

Entstehung von zwei Wolfönen im Cello und die Möglichkeit zu deren aktiver Minderung

Philipp Neubauer, Joachim Bös, Tobias Melz

TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, 64289 Darmstadt

E-Mail: neubauer@szm.tu-darmstadt.de

Einleitung

Wolföne sind unerwünschte modulierte Töne, die bei Streichinstrumenten auftreten können, insbesondere bei Violoncelli. Da Wolföne vorrangig bei hochwertigen und damit aufwändig handgefertigten Celli auftreten, weckt die Minderung der Wolföne bei Musikern wie auch Wissenschaftlern großes Interesse. Durch vorangegangene Untersuchungen an einem Versuchscello konnte bereits ein erster Wolfon identifiziert und charakterisiert werden. Ein System zur aktiven Minderung dieses ersten Wolfons konnte entwickelt und experimentell validiert werden (siehe DAGA 2015 in Nürnberg [1] und CIM 14 in Berlin [2]). Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass an Celli auch ein zweiter Wolfon entstehen kann, der durch den charakteristischen Aufbau des Musikinstruments bei einer höheren Frequenz als der des ersten Wolfons auftritt. Die Vorgänge bei der Entstehung des zweiten Wolfons werden strukturdynamisch dargelegt. Es wird eine Möglichkeit präsentiert, wie auch der zweite Wolfon, analog zum bereits entwickelten System zur aktiven Minderung des ersten Wolfons, aktiv gemindert werden kann. Weiterhin wird gezeigt, dass ein Wolfon bei einem Cello auch ohne die Streichanregung durch einen Bogen, lediglich durch ein Anzupfen der Saite, erzeugt werden kann. Dies zeigt, dass die Streichanregung durch den Bogen nicht die eigentliche Ursache des Wolfons ist, sondern den Wolfon lediglich anfacht.

Der Wolfon im Cello

Das Violoncello, oder kurz Cello, ist ein Streichinstrument, das durch Zupfen oder Streichen der Saite angeregt werden kann. Der prinzipielle Aufbau eines Cellos ist in Abbildung 1 dargestellt.

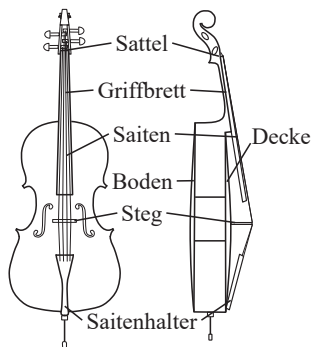


Abbildung 1: prinzipieller Aufbau eines Cellos

Das Cello kann als Gesamtsystem, bestehend aus zwei gekoppelten Teilsystemen, aufgefasst werden. Die Saiten stellen das erste Teilsystem dar und dienen primär zur Erzeu-

gung der Schwingungen. Das zweite Teilsystem ist der Korpus, der zur Wandlung der Schwingungen und zur Abstrahlung des Luftschalls dient [3,4]. Die stärkste Kopplung beider Teilsysteme erfolgt über den Steg. Je nach Betriebschwingform des Cellokorpus entsteht bei bestimmten Frequenzen eine Schaukelbewegung des Steges. Diese Schaukelbewegung wird durch den asymmetrischen Aufbau im Inneren des Cellos hervorgerufen, siehe Abbildung 2.

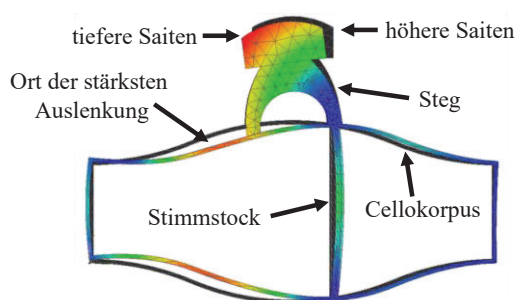


Abbildung 2: numerische Simulation der Schwingung des Cellokorpus beim ersten Wolfon (Querschnitt)

Erreicht die Schaukelbewegung des Steges zu große Amplituden, so interagieren die beiden Teilsysteme Saite und Korpus stark miteinander. Durch die Phasenlage beider sich in Resonanz befindlicher Teilsysteme entsteht ein instabiler Schwingungszustand des Gesamtsystems, welcher zum Wolfon führt.

Wolföne äußern sich im musikalischen Spiel durch starke Modulationen, die bei bestimmten Tönen auftreten. Die Modulationsfrequenz liegt bei etwa 4 – 10 Hz, weshalb das Geräusch aus psychoakustischer Sicht als besonders störend wahrgenommen wird [5]. In vorangegangenen Untersuchungen konnte bereits ein stark ausgeprägter Wolfon an unserem Versuchscello identifiziert werden [1]. In Abbildung 3 sind die Zeitsignale eines Tones mit Auftreten des Wolfons (154 Hz, rot, oben) und eines Tones ohne Auftreten des Wolfones (130 Hz, blau, unten) dargestellt.

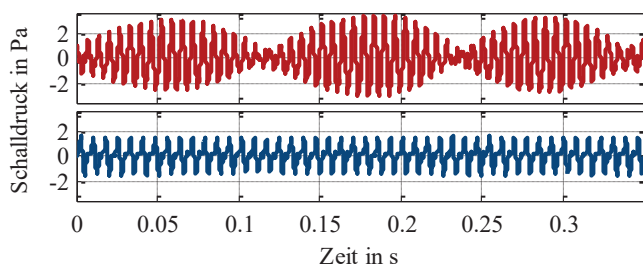


Abbildung 3: Zeitsignal des Luftschalldrucks mit (154 Hz, oben) und ohne Auftreten des Wolfons (130 Hz, unten) [1]

Im Zeitsignal des Luftschalldrucks mit Wolfon (rot, oben) sind die starken Amplitudenmodulationen zu erkennen, welche den charakteristisch modulierten Klangeindruck des Wolfons hervorrufen. Im Zeitsignal des Luftschalldrucks ohne Wolfon bleiben die Amplitudenmodulationen aus. In Abbildung 4 sind die Spektren beider Signale dargestellt.

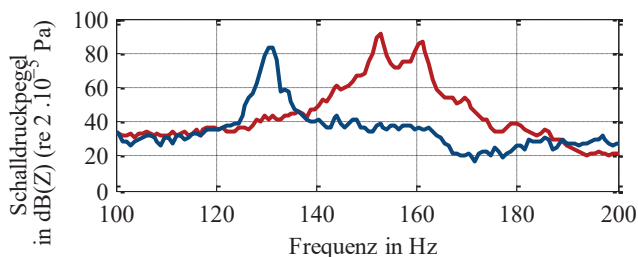


Abbildung 4: Spektren des Luftschalldrucks beim Auftreten des Wolfons (154 Hz, rot) mit charakteristischem Doppel-Peak und ohne Auftreten des Wolfons (130 Hz, blau) [1]

Es ist zu erkennen, dass beim Signal ohne Wolfon (130 Hz, blau) ein einzelner Peak im Spektrum des Luftschalldrucks auftritt. Beim Signal mit Wolfon (154 Hz, rot) entsteht ein charakteristischer Doppel-Peak im Spektrum. Hervorzuheben ist, dass ein lokales Minimum bei der angeregten Frequenz von 154 Hz entsteht.

Aktive Minderung des ersten Wolfons im Cello

Das aktive System zur Minderung des Wolfons basiert auf dem Prinzip der aktiven Dämpfung durch Geschwindigkeitsrückführung. Im Folgenden wird das Vorgehen zur aktiven Minderung des Wolfons, vorgestellt in [1], zusammengefasst.

Das Versuchscello wird durch den Musiker angeregt. Der aktuelle Schwingungszustand des Korpus wird durch zwei Beschleunigungssensoren auf der Decke, nahe des Steges, erfasst. Ein digitaler Signalprozessor (DSP) verarbeitet die Signale in zwei Schritten. Zuerst wird durch den entwickelten Wolfon-Erkennungsalgorithmus detektiert, ob ein Wolfon vorliegt. Darauf folgend wird, falls ein Wolfon detektiert ist, die aktive Geschwindigkeitsrückführung zugeschaltet. Schließlich wird das geschwindigkeitsproportionale Ausgangssignal des DSPs verstärkt und über einen Aktor als Schwingung in den Korpus eingeleitet. Als Aktor wurde ein piezokeramischer Flächenaktor gewählt, da dieser unter anderem in der Lage ist, ausreichend große Schwingungsamplituden in den Korpus einzubringen, eine geringe Masse aufweist und optisch unauffällig anbringbar ist. Das Versuchscello mit angebrachten Beschleunigungssensoren und appliziertem Aktor ist in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5: Cello mit Beschleunigungssensoren und aufgebrachtem Piezoflächenaktor (an der Position der stärksten Auslenkung) zur aktiven Minderung des Wolfons

Die Effektivität des entwickelten Systems zur aktiven Minderung des Cello-Wolfons wurde am Versuchscello messtechnisch validiert. Hierzu wurde die Saite auf die Frequenz des ersten Wolfons bei 154 Hz eingestellt und angeregt. Die Ergebnisse der Untersuchung im Frequenzbereich sind in Abbildung 6 dargestellt.

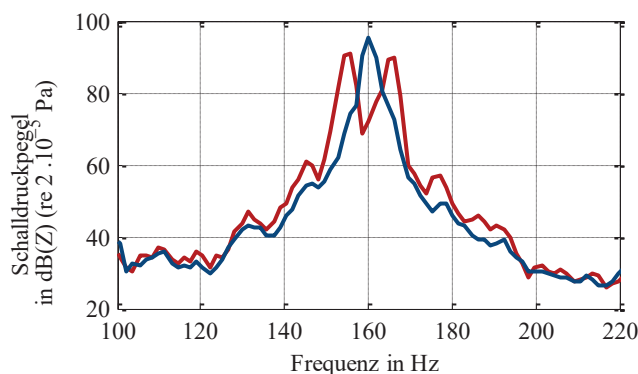


Abbildung 6: Luftschallspektren des Versuchscellos bei aktiviertem (blau) und deaktiviertem (rot) Minderungssystem [1]

Wenn das Minderungssystem deaktiviert bleibt, ist der charakteristische Doppel-Peak des Wolfons im Spektrum der Korpusbeschleunigung deutlich zu erkennen (rot). Bei aktiviertem Minderungssystem verschwindet der Doppel-peak im Spektrum und ein stabiler Einzel-Peak entsteht (blau). Zudem ist zu erkennen, dass Frequenzen außerhalb des Wolfon-Bereichs praktisch unbeeinflusst bleiben.

Der zweite Wolfon im Cello

Das Wissen über die Existenz mehrerer Wolföne im Cello ist schon seit RAMAN bekannt [6]. Eine genaue Untersuchung der Schwingungen des Cellos beim Auftreten eines solchen Wolfons ist jedoch nicht bekannt. In aktuellen Untersuchungen konnte das Auftreten eines zweiten Wolfons an unserem Versuchscello nachgewiesen werden. Beim zweiten Wolfon trifft die Resonanzfrequenz der angeregten Saite, genau wie beim ersten Wolfon, mit einer schwach gedämpften Resonanzfrequenz des Korpus zusammen. Hierbei handelt es sich um eine andere Resonanzfrequenz des Korpus als beim ersten Wolfon. Bei der zu dieser Resonanzfrequenz gehörigen Schwingform schwingt der Korpus unterhalb der höheren Saiten stark, siehe Abbildung 7.

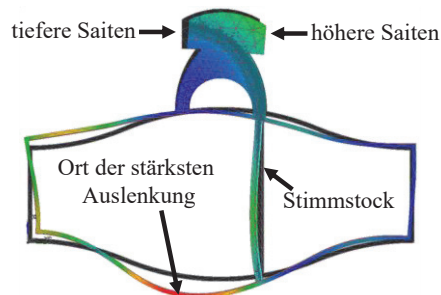


Abbildung 7: numerische Simulation der Schwingung des Cellokorpus beim zweiten Wolfon (Querschnitt)

Wie beim ersten Wolfnton besteht auch beim zweiten Wolfnton eine starke Kopplung der Schwingungen zwischen den Saiten und dem Korpus, was schließlich zum Geräuschphänomen Wolfnton führt. Wie in Abbildung 7 zu sehen, befindet sich die stärkste Auslenkung des Korpus beim zweiten Wolfnton auf der Rückseite des Cellos. Entsprechend wird der Wolfnton auf der Rückseite des Cellos am stärksten abgestrahlt.

Klanglich äußert sich der zweite Wolfnton ähnlich wie der erste Wolfnton. Es entstehen ebenfalls unerwünschte, starke Modulationen im Luftschall, siehe Abbildung 8. In unseren experimentellen Untersuchungen konnte der zweite Wolfnton bei etwa 200 Hz festgestellt werden.

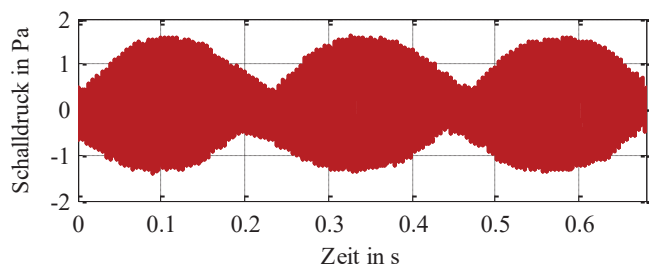


Abbildung 8: Zeitsignal des Luftschalldruckes beim Auftreten des zweiten Wolfntons (ca. 200 Hz)

Der erste Wolfnton konnte durch die Einbringung von aktiver Dämpfung mittels eines Piezoflächenaktors gemindert werden [1]. Es ist davon auszugehen, dass analog dazu auch der zweite Wolfnton durch die Einbringung von aktiver Dämpfung mittels eines Piezoflächenaktors gemindert werden kann. Hierzu muss der Flächenaktor auf dem Korpus, an der Position der stärksten Auslenkung, angebracht werden. Diese Position befindet sich auf der Rückseite des Cellos (Abbildung 7). Zur Minderung des zweiten Wolfntons muss die Einbringung der aktiven Dämpfung daher auf der Rückseite des Cellos, etwa auf der Höhe des Steges stattfinden.

Anregung des Wolfntons durch Zupfen

Die Saiten eines Cellos werden in der Regel entweder durch eine Streichbewegung des Bogens oder durch ein Zupfen der Saite angeregt. Die bisherigen Untersuchungen des Wolfntons haben sich auf eine Anregung durch den Bogen beschränkt. Es soll untersucht werden, ob ein Wolfnton auch ohne die Bogenanregung, lediglich durch Zupfen der Saite mit dem Finger, erzeugbar ist. Da hierüber keine Informationen aus der Literatur bekannt sind, soll dies die Frage klären, welche Rolle die Bogenanregung bei der Entstehung des Wolfntons spielt und ob die Bogenanregung ein elementarer Bestandteil dessen ist. Um diese Frage zu klären, wurde eine Saite des Cellos, gestimmt auf die Frequenz des ersten Wolfntons, durch Zupfen angeregt. Der Zeitverlauf des Luftschalldruckes ist in Abbildung 9 dargestellt.

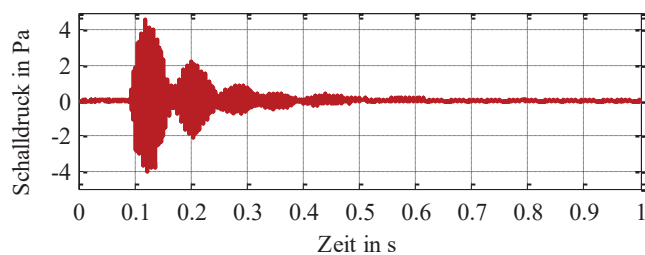


Abbildung 9: Zeitsignal des Luftschalldruckes beim Auftreten des Wolfntons, angeregt durch Zupfen der Saite

Es ist zu erkennen, dass auch durch ein Anzupfen der Saite ein Wolfnton entstehen kann, der jedoch sehr schnell abklingt. Im Zeitsignal sind die Modulationen des Luftschalls gut zu erkennen. Der Wolfnton ist durch das schnelle Abklingen der Schwingung subjektiv jedoch nur schwer wahrzunehmen.

Es kann somit festgestellt werden, dass eine Anregung mit dem Bogen nicht zwingend erforderlich ist, um den Wolfnton zu erzeugen. Offenbar facht der Bogen das Phänomen lediglich weiter an.

Zusammenfassung und Ausblick

In einer vergangenen Veröffentlichung wurde der Wolfnton an einem Versuchscello experimentell identifiziert und charakterisiert [1]. Zudem wurde erläutert, wie die aktive Minderung des Wolfntons umgesetzt werden kann. In aktuellen Untersuchungen konnte auch ein zweiter Wolfnton am Versuchscello festgestellt werden. Ein Ansatz, um auch diesen Wolfnton aktiv zu mindern, wurde vorgestellt. Darüber hinaus konnte experimentell nachgewiesen werden, dass der Wolfnton auch durch ein Anzupfen der Saite, unabhängig von der Bogenanregung, erzeugt werden kann.

In weiteren Schritten soll das aktive System zur Minderung des Wolfntons miniaturisiert und auf einem Mikrocontroller implementiert werden, um die Praxistauglichkeit zu erhöhen.

Literatur

- [1] Neubauer, P. et al.: Aktive Minderung des Cello-Wolfntons durch bedarfsgerechte Geschwindigkeitsrückführung. Proceedings DAGA 2015 (2015) 1158–1161
- [2] Neubauer, P. et al.: Smart material wolf note eliminator. Proceedings CIM14 (2014) 286–291
- [3] Hornborstel, E. und Sachs, C.: Systematik der Musikinstrumente. Zeitschrift für Ethnologie 5 (1914), 554–590
- [4] Woodhouse, J. und McIntyre, M. E.: The Acoustics of Stringed Musical Instruments. Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, Interdisciplinary Science Reviews 3 (1978), 157–173
- [5] Güth, W. und Danckwerth F.: Die Streichinstrumente: Physik – Musik – Mystik, Franz Steiner Verlag, Stuttgart, 1997
- [6] Raman M. A.: On the “wolf-note” in bowed stringed Instruments. Philosophical Magazine Series 6, 32 (190), 391–395