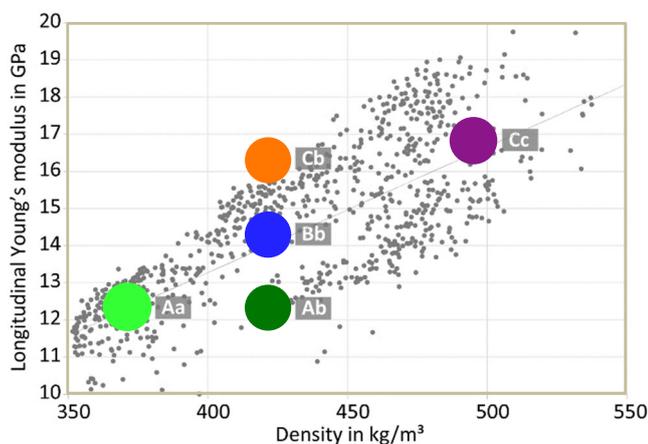


# Charakterisierung von Gitarren mit Hilfe von Transferfunktionsmessungen

Sebastian Merchel, Tom Wühle, Ercan Altinsoy  
 Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Akustik und Haptik,  
 E-Mail: [sebastian.merchel@tu-dresden.de](mailto:sebastian.merchel@tu-dresden.de)

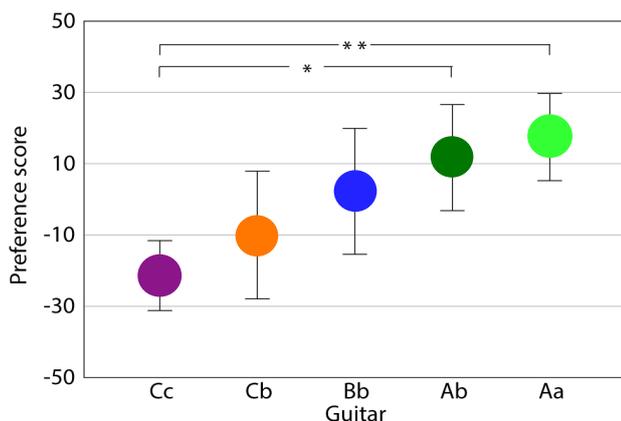
## Einleitung

Dieser Beitrag diskutiert die akustische Charakterisierung von Gitarren mit Hilfe von Transferfunktionen zwischen einer mit einem Impulshammer angeregten Resonanzdecke und dem abgestrahlten Schall. Dazu werden beispielhaft Messungen an Stahlsaitengitarren ausgewertet. Es handelte sich um fünf Taylor 814ce Grand Auditorium mit identischem Design, aber variierenden Materialparametern [1]. Konkret wurden die Biegesteifigkeit und Dichte der Resonanzdecke und Verleistung wie in *Abbildung 1* dargestellt variiert.



**Abbildung 1:** Auswahl von Holzstücken mit verschiedener Steifigkeit und Dichte für Resonanzdecken und Verleistung von fünf geometrisch identischen Gitarren [1].

Die fünf resultierenden Gitarren konnten in vorangegangenen Hörversuchen verlässlich allein auf Grund ihres Klanges unterschieden und nach Präferenz sortiert werden. Die Ergebnisse sind in *Abbildung 2* dargestellt.

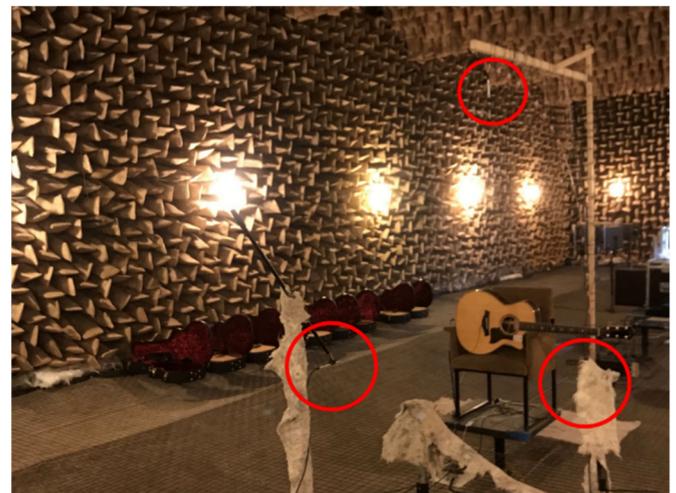


**Abbildung 2:** Mittlere Präferenzbewertung von 23 Gitarrist\*innen für alle fünf Gitarren im Hörversuch aufgetragen mit 95% Konfidenzintervallen. Die Gitarren **Aa** und **Ab** werden als statistisch signifikant besser beurteilt als die Gitarre **Cc** [1].

Es stellt sich die Frage ob die zugrundeliegenden klanglichen Unterschiede mit Hilfe von Transferfunktionsmessungen erklärt werden können.

## Transferfunktionsmessungen

Die Schallabstrahlung aller Gitarren wurde im großen schalltoten Raum der TU Dresden unter Verwendung von Übertragungsfunktionen zwischen Kraftanregung des Steges und Schalldruck an drei Positionen gemessen. Der Aufbau ist in *Abbildung 3* dargestellt. Drei Messmikrofone wurden jeweils im Abstand von 2 m aufgestellt: ein G.R.A.S. 40HL vor der Gitarre und zwei B&K 4188 Freifeldkapseln mit B&K 2671 Vorverstärkern 45° seitlich und oberhalb der Gitarre. Ein Beschleunigungsaufnehmer vom Typ MMF KS95 wurde in der Mitte des Stegs montiert. Alle Signale wurden mit Head Artemis und einem Head Octobox-Frontend aufgenommen.



**Abbildung 3:** Konfiguration für Übertragungsfunktionsmessungen im reflexionsarmen Raum. Markiert sind die Mikrofonpositionen 2 m vor (front), seitlich (side) und über (top) der Gitarre.

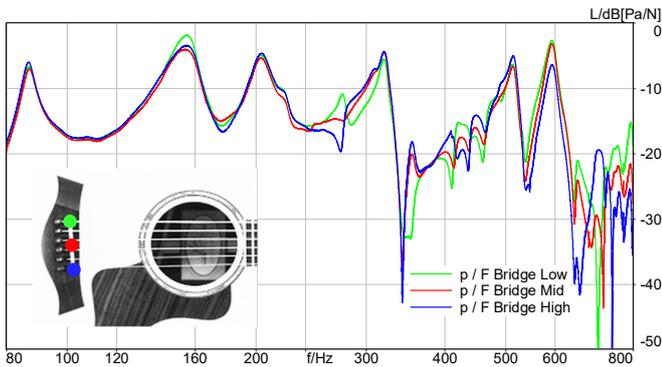
Ein Impulshammer B&K 8202 mit einer Gummispitze und einem Kraftsensor Dytran 1051 wurde verwendet, um den Steg wie in *Abbildung 4* dargestellt anzuregen.



**Abbildung 4:** Anschlag des Stegs mit einem Impulshammer.

## Einfluss der Anschlagposition

Das Foto zeigt den Anschlag in der Stegmitte (mid). Zusätzlich wurde der Steg, am Befestigungspunkt der tiefen E-Saite (low) und der hohen E-Saite (high) angeschlagen. Bei allen Übertragungsfunktionsmessungen wurden die Saiten mit der Hand gedämpft, jedoch nicht (wie im Foto) vor dem Schallloch. Die Position der Hand wurde in Richtung des Halses verschoben um die Resonanz des Luftvolumens nicht zu beeinflussen. **Abbildung 5** zeigt eine beispielhafte Übertragungsfunktion für alle drei Anschlagpositionen. Der Verlauf der Kurven unterhalb von 240 Hz ist nahezu identisch. Bei 270 Hz kehrt sich die allgemeine Tendenz der Kurven für den Aufschlag an der unteren und oberen Position um. Zu höheren Frequenzen hin variieren die Amplituden, aber der generelle Kurvenverlauf ist ähnlich. Oberhalb von 640 Hz sind starke Schwankungen zu erkennen.



**Abbildung 5:** Übertragungsfunktion zwischen Schalldruck am frontalen Mikrofon und Kräfteintrag am Steg der Gitarre Aa für drei unterschiedlichen Anschlagpositionen (low, mid, high).

In allen folgenden Abbildungen wird für jede Übertragungsfunktion der Mittelwert über alle drei Anschlagpositionen (low, mid, high) gebildet. Wie in der gemittelten Übertragungsfunktion in **Abbildung 7** zu sehen ist, verschwindet die Abweichung bei 270 Hz nahezu. Gemittelte Übertragungsfunktionen über 640 Hz sollten mit Vorsicht interpretiert werden.

## Modalanalyse

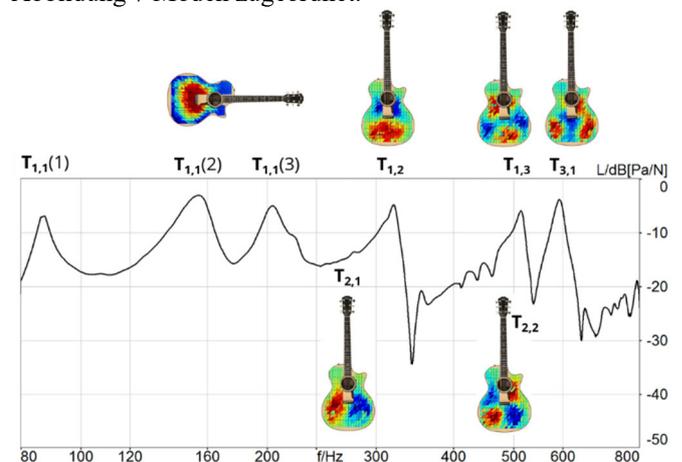
Die Spitzen in der Übertragungsfunktion können Moden zugeordnet und dadurch einfacher interpretiert werden. Dazu wurde eine experimentelle Modalanalyse der Gitarre Aa mittels Roving-Hammer-Test durchgeführt (B&K 8202 mit Kraftsensor Dytran 1051 sowie zwei Beschleunigungsaufnehmer MMF KS95). Die Beschleunigungsaufnehmer wurden mit einer dünnen Wachsschicht befestigt und hatten eine Masse von jeweils 2,9 g, was im Vergleich zur Masse der Resonanzdecke und der Verleistung gering ist. Das Raster für die Hammeranregung wurde mit Papier markiert (siehe **Abbildung 6**), was nicht viel Gewicht mit sich brachte. Da die Saiten während der Messung nicht entfernt wurden, sind keine Messpunkte zwischen Schallloch und Steg sowie am Gitarrenhals verfügbar. Für die Messungen wurde die Gitarre waagrecht auf zwei Vließstreifen montiert, um eine starke Dämpfung des Bodens zu vermeiden. Außerdem war es so einfacher, die Gitarre gleichmäßig von oben anzuschlagen, wobei der Aufschlagwinkel des Hammers senkrecht zur

Oberfläche blieb. Jeder Anschlag wurde separat kontrolliert und die Kohärenzfunktion überwacht um Doppelschläge zu vermeiden und sicherzustellen, dass im gesamten Frequenzbereich ausreichend Energie eingebracht wurde.



**Abbildung 6:** Raster für die experimentelle Modalanalyse mittels Roving-Hammer bei fester Position der Beschleunigungsaufnehmer.

Für jede Anschlagposition des Hammers wird eine Übertragungsfunktion zwischen Kräfteintrag und Beschleunigung berechnet. Anhand des vollständigen Datensatzes können die Eigenformen bestimmt werden. Mit Hilfe der resultierenden Visualisierung von Schwingformen der Decke wurden die Peaks in der Transferfunktion in **Abbildung 7** Moden zugeordnet.



**Abbildung 7:** Übertragungsfunktion zwischen frontalem Mikrofon und Kräfteintrag am Steg für Gitarre Aa, gemittelt über alle drei Anschlagpositionen am Steg. Die Spitzen der Übertragungsfunktion sind den dominanten Moden zugeordnet. Dargestellt ist die maximale Auslenkung der Resonanzdecke. Rot bedeutet Auslenkung nach außen, blau bedeutet Auslenkung nach innen und grün bedeutet keine Bewegung.

$T_{1,1}(1)$  ist die Luftresonanz des Innenvolumens,  $T_{1,1}(2)$  ist die erste Resonanz der Decke und  $T_{1,1}(3)$  ist die erste Resonanz des Bodens. Alle drei Resonanzen strahlen effektiv ab und tragen damit sicher deutlich zum Gitarrenklang bei.

$T_{2,1}$  wird „cross dipole“ genannt [2] und strahlt bei 270 Hz viel weniger Energie ab als  $T_{1,1}$ , da auf Grund der Symmetrie die durchschnittliche Auslenkung des Resonanzbodens nahezu Null ist – die gegenphasig schwingenden Flächen löschen sich

aus. Außerdem wird  $T_{2,1}$  nicht gut angeregt, wenn der Hammer den Steg in der Mitte, d. h. genau auf der Knotenlinie, anschlägt. Je nach Anregung auf der unteren oder oberen Seite des Steges ändert sich für  $T_{2,1}$  der Phasenwinkel relativ zu den benachbarten Moden und erklärt den unterschiedlichen Verlauf der Übertragungsfunktion, welcher in Abbildung 5 bei 270 Hz aufgefallen war.

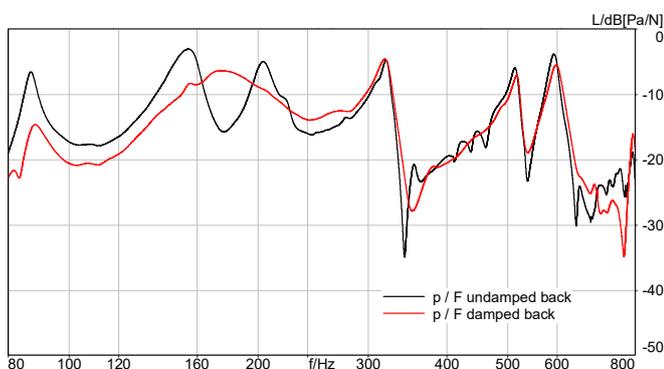
Der Peak oberhalb von 300 Hz kann der  $T_{1,2}$ -Mode zugeordnet werden – dem „long dipole“. In der Abbildung ist eine gute Schallabstrahlung zu beobachten, vermutlich weil die Mode aufgrund des Schalllochs und der Verjüngung des Gitarrenkörpers asymmetrisch wird.

Die beiden dominanten Spitzen zwischen 500 Hz und 600 Hz sind „tripole“ Moden mit einer mittleren Auslenkung der Resonanzdecke ungleich Null:  $T_{1,3}$  und  $T_{3,1}$ . Die starke Senke dazwischen kann durch Auslöschungseffekte erklärt werden, da der von beiden Moden abgestrahlte Schall in diesem Bereich gegenphasig ist.

Die Mode  $T_{2,2}$  hat ebenfalls ihre Resonanzfrequenz im Bereich von 500 Hz, aber sie strahlt auf Grund der symmetrischen Oberflächenauslenkung ähnlich  $T_{2,1}$  wahrscheinlich wenig Schall ab.

### Bedämpfung des Resonanzbodens

Zwischen 340 Hz und 500 Hz sind in Abbildung 7 mehrere Spitzen und Einbrüche zu beobachten, die nicht den Moden der Resonanzdecke zugeordnet werden können. Interessanterweise werden diese Resonanzen reduziert, wenn die Rückseite der Gitarre durch Andrücken gegen einen Stoffballen bedämpft wird. Ein direkter Vergleich der Gitarre Aa mit gedämpftem und ungedämpftem Resonanzboden unter Verwendung der Mittelung über alle drei Anschlagspositionen (top, mid, low) ist in Abbildung 8 dargestellt. Neben der Glättung des Frequenzgangs zwischen 340 Hz und 500 Hz ist die fehlende Bodenresonanz  $T_{1,1}(3)$  und eine Frequenzverschiebung und Dämpfung der Deckenresonanz  $T_{1,1}(2)$  zu beobachten. Außerdem ist die gekoppelte Luftresonanz  $T_{1,1}(1)$  im Pegel reduziert. Hier bestätigt sich, dass die Resonanzen nicht unabhängig voneinander sind, sondern stark miteinander gekoppelt.

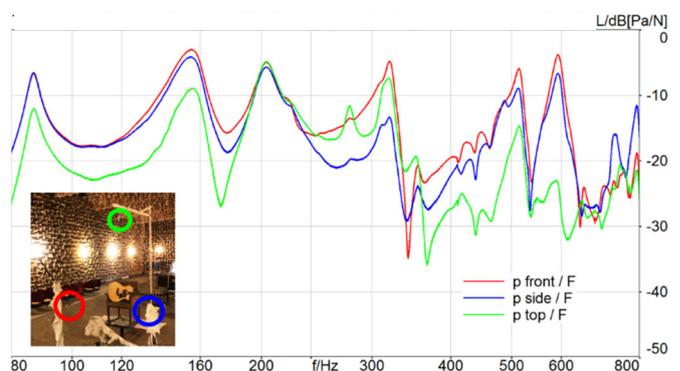


**Abbildung 8:** Übertragungsfunktion zwischen frontalem Mikrofon und Kräfteintrag am Steg für die Gitarre Aa mit und ohne Bedämpfen des Gitarrenbodens.

Die Dämpfung der Rückseite der Gitarre hat keinen starken Einfluss auf die höheren Deckenmoden ( $T_{1,2}$ ,  $T_{1,3}$  und  $T_{3,1}$ ).

### Einfluss der Mikrofonposition

Ein Vergleich zwischen den drei Mikrofonpositionen ist in Abbildung 9 dargestellt. Die Übertragungsfunktion in Richtung der frontalen (rot) und seitlichen (blau) Mikrofonpositionen ist recht ähnlich, außer im Bereich um 300 Hz. Die dominante Mode in diesem Frequenzbereich,  $T_{1,2}$ , scheint gut nach vorne abzustrahlen, zeigt aber einige Auslöschungseffekte in Richtung  $45^\circ$  zur Seite. An der oberen (grünen) Mikrofonposition, d. h. in Richtung des Kopfes des Musikers, ist eine wesentlich größere Abweichung zu erkennen. Interessanterweise ist der Gesamtpegel bei Frequenzen unter 200 Hz niedriger als an der Vorderseite oder der Seite, was darauf hindeutet, dass die Gitarre bei diesen niedrigen Frequenzen, bei denen die Moden  $T_{1,1}(1)$  und  $T_{1,1}(2)$  dominieren, nicht als omnidirektionaler Monopol abstrahlt. Der Pegel bei 200 Hz, wo die Rückresonanz  $T_{1,1}(3)$  aktiv ist, ist in allen Richtungen vergleichbar.



**Abbildung 9:** Übertragungsfunktionen zwischen Schalldruck am vorderen (front), seitlichen (side) und oberen (top) Mikrofon und Kräfteintrag am Steg für Gitarre Aa.

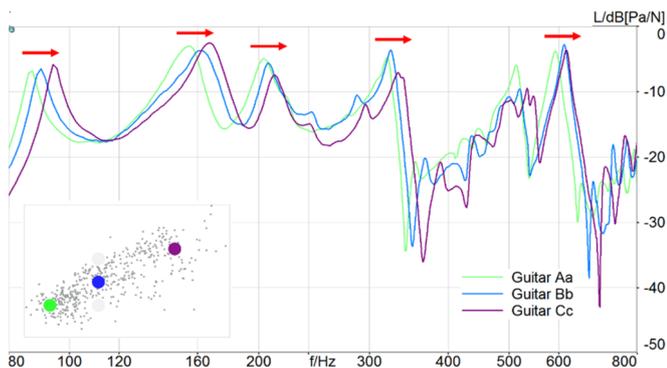
Auffällig ist auch die gute Schallabstrahlung der Mode  $T_{2,1}$  bei 270 Hz nach oben (grün). Bei Frequenzen oberhalb von 340 Hz nimmt die Richtwirkung der Gitarre zu, mit einer besseren Abstrahlung in die horizontale Ebene. Da bei den vorangegangenen Hörversuchen nur die Aufnahme des frontalen Mikrofons verwendet wurde [1], werden die folgenden Vergleiche für die frontale Richtung diskutiert.

### Vergleich verschiedener Gitarren

Nachdem wir das allgemeine vibroakustische Verhalten einer Gitarre erörtert haben, können wir nun verschiedene Gitarren mit unterschiedlichen Materialeigenschaften vergleichen. Zunächst betrachten wir drei Gitarren deren Decken aus Holz mit einem ähnlichen Verhältnis von Steifigkeit längs zur Faser und Dichte hergestellt wurden: Aa, Bb und Cc. Es wurde ursprünglich erwartet, dass dieses konstante Verhältnis zu gleichen modalen Resonanzfrequenzen führen würde. In Abbildung 10 sind die Resonanzen der Übertragungsfunktionen jedoch nicht gleich, sondern es ist ein systematischer Anstieg von Gitarre Aa zu Gitarre Cc zu beobachten. Dieser Anstieg könnte durch den Einfluss des stark variierenden Schermoduls der ausgewählten Deckenhölzer [3] erklärt werden. Die Frequenzen der Deckenmoden (z. B.  $T_{1,1}(2)$ ,  $T_{1,2}$ ,  $T_{3,1}$ ) verschieben sich in Richtung höherer Frequenzen. Interessanterweise ist ein ähnlicher Einfluss auf die erste Mode des Bodens  $T_{1,1}(3)$  und

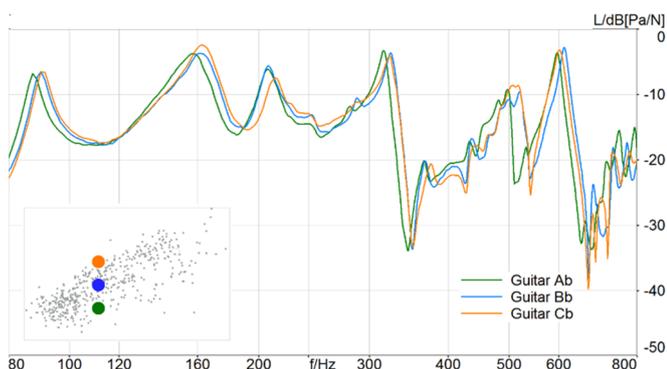
sogar die Luftresonanz  $T_{1,1}(1)$  sichtbar. Dies suggeriert erneut eine starke Kopplung der Resonanzen. Die diskutierte Verschiebung der modalen Frequenzen kann Klangveränderungen erklären, die im Hörversuch festgestellt wurden. Zum Beispiel führen die niedrigeren Resonanzen der höher bewerteten Gitarren Aa und Bb zu mehr Bass.

Eine andere These war, dass schwerere Resonanzböden zu einem allgemein niedrigeren Pegel führen würden. In Abbildung 10 ist jedoch kein systematischer Einfluss zunehmender Masse (von Aa zu Cc) auf den Pegel der Übertragungsfunktion zu erkennen. Dies gilt auch für höhere Frequenzen über 800 Hz, welche hier nicht dargestellt sind.



**Abbildung 10:** Vergleich der Gitarren Aa, Bb und Cc unter Verwendung der Übertragungsfunktion zwischen frontalem Mikrofon und Krafteintrag am Steg.

Geringe Änderungen der Resonanzfrequenzen werden auch beobachtet, wenn die Masse der Decken konstant gehalten und nur die Steifigkeit variiert wird. Dies wird deutlich, wenn man die Gitarren Ab, Bb und Cb in Abbildung 11 vergleicht. Eine Erhöhung der Deckensteifigkeit bei Gitarre Ab (grün) zur Gitarre Bb (blau) erhöht mehrere Resonanzfrequenzen (z. B.  $T_{1,1}(1)$ ,  $T_{1,1}(2)$ ,  $T_{1,2}$ , ...), aber nicht alle Frequenzen (z. B.  $T_{1,1}(3)$ ). Überraschenderweise unterscheiden sich die Resonanzfrequenzen der Gitarren Bb (blau) und Cb (orange) kaum, mit Ausnahme von  $T_{1,1}(3)$ .



**Abbildung 11:** Vergleich der Gitarren Ab, Bb und Cb mit identischer Deckenmasse unter Verwendung der Übertragungsfunktion zwischen frontalem Mikrofon und Krafteintrag am Steg.

## Zusammenfassung

Die Messungen bestätigen, dass die natürliche Variation der Materialeigenschaften des Deckenholzes einen starken Einfluss auf die Gitarrenresonanzen hat. Insbesondere die unterschiedliche Bassintensität in den Musikaufnahmen kann

mit den Resonanzverschiebungen in Verbindung gebracht werden. Interessanterweise wurde kein Einfluss der Deckendichte - und damit der Deckenmasse bei gleichbleibender Deckendicke - auf den Pegel der Übertragungsfunktionen festgestellt. Dies steht im Einklang damit, dass auch bei den für den Hörversuch eingespielten Aufnahmen keine systematischen Lautheitsunterschiede festgestellt werden konnten.

Die in den Übertragungsfunktionen gemessene Verschiebung der Resonanzfrequenzen und die daraus resultierende Ausgewogenheit zwischen Bässen und höheren Frequenzen in den gespielten Musikstücken ist vermutlich ein dominierender Grund für die Präferenzrangfolge in den vorangegangenen Hörtests. Allerdings wurde auch für Gitarren mit nahezu identischen Übertragungsfunktionen (z. B. Bb und Cb) eine (allerdings nicht signifikante) Präferenz tendenz festgestellt (vgl. Abbildung 2). Dies suggeriert dass es mindestens ein weiteres Klangattribut gibt, welches die Präferenz im Hörversuch beeinflusst.

Bei den hier diskutierten Gitarren wurden Steifigkeit und Dichte von Deckenholz und Leisten gleichzeitig variiert. In einer zweiten Gruppe Gitarren wurden nur die Deckplatten variiert, jedoch die Materialparameter der Verleimung konstant gehalten. Auch diese Gitarren konnten in einem separaten Hörversuch nach Präferenz sortiert werden [1]. Auch in dieser zweiten Gruppe gab es Gitarren mit nahezu identischer Übertragungsfunktion, was die obige Hypothese unterstützt.

Bislang wurde der Gitarrenkorpus einzeln untersucht. Der Korpus ist jedoch an ein weiteres Resonanzsystem gekoppelt – die Saiten. Die Interaktion der beiden Resonanzsysteme und das damit einhergehende zeitliche Verhalten liefert vlt. das fehlende Klangattribut und soll in einer separaten Publikation diskutiert werden.

## Danksagung

Diese Forschung wurde unterstützt von Taylor Guitars und Pacific Rim Tonewoods (PRT), einem Spezialsägewerk, das sich ganz der Produktion von Gitarrenholz widmet, sowie dem Wir! – Bündnis I-Ma-Tech. Spezieller Dank gebührt David Olson, Steve McMinn und Eric Warner sowie Bob Taylor, Andy Powers und Terry Myers.

## Literatur

- [1] Merchel, S., Altinsoy, M. E., Olson, D. „Perceptual evaluation of bracewood and soundboard wood variations on the preference of a steel-string acoustic guitar“ J. Acoust. Soc. Am. 146, 2608 (2019)
- [2] Gore, T., Gilet, G. „Contemporary Acoustic Guitar Design and Build“ Trevor Gore (2016)
- [3] Merchel, S., Zenker, B., Altinsoy, M. E., Olson, D. „Simulation des Einflusses von Materialparametern auf das Schwingungsverhalten einer Gitarrendecke“ DAGA Stuttgart (2022)