

Aktive Minderung des Cello-Wolftons durch bedarfsgerechte Geschwindigkeitsrückführung

Philipp Neubauer¹, Johannes Tschesche¹, Joachim Bös¹, Tobias Melz^{1,2}, Holger Hanselka³

¹ TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, 64289 Darmstadt

² Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, 64289 Darmstadt

³ Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 76131 Karlsruhe

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

Einleitung

Wolftöne sind unerwünschte, modulierte Töne, die bei Streichinstrumenten auftreten können, insbesondere bei Violoncelli. Ihre Minderung ist seit jeher eine Herausforderung für den Geigenbau auf der ganzen Welt. Einige mechanische Ansätze zur passiven Minderung von Wolftönen sind bereits auf dem Markt etabliert und werden von Musikern und Instrumentenbauern genutzt, um das Problem einzudämmen. Diese konventionellen Ansätze basieren meist auf den physikalischen Prinzipien eines passiven Tilgers oder einfacher Dämpfungsbeläge. Prinzipiell sind diese Ansätze zwar geeignet, um Wolftöne zu mindern, jedoch können sie den gesamten Klang des Musikinstruments beeinflussen, auch wenn der Wolfon nicht in Erscheinung tritt. Ein weiterer Nachteil besteht in der Empfindlichkeit gegenüber veränderlichen Umgebungsbedingungen, insbesondere der Luftfeuchtigkeit und der Raumtemperatur. Das entwickelte aktive System zur Minderung des Wolftons, basierend auf dem Prinzip der bedarfsgerechten Geschwindigkeitsrückführung, kann den Wolfon ohne die Nachteile konventioneller Ansätze mindern.

Entstehungsmechanismen des Wolftons

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.

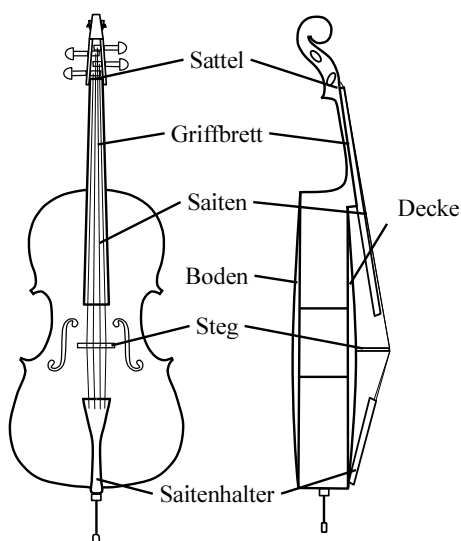


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Cellos.

Nach [1,2] können Saiten und Korpus als zwei gekoppelte Einzelsysteme betrachtet werden. Während die Saiten primär

zur Erzeugung der Schwingungen dienen, wird der Korpus zur Wandlung der Schwingung und zum Abstrahlen des Luftschalls genutzt. Die Kopplung dieser beiden Systeme erfolgt über den Sattel, den Saitenhalter und den Steg, wobei der Steg den stärksten Koppelpunkt darstellt. Durch den asymmetrischen Aufbau des Cellos entsteht bei bestimmten Frequenzen eine Schaukelbewegung des Stegs, wie im Schnittbild in Abbildung 2 dargestellt.

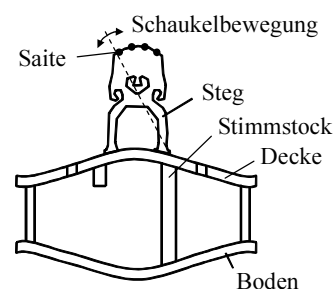


Abbildung 2: Asymmetrischer Aufbau des Cellos (Schnittbild) nach [3].

Unterhalb der höheren Saiten (rechts in Abbildung 2) sind Decke und Boden des Cellos aus klanglichen Gründen durch einen Stimmstock verbunden. Unterhalb der tieferen Saiten (links in Abbildung 2) wird der Steg nicht unterstützt. Werden die Saiten bei der Frequenz angeregt, bei welcher die Haupt-Eigenform des Korpus mit schwacher Dämpfung vorliegt, so sind Saiten und Korpus in diesem Zustand stark miteinander verkoppelt. Die starke Kopplung ist der Grund für das Entstehen des Wolftons. Die Schwingform bei der Haupt-Eigenform des Korpus ist in Abbildung 3 dargestellt.

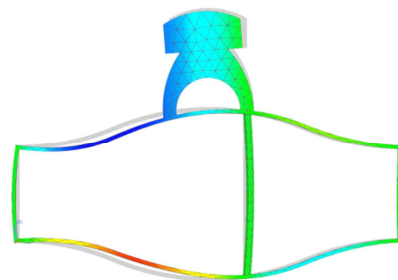


Abbildung 3: Schwingform des Cellos beim Auftreten des Wolftons bei der Haupt-Eigenform des Korpus (Schnittbild).

Aufgrund der individuellen Herstellung von Celli und der veränderlichen mechanischen Eigenschaften des Hauptwerkstoffes Holz tritt der Wolfon bei jedem Cello bei einer unterschiedlichen Frequenz auf.

Der Wolfon kann messtechnisch charakterisiert werden, indem Beschleunigungsmessungen auf dem Korpus im

Bereich des Steges sowie Schwingungsmessungen der Saite durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Untersuchung im Frequenzbereich an einem Versuchscello sind in Abbildung 4 dargestellt.

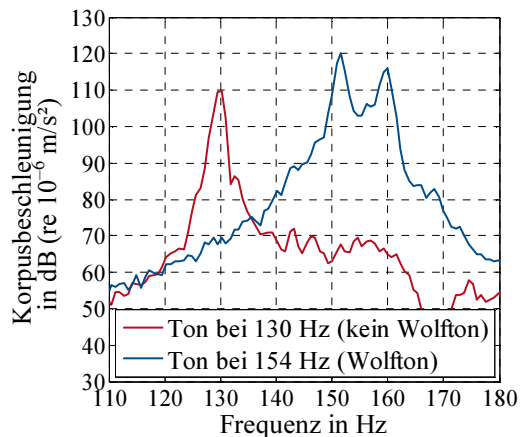


Abbildung 4: Korpusbeschleunigung des Versuchscellos am Steg mit und ohne Auftreten des Wolftons im Frequenzbereich.

Im Frequenzbereich wird ein Ton untersucht, bei welchem kein Wolfton auftritt (130 Hz, rot). Es ist zu erkennen, dass hierbei ein einzelner Peak im Spektrum der Korpusbeschleunigung auftritt. Beim Anregen des Wolftons (beim vorliegenden Versuchscello 154 Hz, blau) entsteht ein charakteristischer Doppel-Peak im Spektrum. Hervorzuheben ist, dass ein lokales Minimum bei der angeregten Frequenz von 154 Hz entsteht. Die Ergebnisse der Untersuchung im Zeitbereich sind in Abbildung 5 dargestellt.

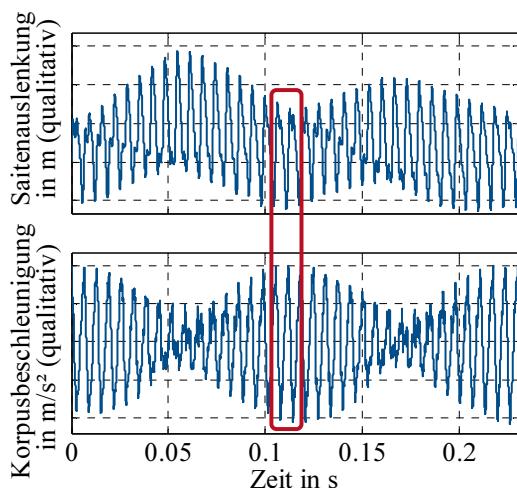


Abbildung 5: Korpusbeschleunigung und Saitenauslenkung des Versuchscellos beim Auftreten des Wolftons im Zeitbereich.

Im Zeitbereich sind im Verlauf der Korpusbeschleunigung (unten) die starken Amplitudenmodulationen zu erkennen, welche nach Abstrahlung als Luftschall den charakteristisch modulierten Klangeindruck des Wolftons hervorrufen. Im Verlauf der Saitenauslenkung (oben) sind periodisch auftretende Störungen zu erkennen, die immer dann neu entstehen, wenn hohe Amplituden der Korpusbeschleunigung auftreten (rote Markierung). Dies verdeutlicht die starke Kopplung zwischen den Saiten und dem Korpus beim

Auftreten des Wolftons. Durch die Rückwirkung der starken Korpusbeschleunigung wird die Saite in ihrer Schwingung erheblich beeinflusst. Da sich Saite und Korpus jeweils in Resonanz befinden, findet die Rückwirkung des Korpus auf die Saite in diesem Zustand gegenphasig statt [4]. Daraus resultiert ein periodisches Aufbauen und Kollabieren der Schwingungen. Es wird klar, dass durch den gezielten Eintrag von Dämpfung in das Gesamtsystem die Amplituden der Korpusbeschleunigung reduziert, die Kopplung der Einzelsysteme verringert und somit die Entstehung des Wolftons verhindert werden kann.

Konventionelle Ansätze zur Minderung des Wolftons

Stand der Technik ist der Einsatz von passiven Tilgern zur frequenzbandbegrenzten Einbringung von Dämpfung in das Gesamtsystem, wodurch der Wolfton eliminiert wird. Kommerziell erhältliche Ausführungen basieren auf Masse-Dämpfer-Elementen, die durch die Befestigung an den Saiten zwischen Steg und Saitenhalten elastisch angebunden werden. Zwei Ausführungen passiver Tilger sind in Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: Zwei passive Tilger zur Eliminierung des Wolftons, befestigt an den Saiten zwischen Steg und Saitenhalter [5].

Durch die dauerhafte Anbindung eines passiven Tilgers an das Musikinstrument wird dessen Klangverhalten permanent beeinflusst.

Da der Wolfton bei jedem Cello bei einer individuellen Frequenz auftritt, muss der passive Tilger individuell auf diese Frequenz abgestimmt werden. Die Abstimmung erfolgt durch die Wahl der Tilgermasse und die Positionierung entlang der Saite. Hierdurch ist der passive Tilger in seiner Arbeitsfrequenz festgelegt, welche ohne erneuten manuellen Eingriff nicht angepasst werden kann. Die Frequenz des Wolftons kann sich jedoch durch eine Veränderung der Umgebungsbedingungen verschieben. Grund hierfür ist die Empfindlichkeit der mechanischen Kennwerte des Korpuswerkstoffs Holz gegenüber der Umgebungstemperatur und der Luftfeuchtigkeit. Auch die Spielweise des Musikers und die Haltung des Instruments können einen Einfluss auf die Frequenz des Wolftons haben.

Die Nachteile der permanenten Beeinflussung des Klangs und der fehlenden Anpassungsfähigkeit an veränderliche Umgebungsbedingungen sind die Gründe für die Entwicklung eines Systems zur aktiven Minderung des Wolftons.

Aktives System zur Minderung des Wolftons

Das aktive System zur Minderung des Wolftons basiert auf dem Prinzip der aktiven Dämpfung durch Geschwindigkeitsrückführung. Das Gesamtsystem ist in Abbildung 7 schematisch dargestellt.

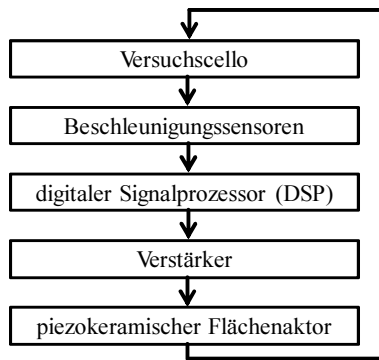


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Gesamtsystems zur aktiven Minderung des Wolfons.

Das Versuchscello wird durch den Musiker angeregt. Der aktuelle Schwingungszustand des Korpus wird durch zwei Beschleunigungssensoren auf der Decke nahe des Stegs erfasst. Ein digitaler Signalprozessor (DSP) verarbeitet die Signale in zwei Schritten. Zuerst wird durch einen neu entwickelten Wolfon-Erkennungsalgorithmus detektiert, ob ein Wolfon vorliegt. Darauf folgend wird, falls ein Wolfon detektiert ist, die aktive Geschwindigkeitsrückführung zugeschaltet. Auf beide Arbeitsschritte des DSPs wird im nächsten Abschnitt genauer eingegangen. Schließlich wird das geschwindigkeitsproportionale Ausgangssignal des DSPs verstärkt und über einen Aktor als Schwingung in den Korpus eingeleitet. Als Aktor wird 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 8 dargestellt.

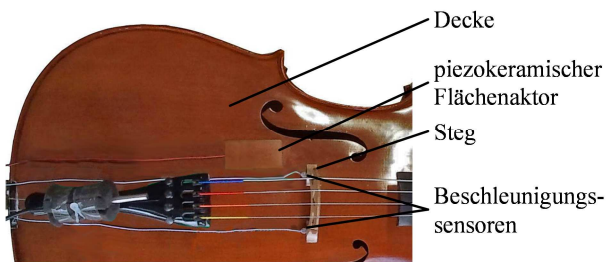


Abbildung 8: Versuchscello mit Beschleunigungssensoren und appliziertem Aktor [6].

Wolfon-Erkennungsalgorithmus

Die erste Aufgabe des DSPs ist die Ausführung des Wolfon-Erkennungsalgorithmus. Dieser muss in Echtzeit arbeiten und den Wolfon zuverlässig detektieren können. Es ist bekannt, dass der Wolfon auftritt, wenn die Saite bei der Frequenz der Haupt-Eigenfrequenz des Korpus angeregt wird. Die Schwingform des Korpus bei dieser Frequenz ist durch die Schaukelbewegung des Stegs charakterisiert, wie in Abbildung 3 dargestellt. Durch die Kenntnis der Korpusbeschleunigungen nahe der beiden Stegfüße kann auf das Auftreten des Wolfons geschlossen werden, da an einer Seite des Stegs erheblich größere Schwingungsamplituden auftreten als an der anderen. Als Kriterium hierfür eignet

sich der Quotient aus den beiden Effektivwerten der Beschleunigungssignale, wie in (1) dargestellt.

$$K_{\text{Wolf}} = \frac{\tilde{a}_{\text{tief}}}{\tilde{a}_{\text{hoch}}} \quad [6] \quad (1)$$

Hierin ist K_{Wolf} das entwickelte Kriterium, das als Maß für die Eintrittswahrscheinlichkeit des Wolfons dient, \tilde{a}_{tief} ist der Effektivwert der Korpusbeschleunigung nahe des ersten Stegfußes unterhalb der tiefen Saiten und \tilde{a}_{hoch} jener nahe des zweiten Stegfußes unterhalb der hohen Saiten.

Mit diesem Kriterium ist es möglich das Auftreten des Wolfons in Echtzeit zu detektieren. Je höher der Wert für K_{Wolf} ansteigt, desto wahrscheinlicher ist das Auftreten des Wolfons. Eine mögliche Falschdetektion durch unterschiedliche Spielweisen, wie zum Beispiel Vibrato, wird nicht erwartet, da über das vorgestellte Kriterium lediglich das Schwingungsverhalten des Korpus an definierten Messstellen zur Bewertung herangezogen wird.

Geschwindigkeitsrückführung

Wenn durch den Wolfon-Erkennungsalgorithmus ein Wolfon detektiert ist, wird die Geschwindigkeitsrückführung aktiviert. Dies ist die zweite Aufgabe des DSPs. Das Grundprinzip der Geschwindigkeitsrückführung ist im Blockschaltbild des Einmassenschwingers in Abbildung 9 schematisch dargestellt.

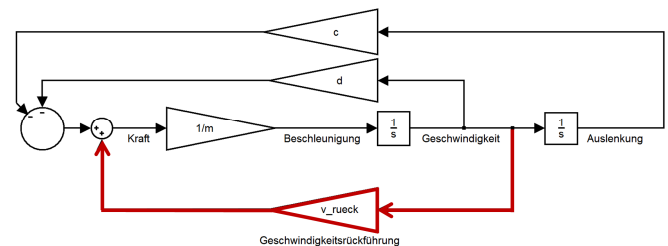


Abbildung 9: Blockschaltbild eines Einmassenschwingers mit Zweig für die Geschwindigkeitsrückführung.

Es ist zu erkennen, dass eine Rückführung des Geschwindigkeitssignals einer aktiven Vergrößerung der Dämpfungskonstante d entspricht. Durch die bedarfsgerechte Verstärkung des rückzuführenden Geschwindigkeitssignals kann in den Korpus genau so viel zusätzliche Dämpfung eingebracht werden, dass der Wolfon zuverlässig gemindert wird.

Der Vorteil des entwickelten aktiven Systems wird klar, da der Instrumentenklang ausschließlich beim Auftreten des Wolfons beeinflusst wird. Weiterhin muss das aktive System nicht auf eine feste Arbeitsfrequenz eingestellt werden, da das rückgeführte Geschwindigkeitssignal durch Integration direkt aus dem gemessenen Beschleunigungssignal hervorgeht. Das rückgeführte Signal passt sich daher in Echtzeit an das aktuelle Schwingungsverhalten des Cellos an.

Messtechnische Validierung

Die Effektivität des entwickelten Systems zur aktiven Minderung des Cello-Wolfons wird am Versuchscello messtechnisch validiert. Hierzu wird die Saite auf die

Frequenz des Wolftons von 154 Hz eingestellt und angeregt. Die Ergebnisse der Untersuchung im Frequenzbereich sind in Abbildung 10 dargestellt.

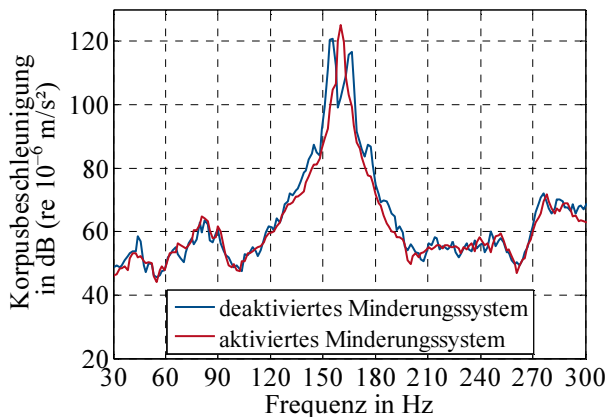


Abbildung 10: Korpusbeschleunigungen des Versuchscellos bei aktiviertem und deaktiviertem Minderungssystem im Frequenzbereich.

Wenn das Minderungssystem deaktiviert bleibt, ist der charakteristische Doppel-Peak des Wolftons im Spektrum der Korpusbeschleunigung deutlich zu erkennen (blau). Bei aktiviertem Minderungssystem verschwindet der Doppel-Peak im Spektrum und ein stabiler Einzel-Peak entsteht (rot). Zudem ist zu erkennen, dass Frequenzen außerhalb des Wolfton-Bereichs praktisch unbeeinflusst bleiben. Die Ergebnisse der Untersuchung im Zeitbereich sind in Abbildung 11 dargestellt.

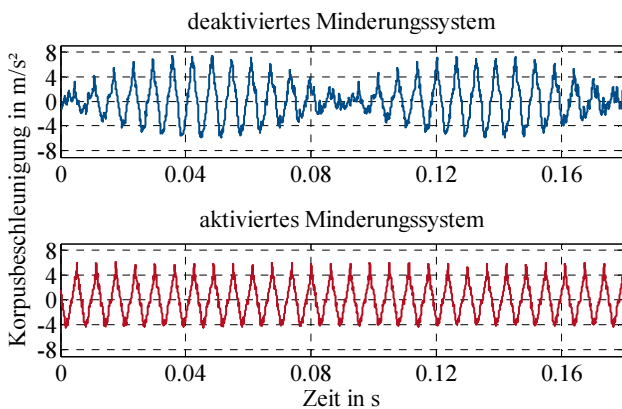


Abbildung 11: Korpusbeschleunigungen des Versuchscellos bei deaktiviertem und aktiviertem Minderungssystem im Zeitbereich.

Bei deaktiviertem Minderungssystem entstehen im Zeitbereich die charakteristischen Amplitudenmodulationen des Wolftons. Nach der Aktivierung des Minderungssystems verschwinden die Amplitudenmodulationen vollständig und es entsteht eine Schwingung mit nahezu konstanten Spitzenamplituden.

Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass mit dem entwickelten System zur aktiven Minderung des Wolftons eine vollständige Eliminierung des Wolftons erreicht werden kann. Die Ziele einer minimalen Beeinflussung des Instrumentenklangs und einer vollständigen Eliminierung

des Wolftons, unabhängig von den Umgebungsbedingungen, wurden erreicht.

Zusammenfassung und Ausblick

Der Wolfton wurde im Rahmen von experimentellen Untersuchungen charakterisiert. Der charakteristische Doppel-Peak im Frequenzbereich und die Amplitudenmodulationen im Zeitbereich konnten als Merkmale des Wolftons herausgestellt werden. Konventionelle Ansätze zur Eliminierung des Wolftons basieren auf dem Prinzip des passiven Tilgers. Hierdurch entstehen die Nachteile einer permanenten Beeinflussung des Instrumentenklangs und einer fehlenden Anpassungsfähigkeit an veränderliche Umgebungsbedingungen ohne manuellen Eingriff. Das zur Überwindung dieser Nachteile entwickelte System zur aktiven Minderung des Wolftons arbeitet nach dem Prinzip der bedarfsgerechten Geschwindigkeitsrückführung. Mithilfe des Wolfton-Erkennungsalgorithmus kann der Wolfton in Echtzeit detektiert werden, sodass der Instrumentenklang lediglich beim Auftreten des Wolftons beeinflusst wird.

In weiteren Schritten soll das aktive System an verschiedenen Celli erprobt werden, um seine allgemeine Kompatibilität zu untersuchen. Weiterhin sollen die beiden Aufgaben des digitalen Signalprozessors auf einem Microcontroller implementiert und die benötigte Peripherie wie Verstärker und Filter in miniaturisierter Form integriert werden.

Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeitsergebnisse wurden teilweise durch das Land Hessen ermöglicht (Projekt „LOEWE Zentrum AdRIA, Adaptronik Research, Innovation, Application“, Förderkennzeichen III L 4 – 518/14004(2008)). Dafür bedanken sich die Autoren.

Literatur

- [1] Hornborstel, E. und Sachs, C.: Systematik der Musikinstrumente. Zeitschrift für Ethnologie 5 (1914), 554–590
- [2] 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
- [3] Rossing, T.: Springer Handbook of Acoustics. Springer Science+Business Media, New York, 2007
- [4] Güth, W.: Physik der Streichinstrumente. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1995
- [5] Gottschling, A.: Entwicklung eines Tilgersystems an Holzstrukturen am Beispiel eines Cellos. Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, TU Darmstadt, 2012
- [6] Neubauer, P.: Entwicklung von Lösungsmöglichkeiten zur aktiven Minderung des Wolftons. Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, TU Darmstadt, 2014