



Silence is golden

Aktive Abgasgeräuschkämpfung in Fahrzeugen



Laute Geräusche sind eine Umweltbelastung und mindern die Lebensqualität. Da sich Lärm jedoch nicht immer vermeiden lässt, haben Forscher schon in den 1930er Jahren darüber nachgedacht, Geräusche durch Gegengeräusche auszulöschen. Und obwohl die Algorithmen für eine aktive Abgasgeräuschkämpfung bekannt und die Vorteile deutlich herausgestellt waren, sind elektronische Geräuschkämpfer bislang nur unter idealisierten Bedingungen machbar. Die Herausforderung ist es heute daher, die Geräuschkämpfung aus dem Labor auf die Straße zu bringen.



Vorteile von „Active Noise Control“:

- Höhere Effizienz beim Reduzieren dominanter Motorordnungen, dadurch kleinere Schalldämpfer
- Niedrigerer Abgas-Gegendruck, dadurch höhere Motorleistung und unter Umständen niedrigerer Kraftstoffverbrauch
- Anpassbarer Klang des Fahrzeugs
- Vielseitig einsetzbare Dämpferkonstruktion, dadurch mehr Übernahmeteile, vereinfachte Entwicklungsprozesse und verkürzte Entwicklungszeiten

Ein Abgassystem hat nicht nur die Aufgabe, die Verbrennungsabgase aus dem Fahrzeug sicher abzuleiten, sondern auch die Schallemissionen zu reduzieren, d.h. die Geräusche zu

dämpfen, die bei der Verbrennung entstehen. Das ActiveSilence®-System von Eberspächer geht weiter: Es dämpft störende Geräusche noch besser und kann das ganze Klangprofil eines Fahrzeugs beeinflussen.

Die grundsätzliche Idee

Basierend auf dem Prinzip der destruktiven Interferenz generiert eine Schallquelle einen Schall mit gleicher Amplitude und Frequenz wie der störende Schall. Bei einer Überlagerung mit einer Phasenverschiebung von genau 180° löschen sich beide Schallwellen gegenseitig aus. Dieses Prinzip spielt bei der aktiven Abgasgeräuschregelung (Active Noise Control, ANC) eine große Rolle. Unter idealisierten Bedingungen im Labor funktioniert die Regelung; sie aber aus dem Labor auf die Straße zu bringen, ist eine große Herausforderung. Die verschiedenen Komponenten des ANC-Systems sind sehr empfindlich, so zum Beispiel der Lautsprecher. Zudem machen es die

Umgebungsbedingungen der Abgasanlage nicht leicht, ein optimales System zusammenzustellen. Lautsprecher und Mikrofon müssen die variierende Temperatur der Abgase von -30 °C beim Kaltstart bis zu +700 °C bei höchster Leistung, die Feuchtigkeit, Erschütterungen und Vibrationen aushalten können. Sehr schnelle Veränderungen der beeinflussenden Parameter, beispielsweise der Motordrehzahl oder des Schalldruckpegels, müssen in der Regelung berücksichtigt werden.

Aufbau der Regelung

Da die primären Geräuschkomponenten im Abgassystem eines Motors Oberwellen der Zündfrequenz sind, lassen sich Verbrennungsmotoren als schmalbandige Geräuschquellen klassifizieren. Unsere Untersuchungen zeigen, dass in diesem Fall eine adaptive Schmalband-Feed-Forward-Regelung der praktischste Ansatz für die aktive Geräuschregelung ist. Das Referenzsignal mit den Informationen über den Zustand des Verbrennungsmotors (Drehzahl, Last) kommt über den CAN-Bus vom Motorsteuergerät (Abbildung 2). Diese Informationen werden vom ANC-Regler verwendet, um den Lautsprecher 180° phasenverschoben anzusteuern (Feed-Forward-Anteil), das sekundäre Geräusch zu generieren und damit die Motorgeräusche auszulöschen. Das Mikrofon nimmt das verbleibende Restrauschen auf, das durch die ANC-Regelung immer weiter minimiert wird.

Die Anforderungen an die Regelung sind hoch:

- Maximale Effizienz im größtmöglichen Frequenzbereich, um ein breites Lärmpektrum zu unterdrücken
- Flexibilität bzgl. der Installation, so dass das System für diverse Motorenfamilien von verschiedenen Herstellern eingesetzt werden kann
- Adaptivität des Systems an die schwankenden, physikalischen Parameter, u.a. Temperatur, Vibrationen und Erschütterungen

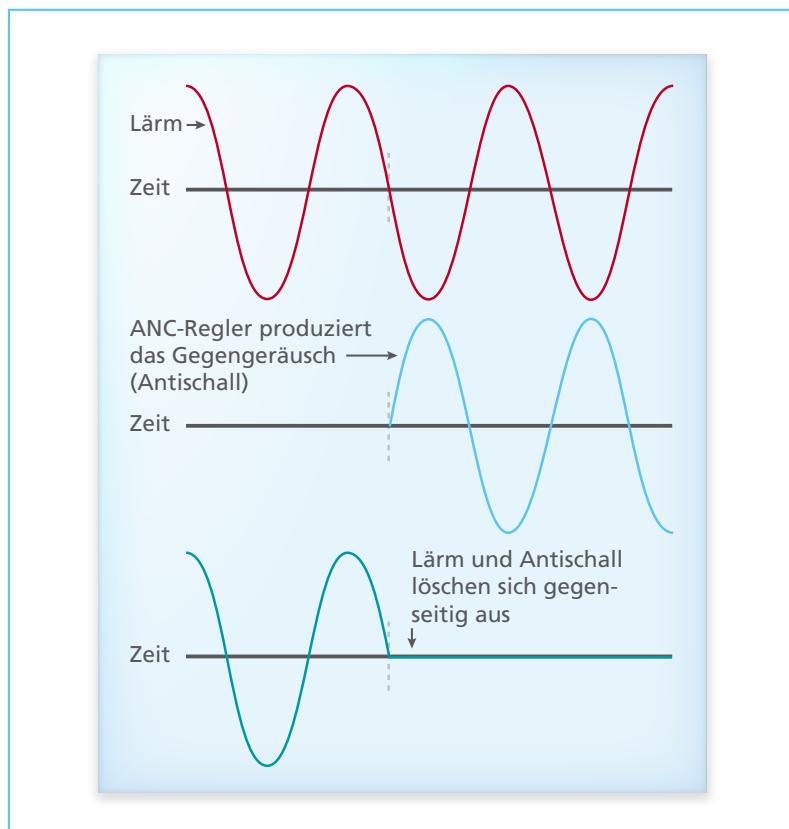


Abbildung 1: Aktive Geräuschdämpfung durch ein Gegengeräusch.

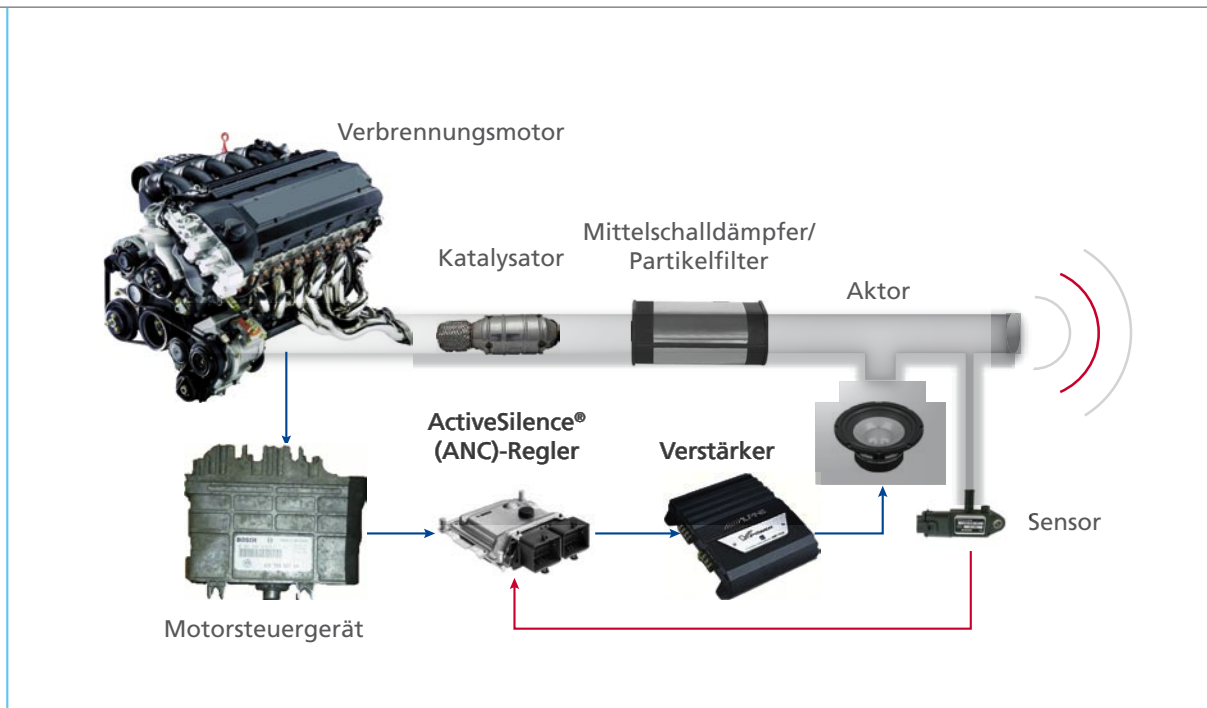


Abbildung 2: Aufbau der Regelung.

„Die MicroAutoBox erlaubte uns, eine kostengünstige, integrierte Lösung zu entwickeln und das Gesamtsystem weiter zu optimieren.“

Dr.-Ing. Jan Krüger, Eberspächer

- Hohe Robustheit und Zuverlässigkeit der verschiedenen Systemelemente
- Einfache Steuerelektronik

Der ANC-Regler generiert die sekundären Geräusche über einen sekundären Schallweg. Die Funktion der Übertragung zwischen dem Reglerausgang (Steuersignal) und seinem Fehlersignaleingang (Fehlermikrofonsignal) wird als Übertragungsfunktion des sekundären Schallwegs bezeichnet (Abbildung 3).

Die Aufgaben des ANC-Reglers sind folgende:

- Reduzierung dominanter Motorordnungen im Frequenzbereich 35-400 Hz
- Selektives Erhöhen von Frequenzen, um einen gewünschten Klang zu erzielen
- Identifizierung der Übertragungs-

funktion des sekundären Schallwegs auch bei Motorlärm

Modellbasierter Entwicklungsprozess

Der ANC-Regler wurde modellbasiert entwickelt. Verschiedene Simulationen zeigten, dass diese Regelung die richtigen Ergebnisse lieferte. Der erste Schritt in Richtung praktischer Anwendung ist die Implementierung des ANC-Reglers auf einer

dSPACE MicroAutoBox als Prototyping-System. Dazu spielen wir aufgenommene Abgasgeräusche über einen Lautsprecher im Labor ab, um die Motorgeräusche zu simulieren. So können wir überprüfen, ob der Regler auf der MicroAutoBox richtig funktioniert. Mit dSPACE ControlDesk können wir Parameter, wie die erforderliche Filterlänge der eingebetteten Controller, einstellen und dadurch optimieren.

Danach ist die MicroAutoBox für den Einsatz im Demo-Fahrzeug bereit. Der ANC-Regler erhält weitere Referenzdaten wie Motordrehzahl, Motorlast und Fahrzeuggeschwindigkeit über den Fahrzeugantriebs-CAN. Auf der



Abbildung 3: Übertragungsfunktion zwischen Reglerausgang und Fehlersignaleingang.

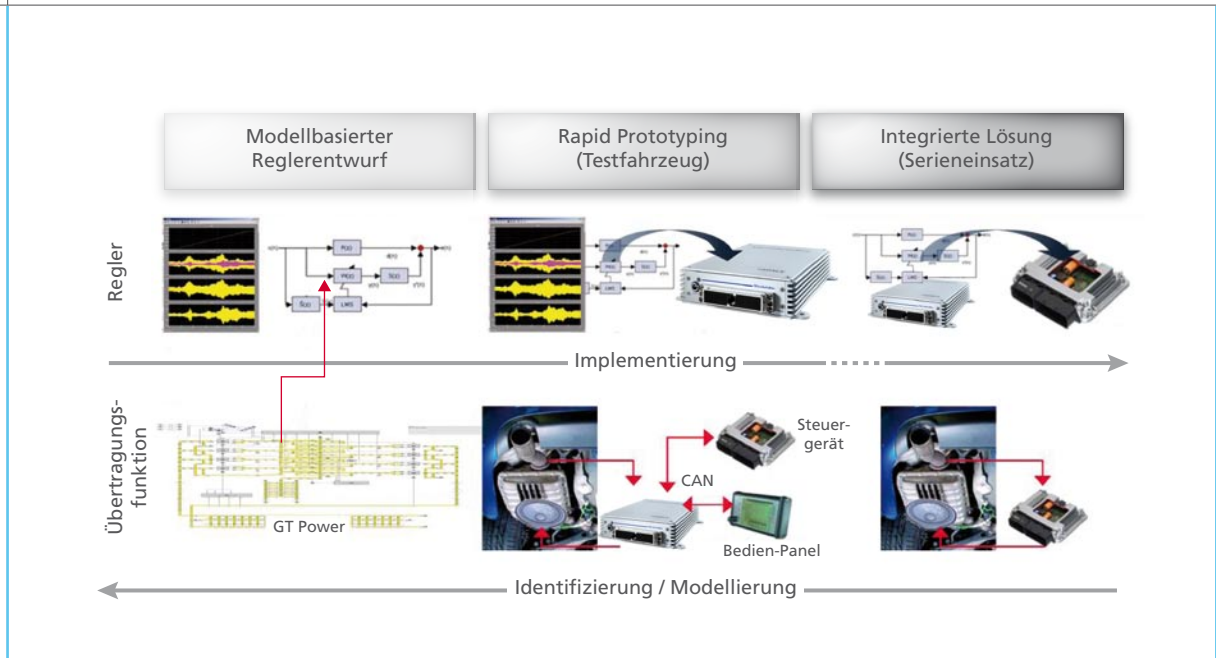


Abbildung 4: Der Entwicklungsprozess – von der modellbasierten Entwicklung zur integrierbaren Regelung.

Grundlage früherer analytischer Ergebnisse untersuchen wir die Eigenschaften des Gesamtsystems und optimieren die Gesamtleistung. Das dynamische Verhalten des Systems und insbesondere der Einfluss auf die Kriterien für die Übertragungsfunktion werden im Detail betrachtet. Die MicroAutoBox ebnet uns somit den Weg, eine kostengünstige integrierte Lösung zu entwickeln und zu verfeinern.

Aufbau des Testfahrzeugs

Das ANC-System bauten wir u.a. in der Abgasanlage eines 4-Zylinder-

Benzinmotors ein. Da der Direkteinspritzer serienmäßig mit einem doppel-flutigen Abgassystem ausgestattet ist, wurden zwei aktive Schalldämpfer eingesetzt, um die konventionellen Nachschalldämpfer zu ersetzen. Der aktive Schalldämpfer enthält ein Mikrofon und speziell entwickelte Lautsprecher, die den hohen Temperaturen standhalten und eine hohe Leistung abstrahlen können. Alle übrigen Abgassystemelemente wie der Katalysator bleiben unverändert. Neben den konventionellen Dämpferkomponenten benötigt das Abgassystem weitere elektronische Komponenten. In diesem Projekt verwendeten wir Folgende:

- dSPACE MicroAutoBox für die Echtzeitverarbeitung des Algorithmus
- Verstärker, um den „löschenden“ Gegenschall-Lautsprecher mit etwa

- 40 W Maximalleistung zu steuern
- Bedienfeld im Fahrerraum, um vordefinierte Klangprofile einzustellen und den Status des Systems zu verfolgen
- Mikrofon-Vorverstärker, um das Restrauschen zurück an den Regler zu leiten

Ergebnisse

Bei mehr als 50.000 gefahrenen Kilometern innerhalb von 18 Monaten konnten wir das ANC-System in verschiedenen Fahrzeugen einbauen und testen. In allen Fällen stellten wir eine wesentliche Reduktion der Abgasgeräusche fest. Weiterhin ist nicht nur eine Reduzierung der Geräusche möglich, sondern auch eine Verbesserung des Klangs. Das ANC-System kann man demnach an das Fahrzeug, die Fahrsituation und auch den Fahrerwunsch anpassen.

Dr.-Ing. Jan Krüger: Programm-Manager ActiveSilence®-Technologie. Er promovierte 1999 zum Thema aktive Schalldämpfer und entwickelt seit 2000 bei Eberspächer die Akustik und den Sound von Abgasanlagen.



Über Eberspächer

Gründung	1865
Unternehmenssitz	Esslingen am Neckar
Mitarbeiter	5.575
Umsatz	2.239,9 Mio. € (2008)
Produkte	Abgastechnik: Katalysatoren, Rußfilter, Schalldämpfer Stand- und Zusatzheizungen für Pkw, Transporter, Lkw, Busse, Baufahrzeuge und Boote

Die akustische Leistungsfähigkeit des ANC-Systems wurde an einem Prüfstand bei voller Beschleunigung (Wide Open Throttle, WOT) im dritten Gang überprüft. Den Regler stellten wir so ein, dass er die dominierenden Motorordnungen 2, 4 und 6 dämpft. Die Abgasgeräusche wurden 0,5 m entfernt gemessen, mit einem 45°-Winkel zur Öffnung des Auspuffendrohrs.

Bei ausgeschaltetem ANC-System ist der Geräuschpegel etwa 5 dB(A) höher als beim Seriensystem, da die ursprüngliche passive Geräuschdämmung nicht mehr vorhanden ist. Mit eingeschaltetem ANC-System jedoch konnten wir eine signifikante Reduzierung um 2 bis 8 dB(A) im Vergleich zum Seriensystem messen. Damit erzielten wir eine Verbesserung des Lärmpegels über fast den gesamten Drehzahlbereich. Die gleichen Mes-

sungen wurden für die 2. Motorordnung durchgeführt. Hier konnte der positive Effekt durch das ANC-System deutlicher abgelesen werden. Bei einer Drehzahl von 1200 Umdrehungen pro Minute (40 Hz) setzte die Minderung ein und in einem weiten Bereich wurde der Lärm um 10 bis 20 dB gemindert. Auch bei anderen Motorordnungen wurde der Lärmpegel wesentlich reduziert, so dass die Abgasgeräusche praktisch keinen Einfluss mehr auf den Lärmpegel im Innenraum hatten.

Wir konnten zeigen, dass ein akustischer Komfort – speziell in unserem Demo-Fahrzeug – erreicht werden kann, der sonst nur aus Luxuslimousinen bekannt ist. ■

*Dr.-Ing. Jan Krüger
J. Eberspächer GmbH & Co. KG
Esslingen
Deutschland*

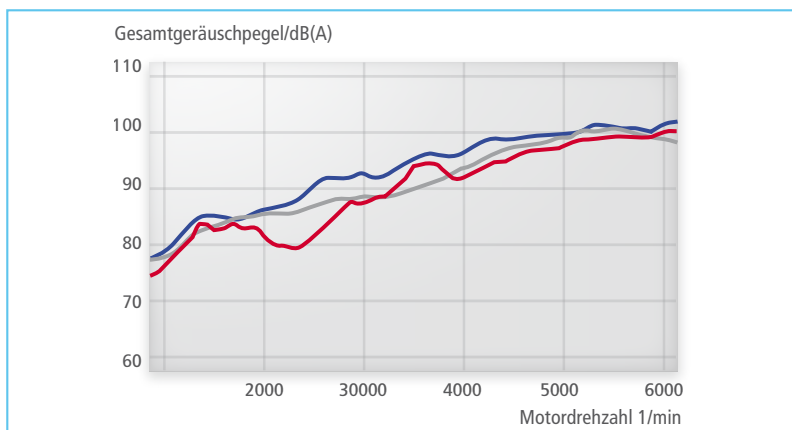


Abbildung 5: Gesamtgeräuschpegel bei einem 4-Zylinder-Benzinmotor (grau = Seriensystem, blau = ausgeschaltetes ANC-System, rot = eingeschaltetes ANC-System).

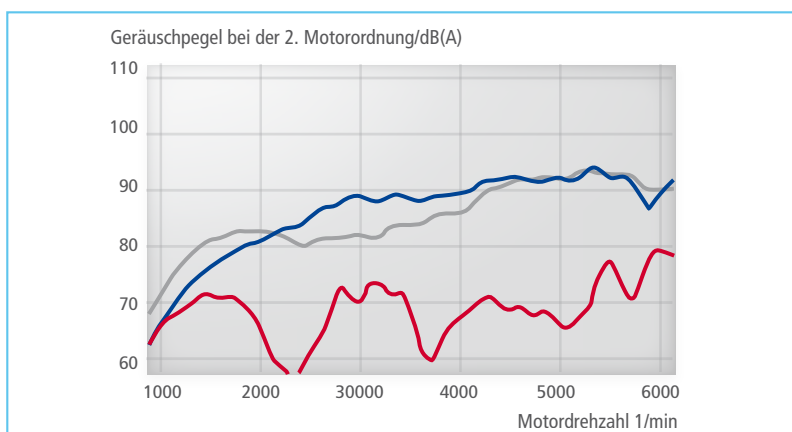


Abbildung 6: Geräuschpegel der 2. Motorordnung bei einem 4-Zylinder-Benzinmotor (grau = Seriensystem, blau = ausgeschaltetes ANC-System, rot = eingeschaltetes ANC-System).

Fazit

Wir konnten das ANC-System als ActiveSilence®-System erfolgreich vom Labor auf die Straße bringen. Auch unter widrigen Umständen funktionierte es gut. Alle funktionalen Vorteile wie Verminderung von Lärm, Dämpfervolumen und Abgas-Gegendruck wurden bestätigt. Als nächstes werden wir uns um die Reduzierung der Systemkosten kümmern. Denn dieses System wird nur zum Serieneinsatz kommen, wenn die zusätzlichen Kosten für Lautsprecher, Regler-Hardware und -Software durch entweder mehr Funktionalitäten oder anderen Mehrwert für den Kunden kompensiert werden können.

Glossar

Geräusch – Geräusche sind Schwingungsvorgänge, die sich aus einer zeitlich ändernden Grundfrequenz und deren Oberwellen zusammensetzen. Die Oberwellen bestimmen den charakteristischen Höreindruck eines Geräusches.

Motorordnungen – Die Motorordnung gibt eine Frequenz (Oberwelle) aus dem Frequenzspektrum des Motors an, die ein Vielfaches der Motordrehzahl ist. Zum Beispiel ist die 2. Motorordnung diejenige Oberwelle, die der doppelten Motordrehzahl entspricht.

