

# Netzwerkbasierte Umsetzung einer verteilten aktiven Schwingungskompensation

Michael Kauba<sup>1</sup>, Dirk Mayer<sup>2</sup>

Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, 64289 Darmstadt, Deutschland

Email: <sup>1</sup> michael.kauba@lbf.fraunhofer.de, <sup>2</sup> dirk.mayer@lbf.fraunhofer.de

## Einleitung und Motivation

Verfahren zur aktiven Schwingungsreduktion wurden an verschiedenen Aufbauten erfolgreich untersucht [1, 2], wobei zur Kompensation von Störungen häufig der Filtered-Reference-Least-Mean-Squares (FxLMS) [5, 1] Algorithmus verwendet wird und zur aktiven Dämpfung mechanischer Strukturen eine integrale Kraft- oder Geschwindigkeitsrückführung verwendet werden kann [4].

Werden zur Schwingungsreduktion mehrere Aktoren und Sensoren verwendet, so steigt die Komplexität der Algorithmen und Implementierungen durch die Berücksichtigung der Kreuzübertragungsstrecken [1], weshalb zur Signalverarbeitung leistungsfähige Prozessoren verwendet werden müssen. Ein Ausweg kann eine verteilte oder dezentrale Implementierung der Verfahren sein, welche experimentell untersucht werden soll. Weiterhin kann eine Kaskadierung von aktiver Schwingungskompensation und -dämpfung die Leistungsfähigkeit der Kompensation steigern [4], da die Konvergenzeigenschaften des FxLMS Algorithmus von der Eigenwertspreizung der Eingangskorrelationsmatrix und damit von der Dynamik der Sekundärstrecke abhängen [1].

## Aktive Schwingungsreduktion

Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des schmalbandigen FxLMS Algorithmus für  $K$  Aktoren und  $M$  Sensoren, mit  $2KM$  Sekundärstreckenmodellen, zusammengefasst in der Transfermatrix  $\hat{\mathbf{S}}(z)$ , und den Koeffizienten  $w_{k0}$  und  $w_{k1}$  des Kompensationsfilters [3] mit  $k = 1, 2, \dots, K$ . Wird die Aktualisierung der Koeffizienten nach Gleichung (1) und (2)

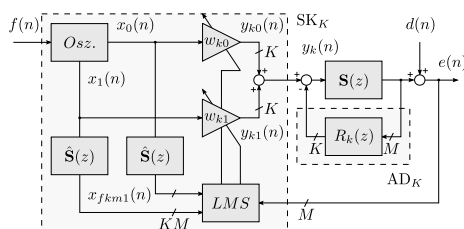


Abbildung 1: Schmalbandiger FxLMS Algorithmus mit  $K$  Aktoren,  $M$  Sensoren und  $K$  dezentralen Rückführungen

$$w_{k0}(n+1) = w_{k0}(n) + \mu \sum_{i=1}^M x_{fki0}(n) e_i(n) \quad (1)$$

$$w_{k1}(n+1) = w_{k1}(n) + \mu \sum_{i=1}^M x_{fki1}(n) e_i(n) \quad (2)$$

für  $K$  Kompensationsfilter durchgeführt, so wird die Summe  $\xi(n)$  der mittleren quadratischen Fehler von  $e_1$  bis  $e_M$  reduziert. Besondere Eigenschaft des Verfahrens ist die quadratische Fehleroberfläche von  $\xi(n)$  abhängig von  $w_{k0}$  und  $w_{k1}$ , womit durch Schätzung des stochastischen Gradienten (Gl. (1) und (2)) stets die optimale Reduktion der Störgröße erreicht werden kann [1].

Eine zusätzliche aktive Dämpfung der Strecke ist in Abbildung 1 durch die Strecke  $R_k(z)$  angedeutet, wobei im Versuch als Regelgesetz eine zeitkontinuierliche integrale Krafrückführung (IFF) verwendet wurde, welche mit einem Bandpassfilter 2. Ordnung auf den kollozierten Bereich der Regelstrecke begrenzt wurde.

## Verteilte und dezentrale Umsetzung

Da, wie in Abbildung 1 dargestellt ist, jeder Kompensationsfilter separat aktualisiert wird, kann der Algorithmus auf  $K$  Signalverarbeitungsknoten verteilt werden, welche jeweils ein Fehlersignal  $e_m(n)$  erfassen und ein Aktorsignal  $y_k(n)$  über eines der  $K$  Kompensationsfilter berechnen. Weiterhin müssen die Fehlersignale zur Berechnung von  $\xi(n)$  allen Knoten in jedem Abtastschritt bereitgestellt werden und ebenfalls für die Schätzung der Sekundärstreckenmodelle  $\hat{\mathbf{S}}(z)$  verfügbar sein. Jeder Knoten berechnet in diesem Fall nur eine Spalte der Transfermatrix  $\hat{\mathbf{S}}(z)$ , welche zur Aktualisierung der entsprechenden Filterkoeffizienten benötigt wird (Gl. (1) und (2)). Zur Realisierung der kollozierten aktiven Dämpfung wird oftmals eine dezentrale Struktur des Reglers verwendet [4], weshalb bei  $K = M$  Aktoren und Sensoren  $K$  integrale Krafrückführungen mit den Rückführverstärkungen  $g_k$  verwendet werden.

## Experimentelle Untersuchung

Abbildung 2 zeigt den experimentellen Aufbau, der aus einer auf zwei piezokeramischen Stapelaktoren gelagerten Masse besteht, welche über zwei dynamische Kraftmeßdosen mit zwei als elastisches Fundament dienenden Balken verbunden ist. Als Anregung dient ein elektrodynamischer Schwingerreger



Abbildung 2: Versuchsaufbau zur aktiven Lagerung

namischer Schwingerreger, welcher mit einem frequenzvariablen, aus mehreren harmonischen Komponenten gebildeten Störgröße angesteuert wird. Die Amplitude der Störgröße steigt quadratisch mit der Frequenz, um das Verhalten einer durch Unwucherregung verursachten Kraft zu erzeugen, wie sie zum Beispiel bei Aggregaten vorliegt. Zur Untersuchung der verteilten Um-

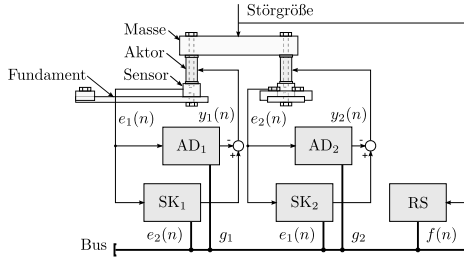


Abbildung 3: Verteilte und dezentrale Signalverarbeitung

setzung wurden die Algorithmen zur Schwingungskompensation ( $SK_k$ ) auf eingebetteten 32Bit Prozessoren (TI TMS320F28335) implementiert, welche über eine CAN-Bus Anbindung zum Austausch der Sensor- und Referenzsignale verfügen (Abb. 3). Zur Synchronisation der Abtastzeiten und zur Schätzung der Grundfrequenz des Störsignals wurde ein 8 Bit Prozessor (Atmel AT90CAN128) verwendet (RS), welcher ebenfalls zur Parametrisierung der integralen Kräfte rückführung verwendet wurde ( $AD_k$ ). Das verteilte System wurde mit einer Abtastfrequenz von 1 kHz betrieben, wobei über den Bus in jedem Abtastintervall die Fehlersignale  $e_1$ ,  $e_2$  und die Frequenz des Referenzsignals  $f$  übertragen wurden. Zur Bewertung der verteilten Realisierung wurde der in [1, 2] verwendete mehrkanalige FxLMS Algorithmus auf einem zentralisierten Rapid Control Prototyping (RCP) System umgesetzt. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse

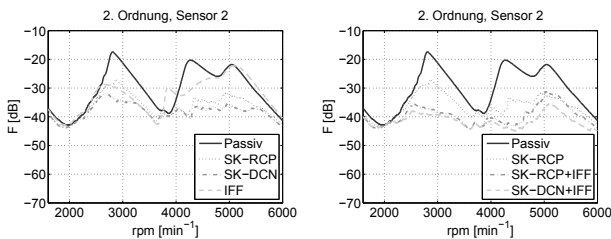


Abbildung 4: Schwingungsreduktion der aktiven Kompensation und aktiven Dämpfung (links) und des aus aktiver Kompensation und Dämpfung kaskadierten Systems (rechts)

der Schwingungsreduktion für eine Hochlaufmessung von  $1500 \text{ min}^{-1}$  bis  $6000 \text{ min}^{-1}$ , wobei die zweite Ordnung kompensiert wurde. Dargestellt sind die RMS-Werte der mit einem Bandpass ordnungsgefilterten Signale des zweiten Fehlersensors für das verteilte (DCN), das RCP-System und die integrale Kräfte rückführung (IFF) im Vergleich zum passiven System (Abb. 4, links). Abbildung 4, rechts zeigt die Reduktionsergebnisse der Kaskadierung aus Schwingungskompensation und -dämpfung. Tabelle 1 zeigt eine Zusammenfassung der Reduktionsergebnisse, wobei die  $H_2$ -Norm der Hochlaufmessung mit aktiven System bezogen auf die  $H_2$ -Norm des Hochlaufs des pas-

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Schwingungsreduktion anhand der  $H_2$ -Norm der Sensorsignale

Red. [dB]	SK-RCP	SK-DCN	IFF
-	-5.50	-7.31	-2.14
Kas. IFF	-8.73	-10.47	-

siven System dargestellt wurde. Die obere Zeile zeigt Ergebnisse der separat betrachteten Systeme und die untere Zeile die Kaskadierung aus aktiver Schwingungsreduktion und -dämpfung. Insgesamt lässt sich eine Reduktion zwischen 5 dB und 10 dB der in das elastische Fundament eingeleiteten Kräfte über den kompletten Frequenzbereich erreichen und eine maximale Reduktion von bis zu 20 dB. Die bessere Reduktion des verteilten Systems im Vergleich zum zentralisierten System (RCP) lässt sich hierbei durch eine höher aufgelöste Schätzung der Störfrequenz erklären, wobei bei beiden Umsetzungen der Vorteil der Kaskadierung aus aktiver Schwingungsreduktion und -dämpfung sichtbar ist.

## Ausblick

Weitere Arbeiten befassen sich mit der Umsetzung von Verfahren zum verringerten Austausch von Sensorsignalen auf dem verteilten System, um für veränderliche Aktor- und Sensoranzahlen unabhängig von der Bandbreite des Kommunikationsmediums zu sein und mit der automatisierten Bestimmung der Reglerparameter der Regelgesetze zur aktiven Dämpfung.

## Danksagung

Die Arbeiten wurden im Rahmen des durch das vom Land Hessen geförderten Projekts „LOEWE AdRIA“ und im durch das vom BMBF geförderten Projekt „FIE-ELAS“ durchgeführt.

## Literatur

- [1] Elliott, S. J., Stothers, I., Nelson, P.: A multiple error LMS algorithm and its application to the active control of sound and vibration. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 35(10), 1423–1434, 1987
- [2] Kauba, M., Herold, S., Koch, T., Mayer, D., Melz, T.: Design and application of an active vibration control system for a marine engine mount. Proceedings of the ISMA, Leuven, 2008
- [3] Kuo, S. M., Morgan, D. R.: Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations. John Wiley&Sons, Singapore, 1996
- [4] De Man, P., Preumont, A.: Hybrid feedback-feedforward control for vibration suppression. Journal of Structural Control, 3(1-2), 33–44, 1996.
- [5] Widrow, B., Stearns, S. D.: Adaptive signal processing. Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 1985.