

Relevante Einflüsse der Holzqualität der Böden von Gitarren und Celli auf die akustischen Eigenschaften der Instrumente

Gunter Ziegenhals

IfM - Institut für Musikinstrumentenbau e.V. an der TU Dresden, 08267 Klingenthal OT Zwota, post@ifm-zwota.de

Einleitung

Die vorliegende Arbeit wendet sich ausführlich den Materialeigenschaften der Böden der Zupf- und Streichinstrumente zu. Die wesentliche Zielstellung bestand darin, die Bodenholzeigenschaften herauszufinden, die einen nachweislichen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften von Gitarren und Celli ausüben, die Art und Weise des Einflusses zu bestimmen und, wenn möglich, gut-Bereiche für diese Eigenschaften und damit für die HolzAuswahl anzugeben.

Materialanalyse und Materialauswahl

Die Rohlinge für Böden und Decken von Gitarren stellen so genannte Hälften (Deckenhälften) dar. Diese gewinnt man, indem im Radialschnitt aus einem ausgewählten Stamm Bretter mit leichtem Übermaß der Hälften und der Dicke von zwei Hälften plus Trennfuge plus Zugabe herausgeschnitten, im klassischen Verfahren herausgespalten werden. Das Brett liefert also beide Hälften, die demnach ursprünglich „nebeneinander im Stamm lagen“. Moderne Sägewerkstechniken verwenden Blockbandsägen, die lange Bretter entsprechender Dicke liefern. Anschließend schneidet man mit der Cup-Säge die „Doppeldecken“, wobei optisch sichtbare Schadbereiche ausgespart werden. Danach trennt man das Brett auf, lässt aber einen kleinen Steg stehen, so dass die entstandenen Deckenhälften noch verbunden sind, im Zwischenraum aber die Luft zum Trocknen zirkulieren kann. Nach entsprechender Lagerung erfolgt die endgültige Trennung und nochmalige Lagerung im sägerauen Zustand mit entsprechenden Kennzeichnungen um Verwechslungen zu vermeiden. Das Schleifen, das Fugen an der Waldkante und eine letzte Lagerung beenden die „Halbzeugherstellung“. Typische Abmessungen der Hälften sind:

- Deckenhälften – 580 mm x 230 mm x 5,5 mm
- Bodenhälften – 565 mm x 220 mm x 5,2 mm.

Derartige Decken- und Bodenhälften bildeten den Ausgangspunkt für das hier beschriebene Projekt.

Betrachtet man die Aussagen der Hersteller über die Böden von Gitarren, so findet man folgende Materialangaben z.B. in [1]: Ahorn, Basswood (Tiliaceae spp.), Birnbaum, Bubinga, Fichte, Jacaranda, Mahagoni, Nato, Ovangkol, Palisander, Zebrano u.a. Werden Preise der Instrumente mit einbezogen, so zeigt sich zunächst nur, dass Ahorn praktisch nur in der unteren Preisklasse vorkommt, die anderen Holzarten aber auf alle Preisklassen verteilt sind. Erst konkreter Hinterfragen ergibt, dass ohne nähere Angaben, Böden gesperrt hergestellt sind. Erst im gehobenen Preissegment erscheint der Zusatz massiv, was auf die Verwendung von Vollholz hindeutet. Im oberen Preissegment dominiert schließlich der Vollholzboden. Es drängen sich zwei Folgerungen auf:

- Der traditionell wesentliche Unterschied zwischen unteren und oberen Preissegmenten liegt nicht in der Auswahl der Holzart an sich, sondern in der Verwendung gesperrter Böden – Vollholzböden.
- Die Unterschiede in den Eigenschaften der verschiedenen Holzarten können nicht als alleinige wesentliche Ursache für die Qualitätsunterschiede in Bezug auf die akustischen Eigenschaften bei der traditionellen Trennung in Hauptqualitätsgruppen angesehen werden.

Für Decken erwiesen sich in entsprechenden Untersuchungen die Größen E-Modul in Faserrichtung E_F und Dichte ρ als wesentliche, mit den akustischen Eigenschaften der Fertiginstrumente korrelierende Merkmale. Als „gut“ bewertete Instrumente erhält man, wenn sich die beiden Größen in folgenden Bereichen bewegen:

- $E_F < 12 \text{ GPa}$
- $\rho < 0,44 \text{ g/cm}^3$.

Interessant ist, dass keine unteren gut-Grenzen angegeben werden konnten. Offensichtlich kamen entsprechend leichte und weiche Decken, die zu einer Trendumkehr führen würden in der untersuchten Stichprobe nicht vor [2].

Für die oben genannten Bodenmaterialien (Vollholz) liegen die beiden Merkmale in folgenden Bereichen:

- $6,4 \text{ GPa} \leq E_F \leq 18 \text{ GPa}$ (Streubreite $\pm 48\%$)
- $0,42 \text{ g/cm}^3 \leq \rho \leq 1,0 \text{ g/cm}^3$ (Streubreite $\pm 41\%$).

Entsprechende Angaben zu Eigenschaften gesperrter (laminiertes) Holzwerkstoffe fanden sich in der Literatur nicht.

In die Untersuchungen wurden folgende Holzarten einbezogen:

- Nussbaum
- Ostindischer Palisander
- Ahorn
- Aningré
- Mahagoni
- laminierte Varianten der Hölzer (Zusatz L).

Die Streubreite der Merkmale ist gegenüber dem obigen Angaben etwas eingeschränkt ($E_F \pm 41\%$, $\rho \pm 37\%$), erscheint aber immer noch ausreichend.

Der grundsätzliche Lösungsansatz bestand in Bau und Untersuchung baugleicher Instrumente unter Verwendung unterschiedlicher Bodenmaterialien. Das Projekt erfolgte in Zusammenarbeit mit der Karl Höfner GmbH & Co KG. Gemeinsam wurde entschieden, pro Bodenholzart drei Instrumente herzustellen, im Falle der laminierten Böden nur je zwei Exemplare, da hier eine geringere Streuung erwartet wurde. Ein zusätzliches Experiment bestand im Vergleich zweier Bodenwölbungen, Tonnenwölbung und Kugelwöl-

bung, so dass jeweils zwei Exemplare entstanden. Insgesamt ergaben sich so 50 herzustellende Testinstrumente. Im Sinne der Baugleichheit sollten Decken mit hinreichend ähnlichen Materialeigenschaften verwendet werden. Hierfür standen 100 vorausgewählte Deckenpaare zur Verfügung. Aus diesen galt es die einander ähnlichsten auszuwählen.

Die Eigenschaften von Holz, auch im lackierten Zustand und damit natürlich die Eigenschaften der Fertiginstrumente hängen vom Umgebungsklima ab. Aufgrund von Erfahrungen entschieden wir, die Untersuchungen bei folgenden Klimabedingungen durchzuführen: $T = 21^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, Luftfeuchte = $50\% \pm 4\%$. Unter diesen Bedingungen stellt sich für Fichte eine Holzfeuchte von $8,5\% \dots 9,5\%$ ein.

Die akustisch relevanten Eigenschaften von Hölzern werden üblicherweise anhand der Größen Dichte, E-Modul und Dämpfung beschrieben, wobei die verwendeten Dämpfungsmerkmale keine reinen Materialeigenschaften darstellen. Aus diesem Grunde wurde die Dämpfung in der beschriebenen Arbeit nicht betrachtet. Der E-Modul ist für die beiden relevanten Merkmalsausrichtungen in und quer zur Faserrichtung zu bestimmen. Methoden zur hinreichend genauen Bestimmung dieser Größen sind bekannt, benötigen aber jeweils bestimmte Probekörper. Aufgrund der Materialstreuungen im Holz müssen diese Probekörper nun unmittelbar aus dem zu untersuchenden Objekt gewonnen werden. Bereits die Verwendung von Probekörpern, die aus dem gleichen Stammstück in der Nähe des eigentlichen Objektes gewonnen wurden liefern nicht zwingend gesicherte Ergebnisse. Hinzu kommt, dass nur in seltenen Fällen Informationen zum Ursprungsstamm überhaupt vorliegen. Da die verwendeten Decken- bzw. Bodenhälften (in der Regel Zuliefererteile) üblicherweise nur sehr wenig Übermaß aufweisen, ist eine Gewinnung von Probekörpern nicht möglich. Die Messungen müssen also zwingend an den Hälften selbst erfolgen. Die Bestimmung der Dichte stellt hier kein Problem an sich dar, jedoch ist die Genauigkeit aufgrund der noch unbearbeiteten Hälften begrenzt. In unserem Falle müssen wir von einem maximalen Fehler $\Delta\rho = \pm 6\%$ ausgehen. E-Modul und Dämpfung werden im IfM aus an frei aufgehängten Hälften gewonnenen Frequenzgängen zwischen Impulshammeranschlag und 5 cm hinter dem Anschlagpunkt positioniertem Mikrofon ermittelt.

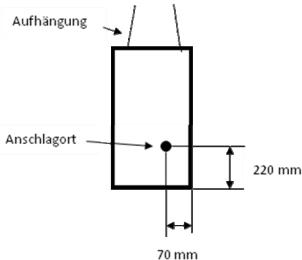


Abbildung 1: Messsituation E-Modul von Hälften

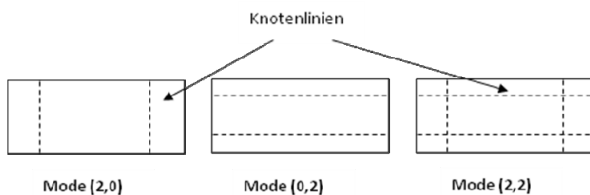


Abbildung 2: Zuordnung der Modenbezeichnungen

Ausgewertet werden die Resonanzen, die auf einfache Biegemoden $(X,0)/(0,X)$, zurückgehen. Die Identifizierung der Resonanzen erfolgt auf der Basis theoretischer Erwartungen von Frequenzen und Kurvenverläufen, die auf eine Reihe

von Referenzmessungen unter Einbeziehung von Modalanalysen zurückgehen: erwartete Frequenzwerte Deckenhälften:

- $f(2,0)$: 60 Hz ... 120 Hz
- $f(0,2)$: 90 Hz ... 190 Hz
- $f(3,0)$: 170 Hz ... 340 Hz

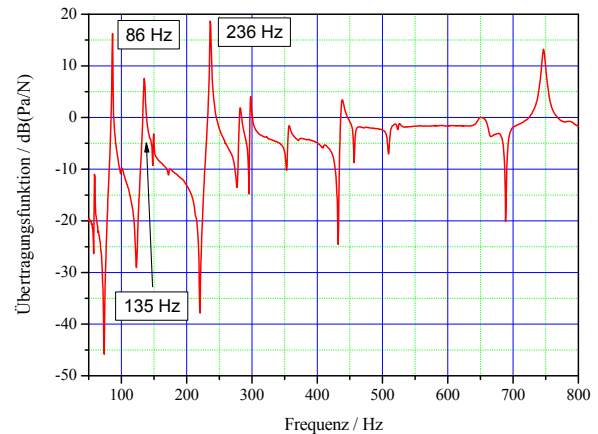


Abbildung 3: Typischer Frequenzgang der Klopfonanalyse an frei aufgehängten Deckenhälften

Abbildung 3 zeigt den typischen Verlauf der erhaltenen Frequenzgänge an Deckenhälften. Die ersten drei deutlichen Resonanzen gehen aufgrund der typischen Differenzen der Materialeigenschaften in und quer zur Faser in den meisten Fällen auf die Biegemoden $(2,0)$, $(0,2)$ und $(3,0)$ zurück. In der Vergangenheit wichen typisch 3 % der Deckenhälften von diesem Verhalten ab. In den aktuellen Proben zeigte sich allerdings, dass sich deutlich häufiger keine reinen Moden sondern nur Mischmoden ausbilden. Da man das untypische Verhalten sowohl anhand der Auswertung als auch anhand des Kurvenverlaufes gut erkennen kann, lassen sich die untypischen Fälle sicher aussondern.

Zur Berechnung der E-Module in (E_F) und quer (E_q) zur Faserrichtung anhand der ermittelten Resonanzfrequenzen wurden die in [3] angegebenen Beziehungen, allerdings mit einer Vereinfachung verwendet. Die Gleichungen enthalten die ebenfalls unbekanntenen Poissonschen Konstanten μ_F und μ_q . Es wurde die Näherung angesetzt: $(1 - \mu_F \mu_q) \approx 1$. Somit lauten die Beziehungen:

$$E_F = \left(\frac{f_{F,n} l^2}{0,113 d k_n} \right)^2 \rho \quad \text{und} \quad E_q = \left(\frac{f_{q,n} b^2}{0,113 d k_n} \right)^2 \rho$$

$f_{F,n}$, $f_{q,n}$ -Frequenzen der reinen Moden n in bzw. quer zur Faserrichtung; l , b , d -Länge, Breite, Dicke der Hälfte; k_n -modenabhängige Konstante.

Die oben für die meisten Fälle angenommene Zuordnung der Resonanzen der Frequenzgänge zu den Moden gilt, wenn die E-Module folgende Bedingungen erfüllen. Zwei Bedingungsgleichungen entstehen aufgrund unterschiedlicher typischer Abmessungen der Hälften bei Decken und Böden:

$$D.: 50 > \frac{E_F}{E_q} > 5,12 \quad B.: 50 > \frac{E_F}{E_q} > 5,83.$$

Während die Forderung $50 >$ keine Probleme bereitet, ist das Verhältnis E_F/E_q bei Bodenmaterialien oft kleiner als 5,83. Da im Falle der Bodenhälften keine Exemplare zur Aussortierung zur Verfügung standen, wurde in Problemfällen auf die Ultraschalllaufzeitmessung zurückgegriffen.

Laminierte Böden entstehen nicht aus Hälften, sondern werden aus in voller Größe schichtverleimten Platten ausgestanzt. Hier konnte für jeden Bodentyp eine Platte hinreichend groß gefertigt werden, so dass Probestäbe für Messungen gewonnen werden konnten. Allerdings stand damit für jeden laminierten Bodentyp jeweils nur ein Messwertsatz zur Verfügung. Da für Ahorn keine hinreichend großen Furnierplatten verfügbar waren, konnten für die laminierte Variante keine Materialwerte gewonnen werden. Die einzelnen Schichten der laminierten Platten werden bewusst hinsichtlich der Wuchsrichtung versetzt eingefügt. Damit ist die Angabe in und quer zur Faser nicht mehr sinnvoll bzw. korrekt. Dennoch werden die entsprechenden Bezeichnungen im Sinne einer besseren Übersichtlichkeit beibehalten.

Insgesamt liegt der Maximalfehler für die beschriebene Bestimmung der E-Module bei $\pm 15\%$. Aus Dichte und E-Modul wurden als weitere Materialkenngrößen die beiden Schallgeschwindigkeiten c_F und c_q berechnet.

Es ergab sich noch eine sehr interessante Beobachtung. Aufgrund von Problemen bei der Herstellung der Testinstrumente, mussten neue Böden für die Aningré-Instrumente bereitgestellt werden. Diese entstammten einer neuen Materialcharge (neuer Einkauf). Es zeigten sich deutliche Differenzen in den Eigenschaften in Bezug auf die erste Charge: Dichte – mittlere Differenz 18%, E_F – mittlere Differenz 58%(!).

Tabelle 1 stellt die mittleren Materialeigenschaften der einzelnen Materialien innerhalb der betrachteten Stichprobe zusammen. Gut ist anhand der Werte zu erkennen, dass man aus den Eigenschaften der massiven Materialien keine zwingenden Schlüsse auf Tendenzen innerhalb der laminierten Varianten ziehen kann!

Holzart	ρ	E_F	E_q	c_F	c_q
Fichte	0,38	9,1	0,73	4881	1376
Nussbaum	0,57	8,6	1,1	3918	1389
Palisander	0,71	9,7	2,5	3609	1866
Ahorn	0,59	9,1	1,9	3914	1775
Aningré	0,45	4,8	1,3	3251	1707
Mahagoni	0,56	11,4	1,3	4534	1460
L Nussbaum	0,55	4,5	2,3	3661	1958
L Palisander	0,62	10,5	3,2	4071	2272
L Aningré	0,52	7,6	2,3	3823	2103
L Mahagoni	0,52	8,3	2	3928	1993

Tabelle 1: Mittlere Materialeigenschaften der Stichprobe; ρ/gcm^{-3} , E/GPa , c/ms^{-1}

In Abbildung 4 ist die Verteilung der Materialparameter c_F und c_q innerhalb der verwendeten Decken- und Bodenrohlinge dargestellt. Deutlich ist zu sehen, dass die Decken trotz Sortierung nach möglichst großer Ähnlichkeit noch erheblich streuen. Weiterhin zeigt sich, dass die Deckeneigenschaften vorwiegen in Faserrichtung streuen, die der Böden quer zur Faser variieren.

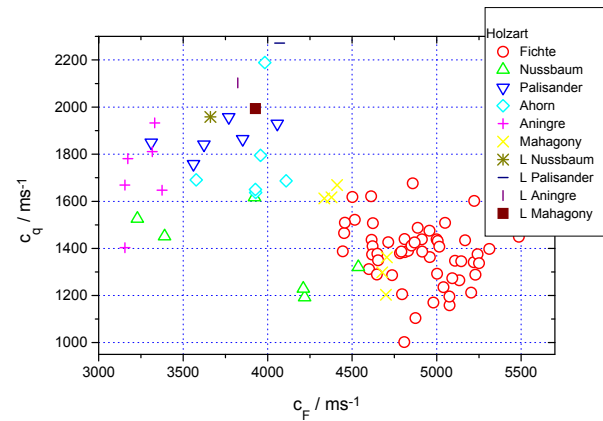


Abbildung 4: Verteilung der Parameter c_F und c_q der Decken- und Bodenmaterialien

Bau der Testinstrumente

Die Testgitarren wurden nach dem Modell HF 12 der Karl Höfner GmbH & Co KG gefertigt. Es kamen einheitlich schichtverleimte Zargen mit Kernmaterial Gabun zum Einsatz, wobei die äußere Schicht stets aus dem aktuellen Bodenholzfurnier besteht, um Irritationen bei den subjektiven Tests zu vermeiden. Der Aufbau der laminierten Böden gestaltete sich wie folgt:

- äußere Schicht – Bodenholzfurnier (ca. 1mm)
- Zwischenschicht – Gabun (ca. 1,5 mm)
- innere Schicht – Bodenholzfurnier (ca. 1mm).

Untersuchung der Testinstrumente

Es erfolgte ein Spieltest, in dem fünf Profimusiker die Merkmale Klang, Spielbarkeit und Optik anhand einer 5-Punkte-Skala bewerteten. Die Instrumente wurden den Musikern einzeln gereicht. Ein Zurücklegen war nicht möglich. Eine Zeitvorgabe wurde nicht gestellt. Dem Musiker stand es frei, wie er zu seinen Urteilen kommt. Jeder Musiker bewertete eine Auswahl von 24 der 50 Instrumente. Mit zwei der Musiker zeichneten wir jeweils zwei Anspiele pro Instrument auf: chromatische Tonleiter, E ... e², auf und abwärts, Tempo 60; Auszug aus „Para Guitarra“ (Notenbild in [4]).

Es erfolgte die Bestimmung der mittleren Werte der (teilweise modifizierten) Psychoakustikgrößen Lautheit, Schärfe, Offenheit, Rauigkeit und Volumen wie in [4] beschrieben.

Als rein messtechnische Analyse kam die Extraktion entsprechender Merkmale aus den Frequenzkurven zur Anwendung [4].

Auswertung und Ergebnisse

Die hauptsächlich angewandte Methodik bei der Auswertung der Daten bestand in der Suche nach Korrelationen zwischen Materialparametern und Merkmalen der Frequenzkurven sowie den aus den Anspielen gewonnenen Werten der Psychoakustikgrößen. Zunächst erfolgte jedoch eine Faktorenanalyse der Frequenzkurven. Das Ergebnis ist in Abbildung 5 zu sehen. Man erkennt zwei deutlich getrennte Linien, innerhalb derer sich, bis auf einige Ausreißer, vergleichbare Tendenzen abzeichnen. Die beiden Linien repräsentieren Exemplare mit jeweils gleicher Bodenwölbung. Interessant ist,

dass entgegen den Erwartungen aus den Daten in Tabelle 1 die materialverwandten massiven und laminierten Exemplare, mit Ausnahme von Ahorn, nahe beieinander liegen.

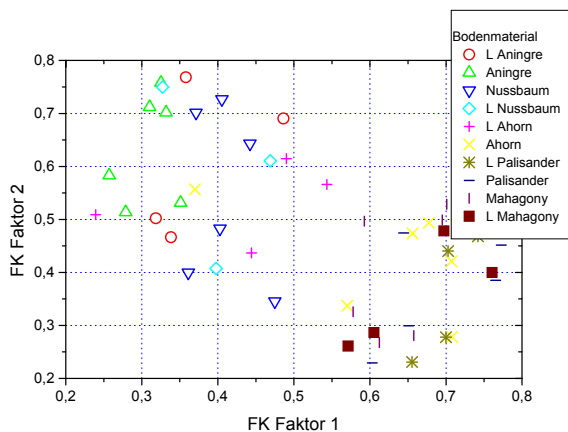


Abbildung 5: Ergebnis der Faktorenanalyse der aufgenommenen Frequenzkurven

Die statistischen Betrachtungen ergaben zunächst keinerlei Zusammenhänge zwischen Frequenzkurvenmerkmalen und Deckeneigenschaften. Dies ist ein gutes Indiz für die hinreichende Ähnlichkeit der verwendeten Decken. In Bezug auf die Bodeneigenschaften lassen sich folgende Zusammenhänge formulieren:

- Der Bodeneinfluss liegt in der Größenordnung des Deckeneinflusses.
- Das Bodenmaterial beeinflusst vor allem Lautstärke und Helligkeit (2 kHz bis 5 kHz) der Gitarre.
- Je höher die Dichte und je höher der Elastizitätsmodul in Faserrichtung, desto höher fallen Gesamtübertragung und Übertragung der Helligkeit aus.

Aufgrund der großen Streuung innerhalb der Bodenmaterialien kann die Wahl der Holzart nur eine tendenzielle Wirkung auf das Fertiginstrument ausüben. Weiterhin zeigt sich, dass der Einfluss der Bodenwölbung, ein konstruktives Element(!), größer ist als der Einfluss des Materials.

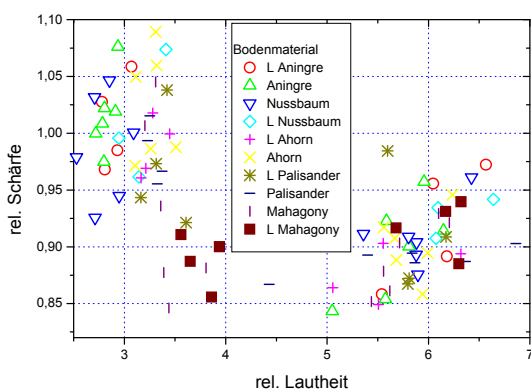


Abbildung 6: Verteilung von mittlerer Lautheit und Schärfe der aufgenommenen Anspiele

Die Auswertung der aus den Anspielen gewonnenen Psychoakustikmerkmale weist auf einen deutlichen Einfluss von den Musikern hin. Innerhalb der beiden Musiker fallen die Tendenzen des Bodenmaterialeinflusses sehr unterschiedlich

aus (Abbildung 6). Allerdings bestätigte sich die aus den Frequenzkurven ableitbare Tendenz, dass eine höhere Dichte und ein größerer E_F zu einer Erhöhung der Lautheit führen. Die geringe Korrelation der Psychoakustikmerkmale korrespondiert mit dem Ergebnis des Spieltests. Es zeigten sich hier keinerlei Korrelationen zwischen den Bewertungen der Musiker.

Untersuchungen an Celli

Der prinzipielle Lösungsweg gestaltete sich völlig analog zum Gitarrenfall, jedoch wurde dem höheren Aufwand beim Bau eines Cellos Rechnung getragen und keine spezielle Projektserie aufgelegt. Vielmehr erfolgten die Untersuchungen an Instrumenten der laufenden Produktion. Das Problem Gewinnung von Probekörpern gilt auch im Falle der Streichinstrumente, hier für den Rohling Kantel. In Längsrichtung (Faser) lässt sich der E-Modul wie bei den Deckenhälften aus den Biegemoden der Kantel ermitteln. In Querrichtung versagt diese Methode. Messungen der Schallgeschwindigkeit mittels Luchimeter lieferten keine verlässlichen Werte. Es wurden zwei Serienchargen untersucht:

- 10 baugleiche Celli eines Herstellers, ausschließlich Ahornböden; Decken: $10,7 \text{ GPa} \leq E_F \leq 15,6 \text{ GPa}$ ($\pm 19\%$), $0,38 \text{ g/cm}^3 \leq \rho \leq 0,44 \text{ g/cm}^3$ ($\pm 7\%$); Böden: $9,1 \text{ GPa} \leq E_F \leq 15,2 \text{ GPa}$ ($\pm 28\%$), $0,54 \text{ g/cm}^3 \leq \rho \leq 0,64 \text{ g/cm}^3$ ($\pm 8\%$)
- Zwei jeweils baugleiche Dreiergruppen verschiedener Hersteller mit den Bodenvarianten Ahorn/Pappel/Kirsche, Ahorn/Pappel/Birne. Die konkreten Materialparameter waren hier nicht bekannt. Es wurde von typischen Werten ausgegangen.

Da die Instrumente aus der laufenden Produktion stammten, erfolgten die Untersuchungen an den einzelnen Exemplaren zu verschiedenen Zeitpunkten. Zwischen den Instrumenten aller drei Chargen zeigten sich eindeutige Unterschiede in den akustischen Eigenschaften, jedoch ließen sich diese nicht tendenziell den bekannten bzw. angenommenen Bodenparametern zuordnen. Es lässt sich nicht aussagen, ob tatsächlich kein Bodenmaterialeinfluss vorliegt, die Methodik der Untersuchungen aus der laufende Produktion heraus, versagte oder andere Fehlerquellen zu stark ausfielen.

Literatur

- [1] N. N.: Gitarren ,83. Instrumentenbau-Z. 37(1983)4 S. 318-323
- [2] Ziegenhals, G.: Resonanzholzmerkmale von Gitarrendecken. Tagungsband des Seminars des FAMA in der DEGA 2001 ISBN 3-00-009226-9
- [3] Rossing; Fletcher: The Physics of Musical Instruments. Springer – Verlag 1991
- [4] Ziegenhals, G.: Subjektive und objektive Beurteilung von Musikinstrumenten. Eine Untersuchung anhand von Fallstudien. Dissertation TU Dresden 2010

Das IGF-Vorhaben 15076 BR der Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Musikinstrumente e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.