

## Materialeigenschaften von Musikhölzern

Peter Holstein<sup>1</sup>, Gunter Ziegenhals<sup>2</sup>, Nicki Bader<sup>1</sup>, Andreas Tharandt<sup>1</sup>,  
Konrad Gillmeister<sup>1</sup>, Andreas Bodi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, 06112 Halle (Saale), E-Mail: p.holstein@sonotec.com

<sup>2</sup> IfM - Institut für Musikinstrumentenbau e. V., 08267 Zwota / Germany, E-Mail: post@ifm-zwota.de

### Einleitung

Holz ist einer der wichtigsten Werkstoffe, die bei der Herstellung von Musikinstrumenten zum Einsatz kommen. Hierbei werden unterschiedliche Hölzer verwendet. Die Hölzer müssen dabei verschiedene mechanische und klangliche Funktionen erfüllen. Naturgemäß weist Holz eine große Schwankungsbreite der Eigenschaften auf. Dies schließt die Anisotropie, die räumliche Inhomogenität aber auch natürliche, unvermeidbare Materialfehler ein. Die Auswahl von geeignetem Material zum Instrumentenbau kann dabei auch ökonomisch von Bedeutung sein. Beispielsweise spielt der Artenschutz eine zunehmende Rolle bei der Auswahl und Verfügbarkeit der Hölzer. Ziel der Arbeiten ist die Entwicklung von Verfahren und Messtechnik zur akustischen Bestimmung mechanischer Kennwerte. Aufgrund der starken Dämpfung und Streuung der Ultraschallsignale werden spezielle Anforderungen an die Mess- und Auswertverfahren sowie die Prüftechnik und Prüfköpfe gestellt. Die Schwankungen der Materialeigenschaften bei Holz beeinflussen die Bewertung der akustischen Kennwerte und der daraus abgeleiteten Materialeigenschaften deutlich. Als zielführend hat sich der skalierte Einsatz von Softwaremodulen und Messtechnik erwiesen, wie sie für Laufzeit- und Nachhallmessung in Räumen eingesetzt werden kann. Die Korrelation der mit pseudo-stochastischen Folgen und mit Chirps angeregten Signale ermöglicht eine höhere Zeitauflösung als mit denen aus Ultraschall-Standardanregungen. Damit ist eine verbesserte Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten und E-Moduli möglich.

### Musikinstrumentenholz und Motivation

Die Materialqualität entscheidet über die Verwendbarkeit des Rohmaterials für die Nutzbarkeit als gutes Musikholz. Die Wahl des geeigneten Materials bestimmt oft auch die Qualität des späteren Musikinstrumentes. Es ist offensichtlich, dass dies gerade für Geigen und vergleichbare Instrumente zutrifft. Für die ausgewählten Geigenbögen dieser Arbeit trifft dies noch aus anderen Gründen zu. Die Kenntnis wichtiger Materialparameter kann Geigenbauer und andere Instrumentenhersteller unterstützen. Die Rolle der Materialauswahl und optimalen Verwendung nimmt noch einmal drastisch zu, wenn man berücksichtigt, dass gerade die wertvollen Hölzer, wie sie bei der Geigenbogenherstellung verwendet werden unter die Artenschutzgesetze fallen. Jahrhundertlang verwendeten Instrumentenbauer alle möglichen in der Natur vorkommenden Materialien. Beispiele sind Elfenbein, Rio-Palisander (Brazilian Rosewood), Pernambuco (das für diese

Arbeit untersuchte Material) und andere [1,2]. Internationale Vereinbarungen zum Artenschutz, die auch ausdrücklich die Pflanzenwelt einschließen, wirken sich unmittelbar auf die Verwendbarkeit und verfügbaren Vorräte von Hölzern wie Pernambuco (Caesalpinia echinata) aus.



**Abbildung 1:** Beispiele der Verwendung von Holz bei der Herstellung von Musikinstrumenten

Da Pernambuco seit ungefähr 1500 erste Wahl für die Bogenbauer in Europa ist, hat die stetig zunehmende Nachfrage zur Inklusion dieser Holzart in Formen des Artenschutzes wie CITECS geführt (2007, [1]). Folglich ist der Handel mit solchen Hölzern stark eingeschränkt. Bis jetzt wurden keine natürlichen Alternativen gefunden, die sich besser als Pernambuco für den Bogenbau eignen. Versuche alternative Materialien wie CFK einzusetzen sind noch am Anfang und nicht zufriedenstellend. Bestimmte mechanische und akustische Eigenschaften (und natürlich die herausragenden optischen/haptischen) machen das Holz gegenwärtig noch unverzichtbar.



**Abbildung 2:** Bogenstangen aus Pernambuco-Holz

Die Resonanzeigenschaften, seine Dichte und Haltbarkeit sind herausragend, wodurch Pernambuco als ein Klasse-1-Material eingestuft ist. Die hohe Dichte impliziert auch eine sehr hohe Steifigkeit. Die Schallgeschwindigkeit ist für ein Holzmaterial außerordentlich groß. Daraus kann auch ein

großer E-Modul abgeleitet werden. Dies wiederum führt zu geringen Vibrationsverlusten. Die Qualität ist weiterhin beeinflusst von der Homogenität der Dichte und räumlichen Verteilung der Steifigkeit. Das Holz verfügt außerdem über einen geringe Wasserlöslichkeit und Anfälligkeit gegen Ethanol oder Benzen. Aus der Verkettung dieser Eigenschaften resultiert die Einzigartigkeit des Materials aus Sicht der Bogenbauer.

Jahrzehntlang wurde die Materialqualität von Bogenholz mittels sogenannter *Lucchi*-Meter bestimmt [3]. Diese Geräte wurden speziell für die Bestimmung der Materialeigenschaften von Musikhölzern entwickelt. Sie verwenden Ultraschall und nutzen das Funktionsprinzip der Prüfgeräte der zerstörungsfreien Materialprüfung. Hölzer mit den notwendigen Abmessungen können nur mit (für Ultraschallprüfungen) niedrigen Frequenzen durchschallt werden. Es wird die Schallgeschwindigkeit zwischen einem Sender und Empfänger bestimmt (siehe Abb. 3 und die Formeln 1-6). Aus der Schallgeschwindigkeit leiten sich alle weiteren Parameter ab. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messung ist daher der Schlüssel zur Anwendbarkeit der Methode und Verfahrensverbesserung.

Eine wichtige Motivation der Arbeit ergibt sich aus der Verfügbarkeit neuer Technologien. Das betrifft vor allem neue Ultraschallsensoren auf der Basis verbesserter Piezomaterialien sowie neue Möglichkeiten der Elektronik und Signalverarbeitung. Vor diesem Hintergrund wurde eine „alte“ Verfahrensidee neu aufbereitet. Die drei wesentlichen Felder, aus denen Innovationen in die Hard- und Softwareentwicklung einfließen, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- neue piezoelektrische Wandler auf Komposit-Basis mit breitbandiger Kennlinie [4]
- Anwendung kodierter Anregung und von Korrelationsverfahren [5,6]
- frei programmierbare Experimente (auf der Basis von MATLAB) [7].

### Zusammenhang zwischen akustischen Parametern und Materialeigenschaften

Es kann an dieser Stelle nur eine vereinfachte Darstellung mit einem grundlegenden Formelgerüst angegeben werden. Die grundlegenden Parameter können aus der Schallgeschwindigkeit abgeleitet werden.

$$c = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{\rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}} \quad (1)$$

$\rho$  ist die Dichte,  $E$  der E-Modul und  $\mu$  das Poissonverhältnis. Die klassische Methode zur Bestimmung von  $E$  ist der 3-Punkt-Biegeversuch (DIN 52186), welcher  $E_B$  liefert:

$$E_B = \frac{l_s^3}{4 \cdot d \cdot h^3} \cdot \frac{F_2 - F_1}{b_2 - b_1} \quad (2)$$

$d$  (Breite) und  $h$  (Höhe) sind geometrische Parameter der Messproben,  $l_s$  ist die Weite zwischen den Auflagepunkten.  $F_1$  und  $F_2$  sind die Kräfte, die zu zwei Biegezuständen gehören.

Die DIN 52186 erfordert bestimmte Genauigkeiten für die folgenden Größen:  $\Delta l_s, \Delta d, \Delta h = 0,5\%$ ;  $\Delta F = 1\%$ ;  $\Delta b = 0,1\%$ . Dies ergibt einen maximalen Fehler für den E-Modul von  $\Delta E_B = 5\% = \pm 2,5\%$ .

Die Ermüdungsversuche liefern die Resonanzfrequenzen des Stabs. Dabei ist es wichtig zu wissen, welche Resonanzfrequenz welcher Mode zuzuordnen ist. Typischerweise wird dies mit einseitiger Einspannung durchgeführt. Dieser Test liefert  $E_D$  (Index D für dynamisch).

$$E_D = \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot l^4 \cdot \rho \cdot f_m^2}{K^2 \cdot s_m^4} \quad (3)$$

mit

$$K = \sqrt{\frac{I}{q}}$$

$I$  ist das Trägheitsmoment,  $q$  der Querschnitt des Stabs,  $l$  die freie Schwingungslänge,  $f_m$  die Frequenz der  $m$ -t-Schwingungsmode.

Der Einfluss des Schermoduls in (3) wird dabei vernachlässigt. Diese Vernachlässigung verursacht einen Fehler (für Holz) in der Größenordnung von 0,1%. Typische Probenmaße sind hierbei  $l = 400$  mm,  $b = 20$  mm,  $h = 3$  mm. Wenn  $l$  und  $q$  der rechteckige Querschnitt sind, kann (3) wie folgt geschrieben werden:

$$E_D = \frac{48\pi^2 l^4 \rho f_m^2}{h^2 s_m^4} \quad (4)$$

Prüfgeräte vom Typ *Lucchimeter* verwenden eine integrierte Berechnung des E-Moduls auf der Grundlage von Gleichung

$$E_L = c^2 \cdot \rho \quad (5)$$

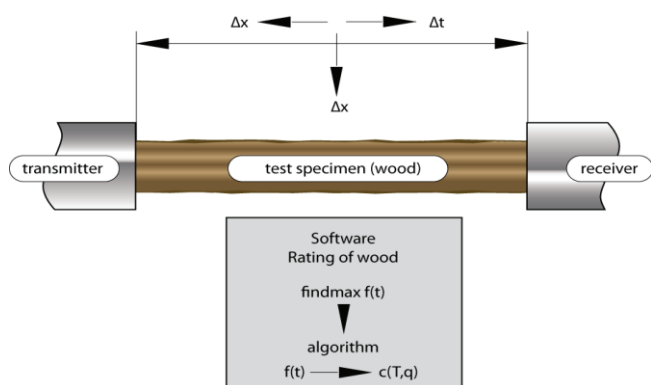
Hier steht  $E_L$  für den E-Modul aus seiner *Lucchimeter*-messung. Der Fehler erhöht sich weiterhin um den der Dichtebestimmung ( $\pm 6\%$ ). Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass es eine Differenz zwischen  $E_D$  und  $E_B$  gibt (10% - dies kann gegenwärtig nicht erklärt werden). Offensichtlich resultiert die Diskrepanz  $E_L > E_D$  aus der Vernachlässigung der Querkontraktion (Poisson-Verhältnis  $\mu$ ) in der Interpretation der Ultraschalldaten. Wenn man realistische Werte für  $\mu$  (Mittelwerte für Nadelhölzer wie Fichte oder Kiefer liegen bei  $\mu Fq = 0,37$ ,  $\mu Fq = 0,041$ ) in

$$E = c^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (6)$$

einsetzt, führt dies zu etwa 10% kleineren Werten. Genauere Laufzeit und Schallgeschwindigkeitsbestimmungen würden zu besseren Möglichkeiten der Materialauswahl und des Ranking führen.

## Experimentelles

Das Prinzip der Laufzeitmessung ist in Abbildung 3 skizziert.



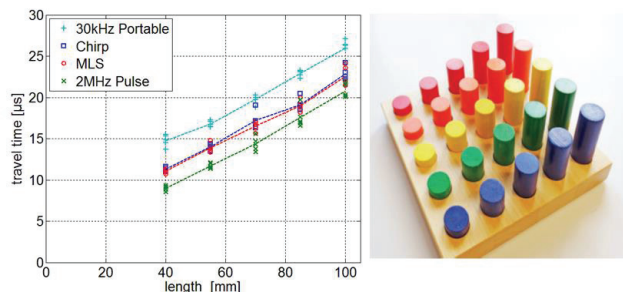
**Abbildung 3:** Sender-Empfänger-Anordnung für die Laufzeitmessungen und die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit. Die Länge der Bogenstange wird mechanisch bestimmt.

Von besonderer Bedeutung für die Laufzeitexperimente an Holz ist die Verfügbarkeit geeigneter Sensoren, die auch bei niedrigeren Prüffrequenzen verwendet werden können. Seit einiger Zeit stehen Sensoren für einen weiten Frequenzbereich zur Verfügung, die über einen relativ glatten Frequenzgang ohne „Nebenresonanzen“ verfügen [4]. Die Kennlinien sind bis zu einem gewissen Grad linearisierbar. Dies ermöglicht neue Anwendungsgebiete. Codierte Anregungen werden in der Akustik für die Bestimmung von Nachhallzeiten verwendet [5,6]. Aufgrund der günstigen Impulsantworten sind solche Verfahren generell für Korrelationsverfahren prädestiniert. *MLS*-Verfahren (*maximum length sequences*) wurden erfolgreich in der Akustischen Vektortomografie [7-9] zur Bestimmung von Temperatur- und Strömungsfeldern eingesetzt. Diese Ideen wurden auf den Ultraschallbereich übertragen und modifiziert. Aufgrund des hervorragenden Frequenzgangs der Sensoren war es möglich, die Codierung *direkt* auf die Ultraschallwandler zu übertragen. Als zweite Codierungsvariante wurden *Chirps* eingesetzt. Dies und die zugehörigen MATLAB-Umgebung wird ausführlicher in [10] beschrieben. Eine Besonderheit der Messungen war, dass sie mit sehr geringen Spannungen (unter 10 V Amplitude) durchgeführt wurden. Das deutet auf die große Reserve des Verfahrens hin.

## Ergebnisse

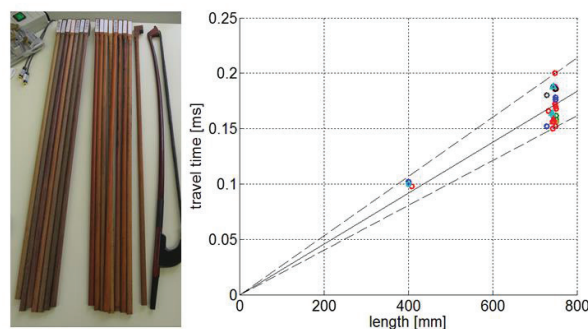
Hier können nur einige prinzipielle Ergebnisse angerissen werden. Es sein noch einmal auf die zu erscheinende Arbeit [10] verwiesen. Der Vergleich von Laufzeitmessungen bei verschiedenen Frequenzen belegt, dass der Niederfrequenzzugang ein großes Potenzial bezüglich der experimentellen Bandbreite und Genauigkeit aufweist. Abbildung 4 soll demonstrieren, dass konventionelle Messungen bei typischen Frequenzen (hier 2 MHz) aufgrund der starken Dämpfung des akustischen Signals nicht für

praktische Anwendungen geeignet sind. Die Experimente an den Buchenholz-Prüfkörpern wurden auch genutzt, um Aussagen zu Material bezogenen Schwankungen (jeweils 5x die gleiche Länge) zu machen. Die Messungen bei 2 MHz liefern bis etwa 10 cm brauchbare Daten. Das bedeutet, dass für längere Durchschallungswege niedrigere Frequenzen genutzt werden müssen.



**Abbildung 4:** Laufzeiten verschiedener Ultraschallmessungen an Buchenholz-Prüfkörpern. Im Vergleich: (einfache) A-Scans bei 2 MHz unter Verwendung von Standard-Ultraschalltechnik der zerstörungsfreien Prüfung (hier 2MHz). Bereits bei Längen von 10 cm wird die Dämpfung so groß, dass Messungen von  $c$  schwierig werden. Die anderen Kurven sind das Ergebnis von Messungen mit verschiedenen Verfahren bei niedrigen Frequenzen. Die Ergebnisse sind bis auf systematisch korrigierbare Effekte identisch.

Die Ergebnisse der Laufzeitmessungen an Bogenstangen sind in Abbildung 5 zusammengefasst. Die Laufzeiten von 29 Prüfkörpern (auch einige mit „halber“ Länge) lassen eine entsprechende Kategorisierung der Materialqualität zu.



**Abbildung 6:** Laufzeiten verschiedener Ultraschallmessungen an Bogenstangen aus Pernambuco. Die Daten stammen aus Messungen mit MLS-Folgen und Chirps. Die Reproduzierbarkeit (unabhängige Wiederholungen, verschiedene Anregungssequenzen) ist sehr hoch.

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass wesentlich verbesserte Laufzeitmessungen auf der Basis modifizierter Ultraschallmessungen zu Bestimmungen der Schallgeschwindigkeit mit höherer Genauigkeit und damit zu genaueren Materialparametern führen. Die Verbesserungen werden wesentlich getragen vom Einsatz neuer Ultraschallsensoren sowie von Messverfahren auf der

Basis codierter Signale und Korrelationen zwischen Sendee- und Empfangssignalen. Es sind weiterführende Entwicklungen geplant. Insbesondere muss der Einfluss der Querkontraktion berücksichtigt werden um weiterführende Materialparameter zu generieren und dem Instrumentenbauer ein zuverlässiges Mittel zur Materialklassifizierung zur Verfügung zu stellen. In gewisser Weise tragen die Arbeiten durch die Möglichkeit der besseren Verwertung der seltenen Hölzer zu deren Schutz in der Natur bei.

### Danksagung

Die Arbeiten wurden durch ein Projekt des BMWi gefördert (Projekt ZIM KF2266010RE4 – Music.US).

### Literaturverzeichnis

- [1] <https://www.fws.gov/international/pdf/factsheet-musical-instruments-2014.pdf> (02./2016)
- [2] Furllett, J., The Insufficiency of the Musical Instrument Passport Program Under CITES under the Law of Act: The Need for a Centralized Wood Title Certification System for Manufactured Wood Products and Wooden Musical Musical Instruments, 48 J. Marshall L. Reviews 495(2015)
- [3] <http://www.lucchimeter.com/>
- [4] Holstein, P., Probst, C., Münch, H.-J., Klepel, A., Tharandt, A., Application of Acoustic Emission in Machinery and Process Monitoring, Proceedings 31st Conference of the European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE)
- [5] Kutruff H. 2001 Room Acoustics (London: E and F N Spon)
- [6] Rife D. D. and Vanderkooy J 1989 Transfer-function measurement with maximum-length sequence J. Audio Eng. Soc. 37 419
- [7] Holstein, P., Ziegenhals, G., Tharandt, A., Gillmeister, K., Bodi, A., Application of pseudo-stochastic excitation in ultrasonic echo experiments for improved time-resolution at low frequencies, Proceedings, 19th World Conference on Non-Destructive Testing, München, 13.-17.06.2016
- [8] Holstein, P., Raabe, A., Müller, R., Barth, M., Mackenzie, D., Starke, E., Acoustical Tomography on the Basis of Travel Time Measurement, Measurement Science and Technology, 15(2004)1420-1428
- [9] Holstein, P., Raabe, A., Barth, M., Seliger, M., Thess, A., The Potential of Acoustic Travel Time Tomography, Proceedings, 4th World Congress on Industrial Process Tomography, 5-8.9.2005, Aizu, Japan
- [10] Holstein, P., Müller, R., Franck, F., Acoustical real-time Experiments on the basis of MATLAB (in German), Proceeding of the Annual DPG-Conference, 18.-22.03.2002