

Qualitätskriterien von Resonanzholz

Michael Baltrusch; Gunter Ziegenhals

Institut für Musikinstrumentenbau an der TU Dresden, post@ifm-zwota.de (veröffentlicht August 2012)

Vorwort

Die diesem Artikel zu Grunde liegenden Arbeiten erfolgten in einem Projekt, das im Zeitraum 1999 bis 2003 vorbereitet und realisiert wurde. Vorbereitung und Durchführung des Projektes lagen im Wesentlichen in den Händen von BALTRUSCH. Er begann auch, eine Veröffentlichung zum Projekt vorzubereiten. Da andere, dringendere Veröffentlichungen anstanden, stellten wir diesen Artikel zunächst zurück. Infolge des späteren Ausscheidens von BALTRUSCH aus dem IfM stagnierte die Fertigstellung der Veröffentlichung. Nunmehr wurde der begonnene Artikel vom Zweitautor überarbeitet, ergänzt und endgültig fertig gestellt.

Auswahl von Klangholz

Für den Bau von Musikinstrumenten wird traditionell nur qualitativ sehr hochwertiges Holz, so genanntes Klang- oder Resonanzholz, verwendet. Dieses Klangholz muss den statischen, klanglichen und visuellen Anforderung genügen, die Instrumentenmacher durch ihre Erfahrung an gutes Resonanzholz stellen. Schließlich wird das gesamte fertige Instrument durch die Eigenschaften der verwendeten Hölzer geprägt. Die Beurteilung der Qualität von Resonanzholz erfolgt durch die Handwerksmeister, wobei die Kriterien, die sie dabei anlegen, traditionell weitergegeben wurden oder sich auch empirisch als bedeutend herausgestellt haben. Die Rohlinge werden im Wesentlichen nach optischen Gesichtspunkten bewertet. Besonderer Wert wird auf den Jahrringbau gelegt, der gleichmäßig sein sollte. Die Vorstellungen von optimalen Jahrringbreiten schwanken etwas, liegen aber hauptsächlich im Bereich von 1 bis 2 mm. Der Spätholzanteil sollte bei etwa 25 % liegen (HOLZ 1984). Die Erfahrungen von Handwerksmeistern zeigen aber auch, dass diese Kriterien noch keine Garantie für hochwertiges Klangholz sind. Deshalb wird versucht, durch subjektive Klopftests eine weiterführende Einschätzung der Qualität zu gewinnen. Man kann mit großer Sicherheit davon ausgehen, dass erfahrende Geigenbauer aus dem wahrgenommenen Klopfon und dem gefühlten Gewicht der Deckenrohlinge relativ genaue Vorstellungen zu Dichte, Elastizitätsmodul und Dämpfung des Holzes ableiten können.

Andererseits besagen insbesondere bei Reparaturen sehr guter Instrumente gewonnene Erkenntnisse, dass viele Instrumente, auch viele hochwertige Geigen bekannter Meister, aus Hölzern gefertigt wurden, die weit von dem vorgestellten Optimalbereich entfernt sind. Daher stellt sich die Frage: Gibt es objektive Kriterien, die die Qualität von Resonanzholz für Streichinstrumente, insbesondere für Geigen, beschreiben und welche sind dies?

Akustisch bedeutende Eigenschaften der Hölzer

Holz ist ein natürlich gewachsener Werkstoff der einige Besonderheiten aufweist. Da Umwelt- und Wachstumsbedingungen, denen der Baum unterliegt, weder überall gleich noch gleich bleibend sind, schwanken auch wichtige Eigenschaften im Holz, zum Teil recht erheblich. Besonders die Dichte und der Elastizitätsmodul, als zwei wichtige Parameter, die die Schwingungseigenschaften be-

stimmen, zeigen eine relativ große Streubreite. Deshalb erschien es notwendig, diese Eigenschaften einer kritischen, statistischen Betrachtung zu unterziehen.

Wie sich die Schwingungseigenschaften objektiv beurteilen lassen, war natürlich schon mehrfach Gegenstand von Untersuchungen. Die Richtungsabhängigkeit der für die Schwingungen so wichtigen Materialkenngrößen und auch die starke Abhängigkeit -vor allem des Dämpfungsverhaltens- von der Holzfeuchte erschweren gesicherte Erkenntnisse. Untersuchungen verlangen daher nach einer möglichst großen Probenanzahl. Für Gitarrendecken nahm man entsprechende Untersuchungen erfolgreich an einer Stichprobe von über 1000 Deckenhälften vor (ZIEGENHALS 2001).

Zur Bestimmung der Biegeeigenschaften von Holz bedient man sich typisch eines dynamischen Messverfahrens. Dabei werden Probekörper, idealerweise Stäbe, ggf. auch Platten seltener Probekörper mit nicht konstantem Querschnitt wie Kanteln für Geigendecken und -böden angeregt und anhand der Schwingreaktion der Probekörper auf die Erregung eine Übertragungskurve aufgenommen. Die Analyse der Resonanzen ermöglicht in Zusammenhang mit der Kenntnis der Geometrie der Probekörper Elastizitätsmodul und Dämpfung zu berechnen. Liegen komplizierte geometrische Verhältnisse vor, wie z. B. bei ausgeformten Decken und Böden von Streichinstrumenten, so lassen sich oft nur die Resonanzfrequenzen als vergleichbare Merkmale angeben. Während für stabförmige Probekörper im IfM ein bewährter Messplatz verfügbar ist, wurde in Anlehnung an die im Gitarrendeckenprojekt verwendete Methodik im Falle von Kanteln, Decken und Böden folgendes Messprinzip verwendet:

Die Hölzer, als Decken- bzw. Bodenplatten, wurden im reflexionsarmen Raum an zwei Punkten hängend befestigt. Die so frei schwingenden Platten wurden mit einem Impulshammer an einer geeigneten Stelle zum Schwingen angeregt, wobei der Kraftimpuls, der beim Aufschlagen des Hammers auf die Platte wirkte, gemessen wurde. Der dabei entstehende Klopfklang wurde mit einem Mikrofon aufgenommen und aus Kraft- und Schallsignal wurde die Übertragungsfunktion berechnet. Die so erhaltene Frequenzkurve gibt den Schalldruckpegel pro Kraft in [Pa/N] wieder. Üblicherweise wird sie in einer Pegeldarstellung verwendet; dann entsprechen $0 \text{ dB} = 1 \text{ Pa/N}$. Betrachtet man solch eine Übertragungsfunktion, wie sie beispielsweise in Abbildung 1 dargestellt wurde, fallen sofort die Resonanzspitzen auf. Diese resultieren aus den Eigenschwingungen der Platte. Die Eigenschwingungen sind Schwingungszustände der Platte bei bestimmten Frequenzen, die durch ein Minimum an Energie erreicht werden können und ebenso mit minimaler Energie stabil am Schwingen gehalten werden können. Sie werden durch die Frequenz, die Eigenschwingform, der Dämpfung definiert. Diese drei Faktoren sind von den Materialeigenschaften und der Geometrie der Platte abhängig. Anhand eines physikalisch-mathematischen Modells vom Biegevorgang kann man wesentliche Zusammenhänge darstellen, solange die Form des Probekörpers relativ einfach ist. Mathematische Beschreibungen von Schwingungen gelingen z. B. für ebene Platten und Stäbe, da sich diese Formen mathematisch noch gut beschreiben lassen und bekannte Lösungen der entsprechenden Differential-

gleichungen existieren. Schwingungen von komplizierteren Gebilden, und darunter fallen auch Geigendecken und -böden, deren Profil bereits ausgearbeitet wurde, lassen sich auf diesem klassischen Weg nicht mehr lösen. Zu erwähnen ist an dieser Stelle, dass sich zur Berechnung der Eigenschwingungen dieser Körper numerische Methoden prinzipiell eignen.

Die Inhomogenität der für Schwingungsvorgänge wesentlichen Materialeigenschaften, wie z. B. Schub- und Elastizitätsmodul, sowie die Dichte, bereitet insofern zusätzlich Schwierigkeiten, dass dadurch die Frequenzlage und auch die Form der Eigenschwingungen beeinflusst werden. Ermittelt wurden immer nur mittlere Werte. Je nach Jahrringbau oder Holzfehlern können örtlich jedoch recht erhebliche Abweichungen von diesen Mittelwerten auftreten.

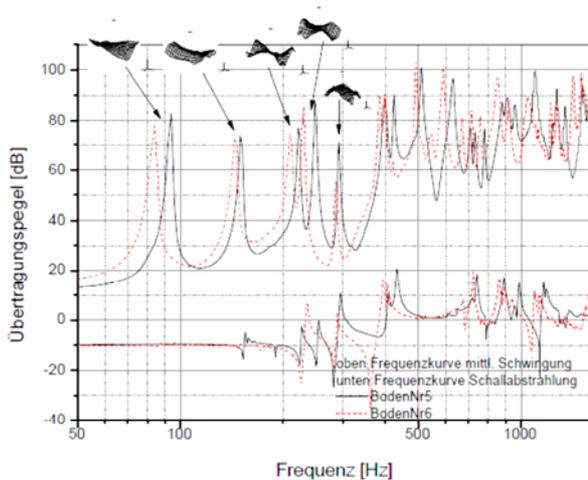


Abbildung 1: Übertragungsfunktion von zwei rechteckig zugeschnittenen Geigenböden. Die unteren Kurven zeigen den Schallübertragungspegel, d. h. den Schalldruck in einer Entfernung von 10 cm, der auftritt, wenn eine konstante sinusförmige Kraft von 1 N auf den Anregungspunkt wirkt. Betrachtet man bei dieser gleichen konstanten Anregungskraft die mittlere Beschleunigung über die gesamte Fläche des Geigenbodens, dann ergibt sich die Schwingungsübertragungsfunktion, wie sie die oberen beiden Kurven zeigen. Nur diejenigen Eigenschwingungen spiegeln sich in der Schallübertragungsfunktion (unten) wieder, die genügend Schallenergie abstrahlen.

Prinzipielle Vorgehensweise

Hält man sich vor Augen, dass letztlich der Musiker bei der Wahl seines Instrumentes bestimmte Kriterien anlegt, die ihn dazu bewegen, sich für ein Instrument zu entscheiden, dann sollte eine Beurteilung der Hölzer letztlich durch die subjektive Beurteilung der Instrumente durch Musiker erfolgen. Folglich wurden in den hier vorgestellten Untersuchungen verschiedene akustisch relevanten Eigenschaften von Hölzern am Rohmaterial bestimmt. Unter Rohmaterial werden hier Decken- und Bodenkanteln sowie, insofern sie groß genug ausfielen, daraus hergestellte Probekörper verstanden. Wichtig war hier, dass stets das tatsächlich weiterverarbeitete Holzstück untersucht wurde.

Aus den Kanteln wurden zunächst Decken bzw. Böden für Geigen gearbeitet und aus diesen schließlich Geigen gefertigt. Im Laufe des Herstellungsprozesses wurden die Schwingungseigenschaften der Decken und Böden in unterschiedlichen Verarbeitungsstufen gemessen.

Schließlich wurde auch das fertige Instrument akustisch untersucht. Kernstück dieser Untersuchungen ist die Ermittlung einer Frequenzkurve bei normierter Anregung und deren Auswertung über

extrahierte Merkmale (Zur Frequenzkurvenmesstechnik einschließlich deren Auswertung siehe ZIEGENHALS 2010).

Wie bereits erwähnt, sollte das subjektive Urteil durch Musiker die Qualität der Instrumente und damit indirekt die Holzqualität bestimmen. Ein umfangreicher subjektiver Spieltest der Instrumente durch professionelle Musiker rundete daher die Untersuchungen ab. Auf die Qualitätseinstufung der verwendeten Hölzer wurde letztendlich von der im Spieltest ermittelten klanglichen subjektiven Bewertung der Instrumente geschlossen.

In den objektiven Untersuchungen und bei subjektiven Spieltests werden gleiche Saiten verwendet; es wird davon ausgegangen, dass die Herstellungstoleranzen der Saiten für den Spieltest vernachlässigbar sind.

Ermittelte objektive Merkmale

Ausgangspunkt der Untersuchungen bildeten je 50 Boden- und Deckenkantelpaare. Es wurden zunächst die Dichten der **Kanteln** bestimmt. Aus den Klopfübertragungsfunktionen sollten ursprünglich die E-Module abgeleitet werden. Da die Kanteln in hinreichend gleichen Abmessungen vorlagen, verwendeten wir die ersten sechs Peakfrequenzen der Übertragungsfunktionen als Merkmale zur Charakterisierung des E-Moduls und die Bandbreite der Peaks als Merkmal für die Dämpfungseigenschaften des Materials.

Diese Merkmale der ersten fünf Peaks der Klopfübertragungskurve wurde im Weiteren von folgenden Baufortschritten der Instrumente ermittelt:

- aus Kanteln gefräste Rechteckplatten
- Form gefräste Decken und Böden
- mit Bassbalken versehene Decken

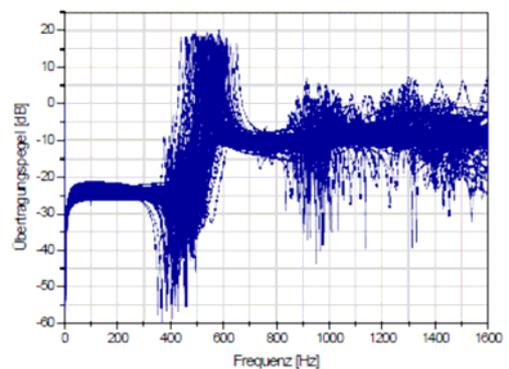


Abbildung 2: Gemessene Klopfübertragungsfunktionen aller Deckenkanteln

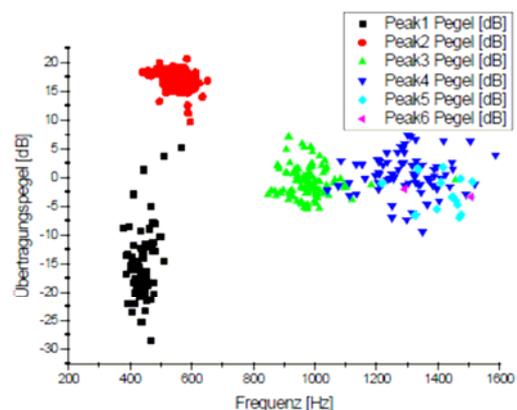


Abbildung 3: Streudiagramm der Peakfrequenzen für alle Deckenkanteln

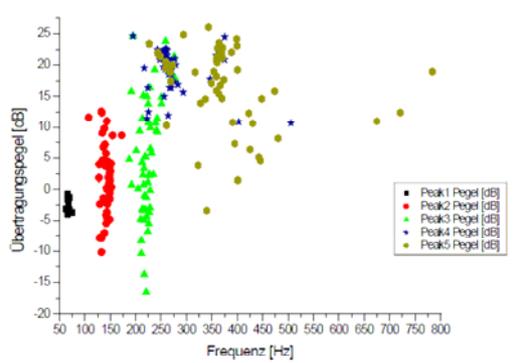


Abbildung 4: Streudiagramm der Peakfrequenzen für alle gefrästen Rechteckplatten Decke

Abbildung 2 bis Abbildung 4 zeigen exemplarisch jeweils Messwerte aller Deckenkanteln bzw. gefrästen Rechteckplatten hinsichtlich der Peakfrequenzen der Klopfübertragungskurve. Vergleicht man die Streudarstellung der Zustände Kante und gefräste Rechteckplatte, diskutiert also die Auswirkung des ersten Verarbeitungsschrittes, so fällt sofort eine Verringerung der Streubreiten ins Auge. Dieses Phänomen setzt sich in allen weiteren Bauphasen der Instrumente fort. Während sich die Ausgangskanteln noch deutlich unterscheiden, werden sich die Instrumente mit zunehmendem Baufortschritt akustisch immer ähnlicher.

Im Rahmen der weiteren Fertigstellung der Instrumente nahmen wir die Frequenzkurven von fertigen Korpusen und den spielfertigen Weißinstrumenten auf. Letztere Messungen dienten jedoch nur zu Kontrollen. In die Auswertung hinsichtlich des Holzeinflusses gingen diese Daten jedoch entsprechend dem Lösungskonzept nicht ein.

Klangbeurteilung

Die subjektive Beurteilung der Instrumente war ein Kernstück der Untersuchungen. In einem ersten Test wurden alle Instrumente subjektiv bewertet. Auf der Grundlage der Beurteilung, ergänzt durch einen Vergleich objektiver Messparameter, wurden 8 Instrumente herausgesucht, die die Bandbreite der Stichprobe repräsentieren. Zwölf professionelle Musiker, Musiklehrer und Orchestermusiker, bewerteten diese Testinstrumente. Der subjektive Spieltest bestand aus zwei Teilen: dem Kurztest, bei dem der Musiker sich in kürzester Zeit (eine Minute) spontan ein Gesamturteil über das Instrument bilden sollte, und einem Langtest, der den Musikern die Möglichkeit einräumte, sich intensiv mit dem Instrument vertraut zu machen. Im diesem zweiten Teil des Spieltests waren verschiedene Eigenschaften zu beurteilen, wie die Klangfarbe, das Klangvolumen, die Klarheit und Brillanz, die Ausgeglichenheit, die Ansprache, das Erscheinungsbild und ein Gesamturteil (ZIEGENHALS 1995 und 2001). Einzelne Eigenschaften wurden für die hohen (a und e) und tiefen Saiten (g und d) getrennt betrachtet. Darüber hinaus wurden weitere Klang beschreibende Merkmale hinzugenommen, die Gegensatzpaare bildeten, wie zum Beispiel „dumpf“ und „schrill“, „dunkel“ und „hell“. Die Beurteilung erfolgte auf einer fünfstufigen Skala.

Ergebnisse

Bei der Suche nach Zusammenhängen zwischen objektiven Messgrößen der Ausgangsmaterialien und subjektiver Bewertung der spielfertigen Instrumente wurde sich verschiedener statistischer Verfahren bedient. Die Korrelationsanalyse war ein wesentlicher

Bestandteil der Untersuchungsmethoden. Dabei wird nach einem linearen Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen gesucht, wobei die Basis dafür alle einzelnen Wertepaare bilden. Im Ergebnis der Korrelationsanalyse erhält man den Korrelationskoeffizienten. Dieser Wert ist ein Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs, der Abhängigkeit der beiden Variablen voneinander. Übersteigt der Korrelationskoeffizient eine bestimmte Grenze, kann davon ausgegangen werden, dass die entsprechenden Merkmale in irgendeiner Weise miteinander zusammenhängen. In diesem Zusammenhang wird auch von der Signifikanz gesprochen. Die Signifikanz gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass bei Verwerfen einer Ausgangshypothese ein Irrtum vorliegt. Als Signifikanzniveau α wurden 0,05 gewählt. Das bedeutet bei der gewählten Vorgehensweise, dass mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % die Null- oder Ausgangshypothese, dass kein Zusammenhang zwischen den untersuchten Größen besteht, verworfen wird.

Subjektive Bewertung und Eigenschaften der Hölzer

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen subjektiver Beurteilung der Instrumente und den Eigenschaften des Holzes weisen nicht für alle subjektiven Merkmale signifikante Werte auf, die einen Zusammenhang nahe legen würden. Aus der Korrelationsanalyse lassen sich folgende Zusammenhänge entnehmen:

- Die Bewertung der Klangfarbe der hohen Saiten hängt stark von der Bandbreite von Peak3 der gefrästen Decken ab. Die Bandbreite charakterisiert mit hoher Wahrscheinlichkeit die Dämpfungseigenschaften des Holzes.
- Ein Zusammenhang ist auch zwischen Brillanz und dem Pegel der ersten Deckenresonanz der Decke im rechteckigen Zuschnitt wahrscheinlich.
- Der Pegel der 3. Deckenresonanz (rechteckige Decke) korreliert stark mit dem Begriff Helligkeit.
- Die Bewertung der Ansprache ist in hohem Maße von der mittleren Holzdicke der Decke abhängig.
- Die Beurteilung der Klangfarbe im tiefen Bereich (Saiten g und d) zeigt einen signifikanten Korrelationskoeffizienten zu der 1. und 5. Resonanzfrequenz des Bodens (gefräst), sowie zum Pegel der 4. Resonanz des Bodens.
- Das Klangvolumen des tiefen Frequenzbereichs wird vom Elastizitätsmodul in Faserrichtung des Holzes (Boden, Peak1) beeinflusst.

Diskussion

Betrachtet man die Ergebnisse der Korrelationsanalyse von subjektiver Klangbewertung der Instrumente und objektiven, grundsätzlichen Eigenschaften des Holzes, so lassen sich nur sehr wenige Zusammenhänge gesichert nachweisen.

Einer der gefundenen Zusammenhänge betrifft die Bewertung der Ansprache und die Dichte der Decke. Betrachtet man Abbildung 5, dann wird deutlich, wie der Zusammenhang für alle Instrumente verläuft. Die Bewertung aller Klangeigenschaften ist so zu verstehen, dass Bewertungen bei 0 das Mittelfeld bilden. Negative Werte, d. h. Linksseitig der 0 sind die besser bewerteten Instrumente. Je größer der Wert, desto schlechter ist die Bewertung. Diese Anordnung resultiert aus den normierten Wertungen der Testpersonen, die im Wesentlichen Zensuren (1-sehr gut, 5-sehr schlecht) vergaben. Aus Abbildung 5 lässt sich erkennen, dass Decken mit großer Dichte geringfügig besser bewertet wurden. Dieser Trend ist jedoch so schwach, dass nicht sicher ist, ob er einem umfangreicheren Test standhalten könnte. Wir können

jedoch annehmen, dass eine leichte Decke zu einer eher schlechteren Ansprache führt.

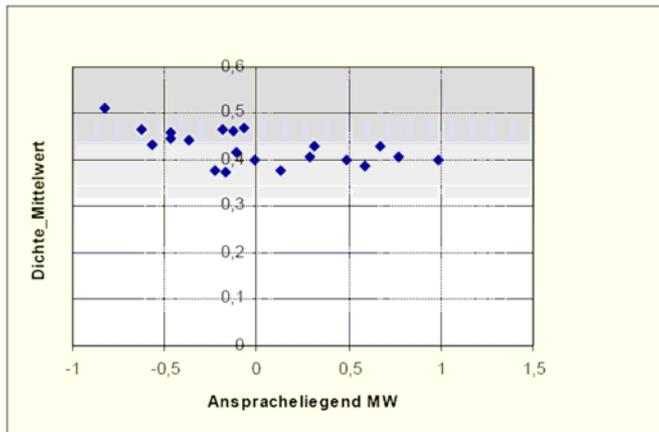


Abbildung 5: Streudiagramm der Instrumente, Dichte der Decke vs. Ansprache (liegende Stricharten)

Auch aus Abbildung 6 wird die relativ schwache Ausprägung der Zusammenhänge deutlich. Mit geringer Tendenz werden biegesteifere Böden ein besseres Klangvolumen im Bereich der tiefen Saiten ergeben. Das lässt die Annahme zu, dass ein biegesteiferer Boden bei tiefen Frequenzen einen kleineren Anteil an Energie aufnimmt.

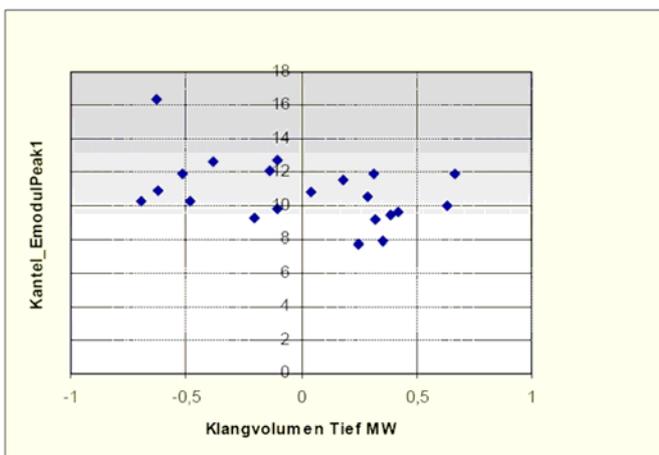


Abbildung 6: Streudiagramm der Instrumente, Elastizitätsmodul des Bodens in Längsrichtung vs. Klangvolumen der beiden tiefen Saiten

Für die Bandbreite der 3. Resonanz wurde eine Korrelation zur Klangfarbenbewertung der hohen Saiten gefunden. Es kann angenommen werden, dass die Bandbreite wenigstens zu einem Teil mit der Dämpfung des Holzes zusammenhängt. Unklar ist jedoch, welchen Anteil an der Gesamtdämpfung die Abstrahlung der Luft bei einer Geige hat.

Literatur

Holz, D.: Über einige Zusammenhänge zwischen forstlich-biologischen und akustischen Eigenschaften von Klangholz (Resonanzholz). Holztechnologie(1), 31 - 36. (1984).

Ziegenhals, G.: Subjektive und objektive Beurteilung von Musikinstrumenten. Eine Untersuchung anhand von Fallstudien. Dissert-

ation TU Dresden 2010, Studentexte zur Sprachkommunikation Band 51 TUDpress 2010 (ISBN 978-3-941298-71-2)

Ziegenhals, G.: Resonanzholzmerkmale von Gitarrendecken. Tagungsband des Seminars des FAMA in der DEGA 2001 ISBN 3-00-009226-9

Ziegenhals, G.: Ein "ungesteuerter" Instrumententest zur Beurteilung der Qualität nicht handwerklich gefertigter Gitarren. Fortschritte der Akustik DAGA 1995

Das dieser Veröffentlichung zugrunde liegende Forschungsprojekt wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. gefördert.