

# Umsetzung einer adaptiven Steuerung für den aktiven Schall-Blocker auf einem Echtzeitsystem mit mehreren Kernen

Sergej Jukkert<sup>1</sup>, Delf Sachau<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Helmut-Schmidt-Universität, 22043 Hamburg, E-Mail: Sachau@hsu-hh.de

## Einleitung

Breitbandiger Lärm, der durch eine offene Grenzfläche (geöffnetes Fenster, Lüftungsrohr etc.) in einen Raum eindringt oder aus diesem austritt, kann durch passive Schalldämmmaßnahmen nicht effektiv im gesamten Frequenzbereich bekämpft werden. Insbesondere für tiefe Frequenzen (< 500 Hz) benötigen passive Maßnahmen, wie z. B.  $\lambda/4$ -Resonatoren in der Wandung des Schallkanals, großen Einbauraum.

Der aktive Schall-Blocker [1][2] kann mit Hilfe von Gegenschall (Sekundärschall) den Lärm (Primärschall) am Eindringen oder am Austreten an der Grenzfläche hindern und somit durch eine lokale aktive Gegenschallmaßnahme die globale Schallreduktion hinter dem Schall-Blocker herbeiführen. Die praktische Umsetzung eines Schall-Blockers kann mit Hilfe einer digitalen mehrkanaligen adaptiven Steuerung erfolgen. Der Rechenaufwand der Steuerung steigt dabei linear mit der Anzahl der Kanäle und den Filterordnungen.

Die hier vorgestellte Multiprozessor-Implementierung der Schall-Blocker Steuerung ermöglicht die Nutzung von zusätzlichen Kanälen, was zur Steigerung der Leistung des Schall-Blockers führt.

## Aktiver Schall-Blocker

Zur Erläuterung des Schall-Blocker Prinzips wird das in Abbildung 1 skizzierte Rohr mit quadratischem Querschnitt und schallharten Wänden für  $a = 0,6$  m und  $l = 2$  m betrachtet.

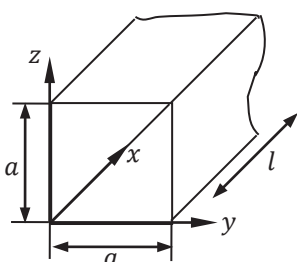


Abbildung 1: Rohr mit quadratischem Querschnitt.

Der Schalldruck  $p$  in diesem Rohr wird durch die Lösung der allgemeinen Wellengleichung

$$p(x, y, z, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \cos\left(\frac{m\pi y}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi z}{a}\right) \times \text{Re} \left\{ p_{+,m,n} e^{j(\omega t - k_{x,m,n}x)} + p_{-,m,n} e^{j(\omega t + k_{x,m,n}x)} \right\} \quad \left[ \frac{N}{m^2} \right] \quad (1)$$

beschrieben [3]. Diese stellt die Summe der Initial- und der Reflexionswellen für alle  $(m, n)$  Moden des Rohres dar. Mit den Transmissionswellenzahlen

$$k_{x,m,n} = \sqrt{k^2 - (m\pi/a)^2 - (n\pi/a)^2} \quad \left[ \frac{\text{rad}}{m} \right] \quad (2)$$

und den Amplituden  $p_{+,m,n}$  und  $p_{-,m,n}$  der entsprechenden  $(m, n)$  Moden.  $k$  ist die Wellenzahl der  $(0, 0)$  Mode und  $\omega$  die Kreisfrequenz der Schalldruckwelle. Die  $(m, n)$  Moden können sich jeweils ab den entsprechenden Grenzkreisfrequenzen [3]

$$\omega_{m,n} > c \sqrt{(m\pi/a)^2 + (n\pi/a)^2} \quad [\text{rad}] \quad (3)$$

ungedämpft ausbreiten. Wobei  $c$  die Schallgeschwindigkeit ist.

Abbildung 2 zeigt einen Schnitt durch das simulierte Primärschallfeld auf der Rohrachse in der  $x$ - $y$ -Ebene. Das Schallfeld wird durch eine harmonische Primärquelle mit der Schallschnelle  $v_p(j\omega)$  bei der Frequenz von  $f = 530$  Hz erzeugt. Dabei sind nach (1) die Moden  $(0, 0)$  und  $(0, 1)$  bzw.  $(1, 0)$  ausbreitungsfähig.

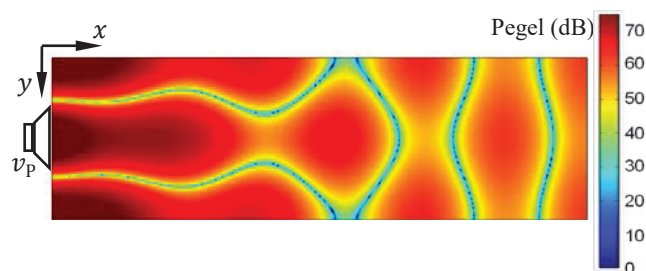


Abbildung 2: Simulation des Schallfeldes im Rohr bei der harmonischen Anregung mit  $f = 530$  Hz.

Abbildung 3 zeigt die Auswirkung zweier lokaler aktiver Gegenschallmaßnahmen auf das Primärschallfeld im Rohr. Zum einen wird ein SISO (single input single output) System (a) und zum anderen ein  $2 \times 2$  MIMO (multiple input multiple output) System (b) verwendet. In beiden Fällen wird durch einen optimalen IMC-Regler (internal model control) [4] die Ansteuerung der Sekundärlautsprecher (SL) so berechnet, dass der Schalldruck an den Regelmikrofonen (Fehlermikrofonen, FM) minimiert wird. Das SISO-System ist mit einem SL nicht in der Lage die Amplitude und Phase beider Moden so einzustellen, dass es zur globalen Schallreduktion rohrabwärts des SL kommt. Es wird nur die  $(0, 0)$  Mode reduziert. Hingegen ist das  $2 \times 2$  MIMO-System in der Lage auch die höhere Mode in Amplitude und Phase so zu beeinflussen, dass es zur globalen Schallminderung rohrabwärts der beiden SL kommt. Hierbei agieren diese als Reflektoren für den Primärschall [5] und der Transport der akustischen Energie rohrabwärts wird geblockt. Grundsätzlich werden  $M$  SL benötigt, um  $M$  Moden zu regeln [4]. Um die globale Reduktion mittels einer adaptiven

Steuerung in einem Raum mit der hohen modalen Dichte zu gewährleisten, muss die Beobachtung der Moden mittels ausreichender Anzahl  $L$  an Sensoren gewährleistet sein [6]. Dabei dürfen diese nicht in den Knoten sowohl des Primärs als auch des Sekundärschallfeldes liegen. Weiterhin werden im Rahmen der experimentellen Untersuchungen nur überbestimmte Systeme mit  $M < L$  betrachtet [4].

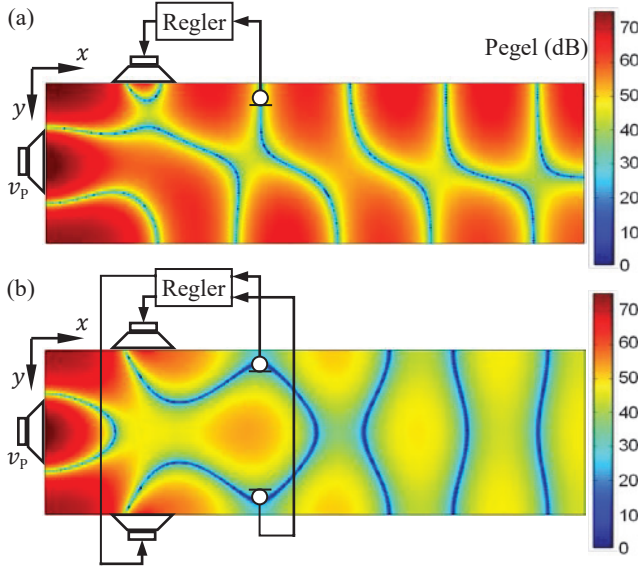


Abbildung 3: Auswirkung einer lokalen aktiven Gegenschallmaßnahme auf das Primärschallfeld im Rohr. (a) SISO-System. (b)  $2 \times 2$  MIMO-System.

### MIMO-FxLMS Steuerung

Die Signalverarbeitung des aktiven Schall-Blockers kann praktisch durch eine MIMO-FxLMS (filtered reference (x) least mean square) Steuerung [7] realisiert werden. Das Blockschaltbild der MIMO-FxLMS Steuerung mit  $K$  Referenzsignalen,  $L$  FM und  $M$  SL ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Ansteuerung des  $m$ -ten SL wird durch

$$y_m(n) = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_{mk}^T(n) \mathbf{x}_k(n), \quad m = 1, \dots, M, \quad [-] \quad (4)$$

berechnet. Wobei  $\mathbf{w}_{mk}(n)$  jeweils einen Koeffizientenvektor eines adaptiven FIR (finite impulse response) Filters mit  $I$  Koeffizienten darstellt.  $\mathbf{x}_k(n) = [x_k(n) \ x_k(n-1) \ \dots \ x_k(n-I+1)]^T$  ist der Vektor mit den Abtastwerten des  $k$ -ten Referenzsignals. Die Adaption der Koeffizienten erfolgt mit

$$\mathbf{w}_{mk}(n+1) = \mathbf{w}_{mk}(n) + \mu \sum_{l=1}^L \mathbf{x}'_{kml}(n) e_l(n) \quad [-] \quad (5)$$

für  $m = 1, \dots, M$  und  $k = 1, \dots, K$ . Die Koeffizienten werden so adaptiert, dass  $\mathbf{e}^T(n)\mathbf{e}(n)$  minimiert wird. Dabei sind  $\mathbf{x}'_{kml}$  die Vektoren mit  $I$  Abtastwerten des  $k$ -ten Referenzsignals, jeweils gefiltert mit den internen Modellen der Übertragungstrecken (FIR Filter mit je  $J$  Koeffizienten)  $\hat{\mathbf{s}}_{lm}$  vom  $m$ -ten Ansteuerungssignal  $y_m(n)$  zum  $l$ -ten Fehlersignal  $e_l(n)$ . Bei  $\mu$  in (5) handelt es sich um einen Konvergenzfaktor zur Steuerung der Adaption.

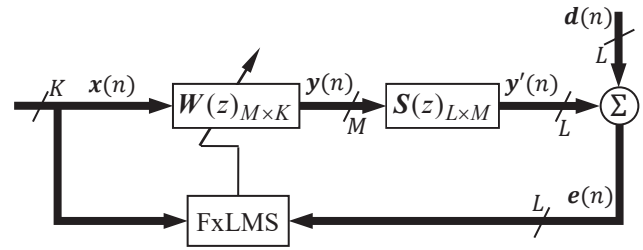


Abbildung 4: Blockschaltbild der MIMO-FxLMS Steuerung.

Den wesentlichen Anteil der Rechenlast der MIMO-FxLMS Steuerung bilden die Multiplikationsakkumulator-Befehle (MAC) bei den jeweiligen Filterungen der Referenzsignale  $\mathbf{x}(n)$  und den Adaptionen der Koeffizienten  $\mathbf{w}_{mk}(n)$ . Die Anzahl  $N$  der MACs ist von den jeweiligen Filterlängen sowie der Anzahl der Sensoren und der Aktoren abhängig und kann mit

$$N = MK(L+1)(I+J) \quad [-] \quad (6)$$

angegeben werden.

### Versuchsaufbau: aktiver Schall-Blocker am Fenster

Der Schall-Blocker wird am Versuchsstand angewandt, um den Primärschall am Eindringen in einen Raum durch den Spalt eines gekippten Fensters zu hindern, Abbildung 5.

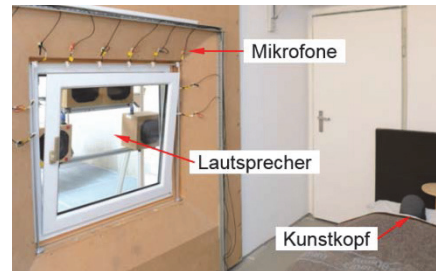


Abbildung 5: Fenster-Versuchsstand mit experimentellem Aufbau des aktiven Schall-Blockers.

Der Fensterrahmen ist quadratisch mit der Kantenlänge von 0,8 m. Die SL sind außerhalb des Raumes vor dem Fenster angebracht. Die FM befinden sich auf der Innenseite des Fensterrahmens äquidistant verteilt entlang des Spalts. Sowohl die Anzahl der SL als auch der FM werden in den Experimenten variiert. Der Primärschall wird durch einen Lautsprecher auf der Außenseite im Abstand von 2 m vor dem Fenster erzeugt. Dazu wird ein mit der Grenzfrequenz von 1 kHz gefiltertes Rauschsignal verwendet. Wobei, bedingt durch den Lautsprecher, das Primärsignal erst ab 80 Hz wirksam wiedergegeben wird. Das Referenzsignal wird intern von der Ansteuerung des Primärlautsprechers abgenommen. Somit gilt für alle Experimente  $K = 1$ . Die adaptive Steuerung wird auf dem RCP (rapid control prototyping) System DS1006 von dSpace mit einem Quad-Core AMD Opteron-Prozessor [8] ausgeführt. Die Steuerung arbeitet mit der Abtastfrequenz  $f_a = 6$  kHz. Die Auswertung der erreichten Schallreduktion im Innenraum erfolgt mittels der Messung des Schalldruckes mit zwei Messmikrofonen

in den Ohren eines Kunstkopfes. Zur Position des Kunstkopfes siehe Abbildung 5.

### Einfluss der Kanalanzahl auf die Leistung des aktiven Schall-Blockers

In Abbildung 6 wird der Einfluss der Anzahl von SL auf die Leistung des Schall-Blockers verdeutlicht. Dargestellt ist der Pegel des Leistungsdichtespektrums des Schalldruckes am linken Ohr des Kunstkopfes mit ausgeschaltetem Schall-Blocker und mit eingeschaltetem Schall-Blocker mit  $M = 2, 3, 4$  und  $L = 10$ . Die Filterordnungen bleiben mit  $I = 500$  und  $J = 200$  in allen Experimenten konstant. Bereits mit zwei oder drei SL kann deutliche Pegelreduktion  $\Delta L \leq 10$  dB im Frequenzbereich bis 400 Hz erzielt werden. Oberhalb von 400 Hz kommt es zur Erhöhung des Pegels in mehreren Frequenzbereichen. Erst mit vier SL kann im gesamten Frequenzbereich  $\Delta L = 10$  dB erreicht werden. Pegelreduktion wird dabei durch die Mittelung der Pegel an den beiden Mikrofonen des Kunstkopfes berechnet.

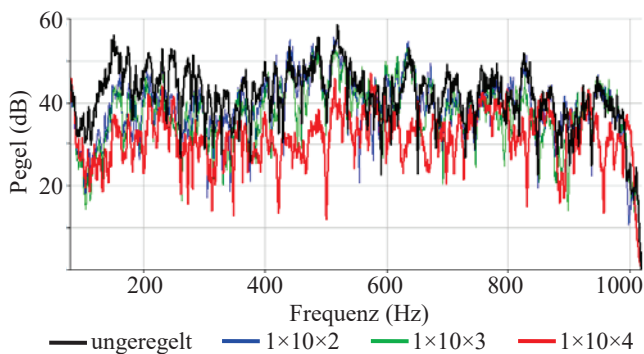


Abbildung 6: Pegel des Leistungsdichtespektrums des Schalldruckes am linken Ohr des Kunstkopfes für 10 FM und unterschiedliche Anzahl von SL.

Abbildung 7 zeigt den Einfluss der Anzahl von FM auf die Leistung des Schall-Blockers. Auch hier gilt, dass es erst bei ausreichender Beobachtbarkeit des Primärschallfeldes zu keinen signifikanten Überhöhungen des Pegels im Frequenzbereich über 500 Hz kommt.

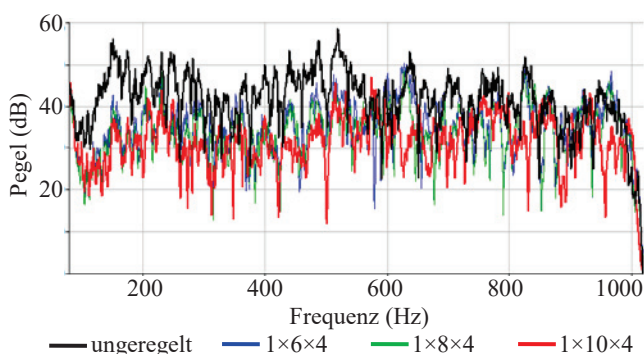


Abbildung 7: Pegel des Leistungsdichtespektrums des Schalldruckes am linken Ohr des Kunstkopfes für 4 SL und unterschiedliche Anzahl von FM.

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse aller Experimente zusammengefasst. Hier zeigt sich deutlich der Trend zur besseren Leistung des Schall-Blockers bei der Erhöhung der Ein- und Ausgangskanäle der MIMO-Steuerung.

Tabelle 1: Erzielte Schallreduktion für unterschiedliche Varianten des Schall-Blockers

Variante des Schall-Blockers	$\Delta L$ (dB)	Variante des Schall-Blockers	$\Delta L$ (dB)
1x10x2	2	1x6x4	6
1x10x3	4	1x8x4	8
1x10x4	10		

### Multiprozessor Implementierung der MIMO-FxLMS Steuerung

Um eine höhere Anzahl an Ein- und Ausgangskanälen zu ermöglichen, wird die Rechenlast der Steuerung auf die vier Kerne des Prozessors verteilt. Dabei werden die Berechnungen der  $M$  Ansteuerungssignale aus (4) sowie die Koeffizientenadaptation aus (5) gleichmäßig auf vier Prozessorkerne verteilt. Das Prozessornetzwerk wird dabei in Stern-Topologie aufgebaut, siehe Abbildung 8. Ein Prozessorkern agiert als *Master*-Prozessor und übernimmt als Netzwerkknoten die Kommunikation mit den Analog-Digital-Umsetzer (A/D), den Digital-Analog-Umsetzer (D/A), den drei *Slave*-Prozessoren sowie mit dem Host-PC. Der Host-PC dient zur manuellen Überwachung der Steuerung.

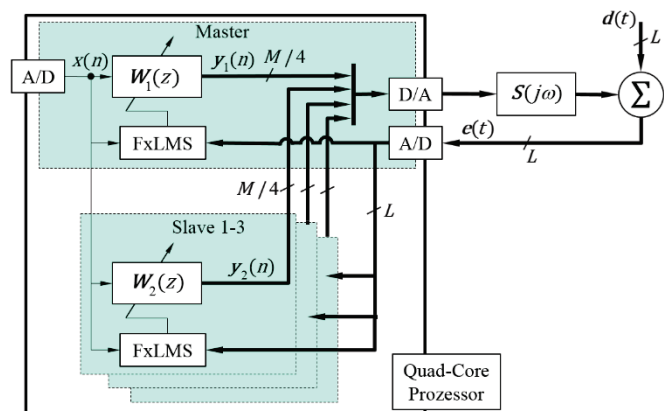


Abbildung 8: Verteilung der Rechenlast der MIMO-FxLMS Steuerung auf vier Prozessor-Kerne.

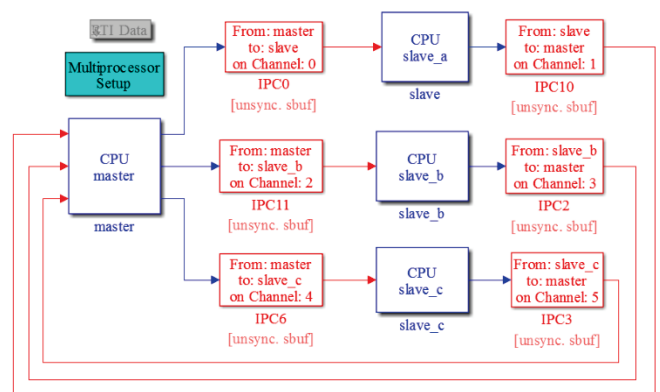


Abbildung 9: MATLAB/Simulink Modell der Prozessorkommunikation für die MIMO-FxLMS Steuerung [9].

Die Zweipunkt-Kommunikation zwischen *Master*-Prozessor und den *Slave*-Prozessoren erfolgt über eine sog. Gigalink-Verbindung [10]. Dabei sind acht bidirektionale Kanäle mit der Datenbreite von 8 kByte je Kanal verfügbar. Die Programmierung erfolgt in MATLAB/Simulink. Die Verteilung auf die vier Prozessorkerne erfolgt mit dem

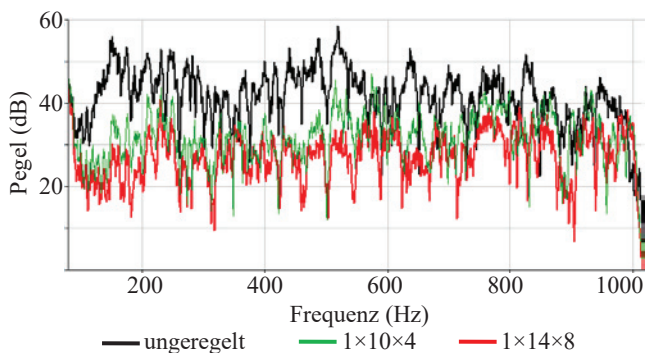


*Multiprocessor Blockset* von dSpace. Die Stern-Topologie wird dabei über die *Interprocessor Communication (IPC)*-Blöcke realisiert. Das zugehörige Simulink Modell zur Prozessorkommunikation ist in Abbildung 9 dargestellt. Durch die Rechenlastverteilung auf vier Kerne kann die Steuerung von dem  $1 \times 10 \times 4$  System auf das  $1 \times 14 \times 8$  System erweitert werden. Dabei wird nach (6) die Anzahl der ausführbaren MACs von  $N_1 = 30800$  auf  $N_4 = 84000$  erhöht. Dies entspricht einer Komplexitätserhöhung um

$$\frac{N_4}{N_1} \approx 2,72. \quad [-] \quad (7)$$

Aufgrund der Stern-Topologie und der damit einhergehenden Mehrbelastung des *Master*-Prozessors konnte die Komplexität nicht um den Faktor 4 erhöht werden.

Abbildung 10 vergleicht die Leistung des  $1 \times 10 \times 4$  Single-Core Systems und des  $1 \times 14 \times 8$  Quad-Core Systems. Eine Verbesserung der Leistung im gesamten Frequenzbereich ist sichtbar. Die Schallreduktion kann um 6 dB auf  $\Delta L = 16$  dB im gesamten Frequenzbereich erhöht werden. Im Frequenzbereich bis 500 Hz wird sogar eine Schallreduktion von 21 dB erreicht.



**Abbildung 10:** Pegel des Leistungsdichtespektrums des Schalldruckes am linken Ohr des Kunstkopfes für  $1 \times 10 \times 4$  System mit Single-Core und  $1 \times 14 \times 8$  System mit Quad-Core.

## Zusammenfassung

Die MIMO-FxLMS Steuerung eines aktiven Schall-Blockers wird in MATLAB/Simulink umgesetzt und mit Hilfe des *Multiprocessor Blocksets* von dSpace auf vier Kerne des Quad-Core AMD Opteron-Prozessors im RCP Board DS1006 von dSpace verteilt. Durch die Verteilung der Rechenlast auf vier Kerne kann die Anzahl ausführbaren MAC Befehle um den Faktor 2,72 gegenüber der Single-Core Umsetzung erhöht werden. Dadurch kann die Steuerung von dem  $1 \times 10 \times 4$  System auf das  $1 \times 14 \times 8$  System erweitert werden, was mit der Steigerung der globalen Schallreduktion um 6 dB einhergeht. Insgesamt kann mit der  $1 \times 14 \times 8$  FxLMS Steuerung eine globale Schallreduktion von 21 dB für ein stochastisches Tiefpasssignal bis 500 Hz und von 16 dB für ein Tiefpasssignal bis 1 kHz erzielt werden.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Herrn Dr.-Ing. Adrian von dem Knesebeck für die weitreichende Unterstützung bei der Realisierung der Multiprozessor Steuerung.

## Literatur

- [1] Böhme, S.; Sachau, D.; Kletschkowski, T.: Aktive akustische Barriere. DAGA 2007 (2007), 695-696
- [2] Kletschkowski, T.; Sachau D.: Globale Lärminderung durch lokalen Gegenschall im Transmissionspfad. DAGA 2012 (2012), 753-754
- [3] Munjal, M. L. Acoustics of ducts and mufflers. John Wiley & Sons, New York, 1987
- [4] Elliott, S. Signal Processing for active control. Academic Press, London, 2001
- [5] Möser, M. Technische Akustik. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2012
- [6] Hansen, C.; Synder S. Active control of noise and vibration. E & FN Spon, London, 1997
- [7] Kuo, S.; Morgan, D. Active noise control systems. Wiley-Interscience, New York, 1996
- [8] DS1006 Processor Board, URL: [http://www.dspace.com/de/gmb/home/products/hw/modular\\_hardware\\_introduction/processor\\_boards/ds1006.cfm](http://www.dspace.com/de/gmb/home/products/hw/modular_hardware_introduction/processor_boards/ds1006.cfm)
- [9] von dem Knesebeck, A.: Multiprozessor MIMO ANC Implementierung auf dem dSpace DS1006. Interner Bericht, Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, 2014.
- [10] dSpace GmbH. RTI and RTI-MP Implementation Guide, Release 2013-A, 2013.