

Akustische Untersuchungen studentischer Arbeiten – Klassische Gitarren

Gunter Ziegenhals

veröffentlicht September 2022

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

Einleitung

Vom Frühjahrssemester 2013 bis Herbstsemester 2019/2020 wurden die im Rahmen ihres achtsemestrigen Studienganges Musikinstrumentenbau an der Westfälischen Hochschule Zwickau (WHZ) von den Studenten vorgelegten Instrumente jeweils einer Frequenzkurvenmessung am Institut für Musikinstrumentenbau e. V. (IfM) unterzogen. Beschrieben ist die dafür verwendete Messmethodik ausführlich in [1]. Die Ergebnisse der Messungen erschienen zwar in den zu den Instrumenten verfassten Dokumentationen, jedoch erfolgte keine übergreifende Auswertung. Zeit dafür fand sich für den Autor erst nach Auslaufen seiner Professur im Jahr 2020. Nachdem bereits 2021 über die Ergebnisse zu den Streichinstrumenten veröffentlicht wurde, [2] und [3], geht es nunmehr um die Gitarren, zunächst die in klassischer Bauform.

Die in den Beiträgen zu den Untersuchungen an studentischen Instrumenten diskutierten Auswertungen der vorgenommenen Messungen folgen keinem streng einheitlichen Schema. Vielmehr wurden für die einzelnen Instrumententypen unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt.

Wie bereits in [2] in Zusammenhang mit dem Fall Geigen diskutiert, stellt sich aufgrund der langen Messphase die Frage äußerer Einflüsse auf die Ergebnisse. Dazu sei auf in [4] beschriebene Untersuchungen über sechs Jahre (2009 bis 2015) an zwei Referenzgitarren verwiesen. Beide lagerten bereits seit 2000 unter klimatisierten Bedingungen und unter um einen Halbton verringerter Saitenspannung im IfM.

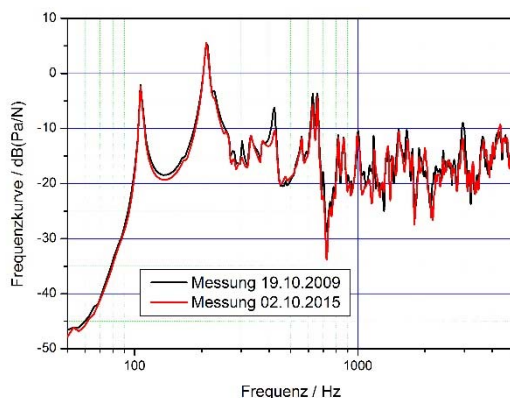


Abbildung 1: Vergleich der Frequenzkurven einer Referenzgitarre des IfM, aufgenommen im Abstand von sechs Jahren

Abbildung 1 zeigt die erste und die letzte Frequenzkurvenmessung von Referenzgitarre 1 des IfM (Takamine) im Rahmen dieser Untersuchungen. Man erkennt durchaus geringe Differenzen, die aber über einerseits einen Restklimaefluss, trotz klimatisierter Lagerung, und die natürlichen Veränderungen im Holz durch Alterung zu erklären sind.

Stichprobe und Faktorenanalyse

Im angegebenen Zeitraum wurden insgesamt 82 klassische Gitarren, hergestellt von Studierenden, vermessen, davon

- 76 spanische Modelle
- 2 Flamenco Gitarren
- 2 Weißgerber Modelle
- 1 Wiener Gitarre
- 1 Baritongitarre.

Weiterhin wurde die Stichprobe der 14 zum Deutschen Musikinstrumentenpreis (DMIP) 2016 eingereichten klassischen Gitarren, für die jeweils zwei Messungen im Abstand von sechs Wochen vorliegen, als Referenzobjekte einbezogen. Die Auswertungen beruhen also auf den Daten von 110 Frequenzkurvenmessungen.

Die Verarbeitung der Frequenzkurvendaten erfolgte bei diesen Untersuchungen nicht vordergründig anhand von bereits festgelegten, aus den Frequenzkurven gewonnenen Merkmalen, wie z. B. Peakfrequenzen oder Bereichssummen (siehe hierzu [1]), sondern basiert im Wesentlichen auf der Faktorenanalyse. Man muss natürlich diese Vorgehensweise hinterfragen, da aus rein statischen Analysen nicht unmittelbar Daten für Veränderungen an den Instrumenten bzw. in Bezug auf deren Konstruktion ableitbar sind. Aussagekräftiger sind hier Informationen zu Resonanzen und deren Ursprungsmoden. Entsprechende Untersuchungen an Referenzgitarren des Instituts für Musikinstrumentenbau e.V. (IfM) zeigen allerdings, dass aus den Peaks der Frequenzkurve nur bedingt auf die verursachende Instrumentenmode geschlossen werden kann [5]. Für eine sichere Zuordnung ist in vielen Fällen eine Modalanalyse (ggf. in eingeschränkter Form) erforderlich. Insofern ist der hier gewählte Weg, wie schon im Falle der Streichinstrumente, legitim.

Ursprünglich bestand der Plan darin, zunächst eine Auswertung nur anhand der Daten der Studenteninstrumente vorzunehmen und erst in einer zweiten Runde die DMIP-Daten einzubeziehen. Erfahrungen bei den vergleichbaren Auswertungen der Daten der Streichinstrumente zeigten aber, dass die Stichprobenzusammensetzung einen sehr starken Einfluss auf die Ergebnisse der Faktorenanalyse ausübt. Dadurch kann es schnell zu falschen Folgerungen aus den Resultaten kommen, wenn man die Stichprobe verändert (siehe hierzu [3]). Alle im Weiteren dargestellten Ergebnisse entstanden also jeweils durch Analyse der gesamten Stichprobe, auch wenn in vielen Fällen nur Ergebnisse für einen Teil der Instrumente dargestellt sind, wie z. B. in Zusammenhang mit dem Einfluss des Herstellungssemesters.

Die Faktorenanalyse, bei der die Frequenzkurven der einzelnen Instrumente als die Variablen behandelt werden, liefert sechs Faktoren mit einem Eigenwert $\geq 2,5$. Mit 66 % Anteil

an der Beschreibung der Unterschiede ist Faktor 1 der dominierende Faktor. Korreliert man die Faktorladungen für die einzelnen Instrumente mit den Charakteristiken der Frequenzkurven, so ergeben sich folgende Aussagen:

Faktor 1

Kennzeichnet 66 % der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für eine tiefe, zugleich scharfe und nicht mittenbetonte Abstimmung des Instrumentes sprechen.

Faktor 2

Kennzeichnet 2,8 % der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für eine höhere Abstimmung der ersten beiden Resonanzen aber nicht für eine generell hohe Abstimmung stehen.

Faktor 3

Kennzeichnet 2,7 % der Unterschiede in den Frequenzkurven. Weist auf eine generell kräftige Abstrahlung hin.

Faktor 4

Kennzeichnet 2,2 % der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für einen eher hellen, aber nicht scharfen Klang des Instrumentes sprechen.

Faktor 5

Kennzeichnet 1,8 % der Unterschiede in den Frequenzkurven. Weist auf einen klaren, eher nicht hellen Klang des Instrumentes hin.

Faktor 6

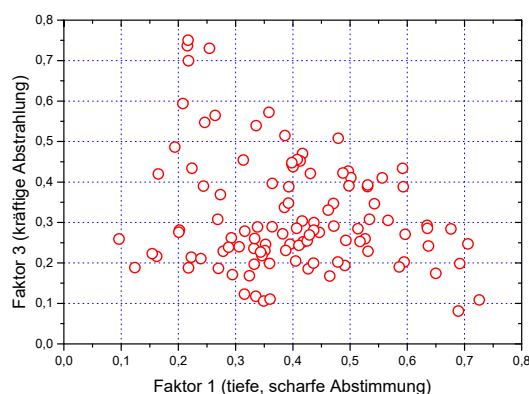
Kennzeichnet 1,6 % der Unterschiede in den Frequenzkurven. Weist auf einen nasalten Klang des Instrumentes hin.

Die für die Faktoren als charakteristisch beschriebenen Tendenzen gelten nur im direkten Sinne. Wenn also für Faktor 1 hohe Faktorladungen mit einer tiefen Abstimmung korrelieren heißt das nicht, dass niedrige Faktorladungen auf eine hohe Abstimmung hindeuten. Es sind lediglich die tiefen Bereiche der Frequenzkurve nicht stark ausgeprägt. Vergleiche hierzu auch entsprechende Ausführungen in [3].

Betrachtungen zur generellen Abstimmung

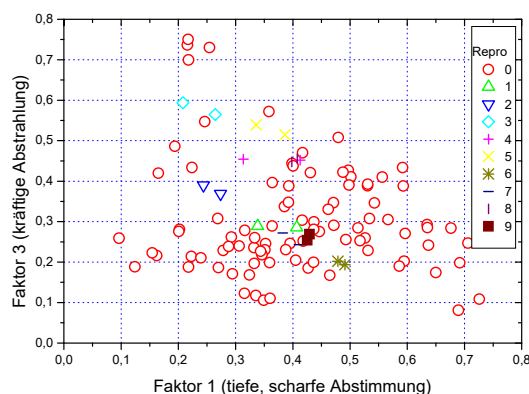
Naheliegender erscheint zunächst eine Konzentration auf eine Gegenüberstellung hohe oder eher tiefe Abstimmung. Dies würde durch die Ladungen der Faktoren 1 und 4 repräsentiert. Allerdings zeigen die Korrelationen zu den frequenzabhängigen Merkmalen, dass Faktor 3, der auf eine ausgewogene Abstimmung mit insgesamt kräftiger Abstrahlung hinweist, hier eindeutige Zusammenhänge zeigt. Außerdem weist er einen etwas höheren Anteil an der Beschreibung der Unterschiede auf. Die Betrachtungen zur Abstimmung sollen deshalb anhand der Faktoren 1 und 3, bzw. deren Ladungen, erfolgen. **Abbildung 2** zeigt die entsprechende Verteilung der Faktorladungen. Wie bereits bei vorangehenden Veröffentlichungen wird in den Achsbeschriftungen der Begriff Faktor anstelle Faktorladung verwendet. Jeder Punkt bzw. jedes Symbol im Diagramm entspricht einem Instrument der Ge-

samtstichprobe. Man erkennt zwei Gruppen von Instrumenten. Die eine liegt auf einer Diagonalen von links oben nach rechts unten. Diese Instrumente sind also entweder eher ausgewogen oder eher tief abgestimmt. Die Abstimmung verändert sich quasi gleitend auf der gedachten Linie. Eine zweite Gruppe weist eine etwa konstante, eher geringe Abstrahlung und eine eher wenig ausgewogene Abstimmung auf, variiert aber stark im tiefen Bereich. Betrachtet man die Verteilung in **Abbildung 2** in Bezug auf die Teilstichproben Studenten und DMIP, so fällt auf, dass die DMIP-Instrumente (also Instrumente gestandener Gitarrenhersteller) nicht in den Bereich einer besonders tiefen Abstimmung fallen.



**Abbildung 2: Verteilung der Faktorladungen 1 und 3
Stichprobe klassische Gitarren**

Zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit der Werte der Faktorladungen werden Daten der im Rahmen des DMIP 2016 vermessenen Instrumente herangezogen. Sie wurden, wie eingangs ausgeführt, zweimal untersucht. **Abbildung 3** stellt die Verteilung der Faktorladungen 1 und 3 nochmals dar, wobei 9 Paare der Reproduzierbarkeitsmessungen markiert sind. Die entsprechende Markierung aller 14 Paare erlaubt das verwendete Programm nicht.



**Abbildung 3: Verteilung der Faktorladungen 1 und 3; neun
zweimal gemessene Instrument sind markiert**

Man erkennt bei einzelnen Paaren gewisse Differenzen, jedoch bleibt die Zuordnung zu den Abstimmungsgruppen eindeutig erhalten. Es zeigt sich darüber hinaus die erwähnte, nicht zu tiefe Abstimmung der Wettbewerbsinstrumente.

Etwas merkwürdig erscheint Faktor 2. Seine Ladungen korrelieren positiv mit den Frequenzen der beiden ersten Resonanzen der Frequenzkurve. Die in **Abbildung 4** dargestellte mittlere Frequenzkurve der DMIP-Instrumente zeigt eindrucksvoll die Dominanz dieser beiden Resonanzen. Sie sind typisch für die meisten Streich- und Zupfinstrumente. Es lohnt sich möglicherweise, kurz diesen Faktor zu beleuchten.

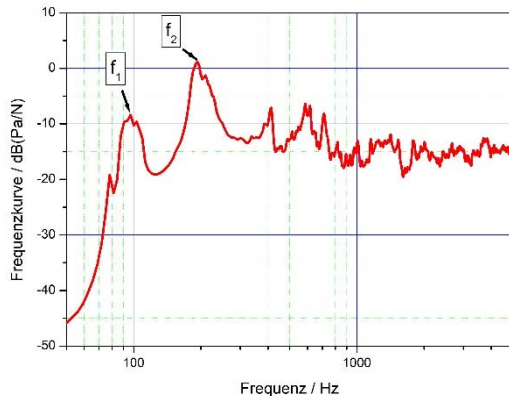


Abbildung 4: Mittlere Frequenzkurve der 14 zum DMIP 2016 eingereichten Gitarren

Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass die erste Resonanz auf der Helmholtzresonanz der im Korpus eingeschlossen Luft und der zweite Peak auf der ersten Deckenresonanz beruhen. Weiterhin ist bekannt, dass die Helmholtzresonanz eine Kopplung von Hohlraummode und Deckenmode darstellt. Manipulationen an der Decke verschieben immer beide Resonanzfrequenzen in die gleiche Richtung. So verwundert es in keiner Weise, dass die beiden Frequenzen bei Gitarren eindeutig korrelieren. Methoden zur Abstimmung der Decke sind nun wohl bekannt. Neben der Materialwahl kommt insbesondere die Beeinflussung der Steifigkeit über die Dickenverteilung und die Beleistung zum Einsatz. Weiterführend sei hier auf [5] und [6] verwiesen.

Untersuchungen an einer im IfM dauerhaft vorliegenden Stichprobe von Gitarren (Referenzgitarren) ergaben, dass die Merkmale der dritten Resonanz der Frequenzkurve nicht mit der Frequenz der ersten beiden Peaks korrelieren. Stimmt man also die Decke im Sinne der beiden ersten Resonanzen höher ab, so folgt dem nicht die dritte Resonanz. Interessant ist nun die Frage, wie sich das für höhere Bereiche darstellt. Mit Faktor 2 steht nun ein Einzahlmarker für f_1 und f_2 zusammen zur Verfügung. Andererseits beschreibt Faktor 4 die Abstimmung der Instrumente in Bezug auf die Helligkeit, also den Bereich 2 kHz bis 4 kHz. **Abbildung 5** stellt die Verteilung der beiden Faktoren dar. Es zeigt sich in gewisser Weise ein ähnliches Bild wie für die Faktoren 1 und 3. Die Verteilung weist auf keinen, zumindest keinen deutlichen Einfluss der

Grundabstimmung der Decke auf die höheren Frequenzbereiche hin. Allerdings ließe sich auch hier für einen Teil der Instrumente eine Diagonale von links oben nach rechts unten in das Bild hineininterpretieren. Diese würde für die auf dieser Linie liegende Teilmenge der Instrumente darauf hindeuten, dass eine höhere Grundabstimmung der Decke die höheren Frequenzbereiche abschwächt. Dieser Effekt ließe sich durchaus erklären. Eine höhere Abstimmung geht oft mit einer höheren Steifigkeit einher. Die wiederum kann die Schwingungsamplituden verringern.

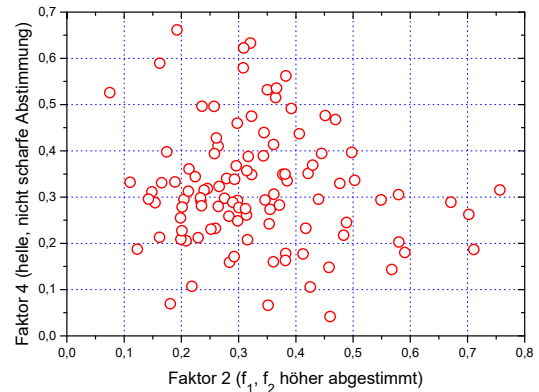


Abbildung 5: Verteilung der Faktorladungen 2 und 4

Diese Beobachtung stärkt die Erkenntnis, dass für eine deutliche Beeinflussung der höheren Frequenzbereiche spezielle Abstimmungsarbeiten erforderlich sind. Die Grundabstimmung der Decke legt hier bestenfalls ein Fundament.

Einfluss der Jahreszeit

Die studentischen Arbeiten entstehen jeweils komplett im Herbst- bzw. Frühjahrssemester, also einmal in einem etwas trockeneren und einmal etwas feuchteren Werkstattklima. Für den hier einbezogenen Wettbewerb um den Deutschen Musikinstrumentenpreis galt als Einreichungstermin Ende August. Eine Vorgabe begrenzt die Herstellungszeit auf die letzten drei Jahre. Erfahrungen zeigen jedoch, dass die eingereichten Objekte sehr häufig zeitnah zur Abgabe, d. h. im Frühjahr/Sommer entstehen, also in einem noch etwas feuchteren Klima im Vergleich zu den Instrumenten des Frühjahrssemesters. Es lohnt sich also einmal zu überprüfen, ob sich diese drei Bauperioden in den Analyseergebnissen widerspiegeln.

Abbildung 6 beleuchtet das Phänomen wiederum über die prinzipielle Abstimmung anhand der Faktoren 1 und 3. Bereits in früheren Untersuchungen konnte ein schwacher, aber prinzipieller Einfluss der Jahreszeit auf die Frequenzkurvenmessung nachgewiesen werden [4]. Auch im jetzigen Fall zeichnet sich eine schwache Tendenz ab. Im Winter entstehen offenbar tendenziell mehr tief abgestimmte Instrumente im Vergleich zu Frühjahr/Sommer. Allerdings wird diese Tendenz stark durch die Gruppe der Wettbewerbsinstrumente genährt. Auch muss man wohl schauen, wie die tief abgestimmten Instrumente im Herbstsemester einzuordnen sind.

Hierzu bietet sich die Betrachtung des Semestereinflusses, also der Entwicklung der Studenten an.

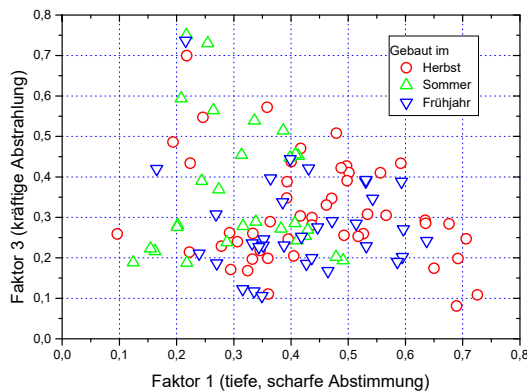


Abbildung 6: Klimaeinfluss - Faktoren 1 und 3

Semestereinfluss

Der Semestereinfluss soll zunächst wieder anhand der grundlegenden Abstimmung, über die Verteilung der Faktoren 1 und 3 analysiert werden (Abbildung 7).

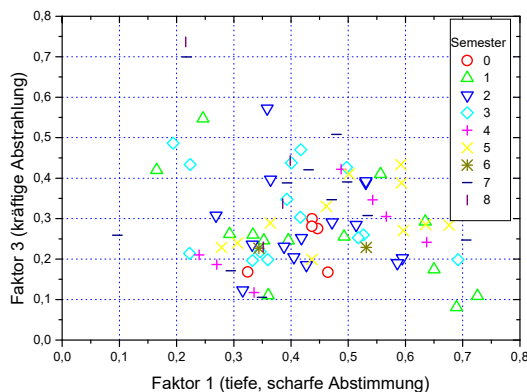


Abbildung 7: Verteilung der Faktorladungen 1 und 3 nach Semestern

In **Abbildung 7** sind nur die Studenten-Instrumente enthalten. Unter Semester 0 werden Instrumente verstanden, die die Studierenden bereits vor ihrem Studium, typischerweise das Gesellenstück, fertigten und zu Vergleichszwecken in die Stichprobe einbrachten.

Eine schwache Tendenz ist erkennbar, Sie deutet darauf hin, dass in unteren Semestern sich die Instrumente eher in der mehr oder weniger tief abgestimmten Gruppe befinden, die Instrumente auf der Diagonalen ausgewogene-tiefe Abstimmung eher aus den höheren Semestern hervorgehen. Dies lässt zwei Folgerungen zu: 1. Erst mit wachsender Berufspraxis erlernt man, dass Instrument auch für eine starke Abstrahlung im höheren Frequenzbereich abzustimmen. 2. Erst mit einer gewissen Entwicklungsstufe empfindet man höher abgestimmte Instrumente als sinnvoll. Letzteres z. B. im Ergebnis einer Reihe von Kundenkontakten, die ja auch Teile der Studierenden bereits pflegen. Diese schwache Tendenz könnte

natürlich auch eine Erklärung für den gefundenen kleinen Einfluss der Jahreszeit sein. Andererseits finden sich bei den klassischen Gitarren ähnlich wie im Falle Cello [3] kaum Hinweise auf Einflüsse einer Entwicklung von Semester zu Semester. Insbesondere bildet sich bei den klassischen Gitarren nicht wie im Violinen-Falle [2] die Bauvorgabe für die Instrumente des ersten Semesters ab.

Es lohnt sich zweifellos noch ein Blick auf die Grundabstimmung der Decke. Hierzu befindet sich in **Abbildung 8** noch einmal die Verteilung der Faktoren 2 und 4, diesmal aber nur mit den Studenteninstrumenten nach Semestern und mit veränderten Achsbereichen(!). Wiederum ergibt sich nur eine vage Tendenz zu einer höheren Grundabstimmung der Decke bei Instrumenten aus niedrigeren Semestern, also einer etwas dickeren (sichereren) Decke. Insbesondere tragen dazu die Instrumente des 0. Semesters bei.

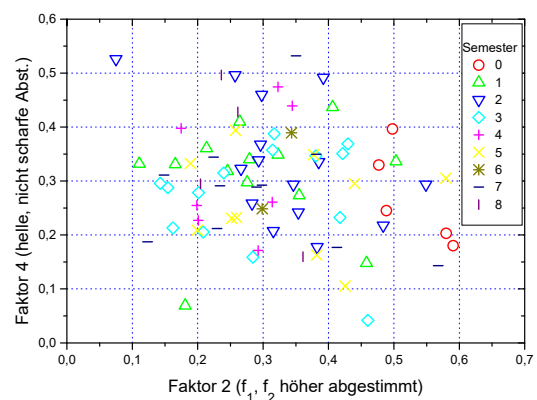


Abbildung 8: Verteilung der Faktorladungen 2 und 4 nach Semestern

Studenten-Gitarren im Umfeld anderer Instrumente

Für diese Betrachtung werden die studentischen Gitarren den Instrumenten des DMIP 2016 gegenübergestellt, zunächst wiederum anhand der Faktoren 1 und 3 (**Abbildung 9**).

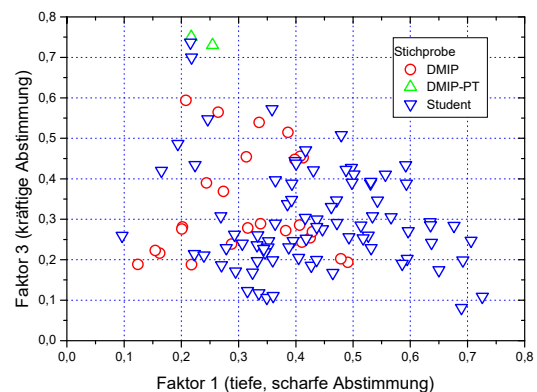


Abbildung 9: Verteilung der Faktorladungen 1 und 3 für die studentischen Arbeiten und die Wettbewerbsinstrumente DMIP 2016

Es sind in allen Diagrammen mit Instrumenten der Untergruppe DMIP 2016 jeweils beide Messungen der Wettbewerbsinstrumente dargestellt! Man erkennt, dass die DMIP-Instrumente tendenziell ausgeglichener und weniger tief im Vergleich zu den Studenteninstrumenten abgestimmt sind. Das trifft auch noch im Großen und Ganzen zu, wenn man die Exemplare der unteren Semester unbeachtet lässt. Ein besonderer Fall sticht in der Verteilung auffällig heraus. Die beiden Messungen des Siegerinstrumentes des DMIP 2016 fallen praktisch mit zwei Messungen studentischer Arbeiten zusammen. Dieses zunächst etwas merkwürdige Zusammentreffen lässt sich allerdings sehr leicht erklären. Die beiden Studentenarbeiten stammen aus einer Hand und wurden im siebenten und achten Semester vorgelegt. Nach seinem Abschluss machte sich der Absolvent mit einer Gitarrenbauwerkstatt selbständig und reichte ein Instrument seiner ersten Serie, die er bereits während des Studiums entwickelte, zum Wettbewerb ein. Und das sehr erfolgreich, wie man sieht!

In Bezug auf die Grundabstimmung der Decke zeigte sich bei den studentischen Arbeiten ein schwacher Trend, dass Instrumente aus niedrigeren Semestern etwas höher abgestimmt sind. Dies wurde auf eine etwas größere Wahl der Deckenstärke aus Sicherheitsgründen zurückgeführt. Interessant ist nun, ob sich dieser Trend auch unter Einbeziehung der Instrumente der gestandenen Hersteller bestätigt. **Abbildung 10** zeigt die entsprechende Verteilung.

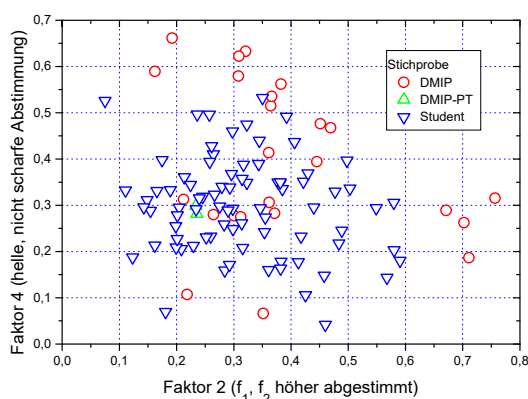


Abbildung 10: Verteilung der Faktorladungen 2 und 4 für die studentischen Arbeiten und die Wettbewerbsinstrumente DMIP 2016

Es ergibt sich ein überraschendes Bild. Zwei der Wettbewerbsinstrumente (je zwei Messungen = vier Punkte im Diagramm!) fallen deutlich in Richtung höherer Grundabstimmung heraus. Wie sich das in der Bewertung im Rahmen des DMIP auswirkt, lässt sich an dieser Stelle noch nicht sagen. Allerdings liegen die beiden Instrumente in der Verteilung der Faktorladungen 2 und 4 weitab des Preisträgerinstrumentes, um das sich aber interessanterweise hier eher die studentischen Arbeiten gruppieren.

Ergebnisse für die besonderen Bauformen

Zur Gesamtstichprobe gehörten auch sechs Instrumente, die von der klassischen, spanischen Bauform abweichen. Es stellt sich natürlich die Frage, inwieweit sich die Instrumente in der Verteilung der Faktoren von den typischen Instrumenten abheben. Diese besonderen Bauformen sind in der erneut dargestellten Verteilung der Faktoren 1 und 3 in **Abbildung 11** gekennzeichnet.

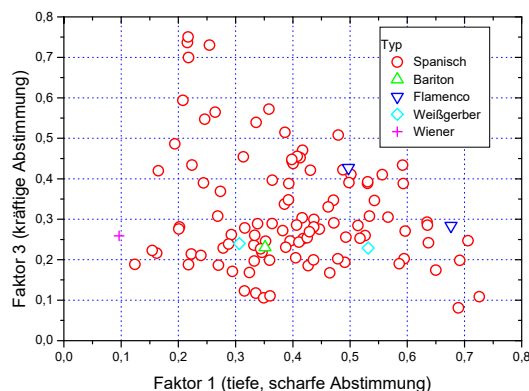


Abbildung 11: Verteilung der Faktorladungen 1 und 3 unter Kennzeichnung der besonderen Bauformen

Die besonderen Bauformen stellen sich keineswegs als Exoten in der Verteilung dar. Einzig das kleine Wiener Modell scheint etwas separat zu liegen. Dieses Ergebnis zeigt sich auch für andere Verteilungen der Faktorladungen. Für die Faktorladungen 2 und 4 illustriert dies **Abbildung 12**.

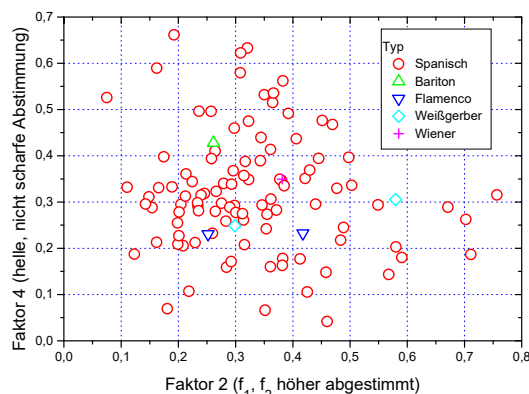


Abbildung 12: Verteilung der Faktorladungen 2 und 4 unter Kennzeichnung der besonderen Bauformen

Diese geschilderte Beobachtung korrespondiert mit Ergebnissen von Klanganalysen gespielter Musik auf verschiedenen Instrumenten. Hier zeigte sich, dass die Variationsbreite des Gitarrenklangs im Vergleich verschiedener Modelle und weiterer Randbedingungen, wie Raum, Musikstück und Musiker gegenüber anderen Instrumententypen klein ausfällt [1].

Bewertung der Faktoren

Zu den Studenteninstrumenten liegen keine Bewertungen durch hinreichend qualifizierte Musiker vor. Die Einbeziehung der Wettbewerbsinstrumente DMIP 2016 lieferte in dieser Beziehung bislang nur den Verweis auf das Preisträgerinstrument als Hinweis für einen mutmaßlichen Gut-Bereich der betrachteten Faktoren bzw. deren Ladungen. Für die Wettbewerbsinstrumente steht aber eine vollständige Bewertung durch Musiker zur Verfügung. Schauen wir uns zunächst die mittlere Bewertung der Juroren für die Instrumente an. In **Abbildung 13** sind dazu die Ränge, die sich aus der Summe der Bewertungen der Musiker für klangliche (akustische) Aspekte ergeben, eingetragen. Erkennbar ist, dass Instrumente mit einer kräftigen Abstimmung wohl bessere Bewertungen erhalten. Weiterhin liegt offenbar eine nicht zu tiefe Abstimmung im Trend. Diese Aussagen fallen aber nicht wirklich eindeutig aus. Den deutlichsten Ausreißer stellt das Instrument mit Rang 10 dar.

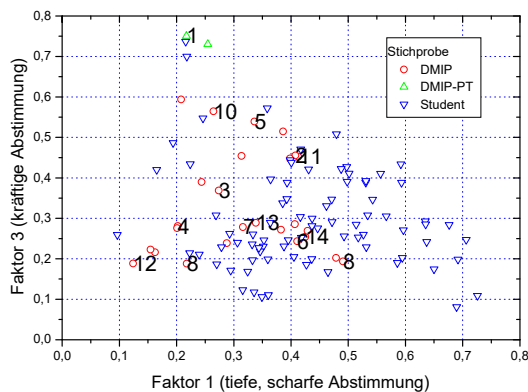


Abbildung 13: Verteilung der Faktorladungen 1 und 3 Gesamtstichprobe mit Rangfolge in der Bewertung der Wettbewerbsinstrumente durch die Juroren

Um weitere Informationen aus der Verteilung ziehen zu können werden in **Abbildung 14** nur die Wettbewerbsinstrumente gekennzeichnet, die von mindestens einem der fünf Juroren auf Rang 1 oder Rang 14 (letzter Rang) gesetzt wurden. Die anhand der Verteilung in **Abbildung 13** vermutete Tendenz bestätigt sich. Eine kräftige, nicht zu tiefe Abstimmung wird offenbar bevorzugt.

Andererseits zeigt sich wieder die Ausnahme, diesmal noch ein wenig krasser. Ein Instrument wurde von einem Juror auf Platz 1 und von einem anderen auf Platz 14 gesetzt. Um dies im Diagramm darstellen zu können, wurde eine Platzierung der ersten und die andere der zweiten Messung zugeordnet. Wie ist nun eine solche Bewertung zu erklären? Die Ursache stellen offenbar sogenannte Typstrukturen bei Musikern und auch reinen Zuhörern dar, wie sie BLUTNER bereits Ende der 1980er Jahre bei Untersuchungen mit Klassischen Gitarren beobachtete [7]. Es zeigte sich, dass Teile seiner Testpersonen eine eher hohe, andere eine eher tiefe Abstimmung und daraus resultierende Klangfarben bevorzugen. Allerdings ergab sich

in seinen Tests eine Präferenz häufiger in Richtung einer Betonung der Tiefen.

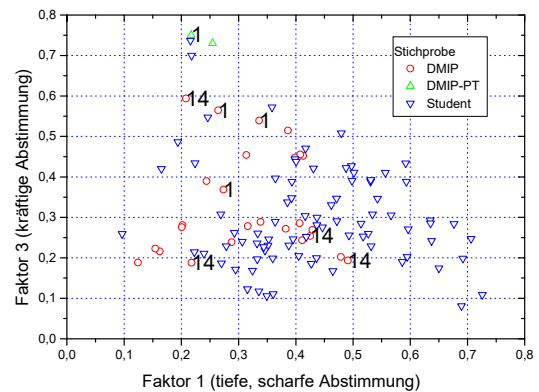


Abbildung 14: Verteilung der Faktorladungen 1 und 3 Gesamtstichprobe mit besten und schlechtesten Bewertungen der Wettbewerbsinstrumente durch die Juroren

Projiziert man die Bewertung der fünf Juroren des DMIP 2016 auf die Gesamtstichprobe, liegt die Mehrzahl der studentischen Arbeiten leider im Bereich der weniger guten Urteile. Vergleicht man **Abbildung 13** und **Abbildung 14** mit **Abbildung 7** so ergibt sich auch in Sachen Musikerbewertung kein Einfluss des Semesters.

Abschließend hierzu sei noch überprüft, wie eine höhere Grundabstimmung der Decke gesehen wird. Hier ist die Verteilung der Ladungen der Faktoren 2 und 4 samt Bewertung der DMIP-Instrumente in **Abbildung 15** dargestellt. Es zeigt sich, dass eine zu hohe Grundabstimmung der Decke eher nicht honoriert wird.

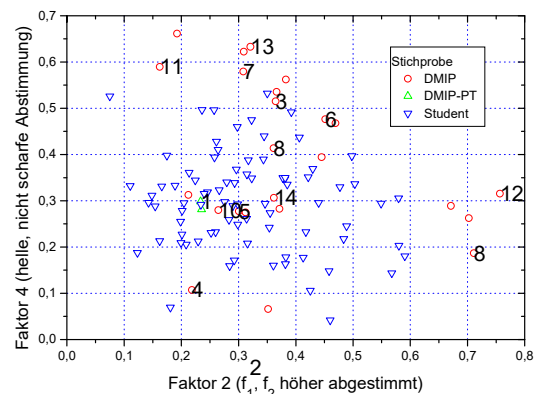


Abbildung 15: Verteilung der Faktorladungen 2 und 4 Gesamtstichprobe mit Rangfolge in der Bewertung der Wettbewerbsinstrumente durch die Juroren

Gleichzeitige Berücksichtigung mehrerer Faktoren

Bislang wurden bei der Analyse der Gitarrenfrequenzkurven jeweils zwei Faktoren bzw. deren Ladungen betrachtet. Dabei erfolgte vorrangig ein Rückgriff auf die Faktoren mit dem höchsten Einfluss bzw. anschauliche Einflüsse wie tiefe/hohe Abstimmung. Für einen Folgeschritt bietet es sich geradezu an, die Unterschiede der Frequenzkurven der Instrumente unter Einbeziehung von mehr als zwei Faktoren zu beschreiben. Die Faktorladungen bilden einen N-dimensionalen Wertebereich. Darüber hinaus sind sie auf den Bereich -1 bis +1 normiert. Man kann also problemlos den Abstand der Objekte in diesem Raum berechnen. Nun wird es sehr unübersichtlich, wenn man die Abstände zwischen allen Objekten betrachtet. Im Falle der Auswertungen der studentischen Arbeiten Violine [2] konnten drei repräsentative Instrumente in die Stichprobe integriert werden. Betrachtet wurden die Abstände der Objekte zu diesen drei „Anker-Instrumenten“. Im vorliegenden Gitarrenfall standen derartige Instrumente nicht zur Verfügung. Herausgehoben wäre der Preisträger des DMIP 2016, stellt aber eben nur ein Referenzobjekt dar. Für eine anschauliche Darstellung werden aber mindestens zwei Referenzobjekte benötigt. Nun besteht die betrachtete Gitarrenstichprobe aus zwei Teilen, den Wettbewerbsinstrumenten DMIP 2016 und den Studentenarbeiten. Als Anker wurden nun zwei fiktive Instrumente gewählt. Es handelt sich um die „mittleren Instrumente“ der beiden Teile, repräsentiert jeweils durch die mittlere Frequenzkurve (FK, Amplitudenmittelung) der Teilstichproben. **Abbildung 16** stellt diese dar. Im Falle der Wettbewerbsinstrumente wurden für die Mittelung jeweils nur die Erstmessungen herangezogen, die zweite, die Repro-Messreihe wurde also nicht berücksichtigt:

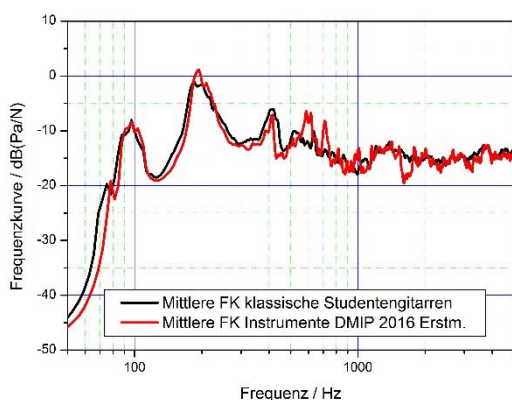


Abbildung 16: Mittlere Frequenzkurven der Teilstichproben Student und DMIP 2016

Verblüffend ist die Ähnlichkeit der beiden mittleren Frequenzkurven, was aber durchaus nicht verwundern sollte, da es sich ja in der Summe um die gleichen Grundtypen von Instrumenten handelt. Die etwas stärkere Strukturierung der Wettbewerbskurve ist der geringeren Anzahl von Objekten und der geringeren Variation der Bauweisen geschuldet.

Da die Einbeziehung der „Ankerinstrumente nicht von Anfang an erfolgte, musste die Faktorenanalyse erneut, mit der um die beiden Objekte erweiterten Stichprobe vorgenommen werden. Es entsteht eine neue Faktorenlösung mit veränderten Ladungen. Im Vergleich zur ersten Analyse gibt es eine größere Zahl von Faktoren mit Eigenwerten > 1 . Für die Auswertung wurden die sechs Faktoren mit dem größten Anteil an der Beschreibung der Unterschiede herangezogen. Sie verweisen gemeinsam auf 71 % der Varianz.

Abbildung 17 stellt nun als Streudiagramm die Abstände der Objekte zu den beiden mittleren Objekten dar.

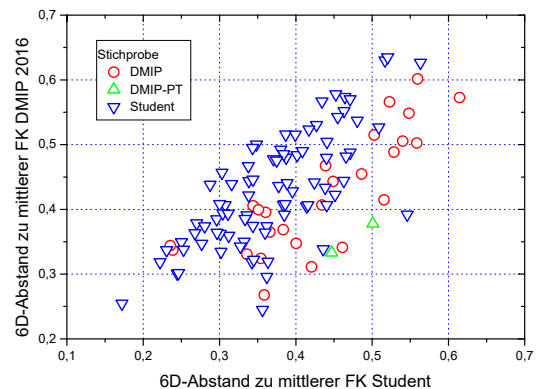


Abbildung 17: Abstände der Instrumente zu den beiden Referenz-Frequenzkurven im sechsdimensionalen Raum der Faktorladungen unter Kennzeichnung der Teilstichproben

Im Gegensatz zum Ergebnis der entsprechenden Auswertung der Studentenviolen zeigt sich hier keine deutliche Streuung. Vielmehr liegt ein nahezu linearer Zusammenhang vor. Dies war aufgrund der starken Ähnlichkeit der beiden mittleren FK aber auch zu erwarten. Ihr Abstand im Raum der Faktorladungen beträgt lediglich 0,2. Die konkreten Instrumente entfernen sich jeweils in ungefähr gleichem Maße von beiden. In Zusammenhang mit dem Herstellungssemester und den besonderen Bauformen lassen sich keine Aussagen ableiten. Lediglich in Bezug auf die Bewertung der Wettbewerbsinstrumente gibt es eine schwache Tendenz. Instrumente, die einen etwas größeren Abstand zur mittleren FK der Teilstichprobe Student als zur mittleren FK der Teilstichprobe DMIP 2016 aufweisen, tendieren zu einer besseren Bewertung durch die Juroren. Man erkennt dies nicht zuletzt an der Lage der beiden Punkte der Messungen des Preisträgerinstrumentes.

Obwohl die Untersuchung anhand der mittleren Frequenzkurven als Ersatz für fehlende Referenzinstrumente nicht die erhofften Aussagen lieferte, bestätigt sie dennoch ein vorliegendes Ergebnis. Messungen mit Melodieanspielen verschiedener Instrumente zeigten, dass die klangliche Varianz von Gitarren deutlich hinter der anderer Instrumente zurücksteht [1]. Dies manifestiert sich hier in der starken Ähnlichkeit der mittleren Frequenzkurven der beiden Teilstichproben, die letztlich zu dem oben geschilderten Ergebnis führt.

Die ersten drei Resonanzen der Frequenzkurve

Betrachten wir abschließend, analog zur Vorgehensweise in [5], die Merkmale f_n und L_n für die ersten drei Resonanzen ($n = 1 \dots 3$). In **Tabelle 1** sind die Korrelationskoeffizienten zusammengestellt. Beim Vergleich der Werte mit denen in entsprechenden Angaben in [5] ist zu beachten, dass die Stichprobe etwa dreimal so viele Objekte wie die Referenzstichprobe des IfM beinhaltet. Dadurch verringert sich der Grenzwert für das Verwerfen eines linearen Zusammenhanges. Hinsichtlich der Frequenzen besteht wiederum nur ein Zusammenhang zwischen f_1 und f_2 . Bestehen bleibt auch die gegenläufige Korrelation zwischen f_1 und L_3 . Ein gleicher Zusammenhang zeigt sich zwischen f_2 und L_3 . Interessant ist besonders, dass mit wachsender Frequenz f_1 auch der Pegel der Resonanz L_1 steigt. Darüber hinaus zeigen sich Korrelationen zwischen L_1 und L_2 sowie L_1 und L_3 . L_2 und L_3 korrelieren jedoch nicht miteinander.

Tabelle 1: Korrelationskoeffizienten zwischen den ersten drei Resonanzfrequenzen der Frequenzkurven der in diesem Artikel diskutierten Gesamtstichprobe, $r_{g, 5\%} = 0,19$

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

Die Korrelation zwischen f_1 und f_2 ergibt sich anschaulich aus den über Modalanalysen festgestellte optisch praktisch gleiche Schwingungsform der Decken bei beiden Moden, wie schon in Zusammenhang mit **Abbildung 4** diskutiert. Die Decke wirkt zudem auf die Schwingung des im Korpus eingeschlossenen Luftvolumens als nachgiebige Wand. Je steifer sie ist, desto höher wird auch die Helmholtzresonanz ausfallen. **Abbildung 18** stellt die Verteilung von f_1 und f_2 dar.

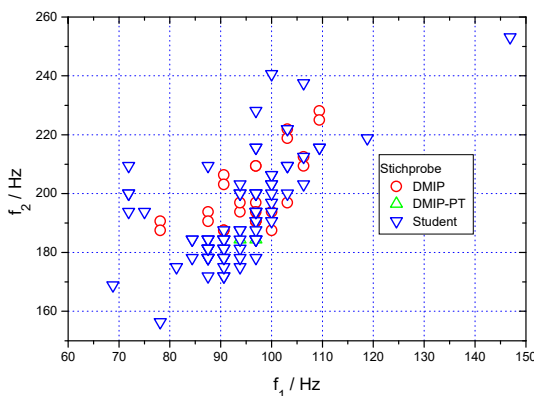


Abbildung 18: Verteilung der Resonanzfrequenzen f_1 und f_2 für die studentischen Arbeiten und die Wettbewerbsinstrumente DMIP 2016

Mit einer zu erwartenden Streubreite ordnen sich sowohl die studentischen Arbeiten als auch die Wettbewerbsinstrumente auf einer Geraden, die dem linearen Zusammenhang entspricht, an. Den größeren Anteil an der Streuung liefern die studentischen Arbeiten, nicht nur aufgrund ihrer Überzahl, sondern auch aufgrund der offensichtlichen, experimentellen Vielfalt der Objekte. Das immer noch sehr gut auf der Geraden liegende, aber doch etwas abgehobene Instrument ganz recht oben ist das Wiener Modell, eine im Verhältnis sehr kleine Gitarre.

Die „fehlende“ Korrelation zwischen f_1 und f_3 bzw. f_2 und f_3 entspricht den Ergebnissen der Untersuchungen an Referenzgitarren des IfM [5]. Dort zeigten sich zwar zunächst entsprechende lineare Zusammenhänge, diese verschwanden allerdings, nachdem drei extrem abweichende Exemplare aus der Statistik genommen wurden. Die Ergebnisse der hier behandelten Stichprobe untermauern die Folgerungen aus [5], dass aufgrund der deutlich anderen Schwingungsformen der f_3 verursachenden Moden bauliche Details eben nicht mehr gleichförmig auch auf f_3 wirken. Es lässt sich also sehr wohl die Mode zu f_3 konstruktiv von der Grundabstimmung der Decke trennen.

Als nächstes wollen wir uns den Zusammenhängen zwischen Frequenzen und Pegeln der Resonanzen widmen. Die gegenläufigen Korrelationen zwischen f_1 bzw. f_2 und L_3 traten ja bereits bei der IfM-Referenzstichprobe als Tendenz auf, allerdings ohne den Grenzwert $r_{g, 5\%}$ zu überschreiten [5]. Bei der hier behandelten Stichprobe gibt es in beiden Fällen eine klare Korrelation. Der in [5] vermutete schwache, aber statistisch nicht gesicherte Zusammenhang scheint doch eindeutig vorzuliegen. Eine plausible und zugleich eindeutige Erklärung für den Effekt lässt sich allerdings auch weiterhin ohne weitere Untersuchungen nicht geben.

Der recht eindeutige Zusammenhang f_1 und L_1 trat bei der Referenzstichprobe nicht auf. Als Ausgangspunkt für die Diskussion soll wiederum die Verteilung dienen (**Abbildung 19**). Wie man sieht, eine recht eindeutige Sache.

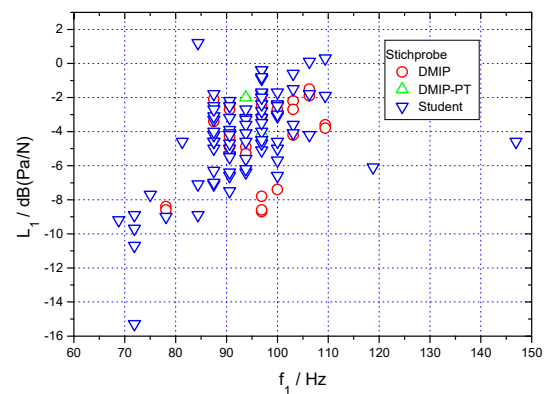


Abbildung 19: Verteilung der Resonanzmerkmale f_1 und L_1 für die studentischen Arbeiten und die Wettbewerbsinstrumente DMIP 2016

„Aus der Reihen tanzen“ eigentlich nur die Instrumente zu den Symbolen gang rechts, das ist das Wiener Modell, und

unten links. Dieses Instrument weist den niedrigsten Pegel in Bezug auf die erste Resonanz auf. Es handelt sich um eine Gitarre in sogenannter Kasha-Bauweise. Ziel dieser Konstruktion ist die Verbesserung der Wiedergabe im tiefen Frequenzbereich. Erreicht werden soll dies durch eine Vergrößerung der schwingenden Fläche und deren Abstimmung. Letzteres erfolgt über eine spezielle Beleistung, ersteres durch Verlagerung des Schallloches von der Decke in die Zarge. Eine sehr tiefe Grundabstimmung wurde in der Tat erreicht, allerdings, wie es aussieht, auf Kosten der Abstrahlung im Bassbereich.

Blendet man die beiden extremen Ausreißer und zusätzlich die beiden weiterhin nicht so richtig im Pulk liegenden Objekte aus, so wird die Korrelation noch eindeutiger. Im Bereich der typischen Frequenzen f_1 zwischen 70 Hz und 110 Hz steigt der Pegel L_1 um etwa 8 dB. Das ist ein erheblicher Zuwachs. Die Beobachtung trifft Studenten- und Wettbewerbsinstrumente in gleicher Weise. Eine erste Erklärung für den Anstieg liefert zweifellos die Tatsache, dass zu tiefen Frequenzen hin die Abstrahlung typischerweise geringer ausfällt. Ursache ist die (eigentlich immer) zu kleine Fläche der Schallsender. Dies kann aber nicht den gesamte Anstieg erklären. Weiter Betrachtungen unter Einbeziehung konstruktiver Details wären hier notwendig.

Die letzte Betrachtung gilt den Korrelationen zwischen den Resonanzpegeln. Eigentlich sollte man davon ausgehen, dass, wenn die Decke insgesamt schwingfreudig gestaltet ist, alle drei Moden in Sachen Abstrahlung profitieren. Nun korrelieren aber nur L_1 und L_2 sowie L_1 und L_3 , L_2 und L_3 aber nicht. Betrachten wir dazu alle drei Verteilungen nach Stichprobenbestandteilen (Abbildung 20 bis Abbildung 22).

Die Instrumente bilden insgesamt recht zusammenhängende Punktwolken. Wirklich herausstechend wirkt nur der geringe Pegel L_1 des oben schon diskutierten Studenteninstrumentes. Allerdings ist auch zu beobachten, dass in der Bilderfolge L_1 - L_2 , L_1 - L_3 , L_2 - L_3 die Untergruppen Student und Wettbewerb zunehmen auseinanderdriften.

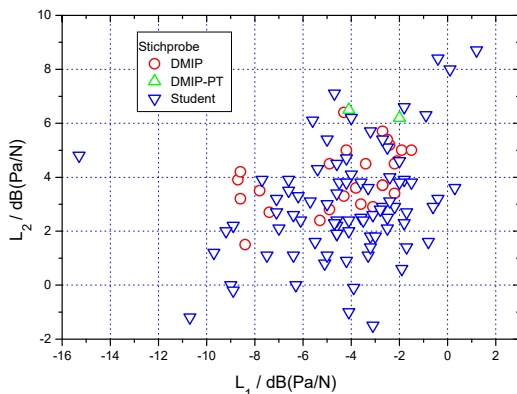


Abbildung 20: Verteilung der Resonanzpegel L_1 und L_2 für die studentischen Arbeiten und die Wettbewerbsinstrumente DMIP 2016

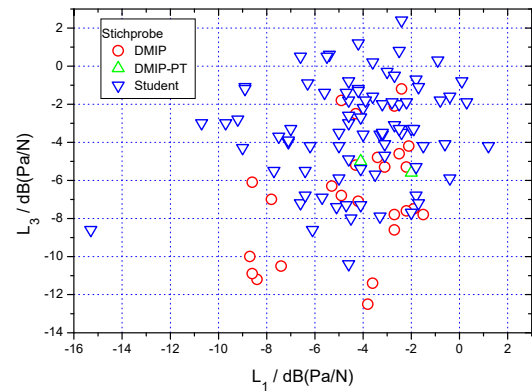


Abbildung 21: Verteilung der Resonanzpegel L_1 und L_3 für die studentischen Arbeiten und die Wettbewerbsinstrumente DMIP 2016

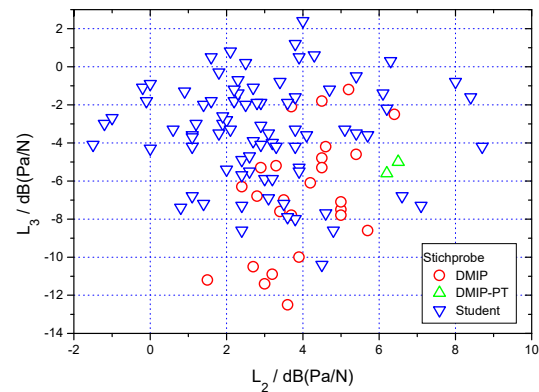


Abbildung 22: Verteilung der Resonanzpegel L_2 und L_3 für die studentischen Arbeiten und die Wettbewerbsinstrumente DMIP 2016

Weiterhin tragen offenbar die Wettbewerbsinstrumente stärker zu den vorgefundenen Korrelationen bei. Nimmt man die Studenteninstrumente heraus, so ergibt sich auch für L_2 - L_3 eine Korrelation.

Eine besondere Überraschung zeigt sich, wenn man die Pegel-Verteilung hinsichtlich der Bauserie darstellt. Die Instrumente des ersten Semesters tragen in keiner Weise zur Korrelation der Pegelmerkmale bei. Abbildung 23 veranschaulicht dies für die Verteilung L_1 - L_2 . Die Besonderheit der Instrumente des ersten Semesters besteht darin, dass, wie auch im Falle der Violine [2], eine Vorgabe für das zu fertigende Objekt vorliegt. Hier ist es eine traditionelle Konzertgitarre spanischer Bauart. Allerdings fällt die Vorgabe weniger scharf als im Geigenfalle aus. Hier wird eine enge Anlehnung an ein konkretes Instrument von Stradivari (Titian) gefordert. Die auftretenden Unterschiede bei den Gitarren des ersten Semesters beruhen also sowohl auf zufälligen Einflüssen (Fehler, noch fehlende Erfahrungen o. Ä.) oder gehen auf gewollte Variationen im eingeräumten Rahmen zurück. Diese Einflüsse tragen aber offensichtlich nicht zur Korrelation zwischen

den Pegeln der Resonanzen bei. In Bezug auf die Resonanzfrequenzen zeigte sich ein analoges Phänomen des ersten Semesters nicht.

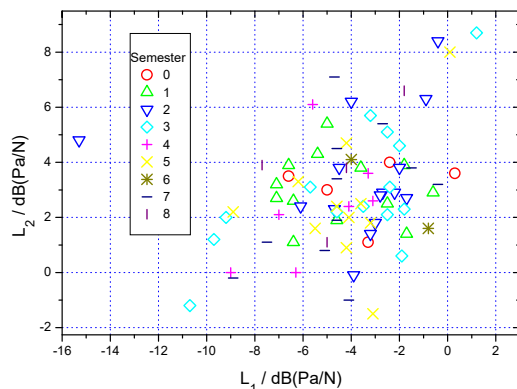


Abbildung 23: Verteilung der Resonanzpegel L_1 und L_2 nach Semestern

Wir können also drei Aussagen festhalten: 1. Tragen die Wettbewerbsinstrumente maßgeblich zur Korrelation zwischen den Resonanzpegeln bei. 2. Die Studenteninstrumente sind nur bedingt beteiligt. Insbesondere von Objekten des ersten Semesters geht keinerlei Beitrag aus. 3. Man kann davon ausgehen, dass die Variationsbreite in Sachen Baukonzept bei den studentischen Arbeiten größer ist als bei den Wettbewerbsinstrumenten, da diese typisch aus der Serie (wie groß diese auch immer ausfallen mag) der Einreicher stammt. Eine Ausnahme dieser Feststellungen gibt es aber definitiv: Der Sieger des DMIP 2016 verwendet für sein eingereichtes Instrument eine spezielle Technologie. Die Leisten werden nicht auf die Decke geklebt, sondern entstehen durch entsprechendes Ausfräsen der Decke.

Fazit

Zunächst bestätigen sich die Aussagen in Bezug auf die Nützlichkeit der Faktorenanalyse von Frequenzkurven, die bereits in Zusammenhang mit den entsprechenden Untersuchungen an Streichinstrumenten kommuniziert wurden [2] und [3]. Man erreicht recht schnell einen guten Überblick. Für Detailaussagen und insbesondere für Zusammenhänge mit baulichen Einflüssen ist der Umstieg auf physikalische Parameter aber unverzichtbar.

Geht man von der Vorgabe klassische Gitarre aus und lässt extreme Bauformen, die bei den studentischen Arbeiten ja außer im ersten Semester nicht ausgeschlossen werden, außen vor, so bleibt immer noch die Aussage, dass die Studenten in ihren Arbeiten weit mehr experimentieren als es die Einreicher zum DMIP taten. Offenbar gibt es einen doch recht klaren Trend für Vorstellungen einer klassischen Gitarre. Dies zeigt sich insbesondere auch für den im Wettbewerb um den DMIP erfolgreichen Absolventen des Studienganges. Sein Wettbewerbsinstrument und seine Arbeiten der letzten Semester liegen trotz der innovativen Konstruktion akustisch eindeutig, oder besser besonders eindeutig im Gut-Trend der

Instrumente der gestandene Instrumentenmacher. Besonders tritt dies bei der Analyse der Zusammenhänge der Frequenzen und Pegel der ersten drei Frequenzkurvenresonanzen hervor. Betrachtet man nur die Wettbewerbsinstrumente, also die der gestandenen Hersteller, so treten alle zu erwartenden Korrelationen zwischen den Merkmalen auf. Man kann wohl bei aller Vorsicht behaupten, hier zeigt sich eine traditionelle Herangehensweise bei der Weiterentwicklung von Instrumenten: Nimm eine bewährte Schablone, ändere ein wenig daran herum und schau was rauskommt. Da natürlich in die jeweiligen Veränderungen eigene Erfahrungen einfließen, führt diese Taktik recht sicher zu (kleinen?) Erfolgen. Dann kommt der nächste Schritt. Dabei bleiben zu erwartende Zusammenhänge typischerweise von Schritt zu Schritt erhalten. Deutliche Eingriffe in das bewährte System, wie es die Studenten im Rahmen ihrer Arbeiten vornehmen, können aber schon mal das typische akustische System der Gitarre merklich verändern und das nicht unbedingt im negativen Sinne. Falls doch, hat man auf jeden Fall Erkenntnisse gewonnen.

Weiterführende Aussagen sind aus Sicht des Autors nur möglich, wenn auch die dokumentierten Informationen zu Konstruktion und Materialeinsatz der studentischen Instrumente in die Betrachtungen einbezogen werden. Das soll aber späteren Projekten vorbehalten sein.

Literatur

- [1] Ziegenhals, G.: Subjektive und objektive Beurteilung von Musikinstrumenten. Eine Untersuchung anhand von Fallstudien. Dissertation TU Dresden 2010. Studentexte zur Sprachkom. Band 51 TUDpress 2010
- [2] Ziegenhals, G.: Akustische Untersuchungen studentischer Arbeiten – Violinen. Fortschritte der Akustik – DAGA 2021
- [3] Ziegenhals, G.: Akustische Untersuchungen studentischer Arbeiten – Bratschen und Celli. September 2021. <https://www.fh-zwickau.de/aks/musikinstrumentenbau/forschung/veroeffentlichungen/>
- [4] Ziegenhals, G.: Klimatische Einflüsse auf die Ergebnisse von Frequenzkurvenmessungen. Fortschritte der Akustik – DAGA 2016
- [5] Ziegenhals, G.: Referenzgitarren des IfM – Frequenzkurven, Moden, Anhängigkeiten. September 2022 <https://www.fh-zwickau.de/aks/musikinstrumentenbau/forschung/veroeffentlichungen/>
- [6] Meyer, J.: Die Abstimmung der Grundresonanzen von Gitarren. Das Musikinstrument 23(1974)2 S. 179 - 186
- [7] Blutner, F.: Synoptisches Feld: ein neues Modell zur Klangbildung von Musikinstrumenten. Fortschritte der Akustik – DAGA 1991 Teil A S. 461 – 464
- [8] Fleischer, H.: Admittanzmessungen an akustischen Gitarren. Forschungs- und Seminarberichte aus dem Gebiet Technische Mechanik und Flächentragwerke 01/97
- [9] Fleischer, H.: Schwingungen akustischer Gitarren. Beiträge zur Vibro- und Psychoakustik 1/98