# Entwicklung und Realisierung einer aktiven Schwingungsunterdrückung zur Dämpfung schmalbandiger Störungen im Körperschall

Marius Wensing[1], Daniel Hölker[2], Heinz-Georg Fehn[3], Peter Richert[4]

[1] *Fachhochschule Münster, 48565 Steinfurt, Deutschland, E-Mail: m.wensing@fh-muenster.de*

[2] *Fachhochschule Münster, 48565 Steinfurt, Deutschland, E-Mail: daniel.hoelker@fh-muenster.de*

[3] *Fachhochschule Münster, 48565 Steinfurt, Deutschland, E-Mail: fehn@fh-muenster.de*

[4] *Fachhochschule Münster, 48565 Steinfurt, Deutschland, E-Mail: richert@fh-muenster.de*

## Einleitung

Die voranschreitende Hausautomatisierung eröffnet immer mehr Einsatzbereiche für Motoren in Umgebungen, wo Lärm nicht erwünscht ist. Motoren erzeugen aber durch die Drehbewegung Schwingungen, deren Frequenz eng mit der Motordrehzahl gekoppelt ist und die über die Motor-Lager als Lärm abgestrahlt werden können. Um genau dies zu verhindern, wird eine Methode vorgestellt, mit der sich diese schmalbandigen Schwingungen gezielt durch das Erzeugen von Gegenschwingungen auslöschen lassen (Active Noise Control, ANC). Das Prinzip der destruktive Interferenz wurde erstmals 1936 vom deutschen Physiker Paul Lueg in einem Patententwurf [1] erwähnt.

## Algorithmus

Die Idee zur Erzeugung einer destruktiven Interferenz ist es nun, das Störsignal aus bekannten Parametern wie etwa der Drehzahl zu synthetisieren und dann phasenverschoben auszugeben. Dazu eignet sich der „Adaptive Notch Filter"-Algorithmus [2], dessen Blockschaltbild in Abbildung 1 gezeigt ist. Er ist dazu geeignet genau ein einzelnes sinusförmiges Störsignal zu unterdrücken, während alle anderen im Störsignal vorhandenen Frequenzen unverändert bleiben.

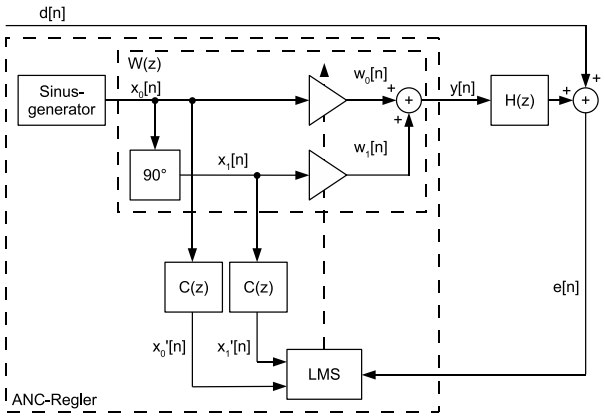


**Abbildung 1:** Blockschaltbild des „Adaptive Notch Filter"-Algorithmus zur Unterdrückung sinusförmiger Störsignale

Das zeitdiskrete Ausgangssignal des Algorithmus wird mit Hilfe eines Sinus-Generators erzeugt. Der Sinus-Generator erzeugt dabei Sinus- und Kosinusschwingungen mit der normierten Kreisfrequenz $\Omega = 2\pi f / f_{\mathrm{Abtast}}$ und den beiden Amplituden $w_0[n]$ und $w_1[n]$. Vergleichbar zur Fourierreihe können so alle Phasenverschiebungen und Amplituden bei der gewählten Frequenz $f$ erreicht werden.

$$y[n] = x_0[n] + x_1[n] = w_0[n]\cos(\Omega n) + w_1[n]\sin(\Omega n) \tag{1}$$

Damit sich der Algorithmus auf die Phase des Störsignals einstellen kann, ist er mit einer adaptiven Regelung versehen, welche die Koeffizienten $w_0[n]$ und $w_1[n]$ ständig anpasst. Dies geschieht mit Hilfe des Filtered-X-Least-Mean-Square-Algorithmus [3]. Dieser Algorithmus berücksichtigt Verzerrungen, die von verschiedenen Komponenten im ANC-System hervorgerufen werden können. Dazu gehört zum Beispiel die Übertragungsfunktion des Aktors $H(z)$. Sie wird durch ein digitales FIR-Filter $N$-ter Ordnung $C(z)$ mit den Koeffizienten $c_k$ modelliert und a-priori geschätzt. Dann gilt für die Adaption der Koeffizienten:

$$w_0[n+1] = w_0[n] - \mu e[n] x_0'[n] \tag{2}$$

$$w_1[n+1] = w_1[n] - \mu e[n] x_1'[n] \tag{3}$$

mit

$$x_0'[n] = \sum_{k=0}^{N} c_k x_0[n-k] \tag{4}$$

$$x_1'[n] = \sum_{k=0}^{N} c_k x_1[n-k] \tag{5}$$

Die Schrittweite $\mu$ des Algorithmus beschreibt die wesentlichen Adaptionseigenschaften. Sie muss so gewählt werden, dass die Adaption möglichst gut funktioniert, der Algorithmus aber trotzdem stabil arbeitet.

## Simulationen

Mit Hilfe von Simulationen soll die theoretische Leistungsfähigkeit des Algorithmus zur schmalbandigen Störsignalunterdrückung untersucht werden. Besonders die optimale Wahl der Schrittweite $\mu$ steht im Vordergrund der Simulationen.

Abbildung 2 zeigt eine simulierte 300 Hz-Störung. Diese ist deutlich als Peak im Störsignalspektrum (rot) zu sehen ist. Das Spektrum des Restsignals liegt deutlich unterhalb des Störsignalspektrums, sodass eine Unterdrückung von nahezu 40 dB erreicht wurde.

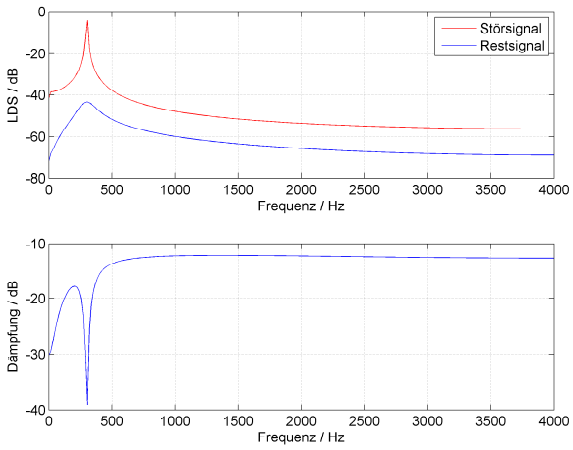


**Abbildung 2:** Leistungsdichtespektrum und Dämpfung einer simulierten 300 Hz-Störung ohne Modellierung des Ausbreitungspfades

Der Einfluss der Schrittweite $\mu$ auf die Bandbreite des Algorithmus wurde ebenfalls mit Hilfe einer Simulation analysiert. Ein auf 300 Hz eingestellter Algorithmus wurde dabei mit Störsignalen zwischen 200 und 400 Hz beaufschlagt. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse dieser Simulation. Deutlich zu erkennen ist, dass die Schrittweite maßgeblich für die Bandbreite verantwortlich ist. Je größer die Schrittweite, desto besser können auch weit von 300 Hz entfernt noch Störungen unterdrückt werden.

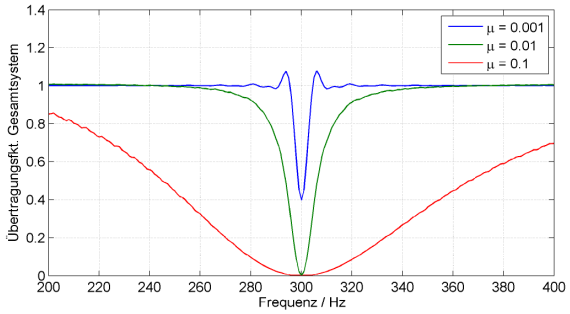


**Abbildung 3:** Bandbreite des adaptiven Notch-Filters in Abhängigkeit der Schrittweite

## Realisierung einer Testumgebung

Der Algorithmus wurde im Anschluss an die Simulationen auf einer realen Hardware implementiert. Abbildung 4 zeigt die Anbringung zweier Aktoren mit einer Gewindestange an eine Metallwelle. Ziel der Realisierung ist es, die Schwingungen des Störsignal-Aktors mit dem Entstör-Aktor zu kompensieren, sodass die Metallwelle schwingungsfrei bleibt.

Abbildung 5 zeigt eine reale Messung an diesem Demonstrator. Das Störsignal besteht aus einer einzelnen sinusförmigen Störfrequenz von 400 Hz (rot). Dieses Störsignal wird durch die aktive Schallunterdrückung stark gedämpft (blau). Durch die Wirkung des Entstör-Aktors wird die in das System abgegebene Leistung verdoppelt, was sich in den deutlichen nichtlinearen Verzerrungen (Oberwellen) äußert. Dies ist problematisch, da zwar die eigentliche Störung gedämpft wird, jedoch neue Störungen durch Oberwellen hinzutreten.

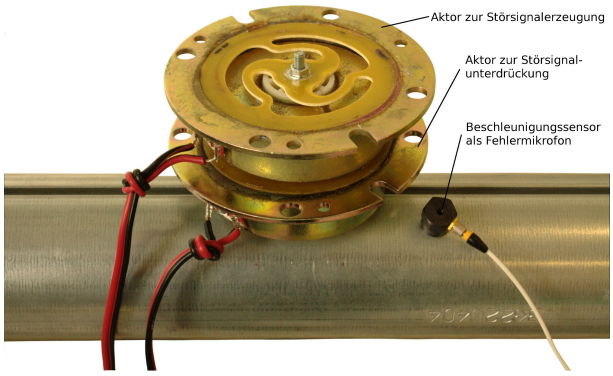


**Abbildung 4:** Aktorkonstruktion zur Realisierung der schmalbandigen Störsignalunterdrückung

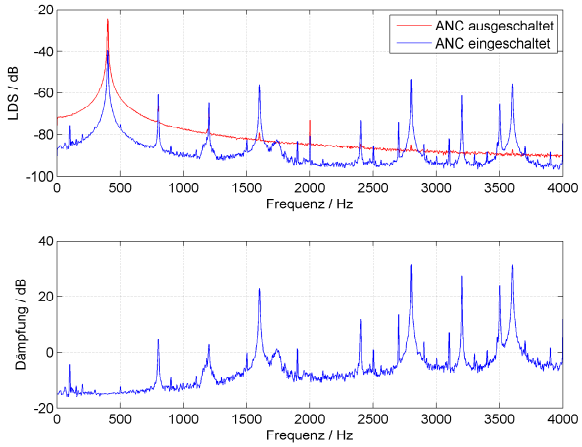


**Abbildung 5:** Messergebnis der Hardware-Realisierung für ein 400 Hz-Störsignal

## Fazit

Es wurde gezeigt, dass für die schmalbandige Unterdrückung von Schwingungen bereits leistungsfähige Algorithmen vorhanden sind. Die Algorithmen haben sich in der Praxis an einem Demonstrator bewährt. Ein grundlegendes Problem ist jedoch die Auswahl geeigneter Aktoren, die auch in einem weiten Frequenzbereich noch linear arbeiten.

## Literatur

[1] Lueg, P.: Process of Silencing Sound Oscillations. 1936

[2] Kuo, S. M., Morgan, D. R.: Active Noise Control Systems. Algorithms and DSP Implementations. John Wiley & Sons, 1996

[3] Haykin, S., Adaptive Filter Theory. Second Edition. Prentice-Hall International, 1991