Hochgeschwindigkeits- Stereophotogrammetrie eines Klingenden Stabes

Timo Grothe¹, Rainer Barth², Malte Kob¹, Jörn Jaschinski²

 ¹ Hochschule f
ür Musik Detmold, 32756 Detmold, Deutschland,
 ² Technische Universit
ät Dresden, 01069 Dresden, Deutschland Email: grothe@hfm-detmold.de

Einleitung

Zur Schwingungsanalyse von Musikinstrumenten wird üblicherweise eine definierte Erregerquelle (Impulshammer, Shaker) verwendet. Nach vielen sequentiellen Einzelpunktmessungen (Beschleunigungsaufnehmer, Laservibrometer) ist das Ergebnis dann eine Übersicht aller möglichen Schwingformen. Für die meisten akustisch-mechanischen Musikinstrumente sind diese bereits umfassend untersucht [1].

Demgegenüber stellt die Messung der Schwingungen eines Musikinstrumentes *während des Spielens* eine messtechnische Herausforderung dar: Diese liegt darin, dass die reale *musikalische* Anregung durch einen Musiker, zum Beispiel mit einen Klöppel, ein Plektrum oder einem Bogen sehr schwer messbar ist, ohne sie zu beeinflussen. Weiterhin wird das Instrument während des Spielens meist bewegt und ortsfest montierte Sensoren würden nicht nur die Schwingung beeinflussen sondern auch den Musiker stören.

Eine Möglichkeit sind musikernahe, technische Erregerquellen, wie z.B. Anschlag-, Anzupf- [2], und Anstreichvorrichtungen [3] die eine exakt reproduzierbare Anregung ermöglichen. Dieser Messstrategie bleiben jedoch der künstlerische Ausdruck und die Lebendigkeit der individuellen Klangformung, die mit der zeitlichen Variation zusammenhängen, verborgen.

Um die reale Schwingung bei einem akustisch-mechanischem Musikinstrument zu erfassen, ist die berührungslose, zeitlich und örtlich hochaufgelöste, simultane Messung vieler Kontrollpunkte auf der Instrumentenoberfläche nötig. Diese Anforderungen werden im Prinzip durch die Hochgeschwindigkeits-Stereophotogrammetrie (HSSP) ermöglicht. Dabei werden die 3D-Koordinaten eines beliebigen Messpunktes auf einer Körperoberfläche aus Pixeldaten zweier Digitalkameras berechnet, die unter bekannten Winkeln auf den Körper gerichtet sind.

Die bei diesem bildkorrelations-basierten Verfahren erzielbare Auflösung und Genauigkeit reicht nicht an die der interferometrischen Methoden heran. Die Eignung von HSSP muss für die konkrete Messaufgabe festgestellt werden: Ortsund Zeitauflösung, sowie die Messdauer hängen voneinander ab und sind durch die Kamera-Sensorgröße, durch den Abstand zwischen Messobjekt und Kameras und den Abstand zwischen den Kameras, durch die Speichergeschwindigkeit und -größe, durch die Größe des Messfelds und durch die Ausleuchtung des Messobjektes bestimmt.

In jüngster Zeit wurde HSSP erfolgreich für Anwendungen in der Schwingungsanalyse von Bauteilen mit bewegtem Bezugssystem (z.B. Rotorblätter) angewendet [4, 5, 6]. Den Autoren ist bislang nur eine Erprobung des Verfahrens für akustisch relevante Schwingungen an Musikinstrumenten bekannt [7].

Dieser Beitrag präsentiert eine Machbarkeitsstudie an einem Schlaginstrument, dem Klingenden Stab (*Sonor Double Bass Chime Bar* $f_0 = 110$ Hz).

Material und Methoden

Zur Erprobung von HSSP in der Schwingungsanalyse von Musikinstrumenten bietet sich der Klingende Stab aufgrund seiner ebenen, rechteckigen Oberfläche und der bereits vorliegenden eingehenden Untersuchungen seiner Schwingungseigenschaften [8] als Versuchsobjekt an.

Messaufbau und Datenerfassung

Zur Vorbereitung der Messungen werden die zu messenden Oberflächen mit punktförmigen, retoreflektierenden Aufklebern in einem ungeordneten Muster beklebt (Abbildung 1).

Die Messungen erfolgte mit dem HSSP-Messsystem PON-TOS (Fa. GOM, Braunschweig, Deutschland). Zwei auf einer Traverse angeordnete Hochgeschwindigkeitskameras werden so ausgerichtet, dass sie unter einem Schnittwinkel von ca. 25 Grad auf den Klangstab gerichtet sind (Abbildung 1). Da die in einer Messung aufzunehmende Datenmenge durch den Speicher der Kamera begrenzt ist, hängt die maximale Messdauer von der gewählten Bildfrequenz ab. Durch eine Teilbelichtung der Sensorfläche pro Bild läßt sich die Messdauer entsprechend erhöhen.

Für diese Machbarkeitsstudie wurde die maximale Bildfrequenz des verwendeten Systems von fs = 2 kHz gewählt, bei Teilbelichtung von 1/4 des Sensors (Gesamtfläche 1024x1024 Pixel) konnten 2,5 Sekunden aufgezeichnet werden. Bei Belichtungszeiten kleiner als 0,5 Millisekunden (= $1/f_s$) wird zur Beleuchtung des Messobjekts eine starke Lichtquelle benötigt. Bei dem PONTOS Messsystem sind dazu sechs mit dem Kameraverschluss getriggerte LED-Blitze um jedes der beiden Objektive angebracht.

Die Oberfläche des Klingenden Stabs hat Abmessungen von ca. 500 x 50 mm². Der Abstand der Kameras von der Oberfläche betrug ca. 0,75 m. Die Kalibrierung des Messsytems erfolgt in dieser Position durch mehrfaches Abfotografieren eines Musters auf einer Kalibrierplatte unter verschiedenen Dreh- und Kippwinkeln. Anschließend bestimmt die Software des PONTOS-Messsystems pro Bild aus einer Pixeldatenkorrelation die 3D-Koordinaten der aufgeklebten Messpunkte. Durch die Bestimmung der Mittelpunkte der ellipsenförmigen Abbildungen der Messpunkte wird hierbei eine Subpixelauflösung erzielt. Als Rohdatensatz aus der HSSP-



Abbildung 1: Messaufbau der HSSP-Messungen am Klingen Stab a) Vorbereitung der Oberflächen von Klöppel und Stab mit retoreflektierenden Messpunkten.

b) Messsystem PONTOS (Fa. GOM) Durchführung am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (TU Dresden)

Messung liegt dann Bild für Bild eine Punktwolke in kalibrierten Koordinatensystem x, y und z vor.

Nachbearbeitung der Rohdaten

Der Klingende Stab hat mittig und senkrecht zur Oberfläche zwei Sacklochbohrungen und ist hier durch lose Auflager in Form von filz- und gummigepolsterten senkrechten Stiften mit dem Resonatorkasten verbunden. Daher führt der Klangstab nach dem Anschlag eine ausgesprägte taumelnde Starrkörperbewegung (Abfedern des Schlags und seitliche Kippbewegungen) aus. Zur Analyse der akustisch relevanten Biegeschwingungen des Klangstabs wurde diese Starrkörperbewegung der Oberfläche durch eine bildweise Hauptachsentransformation der Punktwolke korrigiert (x', y')und z'), und anschließend auf ein rechteckiges Gitter interpoliert $(x'_{i,j}|y'_{i,j})$. Als Ergebnis liegen dann für diskrete, äquidistante Messpunkte (i, j) Zeitreihen der Auslenkung des Klangstabes senkrecht zur Oberfläche $(z'_{i,j}(t))$ vor. Diese Nachbearbeitung der HSSP Rohdaten erfolgte mit MATLAB. Die (frei wählbare) Auflösung des interpolierten Messpunktgitters betrug hier $\Delta x' = 36$ mm, $i_{\text{max}} = 12$; und $\Delta y' = 10$ mm, $j_{\text{max}} = 4$. Für den hier präsentierten Aufbau lag das Messrauschen in z' bei 9,0 Mikrometern.

Modalanalyse

Zur Modalanalyse des Klingenden Stabes aus den so aufbereiteten optischen Auslenkungsdaten $(z'_{i,j}(t))$ wurde das Verfahren der Operational Modal Analysis (OMA) eingesetzt. Bei diesem Verfahren der stochastischen Systemidentifikation basiert die durchgeführte Modalanalyse auf der Singulärwertzerlegung einer Matrix, die die Vektoren der Spektraldichte der einzelnen, simultan gemessenen Messpunkte zusammenfasst. Somit wird implizit eine breitbandige, stochastische Anregung angenommen, und ohne explizite Kenntnis der realen Anregungsfunktion werden Modalformen, -frequenzen und -dämpfungwerte geschätzt [9]. Hochgeschwindigkeits-Die Kombination von Stereophotogrammetrie mit diesem Verfahren der Modalanalyse wird im folgenden als HSSP-OMA bezeichnet.

Vergleichsmessungen

Zum Vergleich der Ergebnisse des HSSP-OMA Verfahrens wurde an demselben Klingenden Stab eine klassische experimentelle Modalanalyse (EMA) mit der Impulshammermethode, sowie eine Betriebsschwingformanalyse (ODS) bei Shakeranregung durchgeführt. Dabei wurde im ersten Fall die Beschleunigung an einem Punkt mit einem aufgeklebten Miniaturbeschleunigungsaufnehmer erfasst; im zweiten Fall erfolgte bei ortsfester Anregung eine berührungslose Geschwindigkeitsmessung auf einem Messraster mit einem Laser-Doppler-Vibrometer (Abbildung 2).



Abbildung 2: a) Vergleichsmessung EMA am Erich-Thienhaus Institut (Anregung: Impulshammer, Messung: Beschleunigungsaufnehmer).

b) Vergleichsmessung ODS (Anregung: Shaker, Messung: Laservibrometer). Durchführung am Institut für Technische Akustik (RW-TH Aachen).

Ergebnisse

Die im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie zum HSSP-OMA Verfahren erzielten Ergebnisse (Spalte 3 in Tabelle 1) sind in sehr guter Übereinstimmung mit dem klassischen Verfahren (EMA) und Literaturwerten (Spalten 2 und 5 in Tabelle 1).

Die klanglich relevanten Teiltöne des Klingenden Stabes sind im Bereich $f < f_s/2$ der Grundton bei $f_0 = 109, 3$ Hz und der dritte Oberton bei f = 438, 2 Hz $\approx 4 f_0$. Bei diesen Frequenzen führt der Klingende Stab eine Biegeschwingung aus mit zwei beziehungsweise drei Knotenlinien quer zur Stablängsachse. Durch die Auskehlung des Klingenden Stabs auf der Unterseite wird vom Instrumentenbauer diese harmonische Abstimmung der beiden Schwingformen gezielt herbeigeführt [10]. Trotz des geringen Signal-Rausch-Abstands von 16 dB beim dritten Oberton wird die zugehörige Schwingform mit der photogrammetrischen Messung noch deutlich erfasst (Abbildung 3).

Im Gegensatz zur klassischen experimentellen Modalanalyse (EMA) basieren die hier gezeigten Ergebnisse der OMA nicht auf einem Laborversuch sondern stammen von der völlig berührungslosen Beobachtung eines einzigen Anschlags unter realen Spielbedingungen. Während im Ergebnis des Laborversuchs alle möglichen Schwingformen und Frequenzen vorliegen, werden mit dem HSSP-OMA Verfahren nur die relevanten Schwingformen erfasst, die das Musikinstrument während des Spielens tatsächlich zeigt. So ist aus den Ergebnissen erkennbar, dass die (1,1) Torsionsmode und die (2,0) Quermode (Zeilen 3 und 5 in Tabelle 1) nicht nur keinen nennenswerten Beitrag zum abgestrahlten Klang liefern [10], sondern gar nicht, bzw. nicht messbar anregt wurden. Neben den

	EMA Impulshammer + Beschl.aufnehmer	OMA normaler Anschlag + Photogrammetrie	ODS Shaker + Laservibrometer	Literatur [8]
(2,0)				
$ \begin{array}{c} f_0 \ [\text{Hz}] \\ f_0 / f_{\text{nom}} [\text{Cent}] \\ \zeta \ [\%] \end{array} $	109,2 -13 0,21	109,3 -11 0,50	105,3 -76	
(1,1)				
f [Hz] f/f ₀ [-] ζ [%]	315,2 2,89 0,45	nicht vorhanden	318,3 3,02	2,48
(3,0)				
f [Hz] f/f_0 [-] ζ [%]	438,9 4,02 0,24	438,2 4,01 0,07	421,9 4,01	4,03
(2,0)*				
f [Hz] f/f ₀ [-] ζ [%]	599,0 5,49 0,26	nicht vorhanden	597,9 5,68	7,01
(4,0)				
f [Hz] f/f_0 [-] ζ [%]	1038 9,50 0,28	J > JNyquist	1057 10,04	10,70
(2,1)				
f [Hz] f/f ₀ [-] ζ [%]	1361 12,46 0,45	$f > f_{ m Nyquist}$	1371 13,02	11,09

Tabelle 1: Modalanalyse des Klingenden Stabes. Gegenüberstellung der Ergebnisse der photogrammetrischen Messungen (Spalte 3) mit den Vergleichsmessungen (Spalten 2 und 4) und Literaturwerten (Spalte 5). Die Angabe (n,m) in der ersten Spalte beschreibt die Modenform anhand der Anzahl der Knotenlinien quer (n) und längs (m) zur Holzfaserrichtung des Stabs.

EMA: Experimentelle Modal Analyse, OMA: Operational Modal Analysis, ODS: Operational Deflection Shape = Betriebsschwing-form, * Quermode

Schwingformen liefert OMA auch die relativen Amplituden und deren zeitliches Abklingverhalten (hier nicht dargestellt).

Diskussion

Mit dem Klangstab wurde bewusst ein einfaches Musikinstrument für diese Machbarkeitsstudie ausgewählt. Nicht nur ist dessen Geometrie relativ einfach zu erfassen, auch kommt der impulsartige Anschlag der in der Operational Modal Analysis getroffenen Annahme einer breitbandigen Anregung nahe. Für Musikinstrumente mit einer quasistationären Anregung müssten zur sauberen Detektion der Eigenfrequenzen der Struktur die harmonischen Anteile der Anregung gesondert behandelt werden. Ansätze dafür sind bekannt [11]. Weiterhin ist, z.B. anhand von orientierenden Einzelpunktmessungen, zu ermitteln ob die Amplituden der interessierenden Schwingungen die Rauschgrenze des Messverfahrens ausreichend überschreiten. Diese hängt natürlich von der Größe des interessierenden Messfeldes und des minimal möglichen



Abbildung 3: Screenshot der Modalanalyse (OMA) der Hochgeschwindigkeits-Stereophotogrammetriedaten des gespielten Klingenden Stabes mit der Software PULSE Labshop Type 7760, V 18.1 (Brüel&Kjær, Nærum, Dänemark).

Kameraabstandes ab. Mit entsprechenden Optiken sind Ortsauflösungen im Nanometerbereich möglich [12].

HSSP ist nach Kenntnisstand der Autoren das einzige Verfahren, das die berührungslose, simultane Erfassung der instationären Strukturschwingung an Musikinstrumenten unter Aufführungsbedingungen erlaubt. Die Kombination HSSP-OMA ist insbesondere deshalb interessant, da über die Charakterisierung des Instruments hinaus das Zusammenspiel von Musikinstrument und Musiker störungsfrei während des Musizierens analysiert werden kann. Dies bietet die Grundlage für Untersuchungen der unterschiedlichen Performance verschiedener Musiker auf demselben Musikinstrument, sowie für die messtechnische Validierung komplexer physikalischer Modelle zur digitalen Klangsynthese [13]. Durch die zeitlich und örtlich hochaufgelöste Beobachtung der schwingenden Struktur anstelle des Schalldrucks in seiner Umgebung werden detaillierte Einblicke in den Zusammenhang zwischen Anregung, Bauform und Klang von Musikinstrumenten möglich.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich bei Polina Zakharchuk für die Unterstützung bei der Vergleichsmessung Impushammer; bei Sebastià V. Amengual Garí, Dustin Eddy und Banu Sahin für die Durchführung und Auswertung der Vergleichsmessung Laservibrometer; bei Michael Vorländer und Markus Müller-Trapet vom ITA Aachen für die Messmöglichkeit am Laservibrometer; sowie bei Jason Kunio und Richard Schlombs von Brüel und Kjær für umfassende Unterstützung mit PULSE Reflex und die freundliche Bereitstellung von Demolizenzen.

Literatur

- [1] N. Fletcher and T. Rossing, *The Physics of Musical Instruments*. Springer, 2005.
- [2] T. Smit, F. Türckheim, and R. Mores, "A highly accurate plucking mechanism for acoustical measurements of stringed instruments," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 127, no. 5, pp. EL222–EL226, 2010.
- [3] A. Cronhjort, "A computer-controlled bowing machine (mums)," *STL-QPSR*, vol. 33, pp. 61–66, 1992.

- [4] T. Lundstrom, J. Baqersad, C. Niezrecki, and P. Avitabile, "Using high-speed stereophotogrammetry techniques to extract shape information from wind turbine/rotor operating data," in *Topics in Modal Analysis II*, *Volume 6* (R. Allemang, J. D. Clerck, C. Niezrecki, and J. R. Blough, eds.), Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, pp. 269–275, Springer New York, Jan. 2012.
- [5] S. E. Obando, J. Baqersad, and P. Avitabile, "Improved modal characterization using hybrid data," *SOUND AND VIBRATION*, vol. 48, no. 6, pp. 8–12, 2014.
- [6] N. Ha, H. Vang, and N. Goo, "Modal analysis using digital image correlation technique: An application to artificial wing mimicking beetle's hind wing," *Experimental Mechanics*, pp. 1–10, 2015.
- [7] S. Urban, "Resonanzverhalten von Saiten einer Laute unter Berücksichtigung der Instrumentenmoden," Semesterarbeit, Technische Universität Dresden, 2008.
- [8] I. Bork, A. Chaigne, L.-C. Trebuchet, M. Kosfelder, and D. Pillot, "Comparison between modal analysis and finite element modelling of a marimba bar," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 85, no. 2, pp. 258–266, 1999.
- [9] B. Peeters and G. De Roeck, "Stochastic system identification for operational modal analysis: a review," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 123, no. 4, pp. 659–667, 2001.
- [10] I. Bork, "Practical tuning of xylophone bars and resonators," *Applied Acoustics*, vol. 46, no. 1, pp. 103 127, 1995. Musical Instrument Acoustics.
- [11] P. Mohanty and D. J. Rixen, "Operational modal analysis in the presence of harmonic excitation," *Journal of sound and vibration*, vol. 270, no. 1, pp. 93–109, 2004.
- [12] W. Huang, C. Ma, and Y. Chen, "Displacement measurement with nanoscale resolution using a coded micromark and digital image correlation," *Optical Engineering*, vol. 53, no. 12, pp. 124103–124103, 2014.
- [13] S. Bilbao, A. Torin, and V. Chatziioannou, "Numerical modeling of collisions in musical instruments," *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 101, no. 1, pp. 155– 173, 2015.