

Aktive Geräusch- und Vibrationsreduktion mit Hilfe elektrischer Antriebe

Dominik Schubert¹, Robert Henneberger¹, Simon Hecker¹, Stefan Sentpali¹

¹ Hochschule München, 80335 München, Deutschland, Email: dominik.schubert@hm.edu

Einleitung

Durch Leichtbau und treibstoffsparende Maßnahmen (z.B. Reduktion der Zylinderanzahl oder Zylinderabschaltung) wird es immer schwieriger die hohen akustischen Ansprüche in modernen Kraftfahrzeugen zu erfüllen. Um dies trotzdem bewerkstelligen zu können, werden teure aktive und passive Dämpfersysteme eingesetzt. Im Rahmen dieses Beitrages sollen als alternative zu diesen zusätzlichen Bauteilen bereits vorhandene elektrische Antriebe zur aktiven Geräusch- und Schwingungsdämpfung eingesetzt werden. Diese bieten den Vorteil, dass die benötigte Hardware in vielen Fällen bereits vorhanden ist, da die Antriebe sowohl mit einer Leistungselektronik als auch mit einem Mikrocontroller ausgestattet sind, um die Primärfunktion in einer ausreichenden Güte realisieren zu können. Somit ist es möglich Gewicht und Kosten einzusparen.

In diesem Beitrag wird beispielhaft das magnetische Feld des elektrischen Lenkhilfesantriebs derart stimuliert, dass eine harmonische Schwingung erzeugt wird, die in einem Versuchsfahrzeug über den Vorderachsträger und die Fahrzeugstruktur letztlich als Luftschallsignal in den Fahrzeuginnenraum übertragen wird. Mit diesem Signal wird dann ein tonales Störgeräusch, das über einen Shaker am Vorderachsträger erzeugt wird und ebenfalls als Luftschallsignal im Fahrzeuginnenraum wahrgenommen wird ausgelöscht. Dieses Störgeräusch ist repräsentativ für Schwingungen des Verbrennungsmotors oder der Reifen (cavity noise), da diese ebenfalls über den Vorderachsträger in den Innenraum des Fahrzeuges übertragen werden. Eine Unterdrückung dieser störenden, tonalen Geräusche wird üblicherweise durch aufwändige aktive oder passive Dämpfermaßnahmen (z.B. aktive Motorlager, Ausschäumen der Reifen) erreicht, weshalb die Nutzung des vorhandenen Lenkhilfesantriebs eine deutliche Kostenreduktion bedeuten würde [1] - [3]. Zur Anpassung der Phase und Amplitude des vom Lenkhilfesantrieb erzeugten Kompensationsgeräusches wird ein adaptives Filter verwendet, dessen Filtergewichte im laufenden Betrieb angepasst werden. Die Anpassung erfolgt mit Hilfe eines auf einem Gradientenverfahren basierendem Algorithmus, dem sogenannten FxLMS [4]. Dieser wird hier in einer parallelen Ausführung verwendet, um höhere harmonische Ordnungen zu kompensieren, welche aufgrund von Nichtlinearitäten im akustischen Übertragungsverhalten des Lenkhilfesantriebs entstehen. Der Eingriff des adaptiven Algorithmus in den bestehenden Motorregelkreis erfolgt dabei in der sogenannten d/q-Ebene. In dieser ist es möglich den drehmomentbildenden Anteil unabhängig vom flussbildenden Anteil des magnetischen Feldes zu Regeln. Mit Hilfe einer Vorsteuerung wird sichergestellt, dass der ANC (Active Noise Control)

Algorithmus (nahezu) keinen Einfluss auf die Funktion des bestehenden Regelkreises hat [5].

Versuchsaufbau

Alle Versuche wurden mit einem Kraftfahrzeug als Versuchsträger durchgeführt. Um vollen Zugriff auf das Lenksystem zu erhalten, wurden der verbaute Regler inklusive der Leistungselektronik durch eigene Komponenten ersetzt, wobei der Lenkhilfesantrieb beibehalten wurde. Des Weiteren ist das Fahrzeug mit Sensoren ausgestattet worden, um alle Regelungsaufgaben und das Monitoring bewerkstelligen zu können. Die Topologie des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 1 dargestellt.

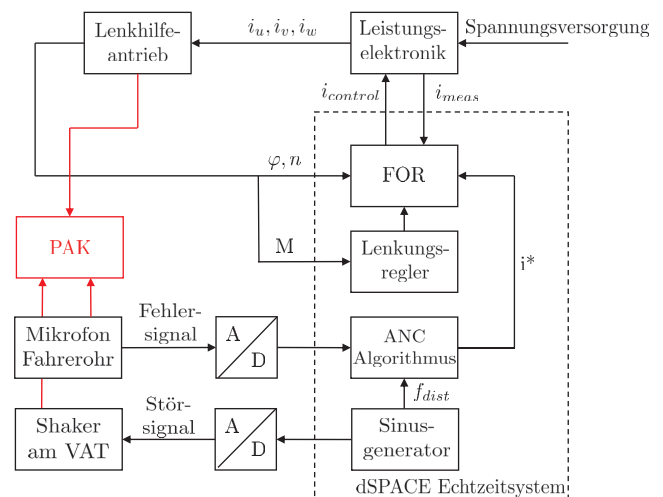


Abbildung 1: Topologie des Versuchsaufbaus in einem Kraftfahrzeug als Versuchsträger

Die dazu verwendeten Komponenten werden im Folgenden genauer beschrieben.

- **Echtzeitsystem:** Sowohl der Regelalgorithmus zur Lenkunterstützung als auch der ANC Algorithmus sind auf einer MicroAutoBox II der Firma dSPACE implementiert. Die Schaltsignale für die Halbbrücken der Leistungselektronik werden mit Hilfe dieser Echtzeithardware generiert. Des Weiteren findet die Erzeugung des Störsignals statt, welches an einen Shaker als Störquelle übertragen wird.
- **Leistungselektronik:** Um den Motor mit der nötigen Energie zu versorgen wird eine Platine mit drei Halbbrücken - bestehend aus jeweils zwei Feldefekttransistoren - verwendet. Die Messung der Phasenströme wird über Strommesswiderstände realisiert.
- **Lenkhilfesantrieb:** Bei dem Lenkhilfesantrieb han-

delt es sich um eine permanenterrregte Synchronmaschine (PMSM). Diese fungiert in diesem Aufbau sowohl als Lenkunterstützung für den Fahrer als auch als akustischer Aktor.

- **Fehlersensor:** Als Fehlersensor wird ein 1/2“ Mikrofon der Firma Microtech Gefell mit linearem Frequenzgang von 20 Hz bis 10 kHz und einer Auflösung von 50 mV/Pa verwendet.
- **Störquelle:** Ein Shaker, welcher am Vorderachsträger (VAT) des Versuchsfahrzeugs befestigt ist, wird als Störquelle verwendet.
- **Messsystem:** Zur Messdatenerfassung und -auswertung wird ein MK II Frontend und die Auswertesoftware PAK 5.9 der Firma MüllerBBM verwendet. Dies bietet hochauflösende Messkanäle mit einem 24-bit Analog-Digital-Wandler in dem verwendeten Spannungsbereich von $\pm 1V$.

Reglerstruktur

Um die Primärfunktion des Lenkhilfeantriebs nicht zu beeinflussen erfolgt der Eingriff in den bestehenden Regelkreis mit Hilfe einer Vorsteuerung. Die daraus resultierende Reglerstruktur ist in Abbildung 2 dargestellt.

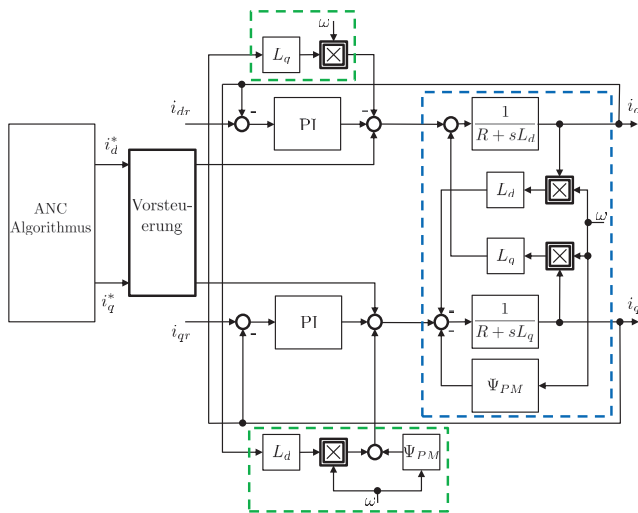


Abbildung 2: Eingriff in die bestehende Stromregelung. Blau: Elektrisches Teilsystem einer PMSM in der d/q-Ebene. Grün: Entkopplung

Da zur Regelung des Lenkhilfeantriebs eine sogenannte feldorientierte Regelung eingesetzt wird und damit eine getrennte Regelung der flussbildenden (d-Komponente) und der drehmomentbildenden (q-Komponente) Statorstromkomponente möglich ist, greift der im folgenden vorgestellte ANC-Algorithmus in dieser d/q-Ebene ein.

Algorithmus

Ein weit verbreitetes Verfahren, um die Filtergewichte adaptiver Filter während des laufenden Betriebs anzupassen ist der sogenannte Least-Mean-Square (LMS)-Algorithmus. Mit diesem ist es möglich auf Basis eines

Gradientenverfahrens das Fehlerquadrat $e^2(n)$ am Fehlersensor zu minimieren. In dem hier vorliegenden Fall setzt sich das Fehlersignal $E(z)$ aus der Überlagerung des Störsignals $D(z)$ und des Kompensationsignals $S(z)Y(z)$, wobei $S(z)$ das Übertragungsverhalten vom Lenkhilfeantrieb zum Fehlersensor darstellt und als Sekundärstrecke bezeichnet wird. Das Signal $Y(z)$ entspricht dem Ausgangssignal des adaptiven Filters. Das Fehlersignal lässt sich somit durch $E(z) = D(z) - S(z)Y(z)$ beschreiben. Um Stabilität zu garantieren muss die Sekundärstrecke im Algorithmus berücksichtigt werden. Dies geschieht durch Verwendung des sogenannten Filtered-x-LMS (FxLMS)-Algorithmus, siehe Abbildung 3.

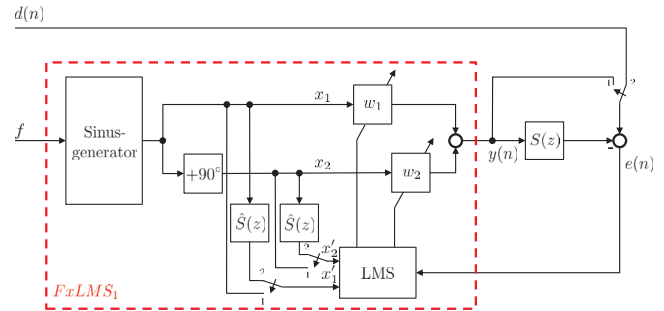


Abbildung 3: FxLMS-Algorithmus

Bei diesem wird im Gegensatz zum LMS-Algorithmus das Referenzsignal $x(n)$ mit der Impulsantwort eines möglichst genauen Modells der Sekundärstrecke $\hat{S}(z)$ gefaltet. Für tonale Störsignale ist die Wirkungsweise des FxLMS-Algorithmus in Abbildung 3 dargestellt, wobei die Frequenz $\omega = 2\pi f$ des harmonischen Störsignals als bekannt vorausgesetzt wird. Mit dessen Kenntnis werden mit Hilfe eines Sinusgenerators die Referenzsignale

$$x_1 = \sin(\omega n h) \tag{1}$$

und

$$x_2 = \cos(\omega n h) \tag{2}$$

erzeugt, wobei h der Abtastzeit des digitalen Systems entspricht, auf welchem der Algorithmus implementiert ist. Das resultierende Ausgangssignal $y(n)$ kann durch

$$y(n) = w_1 \sin(\omega n h) + w_2 \cos(\omega n h) = G(n) \cos(\omega n h + \Phi(n)) \tag{3}$$

mit

$$G(n) = \sqrt{w_1^2(n) + w_2^2(n)} \tag{4}$$

und

$$\Phi(n) = -\arctan\left(\frac{w_2(n)}{w_1(n)}\right) \tag{5}$$

dargestellt werden. Die Filtergewichte w_i werden gemäß der Updatevorschrift

$$w_i(n+1) = w_i(n) + 2\mu x_i'(n)e(n) \tag{6}$$

derart angepasst, dass das Signal $S(z)Y(Z)$ dem harmonischen Fehlersignal $D(z)$ entspricht und somit das Fehlerquadrat $e^2(n)$ minimal wird. Der sogenannte Konvergenzfaktor μ bestimmt dabei die Schrittweite.

Da der Lenkhilfeantrieb ein nichtlineares akustisches Übertragungsverhalten aufweist, entstehen bei der harmonischen Anregung des Motors ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz. Dies führt dazu, dass im Fall von ANC zwar der Grundton reduziert wird, jedoch aufgrund der entstehenden Obertöne keine subjektive Verbesserung des Gehöreindrucks entsteht. Dies ist in Abbildung 4 dargestellt.

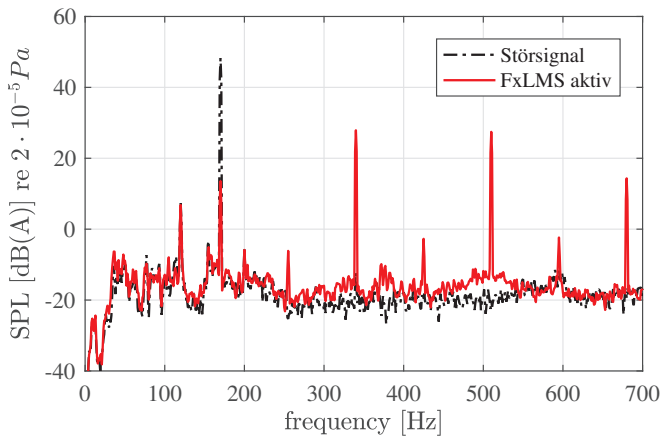


Abbildung 4: Schalldruckpegel (A-bewertet) am Fehlermikrofon. Schwarze Linie: Störsignal bei 170 Hz. Rote Linie: FxLMS aktiv

Daher wird hier eine parallele Version des FxLMS (pFxLMS)-Algorithmus eingesetzt, wie er in Abbildung 5 dargestellt ist. Damit ist es möglich sowohl den Grund-

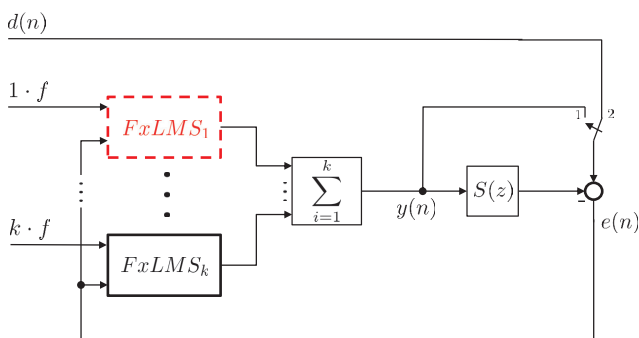


Abbildung 5: Paralleler Aufbau mehrerer FxLMS Algorithmen

ton als auch höhere Harmonische zu reduzieren. Das Ausgangssignal des pFxLMS-Algorithmus wird damit durch

$$y(n) = G_1 \cos(\omega n h + \Phi_1) + \dots + G_k \cos(k \omega n h + \Phi_k) \quad (7)$$

beschrieben.

Anwendung der ANC-Funktion

In diesem Abschnitt werden experimentelle Ergebnisse dargestellt. Dazu wird der im vorherigen Ab-

schnitt vorgestellte pFxLMS-Algorithmus in verschiedenen, möglichst realistischen Situationen zugeschaltet.

In Abbildung 6 ist der Einsatz des Algorithmus bei stehendem Fahrzeug und laufendem Motor dargestellt. Es ist neben der deutlichen Reduktion des Störsignals

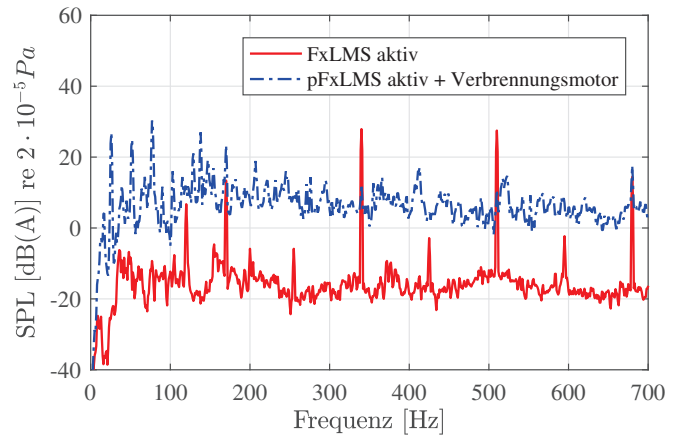


Abbildung 6: Schalldruckpegel (A-bewertet) am Fehlermikrofon. Rote Linie: pFxLMS aktiv. Blaue Linie: pFxLMS aktiv und Verbrennungsmotor im Leerlauf bei stehendem Fahrzeug

zu erkennen, dass auch die entstehenden Obertöne aktiv reduziert werden können. Da der Verbrennungsmotor eine breitbandige akustische Maskierung darstellt, reicht die Reduktion der Signale aus, um eine deutliche Verbesserung des subjektiven Höreindrucks zu bewirken. Um sicherzustellen, dass eine aktive Reduktion von Störsignalen auch während des eigentlichen Betriebs des Lenkhilfeantriebs möglich ist, wurde das Fahrzeug beschleunigt und dabei sinusförmige Lenkbewegungen ausgeführt. Das Messergebnis dieses Versuchs ist in Abbildung 7 dargestellt.

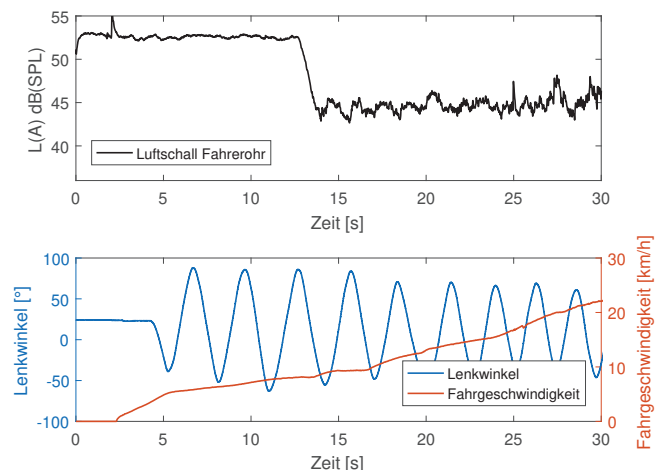


Abbildung 7: Schalldruckpegel (A-bewertet) am Fahrerohr während einer beschleunigten Fahrt mit sinusförmigen Lenkbewegungen

Es ist zu erkennen, dass der Luftschallpegel, welcher mit Hilfe eines Kopfbügelmikrofons direkt am Fahrerohr gemessen wurde, auch während eines realen Fahrmanövers deutlich reduziert werden kann. Das dargestellte Signal

wurde mit Hilfe eines Bandpass mit einer Mittenfrequenz von 170 Hz gefiltert.

Zusammenfassung und Ausblick

Wie gezeigt wurde, ist es möglich mit Hilfe eines elektrischen Lenkhilfeantriebs als akustischer Aktor ein tonales Störgeräusch am Fahrerohr aktiv zu reduzieren. Dies ist auch während der Ausführung der Primärfunktion des Lenkhilfeantriebs möglich. Hierzu wurde lediglich Hardware verwendet, wie sie typischerweise in vielen modernen Kraftfahrzeugen zu finden ist. Daher stellt dieses Verfahren einen wirtschaftlichen Ansatz dar, um die NVH-Eigenschaften in Fahrzeugen zu verbessern.

Da der Algorithmus Informationen über das Übertragungsverhalten der Sekundärstrecke benötigt um stabil zu arbeiten, diese jedoch nicht als zeitinvariant betrachtet werden kann, sind bei vielen Anwendungen Algorithmen im Einsatz, welche das Übertragungsverhalten online schätzen. Zukünftig soll deshalb ein Algorithmus eingesetzt werden, der ohne jegliche Kenntnis über die Sekundärstrecke stabil arbeitet. Dieser soll dahingehend erweitert werden, dass es möglich ist, instationären Störgeräuschen, wie beispielsweise einer Ordnung des Verbrennungsmotors im realen Betrieb, folgen zu können.

Literatur

- [1] S. Hecker, et al.: Akustische Funktionsmehrung elektrischer Lenksysteme Teil 1: Möglichkeiten und Umsetzung mit Hilfe des E-Motors, Aachen, 2016
- [2] F. Schaschko, et al.: Akustische Funktionsmehrung elektrischer Lenksysteme, Teil 2: Aufbau einer prototypischen Steuerkette für eine Sound Design-Funktion im Kraftfahrzeug, Aachen, 2016
- [3] R. Henneberger, et al.: Akustische Funktionsmehrung elektrischer Lenksysteme Teil 3: Experimentelle Validierung im Fahrzeug, Aachen, 2016
- [4] A. Hillis, et al.: A comparison of two adaptive algorithms for the control of active engine mounts, Journal of Sound and Vibration, 2005
- [5] D. Schubert, et al.: Active Noise Cancellation in Passenger Cars using the Electrical Power Steering (EPS) Motor, 1st IEEE CCTA, Hawaii, USA, 2017