (siehe hierzu [1]). Das bedeutet, dass bei diesen Objekten jeweils keine konstruktiven Unterschiede bestehen. Für die Differenzierung der Objekte ist vorrangig die Materialdatenstreuung der verwendeten Hölzer sowie fertigungsbedingte Ursachen verantwortlich. Man kann nun wohl zurecht davon ausgehen, dass sich diese Einflüsse in prinzipiell gleicher Weise auf die verschiedenen Moden auswirken.

Zusammenhänge zwischen den f_n und L_n

Die für die Studentstichprobe in [2] festgestellten Zusammenhänge zwischen den f_n und den L_n bestätigen sich für die erweiterte Stichprobe im Wesentlichen. Die größte Veränderung findet man für den bereits in [2] am ausführlichsten diskutierten Zusammenhang $f_1 - L_1$. Die deutliche Korrelation schwächt sich eindeutig ab. Dies soll auch hier anhand der Streudarstellung der beiden Merkmale überprüft werden (**Abbildung 3**, vergleiche **Abbildung 19** in [2]).

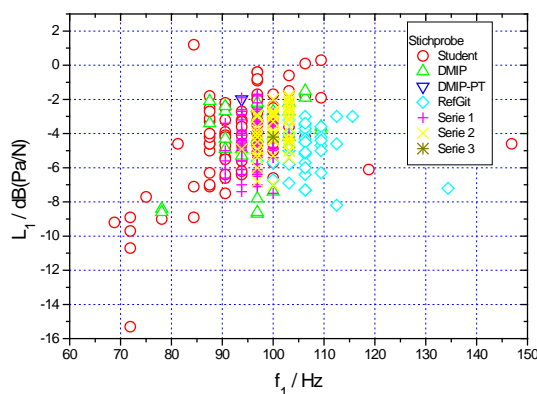


Abbildung 3: Verteilung der Resonanzmerkmale f_1 und L_1 für die Gesamtstichprobe

Man erkennt die Ähnlichkeit mit **Abbildung 19** in [2]. Hinzu gekommen ist lediglich ein weiterer „Ausreißer“, das Symbol unterhalb der Legende bei $f_1 \approx 135$ Hz. Es handelt sich hierbei um eine $\frac{3}{4}$ -Gitarre aus der Referenz-Stichprobe, also in der Tat wieder einen untypischen Vertreter. Dass nur ein weiterer „Ausreißer“ auftritt, darf nicht verwundern, da ja im Wesentlichen Instrumente aus drei Serien hinzugekommen sind. Diese Serieninstrumente verursachen auch den dominanten Block im Bereich f_1 um 100 Hz und L_1 um -4 dB. Dieser Punktblock ist zweifellos die Ursache für die Abschwächung der Korrelation $f_1 - L_1$. Die Serien 1 und 2 weisen zueinander zwar im Mittel die Abhängigkeit $f_1 - L_1$ immer noch auf, die in den Referenzgitarren verwendeten weiteren Serieninstrumente „verwässern“ diesen aber wieder.

Die Beobachtung anhand der Verteilung $f_1 - L_1$, in der sich der Einfluss der Manufakturserien deutlich zeigt, lässt es sinnvoll erscheinen, auch die Verteilung $f_2 - L_2$ diesbezüglich unter die Lupe zu nehmen. Die Korrelationsbetrachtung ergab ja, dass die erweiterte Serie nunmehr auch einen entsprechenden Zusammenhang aufweist. Die Verteilung der Merkmale $f_2 - L_2$ stellt **Abbildung 4** dar.

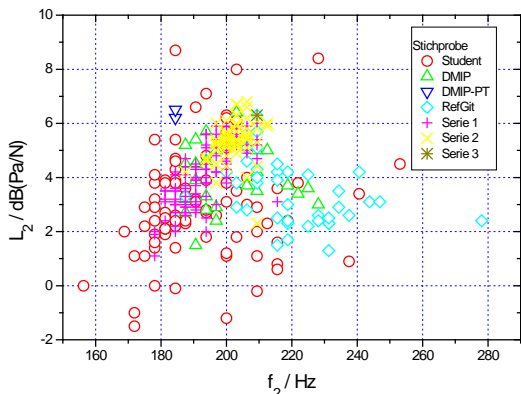


Abbildung 4: Verteilung der Resonanzmerkmale f_2 und L_2 für die Gesamtstichprobe

Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie für die Verteilung $f_1 - L_1$. Die Manufakturserien 1 und 2 befördern den Zusammenhang $f_2 - L_2$, die Instrumente der Referenzserie „verwässern“ ihn. Zur Erinnerung: Die meisten Instrumente der Referenzserie beruhen auf zwei weiteren Manufakturserien, wurden aber im Rahmen von Forschungsprojekten auf unterschiedliche Art und Weise modifiziert.

Zusammenhänge zwischen den L_n

Bei der in [2] geführten Diskussion zu den Zusammenhängen der Pegel der ersten drei Resonanzen der Frequenzkurven wurde zunächst davon ausgegangen, dass man von einer Korrelation der L_n ausgehen kann. Da die schwingenden Flächen der zugehörigen Moden hinreichend groß sind, sollte man erwarten, dass sich eine konstruktions- bzw. materialbedingte Schwingfreudigkeit der Decken jeweils auf alle drei Pegel gleich auswirkt. Man findet jedoch für die um die Wettbewerbsinstrumente DMIP 2016 erweiterte Stichprobe der studentischen Arbeiten eine entsprechende Korrelation nur für $L_1 - L_2$ und $L_1 - L_3$, für $L_2 - L_3$ nicht. Es zeigte sich weiterhin, dass für $L_1 - L_2$ und $L_1 - L_3$ die Instrumente des 0. und 1. Semesters, also frühe Arbeiten der Studierenden einen deutlicheren Zusammenhang verhindern. Der fehlende Zusammenhang $L_2 - L_3$ wird jedoch von allen studentischen Arbeiten verursacht. **Bemerkung:** Unter 0. Semester werden Arbeiten verstanden, die vor Aufnahme des Studiums, z. B. als Gesellenstück oder im Rahmen von Praktika entstanden.

Für die um die Serieninstrumente erweiterte Stichprobe findet sich nun die vorhersehbare positive Korrelation für alle drei betrachteten Pegel. Dabei verhalten sich die Teilstichproben DMIP 2016, Referenzgitarren sowie die beiden Manufakturserien durchweg wie erwartet. Das abweichende Verhalten der studentischen Arbeiten wird in der Darstellung der Verteilung $L_2 - L_3$ besonders anschaulich (Abbildung 5). Abbildung 23 in [2] zeigt deutlich den Einfluss der Instrumente des 0. und 1. Semesters auf die Schwächung des erwarteten Zusammenhanges $L_1 - L_2$. Eine entsprechende Darstellung für $L_2 - L_3$ fehlt. Die wird hier durch Abbildung 6 ergänzt.

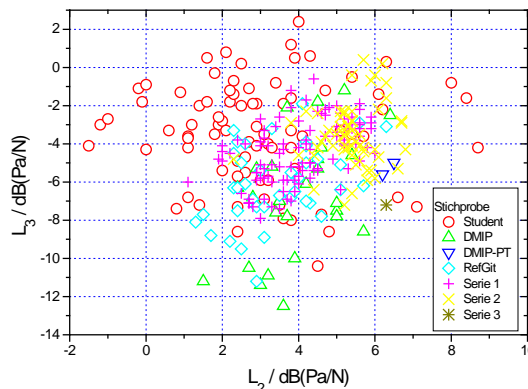


Abbildung 5: Verteilung der Resonanzpegel L_2 und L_3 für die Gesamtstichprobe

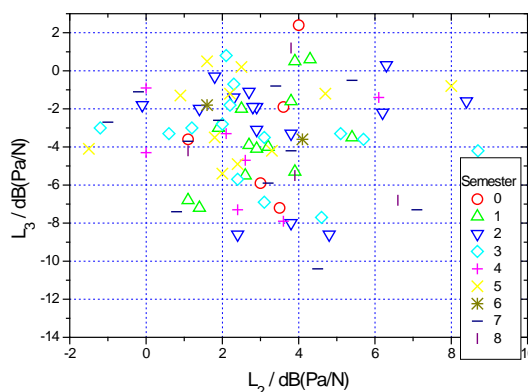


Abbildung 6: Verteilung der Resonanzpegel L_2 und L_3 für die Stichprobe aus [2] nach Semestern

Im Gegensatz zu den Verteilungen $L_1 - L_2$ und $L_1 - L_3$ zeigt sich bei $L_2 - L_3$ kein Einfluss des Semesters. Führt man den Effekt des fehlenden bzw. deutlich schwächeren Zusammenhanges bei den studentischen Arbeiten auf noch nicht entwickelte Fertigkeiten im unteren Semester zurück, so erklärt das aber nicht die Beobachtung hinsichtlich $L_2 - L_3$. Wie bereits mehrfach angeführt, ist für weitere Klärungen das Hinzuziehen von Informationen hinsichtlich detaillierter konstruktiver Ausführungen der Instrumente der Studierenden unerlässlich. Dies bleibt jedoch späteren Arbeiten vorbehalten.

Betrachtung weiterer Merkmale der FK

In [1] wurden neben der Faktorenanalyse auch einige klassische Frequenzkurvenmerkmale betrachtet. Dabei zeigte es sich, dass diese teilweise miteinander korrelieren. Dies betraf den Gesamtübertragungspegel und den Bereichssummenpegel $L_S(2...5 \text{ kHz})$. Letzterer und der Summenpegel im Bassbereich korrelieren hingegen nicht. Wir wollen nun hier ergänzend diese beiden Summenpegel im Verhältnis zum Spectral centroid (SC) der Frequenzkurven analysieren. Die Verteilung SC über $L_S(2...5 \text{ kHz})$ stellt Abbildung 7 dar.

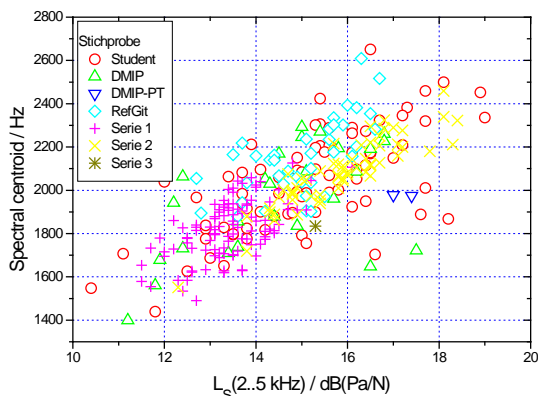


Abbildung 7: Verteilung von Summenpegel im Bereich 2 ... 5 kHz und Spectral centroid der FK, Gesamtstichprobe

Die Korrelation der beiden Merkmale ist auch ohne Berechnung des Korrelationskoeffizienten sofort erkennbar. Der Zusammenhang ist plausibel. Steigt die Übertragung im oberen Frequenzbereich, so erhöht sich auch der Spectral centroid der Kurve. Wie schon in [1] beobachtet, trennen sich die Manufakturserien, die studentischen Arbeiten bevölkern den gesamten Wertebereich.

Den Zusammenhang SC mit dem Summenpegel im Bassbereich stellt *Abbildung 8* dar.

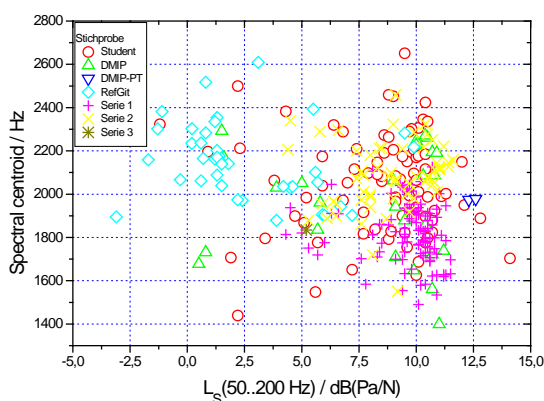


Abbildung 8: Verteilung von Summenpegel im Bereich 50 ... 200 Hz und Spectral centroid der FK, Gesamtstichprobe

Steigt die Übertragung im Bassbereich, so sollte der SC fallen. Dieser Zusammenhang zeigt sich in der Abbildung nicht so vordergründig wie im obigen Fall. Die Korrelationsrechnung ergibt jedoch einen entsprechenden sicheren, wenn auch weniger strengen Zusammenhang. Die Trennung der Manufakturserien ist auch hier deutlich.

Die klassischen Merkmale zeigen also vielfach Korrelationen, so dass man meinen könnte, bei der Auswertung mit einer sehr kleinen Merkmalsanzahl auskommen zu können. Dies schmälert aber in der Regel die Differenzierung in der Beurteilung der Ergebnisse.

Fazit

Die zur DAGA 2024 [1] und ergänzend mit diesem Beitrag vorgestellte Arbeit hatte zum Ziel, die Aussagekraft von Frequenzkurvenmessungen zu beurteilen. Dazu wurde eine bereits in [2] untersuchte Stichprobe aus studentischen Arbeiten und zum DMIP 2016 eingereichten Instrumenten, die man allesamt als Einzelstücke annehmen kann, um Instrumente aus drei Manufakturserien ergänzt. Da man diesen jeweils typische, einheitliche Konstruktionen unterstellen kann, sollten sie sich in den Auswertungen der Messungen voneinander und von den Einzelobjekten abheben. Andererseits wird die Streuung der Materialdaten nur über grobe, manuelle Sortierungen berücksichtigt. Dies und unvermeidbare Produktionsstreuungen werden die Bildung von sehr engen Serien-Punktwolken verhindern.

Diese Erwartungen bilden sich in der Tat in den Messergebnissen der Frequenzkurvenuntersuchungen, sowohl in der statistischen Faktorenanalyse [1] als auch in den physikalischen Merkmalen, ab. Dabei erweist sich die Trennung der Serien in der Faktorenanalyse als schärfer gegenüber der Merkmalsbetrachtung. Andererseits ist die Deutung der Ergebnisse anhand der Merkmale anschaulicher und damit der angestrebten Einflussnahme zugänglicher.

Die in [2] dargestellten Ergebnisse, ermittelt aus Messungen an einer Teilstichprobe, konnten mit der erweiterten Stichprobe im Wesentlichen bestätigt werden. Unklar bleiben einige Ergebnisse, die die studentischen Arbeiten betreffen. Mehrfach wird dabei auf die Experimentierfreudigkeit der Studierenden verwiesen. Wichtig wäre es aber, dies konkret mit Fakten und Ursachen zu untermauern. Hierzu sind weiterführende Arbeiten unter Einbeziehung konkreter konstruktiver Details dieser Instrumente dringend anzuraten. Dies betrifft nicht nur die hier speziell diskutierten Aktivitäten zu Klassischen Gitarren, sondern insbesondere auch den Streichinstrumentenbereich.

Die Untersuchungen der letzten Jahre, mit Schwerpunkt der im Zeitraum 2013 bis 2020 vermessenen studentischen Arbeiten, zeigte aber auch, dass die Wahl, der jeweils betrachteten Stichprobe der angestrebten Zielstellung angepasst sein muss. So kann die Einbeziehung „exotischer“ Objekte, also in ihrer Bauart mehr oder weniger deutlich von der sonst vorliegenden Stichprobe abweichender Instrumente helfen, vermutete Trends prägnanter hervortreten zu lassen. Allerdings besteht die Gefahr, dass diese Objekte zu falschen Schlussfolgerungen führen.

Literatur

- [1] Ziegenhals, G.: Eine Lanze für die Frequenzkurve. Fortschritte der Akustik – DAGA 2024
- [2] Ziegenhals, G.: Akustische Untersuchungen studentischer Arbeiten – Klassische Gitarren. 9/2022 ([Link](#))
- [3] Ziegenhals, G.: Referenzgitarren des IfM – Frequenzkurven, Moden, Anhängigkeiten. September 2022 ([Link](#))