

# Akustische Untersuchungen studentischer Arbeiten – Bratschen und Celli

Gunter Ziegenhals

veröffentlicht September 2021

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

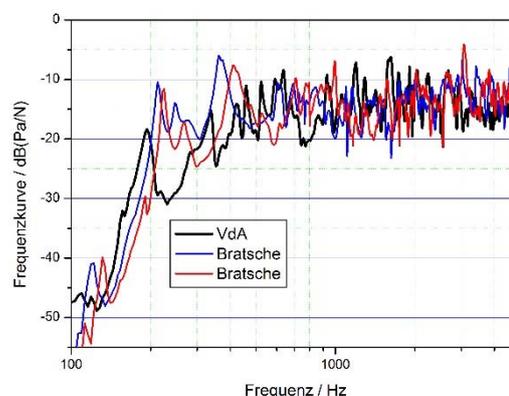
## Einleitung

Der Modulplan des achtsemestrigen Studienganges Musikinstrumentenbau mit den Studienrichtungen Streich- und Zupfinstrumentenbau der Westfälischen Hochschule Zwickau (WHZ) fordert von den Studenten pro Semester (mit Ausnahme des Praktikumssemesters) die Vorlage eines selbst gefertigten Instruments. Während für das erste Semester ein Modell vorgegeben wird (Geige-Stradivariomodell bzw. klassische spanische Gitarre), herrscht in den Folgesemestern im Wesentlichen freie Modellwahl. Hinzu kommen weitere Instrumente, die im Rahmen von zwei Projektarbeiten entstehen. In der Studienrichtung Streichinstrumente wurden im Zeitraum FS 2013 bis HS 2019/2020 62 Geigen, 31 Bratschen (inklusive drei Viola d'amore), 29 Celli und zwei Kontrabässe eingereicht. Einen wichtigen Teil der Dokumentation der Instrumente stellt die Aufnahme der Frequenzkurve dar. Dies erfolgte im Institut für Musikinstrumentenbau in Zwota. Die angewandte Messmethodik ist in [1] ausführlich beschrieben. Die im Ergebnis vorliegenden Frequenzkurven stellen einen sehr interessanten und wertvollen Datenbestand dar, dessen Auswertung über den reinen Aspekt der Dokumentation hinaus überaus lohnenswert erscheint. Die Ergebnisse einer ersten statistischen Bewertung der vorliegenden Geigenfrequenzkurven wurde auf der DAGA 2021 vorgestellt [2]. Eine Erweiterung der Veröffentlichung um Bratsche und Cello hätte den Rahmen eines DAGA-Beitrages gesprengt. Es wurde deshalb der Weg einer ergänzenden Veröffentlichung gewählt. Die Veröffentlichung der Ergebnisse vergleichbarer Untersuchungen an im Rahmen des Studiums entstandenen Zupfinstrumenten wird für 2022 vorbereitet.

## Bratsche – Stichprobe und Faktorenanalyse

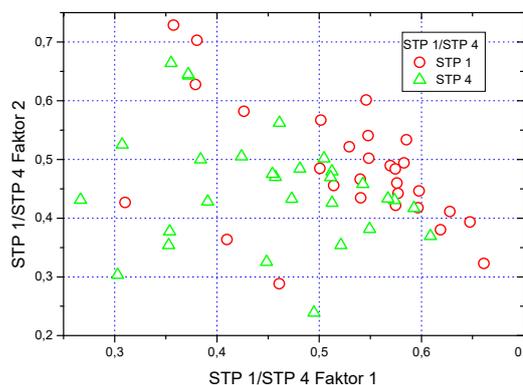
Wie im Fall Violine war auch für die anderen Streichinstrumente die Faktorenanalyse als Hauptuntersuchungsmethodik vorgesehen. Gesucht werden sollte nach äußeren Einflüssen wie z. B. die Entwicklung über die Semester, Modellwahl und Vorbild. Bereits in früheren Arbeiten zeigte es sich, dass die Zusammensetzung der betrachteten Stichprobe das Ergebnis der Faktorenanalyse deutlich beeinflusst. Dies dokumentierten auch die Untersuchungen an Geigen. Bereits die Hinzunahme von drei Referenzgeigen zu den 62 Studenten-Geigen veränderte die Verteilung der Faktorladungen eindeutig, wenn auch nicht dramatisch [2]. Nun fielen in die Stichprobe der Studenten-Bratschen auch drei Viola d'amore. Deren Frequenzkurven unterscheiden sich nun bereits bei rein visueller Analyse deutlich von denen einer typischen Bratsche (**Abbildung 1**). Es stellte sich also zunächst die Frage, ob es sinnvoll ist, diese drei Instrumente in die Betrachtungen einzubeziehen. Um eine Antwort zu finden, wurden aus verfügbaren Daten von Frequenzkurvenmessungen folgende sechs Stichproben (STP) zusammengestellt, in die auch Daten aus Messungen im Rahmen des Deutschen Musikinstrumentenpreises (DMIP) einfließen:

- **STP 1:** Daten der 31 Studenten-Bratschen + eine Reprö-Messung an einer der Bratschen = 32 Objekte.
- **STP 2:** STP 1 + Daten von 18 Messungen an Instrumenten aus Stichprobe DMIP 2018 inklusive drei Reprö-Messungen = 50 Objekte.
- **STP 3:** STP 1 + Daten von 3 Messungen an Instrumenten aus Stichprobe DMIP 2018 inklusive einer Reprö-Messungen = 35 Objekte.
- **STP 4:** STP 1 ohne Viola d'amore = 29 Objekte.
- **STP 5:** STP 2 ohne Viola d'amore = 47 Objekte.
- **STP 6:** STP 3 ohne Viola d'amore = 32 Objekte.



**Abbildung 1:** Vergleich Frequenzkurve Viola d'amore - Bratsche

Vergleicht man die Ergebnisse der Faktorenanalyse für STP 1 und STP 4, so zeichnet sich deutlich der Einfluss der Viola d'amore-Instrumente ab (**Abbildung 2**).

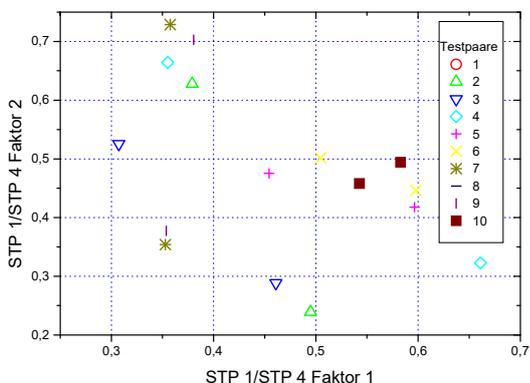


**Abbildung 2:** Vergleich der Faktorenanalysen an STP 1 und STP 4

**Bemerkung:** In den Darstellungen zur Verteilung der Faktorladungen werden die Achsen nur mit dem Begriff Faktor anstelle Faktorladung beschriftet.

Bei den „drei Ausreißern“ STP 1 in **Abbildung 2** handelt es sich nicht um die drei Viola d'amore-Instrumente! Der Einfluss der Stichprobe zeigt sich noch deutlicher, wenn man die

Position einzelner Objekte für beide Auswertungen gegenübergestellt (*Abbildung 3*). Man erkennt, dass einzelne Objekte praktisch ihre (recht weit entfernten) Positionen tauschen.



**Abbildung 3:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 für zufällig ausgewählte Instrumente, berechnet anhand STP 1 und STP 4

Um die Ursache für die Positionssprünge zu finden, werden den Faktoren anhand ihrer Korrelation mit den physikalischen Merkmalen der Frequenzkurve beschrieben. Der Merkmalsatz zur Bewertung der Frequenzkurve Bratsche entspricht im Wesentlichen dem Satz Violine mit geringfügigen Korrekturen markanter Frequenzwerte [1], [2].

#### Faktor 1

**STP 1:** Kennzeichnet 87 % der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für eine **hohe aber nicht scharfe Abstimmung** des Instrumentes sprechen.

**STP 4:** Kennzeichnet 88 % der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für eine **wenig ausgeglichene, nicht klare, weniger hohe, nicht scharfe Abstimmung** des Instrumentes sprechen.

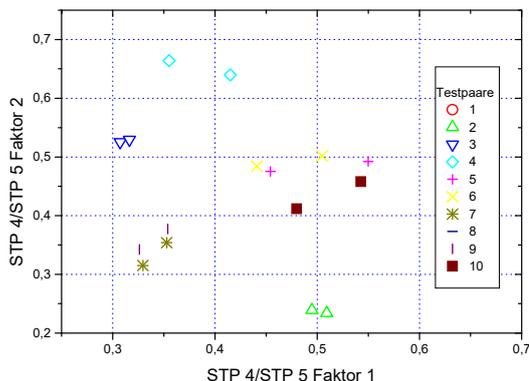
#### Faktor 2

**STP 1:** Kennzeichnet 1,4 % der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, für eine **wenig klare, eher tiefe Abstimmung** des Instrumentes.

**STP 4:** Kennzeichnet 1,6 % der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für eine **mittlere, klare, nicht nasale Abstimmung** des Instrumentes sprechen.

Faktor 1 verändert sich im Vergleich der beiden Stichproben tendenziell, während Faktor 2 eine völlig andere Bedeutung zukommt. Vergleichende Untersuchungen aller sechs Stichproben ergaben, dass die Wirkung der Hinzunahme der zusätzlichen Bratschen-Daten aus der DMIP-Stichprobe keine derartigen Verwerfungen verursachen und die Ergebnisse damit eher vergleichbar sind. Dies sei durch *Abbildung 4* untermauert. Sie zeigt die Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 für die gleichen Testpaare wie *Abbildung 3*, diesmal aber unter Verwendung der Stichproben 4 und 5 ermittelt. Man erkennt, dass zwar immer noch Unterschiede für die Testinstrumente, je nach Stichprobenberechnung bestehen, aber extremes Tauschen der Positionen, wie im Falle STP 1 und STP 4

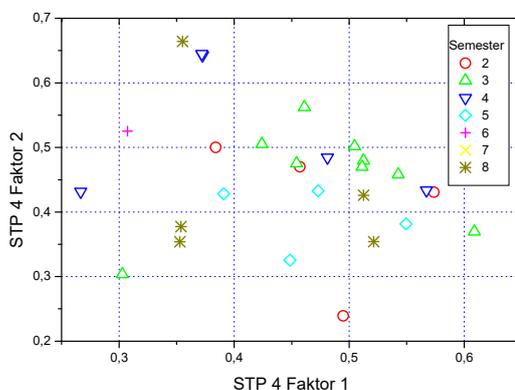
treten nicht mehr auf. Die weiteren Auswertungen erfolgten deshalb anhand der Stichproben 4 und 5.



**Abbildung 4:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 für die gleichen Instrumente wie in *Abbildung 3*, berechnet anhand STP 1 und STP 4

### Bratsche – Semestereinfluss

Betrachtet man nur die Studenteninstrumente (STP 4) so kann man eine gewisse Entwicklung zu weniger hoch abgestimmten Instrumenten zu höheren Semestern hin beobachten. Man „traut sich offenbar dann eher, die Instrumente etwas weniger steif zu bauen.“ *Abbildung 5* stellt das anhand der Faktorladungen 1 und 2 dar. Der Faktor 1 steht in STP 4 für eine eher hohe Abstimmung, Faktor 2 für eine mittlere, klare Abstimmung.



**Abbildung 5:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 für STP 4 nach Semestern

Stellt man die gleiche Situation für STP 5, also unter Hinzunahme der DMIP-Instrumente dar, die Faktoren 1 und 2 behalten im Wesentlichen ihre Bedeutung, so bleibt die Situation im Großen und Ganzen erhalten, die Studenteninstrumente „rücken lediglich etwas zusammen“ (*Abbildung 6*). Dieses „Zusammenrücken“, das man durchaus im Sinne einer Schule auffassen kann, betrifft aber nicht alle von den Studenten geschaffene Instrumente. Die eher nicht hoch und eher mittel abgestimmten Instrumente halten ihre Stellung.

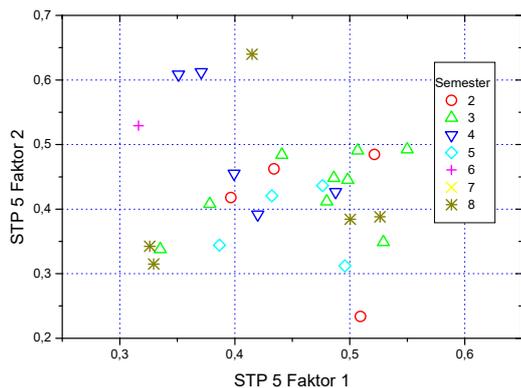


Abbildung 6: Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 für STP 5 nach Semestern

### Studenten-Bratschen im Umfeld anderer Instrumente

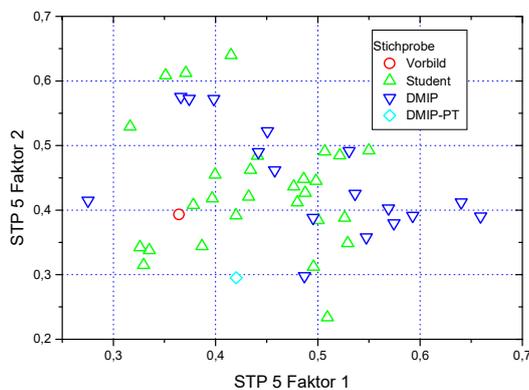


Abbildung 7: Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 für STP 5 – dargestellt ist die gesamte STP 5

Abbildung 7 zeigt nunmehr die Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 für alle Instrumente der STP 5. Als Grundlage für die weiteren Diskussionen sei zunächst die im Ergebnis der Korrelationsanalyse mit den Frequenzkurvenmerkmalen ermittelte Bedeutung der einzelnen Faktoren für diese Stichprobe aufgeführt:

#### Faktor 1

Kennzeichnet **88 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für eine **hohe, nicht klare** Abstimmung des Instrumentes sprechen.

#### Faktor 2

Kennzeichnet **1,1 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für eine **mittlere, klare, nicht nasale** Abstimmung des Instrumentes sprechen.

#### Faktor 3

Kennzeichnet **0,9 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für eine **weniger klare, tiefe** Abstimmung des Instrumentes sprechen.

#### Faktor 4

Kennzeichnet **0,9 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert mit Merkmalen, die für eine **ausgeglichene, hohe, jedoch nicht scharfe** Abstimmung des Instrumentes sprechen.

#### Faktor 5

Kennzeichnet **0,7 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für eine **eher tiefe** Abstimmung des Instrumentes stehen.

Bei der Einschätzung der Eigenschaften der Instrumentenabstimmung anhand der Faktorbedeutung sei darauf hingewiesen, dass immer nur die aufgeführte Korrelation gefunden wurde. Eine niedrige Faktorladung 1 bedeutet, dass das Instrument nicht hoch abgestimmt wurde. Dies bedeutet aber keinen Umkehrschluss auf eine tiefe Abstimmung. Auf eine solche weisen die Faktoren 3 und 5 hin.

Abbildung 7 demonstriert sehr anschaulich, dass die Mehrzahl der untersuchten Bratschen zwischen den Abstimmungen hoch und klar, nicht nasal angesiedelt ist. Eine gewisse Zahl der Studenteninstrumente und eben auch der Preisträger des Wettbewerbs um den Deutschen Musikinstrumentenpreis 2018 (DMIP-PT) tendieren aber zu nicht hoher und nasal Bauweise. Für die Studenten lässt sich hier allerdings keine Semesterentwicklung erkennen. Eine Aussage in Bezug auf hohe-tiefe Abstimmung sollte die Gegenüberstellung der Faktoren 1 und 5 liefern (Abbildung 8), da Faktor 5 nur in Bezug auf eine tiefe Abstimmung, also auf Frequenzkurvenmerkmale, die auf eine tiefe Abstimmung hindeuten, korreliert.

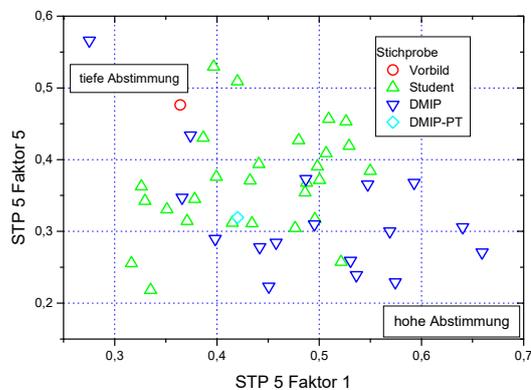


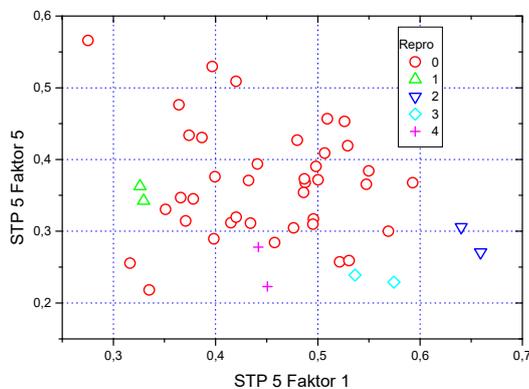
Abbildung 8: Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 für STP 5 – dargestellt ist die gesamte STP 5

Hier zeigt sich nun, dass die Wettbewerbsinstrumente im Vergleich zu den Studentenarbeiten eher höher als tiefer abgestimmt sind, die Preisträgerbratsche zwar nicht ausgeprägt tief im Klang angelegt ist, aber eine gewisse Nasalität aufweist. Aus diesem Einzelfall einen Gut-Trend abzuleiten, wäre aber etwas gewagt. Eine nähere Untersuchung der Bewertung der Wettbewerbsinstrumente war an dieser Stelle nicht Teil der Untersuchungen. Blendet man aber die erreichten Ränge der DMIP-Instrumente in Abbildung 8 ein, so liegen die besser platzierten Teilnehmer eher in der Nähe des Preisträgers. Es

gibt aber Ausnahmen, so die beiden Objekte im oberen linken Quadranten.

Noch eine Bemerkung zum Semestereinfluss auf die Ergebnisse der Auswertung Frequenzkurve Bratsche. Obwohl ein solcher eindeutig erkennbar ist, fällt er doch geringer als im Falle Geige aus. Ein wesentlicher Grund hierfür ist zweifellos, dass bei Violinen die Fixierung auf bestimmte Modelle wesentlich größer ist als im Falle der Bratschen. Hier ist man bei der Ausgestaltung der konkreten Bauform weitaus flexibler.

Abschließend zu den Betrachtungen Bratsche sei noch ein Blick auf die Reproduzierbarkeit geworfen. Vier der Instrumente aus STP 5 wurden je zweimal analysiert. **Abbildung 9** zeigt eine modifizierte Variante von **Abbildung 8**. Die vier Reproduzierbarkeitspaare sind entsprechend markiert. Man erkennt, dass die getroffenen Aussagen unter dem Blickwinkel der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse als hinreichend sicher angesehen werden können.



**Abbildung 9:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 5 für STP 5 nach Reproduzierbarkeitsmessungen

### Cello – Stichprobe und Faktorenanalyse

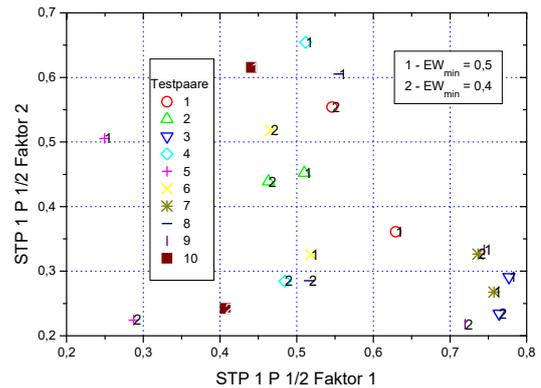
In Anbetracht der Erfahrungen aus den Untersuchungen Geige und Bratsche wurden im Fall Cello nur noch zwei Stichproben betrachtet.

- **STP 1:** Daten der 29 Studenten-Celli = 29 Objekte.
- **STP 2:** STP 1 + Daten von 14 Messungen an Instrumenten aus Stichprobe DMIP 2012 = 43 Objekte.

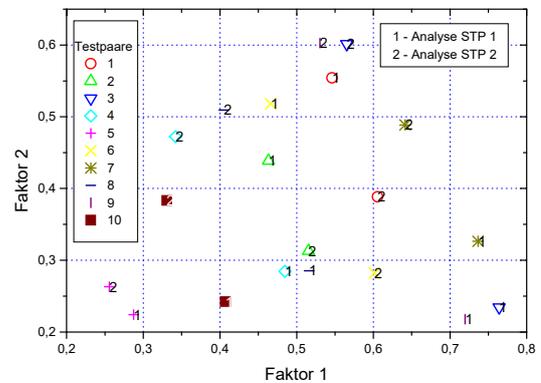
Neben Messergebnissen von Studenten-Instrumenten wurden also wiederum auf Daten aus den Untersuchungen im Rahmen des Wettbewerbs um den Deutschen Musikinstrumentenpreis einbezogen.

Als erstes erfolgte wie im Bratschenfall eine Betrachtung des Einflusses der Stichprobenwahl auf die Ergebnisse der Studenteninstrumente. Dabei kam ein interessantes Phänomen zu Tage. Bei der Faktorenanalyse wählt man als Parameter den „minimaler Eigenwert“ ( $EW_{min}$ ). Nur Faktoren, deren Eigenwert dieses Minimum erreicht werden in die Entwicklung einbezogen. Die Anzahl der berücksichtigten Faktoren beeinflusst deren Charakteristik und ihre Faktorladungen. Bislang konnte stets ein Minimum-Parameter gefunden werden, der für alle betrachteten Stichproben die gleiche, berücksichtigte

Faktorenanzahl lieferte. Im Falle der gewählten Cello-Stichproben gelang das nicht. Beispielhaft sei angeführt, dass die Wahl  $EW_{min} = 0,5$  für beide Stichproben im Falle STP 1 vier Faktoren und im Falle STP 2 sechs Faktoren liefert. Sechs Faktoren findet man auch für STP 1 mit  $EW_{min} = 0,4$ . Frage: Welche Wahl ist die bessere? Vergleiche zeigen, dass die Zahl der berücksichtigten Freiheitsgrade hier einen größeren Einfluss ausübt. Veranschaulicht wird das in **Abbildung 10** und **Abbildung 11**. Dargestellt sind Werte für zweimal dieselben 10 Studenten-Celli, mit entsprechenden Parametern ermittelt.



**Abbildung 10:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 für 10 Student-Celli, berechnet anhand STP 1 für zwei Werte  $EW_{min}$



**Abbildung 11:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 für 10 Student-Celli, berechnet anhand **STP 1 Cello,  $EW_{min} = 0,4$**  und **STP 2 Cello,  $EW_{min} = 0,5$**

Die Veränderungen für die Studenten-Celli werden bei Zunahme der Wettbewerbsinstrumente DMIP geringer, wenn beide Stichproben auf gleiche berücksichtigte Faktorenanzahl ausgerichtet analysiert werden (siehe **Abbildung 11**). Also wurden diese Parameter für die weiteren Analysen zu Grunde gelegt. Es konnte hierbei für die beiden Cello-Stichproben aber nicht sichergestellt werden, dass bei der Analyse der jeweiligen Stichprobe die Faktoren ihre Bedeutung nicht wesentlich verändern, was zu Schwierigkeiten beim Vergleich der Ergebnisse führt. Für die Diskussion wird deshalb vorrangig STP 2 herangezogen.

Für Celli wurden folgende akustische Frequenzkurvenmerkmale verwendet:

- $f_n$  Frequenz der n-ten Frequenzkurvenresonanz ( $n = 1 \dots 5$ )
- $L_n$  Pegel der n-ten Frequenzkurvenresonanz ( $n = 1 \dots 5$ )
- $L_S(50..200)$  Maß für Bassübertragung
- $L_S(0,8..1,2k)$  Maß für Klarheit
- $L_S(1,2..2k)$  Maß für Nasalität
- $L_S(2..4k)$  Maß für Helligkeit
- $L_S(4..5k)$  Maß für Schärfe
- $|L_m(0,05..0,6k) - L_m(2..4k)| = \Delta L_{Ausg.}$  Maß für die Ausgegl.
- $L_S(0,05..5k) = L_{ges}$  Maß für die Gesamtübertragung
- $SC(0,05..5k)$  Spektraler Centroid (Frequenzschwerpunkt)
- $L_{Terz}$  Terzpegel im Bereich 63 Hz bis 5 kHz

Die Faktorenanalyse der Daten STP2 ergibt für  $EW_{min} = 0,5$  sechs Faktoren mit folgender Bedeutung:

#### Faktor 1

Kennzeichnet **75 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für eine **hohe und mittenbetonte, nicht tiefe** Abstimmung des Instrumentes sprechen.

#### Faktor 2

Kennzeichnet **3,3 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für eine **nicht scharfe, klare** Abstimmung des Instrumentes sprechen.

#### Faktor 3

Kennzeichnet **2,2 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für eine **scharfe, nasale, eher bassbetonte** Abstimmung des Instrumentes sprechen.

#### Faktor 4

Kennzeichnet **1,8 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. **Korreliert nicht eindeutig** mit bisher betrachteten akustischen Frequenzkurvenmerkmalen.

#### Faktor 5

Kennzeichnet **1,5 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit einer **nicht hohen** Abstimmung des Instrumentes.

#### Faktor 6

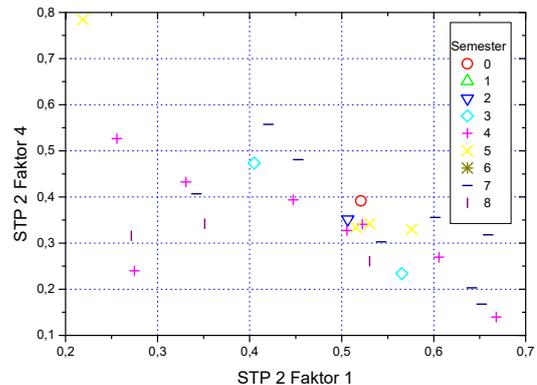
Kennzeichnet **1,4 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit einer **tiefen, nicht hohen** Abstimmung des Instrumentes.

Hierbei wurde erstmals beobachtet (auch bei STP 1), dass sich ein Faktor nicht per Korrelationsbetrachtung auf die Bedeutung (in der Regel mehrerer) klassischer Frequenzkurvenparameter zurückführen ließ.

### Cello – Semestereinfluss

Der Semestereinfluss ist bei den Celli nur sehr gering ausgeprägt. Eine wesentliche Ursache hierfür ist zweifellos, dass

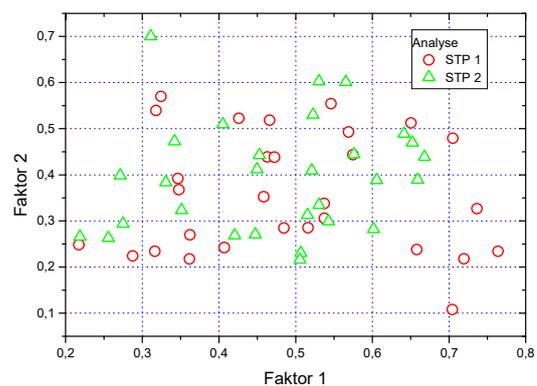
die Studenten in der Regel sich erst in höheren Semestern, also in einem schon gut ausgebildeten persönlichen Entwicklungsstand dem Cello widmen. Besonders deutlich ist dies in der Streudarstellung der Faktorladungen 1 und 4 zu erkennen (**Abbildung 12**). Wie bereits erwähnt findet man nur wenige Exemplare aus den ersten Semestern. Das „0-Instrument“ ist eine Arbeit, die der Student bereits vor dem Studium ausführte und sie aus Interesse ebenfalls zur Messung einreichte.



**Abbildung 12:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 4 für STP 2 Cello nach Semestern

### Studenten-Celli im Umfeld weiterer Instrumente

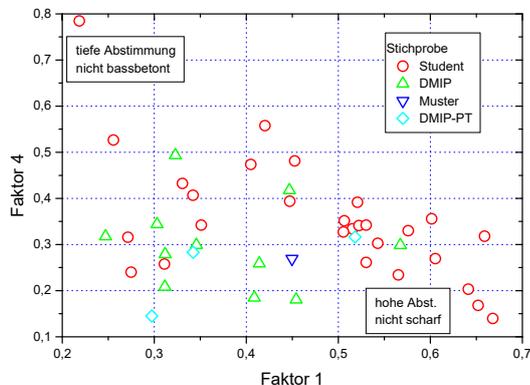
**Abbildung 12** weist auf eine recht breite Verteilung der Eigenschaften der Studenten-Celli hin. Es ist also zu erwarten, dass sich die Einbeziehung der DMIP-Objekte nicht wesentlich auf die Breite der Verteilung der Studenteninstrumente auswirkt. Dies ist in der Tat der Fall, wie die Streudarstellung der Faktorladungen 1 und 2 im Vergleich der Analysen nach STP 1 und 2 zeigt (**Abbildung 13**). Es entsteht nur ein leichtes „Zusammenrücken“ der Studenten-Celli.



**Abbildung 13:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 im Vergleich der Analyse an STP 1 und 2 Cello – dargestellt sind nur die Studenten-Instrumente.

Man könnte nun daraus die Vermutung ableiten, dass sich anders als im Falle der Bratsche keine Tendenz einer Trennung zwischen Studenten- und DMIP-Objekten abzeichnet.

Ergänzt man nun aber **Abbildung 12** um die Daten der DMIP-Objekte, so muss diese Vermutung verworfen werden. Trotz einer gewissen Durchmischung kann man doch Vorzugsbereiche der beiden Gruppen erkennen (**Abbildung 14**). Bei dem Objekt „Muster“ handelt es sich um ein Instrument, das ein Student als Referenzobjekt für eine Arbeit mit vorlegte.

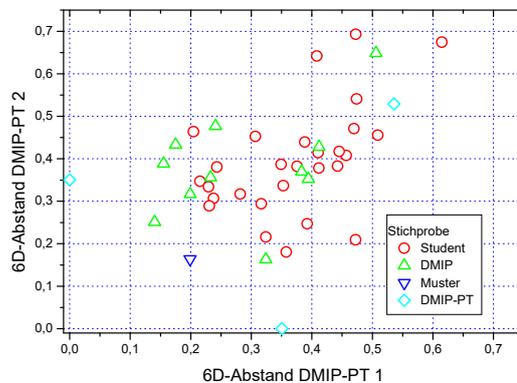


**Abbildung 14:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 4 für STP 2 Celli – dargestellt ist die gesamte STP 2

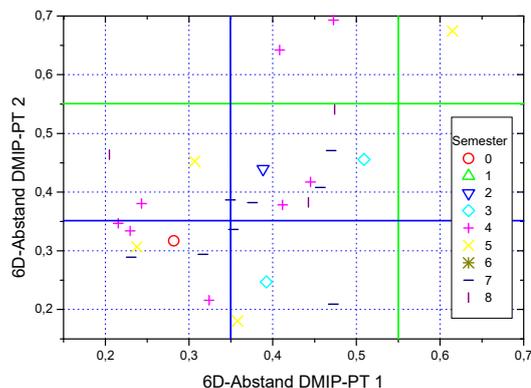
Besonders interessant erscheint die Positionierung der drei Preisträgerinstrumente (DMIP-PT). Im Wettbewerb Deutscher Musikinstrumentenpreis 2012 Cello wurden gleichwertig drei Sieger gekürt. Ein Preisträger sitzt hier quasi inmitten des Studentenpools. Es handelt sich dabei aber nicht um den aus dem Absolventenfeld des Studienganges stammenden Preisträger. Dieser siedelt sich zusammen mit dem dritten erfolgreichen Teilnehmer eher im typischen Bereich der weiteren Wettbewerber an.

Nun zeigt **Abbildung 14** ja wieder nur eine zweidimensionale Projektion des hier sechsdimensionalen Faktorraumes. Es bietet sich an, die Entfernungen der Instrumente zu den drei Preisträgern zu ermitteln, um mögliche Gruppen zu erkennen. Da die drei Preisträger in der 2D-Projektion doch recht weit auseinanderliegen, könnten mehrere, möglicherweise gegensätzliche Aspekte für die Entscheidung der Jury maßgeblich gewesen sein. Wie im Falle der Geigen soll deshalb auch bei den Celli der Abstand der Instrumente im hier nun sechsdimensionalen Raum der Faktorladungen betrachtet werden. Dazu wird in **Abbildung 15** die Verteilung der Abstände der Instrumente zu zwei der Preisträger des DMIP 2012 dargestellt. Der Abstand zwei der Preisträger zueinander beträgt ca. 0,35. Der dritte (gleichberechtigte!) Preisträger liegt deutlich, nämlich 0,55 Einheiten von den beiden entfernt. Nehmen wir die Preisträger als Maßstab, so sollten alle Celli, die sich im Abstandsbereich der drei Preisträger zueinander befinden irgendwie preiswürdig, die sich im Bereich der zwei eng beieinander liegenden Instrumente positionieren besonders preiswürdig sein. **Abbildung 16** stellt diese beiden Bereiche (blau und grün eingegrenzte Flächen in Richtung Ursprung) für die nach Semestern dargestellten Studenteninstrumente dar. Man kann zwei Dinge sofort feststellen: Praktisch alle

Studenten-Instrumente befinden sich im preiswürdigen Bereich. Darüber hinaus bestätigt sich, dass keine Semestertendenzen erkennbar ist.



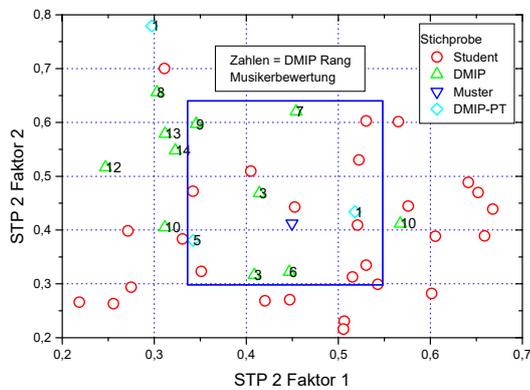
**Abbildung 15:** Abstand aller Celli im sechsdimensionalen Raum der Faktorladungen zu den Preisträgern 1 und 2



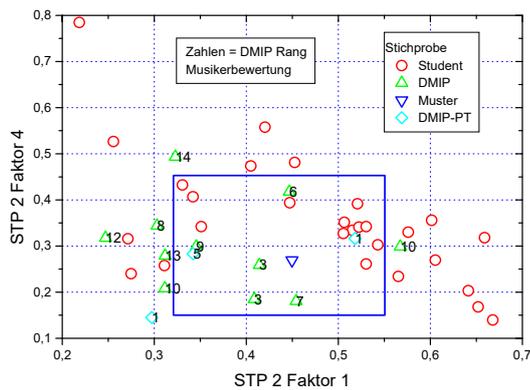
**Abbildung 16:** Abstand der Studenten-Celli im sechsdimensionalen Raum der Faktorladungen zu den Preisträgern 1 und 2 nach Semestern

Die für die Studenteninstrumente getroffenen Aussagen gelten natürlich auch für alle Wettbewerbsinstrumente. Auch diese fallen praktisch alle in den preiswürdigen Bereich. Die Entfernungen im n-dimensionalen Raum der Faktorladungen liefern für diese Stichprobe also keine Ergebnisse, die für eine Bewertung brauchbar wären. Auch die Tatsache, dass für die Findung der Preisträger weitere Merkmale neben den akustischen Eigenschaften herangezogen werden, mildert das Problem nur wenig ab. Neben den Ergebnissen akustischer Untersuchungen gehen Ergebnisse von Spieltests mit hochrangigen Musikern und handwerkliche Gutachten ein. Abhilfe schafft hier die Betrachtung nur ausgewählter Faktoren. In den Streudarstellungen der Faktorladungen 1 und 2 sowie 1 und 4 lassen sich Bereiche finden, in die jeweils die besseren Urteile der Testmusiker fallen. Diese Beobachtung wird durch die Tatsache erhärtet, dass die Urteile der Testmusiker mit der Bewertung der Instrumente anhand der Frequenzkurvenmerk-

male für den Wettbewerb DMIP Cello korrelieren. Entsprechende Darstellungen zeigen **Abbildung 17** und **Abbildung 18**. Die erwähnten Bereiche sind jeweils blau umrandet. Positiv wird eine offenbar mittlere, ausgewogene und doch etwas scharfe Abstimmung der Übertragung bewertet. Erfreulich ist dabei, dass auch etliche Studenten-Celli in den gut-Bereich fallen.



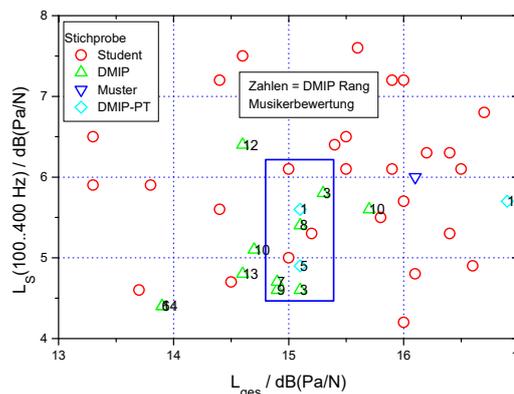
**Abbildung 17:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 für STP 2 Celli – eingblendet sind die Ränge der Musikerbewertung



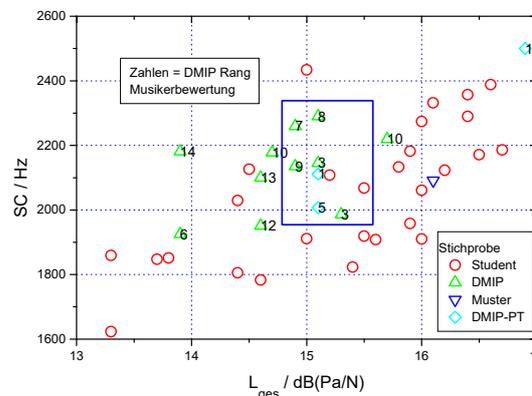
**Abbildung 18:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 4 für STP 2 Celli – eingblendet sind die Ränge der Musikerbewertung

Natürlich bleiben auch hier Fragen offen: Es fallen einige durchaus gute Bewertungen in den Bereich außerhalb des markierten Feldes. Faktor 4 erweist sich als offenbar in Sachen Bewertung als wichtig. Aber gerade seine Werte lassen sich keinen Trends der Frequenzkurvenmerkmale zuordnen. Für eine weitere Einschätzung sind zwei Tatsachen zu beachten: Erstens wurde hier mit Faktoren also statistischen Größen gearbeitet. Statistische Aussagen sind in der Regel globaler Natur und können in konkreten Fällen abweichende Aussagen bringen. Zweitens erfolgte die Bewertung durch Musiker, also Individualisten. Diese können in speziellen Belangen auch sehr spezielle Vorstellungen entwickeln. In Bezug auf den ersten genannten Fakt stellt sich die interessante Frage, ob die analoge Betrachtung konkreter Merkmale mehr Klarheit

bringt. Dazu betrachten wir die Streudarstellung aus Gesamtübertragung  $L_{ges}$  und Summenpegel im Volumenbereich  $L_s(100 \dots 400 \text{ Hz})$  (**Abbildung 19**) sowie Gesamtübertragung und Frequenzschwerpunkt  $SC$ , berechnet im Frequenzbereich 0 bis 5 kHz (**Abbildung 20**). Auch in diesen Darstellungen lassen sich mit den Rangfolgen, vergeben durch die Testmusiker gut-Bereiche darstellen. Diese fallen deutlich enger zusammen als bei der Diskussion anhand der Faktorladungen.



**Abbildung 19:** Streudarstellung der Merkmale Gesamtübertragung und Summenpegel im Volumenbereich STP 2 Celli



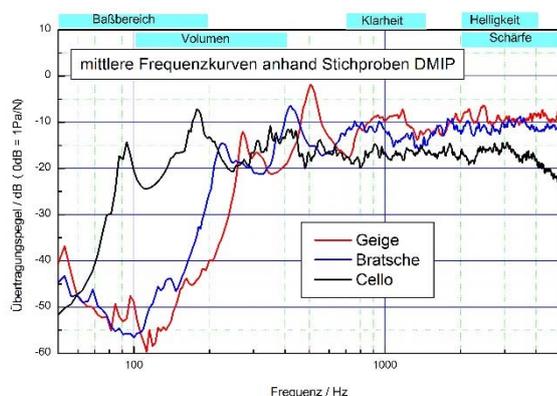
**Abbildung 20:** Streudarstellung der Merkmale Gesamtübertragung und Frequenzschwerpunkt (SC) STP 2 Celli

Es bestätigt sich das Ergebnis aus der Faktordiskussion. Die guten Bewertungen fallen in Bereiche einer mittleren, ausgewogenen Abstimmung. Aber es gibt Ausnahmen. Einer der letztlichen Preisträger, mit einem Rang 1 in der Musikergunst hebt sich deutlich in eine Richtung ab. Ein anderes Instrument, von den Musikern auf Rang 6 gesetzt, liegt in beiden Darstellungen genau entgegengesetzt deutlich außerhalb des allgemeinen gut-Bereiches. Die Ursache liegt auch hier in der Statistik verborgen. Obwohl die akustischen Merkmale konkrete, technisch beeinflussbare Werte darstellen, wurden sie über statistische Zusammenhänge mit Musikerurteilen aus einer Vielzahl möglicher Wertevarianten gewonnen. Statistisch weisen diese Merkmalswerte eine Gut-Tendenz auf, im

konkreten Einzelfall muss diese aber nicht zwingend zutreffen. Erst in der Summe aller verwendeten Merkmale sollte sich eine Korrelation zu den Musikerurteilen ergeben. Dies traf für die Stichprobe DMIP 2012 auch zu. Allerdings ist die Übereinstimmung, besser die Korrelation von Messung und Musikerurteilen natürlich auch von der Zusammensetzung der Jury abhängig.

## Geige, Bratsche, Cello – das Streichquartett

Bislang wurden die drei Instrumententypen, Geige, Bratsche, Cello, sie bilden zusammen das Instrumentarium des Streichquartetts, getrennt betrachtet. Dies war insofern unumgänglich, da die Auswahl der immer wieder herangezogenen Frequenzkurvenmerkmale auf Korrelationen mit Bewertungen von Stichproben von Instrumenten beruht. Nun kann man für eine Bewertung nicht Geige, Bratsche und Cello zusammenwerfen. Eine gemeinsame Betrachtung der Frequenzkurven der Instrumente wäre aber z. B. für die Diskussion der klanglichen Ergänzung der Instrumente zueinander sehr interessant. Es sei daran erinnert, dass HUTCHINS [3] gerade wegen Lücken in der Füllung des Klangraumes statt der bekannten, modernen vier Streichinstrumente Geige, Bratsche, Cello und Kontrabass ein Streich-Oktett vorschlägt und dies auch in kleiner Serie realisiert hat. Legt man die mittleren Frequenzkurven der drei hier betrachteten Typen in einem Diagramm übereinander, so sind die Unterschiede offensichtlich und unübersehbar. **Abbildung 21** zeigt dies anhand der mittleren Frequenzkurven jeweils einer DMIP-Stichprobe.



**Abbildung 21:** Mittlere Frequenzkurven Geige, Bratsche und Cello

Der Kontrabass musste zunächst aus den Betrachtungen ausgenommen werden, da eine deutlich abweichende Messung aufgrund der Frequenzlage und daraus resultierender Zwänge in Bezug auf Frequenzbereich und Auflösung vorliegen.

Um aber die Wirkung einzelnen Instrumente in der Vielfalt der Instrumente in Bezug auf die drei Typen beurteilen zu können, ist eine derartige Darstellung der Frequenzkurven wenig geeignet. Hier bietet sich nun die Faktorenanalyse geradezu an, um die wesentlichen Frequenzkurvenmerkmale bei Betrachtung des ganzen Streichquartetts zu finden. Hierzu wurde aus den vorhandenen Daten eine quasi Gesamtstich-

probe Geige-Bratsche-Cello, **STP GBC** mit folgenden Elementen gebildet:

62 Studenten-Geigen, drei Referenzgeigen, 30 Studenten-Bratschen, davon drei Viola d'amore zuzüglich einer Repromessung an einer Studenten-Bratsche, einer Vorbildbratsche sowie 29 Studenten-Celli. Hinzu kommen 22 Geigen der Stichprobe DMIP 2015 zuzüglich fünf Repromessungen, 15 Bratschen der Stichprobe DMIP 2018 zuzüglich drei Repromessungen und 14 Celli der Stichprobe DMIP 2012. STP GBC besteht aus 185 Objekten.

Die Faktorenanalyse der Frequenzkurvendaten liefert sechs Faktoren mit Eigenwert  $> 1$ . Da für die verschiedenen Typen sehr unterschiedliche Frequenzkurvenmerkmale zur Anwendung kommen, erfolgte die Korrelationsbetrachtung der Faktorladungen nur anhand der Terzpegel.

### Faktor 1

Kennzeichnet **73 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für **eine hohe, nicht tiefe** Abstimmung des Instrumentes sprechen.

### Faktor 2

Kennzeichnet **12 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für eine **nicht hohe, tiefe** Abstimmung des Instrumentes sprechen.

### Faktor 3

Kennzeichnet **1,6 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit Merkmalen, die für eine **nicht bassbetonte, voluminöse, klare, nicht nasale** Abstimmung des Instrumentes sprechen.

### Faktor 4

Kennzeichnet **0,8 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert mit Merkmalen, die für eine **leicht voluminöse, nicht helle** Abstimmung des Instrumentes sprechen.

### Faktor 5

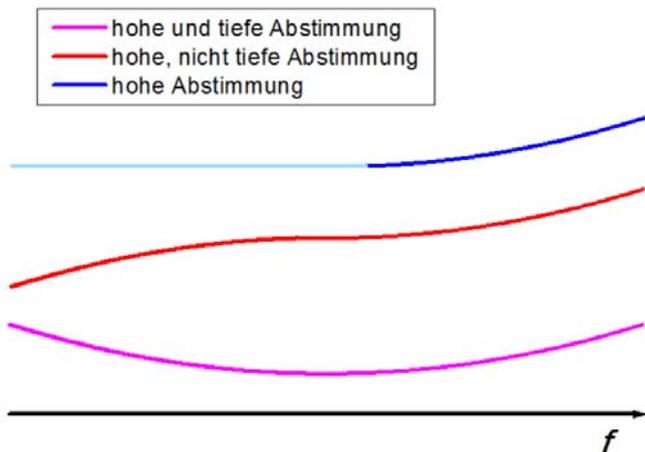
Kennzeichnet **0,6 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert in unklarer Weise mit den Terzbereichen.

### Faktor 6

Kennzeichnet **0,6 %** der Unterschiede in den Frequenzkurven. Korreliert positiv mit einer **nicht voluminösen, leicht hellen** Abstimmung des Instrumentes.

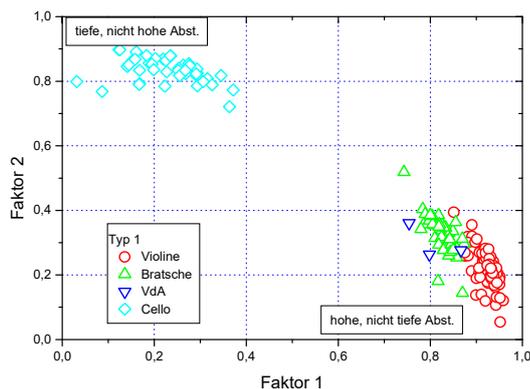
An dieser Stelle sei eine kurze Diskussion zur Beschreibung der Wirkung bzw. der Stellung der Faktoren eingefügt. In den Beschreibungen der Faktoren, wie oben, wird immer wieder auf die Abstimmung der Instrumente hingewiesen. Der dadurch dargestellte Zusammenhang ist folgender: Korreliert z. B. eine Faktorladung positiv mit einem oder mehreren Frequenzkurvenmerkmalen, die auf eine hohe Abstimmung des Instrumentes hindeuten (beispielsweise der Frequenzkurvenpegel im Bereich 2 kHz bis 4 kHz), so wird dem Faktor bei steigendem Wert der Ladung ein Hinweis auf eine hohe Abstimmung des Instrumentes zugeschrieben. Es gibt auch Fälle, in denen Korrelationen mit mehreren, z. T. auch gegensätzlichen Merkmalen auftauchen. So ist eine positive Korrelation mit einer hohen und tiefen Abstimmung sehr selten, aber

möglich. Wahrscheinlicher ist der Fall einer positiven Korrelation mit hohen Übertragungen bei hohen Frequenzen und einer negativen im tiefen Bereich. Die Beschreibung wäre in diesem Fall: Der Faktor spricht für eine hohe, nicht tiefe Abstimmung. Wichtig ist noch zu erwähnen, dass im ersten aufgeführten Beispiel einer Korrelation nur mit hoher Übertragung im oberen Frequenzbereich, keine Aussagen zu den anderen Bereichen möglich sind. **Abbildung 22** stellt einen Versuch dar, dies bildlich zu veranschaulichen. Die Kurven stellen prinzipielle Verläufe der Übertragungstendenzen, abgeleitet aus der Frequenzkurve, für einzelne Beschreibungen beispielhaft dar.



**Abbildung 22:** Veranschaulichung der Beschreibung der Positivtendenzen der Faktorladungen

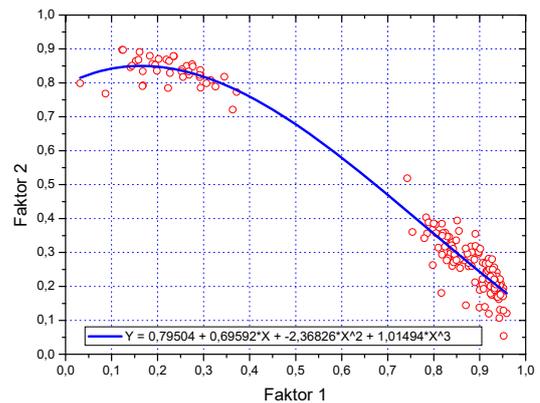
Die Faktorenanalyse lieferte für diesen Fall der Mischung der Typen zwei, relativ bedeutende Faktoren. **Abbildung 23** stellt deren Ladungsverteilung der Stichprobe GBC geordnet nach Typen dar.



**Abbildung 23:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 für STP GBC nach Typen

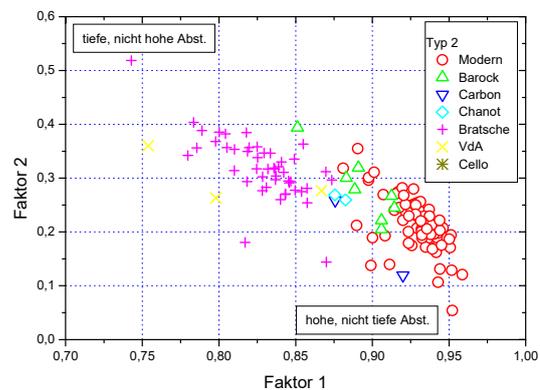
Die Darstellung bietet zunächst keine Überraschungen. Geigen und Bratschen sind im Sinne der Stichprobe hoch und nicht tief abgestimmt, im Gegensatz zu den Celli. Interessant ist aber, wie eng sich Geigen und Bratschen mit einer doch gewissen Übergangszone aneinanderschmiegen und wie groß

die Lücke zu den Celli ausfällt. Zwischen Geige und Bratsche liegt in der Stimmung eine Quinte, zwischen Bratsche und Cello eine Oktave, also nur eine Quarte mehr. Dies veranschaulicht einmal mehr das Bratschenproblem. Darüber hinaus scheint die Anordnung der Elemente eine Gruppierung um eine stetige Funktion zu bilden. Dies bestätigt sich, wenn man eine Regression durchführt. Ein Polynom dritten Grades beschreibt die Verteilung recht gut (**Abbildung 24**). Man kann sich die bessere Füllung der dargestellten „Klangspur“ mittels dem HUTCHINS-Oktett durchaus anschaulich vorstellen.



**Abbildung 24:** Regression der Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 STP GBC

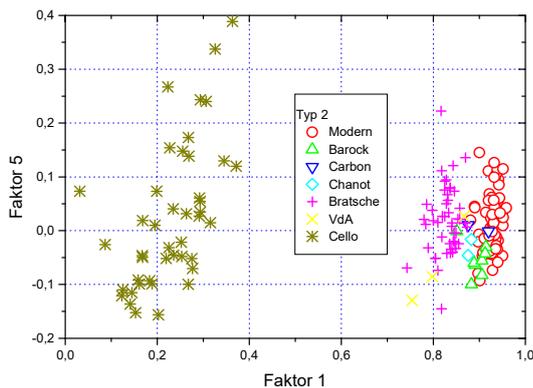
Sehr interessant ist auch die Verteilung der Faktorladungen 1 und 2, wenn man den Bereich auf die Werte der Geigen und Bratschen begrenzt (**Abbildung 25**). Vergleicht man mit der Verteilung der Instrumente in **Abbildung 24** ist zu beachten, dass im Sinne der Darstellung aller Instrumente und der größtmöglichen Ausnutzung der Datenfläche die Achsen nicht mehr den im Verhältnis gleichen Wertebereich umfassen. Die Anordnung der Instrumente wird so gegenüber **Abbildung 25** etwas verzerrt.



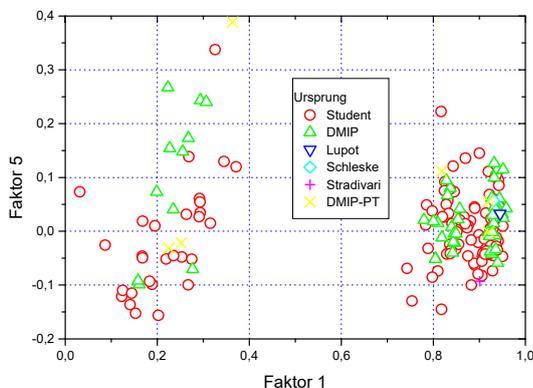
**Abbildung 25:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 2 für STP GBC nach Typen, begrenzt auf den Bereich Geige/Bratsche

Die Trennung zwischen Geige und Bratsche ist nun sehr deutlich zu erkennen. Auch bilden die Barockgeigen eine viel

homogenere Gruppe als in der reinen Auswertung Violine (siehe hierzu [2]). Natürlich gibt es gewisse „Ausreißer“, was insbesondere aufgrund der studentischen Experimente nicht verwundern darf. Die Stichprobe beinhaltet zwei Carbon-Instrumente. Obwohl sie sich in Bezug auf Faktor 1 etwas aus der Geigengruppe herausheben, liegen sie doch deutlich auseinander. Dies ist ein Beleg dafür, dass in der Anwendung des Werkstoffes ebenfalls ein erheblicher Gestaltungsspielraum liegt. Noch etwas deutlicher zeigt sich die Gruppenbildung der Barockinstrumente in der Verteilung der Faktorladungen 1 und 5. Diese zeigen **Abbildung 26** und **Abbildung 27** einmal nach Typen und einmal nach Herkunft.



**Abbildung 26:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 5 für STP GBC nach Typen

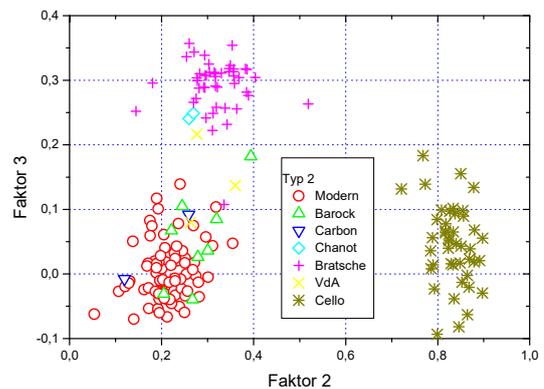


**Abbildung 27:** Verteilung der Faktorladungen 1 und 5 für STP GBC nach Herkunft

Wie man sieht, rücken die Barockgeigen in der Ebene der Faktoren 1 und 5 noch näher zusammen. Ärgerlich ist, dass man gerade dem offenbar in diesem Zusammenhang wichtigen Faktor 5 keinen befriedigenden Zusammenhang mit dem Übertragungsverhalten der Instrumente zuordnen kann. Die Korrelation deutet bei steigender Faktorladung auf eine weder klare noch nasale, andererseits aber schon leicht zur Schärfe tendierende Charakteristik. Eine weitere interessante Beobachtung besteht darin, dass sich im Bereich der Barockgeigen (in der Darstellung Faktoren 1 und 5!) auch einige moderne

Studentenviolenen ansiedeln, die „gestandenen Hersteller der DMIP-Instrumente“ hier aber eindeutig abgrenzen. Nicht unerwähnt bleiben darf die Beobachtung, dass das Stradivari-Instrument in Bezug auf die Übertragung deutlich in den Bereich der Barockgeigen fällt.

Eine weitere Faktorenkombination, die Geige, Bratsche und Cello gut trennt, zeigt **Abbildung 28**. Allerdings wandern hier die Chantot-Geigen vollständig zu den Bratschen und die Barockgeigen grenzen sich nur sehr bedingt ab.



**Abbildung 28:** Verteilung der Faktorladungen 2 und 3 für STP GBC nach Herkunft

## Fazit

Die Ergebnisse von Faktorenanalysen der Frequenzkurven von Streichinstrumenten belegen, dass rein statistische Betrachtungen, wie eigentlich zu erwarten, nur globale Zusammenhänge für das konkrete Problem zu Tage fördern. Daraus resultieren aber durchaus wichtige Erkenntnisse. Bei der Interpretation in Bezug auf konkrete Einzelinstrumente, wie man sie z. B. in Zusammenhang mit einem Wettbewerb benötigt, kommt man selten zu befriedigenden Aussagen. Dies trifft zweifellos auch auf den Zusammenhang zu detaillierten baulichen Einflüssen zu. Eine Ursache dafür ist, dass sich die Faktoren in Bezug auf Ladung und Bedeutung in Abhängigkeit von der betrachteten Stichprobe verändern.

Akustische Messungen und das Hören hängen eng zusammen. Die Ergebnisse der gemeinsamen Betrachtung von Geige, Bratsche und Cello lassen deshalb den Schluss zu, dass sich zumindest bestimmte Eigenschaften der einzelnen Instrumente erst im Ensemble manifestieren. Nicht zuletzt diese Tatsache macht das gemeinsame Musikzieren so wertvoll.

## 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 – Violen. Fortschritte der Akustik – DAGA 2021
- [3] Hutchins, Carleen (1988): Violen. In: Winkler, Klaus: Die Physik der Musikinstrumente. Heidelberg, S. 64–77